



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

POSGRADO EN CIENCIAS DE LA TIERRA

INSTITUTO DE GEOLOGÍA

**CARACTERIZACIÓN MINERALÓGICA E INCLUSIONES FLUIDAS DEL
PROYECTO EL ÁGUILA, DISTRITO TLACOLULA, OAXACA**

TESIS

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:

**MAESTRO EN CIENCIAS DE LA TIERRA
(PETROLOGÍA Y GEOQUÍMICA)**

PRESENTA:

MIGUEL ANGEL CABRERA ROA

TUTOR:

Dr. Antoni Camprubí i Cano (Instituto de Geología, UNAM)

JURADO EXAMINADOR:

Dr. Antoni Camprubí i Cano (Instituto de Geología, UNAM)

Dra. Vanessa Colás Ginés (Instituto de Geología, UNAM)

Dr. Eduardo González Partida (Centro de Geociencias, UNAM)

Dr. Lisard Torró i Abat (Pontificia Universidad Católica del Perú)

Dr. Rafael del Río Salas (Estación Regional Noroeste, UNAM)

CIUDAD DE MÉXICO, DICIEMBRE, 2019



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL


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

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

DECLARATORIA

Declaro conocer el Código de Ética de la Universidad Nacional Autónoma de México, plasmado en la Legislación Universitaria. Con base en las definiciones de integridad y honestidad ahí especificadas, aseguro mediante mi firma al calce que el presente trabajo es original y enteramente de mi autoría.

Todas las citas de, o referencias a, la obra de otros autores aparece debida y adecuadamente señaladas, así como acreditadas mediante los recursos editoriales convencionales.



Miguel Angel Cabrera Roa
Diciembre 2019

AGRADECIMIENTOS

Agradezco al Posgrado en Ciencias de la Tierra y en especial al Instituto de Geología por dejarme realizar mis estudios de posgrado en las instalaciones y formar parte de la gran familia UNAM.

Agradezco al Concejo Nacional de Ciencias y Tecnología (CONACyT) por la beca otorgada para realizar los estudios de la Maestría.

Gracias al proyecto "CONACyT 155662" a cargo del Dr. Antoni Camprubí, que financió los análisis de microsonda electrónica, isótopos estables, láminas delgadas y trabajos de campo que se realizaron en el presente trabajo.

Agradezco al proyecto de infraestructura CONACyT 2014-225845 por el apoyo de la toma de fotomicrografías.

Agradezco al Vice Presidente de Exploración Barry D. Devlin del Gold Resource Corporation y a la gerencia de Don David Gold en especial al Mtro. Guillermo Hernández, Ing. Lorenzo Rivera, Ing. Julio Flores, Ing. Cesar Campos y al personal del muestreo por el apoyo en la alimentación, hospedaje, información técnica, movilización en el reconocimiento del proyecto.

Al Dr. Antoni Camprubí, mi tutor y profesor, por su tiempo, paciencia, sugerencia y su participación para realizar este trabajo hasta su culminación.

Agradezco al jurado evaluador formado por: Dr. Eduardo González Partida, Dra. Vanessa Colás Ginés, Dr. Lisard Torró i Abat y Dr. Rafael del Río Salas por su revisión y valiosos comentarios para culminar este trabajo.

Agradezco al Dr. Augusto Antonio Rodríguez Díaz del instituto de Geofísica por sus sugerencias y apoyo en el uso del equipo de SEM.

A la M. en C. Edith Fuentes Guzmán, laboratorio de Catodoluminiscencia e Inclusiones Fluidas del Departamento de Procesos Litosféricos del Instituto de Geología, Laboratorio Nacional de Geoquímica y Mineralogía-LANGEM de la UNAM, por el uso de sus instalaciones, equipos y materiales.

Agradezco a la Dra. Vanessa Colás Ginés por su apoyo en campo, laboratorio y sugerencia para realizar este trabajo.

Gracias a Juan Tomás Vázquez Ramírez del taller de laminación del Centro de Geociencias por la capacitación en los procedimientos para realizar las láminas doblemente pulidas. A Joaquín Aparicio del taller de laminación del Instituto de Geología por el asesoramiento en corte de muestras y el desbastado de las muestras para láminas.

Agradezco el apoyo del Dr. Fernando Núñez Useche el uso del laboratorio de microscopios Francisco Fabregat. También a la Ing. María del Consuelo Macías Romo por su apoyo en el uso del microscopio de Separación de Minerales II, a ambos por su disposición y gentileza.

Agradezco el apoyo de la Dra. Elisa Fitz Díaz en el uso del laboratorio de arcillas para la preparación de las muestras de isótopos estables e inclusiones fluidas.

Gracias al Dr. Kenneth Domanik de la Universidad de Arizona por el asesoramiento y capacitación del uso del microscopio electrónico, y la obtención de los resultados químicos.

Gracias al Ing. Carlos Linares López del Laboratorio Universitario de Petrología del LANGEM del Instituto de Geofísica por el apoyo con los análisis de microsonda para la química mineral.

Agradezco a la Dra. Pura Alfonso de la Universidad de Barcelona, por el apoyo en la obtención de los análisis de isótopos de azufre.

Agradezco el apoyo de la M. en C. Edith Cienfuegos Alvarado y del M. en C. Francisco Javier Otero Trujano del Laboratorio de Isótopos Estables, del LANGEM del Instituto de Geología en la obtención de los análisis de los isótopos de oxígeno y carbono.

Agradezco a las secretarías María Luisa Reyes del Instituto de Geología y a la Sra. Araceli Chaman de la unidad de Posgrado en Ciencias de la Tierra por su el apoyo en los tramites de documentación durante mi estancia en el Posgrado.

DEDICATORIA

A mis querido padres Demetrio Cabrera y Filomena Roa por su apoyo incondicional durante todo el proceso que duro la maestría. Los quiero muchísimo.

A mis queridos hermanos Humberto, Soledad y Sócrates por su constante sugerencias y apoyo moral para concluir la tesis. Los quiero muchísimo.

A mis queridos tíos Marcelino, Fabiana y familiares por sus palabras de ánimo en los momentos difíciles. Les estimo muchísimo.

A mis compañeros de posgrado y amigos que me han acompañado en todo momento; Edith Fuentes, Lizbeth Landa, Athziri Hernández, Brenda de la Torre, Isela Martínez, Argelia Silva, Silja Austria, Paola Hernández, José Hernández, Carlos Jaramillo, Daniel Ruiz y Isaac Bautista, gracias por su compañía, palabras de aliento, consejos, muchas gracias por brindarme su amistad.

RESUMEN

El proyecto El Águila se localiza en el extremo sur de la provincia fisiográfica de la Sierra Madre del Sur, al sureste de la ciudad de Oaxaca, en el terreno Cuicateco. El Águila está hospedado en la provincia volcánica del Mioceno, constituida de una secuencia de tobas riolíticas a andesíticas, ignimbritas y aglomerados volcánicos, intrusivos dioríticos y diques de pórfidos riolíticos. Éste y otros yacimientos constituyen una provincia metalogenética del Mioceno que abarca la mayor parte del estado de Oaxaca, y tiene su origen en el vulcanismo terminal de la Sierra Madre del Sur. El Águila consta de las zonas mineralizadas de Arista, Altagracia, Margarita, El Chacal y el tajo Águila de los cuales solo se realizó estudios geológicos de Arista y Altagracia. Arista es un depósito epitermal de sulfuración intermedia que se caracteriza por tener cuarzo en texturas coloformes, crustiformes y brechas. En esta zona se tiene registrado treinta y nueve vetas, se restringió a solo dos vetas Splay 5 y Splay 66 para obtener la información geológica. Estas dos vetas presenta siete etapas principales de mineralización, de las cuales las cuatro primeras tienen relevancia económica. La mineralización metálica está conformada mayoritariamente por pirita, esfalerita, galena, calcopirita, sulfosales de plata y cobre, miargirita y *electrum*. Altagracia es un depósito epitermal de sulfuración intermedia constituido por cuarzo con textura masivas y coloformes. De las cinco vetas registradas solo se estudió la veta El Huaje que tiene cinco etapas de mineralización, de las cuales la segunda es la que contiene la mena metálica. La mineralización metálica está conformada mayoritariamente por pirita, esfalerita, galena, calcopirita, proustita-pirargirita y argentita.

Se ha determinado la composición química, mediante microsonda electrónica de los minerales de mena tales como: esfalerita, *electrum*, miargirita, proustita-pirargirita, tetraedrita-tennantita y arsenopirita, en ambas zonas mineralizadas. En Arista, la esfalerita tiene un valor máximo de fracción molar de FeS de 0.03; el valor de $Ag/(Ag+Au)$ en *electrum* varía entre 0.50 y 0.78 (molar); el valor de $As/(As+Sb)$ en miargirita tiene un promedio de 0.19; los valores de $Ag/(Ag+Cu)$ y $Ag/(As+Sb)$ en proustita-pirargirita se encuentran en los rangos de 0.94 a 1 y de 0 a 0.95 (molar), respectivamente; los valores de $Ag/(Ag+Cu)$, $Zn/(Zn+Fe)$ y $As/(As+Sb)$ en tetraedrita-tennantita se encuentran en los rangos de 0 a 0.57, 0 a 0.98 y 0 a 1 (molar), respectivamente; la composición de la arsenopirita tiene entre 27.6 y 33.2 %at. de As. En Altagracia, la esfalerita tiene un valor de fracción molar máximo de FeS de 0.02; los valores de $Ag/(Ag+Cu)$ y $As/(As+Sb)$ en proustita-pirargirita se encuentran en rangos de 0.99 a 1.00 y de 0.12 a 0.65 (molar), respectivamente.

Los datos microtermométricos de inclusiones fluidas (IF) para las zonas Arista y Altagracia varían de acuerdo a las etapas de mineralización. En Arista la temperatura de homogenización (Th) y salinidad de las vetas Splay 5 y Splay 66 se encuentran en los siguientes rangos: en la etapa II la Th varía entre 179.1 y 254.8 °C con salinidades entre 5.7 y 11.5 % en peso de NaCl equiv.; en la etapa IIIB la Th varía entre 186.3 y 272.3 °C y la salinidad entre 5.1 y 15 % en peso de NaCl equiv.; en la etapa IIIC la Th varía entre 174.3 y 288.1 °C la salinidad entre 4.5 y 12 % en peso de NaCl equiv.; en la etapa IV la Th varía entre 199.7 a 269.7 °C y la salinidad entre 4.5 y 10.7 % en peso de NaCl equiv.; en la etapa VI la Th varía entre 227.4 y 291 °C la salinidad entre 4.6 y 10.5 % en peso de NaCl equiv. En Altagracia la Th y salinidad de la veta El Huaje varían de la siguiente manera: en la etapa I la Th varía entre 200.1 a 262.4 °C y la salinidad entre 2.2 a 4 % en peso de NaCl equiv.; en la etapa II la Th varía entre 174.1 y 244.7 °C y salinidad entre 0.5 a 5.9 % en peso de NaCl equiv.; en la etapa III la Th varía entre 177 y 208.7 °C y la salinidad entre 0.5 y 4.3 % en peso de NaCl equiv.; en la etapa V la Th varía entre 213.7 y 247.8 °C y la salinidad entre 1.9 y 3.4 % en peso de NaCl equiv.

La composición isotópica de oxígeno ($\delta^{18}O_{VSMOW}$) y carbono ($\delta^{13}C_{VPDB}$) en calcita de vetas relacionadas a los cuerpos mineralizados para las zonas mineralizadas varían en los siguientes rangos: en Arista los valores el $\delta^{18}O_{VSMOW}$ varían entre 5.1 y 12.6 ‰ y los de $\delta^{13}C_{VPDB}$ entre -1.2

y -4.9 ‰; en Altagracia los valores de $\delta^{18}\text{O}_{VSMOW}$ varían entre 5.8 y 8.6 ‰ y los de $\delta^{13}\text{C}_{VPDB}$ entre -2.0 y -3.8 ‰. La composición isotópica de azufre ($\delta^{34}\text{S}_{VCDT}$) en sulfuros varía del siguiente modo: en Arista se presentan valores de entre -3.11 y 2.74 ‰ en la etapa II, entre -4.39 y -0.09 ‰ en la etapa IIIB y entre -3.52 y 1.35 ‰ en la etapa I, mientras que en Altagracia varían entre -2.75 y 2.05 ‰ en la etapa II.

Los fluidos mineralizantes en Arista son probablemente el resultado de mezclas de fluidos de diverso origen, incluyendo fluidos magmáticos, metamórficos, meteóricos o marinos. El azufre de los sulfuros procede plausiblemente de fuentes magmáticas y sedimentarias / metasedimentarias. En la etapa I la arsenopirita cristalizó a 312 °C de temperatura. En la etapa II la cristalización de la esfalerita se produjo entre 179.1 y 254.8 °C de temperatura de homogenización (Th), la tetraedrita-tennantita entre 170 y 250 °C y el *electrum* a 160 °C de temperatura. La precipitación de sulfuros se desarrolló mediante una ebullición (Splay 5) y enfriamiento conductivo (Splay 66). En la etapa IIIB la arsenopirita cristalizó a 432 °C de temperatura, la esfalerita entre 186.3 y 272.3 °C de Th, la tetraedrita-tennantita entre 200 y 250 °C de temperatura, estos minerales precipitaron mediante enfriamiento conductivo (Splay 5) y ebullición (Splay 66). En la etapa IIIC la esfalerita precipitó entre 174.3 y 288.1 °C de Th, mientras la tetraedrita-tennantita entre 170 y 200 °C de temperatura. La precipitación de los sulfuros es el resultado de un enfriamiento conductivo (Splay 5 y Splay 66). Durante la etapa IV, los sulfuros cristalizaron mediante ebullición (Splay 5) en donde la arsenopirita presenta temperatura de formación de 405 °C, el cuarzo entre 199.7 y 269.7 °C de Th, la esfalerita 230.3 y 232 °C de Th, la miargirita de 250 °C, la tetraedrita-tennantita entre 170 y 250 °C y el *electrum* a 220 °C de temperatura de formación.

Los fluidos mineralizantes en Altagracia tienen una composición isotópica de oxígeno y carbono cercana a los fluidos de naturaleza magmática. El azufre en la mineralización proviene de fuentes magmáticas y metasedimentarias. Además, se hallaron asociaciones mineralógicas de caolinita-esmectita-montmorillonita e illita-esmectita, cuya disposición espacial puede constituir una evidencia indirecta de ambientes de aguas calentadas por vapor. Ello, a su vez, sugiere la existencia de una ebullición generalizada en el ambiente epitermal, aún en ausencia de otras evidencias de dicho proceso. Por ello, no se puede descartar que dicho mecanismo haya sido el responsable de la precipitación mineral en el yacimiento. En la etapa I el cuarzo cristalizó entre 200.1 y 262.4 °C de Th y el cuarzo de la etapa II entre 174.1 y 244.7 °C de Th, indicando que en ambas etapas su precipitación se produjo mediante enfriamiento conductivo; el cuarzo amatista de la etapa III cristalizó entre 177 y 208.7 °C de Th y la calcita de la etapa V precipitó entre 213.7 y 247.8 °C de Th, mientras que la formación de las etapas III y V se produjo probablemente mediante mezclas isotérmicas.

ABSTRACT

The El Aguila project is located at the southern end of the physiographic province of the Sierra Madre del Sur, southeast of the city of Oaxaca, on the Cuicateco terrane. El Aguila is hosted in the Miocene volcanic province, consisting of a sequence of rhyolitic to andesitic tuffs, ignimbrites and volcanic agglomerates, intrusive dioritic and rhyolitic porphyry dikes. This and other deposits constitute a metallogenetic province of the Miocene that covers most of the state of Oaxaca and has its origin in the terminal volcanism of the Sierra Madre del Sur. El Aguila consists of the mineralized areas of Arista, Altagracia, Margarita, El Chacal and the Aguila pit, of which only geological studies of Arista and Altagracia were carried out. Arista is an intermediate sulfidation epithermal deposit that is characterized by having quartz in colloform, crustiform, and breccia textures. Thirty-nine veins are registered in this area, restricted to only two veins Splay 5 and Splay 66 to obtain geological information. These two veins have seven main stages of mineralization, of which the first four have economic relevance. The metal mineralization is mostly made up of pyrite, sphalerite, galena, chalcopryite, silver and copper sulfosalt, miargyrite and electrum. Altagracia is an intermediate sulfidation epithermal deposit consisting of massive and colloform textured quartz. Of the five recorded veins, only the El Huaje vein was studied, which has five stages of mineralization, of which the second is the one containing the metal ore. The metal mineralization is mostly made up of pyrite, sphalerite, galena, chalcopryite, proustite-pyrargyrite, and argentite.

The chemical composition has been determined, using an Electron microprobe of ore such as sphalerite, electrum, miargyrite, proustite-pyrargyrite, tetrahedrite-tennantite and arsenopyrite, in both mineralized areas. In Arista, sphalerite has a maximum mole fraction value of FeS of 0.03; the value of Ag/(Ag+Au) in electrum range between 0.50 and 0.78 (molar); the value of As/(As+Sb) in miargyrite has an average of 0.19; the values of Ag/(Ag+Cu) and Ag/(As+Sb) in proustite-pyrargyrite are in the ranges of 0.94 to 1 and 0 to 0.95 (molar), respectively; the values of Ag/(Ag+Cu), Zn/(Zn+Fe) and As/(As+Sb) in tetrahedrite-tennantite are in the ranges of 0 to 0.57, 0 to 0.98 and 0 to 1 (molar), respectively; The composition of arsenopyrite has between 27.6 and 33.2% at. of As. In Altagracia, sphalerite has a maximum mole fraction value of FeS of 0.02; the values of Ag/(Ag+Cu) and As/(As+Sb) in proustite-pyrargyrite are in the ranges of 0.99 to 1.00 and 0.12 to 0.65 (molar), respectively.

The microthermometric data of fluid inclusions (IF) for the Arista and Altagracia areas vary according to the stages of mineralization. In Arista the homogenization temperature (Th) and salinity of the Splay 5 and Splay 66 veins are in the following ranges: in stage II the Th varies between 179.1 and 254.8 °C with salinities between 5.7 and 11.5 wt.% NaCl equiv.; in stage IIIB the Th varies between 186.3 and 272.3 °C and the salinity between 5.1 and 15 wt.% NaCl equiv.; in stage IIIC the Th varies between 174.3 and 288.1 °C salinity between 4.5 and 12 wt.% NaCl equiv.; in stage IV the Th varies between 199.7 to 269.7 °C and the salinity between 4.5 and 10.7 wt.% NaCl equiv.; in stage VI the Th varies between 227.4 and 291 °C salinity between 4.6 and 10.5 wt.% NaCl equiv. In Altagracia the Th and salinity of the El Huaje vein vary as follows: in stage I the Th varies between 200.1 to 262.4 °C and the salinity between 2.2 to 4 wt.% NaCl equiv.; in stage II the Th varies between 174.1 and 244.7 °C and salinity between 0.5 to 5.9 wt.% NaCl equiv.; in stage III the Th varies between 177 and 208.7 °C and the salinity between 0.5 and 4.3 wt.% NaCl equiv.; in stage V the Th varies between 213.7 and 247.8 °C and the salinity between 1.9 and 3.4 wt.% NaCl equiv.

The isotopic composition of oxygen ($\delta^{18}\text{O}_{VSMOW}$) and carbon ($\delta^{13}\text{C}_{VPDB}$) in calcite of veins related to mineralized bodies for mineralized areas vary in the following ranges: in Arista the values $\delta^{18}\text{O}_{VSMOW}$ vary between 5.1 and 12.6 ‰ and those of $\delta^{13}\text{C}_{VPDB}$ between -1.2 and -4.9 ‰; In Altagracia the values of $\delta^{18}\text{O}_{VSMOW}$ vary between 5.8 and 8.6 ‰ and those of $\delta^{13}\text{C}_{VPDB}$ between -

2.0 and -3.8 ‰. The isotopic composition of sulfur ($\delta^{34}\text{S}_{VCDT}$) in sulfides varies as follows: in Arista values between -3.11 and 2.74 ‰ are presented in stage II, between -4.39 and -0.09 ‰ in stage IIIB and between -3.52 and 1.35 ‰ in stage I, while in Altagracia they vary between -2.75 and 2.05 ‰ in stage II.

Mineralizing fluids in Arista are probably the result of mixtures of fluids of diverse origin, including magmatic, metamorphic, meteoric or marine fluids. Sulfur of sulfide comes plausibly from magmatic and sedimentary / metasedimentary sources. In stage I arsenopyrite crystallized at 312 °C temperature. In stage II crystallization of sphalerite occurred between 179.1 and 254.8 °C homogenization temperature (Th), tetrahedrite-tennantite between 170 and 250 °C and the electrum at 160 °C temperature. Sulfide precipitation was developed by boiling (Splay 5) and conductive cooling (Splay 66). In stage IIIB arsenopyrite crystallized at 432 °C temperature, sphalerite between 186.3 and 272.3 °C of Th, tetrahedrite-tennantite between 200 and 250 °C temperature, these minerals precipitated by conductive cooling (Splay 5) and boiling (Splay 66). In stage IIIC, sphalerite precipitated between 174.3 and 288.1 °C of Th, while tetrahedrite-tennantite between 170 and 200 °C temperature. Sulfide precipitation is the result of conductive cooling (Splay 5 and Splay 66). During stage IV, the sulfides crystallized by boiling (Splay 5) where the arsenopyrite has a formation temperature of 405 °C, the quartz between 199.7 and 269.7 °C of Th, the sphalerite 230.3 and 232 °C of Th, the 250 °C miargyrite, the tetrahedrite-tennantite between 170 and 250 °C and the electrum at 220 °C formation temperature.

Mineralizing fluids in Altagracia have an isotopic composition of oxygen and carbon close to fluids of a magmatic nature. Sulfur in mineralization comes from magmatic and metasedimentary sources. In addition, mineralogical associations of kaolinite-smectite-montmorillonite and illite-smectite were found, whose spatial arrangement may constitute indirect evidence of steam-heated water environments. This, in turn, suggests the existence of a generalized boil in the epithermal environment, even in the absence of other evidence of this process. Therefore, it cannot be ruled out that said mechanism was responsible for the mineral precipitation at the site. In stage I, the quartz crystallized between 200.1 and 262.4 °C of Th and the quartz of stage II between 174.1 and 244.7 °C of Th, indicating that in both stages its precipitation was produced by conductive cooling; the amethyst quartz of stage III crystallized between 177 and 208.7 °C of Th and the calcite of stage V precipitated between 213.7 and 247.8 °C of Th, while the formation of stages III and V probably occurred by isothermal mixtures.

ÍNDICE

RESUMEN	I
ABSTRACT	III
ÍNDICE	V
ÍNDICE DE FIGURAS	VIII
ÍNDICE DE TABLAS	XI
CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN	1
1.1. Planteamiento del problema	1
1.2. Objetivos	1
1.2.1. Objetivo general	1
1.2.2. Objetivo específicos	1
1.3. Localización y acceso	2
CAPÍTULO 2: MARCO GEOLÓGICO	3
2.1. Geología regional	3
2.1.1. Litoestratigrafía del Mesozoico y Cenozoico	3
2.1.1.1. Mesozoico	3
2.1.1.2. Cenozoico	4
Rocas ígneas extrusivas	6
2.2. Geología estructural	7
2.3. Geología local	7
2.4. Depósitos minerales en Oaxaca	11
2.4.1. Depósitos minerales del Eoceno – Oligoceno	11
2.4.2. Depósitos minerales del Mioceno	13
CAPÍTULO 3: METODOLOGÍA	14
3.1. Trabajo de campo	14
3.2. Petrografía de la mineralización	15
3.3. Microscopía Electrónica de Barrido (SEM) y Microsonda Electrónica (EMPA)	15
3.4. Petrografía y microtermometría de inclusiones fluidas	16
3.5. Geoquímica de isótopos estables	17
3.5.1. Análisis de la composición isotópica del azufre en sulfuros.	17
3.5.2. Análisis de la composición isotópica de oxígeno y carbono en carbonatos.	18
CAPÍTULO 4: MINERALOGÍA Y QUÍMICA MINERAL DE LAS ZONAS MINERALIZADAS ARISTA Y ALTAGRACIA	19
4.1. Estratigrafía de veta y estructura interna	19
4.1.1. Estratigrafía de la zona mineralizada Arista	20
Etapa I	22
Etapa II	23
Etapa III	23
Etapa IIIA	23
Etapa IIIB	23
Etapa IIIC	25
Etapa IV	25
Etapa V	25
Etapa VI	25
Etapa VII	25
4.1.2. Estratigrafía de la zona mineralizada Altagracia	26
Etapa I	26

Etapa II	27
Etapa III	28
Etapa IV	29
Etapa V	29
4.2. Mineralogía	29
4.2.1. Zona mineralizada Arista	29
Etapa I	29
Etapa II	32
Etapa III	34
Etapa IIIA	34
Etapa IIIB	35
Etapa IIIC	37
Etapa IV	39
Etapa V	40
4.2.2. Zona mineralizada Altagracia	43
Etapa II	43
4.3. Geoquímica mineral	46
4.3.1. Zona mineralizada Arista	46
Esfalerita	46
Electrum	47
Miargirita	47
Proustita-Pirargirita	48
Tetraedrita-Tennantita	48
Arsenopirita	51
4.3.2. Zona mineralizada Altagracia	52
Esfalerita	52
Proustita-Pirargirita	52
4.4. Condiciones fisicoquímicas de depósito mineral	53
Arsenopirita	53
Esfalerita	53
Miargirita	55
Tetraedrita-tennantita (Tr)	55
CAPÍTULO 5: PETROGRAFÍA Y MICROTERMOMETRÍA DE INCLUSIONES FLUIDAS	58
5.1. Petrografía de inclusiones fluidas	58
5.1.1. Zona mineralizada Arista	58
5.1.2. Zona mineralizada Altagracia	58
5.2. Microtermometría de inclusiones fluidas	61
5.2.1. Zona mineralizada Arista	61
Etapa II	61
Etapa IIIB	61
Etapa IIIC	63
Etapa IV	63
Etapa VI	63
5.2.2. Zona mineralizada Altagracia	64
Etapa I	64
Etapa II	65
Etapa III	65
Etapa V	65

CAPÍTULO 6: ISÓTOPOS ESTABLES	68
6.1. Generalidades de los isótopos	68
6.2. Isótopos estables de O, C y S	68
6.2.1. Oxígeno (O)	69
6.2.2. Carbono (C)	70
6.2.3. Azufre (S)	71
6.3. Resultados de los análisis isotópicos para el estudio, y su interpretación	71
6.3.1. Isótopos de oxígeno y carbono	72
6.3.2. Isótopo de azufre	74
CAPÍTULO 7: DISCUSIÓN	78
CAPÍTULO 6: CONCLUSIONES	88
REFERENCIA BIBLIOGRÁFICAS	90
ANEXO A: Muestras de mano y núcleos de barreno.	100
ANEXO B: Fotomicrografía de láminas delgadas.	105
ANEXO C: Análisis de microsonda electrónica.	119
ANEXO D: Coordenadas de las muestras Arista y Altagracia.	133

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Ubicación geográfica del proyecto El Águila. -----	2
Figura 2. Mapa geológico regional. -----	4
Figura 3. Columna estratigráfica regional. -----	5
Figura 4. Mapa geológico local del proyecto El Águila. -----	8
Figura 5. Sección geológica A-A' elaborada a partir de la cartografía geológica y edades isotópicas -----	8
Figura 6. Columna estratigráfica local. -----	9
Figura 7. Distribución del magmatismo de la Sierra Madre Sur en Oaxaca. -----	11
Figura 8. Franja volcánica del Eoceno-Oligoceno y la distribución de los depósitos minerales. -- -----	12
Figura 9. Distribución de depósitos minerales y edades isotópicas relacionados con el vulcanismo Mioceno. -----	13
Figura 10. A) Almacén de núcleos de barrenos de la empresa Don David Resource Gold. B) Obra minera nivel 20, veta Splay 5. -----	14
Figura 11. Microscopio Olympus BX60. -----	15
Figura 12. Microsonda electrónica CAMECA SX100 Ultra localizada en el Laboratorio de Microsonda Electrónica de la Universidad de Arizona, USA. -----	16
Figura 13. A) Equipo VibroMet localizada en el Laboratorio de Arcillas del instituto de Geología de la UNAM y B) Molde de muestra con pesas sobre la bandeja de VibroMet para el estudio de inclusiones fluidas. -----	16
Figura 14. A) Microscopio binocular (ZEISS Stemi 508) del laboratorio de Arcillas (IGL, UNAM). B) Granos de proustita-pirargirita, aumento 5X. -----	17
Figura 15. Mapa geológico de la zona mineralizada de Arista y sección longitudinal del muestreo.-- -----	19
Figura 16. Mapa geológico de la zona mineralizada de Altagracia y sección longitudinal del muestreo. -----	20
Figura 17. Esquema estratigráfico de las vetas en la zona mineralizada de Arista. -----	21
Figura 18. Esquema de eventos hidrotermales en la zona mineralizada de Arista. -----	22
Figura 19. Fotografía de los contactos irregulares entre diferentes etapas de la Veta Splay 5.-----	24
Figura 20. Esquema estratigráfico de las vetas en la zona mineralizada de Altagracia. -----	26
Figura 21. Esquema de eventos hidrotermales en la zona mineralizada de Altagracia. -----	27
Figura 22. Fotografías de muestras de núcleo de barrenos y labor minera de la zona mineralizada de Altagracia. -----	28
Figura 23. Secuencia mineral para las etapas I y II en la zona mineralizada de Arista. -----	30
Figura 24. Fotomicrografía de la Veta Splay 5, Nivel 12, Etapa I (zona mineralizada de Arista).-----	31
Figura 25. Fotomicrografía de la Veta Splay 5, Nivel 12, Etapa II (zona mineralizada de Arista).-----	33

Figura 26. Secuencia mineral para la etapa III en la zona mineralizada de Arista. -----	35
Figura 27. Fotomicrografía de la Veta Splay 5, Nivel 14, Etapa IIIC (zona mineralizada de Arista).--	38
Figura 28. Secuencia mineral para las etapas IV y V en la zona mineralizada de Arista. -----	39
Figura 29. Fotomicrografía de la Veta Splay 5, Nivel 12, Etapa IV (zona mineralizada de Arista).---	41
Figura 30. Secuencia mineral para la etapa II de la zona mineralizada de Altagracia. -----	43
Figura 31. Fotomicrografía de la Veta El Huaje, Nivel 1620, Etapa II (zona mineralizada de Altagracia). -----	45
Figura 32. Variación composicional en el contenido en zinc, hierro y cadmio de la esfalerita.-----	46
Figura 33. Variación del contenido de FeS (%mol) en esfalerita con la profundidad para las etapas II, IIIB, IIIC y IV de la zona mineralizada de Arista -----	47
Figura 34. Histograma de composición de la serie proustita-pirargirita para las etapas I, II, IIIB y IV, de la zona mineralizada de Arista. -----	48
Figura 35. Distribución de los resultados del análisis de microsonda en una diagrama cúbico y planar para los cristales de tetraedrita-tennantita $(Cu, Ag)_{10}(Fe,Zn)_2(Sb,As)_4S_{13}$ de la etapa II en la zona mineralizada de Arista -----	49
Figura 36. Distribución de los resultados del análisis de microsonda en una diagrama cúbico y planar para los cristales de tetraedrita-tennantita $(Cu, Ag)_{10}(Fe,Zn)_2(Sb,As)_4S_{13}$ de la etapa IIIB en la zona mineralizada de Arista. -----	50
Figura 37. Distribución de los resultados del análisis de microsonda en una diagrama cúbico y planar para los cristales de tetraedrita-tennantita $(Cu,Ag)_{10}(Fe,Zn)_2(Sb,As)_4S_{13}$ de la etapa IIIC en la zona mineralizada de Arista. -----	50
Figura 38. Distribución de los resultados del análisis de microsonda en una diagrama cúbico y planar para los cristales de tetraedrita-tennantita $(Cu, Ag)_{10}(Fe,Zn)_2(Sb,As)_4S_{13}$ de la etapa IV en la zona mineralizada de Arista. -----	51
Figura 39. Variación del contenido de FeS en los cristales de esfalerita para la etapa II en la zona mineralizada de Altagracia. -----	52
Figura 40. Histograma de composición de la serie proustita-pirargirita para la etapa II en la zona mineralizada de Altagracia. -----	52
Figura 41. Composición de arsenopirita para las etapas I, IIIB y IV (zona mineralizada de Arista)---	53
Figura 42. Diagrama $\log(a_{S_2})$ versus $\log(a_{O_2})$ a 250°C. a 250 °C que muestran los campos de estabilidad de óxidos y sulfuros de hierro, donde se ha representado el máximo contenido de FeS en esfalerita para las etapas II, IIIB, IIIC y IV en la zona mineralizada de Arista -----	54
Figura 43. Diagrama Zn (% en peso) versus Fe (% en peso) en esfalerita de las zonas mineralizadas de Arista y Altagracia -----	54
Figura 44. Diagrama X_{As} (fracción molar de As) vs. temperatura (°C) que muestra la temperatura mínima de cristalización de miargirita en la etapa IV (veta Splay 5) de la zona mineralizada de Arista -----	55
Figura 45. Diagrama de $Ag/(Ag + Cu)$ versus $Zn/(Zn + Fe)$ en la serie tetraedrita-tennantita rica en Ag de la zona mineralizada de Arista -----	56

Figura 46. Diagrama de $Ag/(Ag + Cu)$ vs $As/(As + Sb)$ en tetraedrita-tennantita y <i>electrum</i> en las vetas Splay 5 y Splay 66 de la zona mineralizada de Arista	57
Figura 47. Fotomicrografía de la asociaciones de inclusiones fluidas en muestras de asociaciones minerales metálicas en la zona mineralizada Arista	59
Figura 48. Fotomicrografía de las asociaciones de inclusiones fluidas muestras de asociaciones minerales metálicas en la zona mineralizada Altagracia	60
Figura 49. Diagrama de la temperatura de homogenización (Th, °C) vs salinidad (% en peso de NaCl equiv.) que muestra la evolución del fluido en la zona mineralizada Arista.	62
Figura 50. Diagrama de temperatura de homogenización (Th) vs salinidad, que muestra la evolución del fluido en la zona mineralizada de Altagracia	64
Figura 51. Diagrama de profundidad (m) vs temperatura (°C) de los resultados de inclusiones fluidas de la zona mineralizada Arista y Altagracia.	66
Figura 52. Composición isotópica de $\delta^{18}O$ en diferentes reservorios naturales y en los carbonatos de las zonas mineralizadas Arista y Altagracia	73
Figura 53. Composición isotópica de $\delta^{13}C$ en diferentes reservorios naturales y en los carbonatos de las zonas mineralizadas de Arista y Altagracia.	73
Figura 54. Isótopos de azufre ($\delta^{34}S$) en la muestra con textura bandeada (EA006)	74
Figura 55. Histograma de frecuencia para los análisis de $\delta^{34}S_{VCDT}$ en sulfuros de las zonas mineralizadas Arista y Altagracia.	75
Figura 56. Composición isotópica de $\delta^{34}S$ en diferentes reservorios naturales y en los sulfuros de las zonas mineralizadas de Arista y Altagracia	76
Figura 57. Diagrama de evolución de los fluidos por etapas de mineralización y distribución del muestreo (círculos sólidos negros) en sección longitudinal de la zona mineralizada de Arista	80
Figura 58. Diagrama de evolución de los fluidos por etapas de mineralización y distribución del muestreo en una sección longitudinal de la zona mineralizada de Altagracia	82
Figura 59. Diagrama de $\log f(S_2)$ vs Temperatura en sulfuros de las zonas mineralizadas de Arista y Altagracia	82
Figura 60. Secciones geológicas representativas de las zonas mineralizadas de Arista y Altagracia	83
Figura 61. Fotomicrografía de la veta Splay 5, Etapa IV, en la zona mineralizada de Arista	87

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Estándares sintéticos que se utilizaron en el microanálisis. -----	15
Tabla 2. Valores estándares de $\delta^{34}\text{S}$ de las muestras de referencia con relación a Vienna-Canyon Diablo Troilite VCDT. -----	18
Tabla 3. Valores estándares de $\delta^{13}\text{C}$ de las muestras de referencia con relación a V-PDB (<i>Vienna Pee Dee Belemnite</i>). -----	18
Tabla 4. Valores estándares de $\delta^{18}\text{O}$ para diferentes minerales. -----	18
Tabla 5. Resultados de los datos microtermométricos de las inclusiones fluidas para el sistema mineralizado de Arista. -----	67
Tabla 6. Resultados de los datos microtermométricos de las inclusiones fluidas para el sistema mineralizado de Altagracia. -----	67
Tabla 7. Abundancia de los isótopos de oxígeno en la naturaleza. -----	69
Tabla 8. Abundancia de los isótopos de carbono en la naturaleza. -----	71
Tabla 9. Abundancia de los isótopos de azufre en la naturaleza. -----	71
Tabla 10. Resultado los análisis de isótopos de oxígeno y carbono en las zonas mineralizadas de Arista y Altagracia. -----	72
Tabla 11. Análisis de isótopos de azufre en los sulfuros de las zonas mineralizadas de Arista y Altagracia. -----	77

Caracterización mineralógica e inclusiones fluidas del proyecto "El Águila", Distrito Tlacolula, Oaxaca

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN

México posee una amplia variedad de depósitos minerales a lo largo de su territorio (epitermales, pórfidos, skarn sulfurados, MVT, VMS, SEDEX, IOCG, etc.). Prueba de ello es que ocupe el primer lugar como productor de plata a nivel mundial; la extracción de este metal es mayormente a partir de yacimientos epitermal. De acuerdo con el Servicio Geológico Mexicano (SGM) en Oaxaca la actividad minera inicio a principios de la década de 1880 en el distrito minero de Tlacolula con la producción de unas 300,000 onzas de oro y plata a partir de una veta la mina La Leona. Según el SGM en el 1892 se construyeron y operaron dos fundiciones (Magdalena Teitipac y O'Kelly) cerca al poblado Tlacolula para procesar los minerales de las minas Altagracia, La Soledad, San Ignacio, La Leona, La Victoria y San Rafael. Posteriormente, en 1911 el Sr. Sken Sanders llevo a cabo investigación sobre la región minera de Totolapam con especial interés la mina Margaritas. Los minerales de las minas Águila y Altagracia se extrajeron a pequeña escala (minería artesanal). No existe registro de producción histórica. En el año 2003 la empresa *Don David Gold S.A.* (DDG) filial de *Gold Resource Corporation* adquirió las concesiones de las minas Águila y Altagracia. La empresa DDG en la mina Águila ha producido 193,262 onzas de oro, 15'982,408 onzas de plata, 6,131 toneladas de cobre, 20,734 toneladas de plomo y 61,694 toneladas de zinc hasta el 2010 (Devlin, 2016).

El proyecto El Águila se encuentra en la parte sur de la provincia fisiográfica Sierra Madre del Sur. Litológicamente, se encuentra dentro de la franja volcánica del Mioceno, constituida por depósitos epiclásticos, volcanoclásticos y piroclásticos que están cubriendo las rocas sedimentarias del Mesozoico. A su vez, existen rocas intrusivas de composición riolítica la atraviesan las rocas del Mioceno y están relacionadas con la mineralización. El proyecto El Águila consta de las zonas mineralizadas de Arista, Altagracia, Margarita, El Chacal y el tajo Águila de los cuales solo se realizó estudios geológicos de Arista y Altagracia. En Arista, las vetas presentan textura crustiforme y coliforme (Dong *et al.*, 1995) con concentraciones de oro, plata, plomo, cobre y zinc, asociados con minerales de ganga como cuarzo lechoso, cuarzo hialino, calcedonia, amatista, calcita, ankerita, sericita, illita/esmectita; las estructuras presentan una orientación NW-SE y una inclinación hacia el NE. Así como, en Altagracia las vetas presentan una textura masiva con concentraciones de plata y cantidades menores de cobre, zinc y plomo, y están asociadas con minerales de ganga como cuarzo masivo, cuarzo lechoso, cuarzo hialino, amatista y calcita; las estructuras presentan una orientación de NE-SW con una inclinación hacia NW. Se realizaron los estudios de petrología, mineralogía, inclusiones fluidas, isótopos estables de azufre, oxígeno y carbono. Estos análisis arrojarán a la luz datos como las temperaturas de cristalización, la salinidad de los fluidos involucrados en estos procesos (Roedder, 1984), así como los mecanismos de precipitación mineral, pudiendo con ello iniciar la caracterización de la procedencia de los fluidos mineralizantes (Albinson *et al.*, 2001).

1.1. Planteamiento del problema

En las zonas mineralizadas de Arista y Altagracia no se han realizado hasta la fecha estudios muy detallados de petrografía, minerografía, eventos de mineralización, microtermometría de inclusiones fluidas e isótopos estables, por lo que es necesario llevar a cabo estudios de este tipo,

CAPÍTULO 2: MARCO GEOLÓGICO

2.1. Geología regional

La zona de estudio se encuentra dentro de la provincia volcánica de la Sierra Madre del Sur que se encuentra cubriendo a los materiales del terreno tectonoestratigráfico Juárez (Campa y Coney, 1983) o Cuicateco (Sedlock *et al.*, 1993).

La secuencia litoestratigráfica comprende desde el Cretácico inferior hasta el Holoceno, con secuencias de areniscas, carbonatos, conglomerados, tobas andesíticas, tobas riolíticas, conglomerados polimícticos, areniscas, travertinos y aluvión. También, afloran rocas intrusivas de composición cuarzo diorita, diorita y pórfido andesítico a riolítico.

2.1.1. Litoestratigrafía del Mesozoico y Cenozoico

Las secuencias sedimentarias del Mesozoico se acumularon en la cuenca Cuicateco, de edad Jurásico-Cretácico Superior (Sedlock *et al.*, 1993) (Figuras 2 y 3). Estas secuencias experimentaron episodios de acortamiento NE-SW por la orogenia Laramide durante el Cretácico Superior a Eoceno Medio (Carfantan, 1981-1983); seguidamente, se produjeron episodios de acortamiento y extensión durante el Eoceno tardío y Mioceno (Nieto-Samaniego *et al.*, 2006). Además, durante el Mioceno se depositaron secuencias volcánicas y sedimentarias continentales (Martínez-Serrano *et al.*, 2008), las cuales fueron cortadas por rocas intrusivas y subvolcánicas.

2.1.1.1. Mesozoico

Formación Jaltepetongo (KnapLu-Ar). Fue nombrada por primera vez por González-Alvarado (1970) y aflora al norte de la localidad de San Baltazar Guelavila (Figura 2). Esta Formación es un conjunto de flysch, toba, pizarra negra y caliza fuertemente deformado, pero débilmente metamorfizados, que contiene microfósiles del Berriasiano-Valangiano (Figura 3) y amonites de la especie *Olcoste phanus* Valangiana (Carfantan, 1981; Ortega-Gutiérrez y González Arreola, 1985). La Formación Jaltepetongo se depositó en un ambiente de cuencas y mares someros (Motolinía-García *et al.*, 2002).

Formación Yushe (KaceCz). Fue nombrada por primera vez por González (1970) y aflora al norte de la localidad de San Baltazar Guelavila y al occidente de Santa Ana del Río (Figura 2). Esta Formación está constituida por una secuencia de calizas puras con horizontes de pedernal negro en una estratificación delgada (González, 1970), que se depositó en un ambiente marino de plataforma externa (Vázquez, 1983). Con base a su contenido faunístico se le asigna una edad de Albiano-Turoniano (Varela, 1983) (Figura 3).

Formación Yucunama (KamAr-Lu). Fue nombrada por primera vez por González-Alvarado (1970) y aflora al oriente de San Pedro Quiatoni y al norte de La Mancornada (Figura 2). Esta Formación es una secuencia calcárea terrígena de margas y calizas que se depositaron en un ambiente de plataforma semiprofunda (González-Alvarado, 1970; Ferrusquía *et al.*, 1970; Ferrusquía-Villafranca, 1976). Martínez-Amador *et al.* (1999) la describen como una secuencia calcáreo-arcillosa compuesta por limolita micácea intercaladas con areniscas de grano fino a grueso, marga, caliza nodular y arcillas de estratificación laminar a delgada. En base a los fósiles encontrados se le asigna una edad de Cenomaniano-Maestrichtiano (Ferrusquía *et al.*, 1970; Ferrusquía-Villafranca, 1976; Ortega-Gonzalez y Lambarria-Silva, 1991) (Figura 3).

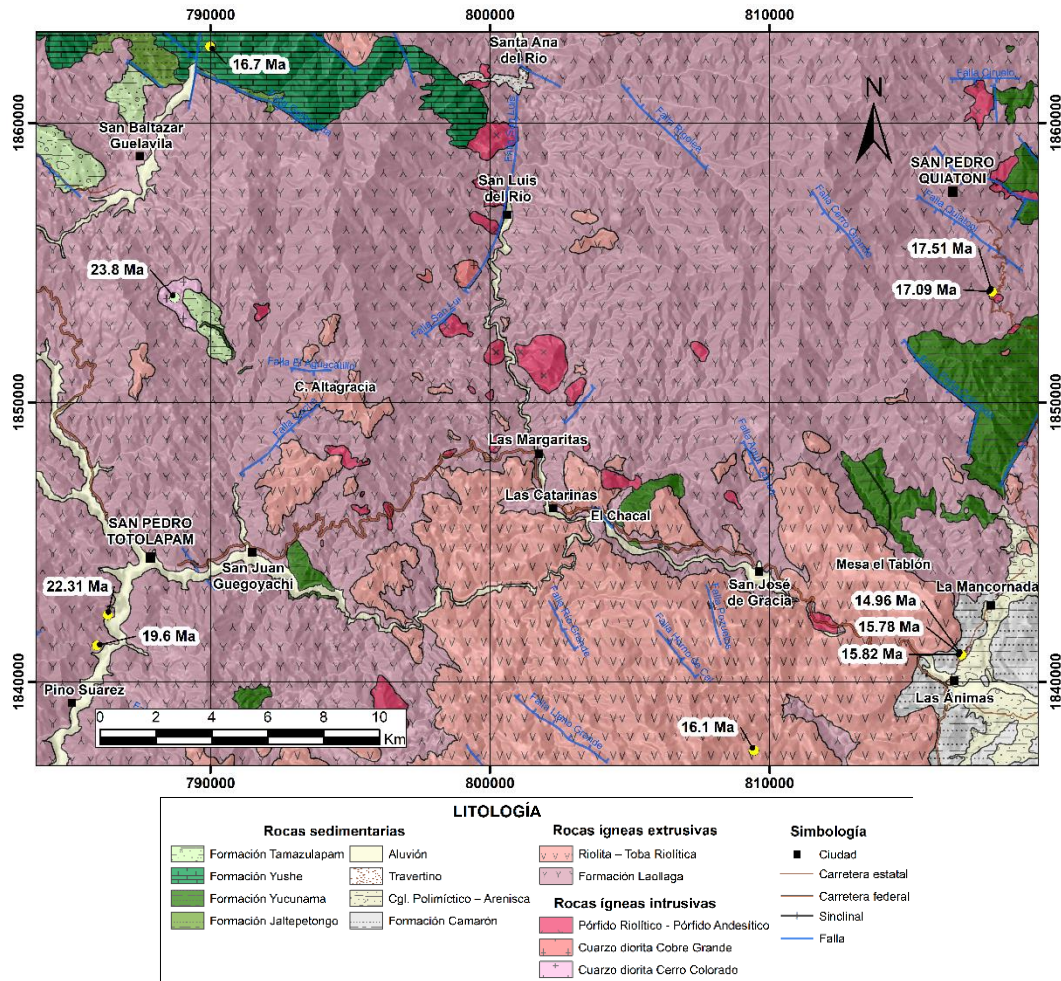


Figura 2. Mapa geológico regional modificado de las cartas geológicas San Pedro de Totolapam y San Pedro Quiatoni (Vergara-Martínez. *et al.*, 2003, Motolinía-García *et al.*, 2003) y edades isotópicas obtenidas por Iriondo *et al.* (2004); Martínez-Serrano *et al.* (2006); Ferrusquía *et al.* (2001) y Poliquin (2009) del distrito San Pedro Totolapam. Abreviatura: C = cerro, Cgl = conglomerado.

2.1.1.2. Cenozoico

Formación Tamazulapam (TpaeCgp). Fue descrita inicialmente por Salas (1949) en Ortega-González y Lambarria-Silva (1991) como conglomerado basal y posteriormente, González-Alvarado (1970), Ferrusquía-Villafranca (1976) la designa como Formación Tamazulapan. Esta unidad aflora al occidente y norte de la localidad de San Baltazar Guelavila (Figura 2). Está constituida por cuerpos masivos de conglomerado de guijarros y matatenas de caliza y dolomía, rocas volcánicas, pedernal, cuarzo y areniscas en un cementante arenoso-tobáceo (González-Alvarado, 1970 y Ferrusquía-Villafranca, 1976). Esta Formación sobreyace discordantemente a las Formaciones Jaltepetongo y Yushé. De acuerdo con su posición estratigráfica se le asignó una edad de Paleoceno-Eoceno (Motolinía-García *et al.*, 2002) (Figura 3).

Rocas ígneas extrusivas

Formación Laollaga (TmTDa-TA). Fue nombrada por primera vez por González-Alvarado (1969). Esta unidad aflora en las localidades de San Baltazar Guelavila, Santa Ana del Río, San Luis del Río, San Pedro Quiatoni, San Pedro Totolapam, Pino Suárez, Las Margaritas y San José de Gracia (Figura 2). Esta Formación está constituida por secuencias volcánicas andesíticas en la base

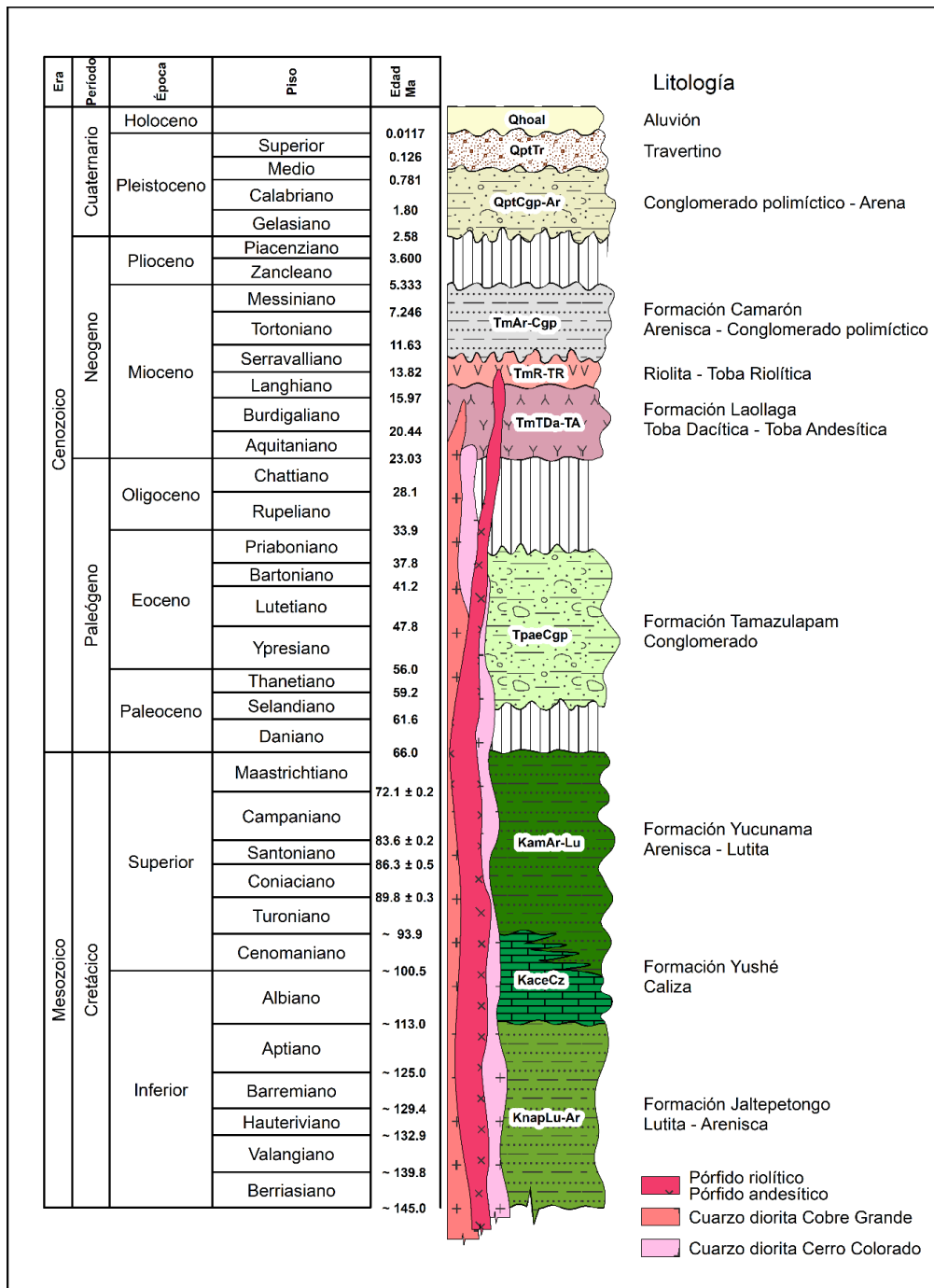


Figura 3. Columna estratigr3fica regional del distrito San Pedro Totolapam, elaborada a partir del mapa geol3gico regional (Figura 2).

y en la parte media a superior presenta una secuencia volc3nica cuya composici3n incluye: dacita, riodacita, toba y brecha de composici3n andes3tica, dac3tica e ignimbrita; tambi3n contiene lentes de caliza lacustre (Gonz3lez-Alvarado, 1969; Motolin3a-Garc3a *et al.*, 2002; Vergara-Mart3nez *et al.*, 2003). Las edades isot3picas obtenidas con $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ en la matriz andesita var3an de 22.31 ± 0.03 a 17.51 ± 0.05 Ma, es decir, al Mioceno inferior (Iriundo *et al.*, 2004; Mart3nez-Serrano *et al.*, 2008) (Figura 3).

Riolita-Toba Riolítica (TmR-TR). Esta unidad aflora en las localidades de El Chacal, Mesa el Tablón, al oriente de San Luis del Río y Cerro Altagracia (Figura 2). Esta secuencia volcánica está constituida de base a techo por una riolita de textura afanítica con una estructura fluidal y una secuencia de toba riolítica con textura piroclástica en pseudoestratos, riolita de textura afanítica y estructura fluidal esferulítica, horizonte de vitrófido y toba riolítica (Sánchez-Rojas *et al.*, 1998; Motolinía-García *et al.*, 2002; Vergara-Martínez *et al.*, 2003). Las edades isotópicas obtenidas con K-Ar en la ignimbrita y en la plagioclasa en toba son de 16.1 Ma y 14.96±0.85 Ma, respectivamente (Ferrusquía-Villafranca y McDowell, 1991) (Figura 3).

Rocas ígneas intrusivas

Cuarzo diorita Cerro Colorado. Esta apófisis se localiza al sur de la localidad de San Baltazar Guelavila (Figura 2). Es un intrusivo cuarzo diorítico muy alterado con fenocristales de cuarzo, plagioclasas, feldespatos, clorita, epidota y pirita, que corta las rocas volcánicas Cenozoicas. La edad isotópica obtenida con U-Pb en circón es de 23.8±0.4 Ma (Poliquin, 2009) (Figura 3).

Cuarzo diorita Cobre Grande. Este intrusivo se localiza al norte de la localidad de San Baltazar Guelavila (Figura 2). Es un intrusivo cuarzo diorítico muy alterado con fenocristales de cuarzo inmerso en una matriz de grano fino dominada por feldespatos potásicos. Corta las rocas sedimentarias Mesozoicas y rocas volcánicas del Cenozoico. La edad isotópica obtenida con U-Pb en circón es de 16.7±0.6 Ma (Poliquin, 2009) (Figura 3).

Pórfido Riolítico-Pórfido Andesítico (Tm PR-PA). Estos dos cuerpos, subvolcánicos riolítico e hipabisales andesíticos, afloran en las localidades de Altagracia, San José de Gracia, Las Margaritas, La Adelita y camino a San Luis del Río (Figura 2). Estos cuerpos fueron descritos por Vergara-Martínez *et al.* (2003) como cuerpos subvolcánicos que presentan coloraciones blanquecinas y se alteran a coloraciones rojizas. Tienen una textura afanítica a porfídica, contienen feldespato potásico, cuarzo, sericita, calcita y escasas plagioclasas y presentan fracturas rellenadas con óxidos de hierro. Estos cuerpos subvolcánicos cortan a la Formación Laollaga. Las edades isotópicas obtenidas con $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ en plagioclasa es de 17.09±0.06 Ma y 17.51±0.05 Ma (Irriondo *et al.*, 2004) (Figura 3).

Formación Camarón (TmAr-Cgp). Fue nombrada por primera vez por Ferrusquía-Villafranca (2001) y aflora en las localidades de Las Aminas y La Mancornada (Figura 2). Esta Formación está constituida por arenisca con textura clástica de grano fino, semiconsolidada. Algunos horizontes presentan estratificación cruzada, intercaladas con horizontes de areniscas conglomerática (Vergara-Martínez *et al.*, 2003). La Formación Camarón sobreyace de manera concordante a la secuencia de riolita y toba riolítica (TmR-TR). Ferrusquía-Villafranca (2001) encontró fósiles de mamíferos pertenecientes a la fauna Nejapa y le asignó una edad de Mioceno Medio a Superior (Figura 3).

Conglomerado Polimíctico – Arenisca (QptCgp-Ar). Esta unidad aflora en las localidades de Las Aminas y La Mancornada (Figura 2). Está constituido por una sucesión de conglomerados polimícticos, intercalados con horizontes de arena de grano fino mal consolidada. Esta unidad sobreyace discordantemente a la Formación El Camarón de forma que, por su posición estratigráfica se le asigna una edad del Pleistoceno (Sánchez-Rojas *et al.*, 1998; Vergara-Martínez *et al.*, 2003) (Figura 3).

Travertino (QptTr). Esta unidad aflora al sur de la localidad de Santa Ana del Río (Figura 2). El travertino es de color café a beige, su textura es porosa y fracturada, y está cubierto por una capa de caliche (Motolinía-García *et al.*, 2002).

Aluvi3n (Qhoal). Los dep3sitos consisten en cantos rodados de diferentes tama1os (i.e., grava, arena, arcilla y limo), que forman abanicos aluviales no consolidados (Motolinía-García *et al.*, 2002).

2.2. Geología Estructural

De acuerdo con Nieto-Samaniego *et al.* (2006) en el sur de M3xico se produjeron tres eventos tect3nicos sucesivos principales. El primer evento, del Cret3ceo Superior – Eoceno Medio corresponde a la orogenia Laramide, cuando la deformaci3n migr3 de oeste a este. El segundo evento produjo fallas de desplazamiento durante el acortamiento horizontal NE-SW del Eoceno a Oligoceno. El tercer evento produjo fallas normales y de rumbo (movimiento paralelo al rumbo), indicando extensi3n horizontal NE-SW durante el Oligoceno-Mioceno. Al suroeste de la falla Oaxaca, Mor3n-Zenteno *et al.* (1999) reconocieron varias estructuras del tipo graben orientadas E-W, lo cual permite inferir una edad Mioceno Inferior a Medio, utilizando is3topos de K-Ar en materiales pirocl3sticos del relleno de la cuenca (Ferrusquía-Villafranca, 1992). Estas estructuras tipo graben corresponden al tercer evento.

En la regi3n San Pedro Totolapam est3 marcada por cuatro sistemas de fallas: Sistema normal NW-SE, Sistema normal NE-SW, Sistema lateral NW-SE y Sistema normal S-W.

El lineamiento principal es el sistema normal NW-SE que presenta un rumbo de N30°-62°W y N28°-58°W y con una inclinaci3n de 40°-70°SW y 70°-84°NE. El segundo lineamiento es el sistema normal NE-SW, que presentan el siguiente rumbo: N35°-52°W y N30°-45°W, con una inclinaci3n de 51°-73°NW y 49°-80°SE. El tercer lineamiento es el sistema lateral NW-SE, que presenta un rumbo de N9°-15°W con desplazamiento derecho y de N60°W con desplazamiento izquierdo. El cuarto lineamiento es el sistema normal E-W, con una inclinaci3n de 45°S (Motolinía-García *et al.*, 2002; Vergara-Martínez *et al.*, 2003).

2.3. Geología Local

Las secuencias sedimentarias mas antiguas registradas en la zona mineralizada de Arista y Altagracia es la Formaci3n Yucunama del Mesozoico y las rocas volc3nicas del Mioceno est3n cubriendo la mayor parte de la superficie entre Arista y Altagracia. A continuaci3n, se describe detalladamente las unidades litoestratigr3ficas.

Formaci3n Yucunama. Esta formaci3n aflora en El Águila, El Chacal y al sur del cerro Altagracia (Figuras 4 y 5). Est3 constituida por secuencias de lutita carbonatada, areniscas de grano fino, limolitas, calizas y calizas arenosas; presentan estructuras laminares, flaser y lenticulares. Los estratos presentan espesores que varían de 5 a 80 cm, si bien las capas de areniscas alcanzan hasta 1 m de espesor. Adem3s, existen concreciones rocosas desde pocos milímetros hasta 1 m de diámetro compuestas por fragmentos de roca de la misma Formaci3n. Es la Formaci3n m3s antigua registrada en la zona mineralizada El Águila y al sur de Altagracia como se observa en las Figuras 5 y 6.

Lava Andesítica. Aflora a unos 3 km al sureste de la localidad de San Pedro Totolapam (Figura 4). Est3 constituida por una secuencia de andesita a andesita basáltica, compuesta por flujos de

lava y brechas de cono de ceniza con presencia de arcillas, producto de alteración hidrotermal. El componente principal de esta roca son plagioclasa, piroxeno y fenocristales de olivino incluidos en una matriz vítrea (Martínez-Serrano *et al.*, 2008). La edad isotópica obtenida con $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ en una matriz volcánica es de 22.31 ± 0.03 Ma (Iriondo *et al.*, 2004). Sobreyaciendo a esta unidad se dispone una secuencia de vitrófido de composición riolítica con una edad obtenida con K-Ar en roca total de 19.6 ± 0.5 Ma (Martínez-Serrano *et al.*, 2008) (Figuras 5 y 6).

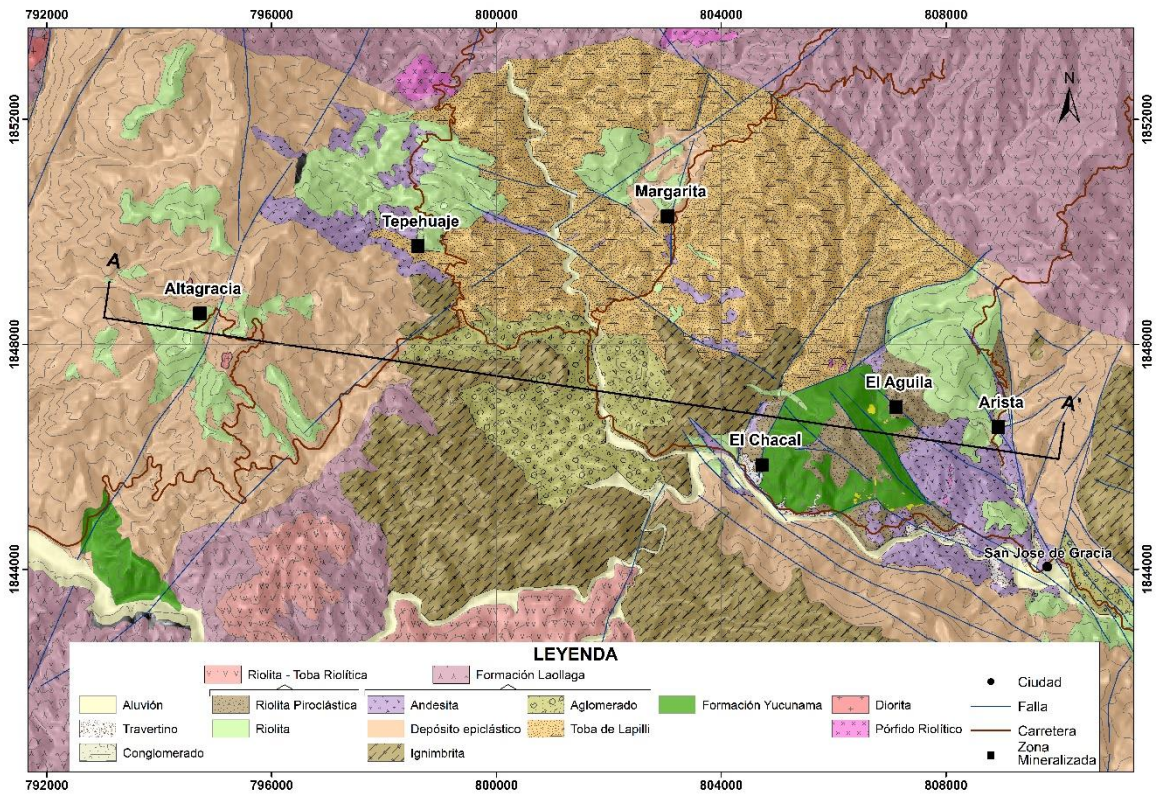


Figura 4. Mapa geológico local del proyecto El Águila, basado en los trabajos de la empresa *Don David Resource Gold* (Devlin, 2016).

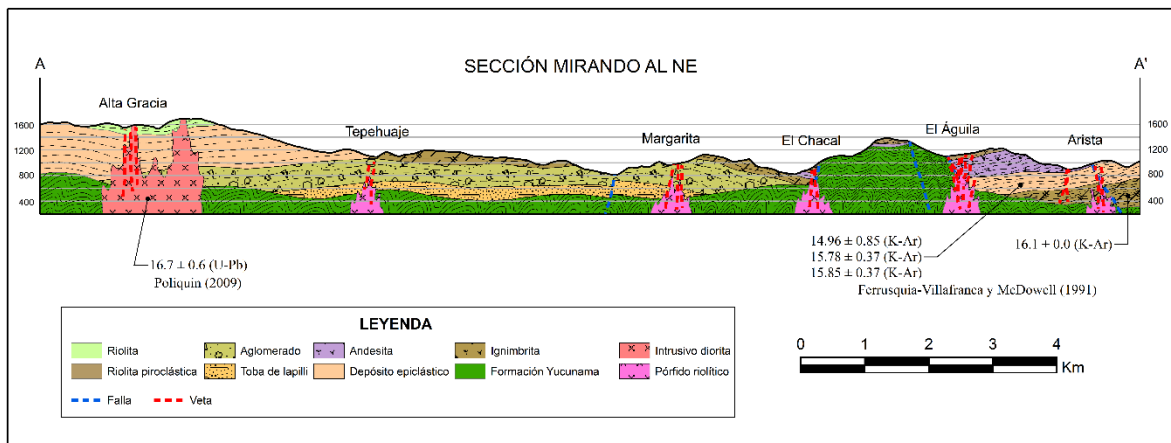


Figura 5. Sección geológica A-A' elaborada a partir de la cartografía geológica y edades isotópicas (Iriondo *et al.*, 2004; Martínez-Serrano *et al.*, 2006; Ferrusquía-Villafranca y McDowell, 1991; Poliquin, 2009) Detalle del mapa de la Figura 4.

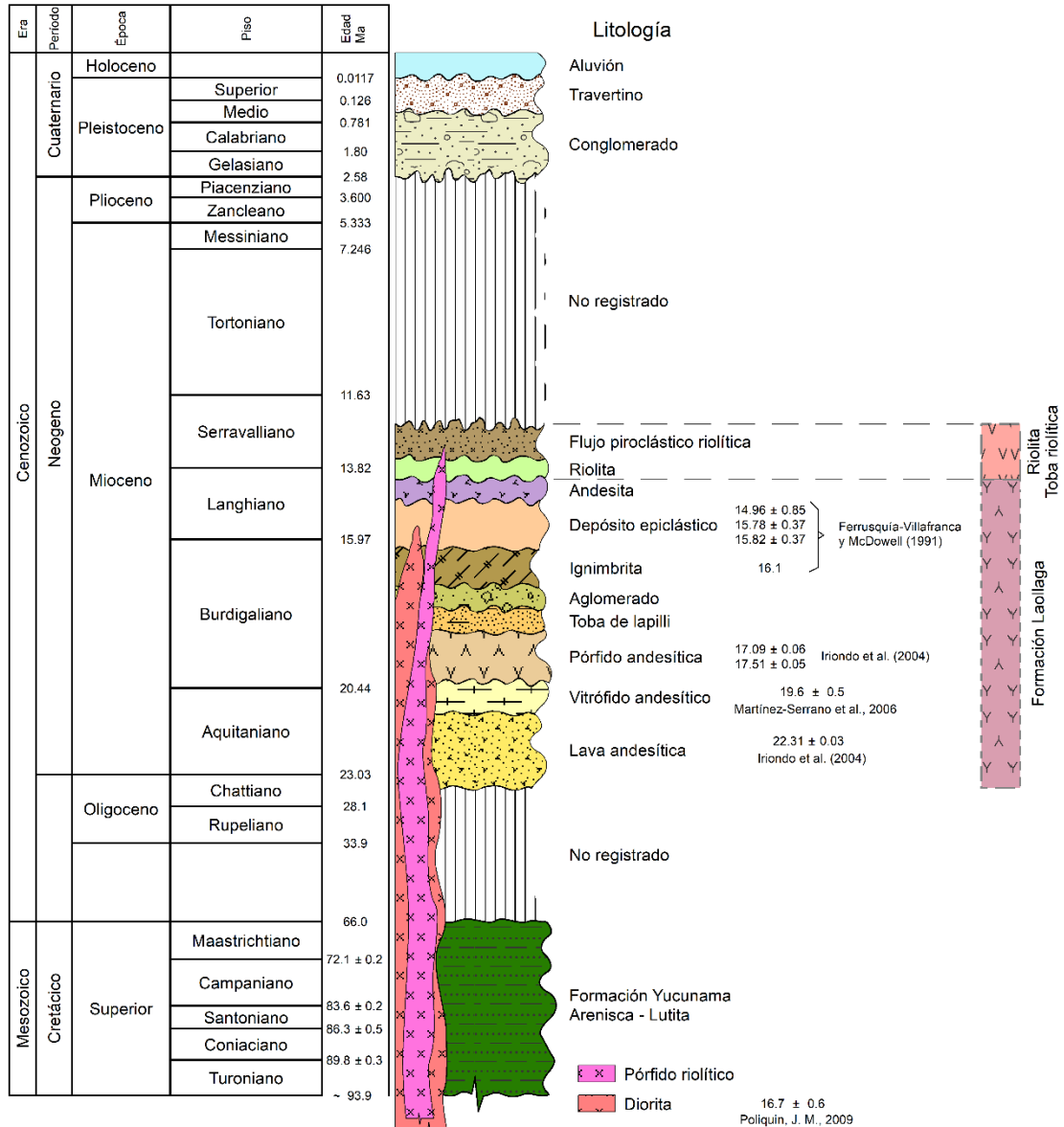


Figura 6. Columna estratigr3fica local, elaborada con la cartograf3a geol3gica y edades isot3picas (Iriondo *et al.*, 2004; Mart3nez-Serrano *et al.*, 2006; Ferrusqu3a-Villafranca y McDowell, 1991; Poliquin, 2009).

Toba de lapilli. Los afloramientos se encuentran en las localidades de Tepehuaje y Margarita (Figura 4). Consiste en una secuencia de toba de lapilli, toba de ca3da y toba de cristal de composici3n andes3tica a riol3tica. Presenta laminaci3n cruzada; dentro de las secuencias hay estratos de 3 a 5 m de espesor con textura muy gruesa de clastos redondeados a sub-redondeados moderadamente consolidados. Todas las tobas se encuentran moderadamente alteradas a arcillas y carbonatos. Las tobas de lapilli se encuentran sobreyaciendo a lavas andes3ticas y a la Formaci3n Yucucama (Figuras 5 y 6).

Agglomerado. Afloran al sureste de la localidad Tepehuaje (Figura 4). Consiste en una secuencia de tobas l3ticas estratificadas con capas de ignimbrita intercalada, de 5 metros de espesor. Estas rocas contienen cristales de cuarzo, feldespato pot3sico y abundantes fragmentos redondeados a sub-redondeados de ignimbritas con una pobre clasificaci3n y ligera consolidaci3n.

Esta unidad tiene un espesor de aproximadamente 200 m. Las características físicas de esta unidad, como estratificación, laminación cruzada y los fragmentos redondeados a sub-redondeados, indican una secuencia volcano-sedimentaria que durante la deposición fueron interrumpidas por eventos volcánicos causantes de la deposición de las capas intercaladas de ignimbritas, riolita y tobas. Esta unidad de aglomerado se encuentra sobreyaciendo a los depósitos de tobas de lapilli (Figuras 5 y 6).

Ignimbrita. Los afloramientos se encuentran al noroeste y sur de las localidades El Chacal, al este de Arista y al sur de Tepehuaje (Figura 4) y está constituida por ignimbritas y una serie de depósitos piroclásticos que presentan una estratificación con diferentes grados de consolidación. Éstas contienen abundantes litoclastos englobados en una matriz de grano fino. Los componentes más abundantes son fragmentos de pómez y líticos, además de cristales de cuarzo, feldespatos y biotita. Esta unidad de ignimbritas se encuentra sobreyaciendo a los aglomerados (Figuras 5 y 6)

Depósito epiclástico. Los afloramientos se encuentran en las localidades Arista, Altagracia y al sur de El Chacal (Figura 4). Se trata de una secuencia volcano-sedimentaria constituida por estratos de arenisca, toba arenosa, limonita, lentes de carbonatos, y un estrato delgado de sílice con bandas oscuras y claras (pedernal).

Andesita. Los afloramientos se observan al sur de Arista y alrededores de Tepehuaje (Figura 4). Consiste en una serie de flujos andesíticos de textura porfídica, tobas y zonas de brechas en contacto al depósito epiclástico. Esta unidad se encuentra cubriendo a los depósitos epiclásticos y en algunas partes sobreyaciendo al aglomerado (Figuras 5 y 6).

Riolita. Afloran al noroeste de Arista y Margarita, al norte de Tepehuaje, norte y sur de Altagracia (Figura 4). Consiste en flujo riolítico con algunas fases piroclásticas, hospedando abundantes fenocristales de plagioclasa y cuarzo. Esta unidad se superpone a la andesita con contactos discordantes y estructurales (Figuras 5 y 6).

Riolita Piroclástica. Se tiene afloramientos en el tajo El Águila y Arista (Figura 4). Es un depósito de toba de caída de composición riolítica que consiste en una secuencia laminar de 10 a 20 cm de espesor; en la base de la secuencia las tobas engloban fragmentos de lutita y arenisca de grano grueso dentro de una matriz de grano fino. La unidad exhibe una fuerte alteración, incluyendo silicificación, argilización y oxidación. Esta unidad se encuentra cubriendo a las rocas andesíticas y riolíticas (Figuras 5 y 6).

Conglomerado. Los afloramientos se encuentran al sureste de San José de Gracia (Figura 4) y está constituido por una secuencia de areniscas y limos poco consolidados, con clastos de diferente composición y tamaño. Las estratificaciones delgadas presentan deposición gradual (de grano fino en la base y grueso en la parte superior).

Travertino. Los afloramientos se encuentran al suroeste de la localidad de San José de Gracia y El Chacal (Figuras 4 y 6). Está constituido por una secuencia laminar de calcita con coloraciones blanquecina y marrón amarillento; en la parte superior está cubierto por una delgada capa (10 cm de espesor) de óxido de hierro (limonita). El espesor del travertino varía de 30 cm a 5 m.

Aluvi3n. Está constituido por sedimentos fluviales con mala clasificaci3n de los granos (gravas y arenas), y donde los sedimentos engloban clastos de diferentes tamaños.

2.4. Depósitos minerales en Oaxaca

El estado de Oaxaca se encuentra en el extremo meridional de la Sierra Madre del Sur. El magmatismo se registró desde 54 ± 4 Ma (Murillo-Muñetón y Torres-Vargas, 1987) hasta 14.5 Ma (Ferrusquía-Villafranca y McDowell, 1991). De acuerdo a la distribución de las edades isotópicas obtenidas por varios autores (Figura 7) se diferencian dos épocas de vulcanismo: el vulcanismo Eoceno-Oligoceno se encuentran al occidente de la ciudad de Oaxaca (Figura 8) con un rango edad isotópica que varía desde 54 ± 4 Ma (Murillo-Muñetón y Torres-Vargas, 1987) hasta 20.0 ± 0.9 Ma (Santamaría-Díaz *et al.*, 2008) y el vulcanismo Mioceno que se localiza desde el centro al oriente de la ciudad de Oaxaca (Figura 9) con un rango de edad isotópica que varía desde 22.31 ± 0.03 Ma (Iriondo *et al.*, 2004) hasta 14.5 Ma (Ferrusquía-Villafranca y McDowell, 1991). Este vulcanismo generó una gran variedad de depósitos minerales de diferentes edades y tipologías (Poliquin, 2009; Camprubí *et al.*, 2019). Dichos depósitos minerales están relacionados con la actividad magmática, producto de la subducción de la Placa Cocos sobre la Placa Norteamericana (Martiny *et al.*, 2000; Martínez-Serrano *et al.*, 2008).

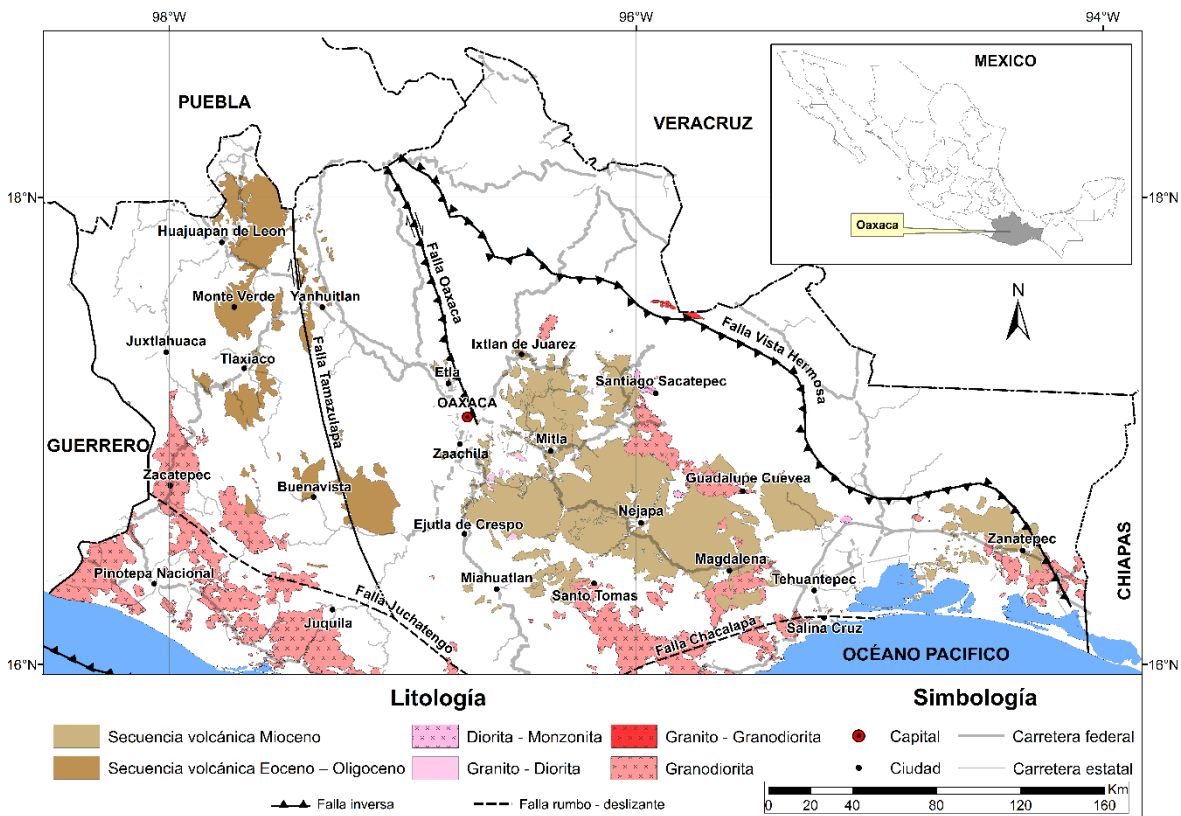


Figura 7. Distribución del magmatismo de la Sierra Madre Sur en Oaxaca, vulcanismo Eoceno-Oligoceno en la margen occidental de la falla Tamazulapa y del centro al oriente de la falla Oaxaca el vulcanismo Mioceno. Modificado del INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía) y carta Geológico-Minero del SGM (Servicio Geológico Mexicano).

2.4.1. Depósitos minerales del Eoceno – Oligoceno

En esta época, se registraron principalmente vetas de cuarzo con diseminación de metales preciosos (Au, Ag) y metales de base (Pb, Zn, Ba y Sb) del tipo epitermal. La mineralización de estos depósitos se encuentran en periodos muy diferenciados a ~ 46 Ma (Los yacimientos El

Carmen, Rio Dulce, Rio Minas, Niño Perdido y Santa Catarina) y ~26 Ma (el yacimiento Los Tejocotes) (ver Figura 8).

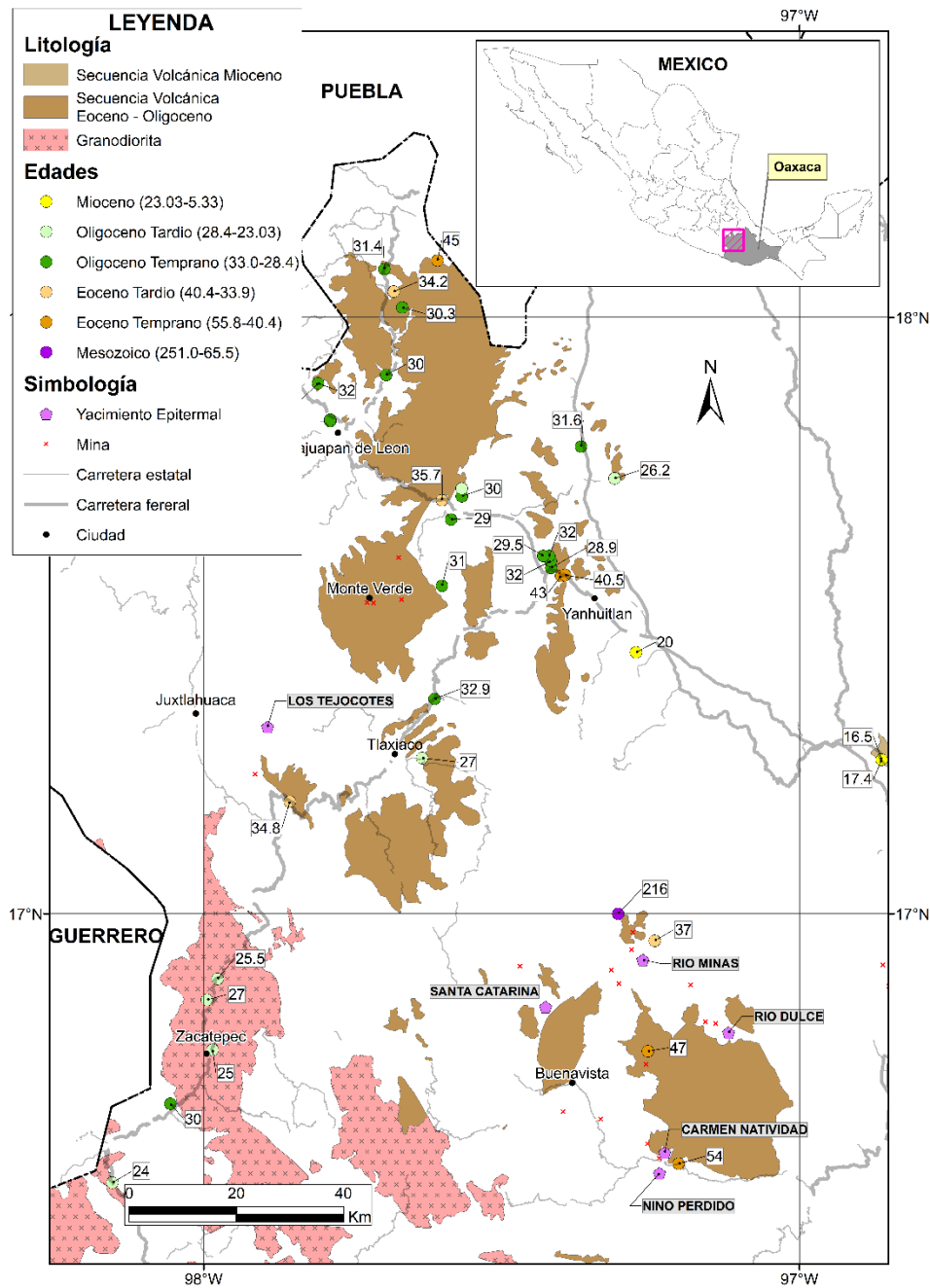


Figura 8. Franja volcánica del Eoceno-Oligoceno y la distribución de los depósitos minerales. El mapa fue modificado de las Cartas Geológicas Orizaba, Oaxaca, Zaachila, Chilpancingo, Acapulco (Martínez-Amador *et al.*, 2001; González-Ramos *et al.*, 2000; Sánchez-Rojas *et al.*, 2000; Campa-Uranga *et al.*, 1998; Cruz-López *et al.*, 2000). Las edades isotópicas fueron obtenidas por Solé *et al.* (2007), Herrmann *et al.* (1994), Guerrero-García y Herrero-Bervera (1993), Murillo-Muñetón y Torres-Vargas (1987), Martiny *et al.* (2000), Ferrusquía-Villafraña *et al.* (1974), Santamaría-Díaz *et al.* (2008), Cerca *et al.* (2007), Ferrusquía-Villafraña y McDowell (1991) y Galina-Hidalgo (1996).

2.4.2. Depósitos minerales del Mioceno

En esta franja se evidenciaron diversas tipologías de depósitos minerales de metales preciosos y de base como epitermales, skarn, pórfidos. La mineralización de estos depósitos presentan edades isotópicas muy variadas que se detallan a continuación: Cerro Colorado con anomalías en Au de 23.8 ± 0.4 Ma (Poliquin, 2009); los depósitos El Águila, Yagalán, La Valenciana, La Aurora, Mina Vieja, La Plata I, Taviche, El Cubilete, El Carmen-San Ignacio, La Altona, Verónica-San Juan, San Martín, San Jorge-Colmena y Los Ocotes (son de tipo epitermal y skarn) de ~ 17 a 16 Ma; Cobre Grande (skarn y stockwork) de 16.7 ± 0.6 Ma (Poliquin, 2009); los depósitos skarn Niño Perdido, Aurena, La Esperanza y Potrerillo de ~ 16 Ma; los depósitos epitermales de El Águila, El Aire, Buena Noche, El Mirador, Guielavazar, El Pochotle, Cerro Imán y Skarn Santa Margarita, y Azucena de ~ 14 Ma a 13 Ma (ver Figura 9).

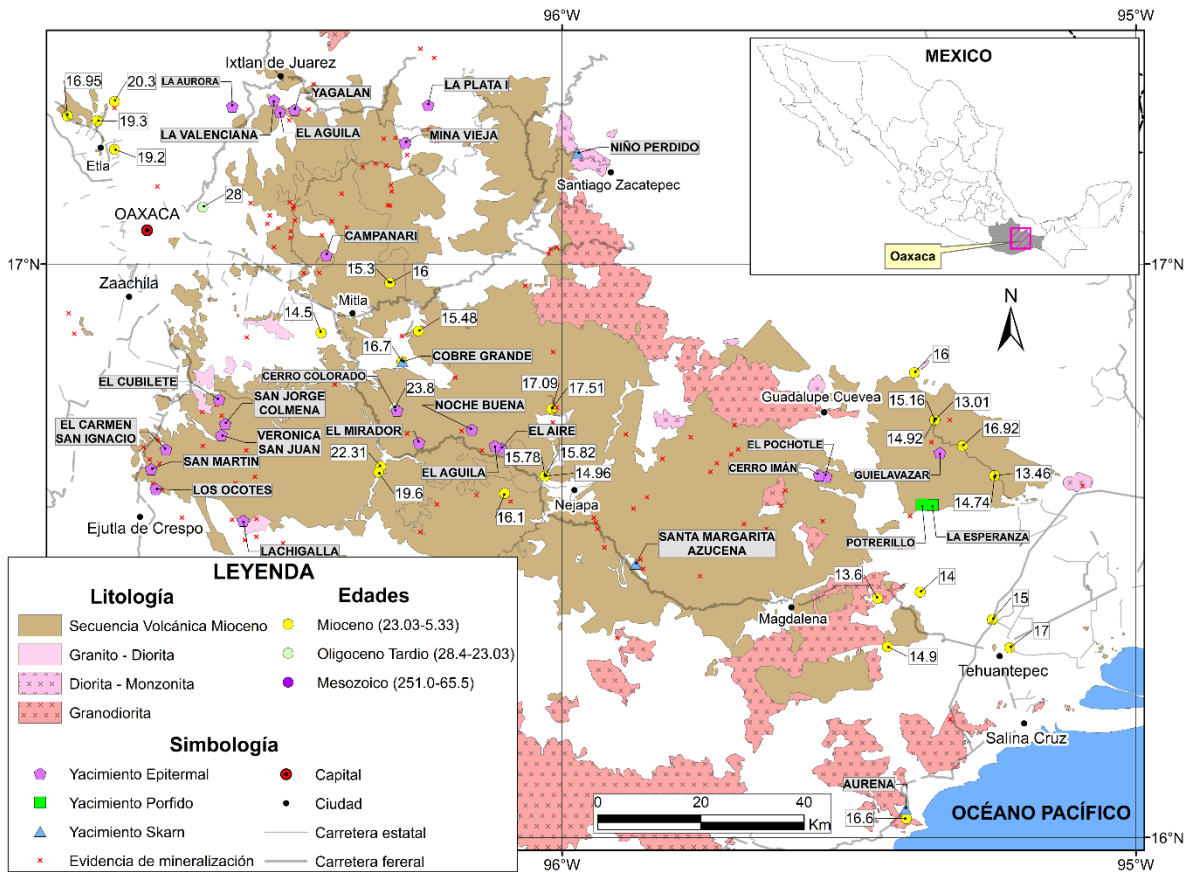


Figura 9. Distribución de depósitos minerales y edades isotópicas relacionados con el vulcanismo Mioceno. Mapa modificado de las Cartas Geológicas Juchitán, Minatitlán, Oaxaca, Puerto Escondido y Zaachila (Amador-Martínez *et al.*, 2000; Aguilera-Martínez *et al.*, 2000; González-Ramos *et al.*, 2000; Motolinía-García *et al.*, 2002; Sánchez-Rojas *et al.*, 2000). Las edades isotópicas fueron obtenidas por Ferrusquía-Villafranca (1999), Ferrusquía-Villafranca y McDowell (1991), Ferrusquía-Villafranca *et al.* (1974), Iriondo *et al.* (2004), Poliquin (2009), Keppie *et al.* (2012), Martínez-Serrano *et al.* (2006), Murillo-Muñetón y Torres-Vargas (1987), Pérez-Gutiérrez (2010), Solé *et al.* (2007) y Solís-Pichardo (Comunicación escrita).

CAPÍTULO 3: METODOLOGÍA

La empresa *Don David Resource Gold* facilitó el acceso a las zonas mineralizadas de Arista y Altagracia, así como a la información obtenida (informes técnicos, mapeos geológicos superficiales, mapeo geológico de obras subterráneas, logueos geológicos y orientación de los barrenos). El muestreo se realizó en superficie, obras mineras y núcleos de barrenos. También se realizó un mapeo geológico semidetallado con base al mapa geológico que dispone la empresa. Con la información obtenida se realizaron los siguientes estudios: estratigrafía de vetas, mineralogía de los núcleos de barrenos y muestras de labores mineras, geoquímica mineral, petrográfica de inclusiones fluidas e isótopos estables.

La revisión bibliográfica se realizó en la biblioteca conjunta de Ciencias de la Tierra (libros, revistas, tesis y la información electrónica) que pertenece al Centro de Ciencias de la Atmósfera y los Institutos de Geofísica, Geología y de Ciencias del Mar y Limnología de la Universidad Nacional Autónoma de México.

3.1. Trabajo de campo

Se realizó una cartografía semidetallada en las zonas mineralizadas de Arista y Altagracia con base al mapa de la empresa. La toma de muestras se llevó a cabo cada 50 metros en el afloramiento de vetas superficiales en la zona mineralizada de Altagracia. El muestreo de núcleos de barrenos (Figura 10A) se realizó en una malla de 100 metros y una profundidad de 60 metros en las zonas mineralizadas. El muestreo en las obras mineras se realizó en los topes de las labores subterráneas (cada 10 metros) (Figura 10B).



Figura 10. A) Almacén de núcleos de barrenos de la empresa *Don David Resource Gold*. **B)** Obra minera nivel 20, veta Splay 5.

3.2. Petrografía de la mineralización

Se realizaron 29 láminas delgadas con pulido espejo de sulfuros y mineral no económico para llevar a cabo estudios de mineralogía bajo el microscopio de luz transmitida y reflejada. Las láminas delgadas se realizaron en el laboratorio de Wagner Petrographic. El estudio petrográfico se realizó con los microscopios Leica DMLP (Laboratorio de Separación de Minerales II) y Olympus BX60 (Laboratorio de Microscopía Francisco Fabregat) (Figura 11) ubicados en el Instituto de Geología de la Universidad Nacional Autónoma de México.



Figura 11. Microscopio Olympus BX60. Laboratorio Francisco Fabregat.

3.3. Microscopía Electrónica de Barrido (SEM) y Microsonda Electrónica (EMPA)

El microscopio electrónico de barrido (SEM) es una técnica que proporciona imágenes de alta resolución a partir de una superficie pulida (briquetas de mineral de

mena) y es escaneado con un haz de electrones. Microsonda electrónica (EMPA) esta técnica permite el análisis químico cualitativo y cuantitativo de un mineral. El análisis cuantitativo de elementos mayores en los sulfuros (i.e., esfalerita, proustita-pirargirita, tetraedrita-tennantita, arsenopirita) y en oro se llevó a cabo con una microsonda electrónica CAMECA SX100 Ultra, localizada en el Laboratorio de Microsonda Electrónica de la Universidad de Arizona (USA). Las condiciones analíticas en la microsonda electrónica (Figura 12) fueron de: corriente de sonda de 20 nA y aceleración de voltaje 15 keV (para sulfuros) y 20 KeV (para oro), diámetro de haz de 1 μm , con un conteo de cada pico de 15 segundos por elemento. Los estándares utilizados fueron: pirita (S $K\alpha$), calcopirita (Fe $K\alpha$, Cu $K\alpha$), ZnS (Zn $K\alpha$), ZnSe (Se $K\alpha$), estibina2 (Sb $K\alpha$), Ag (Ag $K\alpha$), galena2 (Pb $K\alpha$), Au (Au $K\alpha$), AgBiS₂ (Bi $K\alpha$), NiAsb(As $K\alpha$), GGG (Ga $K\alpha$), Ge (Ge $K\alpha$), Cd₂ (Cd $K\alpha$), AuTe₂ (Te $K\alpha$) y enargita (SK α).

Tabla 1. Estándares sintéticos que se utilizaron en el microanálisis.

Estándar	Composición	Estándar	Composición
Pirita	Fe=46.55% y S=53.45%	AgBiS ₂	Ag=28.31%, Bi=54.85%, S=16.83%
Calcopirita	Cu=34.44%, Fe=30.45%, Si=0.21% y S=34.93%	NiAs	Ni=43.93% y As=56.07%
ZnS	Zn=67.09% y S=32.91%	GGG	Gd=46.6%, Ga=34.44% y O=18.97%
ZnSe	Zn=45.29% y Se=54.71%	Ge	Ge=100%
Estibina2	Sb=71.68% y S=28.32%	Cd ₂	Cd=100%
Ag	Ag=100%	AuTe ₂	Au=43.56% y Te 56.44%
Galena2	Pb=86.6% y S=13.4%	Enargita	Cu=48.55%, As=18.72%, Sb=0.21%, S=32.55%
Au	Au=100%		



Figura 12. Microsonda electrónica CAMECA SX100 Ultra localizada en el Laboratorio de Microsonda Electrónica de la Universidad de Arizona, USA.

3.4. Petrografía y microtermometría de inclusiones fluidas

Con el estudio de las inclusiones fluidas se obtuvieron la temperatura eutéctica, la temperatura de fusión de hielo y la temperatura de homogenización. Se realizaron 33 láminas doblemente pulidas de esfalerita, cuarzo y calcita para las zonas mineralizadas de Arista y Altagracia, 23 láminas de esfalerita y cuarzo en Arista y 10 láminas de cuarzo, esfalerita y calcita en Altagracia. Estas láminas doblemente pulidas se realizaron en el Taller de Laminación y en el Laboratorio de Arcillas del Instituto de Geología, UNAM. El equipo VibroMet se utilizó para realizar las láminas doblemente pulidas (Figuras 13A y B). El estudio petrográfico de las inclusiones fluidas se realizó con los microscopios Leica DMLP (Lab. de Separación de Minerales II) y Olympus BX60 (Laboratorio de Microscopía Francisco Fabregat), ambos localizados en el Instituto de Geología, UNAM.

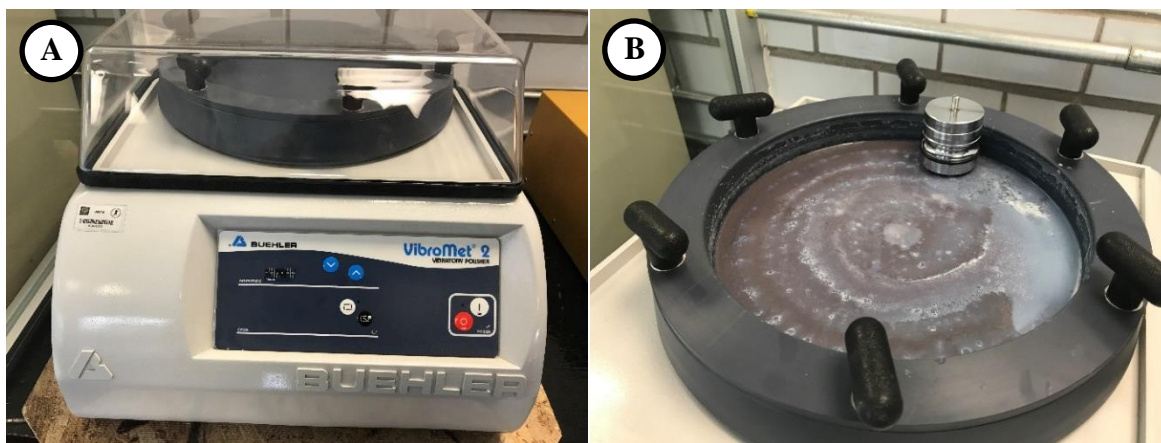


Figura 13. A) Equipo VibroMet localizada en el Laboratorio de Arcillas del instituto de Geología de la UNAM y **B)** Molde de muestra con pesas sobre la bandeja de VibroMet para el estudio de inclusiones fluidas.

Los datos microtermométricos se obtuvieron con la platina Linkam THMSG 600 montada en un microscopio Olympus BX60 con un objetivo de 50X. Este equipo se encuentra en el Laboratorio de Catodoluminiscencia e Inclusiones Fluidas del Laboratorio Nacional de Geoquímica y Mineralogía (LANGEM) del Instituto de Geología, UNAM. La precisión del equipo es de $\pm 0.2^{\circ}\text{C}$ a

bajas temperaturas y de ± 2 °C a altas temperaturas. La salinidad se calculó con el formato en Excel “HOKIEFLINCS_H₂O-NACL” de Steele-MacInnis *et al.* (2012) para el sistema H₂O-NaCl.

3.5. Geoquímica de isótopos estables

El estudio de los isótopos estables se empleó para proveer información sobre la fuente del fluido, la interacción fluido-roca, la temperatura de mineralización y las condiciones físico-químicas (Hoefs, 2015). Para este estudio se tomaron 46 muestras, de 1 a 300 mg de peso, de las cuales se obtuvieron 36 muestras de sulfuros y 3 muestras de calcita en Arista, y 4 muestras de sulfuros y 3 de calcita en Altagracia.

La preparación de las muestras se realizó en el Laboratorio de Arcillas del Departamento de Procesos Litosféricos, IGL-UNAM. Se utilizaron las siguientes herramientas: martillo de geólogo, pinzas, microscopio binocular (ZEISS Stemi 508) (Figuras 14A, B), vasos de precipitados Pyrex, limpiador ultrasónico, acetona, mortero de porcelana y frascos snap cap 0.5 mL.

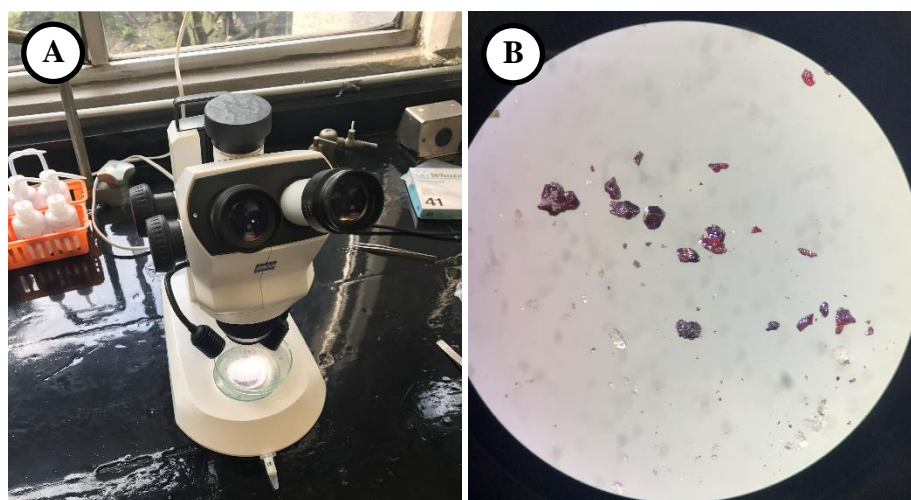
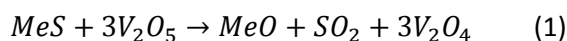


Figura 14. A) Microscopio binocular (ZEISS Stemi 508) del laboratorio de Arcillas (IGL, UNAM). **B)** Granos de proustita-pirargirita, aumento 5X.

Los análisis de las muestras se realizaron en dos laboratorios. El análisis de isótopos de S de los sulfuros se hizo en el Departamento de Ingeniería Minera y Recursos Naturales de los Centros Científicos i Tecnològics de la Universitat de Barcelona. Mientras que el análisis de isótopos de O y C en la calcita se realizó en el Laboratorio de Isótopos Estables del Laboratorio Nacional de Geoquímica y Mineralogía (LANGEM) del Instituto de Geología, UNAM.

3.5.1. Análisis de la composición isotópica del azufre en sulfuros

El análisis de la composición isotópica del azufre en sulfuros se realizó con un espectrómetro de masas EA-DELTA PLUS XP THERMOFISHER. La medición de isótopos de azufre en los sulfuros se realizó convirtiendo éstos en SO₂ (gas) mediante una reacción con un agente oxidante V₂O₅ (ver la Reacción 1). El método consiste en colocar una muestra, entre 0.2 a 3 miligramos de sulfuro, en una cápsula de estaño con V₂O₅. Se realizó un análisis elemental de la cápsula y la separación de los gases mediante una columna cromatográfica, para el posterior análisis del gas SO₂ en un espectrómetro de masas (Faure y Mensing, 2005; De Groot, 2009).



Los estándares utilizados en el análisis se indican en la Tabla 2. El valor de $\delta^{34}\text{S}$ se obtiene a partir de la relación isotópica $^{34}\text{S}/^{32}\text{S}$ de la muestra de referencia en relación a la troilita (meteorito del Cañón del Diablo). Los resultados obtenidos se expresan en ‰ (por mil) relativo al estándar VCDT (*Vienna-Canyon Diablo Troilite*).

Tabla 2. Valores estándares de $\delta^{34}\text{S}$ de las muestras de referencia con relación a *Vienna-Canyon Diablo Troilite* (VCDT).

Estándar	Mineral	$\delta^{34}\text{S}_{\text{VCDT}}$ (‰)
IAEA S-1	Ag ₂ S	-0.30
IAEA S-2	Ag ₂ S	+22.7 ± 0.2
IAEA S-3	Ag ₂ S	-32.3 ± 0.2
IAEA S-4	S	+16.9 ± 0.2
YCEM		+12.8

* IAEA = *International Atomic Energy Agency*, YCEM = Patrones secundarios

3.5.2. Análisis de la composición isotópica de oxígeno y carbono en carbonatos

El análisis de la composición isotópica de oxígeno y carbono en los carbonatos se realizó en un equipo Gas Bench II, acoplado a un espectrómetro de masas de relaciones isotópicas IRMS Thermo MAT 253 + (Entrada dual) con 10 colectores de iones.

La medición de los isótopos de oxígeno y carbono en la calcita se realizó convirtiendo los carbonatos en CO₂ (gas), mediante una reacción con ácido fosfórico (H₃PO₄) (ver Reacción 2). El método consiste en colocar una muestra de calcita (CaCO₃), de 0.3 a 0.4 miligramos de peso, dentro de una cápsula, se le añade ácido fosfórico al 100 %, produciendo una reacción que libera CO₂. Todo este procedimiento se lleva a cabo a una temperatura de 25 °C durante 36 horas. El CO₂ liberado se traslada hacia el espectrómetro de masas, donde se realiza el análisis elemental de las relaciones isotópicas de $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ y $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$. Este procedimiento fue descrito por McCrea (1950).



Los estándares utilizados para los isótopos de oxígeno son V-SMOW (*Vienna-Standard Mean Ocean Water*) y V-PDB (*Vienna-Pee-Dee Belemnite*; ver Tablas 3 y 4). La conversión entre $\delta^{18}\text{O}_{\text{V-PDB}}$ y $\delta^{18}\text{O}_{\text{V-SMOW}}$ se calcula con la siguiente fórmula (Coplen *et al.*, 1983):

$$\delta^{18}\text{O}_{\text{V-SMOW}} = 1.03091 \times \delta^{18}\text{O}_{\text{V-PDB}} + 30.91\text{‰} \quad (3)$$

Tabla 3. Valores estándares de $\delta^{13}\text{C}$ de las muestras de referencia con relación a V-PDB (*Vienna Pee Dee Belemnite*). Recopilado por Coplen *et al.* (2002) y Hoefs (2015)

Estándar	Mineral	$\delta^{13}\text{C}$ (‰)
NBS-19	Mármol	+1.95
LSVEC	LiCO ₃	-46.6 ± 0.2

* NBS = National Bureau of Standards, LSVEC = Lithium carbonate.

Tabla 4. Valores estándares de $\delta^{18}\text{O}$ para diferentes minerales. Recopilado por Coplen *et al.* (2002) y Hoefs, (2015).

Estándar	Mineral	$\delta^{18}\text{O}_{\text{V-PDB}}$ (‰)	$\delta^{18}\text{O}_{\text{V-SMOW}}$ (‰)
NBS-18	Calcita	-23.2 ± 0.1	7.0
NBS-19	TS-Caliza	-2.2	28.6
LSVEC	LiCO ₃	-26.7 ± 0.2	3.4

* NBS = National Bureau of Standards, LSVEC = Lithium carbonate.

CAPÍTULO 4: MINERALOGÍA Y QUÍMICA MINERAL DE LAS ZONAS MINERALIZADAS ARISTA Y ALTAGRACIA

La descripción detallada de las vetas en superficie, obras mineras y núcleos de barrenos se elaboró con base a la estratigrafía de las vetas (i.e., etapas de mineralización). La descripción petrográfica se desarrolló para cada etapa de mineralización.

4.1. Estratigrafía de veta y estructura interna

Para el presente estudio se han considerado las zonas mineralizadas de Arista y Altagracia.

La zona mineralizada de Arista consiste en treinta y nueve vetas, entre las que destacan Viridiana, Splay 5, Splay 66, Sagrario-Sofía, Soledad, Susana, Splay 31, Chuy, Baja, Veta 1, Luz, Candelaria, Aire, Santiago (Figura 15). La empresa DDG se encuentra actualmente extrayendo minerales de las seis primeras vetas y el resto ya fueron explotados. Para el presente estudio se eligieron las vetas Splay 5 y Splay 66 por la distribución espacial de las muestras y la información geológica recolectada en campo. El muestreo se realizó en los diferentes niveles de explotación y barrenación de las vetas Splay 5 y Splay 66 que presentan orientaciones de N64°W/30°NE y N70°W/60°NE.

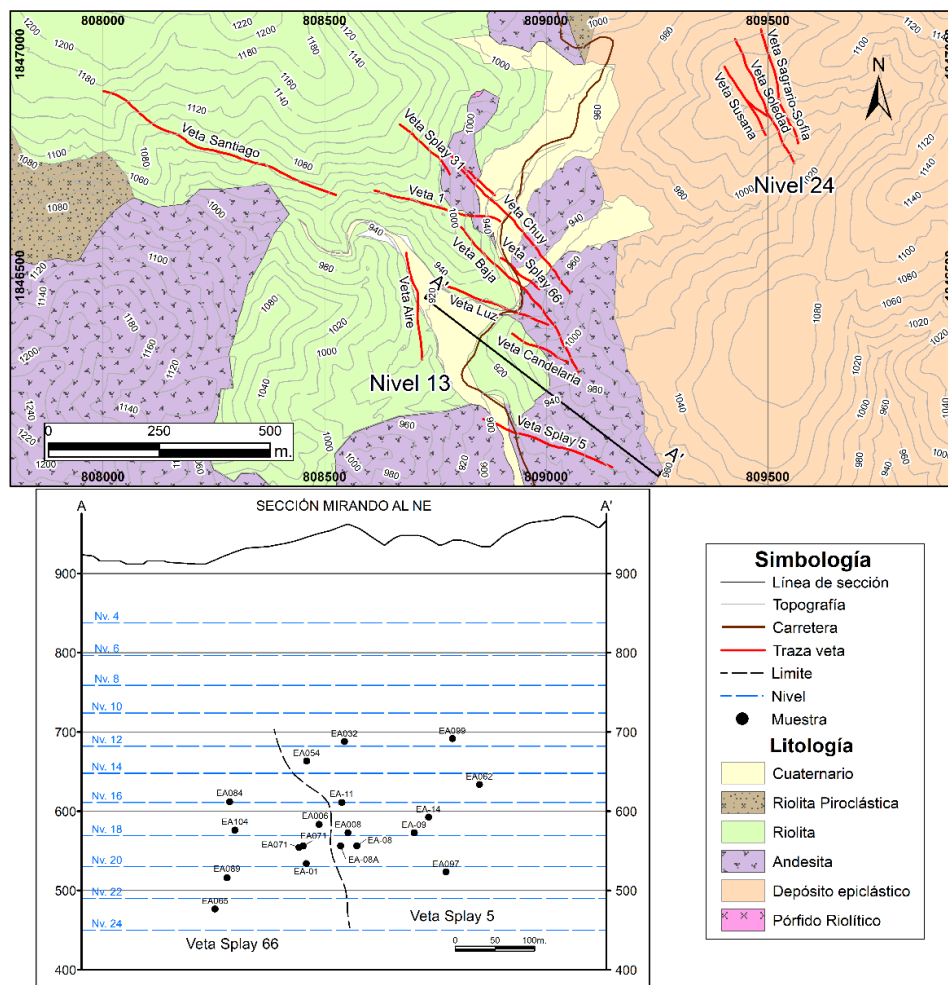


Figura 15. Mapa geológico de la zona mineralizada de Arista y sección longitudinal del muestreo.

La zona mineralizada de Altagracia consiste en cinco vetas: El Huaje, Mirador, Victoria, Independencia y San Juan (Figura 16). Estas vetas fueron explotadas mediante tajos y obras mineras por los antiguos mineros. Actualmente, la empresa DDG se encuentra realizando barrenación desde la superficie. Para el presente estudio se eligió la veta El Huaje por la distribución espacial de las muestras y la información geológica recolectada en campo. El muestreo se realizó en superficie, obra minera y núcleos de barreno de la veta El Huaje que presentan una orientación de N30°E/80°NW.

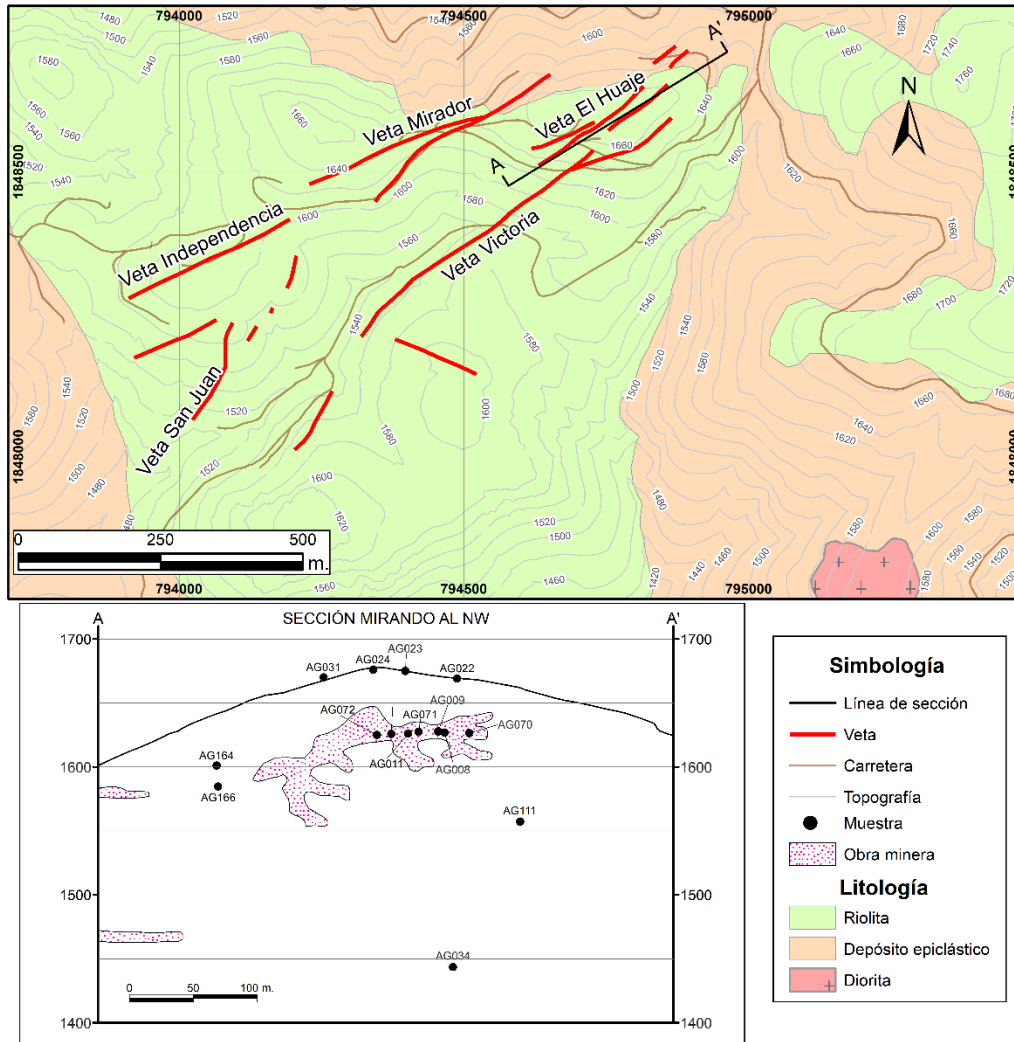
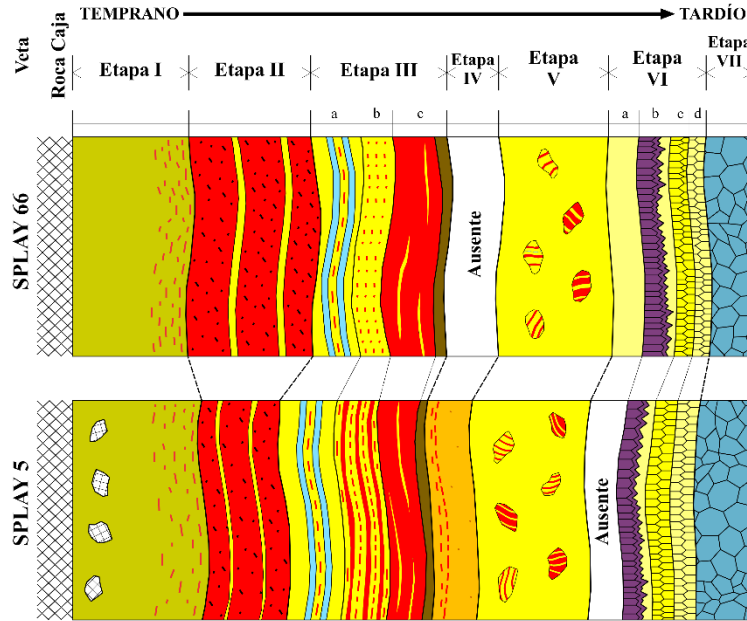


Figura 16. Mapa geológico de la zona mineralizada de Altagracia y sección longitudinal del muestreo.

4.1.1. Estratigrafía de la zona mineralizada Arista

Para elaborar los diagramas de la estratigrafía y el esquema estratigráfico de las vetas se tomó información de la labor minera en explotación y de núcleos de barrenación de exploración. Asimismo, se elaboró un esquema estratigráfico para las vetas Splay 66 y Splay 5 (Figura 17) y un esquema de eventos hidrotermales para cada etapa de mineralización hidrotermal (Figura 18). A continuación, se detallan las características en las 7 etapas principales empleadas para obtener el esquema estratigráfico y el esquema de eventos hidrotermales de la zona mineralizada Arista. En el Anexo A, B y D se adicionaron más fotografías y descripción detallada de las muestras de campo.



ESTRATIGRAFÍA DE LAS VETAS, ZONA MINERALIZADA ARISTA

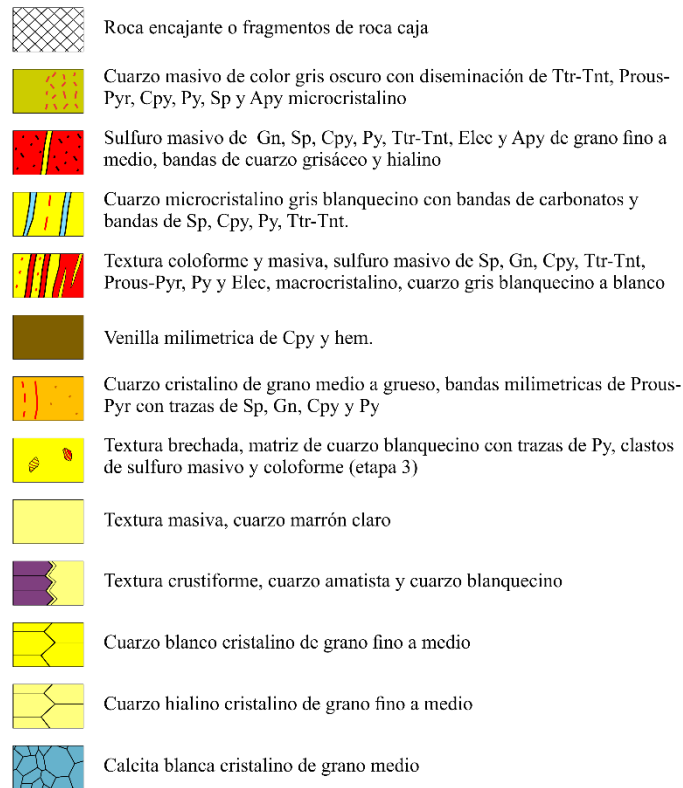


Figura 17. Esquema estratigráfico de las vetas en la zona mineralizada de Arista, elaboradas según su estilo de mineralización y características mineralógicas. Abreviaturas: Apy = arsenopirita, Cpy = calcopirita, Elec = *electrum*, Gn = galena, hem = hematita, Prous = proustita, Py = pirita, Pyr = pirargirita, Sp = esfalerita, Tnt = tennantita, Ttr = tetraedrita.

**ESQUEMA DE EVENTOS HIDROTERMALES
ZONA MINERALIZADA ARISTA**

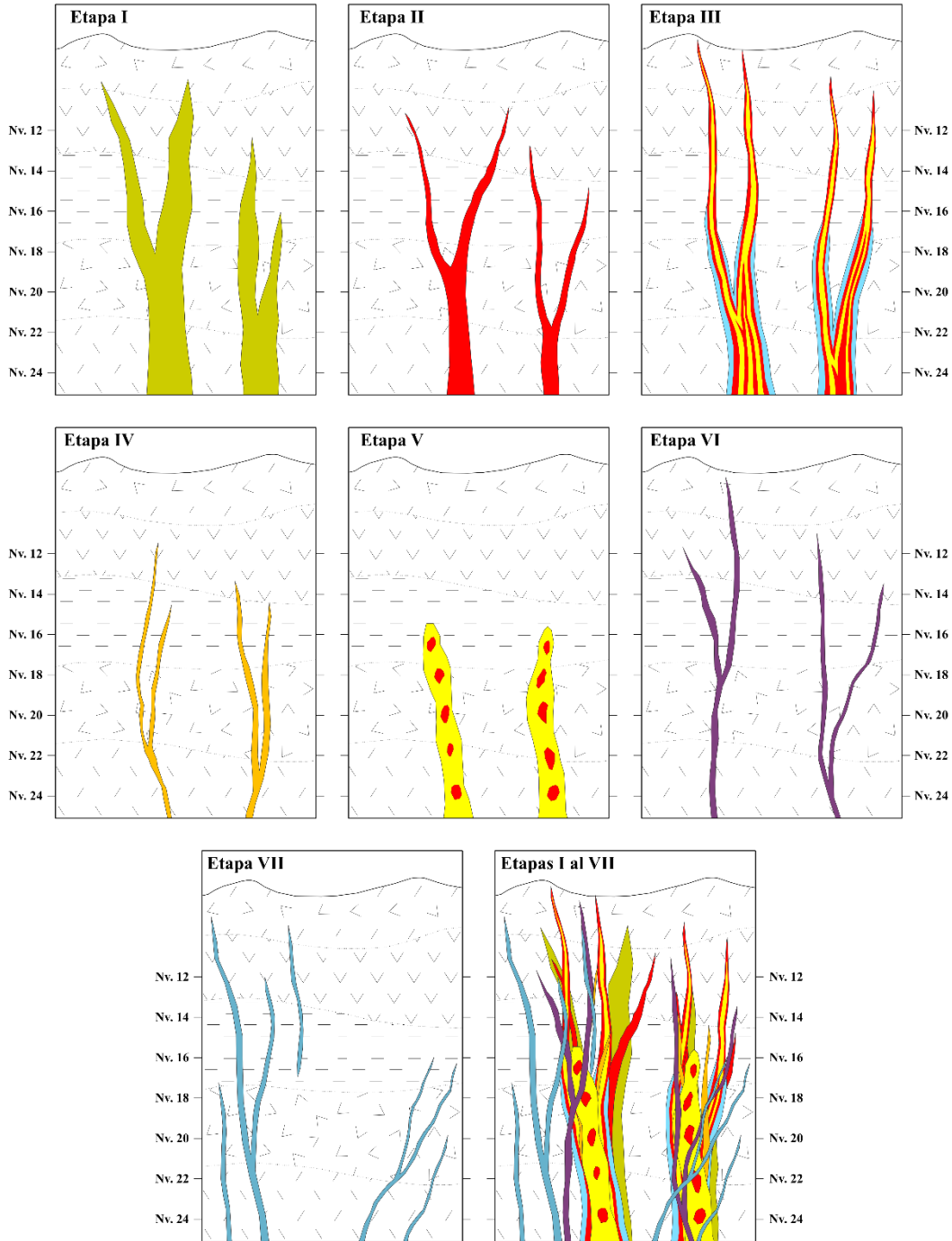


Figura 18. Esquema de eventos hidrotermales en la zona mineralizada de Arista, elaborado con la información de labores mineras y los núcleos de barrenación de la empresa *Don David Gold S.A.*

Etapa I

La etapa I se caracteriza por tener textura brechada (Figuras 19B, C) y clastos polimícticos de lutita, caliza y toba. Los clastos son de redondeados a sub-redondeados y varían en diámetro de 1 a 20 cm. En su mayoría, los clastos se encuentran silicificados (lutitas y calizas), o muestran

moderada argilización y muy débil propilitización en las tobas. La matriz con coloraciones gris oscuro está constituida por microcristales de cuarzo gris oscuro, sulfuros, calcita y sericita. Los sulfuros están constituidos por proustita-pirargirita, tetraedrita-tennantita, calcopirita, esfalerita, galena y pirita. Esta etapa se encuentra en los niveles 12, 14 y 20 de las vetas Splay 5 y Splay 66. Esta etapa es la tercera etapa de mayor importancia económica por su contenido en plata, cobr y menor contenido de zinc-plomo.

Etapa II

Se caracteriza por tener textura masiva (Dong *et al.*, 1995) con sulfuros de grano fino y tramos de textura coloforme (Dong *et al.*, 1995) con bandas de sulfuros (grano medio) y mineral de ganga (Figura 19A). Los sulfuros de grano fino están constituidos por esfalerita, calcopirita, galena, tetraedrita, Ag-tetraedrita, tennantita, pirita, pirargirita y *electrum*. La mineralización no económica está conformada por cuarzo gris blanquecino, calcita y sericita. El contacto con la etapa 1 es muy irregular y presenta concavidades. Esta etapa se encuentra en el nivel 18 del sistema Splay 66 y nivel 12 del sistema Splay 5. Esta etapa es la segunda etapa de mayor importancia económica y volumétrica, por su contenido en plomo, zinc, cobre, plata y oro.

Etapa III

Se caracteriza por su textura masiva y coloforme (Dong *et al.*, 1995) con bandas oscuras (sulfuros) de grano fino a medio y bandas claras (mineral ganga) de grano fino. Los sulfuros macrocristalinos son de esfalerita y galena, mientras que los microcristales son de calcopirita, tetraedrita-tennantita, proustita-pirargirita, *electrum*, arsenopirita y pirita. Los minerales no económicos son el cuarzo, calcedonia, sericita, calcita y ankerita. El contacto con la etapa II presentan irregularidades, aveces formando concavidades. Es la etapa principal de mayor contenido de metales preciosos y de base en el sistema Arista y es la que presenta mayor distribución lateral y vertical. Por tanto, esta etapa representa la primera etapa de mayor importancia económica y volumétrica, por su contenido metálico en zinc, plomo, cobre, plata y oro. La etapa III se encuentra distribuida en los niveles 12, 14, 16, 18, 20 y 22 en las vetas Splay 5 y Splay 66. Esta etapa se subdivide en tres etapas: IIIA, IIIB y IIIC.

Etapa IIIA

Esta subetapa se caracteriza por su textura coloforme (Dong *et al.*, 1995) con bandas claras (mineral ganga) y oscuras (sulfuro). Las bandas claras de cuarzo, calcita y sericita predominan respecto a los sulfuros. Los sulfuros microcristalinos están constituidos por esfalerita (marrón verdoso a amarillento y gris verdoso), galena, calcopirita, pirita y hematita. Los minerales no económicos son el cuarzo gris blanquecino y blanco, calcedonia, carbonato gris amarillento (ankerita) y carbonato blanco (calcita).

Etapa IIIB

Se define por su textura coloforme (Dong *et al.*, 1995) (Figura 19B, C) con bandas oscuras (sulfuro) y claras (ganga). Los sulfuros están conformados por macrocristales de esfalerita (amarillo rosáceo, gris verdoso, verde amarillento, marrón amarillento a verdoso) y galena de grano grueso, y microcristales de calcopirita, sulfosales de plata, sulfosales de cobre-plata, pirita, arsenopirita y *electrum*. Los minerales no económicos son de colores blanquecino y gris amarillento, y varían en un rango de 3 mm a 10 cm de tamaño. Están constituidos por microcristales de cuarzo gris blanquecino a hialino, calcedonia, carbonato (calcita y ankerita), arcilla y sericita.

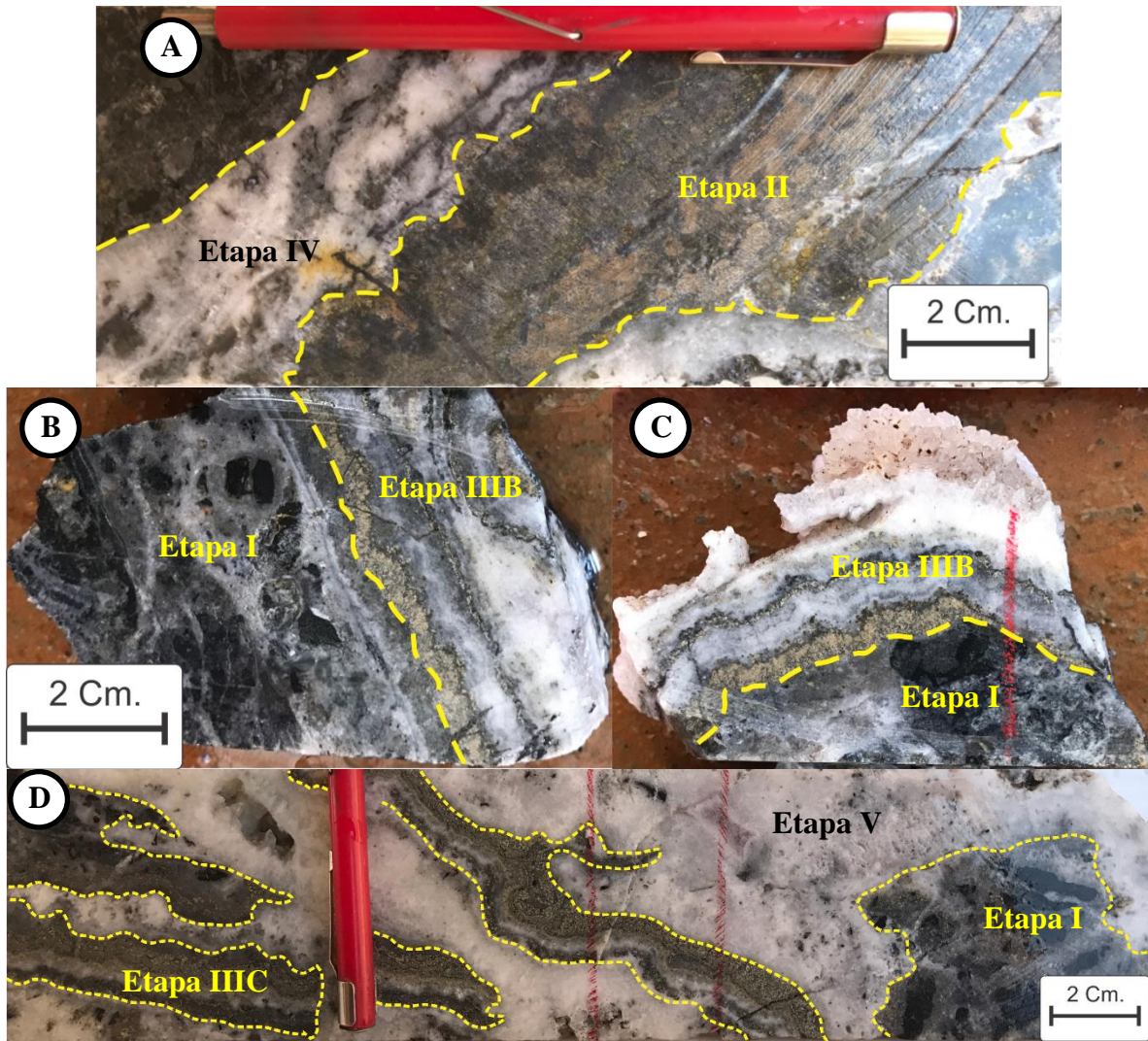


Figura 19. Fotografía de los contactos irregulares entre diferentes etapas de la Veta Splay 5. **A)** Nivel 12 donde se observan dos eventos hidrotermales: i) Etapa II con textura masiva de grano fino, microcristales de sulfuros esfalerita (marrón claro y verde oscuro), galena, calcopirita, pirita, cuarzo, calcita y sericita; y ii) Etapa IV con textura masiva de grano fino, microcristales de platas rojas, pirita, calcopirita, esfalerita, cuarzo y calcita. **B y C)** Nivel 12 donde se observan dos etapas de mineralización: i) Etapa I con textura brechada, clastos de lutita silicificada, matriz de microcristales de pirita, calcopirita y cuarzo; ii) Etapa IIIB con textura coloforme con bandas de sulfuros de grano grueso de esfalerita (amarillo rosáceo), calcopirita y pirita, cuarzo microcristalino blanco-hialino y cuarzo marrón rosáceo. **C)** Nivel 14 donde se observan tres etapas de mineralización: i) Etapa I con textura brechada clastos de lutita silicificado, matriz de cuarzo microcristalino gris oscuro, disseminación de pirita y mineral gris oscuro; ii) Etapa IIIC con textura coloforme bandas de sulfuros de esfalerita (marrón verdoso a amarillento), calcopirita y pirita, y cuarzo microcristalino gris blanquecino; iii) Etapa V con textura masiva de cuarzo microcristalino con presencia de geodas de cuarzo hialino y pirita disseminada.

Etapa IIIC

Esta subetapa se diferencia de las anteriores por su textura masiva (Figura 19D) con escasos tramos de textura coliforme (Dong *et al.*, 1995). Los sulfuros macrocristalinos de grano medio son de esfalerita (marrón amarillento a verdoso, marrón rosáceo, gris verdoso y verde amarillento) y galena, y los minerales microcristalinos son calcopirita, Ag-tetraedrita, tennantita, proustita, pirargirita, *electrum*, arsenopirita y pirita. Los minerales no económicos son de colores blanquecino a blanco y están constituidos por cuarzo, calcita y sericita. Además, se observan venillas milimétricas de sulfuros con óxidos de hierro de una etapa tardía que cortan a los sulfuros de la etapa IIIC. Esta etapa tardía está constituida por calcopirita, pirita, tetraedrita, tennantita y trazas de esfalerita y galena. Los óxidos de hierro (hematita) presentan trazas de pirita y calcopirita. El mineral no económico lo conforma generalmente cuarzo lechoso y su espesor se encuentra en un rango de 1 a 5 mm.

Etapa IV

Esta etapa es muy característica por tener textura masiva (Dong *et al.*, 1995), donde predomina los minerales blancos respecto a los sulfuros. La textura masiva (Figura 19A) está constituida por sulfuros microcristalinos de pirargirita, miargirita, sulfosales de cobre-plata, calcopirita, pirita, esfalerita, galena y arsenopirita. Los minerales no económicos de color blanquecino son cuarzo, calcita y sericita. Dentro de esta matriz de minerales blancos hay geodas con cristales milimétricos de cuarzo de dispersos tamaños. Esta etapa se encuentra en los niveles 12, 16 y 20 de la veta Splay 5. Esta etapa es la última con valor económico importante en plata, cobre y oro.

Etapa V

La etapa V se caracteriza por su textura brechada (Figura 19D). La textura brechada se caracteriza por una matriz sostenida y clastos polimícticos. La matriz está constituida por cuarzo lechoso, calcedonia, calcita, sericita, arcillas en oquedades y venillas milimétricas de cuarzo hialino con sulfuros diseminados (esfalerita, calcopirita, pirita, sulfosales de cobre-plata, arsenopirita y trazas de *electrum*). Además, algunos tramos de la matriz presentan textura crustiforme (Dong *et al.*, 1995). Dentro de la matriz hay de geodas con cristales eudrales de cuarzo milimétrico. Las brechas polimícticas tienen clastos redondeados a sub-redondeados de las etapas I, II y III, y de roca encajonante (lutita y tobas riolítica). Esta etapa se encuentra en los niveles 20, 19, 16, 14 de las vetas Splay 5 y Splay 66. Esta etapa es de menor importancia económica respecto a las etapas I, II, III y IV por su concentración en zinc, plomo, cobre y plata.

Etapa VI

Se caracteriza por tener una secuencia de vetillas macrocristalina y microcristalina de cuarzo marrón claro con textura *comb* (Dong *et al.*, 1995), cuarzo amatista-blanco con textura crustiforme (Dong *et al.*, 1995), cuarzo lechoso – hialino con textura *comb* (Dong *et al.*, 1995). Los espesores de las vetillas varían entre 1 mm y 10 cm. El cuarzo lechoso presenta trazas de pirita. Se puede trazar desde el nivel 20 hasta nivel 10 de la veta Splay 5 y Splay 66 y es la de menor importancia económica.

Etapa VII.

Se caracteriza por tener vetillas de calcita con textura masiva y *comb* (Dong *et al.*, 1995). Esta etapa corta a todas las etapas anteriores.

4.1.2. Estratigrafía de la zona mineralizada Altagracia

Para realizar los diagramas de esquema estratigráfico y el esquema de eventos hidrotermales se tomó la información de las vetas que afloran en superficie, en labores mineras y los núcleos de barrenación. Se ha elaborado el esquema estratigráfico para las vetas Victoria, San Juan, Mirador y El Huaje (Figura 20), y se confeccionó un esquema de eventos hidrotermales para cada etapa hidrotermal (Figura 21). A continuación, se detalla las características de las 5 etapas principales empleadas para obtener la estratigrafía y el esquema de eventos hidrotermales de la zona mineralizada de Altagracia. En el Anexo D se detalla la descripción de muestras de campo.

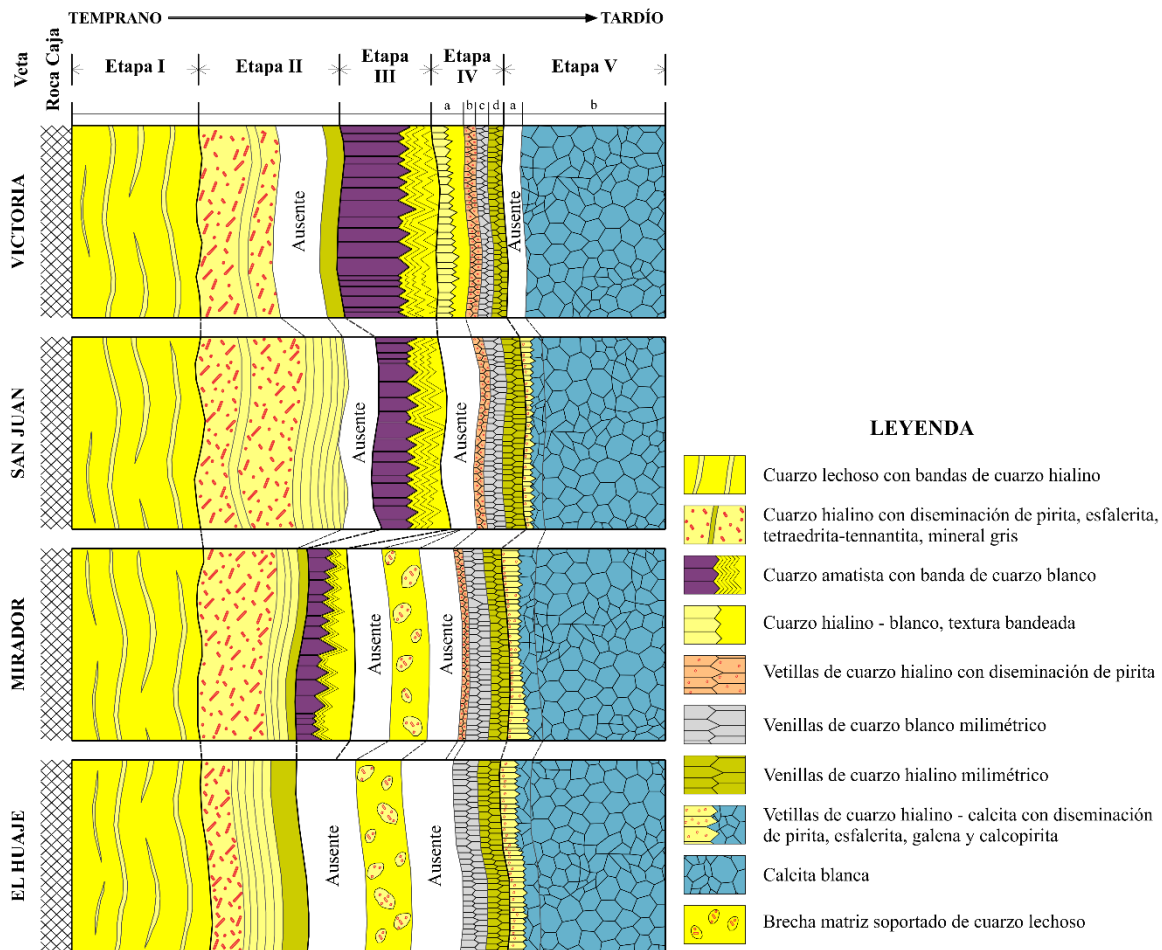


Figura 20. Esquema estratigráfico de las vetas en la zona mineralizada de Altagracia, elaborado según el estilo de mineralización y características mineralógicas.

Etapa I

Esta etapa se caracteriza por tener textura masiva (Dong *et al.*, 1995) (Figura 22A), color de blanco a gris blanquecino, y tramos con texturas bandeada con coloraciones claras a hialinas. Los tramos masivos se caracterizan por su contenido es cuarzo lechoso con trazas de sulfuros, mientras las bandas claras están constituidas por cuarzo hialino. En la superficie el cuarzo masivo presenta coloraciones blanco lechoso con tramos más amarillentos y a profundidad son de color blanquecino. Estos cuarzos albergan geodas con microcristales de cuarzo hialino. Los óxidos de hierro, limonita y manganeso están relleno las fracturas y los espacios de las geodas. Además, hay venillas milimétricas de calcita cortando (fracturas) y relleno espacios entre los cristales de

**ESQUEMA DE EVENTOS HIDROTERMALES
ZONA MINERALIZADA ALTAGRACIA**

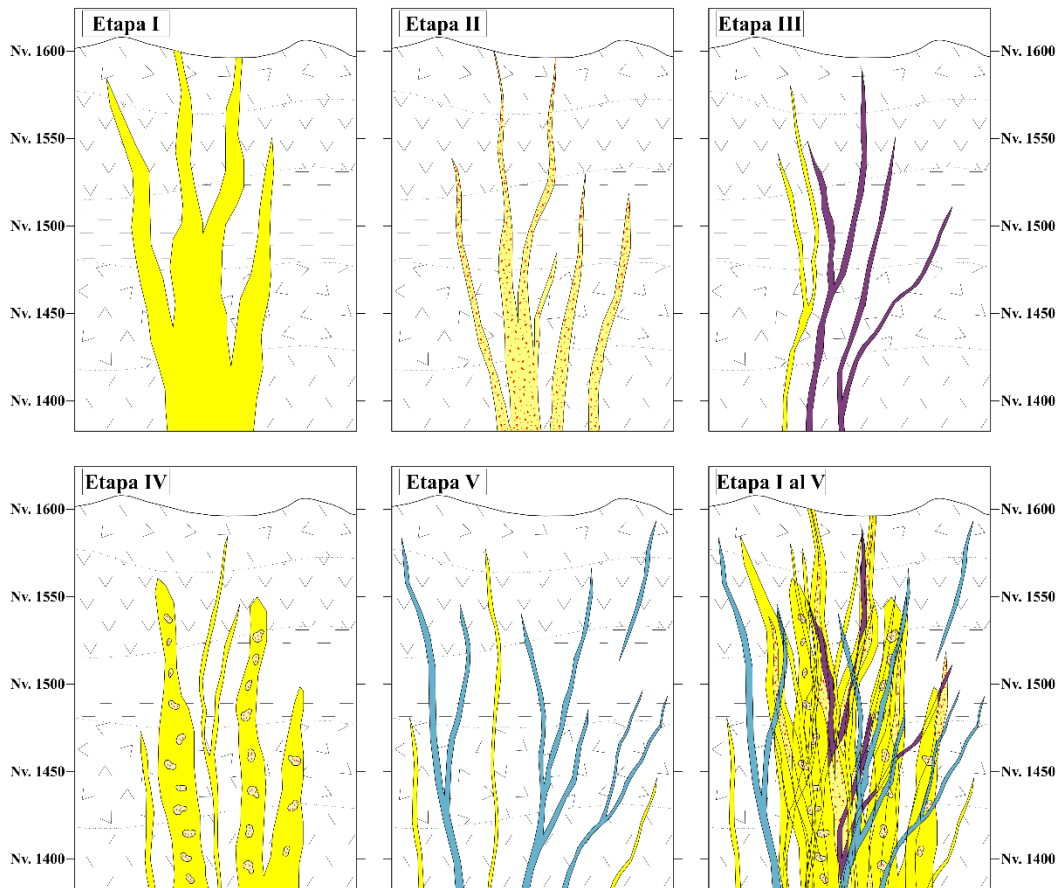


Figura 21. Esquema de eventos hidrotermales en la zona mineralizada de Altagracia, elaborado con la información de los afloramientos de las vetas, labores mineras y los núcleos de barrenación de la compañía *Don David Gold S.A.*

cuarzo. Esta etapa, en su mayoría se encuentra junto a la roca encajonante (riolita y andesita), que representa una alteración argílica selectiva con illita, caolinita, halloysita, montmorillonita, pirita y calcita (Aguilar-Austria, 2019). Esta etapa se encuentra en los niveles 1670 (superficie), 1600 y 1580 de la veta El Huaje. Esta etapa es la de menor importancia económica por su contenido en plata, cobre y zinc.

Etapa II

Esta etapa se caracteriza por tener tramos con textura masiva y coloforme (Dong *et al.*, 1995). La textura masiva está constituida por dos tipos de cuarzos: 1) el cuarzo gris oscuro microcristalino, que se caracteriza por una intensa diseminación de pirita y minerales gris oscuro (Figuras 22A, B); y 2) el cuarzo blanco masivo presenta con trazas de pirita (Figura 22C). Ambos tipos de cuarzo presentan geodas de 2 a 10 mm de diámetro con microcristales eudrales de cuarzo hialino. Además, la sericita y calcita se encuentran relleno los espacios de los cristales de cuarzo y las geodas. La textura coloforme se caracteriza por cuarzo masivo gris blanquecino con bandas de cuarzo hialino microcristalino. En la matriz del cuarzo gris blanquecino hay geodas con cristales milimétricas de cuarzo, las que fueron rellenas con limonita y óxidos de manganeso.

Las venillas milimétricas de cuarzo hialino se encuentran cortando a los tramos masivos. Esta etapa se encuentra en los niveles 1620 y 1670 (superficie). Esta etapa es la de mayor importancia económica por su contenido de plata, cobre y zinc.

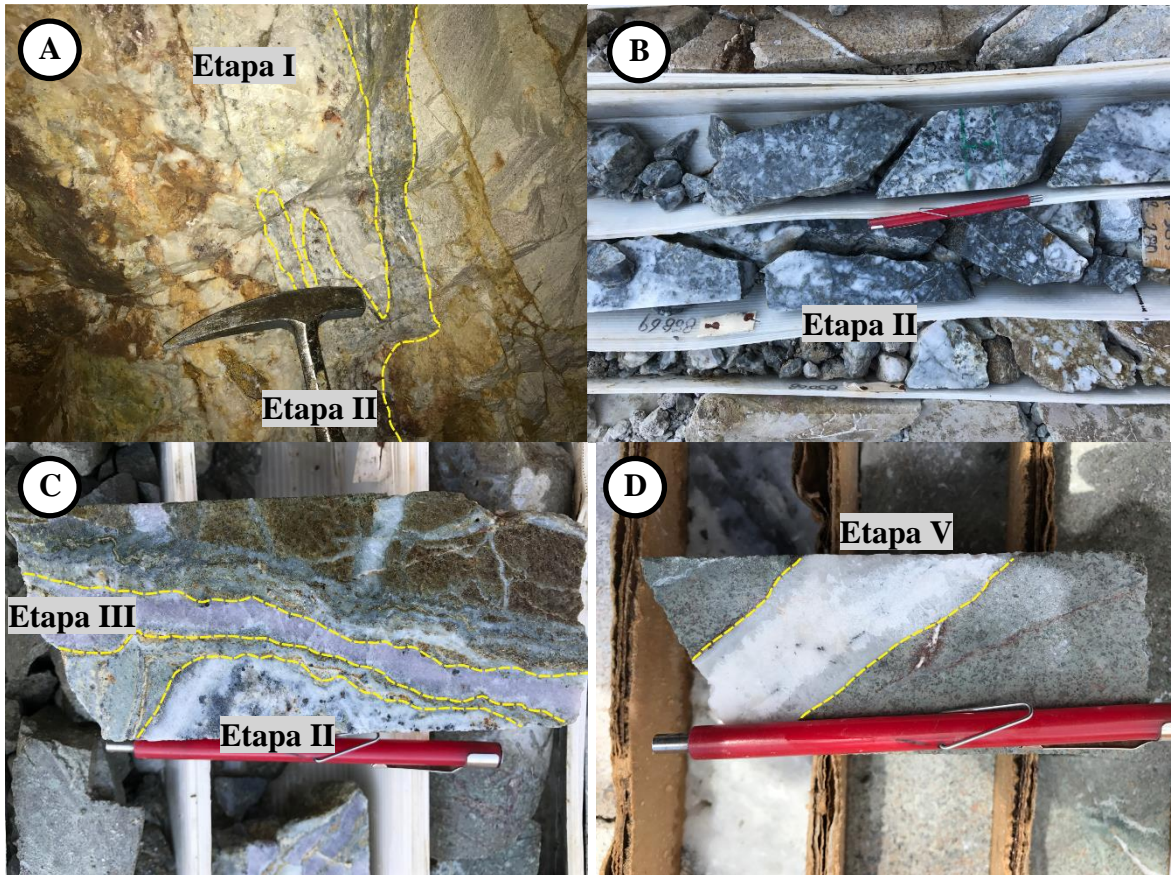


Figura 22. Fotografías de muestras de núcleo de barrenos y labor minera de la zona mineralizada de Altagracia. **A)** Tope de la labor minera de la veta El Huaje, donde se observan dos eventos hidrotermales: i) Etapa I con textura masiva formada por microcristales de cuarzo y trazas de pirita; ii) Etapa II con microcristales de pirita, mineral gris oscuro y cuarzo con textura masiva. **B)** Núcleos de barreno de la veta El Huaje con pirita y calcopirita diseminada y mineral gris oscuro microcristalinos formando textura brechada, los clastos son de cuarzo masivo (calcedonia). **C)** Núcleo de barreno de la veta El Huaje donde se observan dos eventos hidrotermales: i) Etapa II con pirita diseminada y mineral gris oscuro microcristalino en una matriz de cuarzo lechoso; ii) Etapa III con textura masiva de cuarzo amatista macrocristalino. **D)** Venilla de cuarzo y calcita, en el contacto con la roca caja hay cuarzo hialino y en el centro hay calcita con sulfuros diseminados con textura crustiforme.

Etapa III

La etapa III se caracteriza por presentar textura colorme y crustiforme (Dong *et al.*, 1995) (Figura 22C), generalmente está constituida por cuarzo amatista macrocristalino con microcristales de cuarzo gris hialino en el centro. La sericita y la calcita se encuentran relleno espacios entre los cristales de cuarzo. Esta etapa se encuentra en el nivel 1620 y es de menor importancia económica.

Etapa IV

La etapa IV se caracteriza por presentar textura brechada. También se observan varias secuencias de vetillas de cuarzo milimétricos que cortan a la matriz y clasto. Los clastos de la brecha son fragmentos de la etapa II y la matriz es de cuarzo lechoso y se encuentra cortando a las etapas I, II y III. Las venillas de cuarzo presentan espesores de 5 a 20 mm. Las venillas de cuarzo hialino se caracterizan por tener sulfuros diseminados (pirita, calcopirita), mientras que las otras venillas de cuarzo blanco y hialino no presentan sulfuros. Además, se observa sericita y calcita relleno los espacios abiertos y las fracturas.

Etapa V

La etapa V se caracteriza por tener dos fases: de venilleo de calcita-cuarzo (Figura 22D) y calcita. Las venillas de calcita-cuarzo con textura crustiforme (Dong *et al.*, 1995) presentan bordes de microcristales de calcita y al centro microcristales de cuarzo con diseminación de sulfuros (esfalerita, galena, calcopirita y pirita). Las vetillas de calcita con espesores de 5 mm a 10 cm presentan texturas masivas (Dong *et al.*, 1995) con trazas de sulfuros (pirita). Generalmente, esta etapa se encuentra alejada unos metros de las vetas de cuarzo con sulfuros. Esta etapa es de menor importancia económica con respecto a la etapa II.

4.2. Mineralogía

4.2.1. Zona Mineralizada Arista

Etapa I

De acuerdo con el estudio petrográfico de las láminas delgado-pulidas se observaron dos asociaciones mineralógicas principales: 1) cuarzo, pirita, esfalerita, calcopirita, galena, sericita, illita-esmectita y calcita; 2) cuarzo, pirita, arsenopirita, calcopirita, tetraedrita-tennantita (Tr), proustita-pirargirita (Pr), sericita, illita-esmectita y calcita.

La **primera asociación mineral** presenta dos estilos de mineralización: a) reemplazamiento de los minerales máficos y b) diseminación dentro de una matriz de cuarzo. Ambos estilos de mineralización se encuentran dentro de los clastos polimícticos que están constituidos de toba andesítica y riolítica. De acuerdo con su textura, se determinó la siguiente secuencia paragenética: pirita → esfalerita → galena → calcopirita.

La pirita se presenta como cristales subedrales a anedrales de grano fino, la mayoría de los cristales se encuentran coexistiendo con calcopirita, esfalerita y galena. La esfalerita, calcopirita y galena están presentes como cristales anedrales de grano fino.

La ganga está conformada por cuarzo, illita-esmectita, sericita y calcita. El cuarzo se presenta en forma de cristales anedrales y subedrales de grano medio a fino; dicho mineral se encuentra relleno las fracturas de los clastos. La sericita se encuentra intercreciendo con cuarzo y, a su vez, en los bordes y fracturas de los cristales de plagioclasa. La calcita se presenta como cristales anedrales de grano fino; generalmente se encuentran en vetillas finas de 2 a 5 μm de espesor.

La **segunda asociación mineral** presenta dos estilos de mineralización: a) diseminación, donde los sulfuros se presentan dentro de una matriz de cuarzo e illita-esmectita; y b) reemplazamiento, donde es característico que los sulfuros presenten textura de reabsorción; estas texturas se observan en los cristales de Pr, Tr, calcopirita y pirita. De acuerdo con su textura, se determinó una secuencia paragenética: pirita → arsenopirita → esfalerita → arsenopirita + calcopirita → Pr → Tr (Figura 23).

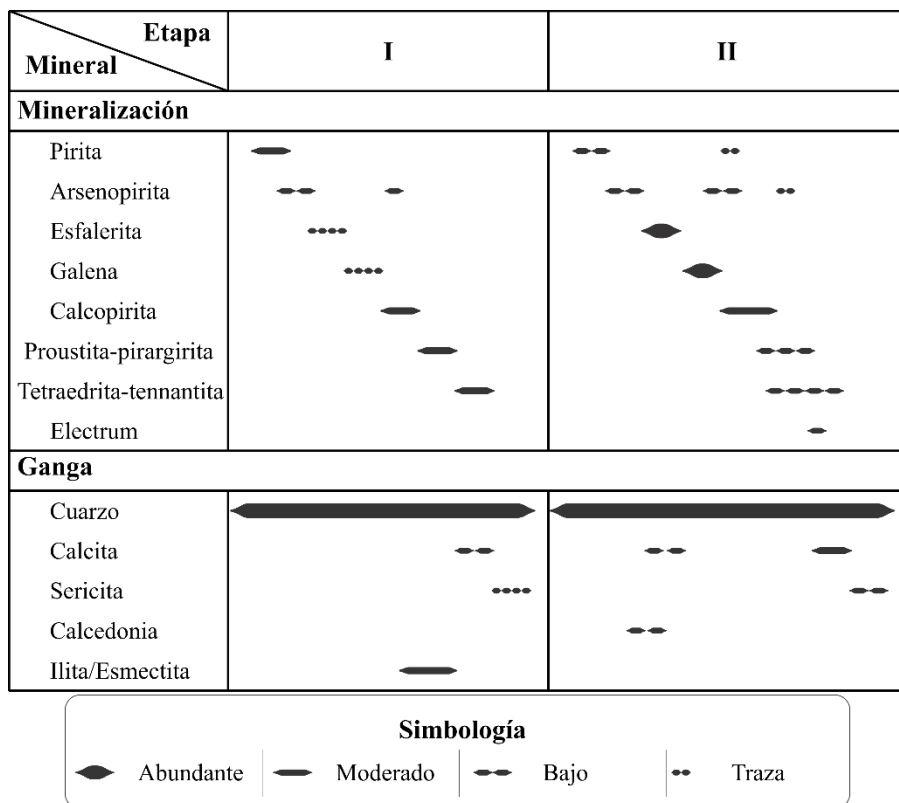


Figura 23. Secuencia mineral para las etapas I y II en la zona mineralizada de Arista.

La pirita aparece como cristales anedrales a subedrales de grano fino (50 a 150 μm). Los bordes de los cristales de pirita en contacto con Pr y calcopirita son muy irregulares (Figura 24E). En algunas ocasiones se encuentran formando bahías, que indican condiciones de inestabilidad química (texturas de reabsorción).

La arsenopirita se presenta como cristales anedrales y subedrales de grano fino. En su mayoría se encuentra coexistiendo con calcopirita y Pr. Los bordes de los cristales de arsenopirita en contacto con Pr y pirita son muy irregulares indicando texturas de reabsorción. Además la arsenopirita y calcopirita están intercreciendo.

La Pr se observan como cristales anedrales de grano fino, en su mayoría coexisten con calcopirita, pirita, arsenopirita y Tr (Figura 24C, F). La Pr generalmente se encuentran englobando a los cristales de calcopirita y Tr, los contactos son muy irregulares y a su vez se encuentran como inclusiones sólidas (micrométricas) dentro de pirita. Los cristales de Pr se encuentran diseminados dentro de los cristales anedrales de ilita/esmectita.

Los cristales de Tr son anedrales, de tamaño $<30 \mu\text{m}$, se encuentra coexistiendo con calcopirita, Pr y pirita. Los bordes de los cristales en contacto con calcopirita, Pr y pirita son muy irregulares y algunas ocasiones se encuentran invadido casi completo por Pr (Figura 24D) indicando condiciones de desequilibrio y formando textura de reabsorción.

La mineralización no económica está constituida de cuarzo, ilita/esmectita, calcita y sericita (Figuras 24A, B). El cuarzo se presenta en forma de cristales anedrales y subedrales de grano medio (150 a 600 μm) y fino (20 a 70 μm). Algunos de los cristales de grano fino presentan una leve recristalización formando una textura en mosaico (Dong *et al.*, 1995). La ilita/esmectita se ob-

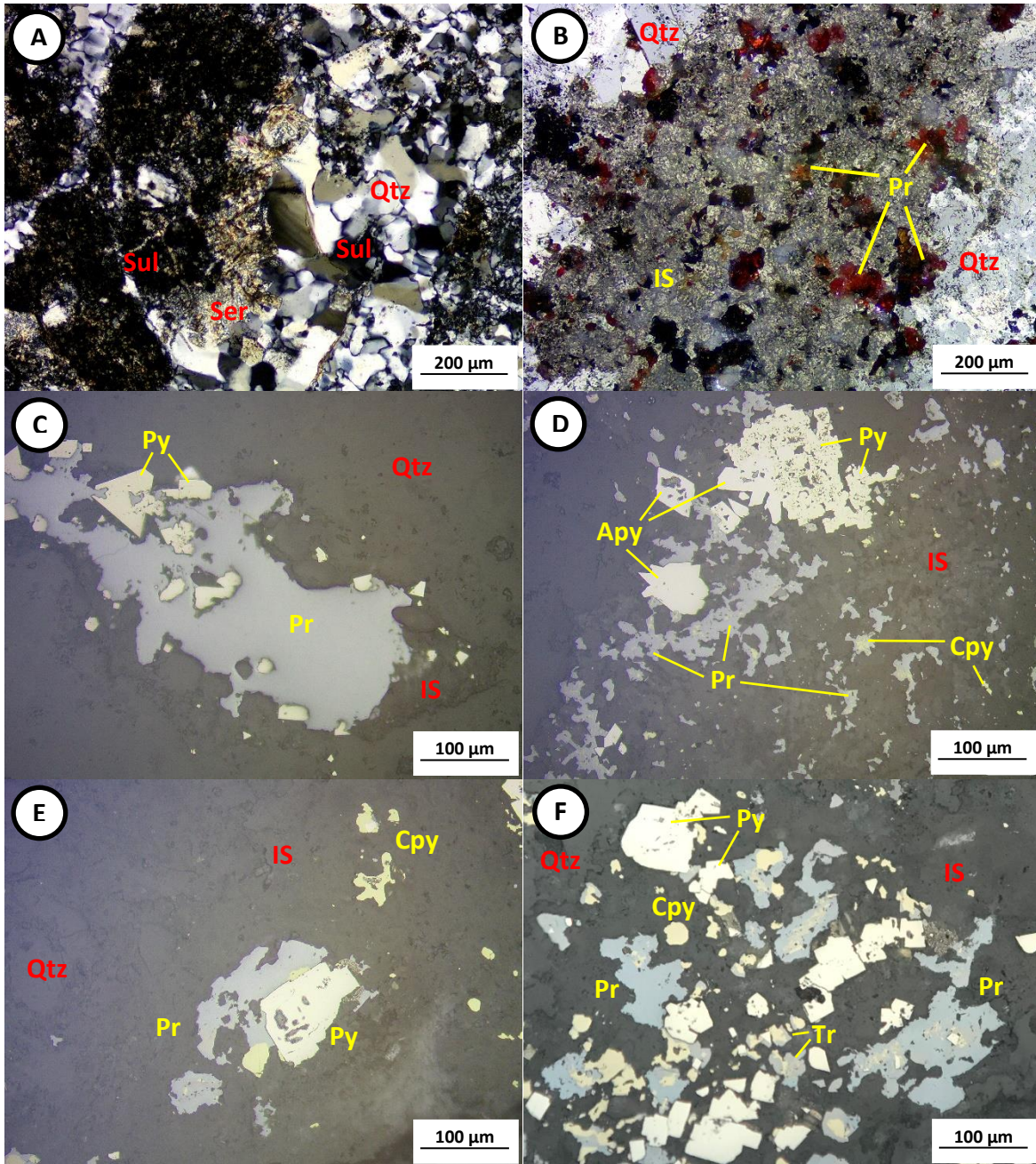


Figura 24. Fotomicrografía de la Veta Splay 5, Nivel 12, Etapa I (zona mineralizada de Arista). **A)** Cristales anedrales de cuarzo, sericita, sulfuros de color negro y clasto argilizado; **B)** cristales de proustita-pirargirita en una matriz de illita-esmectita englobado por cuarzo; **C)** pirita con bordes de corrosión e inclusiones de proustita-pirargirita evidencia de disolución; **D)** proustita-pirargirita relleno de los espacios entre los cristales de arsenopirita y englobando a calcopirita; **E)** pirita con bordes de corrosión e inclusiones de proustita-pirargirita evidencia de disolución; **F)** proustita-pirargirita y tetraedrita-tennantita englobando a calcopirita. Abreviaturas: Cpy = calcopirita, IS = illita-esmectita, Pr = proustita-pirargirita, Py = pirita, Qtz = cuarzo, Ser = sericita, Sul = sulfuro, Tr = tetraedrita-tennantita. Referencia de las abreviaturas de los minerales. Simbología incluida en la figura.

servan como cristales anedrales dentro de una matriz de cuarzo y englobando a los sulfuros pirita, arsenopirita, calcopirita, Pr y Tr. La calcita y sericita se encuentran dentro de los espacios vacíos de cuarzo, a su vez, intercreciendo con cuarzo.

Etapa II

Con el estudio petrográfico de láminas delgadas se determinaron dos asociaciones mineralógicas principales: 1) cuarzo, pirita, esfalerita, galena, calcopirita, calcita y sericita; 2) cuarzo, esfalerita, calcopirita, galena, pirita, Pr, Tr, arsenopirita, *electrum*, calcita y sericita. La segunda asociación es la más importante económica y volumétricamente por su contenido en oro y plata.

La **primera asociación mineral** se caracteriza por su contenido de metales de base y su estilo de mineralización, que es diseminado en una matriz de cuarzo. De acuerdo con su característica texturales se determinó la siguiente secuencia paragenética: pirita → esfalerita → galena → calcopirita.

La pirita se presenta como cristales anedrales y subedrales de grano fino que generalmente se encuentra coexistiendo con esfalerita, calcopirita y galena. La esfalerita se manifiesta como cristales anedrales de grano medio a fino. Los bordes de los cristales de esfalerita en contacto con calcopirita y galena son irregulares y a veces forman concavidades, indicando condiciones de desequilibrio. La calcopirita se presenta como cristales anedrales de grano medio a fino; la calcopirita se encuentra englobando cristales de galena y, algunas veces, cristales de esfalerita.

La **segunda asociación mineral** está constituida por metales preciosos y base, donde los cristales de esta asociación presentan dos tipos de relación de corte: Intercrecimiento y reemplazamiento. El intercrecimiento involucra arsenopirita–galena, pirita–arsenopirita–calcopirita, calcopirita–Tr, arsenopirita–Tr. El reemplazamiento se observa en los siguientes pares de minerales: pirargirita–Tr, calcopirita–Tr y calcopirita–esfalerita. De acuerdo con la petrografía se obtuvo la siguiente secuencia paragenética: pirita → arsenopirita → esfalerita → arsenopirita + galena → pirita + arsenopirita + calcopirita → calcopirita → calcopirita + Pr + Tr → pirita + Pr + Tr + *electrum* → Tr (Figura 23).

Los cristales anedrales y subedrales de pirita entre 50 y 350 µm de tamaño que presentan bordes irregulares, en algunos casos se forma bahías (Figuras 25D, F). Las fracturas de pirita están rellenas por una etapa tardía de calcopirita y Tr.

Los cristales anedrales de esfalerita entre 100 y 820 µm de tamaño que presentan inclusiones micrométricas de calcopirita (enfermedad de calcopirita por Barton, 1970, 1978) distribuidos sin orden específico. A su vez, las fracturas están rellenas por una etapa tardía de calcopirita, galena, Tr, cuarzo y calcita (Figura 25A).

Se han identificado dos tipos de cristales anedrales de *electrum* (color amarillo naranja y amarillo claro; ver Figura 25A) entre 1 a 5 µm y 12 a 30 µm de tamaño, que generalmente está coexistiendo con calcopirita–Tr–galena–esfalerita, esfalerita–galena y calcopirita.

Los cristales anedrales de Tr entre 50 y 470 µm de tamaño que generalmente coexisten con pirita–galena–calcopirita–Pr. Los bordes de los cristales son muy irregulares (Figuras 25B, D, E, F), ya que algunas veces presentan formas de bahía indicando condiciones de desequilibrio. Estos bordes se observan en contacto con los siguientes minerales: Pr, calcopirita, pirita y galena.

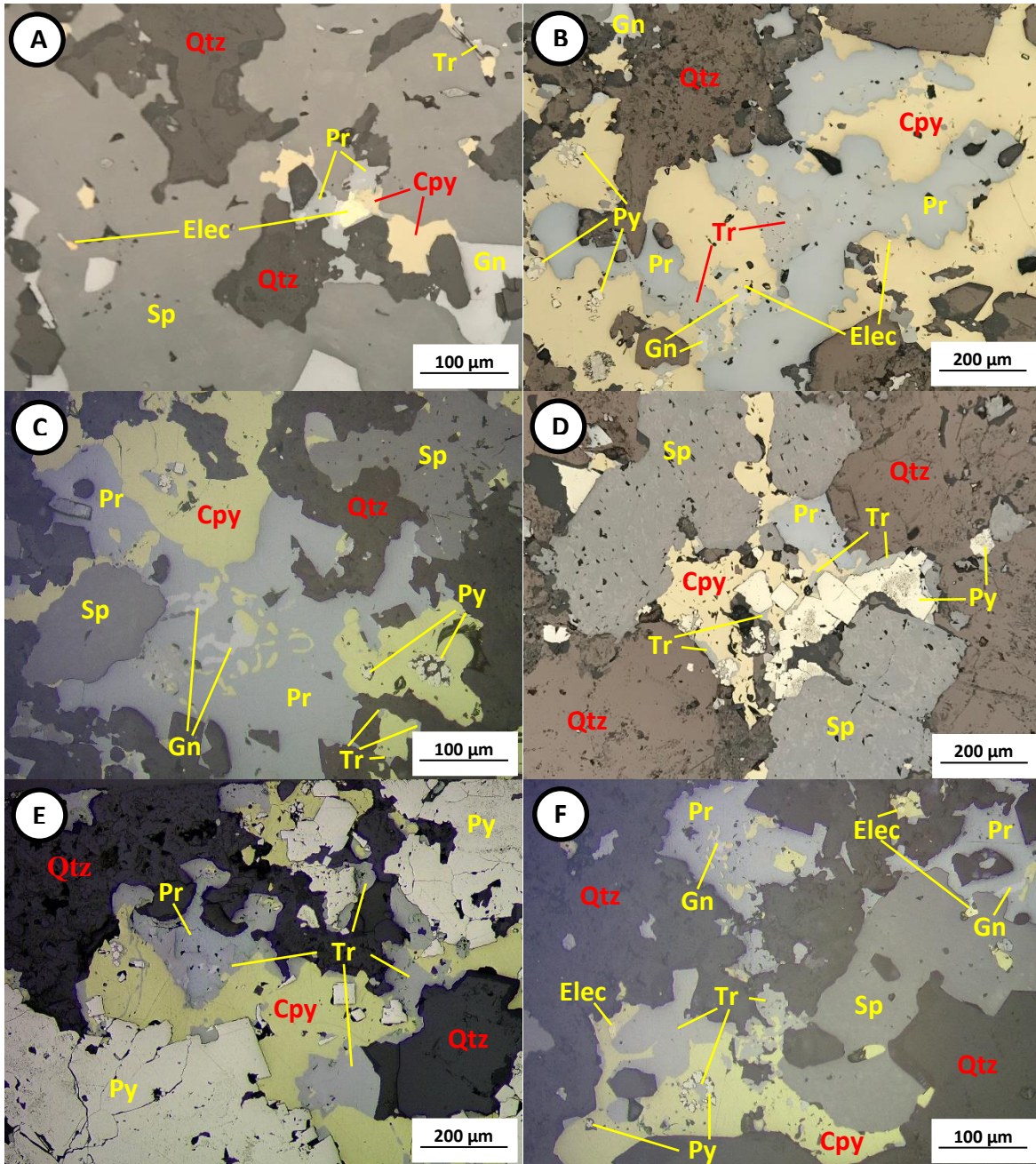


Figura 25. Fotomicrografía de la Veta Splay 5, Nivel 12, Etapa II (zona mineralizada de Arista). **A)** Agregados de cristales anedrales de esfalerita, galena, calcopirita, Pr, Tr, *electrum* y cuarzo; **B)** textura de reabsorción entre los cristales de Pr y Tr, pirita y Tr; **C)** proustita-pirargirita englobando a calcopirita y galena, y borde de esfalerita muy irregulares; **D)** bordes de los cristales de pirita muy irregulares en contacto con Tr; **E)** bordes de corrosión de pirita y Pr rellenas por Tr; **F)** asociación de cristales anedrales de esfalerita, calcopirita, Pr, Tr, galena, pirita, *electrum* y cuarzo. Abreviaturas: Cpy = calcopirita, Elec = *electrum*, Gn = galena, Pr = proustita-pirargirita, Py = pirita, Qtz = cuarzo, Sp = esfalerita, Tr = tetraedrita-tennantita. Referencia de las abreviaturas de los minerales. Simbología incluida en la figura.

Los cristales anedrales de Pr (de 50 y 540 μm de tamaño) se encuentran coexistiendo con calcopirita, Tr, galena y, en algunas ocasiones, con esfalerita. Los cristales presentan bordes muy irregulares (Figuras 25B, C, E, F) y, a veces, forman bahías en contacto con calcopirita y Tr, formando texturas de reabsorción, lo cual sugiere condiciones de desequilibrio.

Los cristales subedrales de arsenopirita (10 a 120 μm de tamaño) en su mayoría coexisten con calcopirita, galena, calcita y cuarzo. Como mineral de ganga se tiene cuarzo, calcedonia, calcita, sericita.

El cuarzo varía en dimensiones de 25 a 250 μm (grano fino), 150 a 400 μm (grano medio) y 0.7 a 2.0 mm (grano grueso), presentando la siguiente secuencia paragénetica: grueso \rightarrow medio \rightarrow fino. Por lo regular, el cuarzo de etapa temprana (grano grueso) presentan recristalización formando una textura plumosa. Se han identificado tres etapas de cristalización de calcita: A) etapa temprana, que inició después de la cristalización de esfalerita; B) etapa tardía, donde la calcita se encuentra relleno de espacios entre los granos de sulfuro y cuarzo; y C) venillas de calcita (de 10 a 50 μm de espesor) relleno de fracturas que cortan a los cristales de cuarzo y sulfuros. Los cristales anedrales de sericita (de 2 a 130 μm de tamaño) se encuentran relleno de espacios y fracturas de los cristales de cuarzo y sulfuro.

Etapa III

La etapa III se subdividió en las etapas IIIA, IIIB y IIIC. La descripción petrográfica se realizó en estas tres etapas.

Etapa IIIA

Con la petrografía se determinó la siguiente asociación mineralógica: cuarzo, galena, esfalerita, calcopirita, arsenopirita, pirita, ankerita, calcita y sericita. En estas asociaciones mineralógicas se observaron dos tipos de mineralización: reemplazamiento y intercrecimiento. El reemplazamiento se aprecia en los siguientes pares de minerales calcopirita–arsenopirita y pirita–arsenopirita; mientras que el intercrecimiento se observa en los siguientes minerales esfalerita–galena y esfalerita–calcopirita. Con la petrografía se determinó la siguiente secuencia paragenética: pirita \rightarrow arsenopirita \rightarrow esfalerita \rightarrow galena \rightarrow galena + arsenopirita \rightarrow calcopirita + arsenopirita + pirita \rightarrow hematita (Figura 26).

Los cristales anedrales y subedrales de pirita (de 5 a 110 μm de tamaño) en su mayoría se encuentran fracturados y con bordes muy irregulares en el contacto con los cristales de esfalerita y calcopirita. Ocasionalmente, las fracturas están rellenas por calcopirita.

Los cristales anedrales de galena y calcopirita (5 a 150 μm de tamaño) cristalizaron en las fracturas de esfaleritas. El contacto entre la galena y la esfalerita es muy irregular (secuencia reactiva); asimismo, la esfalerita presenta inclusiones microscópicas de calcopirita (enfermedad de calcopirita por Barton, 1970, 1978).

Los cristales euedrales de arsenopirita (de 20 a 80 μm de tamaño) están coexistiendo con pirita, calcopirita, ankerita y cuarzo. Los cristales anedrales de hematita (50 a 150 μm de tamaño) están asociados con calcopirita, cuarzo y ankerita.

La ganga está compuesta por cuarzo, calcita, ankerita, sericita e illita/esmectita. El cuarzo se presenta en tres variedades: grano grueso (0.3 a 0.7 mm), medio (100 a 300 μm) y fino (10 a 50 μm). Con los estudios petrográficos se obtuvo la siguiente secuencia paragenética para el cuarzo:

grosso → medio → fino. Los carbonatos están presentes en dos variedades: ankerita y calcita. La ankerita precipitó coetáneamente con el cuarzo de grano grueso, formando una textura coloforme

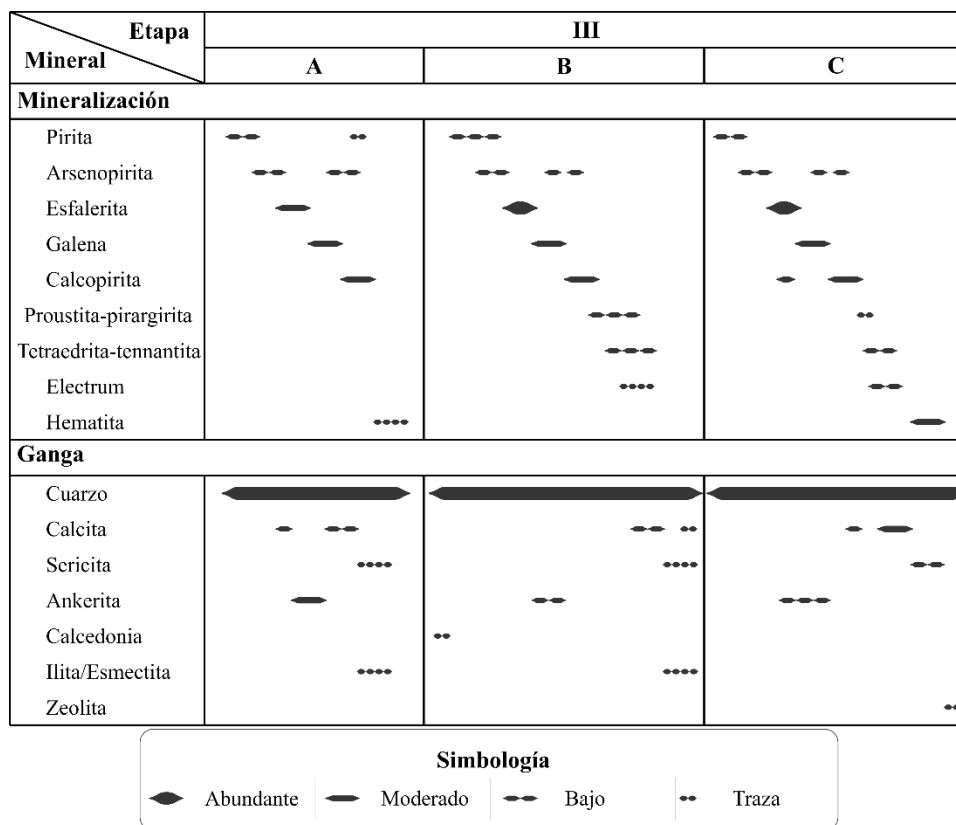


Figura 26. Secuencia mineral para la etapa III en la zona mineralizada de Arista.

(Dong *et al.*, 1995) y, a su vez, la ankerita presenta inclusiones de arsenopirita, pirita y calcopirita. La calcita cristalizó en dos etapas: temprana y tardía. La calcita temprana se encuentra intercreciendo con el cuarzo; mientras que la tardía rellena fracturas de cuarzo y sulfuros (10-70 μm de espesor). Los cristales de sericita se encuentran intercreciendo con cuarzo; y los cristales anedrales de ilita/esmectita se encuentran reemplazando a los cristales de plagioclasas y ferromagnesianos.

Etapa IIIB

Con la petrografía se determinaron dos asociaciones mineralógicas: 1) cuarzo, esfalerita, galena, calcopirita, pirita, calcita y sericita; 2) cuarzo, esfalerita, calcopirita, Pr, Tr, pirita, arsenopirita, *electrum*, calcita, sericita y ilita-esmectita. La primera asociación es la más importante volumétricamente, mientras que la segunda asociación es importante por su contenido en sulfosales de plata y cobre.

La **primera asociación mineral** se caracteriza por presentar un estilo de mineralización de reemplazamiento. De acuerdo con su textura se obtuvo la siguiente secuencia paragenética: pirita → esfalerita → galena → calcopirita.

La **segunda asociación mineral** se caracteriza por presentar dos estilos de mineralización, de reemplazamiento e intercrecimiento. El reemplazamiento se da en los siguientes pares de minerales: pirita–calcopirita, pirita–Tr y Tr–Pr. El intercrecimiento se presenta en los siguientes

pares de minerales calcopirita–arsenopirita, galena–arsenopirita y calcopirita–*electrum*. De acuerdo con su textura tiene la siguiente secuencia paragenética: pirita → arsenopirita + pirita → esfalerita → galena + arsenopirita → calcopirita + arsenopirita → Pr + Tr + *electrum* → Tr (Figura 26).

Los cristales anedrales de pirita (de 10 a 100 μm de tamaño) están muy fracturados y rellenos por una etapa tardía de calcopirita y Tr. Los contactos son muy irregulares indicando condiciones inestables (textura de reabsorción).

La cristalización de esfalerita se desarrolló en dos etapas: una primera etapa incluye cristales con inclusiones sólidas de calcopirita distribuida aleatoriamente, y en la segunda etapa la esfalerita está libre de inclusiones sólidas. Las fracturas de esfalerita están rellenas por una etapa tardía de calcopirita, galena y Tr. El contacto con los cristales de calcopirita y galena es muy irregular y, en algunas ocasiones, se forman bahías indicando condiciones de reabsorción.

Los cristales anedrales de *electrum* se encuentran asociados con esfalerita–galena–Tr–calcopirita y calcopirita. Las dimensiones de los granos varían en un rango de 5 a 8 μm (color amarillo claro rica en plata) y 30 a 45 μm (color amarillo naranja rica en oro) de tamaño.

Los cristales anedrales de Tr (de 40 a 110 μm de tamaño) presentan inclusiones sólidas de galena, y se encuentran rodeados irregularmente por Pr generando una textura de reemplazamiento. Además, el contacto con los cristales de pirita, arsenopirita y calcopirita es muy irregular y, en algunas ocasiones, se encuentra formando bahías que indican condiciones inestables (textura de reabsorción). De igual forma algunos cristales de Tr presentan zonación que varían en composición de centro (tetraedrita) a borde (tennantita).

Los cristales anedrales de Pr (de 10 a 90 μm de tamaño) agrupados con Tr, calcopirita, pirita, galena y esfalerita. Los bordes de los cristales de Pr en contacto con los cristales de Tr, calcopirita y pirita son muy irregulares, formando textura de reabsorción; a su vez, los cristales de esfalerita presentan contactos muy agudos indicando relleno de espacios en Pr. Dentro de los cristales anedrales de hemática se observaron granos de calcopirita y están rodeado por cuarzo.

Como minerales de ganga se encuentran el cuarzo, calcedonia, calcita, ankerita y sericita. Con la petrografía se determinaron tres etapas de cristalización de cuarzo: grano grueso (0.8 a 3.5 mm), medio (300 a 700 μm) y fino (50 a 500 μm). De acuerdo con su textura presenta la siguiente secuencia paragenética: grueso → medio → fino. La mayoría de los cristales de grano grueso presentan recristalización, formando textura plumosa y flameada (Dong *et al.*, 1995). Los cristales anedrales de calcedonia, cuarzo y sulfuros están formando textura colorme (Dong *et al.*, 1995). Por lo general la calcedonia se encuentra recristalizado y formando textura flameado (Dong *et al.*, 1995). Los cristales anedrales y subedrales de ankerita (100 μm a 1.5 mm de tamaño) se presentan en hábito acicular y masivo, formando una textura colorme (Dong *et al.*, 1995). Su cristalización se desarrolló después del cuarzo de grano grueso. Por lo general, los cristales de ankerita se encuentran englobando a cristales euedrales de arsenopirita. La precipitación de calcita se desarrolló en dos etapas: 1) relleno de los espacios abiertos entre cuarzo y sulfuros; 2) relleno de las fracturas de cuarzo y sulfuros. Los cristales de sericita se encuentran relleno de espacios entre cuarzo y sulfuro; a su vez, los clastos de tobas se encuentran muy sericitizados.

Etapa IIIC

Con la petrografía se determinaron dos asociaciones mineralógicas: 1) cuarzo, esfalerita, galena, calcopirita, pirita, calcita y sericita; 2) cuarzo, esfalerita, galena, calcopirita, pirita, tetraedrita-tennantita (Tr), arsenopirita, calcita y sericita. La primera asociación es importante volumétricamente, y la segunda es la más importante por su contenido de sulfosales de cobre-plata.

La **primera asociación mineral** se caracteriza por su asociación de metales base, presenta textura de reemplazamiento y. de acuerdo con su textura, presenta la siguiente secuencia paragenética: pirita → esfalerita → galena → calcopirita.

La **segunda asociación mineral** se caracteriza por presentar dos estilos de mineralización: de reemplazamiento e intercrecimiento. El reemplazamiento se observa en los siguientes minerales: pirita–calcopirita, pirita–Tr, calcopirita–Tr y pirita–galena; el intercrecimiento se observa en los siguientes minerales: arsenopirita–calcopirita y arsenopirita–galena. De acuerdo con su textura se determinó la siguiente secuencia paragenética: pirita → arsenopirita → esfalerita + calcopirita → arsenopirita + galena → arsenopirita + calcopirita → Pr + Tr + *electrum* → Tr (Figura 26).

Las evidencias texturales sugieren que la pirita cristalizó en dos etapas, una temprana y otra tardía. En la etapa temprana, el primer sulfuro en cristalizar es la pirita y se observa como cristales anedrales y subedrales de grano medio a fino, la mayoría se encuentran fracturados y rellenos por calcopirita, galena y Tr, los bordes de los cristales de pirita son muy irregulares y, en algunas ocasiones, formando bahías en los contactos con calcopirita, galena y Tr, evidenciando texturas de reabsorción y reemplazamiento. En la etapa tardía los cristales anedrales de pirita (de 10 a 540 μm de tamaño) se encuentran relleno de las fracturas de esfalerita.

La arsenopirita aparece como cristales anedrales, subedrales y en algunas ocasiones euedrales (de 10 a 90 μm de tamaño). Los cristales de arsenopirita generalmente están coexistiendo con esfalerita, calcopirita, sulfosal de cobre-plata, ankerita, calcita y cuarzo (Figura 27D). Los bordes de los cristales de arsenopirita en contacto con esfalerita son muy irregulares evidenciando textura de reemplazamiento.

La esfalerita se manifiesta como cristales anedrales de grano grueso a fino. Algunos cristales de esfalerita presentan inclusiones microscópicas de calcopirita (enfermedad de calcopirita por Barton 1970, 1978) con una distribución aleatoria (Figuras 27D, F), si bien, otros cristales están libres de inclusiones sólidas. Los bordes de los cristales de esfalerita que se encuentran en contacto con calcopirita y galena son muy irregulares, en algunas ocasiones formando bahías indicando textura de reabsorción (Figuras 27D, E, F) y reemplazamiento; además las fracturas de los cristales de esfalerita están rellenas por una etapa tardía de calcopirita y galena.

La calcopirita se presenta como cristales anedrales de grano grueso a fino. La calcopirita cristalizó en dos etapas: 1) Etapa temprana, la calcopirita se presentan como inclusiones sólidas dentro de los cristales de esfalerita formando textura de enfermedad de calcopirita (Barton, 1970, 1978). 2) Etapa tardía, la calcopirita se presentan relleno de las fracturas de esfalerita (Figura 27F) y englobando a los cristales de esfalerita y galena.

Los cristales anedrales de Tr (de 20 a 150 μm de tamaño) en su mayoría están agrupados con calcopirita, esfalerita y galena (Figuras 27C, D, E), los bordes son muy irregulares y, en algunas ocasiones, forman bahías en contacto con calcopirita.

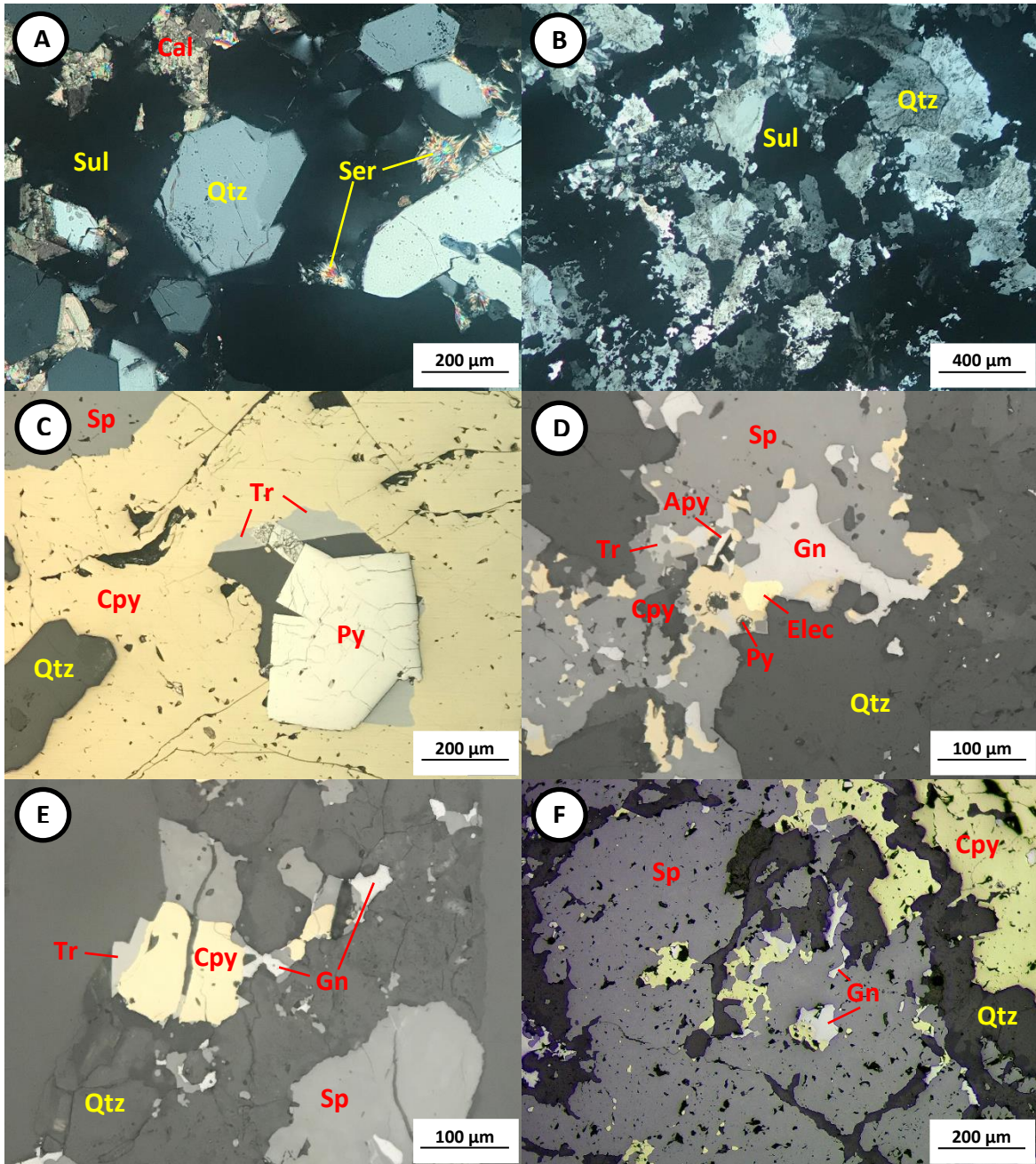


Figura 27. Fotomicrografía de la Veta Splay 5, Nivel 14, Etapa IIIC (zona mineralizada de Arista). **A)** Asociación de cristales cuarzo, calcita, sericita y sulfuros, calcita y sericita relleno espacios; **B)** granos gruesos de cuarzo recrystalizados (textura plumosa) con bordes muy irregulares; **C)** Tr relleno espacios y fracturas de calcopirita y pirita; **D)** asociación de cristales anedrales de esfalerita, galena, calcopirita, *electrum*, Tr y arsenopirita; **E)** bordes irregulares de calcopirita al contacto con Tr y, a su vez, relleno las fracturas; **F)** esfalerita con micro- y macroinclusiones de calcopirita y fracturas rellenas por galena y calcopirita. Abreviaturas: Apy = arsenopirita, Cal = calcita, Cpy = calcopirita, Elec = *electrum*, Gn = galena, Pr = proustita-pirargirita, Py = pirita, Qtz = cuarzo, Ser = sericita, Sp = esfalerita, Sul = sulfuro, Tr = tetrahedrita-tennantita. Referencia de las abreviaturas de los minerales. Simbología incluida en la figura.

Los cristales anedrales de Pr (de 30 a 120 μm de tamaño) se encuentran rellenando espacios de calcita generando textura de rompecabezas.

Los granos anedrales de *electrum* (de 10 a 40 μm en tamaño) son de color amarillo claro (ricas en plata) y (Figura 27D), por lo general, se encuentran asociados con calcopirita y galena.

Los minerales de ganga están constituidos por cuarzo, calcita, ankerita, sericita y zeolita. El cuarzo cristalizó en tres etapas, variando de grano grueso (0.2 a 1.5 mm), medio (50 a 250 μm) y fino (10 a 80 μm). Los cristales de grano grueso presentan recrystalización, formando una textura flameada y plumosa (Dong *et al.*, 1995); los de grano medio son recrystalizados y forman una textura en mosaico y los cristales eudrales de cuarzo de granos finos cristalizaron en las fracturas de cuarzo y sulfuros. De acuerdo con su textura, se presenta la siguiente secuencia paragenética: grueso \rightarrow medio \rightarrow fino (Figura 27B). Los cristales anedrales y subedrales de calcita (de 50 a 250 μm de tamaño) se encuentran rellenando espacios (Figura 27A) entre los granos de cuarzo. Los cristales anedrales y subedrales de ankerita (de 70 μm a 0.9 mm de tamaño) presentan textura acicular. Los cristales de sericita (de 40 a 130 μm de tamaño) están rellenando espacios entre cuarzo y sulfuros (Figura 27A). Los cristales anedrales de illita/esméctica (de 10 a 80 μm de tamaño) se encuentran rellenando espacios entre cuarzo y sulfuros, generalmente se encuentran agrupados con calcita, cuarzo y sulfuros. Los granos anedrales de zeolita (de 10 a 50 μm de tamaño) están rellenando las fracturas de cuarzo y sulfuros.

Etapa IV

Con la petrografía se determinó la siguiente asociación mineral: cuarzo, Pr, miargirita, calcopirita, Tr, esfalerita, pirita, *electrum*, calcita y sericita. Esta asociación es la de mayor importancia volumétrica y económica por el alto contenido de metales preciosos. De acuerdo con su textura se determinó la siguiente secuencia paragenética: pirita \rightarrow arsenopirita \rightarrow esfalerita \rightarrow arsenopirita + galena \rightarrow arsenopirita + calcopirita \rightarrow calcopirita \rightarrow Pr + miargirita \rightarrow Pr + miargirita + Tr \rightarrow Tr + *electrum* \rightarrow Tr (Figura 28).

Etapa	IV	V
Mineral		
Mineralización		
Pirita	••	••••
Arsenopirita	••••	••••
Esfalerita	••	••••
Galena	••	••••
Calcopirita	••	••••
Proustita-pirargirita	••••	
Miargirita	••	
Tetraedrita-tennantita	••••	••
Electrum	••	
Ganga		
Cuarzo	••••••••	••••••••
Calcita		••
Sericita		••••
Ankerita	••••	
Calcedonia		••
Illita/Esmectita		••••

Simbología

Abundante
 Moderado
 Bajo
 Traza

Figura 28. Secuencia mineral para las etapas IV y V en la zona mineralizada de Arista.

Algunos de los cristales anedrales de pirita (de 70 a 210 μm de tamaño) presentan bordes irregulares (Figuras 29C, E) y golfos de corrosión indicando una condición de desequilibrio. Las facturas en pirita han sido rellenadas por una etapa tardía de Tr.

Los cristales anedrales y subedrales de arsenopirita (de 40 a 70 μm de tamaño) se encuentran asociado con calcopirita y pirita y están englobado por ankerita y cuarzo. Los espacios entre arsenopirita y pirita fueron rellenados y englobados por Tr y Pr (Figura 29E); además, el contacto entre la arsenopirita y pirita es muy irregular indicando una reabsorción. Adicionalmente, los cristales de arsenopirita coprecipitaron con ankerita.

Los cristales anedrales de calcopirita (de 20 a 420 μm de tamaño) presentan textura de reabsorción y están parcialmente reemplazamiento por Pr y Tr (Figura 19C, D). La calcopirita, a su vez, presenta inclusiones de galena.

Los cristales anedrales de Pr (de 80 a 250 μm de tamaño) se encuentran asociados con Tr, calcopirita y esfalerita. Los bordes de los cristales de Pr en contacto con calcopirita y Tr son muy irregulares (Figura 29D) indicando condiciones de desequilibrio; el contacto con los cristales de cuarzo es regular y, en algunas ocasiones, forma contactos muy agudos indicando que la fase Pr rellenó los espacios vacíos. A su vez, los cristales de Pr presentan inclusiones sólidas de galena.

Los cristales anedrales de Tr (de 80 a 370 μm de tamaño) se encuentran asociados con calcopirita, pirita, Pr y arsenopirita. El contacto con los cristales de calcopirita, pirita y Pr son muy irregulares (Figura 29D) (en algunas ocasiones formando ángulos agudos), ya que los cristales de Tr se encuentran absorbiendo a calcopirita y pirita, indicando condiciones inestables. Los cristales de Tr se encuentran rellenando espacios entre los cristales de arsenopirita y pirita.

Los cristales anedrales de miargirita (de 50 a 260 μm de tamaño) generalmente están englobados por Pr (Figura 29F). Se encuentran asociados con pirita y calcopirita, y/o rellenando espacios entre los cristales de cuarzo.

Los cristales anedrales de *electrum* (de 20 a 60 μm de tamaño) son de color amarillo anaranjado y, generalmente, coexisten con calcopirita.

Los minerales de ganga están constituidos por cuarzo, calcita, ankerita y sericita. Los cristales anedrales, subedrales y eudrales de cuarzo se presentan en tres variedades de granos grueso (0.3 a 3.2 mm), medio (70 a 300 μm) y fino (10 a 60 μm); de acuerdo con su textura se determinó la siguiente secuencia paragenética: grueso \rightarrow medio \rightarrow fino (Figuras 29A, B). Con la petrografía se evidenciaron que los cristales de cuarzo exhiben tres variedades texturales: de recristalización plumosa, pseudo-acicular (Figura 29A) y *parallel bladed* (Dong *et al.*, 1995). Los cristales anedrales de calcita se encuentran rellenado espacios entre cuarzo y los sulfuros, englobando a los sulfuros, con bordes muy irregulares, en algunas ocasiones, en forma de venillas. Los cristales de sericita se encuentra rellenado los espacios e intercreciendo con cristales de cuarzo. Los cristales anedrales y subedrales de ankerita (de 100 a 540 μm de tamaño) se encuentran englobando a la arsenopirita, calcopirita y calcita, y está rodeado por cuarzo.

Etapa V

Esta etapa está constituida mayoritariamente de cuarzo con una menor presencia de minerales metálicos. La asociación mineralógica característica es la siguiente: cuarzo, calcopirita, esfalerita, galena, pirita, tetraedrita-tennantita (Tr), calcita y sericita. Considerando la asociación textural se determinó la siguiente secuencia paragenética: pirita \rightarrow arsenopirita \rightarrow esfalerita \rightarrow arsenopirita + galena \rightarrow arsenopirita + calcopirita \rightarrow Tr (Figura 28).

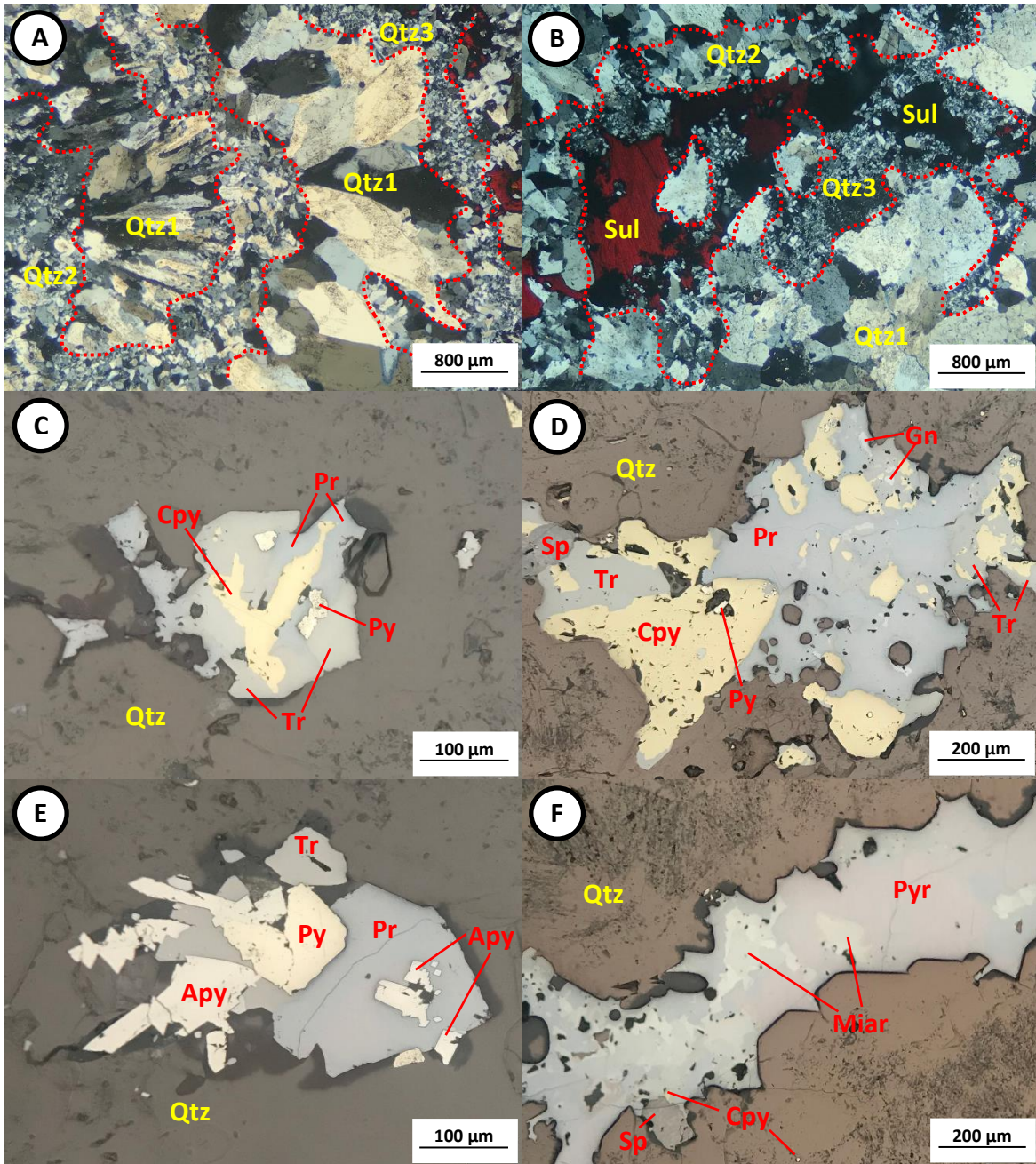


Figura 29. Fotomicrografía de la Veta Splay 5, Nivel 12, Etapa IV (zona mineralizada de Arista). **A)** Cuarzo de grano grueso con textura primitiva y pseudo-acicular, y de grano medio y fino relleno espacios; **B)** tres variedades de cuarzo, el cuarzo de grano fino es el último evento hidrotermal; **C)** Pr y Tr englobando a calcopirita y pirita formado textura de reabsorción; **D)** bordes irregulares de Pr en contacto con Tr y calcopirita formando textura de reemplazamiento; **E)** bordes irregulares de pirita y arsenopirita en contacto con Tr y Pr; **F)** cristales de pirargirita coexistiendo con miargirita, esfalerita y calcopirita. Abreviaturas: Apy = arsenopirita, Cpy = calcopirita, Elec = *electrum*, Gn = galena, Miar = miargirita, Pr = proustita-pirargirita, Py = pirita, Qtz = cuarzo, Sp = esfalerita, Sul = sulfuro, Tr = tetraedrita-tennantita. Referencia de las abreviaturas de los minerales. Simbología incluida en la figura.

Los cristales anedrales y subedrales de pirita (de 10 a 80 μm de tamaño) tienen bordes muy irregulares (textura de reabsorción) indicando condiciones de inestabilidad y las fracturas están rellenas por Tr. Los cristales anedrales de esfalerita (de 20 a 80 μm de tamaño) presentan inclusiones microscópicas de calcopirita (enfermedad de calcopirita por Barton, 1970, 1978); las fracturas en la esfalerita se encuentran rellenas de galena y calcopirita. Los cristales anedrales y subedrales de calcopirita (de 10 a 70 μm de tamaño) se encuentran englobados por cuarzo y los cristales subedrales de arsenopirita (de 20 a 50 μm de tamaño) están asociados con calcopirita y pirita. El contacto entre los cristales de calcopirita y arsenopirita es regular indicando texturas de intercrecimiento.

Los minerales de ganga están constituidos por cuarzo, calcedonia, calcita, sericita y illita/esmectita.

Con la petrografía se determinaron tres etapas de cuarzo que varían en función de la dimensión de los cristales: grano grueso (1.5 – 3.1 mm), medio (0.1 – 1.0 mm) y fino (75 – 250 μm). De acuerdo con su textura, se determinó la siguiente secuencia paragenética para el cuarzo: grueso \rightarrow medio \rightarrow fino. Los cristales de grano grueso presentan una débil recristalización formando textura plumosa (Dong *et al.*, 1995), los cristales subedrales e eudrales de grano medio se encuentran cortando irregularmente al cuarzo de grano grueso, los cristales eudrales y subedrales de cuarzo de grano fino están rellenas las fracturas de los cuarzos (grano grueso y medio). Los cristales anedrales de calcita (de 10 a 30 μm de tamaño) se encuentran rellenas las fracturas de cuarzo y rellenas los espacios entre los cristales de cuarzo. Los cristales anedrales de sericita y illita/esmectita (de 20 a 60 μm de tamaño) se encuentran rellenas los espacios entre los cristales subedrales de cuarzo.

4.2.2. Zona Mineralizada Altagracia

La petrografía de los sulfuros metálicos no se ha realizado en las etapas I, III, IV y V por el bajo contenido (nivel traza) de minerales económicos.

Etapa II

Con el estudio petrográfico se determinó la siguiente asociación mineral: esfalerita, pirita, calcopirita, Tr, galena, argentita, calcita, sericita, illita/esméctica, hematita, covellita supérgena y limonita. De acuerdo con su textura se determinó la siguiente paragénesis: pirita → esfalerita → pirita → galena → calcopirita → argentita → Pr → hematita → covellita (Figura 30).

La pirita se aprecia como cristales subedrales y anedrales de grano medio a fino (50 a 500 μm). El contacto entre los cristales pirita y calcopirita es muy irregular, indicando procesos de oxidación post mineralización. La mayoría de los cristales se encuentran coexistiendo con calcopirita, esfalerita y Pr.

La esfalerita se presenta como cristales anedrales de grano medio (150 a 300 μm) y se encuentra coexistiendo con pirita-calcopirita-galena. Algunos de los cristales de esfalerita tienen inclusiones sólidas de calcopirita (enfermedad de calcopirita por Barton, 1970, 1978).

La galena se observa como cristales anedrales de grano fino (50 a 150 μm). La mayoría de los cristales de galena se encuentran coexistiendo con esfalerita y pirita. los bordes de los cristales de galena en contacto con pirita-calcopirita son muy irregulares, formando bahías al estar en contacto con esfalerita y, en algunos cristales de pirita, el contacto es muy agudo.

Los cristales de esfalerita-galena-calcopirita presentan bordes irregularidades en contacto con pirita (Figuras 31A, B, C), formando bahías y contactos muy agudos, indicando condiciones de desequilibrio. Además, la pirita cristalizó en las fracturas de esfalerita (Figura 31A) y, a su vez, englobándolos.

La Pr se observa como cristales anedrales de grano fino (50 a 100 μm), generalmente se encuentra coexistiendo con pirita y calcopirita (Figuras 31A, B). Los bordes de los cristales en contacto con pirita-calcopirita son muy irregulares. Algunos cristales de Pr presentan inclusiones sólidas de pirita. Además la proustita se encuentra relleno las fracturas de pirita.

La argentita se aprecia como cristales anedrales de grano grueso a fino (50 a 800 μm). Mayormente se encuentra coexistiendo con esfalerita (Figuras 31E, F). Los cristales de argentita engloban a los cristales de esfalerita, con contactos muy irregulares en ocasiones formando bahías, indicando reemplazamiento.

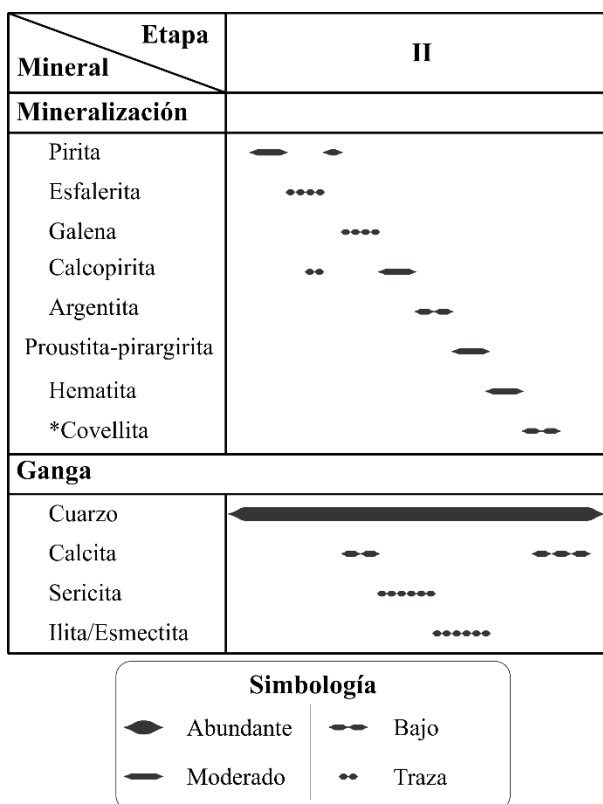


Figura 30. Secuencia mineral para la etapa II de la zona mineralizada de Altagracia. * Mineral supérgena.

El mineral de ganga está constituido por: cuarzo, calcita, sericita, illita/esméctica, hematita, limonita.

Los cristales anedrales y subedrales de cuarzo se presentan en dos variedades de granos grueso (0.5 a 1.1 mm) y medio (100 a 450 μm), de acuerdo con su textura se determinó la secuencia paragenética: grueso \rightarrow medio. Los cristales de grano grueso presentan débil recristalización formando textura plumosa (Dong *et al.*, 1995). Los cristales de grano medio se encuentran rellenando las fracturas formando contactos muy irregulares. Los cristales anedrales de calcita (de 50 a 320 μm de tamaño) se encuentran rellenando las fracturas (0.5 a 0.9 mm de espesor) y oquedades de cuarzo y sulfuros. Los cristales anedrales de sericita (de 10 a 80 μm de tamaño) se hallan rellenados los espacios entre los cristales de cuarzo. Generalmente los cristales anedrales de illita/esmectita (de 100 a 550 μm de tamaño) se encuentran dentro de las fracturas de los cristales de cuarzo.

Los cristales de hematita se observaron en dos formas: rellenando las fracturas y los espacios entre los cristales de cuarzo (Figura 31D), y englobando a los granos (20 a 70 μm) de calcopirita. Generalmente la limonita se observa rellenando las fracturas de los cristales de cuarzo, calcita, esfalerita, calcopirita, pirita y covellita.

La covellita supergénica aparece como cristales anedrales de grano fino (10 a 40 μm), estos cristales se ubican en los bordes de calcopirita formando coronas de reacción y, por lo general, está asociado con pirita y calcopirita.

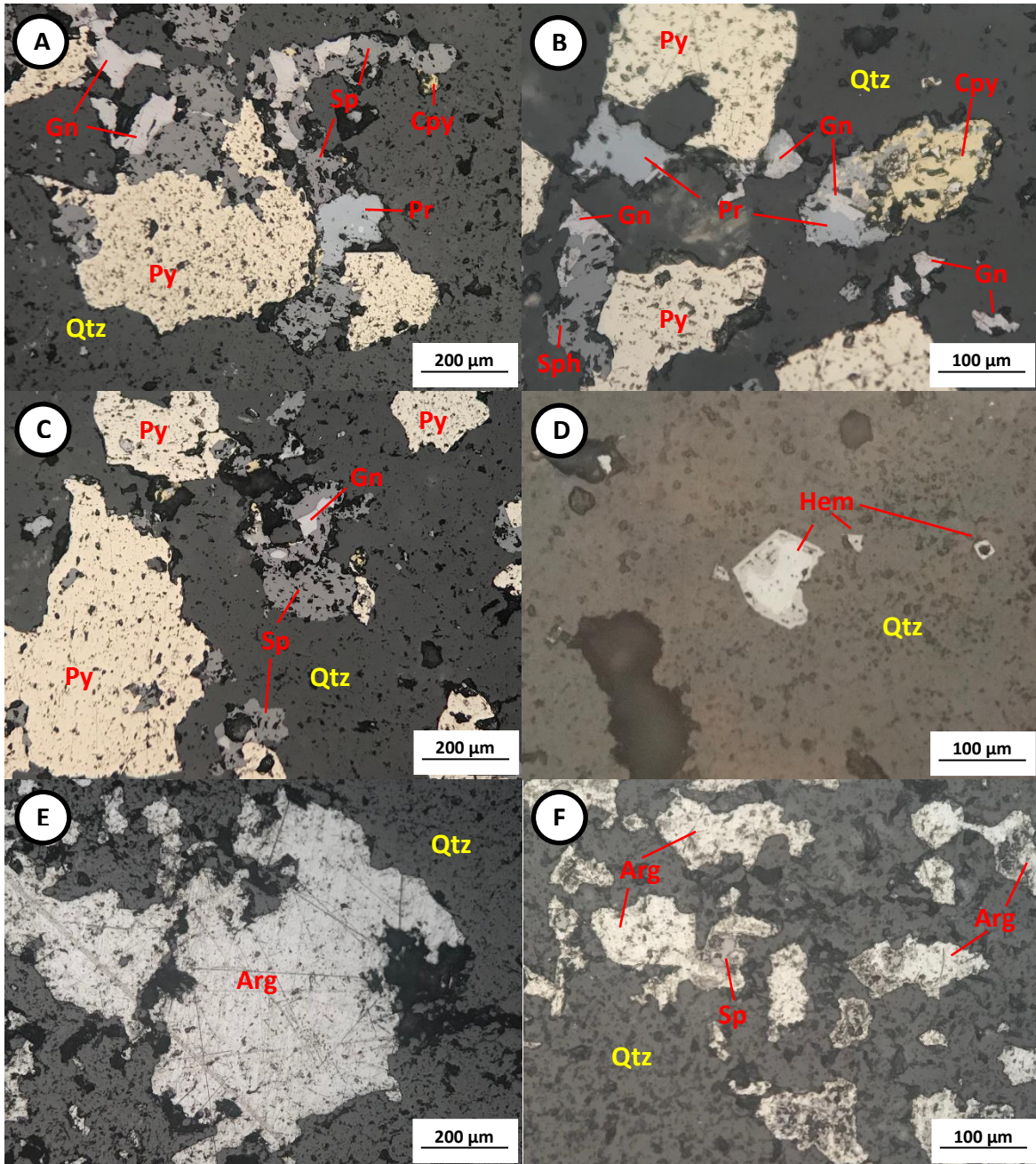


Figura 31. Fotomicrografía de la Veta El Huaje, Nivel 1620, Etapa II (zona mineralizada de Altagracia). **A)** Pirita reemplazada por esfalerita y galena relleno fracturas de esfalerita; **B)** pirita y proustita-pirargirita englobadas por calcopirita, y pirita con golfos de corrosión rellenos por esfalerita; **C)** pirita con inclusiones sólidas de esfalerita y galena; **D)** cristales subedrales de hematita dentro de una matriz de cuarzo; **E)** cristales anedrales de argentita en una matriz de cuarzo; **F)** esfalerita englobada por argentita dentro de una matriz de cuarzo. Abreviaturas: Arg = argentita, Cpy = calcopirita, Gn = galena, Hem = hematita, Pr = proustita-pirargirita, Py = pirita, Qtz = cuarzo, Sp = esfalerita. Referencia de las abreviaturas de los minerales. Simbología incluida en la figura.

4.3. Geoquímica Mineral

4.3.1. Zona Mineralizada Arista

Esfalerita

La esfalerita de la etapa II presentan dos colores: amarillo miel y amarillo oliva. La esfalerita de color amarillo oliva presentan inclusiones sólidas de galena y calcopirita, y la esfalerita amarillo miel no se evidencio inclusiones sólidas. El análisis cuantitativo se realizó en la esfalerita amarillo miel debido a que no presentan inclusiones. El valor promedio de la fracción molar de FeS es 0.01. Además, estas esfaleritas presentan valores trazas (de fracción molar) de cobre y cadmio. La fórmula estructural promedio de la esfalerita es de $Zn_{.99}Fe_{0.01}S$. Los resultados de los análisis se detallan en el Anexo C.

Los cristales de esfalerita de la etapa de IIIB exhiben cuatro diferentes colores: amarillo ocre, gris amarillo, marrón verdoso y amarillo oliva. Los cristales de color marrón verdoso tienen inclusiones micrométricas de calcopirita (enfermedad de calcopirita por Barton, 1970, 1978) y los de color amarillo oliva presentan inclusiones sólidas de calcopirita y galena. Su fracción molar de FeS varía en un rango de 0.01 a 0.03, donde los valores más altos 0.03 de fracción molar se presentan en los cristales de color amarillo ocre. A su vez, la esfalerita tiene trazas en fracción molar de cobre y cadmio. En la Figura 32A se observa los puntos de análisis de la microsonda y su variación composicional de cadmio, hierro y zinc en la esfalerita. La fórmula estructura de la esfalerita es de $Zn_{.97}Fe_{0.03}S$.

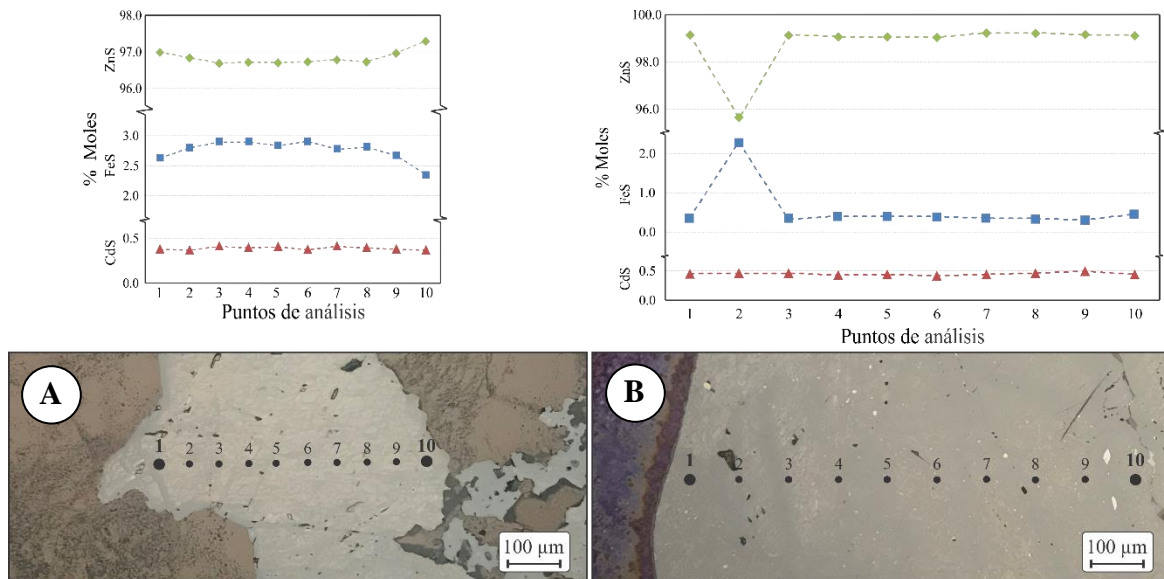


Figura 32. Variación composicional en el contenido en zinc, hierro y cadmio de la esfalerita. A) esfalerita amarillo ocre de la etapa IIIB y B) esfalerita beige verdoso de la etapa IIIC.

La esfalerita de la etapa IIIC presentan dos colores diferentes, beige verdoso y amarillo ocre. Los cristales de color beige verdoso contienen inclusiones sólidas de calcopirita y galena, y el amarillo ocre sólo presentan inclusiones de galena. La fracción molar de FeS alcanza hasta un máximo valor de 0.02, valores trazas de cobre y cadmio. La mayoría de los cristales de esfalerita analizados poseen valores de FeS (%mol) muy semejante, a excepción de la esfalerita (Figura 32B), donde se observa la variación de FeS (%mol) y el valor de CdS (%mol) es constante en todo el cristal. La fórmula estructural de la esfalerita es de $Zn_{.98}Fe_{0.02}S$.

Los cristales de esfalerita de la etapa IV exhiben dos diferentes colores: amarillo miel y amarillo oliva. La esfalerita amarillo miel no se han evidenciado inclusiones sólidas y los cristales

amarillo oliva presentan inclusiones micrométricas de calcopirita (enfermedad de calcopirita). La fracción molar de FeS es de 0.01 en promedio para ambas esfaleritas y tienen valores trazas de cobre y cadmio. La fórmula estructural de la esfalerita es de $Zn_{.99}Fe_{0.01}S$.

En la vertical la esfalerita de la etapa II presenta un ligero incremento del FeS %mol hacia la superficie; en la etapa III el valor de FeS %mol decrece hacia la superficie, y en la etapa IV el valor de FeS %mol son relativamente constantes a cualquier profundidad (Figura 33).

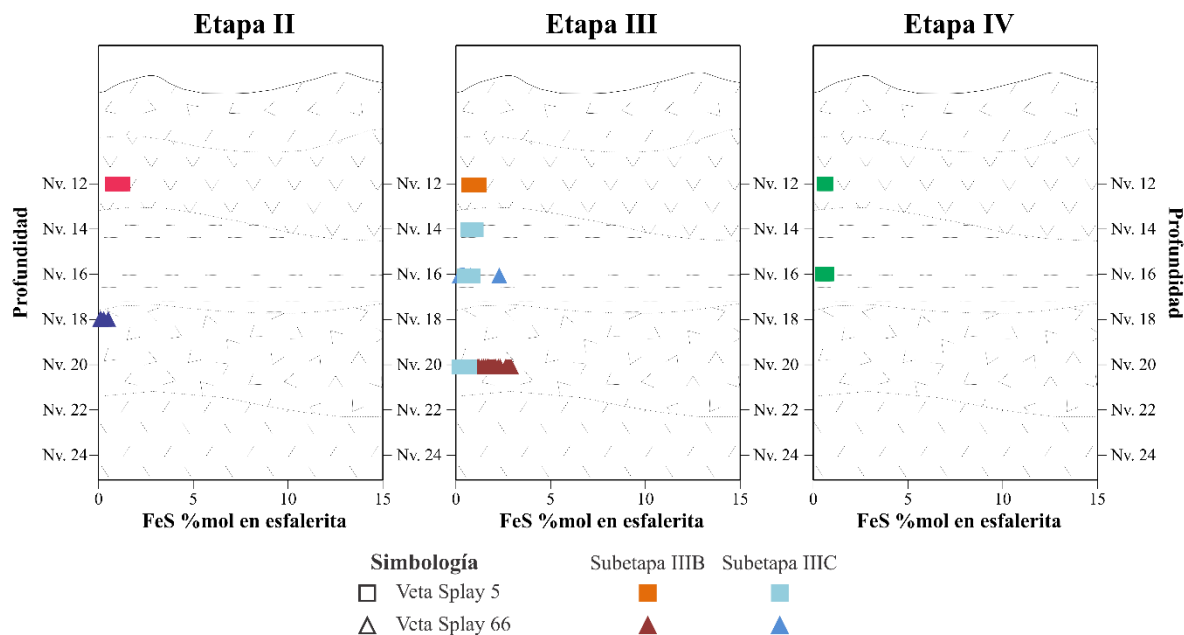


Figura 33. Variación del contenido de FeS (%mol) en esfalerita con la profundidad para las etapas II, IIIB, IIIC y IV de la zona mineralizada de Arista, de acuerdo con el análisis de microsonda. Leyenda incluida en la figura.

Electrum

Los granos de *electrum* generalmente están presentes en las etapas II, IIIB, IIIC y IV. En la etapa II el *electrum* aparece con cristales de calcopirita–Tr– galena–esfalerita, esfalerita–galena y calcopirita. En la etapa IIIB aparece con esfalerita–galena–Tr–calcopirita y calcopirita. En la etapa IIIC está coexistiendo con calcopirita–galena. En la etapa IV se encuentran coexistiendo con calcopirita. Los resultados de los análisis se detallan en el Anexo C.

En la etapa II los cristales de *electrum* son amarillo anaranjado y amarillo claro, y su relación de $Ag/(Ag + Au)$ (en fracción molar) es la siguiente manera: los granos amarillo anaranjado tienen un valor de 0.54 y los de color amarillo claro se encuentran en un rango de 0.76 a 0.78; el contenido en Cu se encuentra en concentraciones trazas en ambos tipos de *electrum*. En la etapa IIIB no se concretó con los análisis debió al tamaño de los granos. En la etapa IIIC, los cristales de *electrum* son de color amarillo claro y su relación $Ag/(Ag + Au)$ es de 0.51 en promedio. En la etapa IV, los cristales de *electrum* son de color amarillo anaranjado y su proporción $Ag/(Ag + Au)$ está en un rango de 0.60 a 0.61.

Miargirita

Los cristales anedrales de miargirita están presentes en la etapa IV de la veta Splay 5 en el nivel 12. La miargirita tiene una fórmula estructural promedio de $Ag(Sb_{0.9}As_{0.1})S_2$ y se encuentra englobando y coexistiendo con proustita–pirargirita. La relación $As/(As + Sb)$ (en fracción molar) de los cristales de miargirita está en un rango de 0.05 a 0.19. El contenido de Cu y Fe se encuentran en concentraciones trazas. Los resultados de los análisis se detallan en el Anexo C.

Proustita-Pirargirita

Los minerales de la serie proustita-pirargirita han cristalizado en las etapas I, II, IIIB y IV de la veta Splay 5. En la etapa I ésta serie se encuentra coexistiendo con calcopirita, pirita, arsenopirita y tetraedrita-tennantita (Tr); la etapa II está asociado con calcopirita, Tr, galena y, en ocasiones, con esfalerita; la etapa IIIB coexisten con Tr, calcopirita, pirita, galena y esfalerita; y en la etapa IV coexisten con Tr, calcopirita y esfalerita. La proporción $As/(As + Sb)$ (fracción molar) en los minerales de la serie proustita-pirargirita varía en un rango de 0.52 a 0.95 en la etapa I, hasta 0.04 en la etapa II, en un rango de 0.0 a 0.88 en la etapa IIIB; estos rangos de valores se presentan en el nivel 12. En la etapa IV la serie proustita-pirargirita presenta valores de 0.02 a 0.36 en el nivel 12, de 0.01 a 0.03 en el nivel 16 y de 0.01 a 0.34 en el nivel 20. La etapa II y IIIB tiene un valor máximo de 0.04 en la relación $Se/(Se + S)$ (fracción molar). Otros elementos como Cu, Pb y Fe están en concentraciones trazas. Los resultados de los análisis se detallan en el Anexo C.

Los resultados analíticos de las sulfosales de plata se representaron en un histograma (Figura 34). Las sulfosales de plata en la etapa I son más ricas en arsénico (i.e. proustita), en la etapa II es más rica en antimonio (i.e. pirargirita), en la etapa IIIB está enriquecida en arsénico y antimonio, y la etapa IV está enriquecida en antimonio.

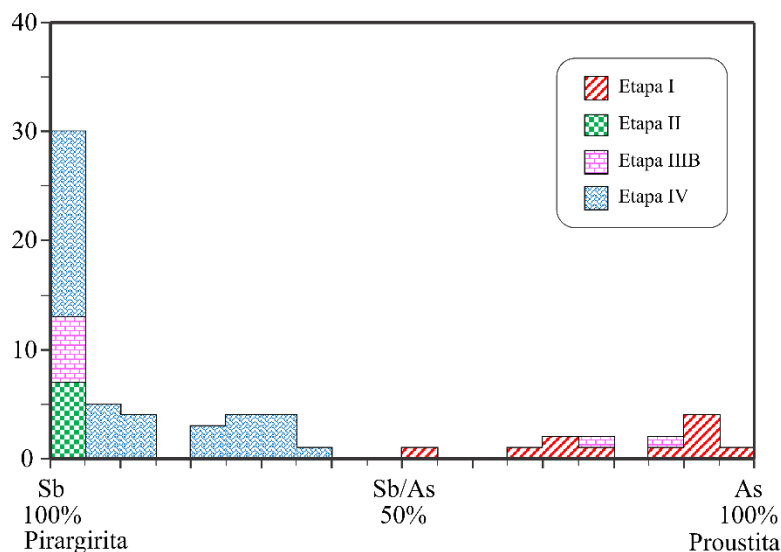


Figura 34. Histograma de composición de la serie proustita-pirargirita para las etapas I, II, IIIB y IV, de la zona mineralizada de Arista. Leyenda incluida en la figura.

Tetraedrita-Tennantita

Los minerales del grupo tetraedrita-tennantita (Tr) en la zona mineralizada de Arista son una mezcla de freibergita, tetraedrita, tennantita y giraudita. Además, los resultados de la microsonda se representaron en el diagrama de cubo de Sack *et al.* (2005) (Figuras 35 al 38). Los minerales de Tr cristalizaron en las etapas: I, II, IIIB, IIIC y IV, si bien el mayor contenido volumétrico de Tr se encuentra en las etapas IIIB y II. Los resultados de los análisis se detallan en el Anexo C.

Etapa I

Los análisis no se llegaron a concretar para los cristales de Tr de la etapa I, debido al tamaño de los granos (<30 μm) presentes en la muestra.

Etapa II

En esta etapa la fórmula estructural promedia de Tr para las vetas Splay 5 y Splay 66 es: $[(Cu_{5.5}Ag_{4.6})_{10.1}(Fe_{1.2}Zn_{0.8})_{2.0}]_{12.1}(Sb_{3.9}As_{0.1})_{4.0}S_{13}$ y $[(Cu_{10.0}Ag_{0.1})_{10.1}(Fe_{0.2}Zn_{1.7})_{1.9}]_{11.8}(Sb_{1.2}As_{2.9})_{4.1}S_{13}$,

respectivamente. Los subíndices de las fórmulas estructurales de Tr (i.e. átomos por fórmula estructural) se representaron en el diagrama de cubo de Sack *et al.* (2005) (Figura 35).

El Tr rico en Ag muestreado en el nivel 12 de la veta Splay 5, está asociado con sulfosales de Ag, calcopirita, galena y *electrum*, los valores de $Ag/(Ag + Cu)$, $Zn/(Zn + Fe)$ y $As/(As + Sb)$ se encuentran en los rangos de 0.33 a 0.46, 0.29 a 0.67 y 0.02 a 0.04 de fracción molar.

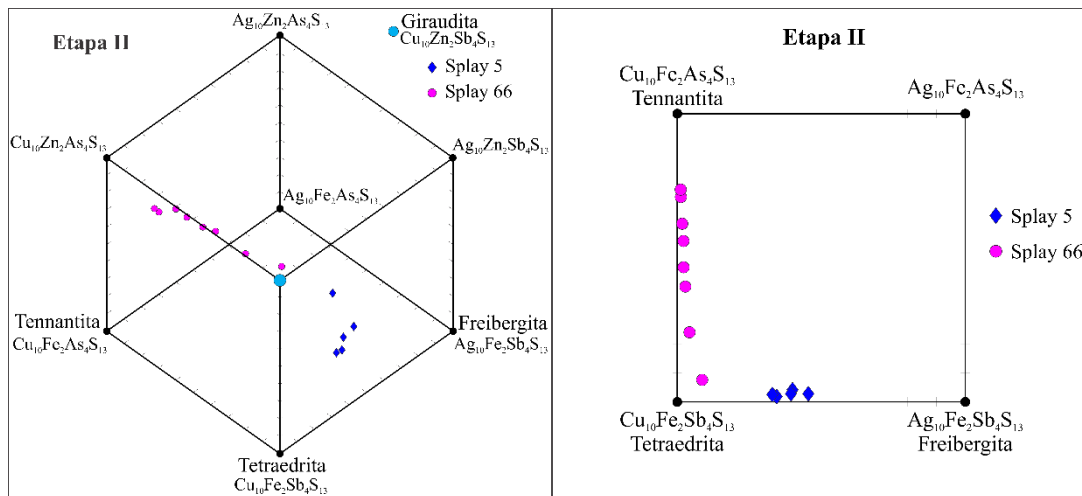


Figura 35. Distribución de los resultados del análisis de microsonda en una diagrama cúbico y planar para los cristales de tetraedrita-tennantita $(Cu, Ag)_{10}(Fe,Zn)_2(Sb,As)_4S_{13}$ de la etapa II en la zona mineralizada de Arista. El diagrama se modificó de Sack *et al.* (2005). Leyenda incluida en la figura.

El Tr rico en Cu y Zn se muestreó en el nivel 18 de la veta Splay 66. Se encuentra como inclusión en granos de galena y, a su vez, está asociado con esfalerita y calcopirita. Se analizaron dos cristales de Tr con la microsonda. La Tr que se encuentra englobado por galena, tienen valores de $Cu/(Cu + Ag)$, $Zn/(Zn + Fe)$ y $As/(As + Sb)$ que varían en un rango de 0.97 a 0.98, 0.96 a 0.98 y 0.40 a 0.62 de fracción molar. Además, los cristales presentan un ligero enriquecimiento en As de núcleo a borde del cristal. El Tr que está agrupado con esfalerita, galena y calcopirita, presenta valores de $Cu/(Cu + Ag)$, $Zn/(Zn + Fe)$ y $As/(As + Sb)$ que varían en un rango de 0.91 a 0.99, 0.88 a 0.96 y 0.08 a 0.74 de fracción molar; asimismo, el Tr se enriquece en As hacia el borde del cristal.

Etapa IIIB

En esta etapa la fórmula estructural promedio de Tr para las vetas Splay 5 y Splay 66 es: $[(Cu_{4.2}Ag_{5.7})_{9.9}(Fe_{1.5}Zn_{0.4})_{1.9}]_{11.8}(Sb_{4.0}As_{0.1})_{4.1}S_{13}$ y $[(Cu_{9.8}Ag_{0.2})_{10.0}(Fe_{1.9}Zn_{0.0})_{1.9}]_{11.9}(Sb_{0.2}As_{3.8})_{4.0}S_{13}$, respectivamente. Los subíndices de las fórmulas estructurales de Tr (i.e. átomos por fórmula estructural) se representaron en el diagrama de cubo de Sack *et al.* (2005) (Figura 36).

El Tr rica en Ag se ubicó en el nivel 12 de la veta Splay 5 y se encuentra asociado con calcopirita, sulfosales de Ag, esfalerita, galena y pirita. Se analizaron tres granos diferentes de Tr con la microsonda electrónica. De acuerdo con los resultados obtenidos, los granos de Tr presentan variación composicional de núcleo a borde del cristal. Los intervalos de $Ag/(Ag + Cu)$ y $As/(As + Sb)$ del núcleo varían en un rango de 0.50 a 0.57 y 0.00 a 0.32 de fracción molar, y el borde tiene un rango de 0.24 a 0.39 y 0.55 a 0.84 de fracción molar. La relación $Zn/(Zn + Fe)$ en Tr se encuentra en un valor de 0.19 ± 0.02 ($n=13$) de fracción molar.

El Tr rico en Cu y Fe se muestreó en el nivel 18 de la veta Splay 66, está agrupado con calcopirita, esfalerita, pirita y cuarzo. Los puntos analizados con la microsonda electrónica se realizaron de núcleo a borde de dos cristales de Tr en la misma muestra. Para ambos cristales el

valor de la relación $Cu/(Cu + Ag)$ es de 0.94 ± 0.04 ($n=9$) de fracción molar, si bien composición de Zn y As varía de borde a borde: el valor de $Zn/(Zn + Fe)$ tiene dos tendencias de 0.58 ± 0.18 ($n=6$) y 0.01 ± 0.00 ($n=3$) de fracción molar y la relación $As/(As + Sb)$ también presenta dos tendencias 0.21 ± 0.16 ($n=6$) y 0.91 ± 0.07 ($n=3$) de fracción molar.

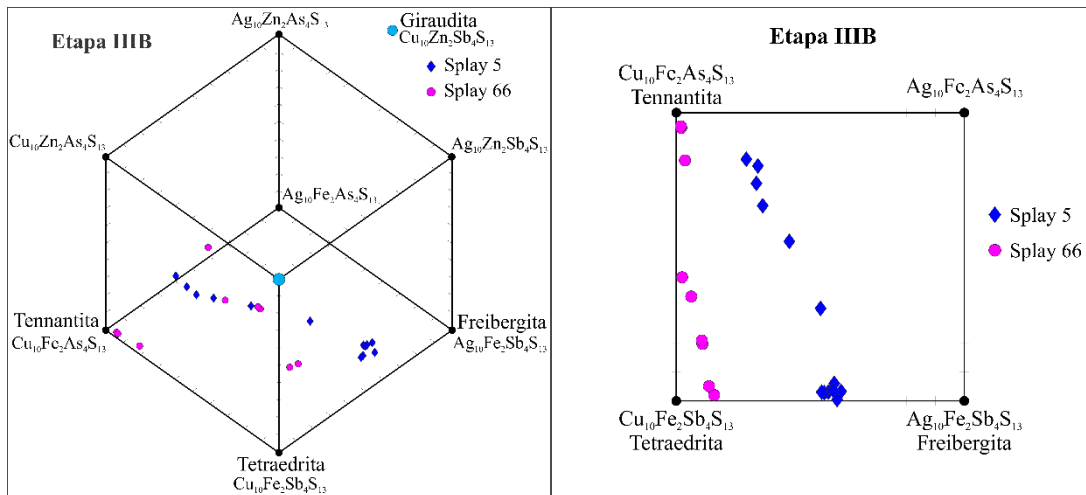


Figura 36. Distribución de los resultados del análisis de microsonda en una diagrama cúbico y planar para los cristales de tetradrita-tennantita $(Cu, Ag)_{10}(Fe, Zn)_2(Sb, As)_4S_{13}$ de la etapa IIIB en la zona mineralizada de Arista. El diagrama se modificó de Sack *et al.* (2005). Leyenda incluida en la figura.

Etapa IIIC

En esta etapa la fórmula estructural promedio de Tr para las vetas Splay 5 y Splay 66 es: $[(Cu_{6.1}Ag_{3.6})_{9.8}(Fe_{1.3}Zn_{0.8})_{2.1}]_{11.9}(Sb_{4.0}As_{0.2})_{4.2}S_{13}$ y $[(Cu_{9.9}Ag_{0.1})_{10.0}(Fe_{0.6}Zn_{1.3})_{1.9}]_{11.9}(Sb_{0.0}As_{4.0})_{4.0}S_{13}$, respectivamente. Los subíndices de las fórmulas estructurales de Tr (i.e. átomos por fórmula estructural) se plotearon el diagrama de cubo de Sack *et al.* (2005) (Figura 37).

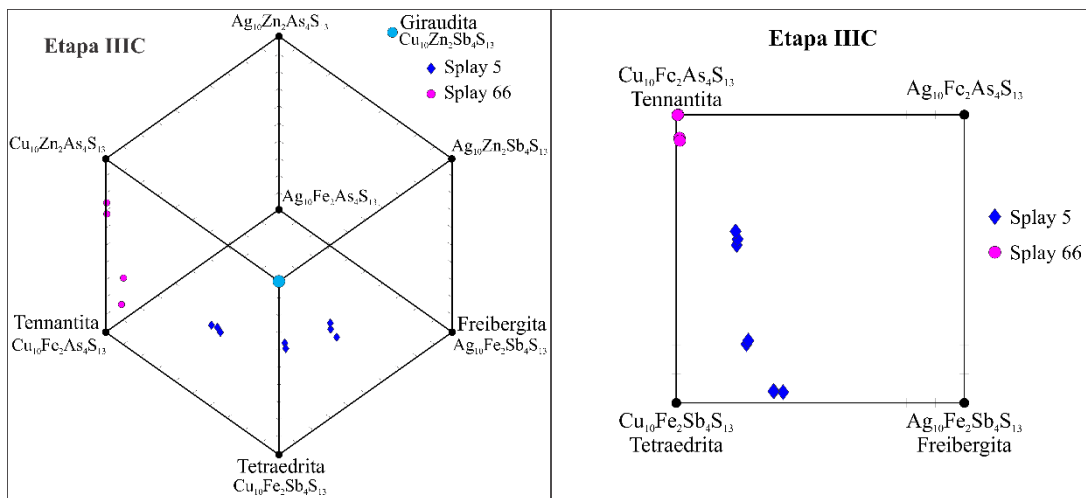


Figura 37. Distribución de los resultados del análisis de microsonda en una diagrama cúbico y planar para los cristales de tetradrita-tennantita $(Cu, Ag)_{10}(Fe, Zn)_2(Sb, As)_4S_{13}$ de la etapa IIIC en la zona mineralizada de Arista. El diagrama se modificó de Sack *et al.* (2005). Leyenda incluida en la figura.

Los cristales de Tr rico en Cu y Ag se ubicaron en los niveles 14 y 16 de la veta Splay 5 y se encuentra asociados con esfalerita-calcopirita-galena-pirita-electrum, calcopirita-pirita-esfalerita y calcopirita-galena. El en nivel 14 se analizaron dos cristales de Tr, sus proporciones $Ag/(Ag + Cu)$ y $Zn/(Zn + Fe)$ están en los siguientes intervalos 0.21 a 0.25, 0.17 a 0.31 de

fracción molar; el valor de $As/(As + Sb)$ tiene dos intervalos muy marcados de 0.20 a 0.22 y 0.55 a 0.60 de fracción molar. Para el nivel 16 se analizó un cristal de Tr y sus valores de $Ag/(Ag + Cu)$, $As/(As + Sb)$ y $Zn/(Zn + Fe)$ (en fracción molar) tienen el siguiente promedio 0.35 ± 0.02 (n=3), 0.04 ± 0.00 (n=3) y 0.45 ± 0.05 (n=3).

Los Tr ricos en Cu y Zn se localizaron en el nivel 16 de la veta Splay 66, y están agrupados con calcopirita-esfalerita-galena. Se analizaron cuatro cristales de Tr donde los valores de $Cu/(Cu + Ag)$ y $As/(As + Sb)$ tiene un promedio de 0.99 ± 0.00 (n=4) y 0.96 ± 0.05 (n=4), y el valor de $Zn/(Zn + Fe)$ tiene dos rangos de 0.21 a 0.37 y 0.68 a 0.75 de fracción molar.

Etapa IV

En esta etapa la fórmula estructural promedio de Tr de veta Splay 5 varía de: $[(Cu_{4.9}Ag_{5.2})_{10.1}(Fe_{1.5}Zn_{0.5})_{2.0}]_{12.1}(Sb_{3.9}As_{0.1})_{4.0}S_{13}$ a $[(Cu_{6.7}Ag_{2.9})_{9.8}(Fe_{1.1}Zn_{0.8})_{1.9}]_{11.7}(Sb_{2.8}As_{1.2})_{4.0}S_{13}$. Los subíndices de las fórmulas estructurales de Tr se plotearon el diagrama de cubo de Sack *et al.* (2005) (Figura 38).

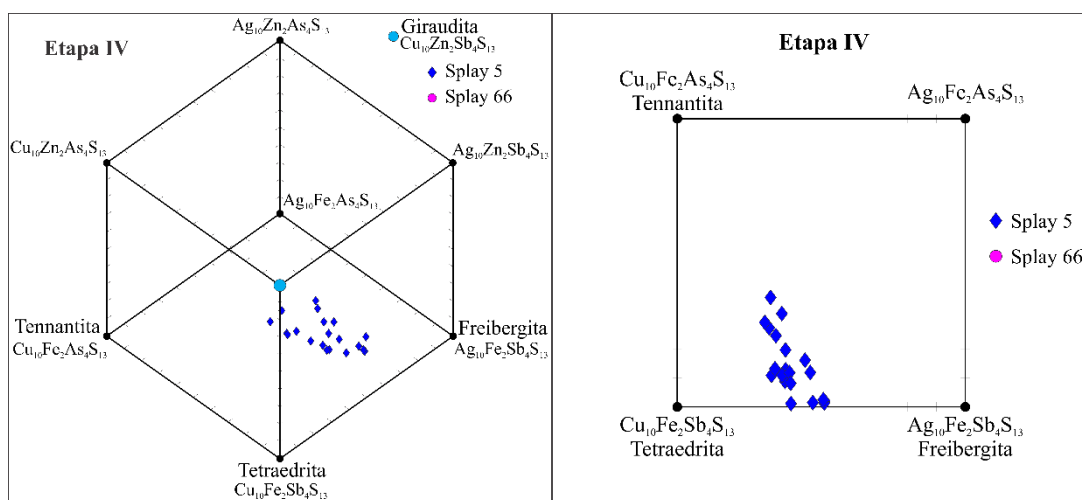


Figura 38. Distribución de los resultados del análisis de microsonda en una diagrama cúbico y planar para los cristales de tetraedrita-tennantita $(Cu, Ag)_{10}(Fe, Zn)_2(Sb, As)_4S_{13}$ de la etapa IV en la zona mineralizada de Arista. El diagrama se modificó de Sack *et al.* (2005). Leyenda incluida en la figura.

El Tr rico en Ag se muestreó en los niveles de 12, 16 y 20 de la veta Splay 5, y se encuentra asociado con sulfosales de Ag, calcopirita, galena, arsenopirita y pirita. Además, las muestras del nivel 12 y 16 se localizan en la parte centro de la veta y las muestras del nivel 20 se ubican en el extremo sureste de la veta. En el nivel 12 se analizaron en tres cristales de Tr y los valores de $Ag/(Ag + Cu)$, $As/(As + Sb)$ y $Zn/(Zn + Fe)$ (fracción molar) tienen los siguientes promedios: 0.36 ± 0.02 (n=7), 0.21 ± 0.11 (n=7) y 0.28 ± 0.03 (n=7). En el nivel 16 se analizaron dos cristales de Tr y las proporciones de $Ag/(Ag + Cu)$, $As/(As + Sb)$ y $Zn/(Zn + Fe)$ (fracción molar) poseen los siguientes promedios: 0.48 ± 0.05 (n=5), 0.02 ± 0.01 (n=5) y 0.29 ± 0.04 (n=5). En el nivel 20 se analizaron seis cristales de Tr, donde los valores de $Ag/(Ag + Cu)$, $As/(As + Sb)$ y $Zn/(Zn + Fe)$ se encuentran en los rangos de 0.30 a 0.46, 0.08 a 0.29 y 0.28 a 0.58 de fracción molar; además, el Tr que se encuentra coexistiendo con arsenopirita tiene mayor contenido de Zn que las que están coexistiendo con sulfosales de Ag y calcopirita.

Arsenopirita

Los cristales de arsenopirita se encontraron en las etapas I, IIIB y IV de la veta Splay 5 y se ubican en el nivel 12. Las tres etapas tienen el siguiente rango de fracción molar de FeS: etapa I de 0.77 a 0.79, etapa IIIB tiene 0.76 y etapa IV de 0.75 a 0.77. El % atómico de As presentan los

siguientes rangos: etapa I de 27.6 a 30.3, etapa IIIB de 31.4 a 32.4 y etapa IV de 29.5 a 33.2. Los resultados de los análisis se detallan en el Anexo C.

4.3.2. Zona Mineralizada Altigracia

Esfalerita

Los cristales de esfalerita de la etapa II presentan tonalidades amarillo caramelo a amarillo limón. Estas esfaleritas tienen inclusiones de calcopirita (enfermedad de calcopirita por Barton, 1970, 1978). El contenido de FeS en esfalerita se encuentra en un rango de 0.85 a 1.98 %molar. Los cristales de esfalerita contienen concentraciones de traza de Cb, Ge y Ga, y hasta 0.01 de fracción molar de Cu. El FeS %mol se representó en un diagrama de profundidad *versus* FeS %mol (Figura 39). La fórmula estructural promedio de la esfalerita es de $Zn_{0.97}Fe_{0.03}S$. Los resultados de los análisis se detallan en el Anexo C.

Proustita-Pirargirita

Los cristales de proustita-pirargirita solo cristalizaron en la etapa II. La relación $As/(As + Sb)$ se encuentra en un rango de 0.12 a 0.65 de fracción molar (Figura 40) y el contenido de Cu está en concentraciones trazas, presentando una relación de $Ag/(Ag + Cu)$ (fracción molar) de 0.99 en promedio. Los cristales proustita-pirargirita también contienen cantidades traza de Zn y Fe.

En la veta El Huaje, la mayoría de los sulfosales de plata en la etapa II están enriquecidos en antimonio (i.e. pirargirita) y uno de los granos analizados está enriquecido en arsénico (i.e. proustita) como se muestra en la Figura 40.

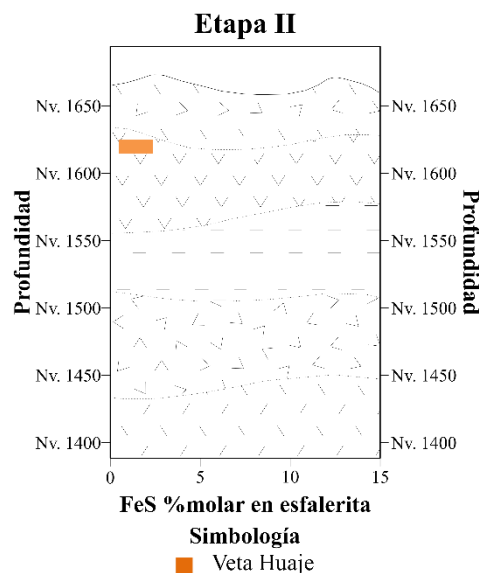


Figura 39. Variación del contenido de FeS en los cristales de esfalerita para la etapa II en la zona mineralizada de Altigracia. Leyenda incluida en la figura.

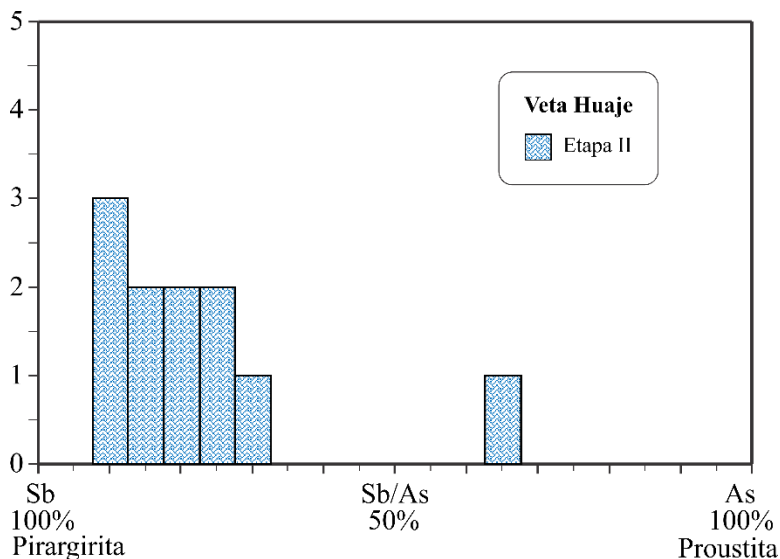


Figura 40. Histograma de composición de la serie proustita-pirargirita para la etapa II en la zona mineralizada de Altigracia. Leyenda incluida en la figura.

4.4. Condiciones fisicoquímicas de cristalización

Arsenopirita

La arsenopirita cristalizó en las etapas I, IIIB y IV de la veta Splay 5.

En el diagrama T (°C) – As (% at.) (Figura 41) de Kretschmar y Scott (1976) se plasmó, mediante histogramas, el contenido de Arsénico (As) en arsenopirita. A partir del valor promedio de As (% at.) se elevó una línea vertical hasta el intercepto con la curva de estabilidad de arsenopirita (etapa IIIB y IV hasta *Apy* y la etapa I hasta *Py + As – As*).

La arsenopirita de la etapa I tiene una temperatura mínima de cristalización de 312 °C, en la etapa IIIB es de 432 °C y en la etapa IV es de 405 °C.

Esfalerita

En la zona mineralizada de Arista se distinguieron siete etapas de mineralización, de los cuales solo se ha encontrado esfalerita en las etapas II, III y IV. En la zona mineralizada de Altagracia se evidenciaron cinco etapas de mineralización. De las cinco etapas solo se encontró esfalerita en la etapa II.

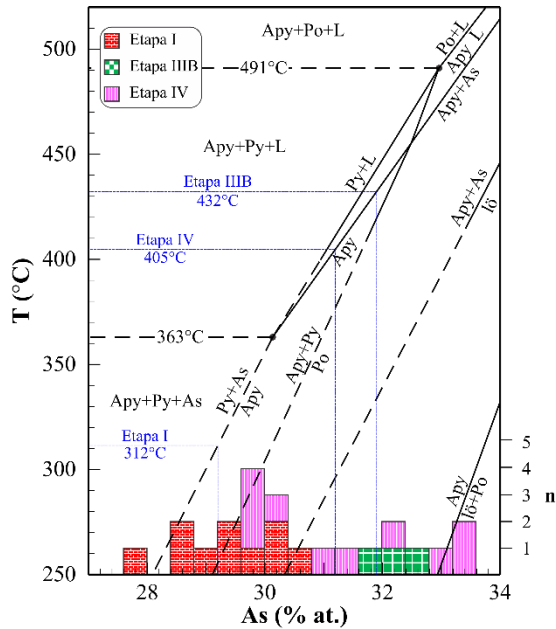


Figura 41. Composición de arsenopirita para las etapas I, IIIB y IV (zona mineralizada de Arista) en el diagrama temperatura (T) versus arsenopirita en el sistema Fe-As-S. Adaptado de Kretschmar y Scott (1976). Abreviaturas: *Apy* = arsenopirita, *As* = arsénico, *at* = átomos, *L* = líquido, *lö* = loellingita, *n* = número de análisis, *Po* = pirrotina, *Py* = pirita. Leyenda incluida en la figura.

En el diagrama $\log(a_{S_2})$ *ves.* $\log(a_{O_2})$ se plasmaron los valores máximos del contenido de FeS en la esfalerita de las zonas mineralizadas de Arista y Altagracia. Durante la transición de las etapas en Arista, la actividad de azufre (representado por $\log(a_{S_2})$) varía de la siguiente forma: entre la etapa II y la etapa IIIB decrecen ligeramente desde -10.4 a -10.9 y los valores en las etapas IIIB, IIIC y IV se incrementa constantemente desde -10.9 a -10.4. En Altagracia la actividad de azufre en la etapa II tiene un valor de -10.7 (Figura 42).

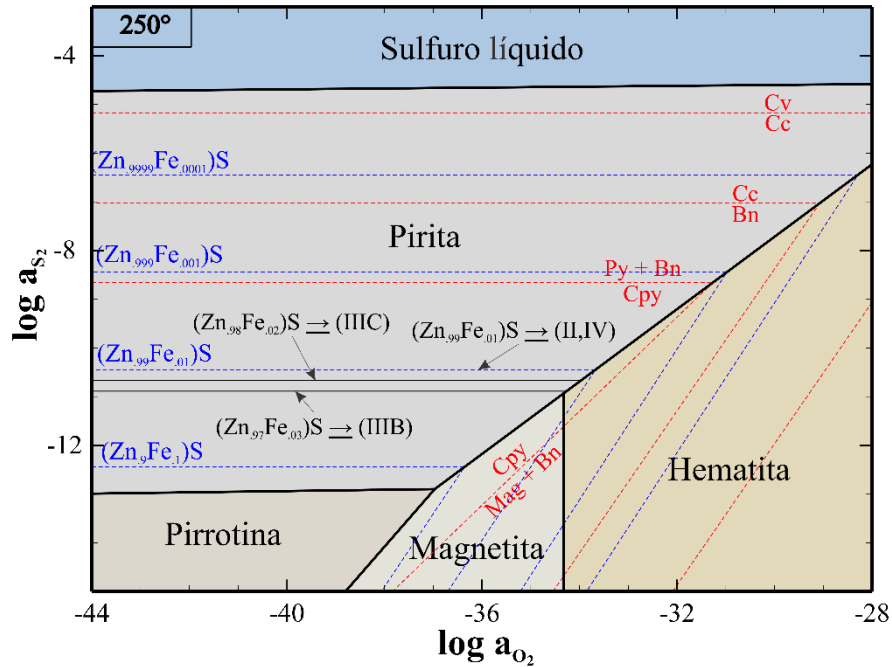


Figura 42. Diagrama $\log(a_{S_2})$ versus $\log(a_{O_2})$ a 250 °C que muestran los campos de estabilidad de óxidos y sulfuros de hierro, donde se ha representado el máximo contenido de FeS en esfalerita para las etapas II, IIIB, IIIC y IV en la zona mineralizada de Arista y la etapa II de la zona mineralizada de Altagracia. Sistema Fe-S-O (línea gruesa), sistema Cu-Fe-S-O (línea de puntos roja de Baton y Toulmin, 1964) y contenido máximo de FeS en esfalerita (línea de puntos azul) elaborado por Barton *et al.* (1977) y Barton y Skinner (1979).

La esfalerita de las zonas mineralizadas de Arista y Altagracia son pobres en hierro y cobre, y ricas en zinc, como se observa en el diagrama de la Figura 43. El contenido de azufre en esfalerita en la zona mineralizada de Arista y Altagracia tienen los siguientes rangos 32.16 a 32.69 % en peso y de 33.53 % en peso.

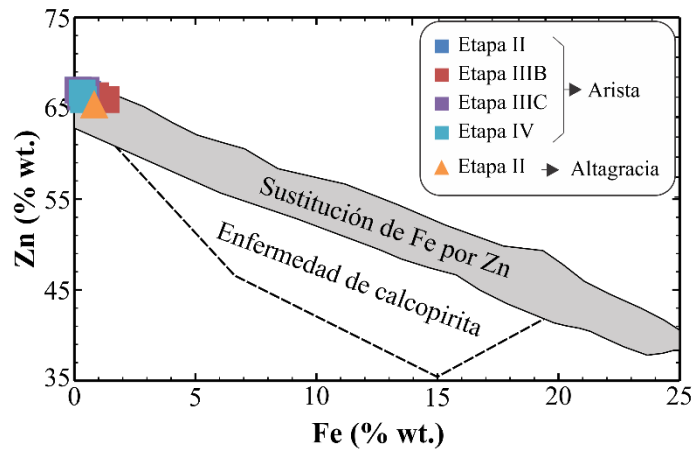


Figura 43. Diagrama Zn (% en peso) versus Fe (% en peso) en esfalerita de las zonas mineralizadas de Arista y Altagracia. El área en blanco representa la composición de la esfalerita con exsolución de calcopirita (enfermedad de la esfalerita) y el área sombreada representa la sustitución de Fe por Zn (Keith *et al.*, 2014).

Miargirita

Ghosal y Sack (1995) desarrollaron el diagrama de fase miargirita-smithita/terchmannita, de forma que la relación de $As/(As+Sb)$ en los cristales de miargirita se puede utilizar para calcular la temperatura mínima de cristalización de miargirita. Los cristales de este mineral solo cristalizaron en la etapa IV y se ubican en el nivel 12 de la veta Splay 5 de la zona mineralizada de Arista. La temperatura mínima de cristalización de la miargirita se ha calculado representando en la Figura 44 el valor más alto de la relación $As/(As+Sb)$ (fracción molar). La temperatura mínima obtenida para la cristalización de miargirita es de 250 °C para la etapa IV.

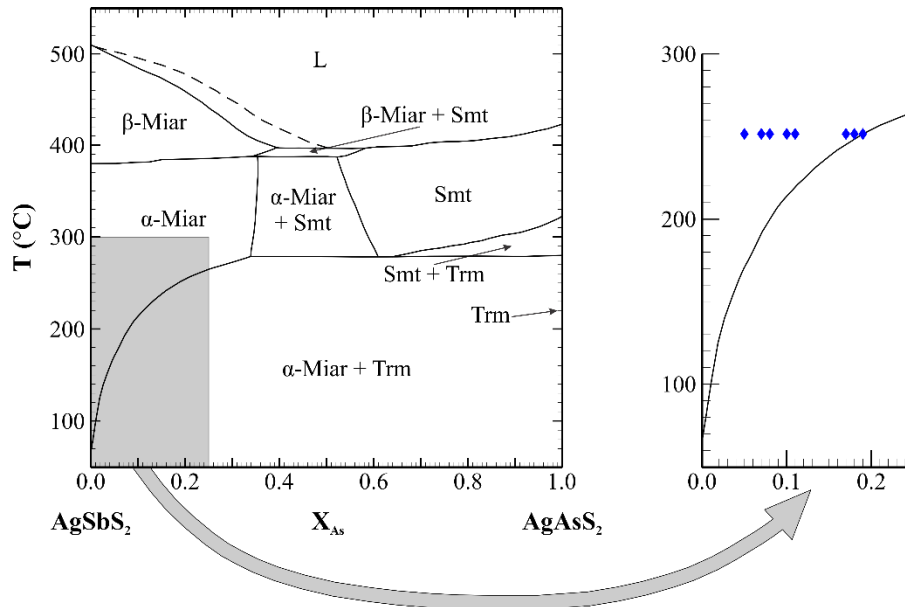


Figura 44. Diagrama X_{As} (fracción molar de As) vs. temperatura (°C) que muestra la temperatura mínima de cristalización de miargirita en la etapa IV (veta Splay 5) de la zona mineralizada de Arista (Modificado de Ghosal y Sack, 1995). Abreviaturas: L = líquido, Miar = miargirita, Smt = smithite, Trm = terchmanite. Referencia de las abreviaturas de los minerales. Simbología incluida en la figura.

Tetraedrita-tennantita (Tr)

Etapla II. Los valores de $Ag/(Ag + Cu)$ y $Zn/(Zn + Fe)$ (fracción molar) de Tr en la veta Splay 5 se representaron en el diagrama de isotermas calculada por Sack (2005), donde se obtuvo una temperatura mínima de cristalización entre 170 y 250 °C (Figura 45A). El Tr rico en Ag tiene un valor máximo de $Ag/(Ag + Cu)$ de 0.46 y la temperatura obtenida de 250 °C, que representa la máxima solubilidad de Ag en tetraedrita-tennantita en el sistema $Ag_2S-Cu_2S-ZnS-FeS-Sb_2S_3-As_2S_3$ (Sack *et al.*, 2002). La trayectoria marcada (flecha gris) en la Figura 45A representa el descenso del contenido plata en los cristales de Tr y una ligera disminución de Zn.

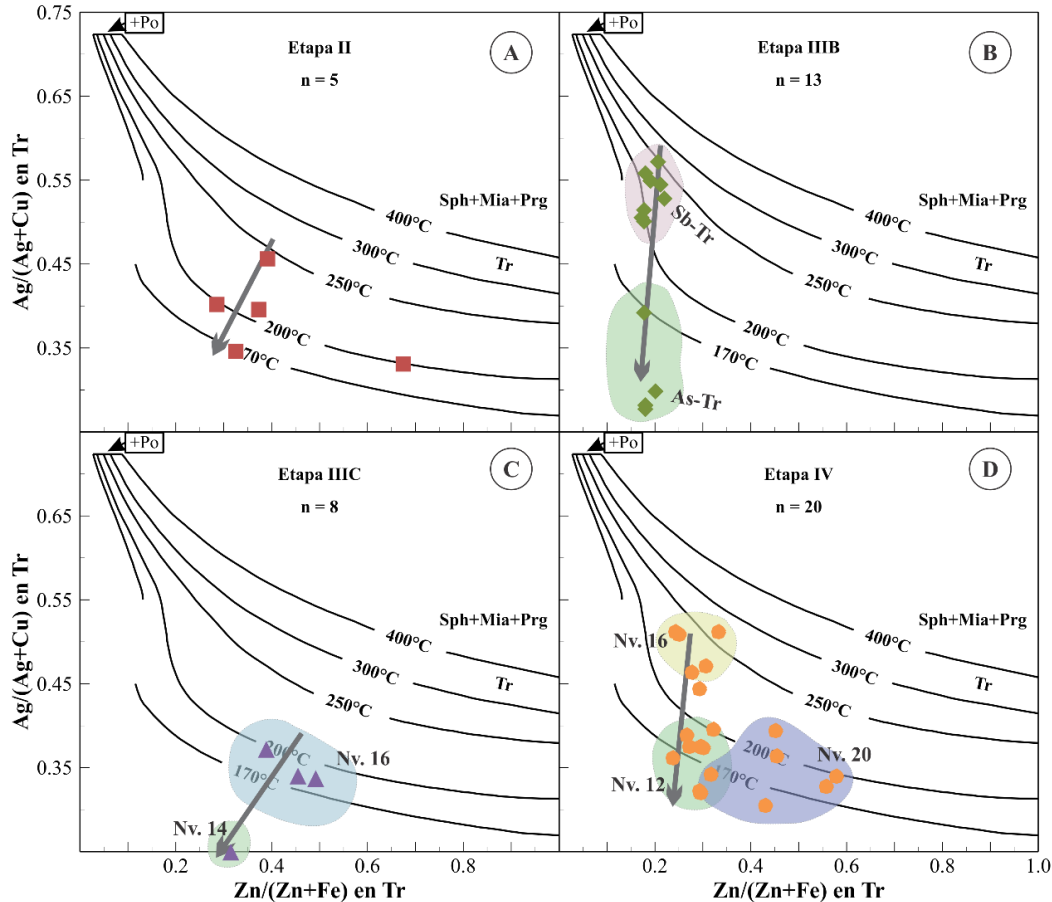


Figura 45. Diagrama de $Ag/(Ag + Cu)$ versus $Zn/(Zn + Fe)$ en la serie tetraedrita-tennantita rica en Ag de la zona mineralizada de Arista, donde se observa las isotermas (línea sólida) obtenidas por Sack (2005) a una presión de 1 bar y solubilidad máxima de Ag en Tr Para **A)** etapa II, resultados analíticos de Tr; **B)** etapa IIIB, del núcleo rico en Sb (área rosado) y borde rico en As (área verde) en Tr; **C)** etapa IIIC, del nivel más profundo (área celeste) al más somero (área verde); y **D)** etapa IV, nivel 20 más profundo (área morado), nivel 16 intermedio (área amarillo) y nivel 12 más somero (área verde). Abreviaturas: As = arsenico, Miar = miargirita, n = número de análisis en la microsonda, Nv = nivel, Prg = piargirita, Sb = antimonio, Sph = esfalerita, Tr = tetraedrita-tennantita. Referencia de las abreviaturas de los minerales. Simbología incluida en la figura.

Etapa IIIB. Las proporciones de $Ag/(Ag + Cu)$ y $Zn/(Zn + Fe)$ del núcleo y borde de Tr se representaron en el diagrama de isotermas de Sack (2005), donde se observa que la temperatura mínima de cristalización de los núcleos de Tr varía de 200 a 250 °C, mientras que la del borde es <170 °C. Para esta etapa la máxima solubilidad de Ag en el sistema $Ag_2S-Cu_2S-ZnS-FeS-Sb_2S_3-As_2S_3$ en Tr a una temperatura de 250 °C (Sack *et al.*, 2002). La trayectoria marcada (flecha gris) en la Figura 45B presenta el cambio composicional (del núcleo al borde) de los cristales de Tr. El núcleo está enriquecido en antimonio y plata, y el borde está enriquecido en arsénico y cobre.

Etapa IIIC. Los valores de $Ag/(Ag + Cu)$ y $Zn/(Zn + Fe)$ en Tr se representaron en el diagrama de isotermas de Sack (2005), donde se obtuvo una temperatura mínima de cristalización de Tr en el nivel 16 entre 170 y 200 °C y en el nivel 14 menor a 170 °C. La máxima solubilidad de Ag para el sistema $Ag_2S-Cu_2S-ZnS-FeS-Sb_2S_3-As_2S_3$ es a 200 °C en el nivel 16 (Sack *et al.*, 2002). La fecha de la Figura 45C representa el descenso de la temperatura y el empobrecimiento de Ag, Zn y Sb en Tr.

Etapa IV. Las proporciones de $Ag/(Ag + Cu)$ y $Zn/(Zn + Fe)$ en Tr se representaron en el diagrama de isotermas de Sack (2005). La temperatura mínima de cristalización de Tr en el nivel 16 está en un rango de 200 a 250 °C y en el nivel 12 de 170 a 200 °C. La máxima solubilidad de Ag para el sistema $Ag_2S-Cu_2S-ZnS-FeS-Sb_2S_3-As_2S_3$ es de 250 °C en el nivel 16 (Sack *et al.*, 2002). La temperatura mínima de cristalización de Tr en el nivel 20 (ubicado en extremo sureste de la veta Splay 5) está en un rango de temperatura de <170 a 200 °C. La flecha de la Figura 45D indica el descenso de la temperatura y el empobrecimiento en Ag y Sb del nivel 16 al nivel 12, además el Zn se empobrece ligeramente.

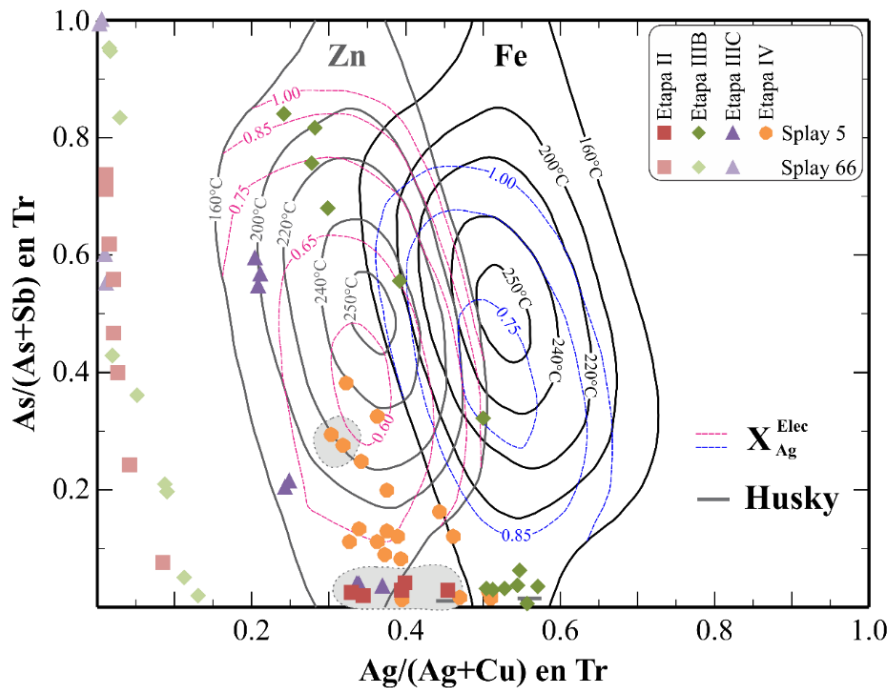


Figura 46. Diagrama de $Ag/(Ag+Cu)$ vs $As/(As+Sb)$ en tetraedrita-tennantita y electrum en las vetas Splay 5 y Splay 66 de la zona mineralizada de Arista. Las isopleteras de color gris y negro corresponden a los huecos de miscibilidad calculados para tetraedrita-tennantita $(Cu,Ag)_{10}Fe_2(As,Sb)_4S_{13}$ y $(Cu,Ag)_{10}Zn_2(As,Sb)_4S_{13}$, las isopleteras de color rosado y azul corresponden a la fracción molar de *electrum* (Sack y Ebel, 2006). Abreviaturas: Ag = plata, Elec = *electrum*, Fe = hierro, Tr = tetraedrita-tennantita, X_{Ag} = fracción molar de Ag en *electrum*, Zn = zinc. Referencia de las abreviaturas. Leyenda incluida en la figura.

Los valores de las proporciones de $Ag/(Ag + Cu)$ y $As/(As + Sb)$ en tetraedrita-tennantita (Tr) se representaron en el diagrama de Sack y Ebel (2006) (Figura 46). Las etapas II, III B y III C de la veta Splay 5 están dentro del hueco de miscibilidad entre 240 y 160 °C de temperatura y las etapas II, III B y III C de la veta Splay 66 caen fuera del hueco de miscibilidad menor a 160 °C de temperatura.

Los granos de *electrum* se encontraron en las etapas II y IV de la veta Splay 5 en equilibrio con calcopirita y pirita. De acuerdo con las isopleteras calculadas por Sack y Ebel (1993) para los valores de 0.6 a 1.00 de $Ag/(Ag+Au)$, el *electrum* de la etapa II son estables a una temperatura de 160 °C y en la etapa IV de 220 °C (Figura 46).

CAPÍTULO 5: PETROGRAFÍA Y MICROTERMOMETRÍA DE INCLUSIONES FLUIDAS

5.1 Petrografía de inclusiones fluidas

En Arista se estudiaron las inclusiones fluidas (IF) (23 láminas doblemente pulidas) contenidas en esfalerita, cuarzo hialino-blanco-amatista. En Altagracia se examinaron las inclusiones fluidas (10 láminas doblemente pulidas) en cuarzo hialino-blanco, cuarzo amatista y calcita. Las asociaciones de IF se definieron de acuerdo con los criterios de Roedder (1984), Goldstein y Reynolds (1994), Samson *et al.* (2003), clasificándose en IF primarias y secundarias.

5.1.1. Zona mineralizada Arista

Las inclusiones fluidas primarias se encontraron en esfalerita, cuarzo hialino-blanco y cuarzo amatista (Figura 47). La mayoría de las asociaciones se encuentran en zonas de crecimiento y algunas muy aisladas. Las inclusiones fluidas presentan una amplia variedad de morfologías, algunas propias de encuellamiento, y otras esferoidales, tabulares aplanadas e irregulares. Se encontraron dos tipos de inclusiones fluidas: monofásica y bifásica. Las monofásicas solo se hallaron en cuarzo, mientras que las bifásicas en esfalerita y cuarzo. Las inclusiones fluidas primarias están dominadas por dos fases: líquido y vapor. Las monofásicas están constituidos solo de líquido. Las inclusiones fluidas primarias bifásicas presentan un grado de relleno de 0.9 en promedio y tienen un rango de diámetro de 8 a 25 μm ; además, se encontraron IF de 40 a 50 μm de diámetro en esfalerita.

Las inclusiones fluidas secundarias se encontraron en esfalerita, cuarzo blanco, cuarzo hialino y cuarzo amatista (Figura 42), por lo regular se localizan dentro de las fracturas o formando una línea oblicua continua. En general, las inclusiones fluidas secundarias presentan morfologías alargadas muy irregulares, con dos fases: líquido y vapor. También, se evidenciaron procesos de modificación post-atrapamiento, debido a la morfología de estrangulamiento y decrepitación de las inclusiones.

5.1.2. Zona mineralizada Altagracia

Las inclusiones fluidas primarias se localizaron en cristales de cuarzo hialino-blanco, cuarzo amatista y calcita (Figura 48). Las asociaciones de inclusiones fluidas primarias se hallaron en zonas de crecimiento y algunas aisladas, y su morfología es de dos tipos, elípticas e irregulares. Las inclusiones fluidas están dominadas por dos fases, líquido y vapor, con un grado de relleno de 0.9 en promedio, el tamaño de las inclusiones fluidas varía en un rango de 0.5 a 15 μm (de diámetro).

Las inclusiones fluidas secundarias se ubicaron en los cristales de cuarzo “hialino-blanco-amatista” y calcita; generalmente se encuentran relleno de fracturas preexistentes o formando un alineamiento muy marcado. La mayoría de las inclusiones fluidas secundarias tienen morfologías alargadas muy irregulares y son de los dos tipos, monofásicas y bifásicas. Las inclusiones fluidas secundarias monofásicas pueden ser ricas en vapor o líquido; bien, las bifásicas están constituidas de vapor + líquido.

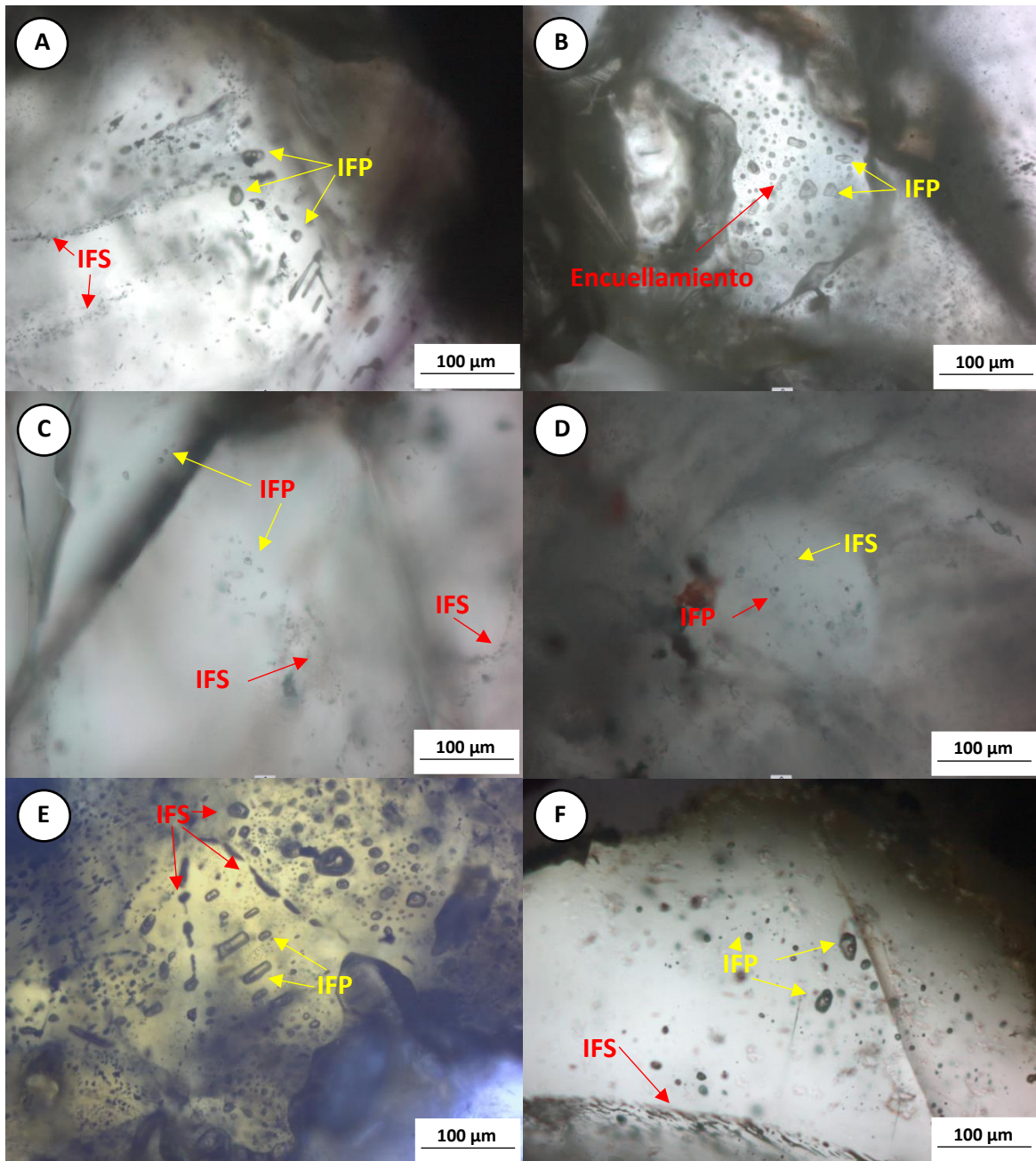


Figura 47. Fotomicrografía de la asociaciones de inclusiones fluidas en muestras de asociaciones minerales metálicas en la zona mineralizada Arista. **A)** Esfalerita, las inclusiones fluidas primarias presentan morfologías alargadas y elípticas, y las secundarias presentan un alineamiento muy marcado. **B)** Esfalerita, las inclusiones fluidas primarias se observa de diferentes formas: cristal negativo, alargado, elípticas y algunas sufriendo encuellamiento. **C)** Cuarzo, las inclusiones fluidas primarias bifásicas (V+L) se encuentran muy aisladas y las secundarias presentan lineamiento. **D)** Las inclusiones fluidas primarias y secundarias se encuentran en un grano de cuarzo, las primarias muy aisladas y las secundarias muy alineadas. **E)** Esfalerita, las inclusiones fluidas primarias presentan morfologías alargadas y las secundarias son alargadas y muy irregulares. **F)** Esfalerita, inclusiones fluidas primarias bifásicas (V+L) aisladas y las secundarias están relleno las fracturas preexistentes. Abreviaturas: IFP = inclusión fluida primaria, IFS = inclusiones fluida secundaria, L = líquido, V = vapor. Referencia de las abreviaturas de los minerales. Simbología incluida en la figura.

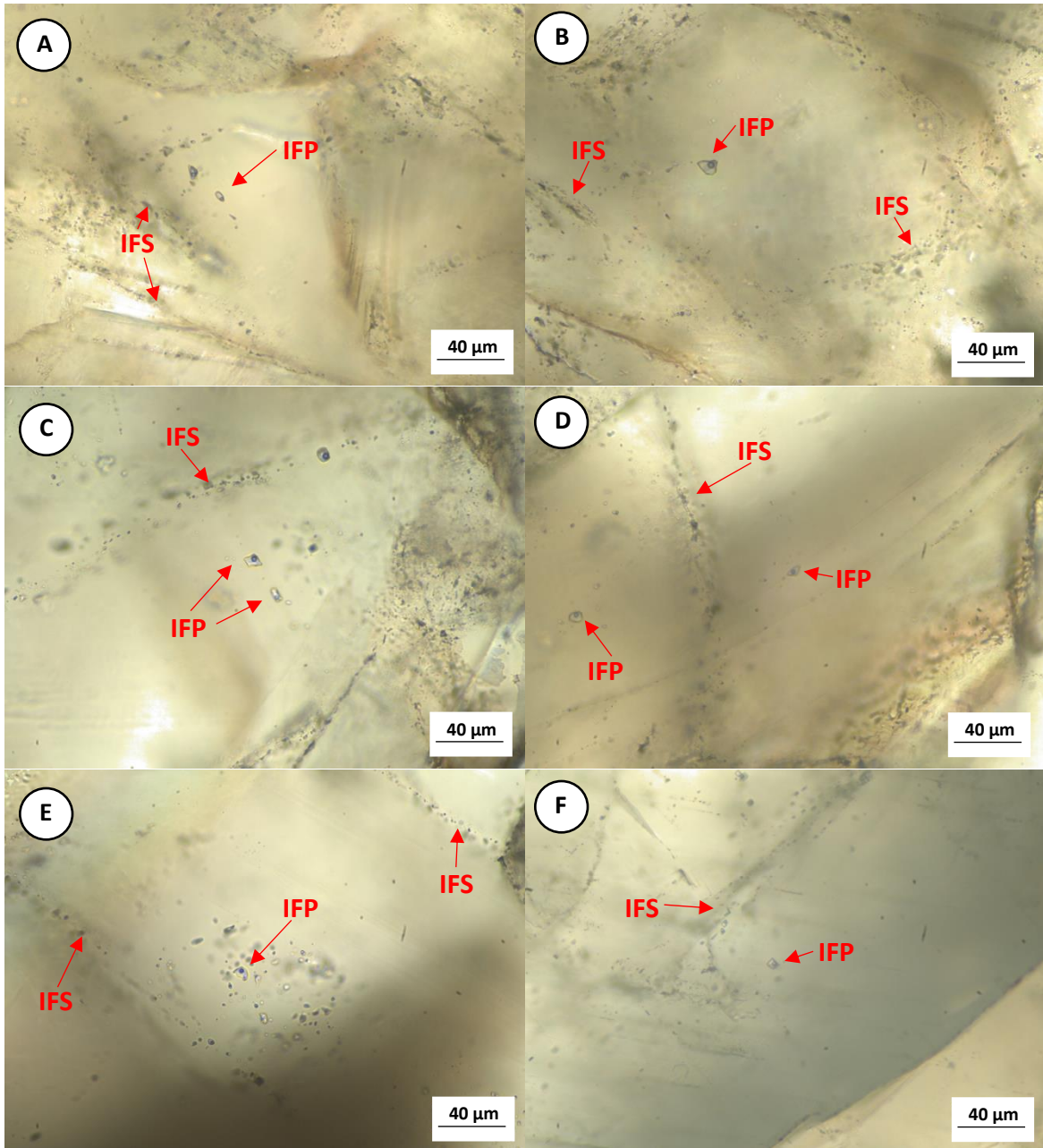


Figura 48. Fotomicrografía de las asociaciones de inclusiones fluidas muestras de asociaciones minerales metálicas en la zona mineralizada Altigracia. **A)** Cuarzo, se observan inclusiones fluidas primarias bifásica (V+L) aisladas y las secundarias están rellenoando fracturas preexistentes. **B)** Cuarzo, inclusiones fluidas primarias bifásicas (V+L) aisladas en el centro del grano y las secundarias en los bordes del grano formando lineamientos curvos. **C)** Cuarzo, las inclusiones fluidas primarias bifásicas (V+L) aisladas con morfologías tabular e irregular y las secundarias muy alineados. **D)** Las inclusiones fluidas primarias se encuentran en el centro de los granos de cuarzo con morfologías elípticas y las inclusiones fluidas secundarias se encuentran rellenoando fracturas. **E)** Cuarzo, las inclusiones fluidas primarias se encuentran en el centro del grano y las secundarias en los bordes, formando lineamientos muy marcados. **F)** Calcita, las inclusiones fluidas primarias bifásicas (V+L) con forma cuadrada aisladas y las secundarias están rellenoando fracturas o formando líneas. Abreviaturas: IFP = inclusiones fluidas primarias, IFS = inclusiones fluidas secundarias, L = liquido, V = vapor. Referencia de las abreviaturas de los minerales. Simbología incluida en la figura.

5.2 Microtermometría de inclusiones fluidas

En las inclusiones fluidas se obtuvieron las siguientes temperaturas: temperatura eutéctica (Te), temperatura de fusión de hielo (Tmi) y temperatura de homogenización (Th).

5.2.1. Zona Mineralizada Arista

En las vetas Splay 5 y Splay 66 se tomaron las muestras en los niveles 12 (682 m.s.n.m.), 14.5 (639 m.s.n.m.), 16 (611 m.s.n.m.), 17.0 (590 m.s.n.m.), 18.0 (569 m.s.n.m.), 18.5 (560 m.s.n.m.), 20.0 (530 m.s.n.m.), 20.5 (520 m.s.n.m.) y 22.5 (480 m.s.n.m.). Se midieron un total de 302 inclusiones fluidas y se obtuvo la Te, Tmi y Th, los resultados se observan en la Tabla 5. La salinidad, densidad y presión se calcularon con la fórmula "HOKIEFLINCS_H₂O-NACL" de Steele-MacInnis *et al.* (2012) para inclusiones fluidas de H₂O-NaCl.

Las etapas II y IIIC de la veta Splay 5 tienen una Te mínima de -36.5 y -34.7 °C y las etapas II, IIIB, IIIC y VI de la veta Splay 66 poseen una Te mínima de -27.8°, -33.1°, -33.8° y -35.1 °C. Estas temperaturas indican que el fluido acuoso está dominado por cationes monovalentes y es un fluido polisalino complejo (Davis *et al.*, 1990; Goldstein y Reynolds, 1994).

Etapa II

Los datos microtermométricos de la etapa II se obtuvieron en las vetas Splay 5 y Splay 66.

Las inclusiones fluidas de la veta Splay 5, nivel 18.5 están hospedados en esfalerita. Tiene una salinidad que varía en un rango de 5.7 a 9.1 % en peso de NaCl equiv. con una densidad promedio de 0.9 g/cm³ y la Th varía entre 179.1 y 242.3 °C. Estas inclusiones fluidas fueron atrapados a una profundidad de aproximadamente 195 m (la profundidad se obtuvo mediante la gráfica de Haas, 1971). En esta veta, las muestras presentan textura coloforme y se identificó calcedonia, lo que indican evidencias de ebullición (Simmons *et al.*, 2005; Hedenquist *et al.*, 1998). Los datos microtermométricos se plotearon en el diagrama de temperatura *versus* salinidad (Figura 49A)

Las asociaciones de inclusiones fluidas de la veta Splay 66, nivel 18.5 están alojados en esfalerita y cuarzo. Tienen una salinidad que varía en un rango de 7.4 a 11.5 % en peso de NaCl equiv. con una densidad promedio de 0.9 g/cm³ y su Th varía de 225.3 a 254.8 °C. Estas inclusiones fueron atrapadas a una profundidad de aproximadamente 391 m (la profundidad se obtuvo mediante la gráfica de Haas, 1971). En esta veta, las muestras presentan textura masiva de sulfuros, no teniendo evidencias de ebullición. Los resultados obtenidos de las inclusiones fluidas en la etapa II se representaron en el diagrama Th *versus* salinidad (Figura 49A).

Etapa IIIB

Los datos microtermométricos de la etapa IIIB se obtuvieron en las vetas Splay 5 y Splay 66.

La veta Splay 5, nivel 18.0 tiene una salinidad que varía de 11.8 a 12.5 % en peso de NaCl equiv., con una densidad promedio de 0.9 g/cm³ y la Th está entre 222.5 a 239.5 °C. Las inclusiones fluidas fueron atrapadas a una profundidad de aproximadamente 279 m (la profundidad se obtuvo mediante la gráfica de Haas, 1971). Además, esta esfalerita presenta micro-inclusiones sólidas de calcopirita. En esta veta, la mayoría de las muestras presentan textura masiva, no hay evidencias de ebullición, la precipitación de los sulfuros se desarrolló mediante un enfriamiento conductivo (Camprubí y Albinson, 2006).

La salinidad de la veta Splay 66 se encuentra entre 5.1 y 15.0 % en peso de NaCl equiv. con una densidad promedio de 0.9 g/cm³ y su Th está en un rango de 186.3 a 272.3 °C, además, las inclusiones fluidas fueron atrapadas a una profundidad de aproximadamente 325 m (la profundidad

se obtuvo mediante la gráfica de Haas, 1971). Las muestras EA-01A (nivel 20) y EA071 (nivel 18.5) se encuentran en el centro de la veta Splay 66. Las inclusiones fluidas tienen una Th que varía de 243.4 a 231.9 °C y la salinidad está en un rango de 10.7 a 9.8 % en peso de NaCl equiv. Las muestras EA065 (nivel 22.5) y EA089 (nivel 20.5) se encuentran en el extremo noroeste de la veta Splay 66, las inclusiones fluidas halladas tienen una Th de 259.5 a 214.3 °C y la salinidad está en un rango de 5.9 a 8.8 % en peso de NaCl equiv. En esta veta, las muestras presentan textura coliforme y hay presencia de calcedonia, evidencia de ebullición (Simmons *et al.*, 2005; Hedenquist *et al.*, 1998). Los datos microtermométricos obtenidos de las inclusiones fluidas de la etapa IIIB se representaron en el diagrama de Th versus salinidad (Figura 49B).

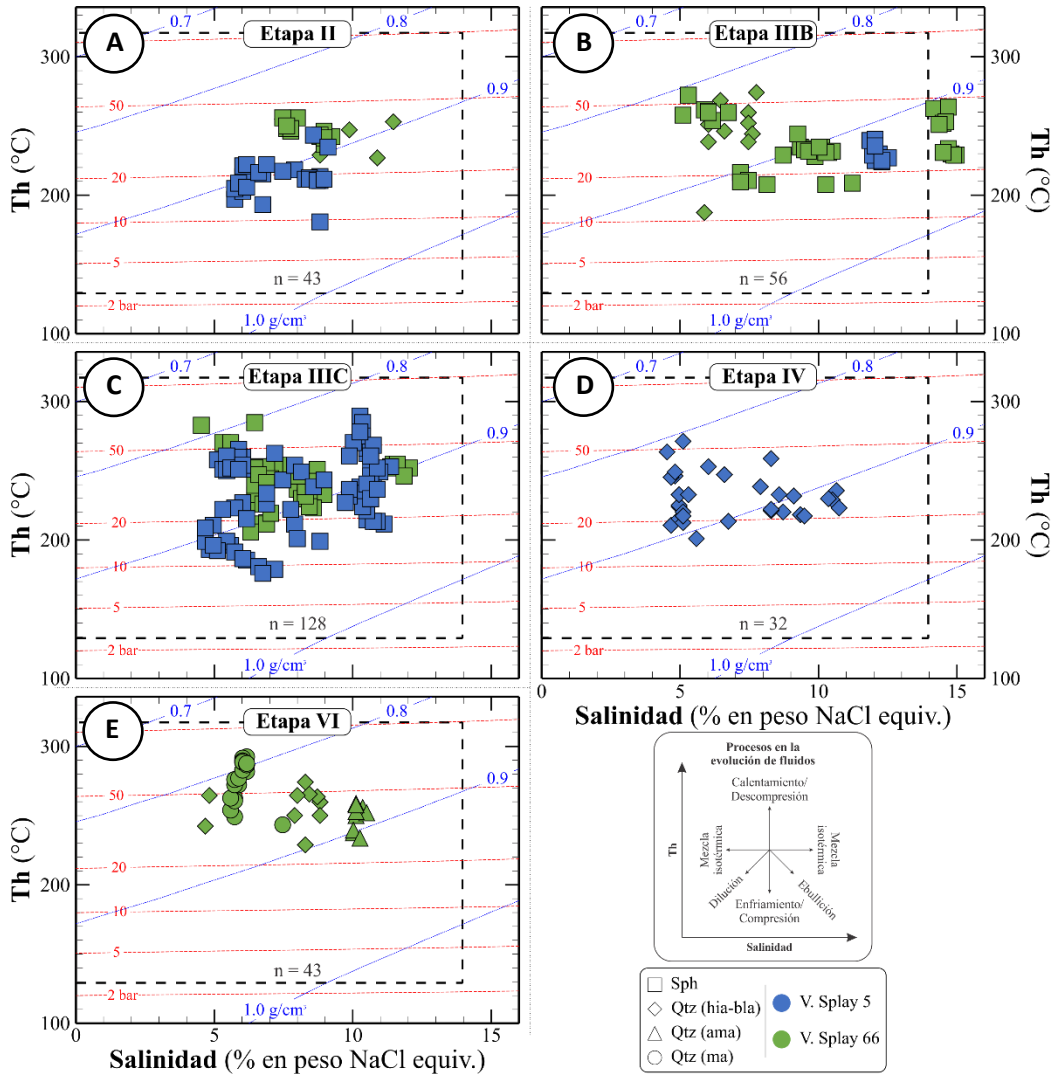


Figura 49. Diagrama de la temperatura de homogenización (Th, °C) vs salinidad (% en peso de NaCl equiv.) que muestra la evolución del fluido en la zona mineralizada Arista. La línea azul representa la densidad (g/cm³) y la línea roja representa la presión (bar). Las isopletas de densidad y presión se generaron con la fórmula de Steele-MacInnis *et al.* (2012), procesos de evolución de fluidos (Wilkinson, 2001). Abreviaturas: ama = amatista, bla = blanco, hia = hialino, ma = marrón, n = número de análisis, Qtz = cuarzo, Sph = esfalerita, Th = temperatura de homogenización, V = veta. Referencia de las abreviaturas de los minerales. Leyenda incluida en la figura.

Etapa IIIC

Los datos microtermométricos de la etapa IIIC se obtuvieron de las vetas Splay 5 y Splay 66.

Las asociaciones de inclusiones fluidas de la veta Splay 5 están hospedados en esfalerita. Tienen una salinidad de 4.6 a 11.3 % en peso de NaCl equiv., que representan una densidad de 0.9 g/cm³ y su Th se encuentra en un rango de 174.3 a 288.1 °C. Además, las inclusiones fluidas quedaron atrapadas a una profundidad cercana a 295 m (la profundidad se obtuvo mediante la gráfica de Haas, 1971). La muestra EA-11 (nivel 16) se ubica en el parte medio de la veta Splay 5, su salinidad tiene un promedio de 7.9 % en peso de NaCl equiv. y una Th de 251.5 °C. Las muestras EA097 (nivel 20.5) y EA062 (nivel 14.5) se encuentran en el extremo sureste de la veta Splay 5: la muestra EA097 tiene un promedio de salinidad de 7.8 % en peso de NaCl equiv., y una Th de 222.1 °C; la muestra EA062 posee una salinidad de 7.8 % NaCl equiv. y su Th es de 224 °C.

Las inclusiones fluidas de la veta Splay 66 están alojados en esfalerita (asociado con calcopirita y galena). Tienen una salinidad de 4.5 a 12.0 % en peso de NaCl equiv. La densidad está en un promedio de 0.9 g/cm³ y la Th se encuentra entre 204.4 y 283.3 °C; además, las inclusiones fluidas se atraparon a una profundidad de aproximadamente 375 m (la profundidad se obtuvo mediante la gráfica de Haas, 1971). La muestra EA104 (nivel 18) tiene una salinidad promedio de 6.0 % en peso de NaCl equiv. y su Th es de 245.5 °C; la muestra EA006 (nivel 17) posee una salinidad promedio de 8.0 % en peso de NaCl equiv. y su Th es de 238.9 °C.

En esta etapa, las muestras de sulfuros presentan textura masiva y coloforme. Con la petrografía no se han evidenciado minerales y texturas de ebullición. Los datos microtermométricos obtenidos de las inclusiones fluidas en la etapa IIIC se representaron en el diagrama Th *versus* salinidad (Figura 49C).

Etapa IV

Las asociaciones de inclusiones fluidas de la veta Splay 5 fueron hallados en cuarzo (asociado con sulfosales de plata, calcopirita, piritita y tetraedrita-tennantita). Tiene una salinidad de 4.5 a 10.7 % en peso de NaCl equiv., una densidad de 0.9 g/cm³ y su Th está en un rango de 199.7 a 269.7 °C. Asimismo, estas inclusiones fluidas quedaron atrapadas a una profundidad de aproximadamente 304 m (la profundidad se obtuvo mediante la gráfica de Haas, 1971). Las muestras EA-11 (nivel 16) y EA032 (nivel 12) se ubican en la parte media de la veta Splay 5. La muestra EA-11 posee un promedio de salinidad de 9.1 % en peso de NaCl equiv. y una Th de 229.3 °C. La muestra EA032 tiene una salinidad promedio de 5.3 % en peso de NaCl equiv. y una Th de 227.1 °C. La muestra EA097 (nivel 20.5) se encuentra en el extremo sureste de la veta Splay 5, dispone de una salinidad promedio de 5.3 % en peso de NaCl equiv. y una Th de 227.1 °C.

En esta etapa, las muestras recolectadas presentan textura coloforme y se evidenciaron texturas pseudo-aciculares, *parallel bladed* y calcedonia, indicando evidencias de ebullición (Simmons *et al.*, 2005; Hedenquist *et al.*, 1998). Los datos microtermométricos obtenidos de las inclusiones fluidas en la etapa IV se representaron en el diagrama de Th *versus* salinidad (Figura 49D).

Etapa VI

Las muestras de la veta Splay 66 están ubicadas en el extremo noroeste de la veta. Las inclusiones fluidas primarias se hallaron en cuarzo hialino-blanco, cuarzo amatista y cuarzo marrón claro con salinidad de 4.6 a 10.5 % en peso de NaCl equiv., densidad de 0.8 g/cm³ y una Th entre 227.4 a 291 °C. Las inclusiones fluidas fueron atrapadas a una profundidad de aproximadamente

519 m (la profundidad se obtuvo mediante la gráfica de Haas, 1971). En la muestra EA104 del nivel 18, el cuarzo hialino-blanco tiene una salinidad promedio de 7.7 % en peso de NaCl equiv. y una Th de 255 °C. La muestra EA084 en el nivel 16, el cuarzo marrón claro posee una salinidad promedio de 6 % en peso de NaCl equiv. y una Th de 276 °C, y el cuarzo amatista tiene una salinidad promedio de 10.2 NaCl equiv. y una Th de 248.6 °C.

En esta etapa, las muestras presentan textura masiva. Con la petrografía no se ha evidenciado minerales y texturas de ebullición. Los datos microtermométricos obtenidos de las inclusiones fluidas de la etapa VI se representaron en el diagrama Th versus salinidad (Figura 49E).

5.2.2. Zona mineralizada Altagracia

La toma de las muestras se realizó en los niveles 1560, 1600, 1620 1670 de la veta El Huaje. Se midieron un total de 100 inclusiones fluidas y se obtuvieron la Tmi y Th, los resultados se muestran en la Tabla 6. La salinidad, densidad y presión se calculó con la fórmula “HOKIEFLINCS_H₂O-NACL” de Steele-MacInnis *et al.* (2012) para inclusiones fluidas de H₂O-NaCl. La temperatura eutéctica (Te) de las inclusiones fluidas de 8 a 10 µm dimensión no se pudieron obtener.

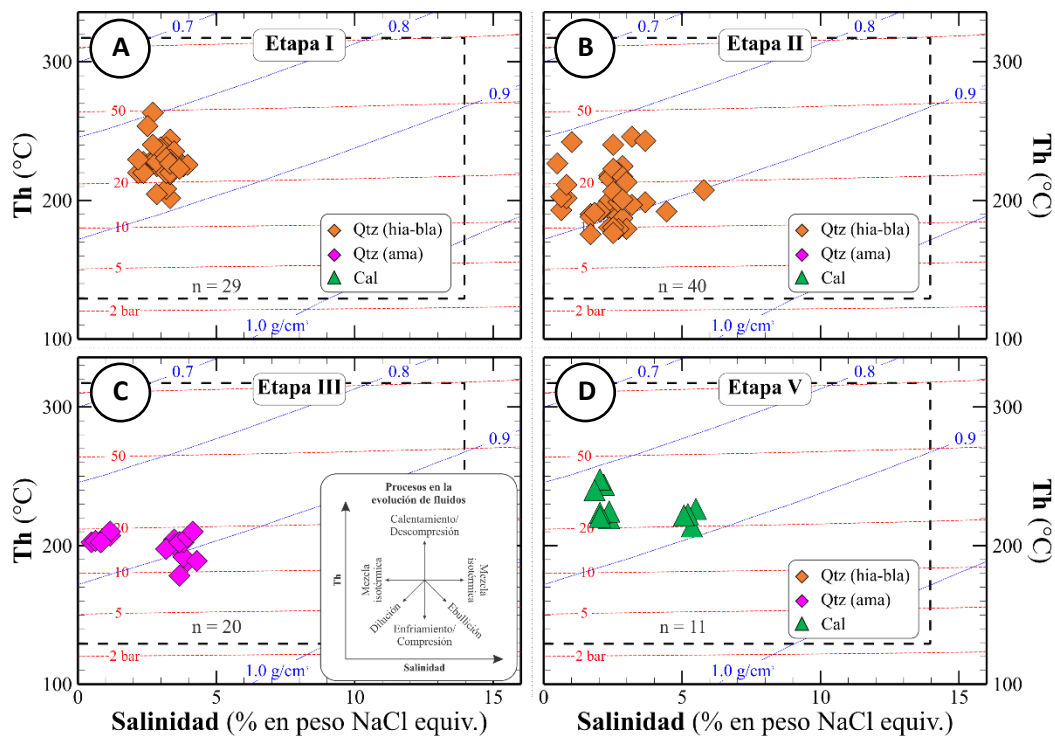


Figura 50. Diagrama de temperatura de homogenización (Th) versus salinidad, que muestra la evolución del fluido en la zona mineralizada de Altagracia. La línea azul representa la densidad (g/cm³) y línea roja representa presión (bar) calculadas a partir de la fórmula de Steele-MacInnis *et al.* (2012), procesos de evolución de fluidos (Wilkinson, 2001). Abreviaturas: bla = blanco, Cal = calcita, hia = hialino, n = número de análisis, Qtz = cuarzo, Th = temperatura de homogenización. Referencia de las abreviaturas de los minerales. Leyenda incluida en la figura.

Etapa I

Las asociaciones de inclusiones fluidas de la veta El Huaje están alojados en cuarzo. Tienen una salinidad de 2.2 a 4.0 % en peso de NaCl equiv. con una densidad de 0.9 g/cm³ y una Th varía de 200.1 a 262.4 °C. Estas inclusiones fluidas fueron atrapadas a una profundidad de 286 m (la

profundidad se obtuvo mediante la gráfica de Haas, 1971). Las muestras AG-166 (nivel 1560) y AG-164 (nivel 1600) se encuentran en el extremo suroeste de la veta El Huaje. La muestra AG-166 tienen una salinidad promedio de 3.6 % en peso de NaCl equiv. y una Th de 225.5 °C, la salinidad de AG-164 está en un promedio de 2.8 % en peso de NaCl equiv. y una Th de 224.1 °C. La muestra AG-022 (nivel 1670) se encuentra en la parte media de la veta El Huaje, tiene una salinidad promedio de 2.9 % en peso de NaCl equiv. y una Th de 230.9 °C. Los datos microtermométricos obtenidos de las inclusiones fluidas de la etapa I se representaron en el diagrama Th *versus* salinidad (Figura 50A).

Etapa II

Las asociaciones de inclusiones fluidas de la veta El Huaje están alojados en cuarzo. Tienen una salinidad de 0.5 a 5.9 % en peso de NaCl equiv. con una densidad de 0.9 g/cm³ y una Th de 174.1 a 244.7 °C. Las inclusiones fluidas fueron atrapadas a una profundidad de 173 m (la profundidad se obtuvo mediante la gráfica de Haas, 1971). La muestra AG-013 (nivel 1620) con textura masiva de cuarzo blanco-hialino con trazas de sulfuros tiene una salinidad promedio de 1.6 % en peso de NaCl equiv. y una Th de 209.4 °C. La muestra AG-009 (nivel 1620) con textura masiva y sulfuros diseminados posee una salinidad de 3.1 % en peso de NaCl equiv. y una Th de 205.8 °C. La muestra AG-008 (nivel 1620) con textura masiva de cuarzo blanco con piritita y minerales grises diseminados tienen una salinidad de 3.2 % en peso de NaCl equiv. y una Th de 201.9 °C. La muestra AG-070 (nivel 1620) con textura masiva y sulfuros diseminados tienen una salinidad de 1.9 % en peso de NaCl equiv. y una Th de 185.2 °C. La muestra AG-023 (nivel 1670) con textura de masiva de cuarzo blanco posee una salinidad de 2.6 % en peso de NaCl equiv. y una Th de 200.8 °C.

Las muestras AG-008 y AG-009 se ubican en la parte media de la veta y poseen alta salinidad y alta temperatura de homogenización que el resto de muestras analizadas. La muestra AG-013 se encuentra en el extremo suroeste de la veta, tiene baja salinidad y temperatura de homogenización semejante al centro del sistema (muestras AG-008 y AG-009). La muestra AG-070 se encuentra en el extremo noreste de la veta, tiene salinidad baja y temperatura de homogenización inferior a las muestras AG-008, AG-009 y AG-013. La muestra AG-023 se encuentra en la superficie, se ubica en el centro del sistema y tiene una salinidad y temperatura de homogenización semejante a las muestras AG-008 y AG-009 (Tabla 6). Los datos microtermométricos obtenidos de las inclusiones fluidas de la etapa II se representaron en el diagrama Th *versus* salinidad (Figura 50B).

Etapa III

Las asociaciones de inclusiones fluidas primarias de la veta El Huaje del nivel 1620 fueron medidas en cuarzo amatista. Posee una salinidad de 0.5 a 4.3 % en peso de NaCl equiv. con una densidad promedio de 0.9 g/cm³ y una Th de 177 a 208.7 °C. Estas asociaciones de inclusiones fluidas fueron atrapadas a una profundidad promedio de 172 metros (la profundidad se obtuvo mediante la gráfica de Haas, 1971). Los datos microtermométricos obtenidos de las inclusiones fluidas de la etapa III se representaron en el diagrama Th *versus* salinidad (Figura 50C).

Etapa V

Las inclusiones fluidas primarias de la veta El Huaje del Nivel 1620 están alojados en calcita de textura masiva. Tienen una salinidad de 1.9 a 5.6 % en peso de NaCl equiv., una densidad promedio de 0.9 g/cm³ y una Th de 213.7 a 247.8 °C. Las asociaciones de inclusiones fluidas quedaron atrapados a una profundidad promedio de 318 m (la profundidad se obtuvo mediante la gráfica de Haas, 1971). Los datos microtermométricos obtenidos de las inclusiones fluidas de la etapa V se representaron en el diagrama Th *versus* salinidad (Figura 50D).

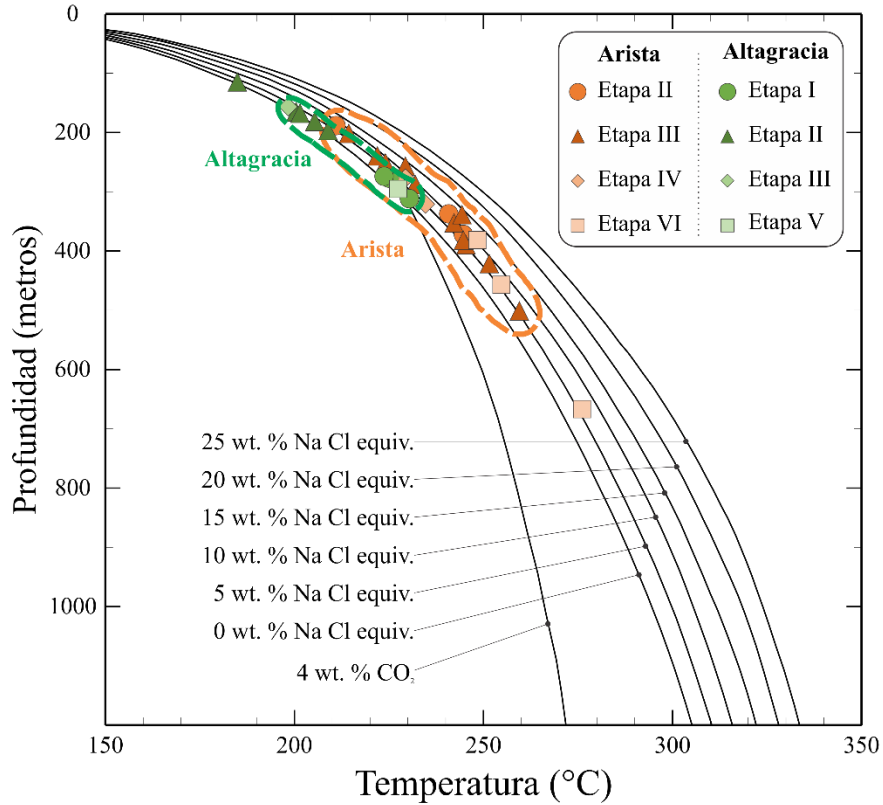


Figura 51. Diagrama de profundidad (m) vs temperatura (°C) de los resultados de inclusiones fluidas de la zona mineralizada Arista y Altagracia, isopletas de salinidad de Haas (1971) y curva por el efecto de CO₂ de Henley *et al.* (1984) (Modificado de Camprubí *et al.*, 2006).

La profundidad de cristalización de los minerales en las zonas mineralizadas de Arista y Altagracia se determinó mediante la gráfica de profundidad *versus* temperatura (Figura 51). La Temperatura de homogenización y salinidad se utilizaron para obtener la profundidad cristalización de sulfuro y mineral de ganga. El procedimiento para obtener el valor de la profundidad es la siguiente: a) la Th obtenida de las inclusiones fluidas se proyectó hasta interceptar (misma salinidad que las inclusiones fluidas) a la curva de salinidad de Haas (1971), b) del intercepto se proyectó horizontalmente hasta el eje de profundidad y obteniendo la profundidad de cristalización de los sulfuros y mineral de ganga. Los sulfuros y la ganga en Arista cristalizaron a una profundidad de 180 a 670 m, a una Th de 204.7 a 276 °C y salinidad de 5.0 a 14.6 % en peso de NaCl equiv. Los sulfuros y la ganga de la zona mineralizada Altagracia se formaron a una profundidad de 130 a 320 m, a una Th de 185.2 a 230.9 °C y salinidad de 1.6 a 3.6 % en peso de NaCl equiv.

Tabla 5. Resultados de los datos microtermométricos de las inclusiones fluidas para el sistema mineralizado de Arista.

#	Veta	Muestra	No. de inclusiones analizadas	Mineral	Etapas	Sistema químico	Temperatura de homogenización mínima, promedio y máxima (°C)	Temperatura de fusión de hielo mínima, promedio y máxima (°C)	Salinidad (wt.% NaCl equiv.) mínima, promedio y máxima	Presión de homogenización (bar)	Densidad (g/cm ³)	Profundidad (m)
1	Splay 5	EA-08A	25	Esfalerita	II	H ₂ O-NaCl	179.1/ 211.2 /242.3	-5.9/ -4.7 /-3.5	5.7/ 7.4 /9.1	9.2-32.7	0.909	213
2		EA-09	9	Esfalerita	IIIB	H ₂ O-NaCl	222.5/ 229.3 /239.5	-8.7/ -8.4 /-8.1	11.8/ 12.1 /12.5	22.2-30.3	0.928	279
3		EA062	32	Esfalerita	IIIC	H ₂ O-NaCl	174.3/ 224.0 /261.2	-7.7/ -5.0 /-3.2	5.3/ 7.8 /11.3	8.4-45.5	0.896	300
4		EA-11-A	33	Esfalerita		H ₂ O-NaCl	212.6/ 251.5 /288.1	-7.3/ -5.1 /-3.1	5.1/ 7.9 /10.9	18.6-67.5	0.864	473
5		EA097-A	17	Esfalerita	IV	H ₂ O-NaCl	191.4/ 222.1 /277.0	-7.3/ -5.0 /-2.8	4.6/ 7.8 /10.9	12.5-57.1	0.900	281
6		EA-11-E	15	Cuarzo		H ₂ O-NaCl	215.7/ 229.3 /257.4	-7.2/ -5.9 /-3.7	6.0/ 9.1 /10.7	19.9-42.4	0.902	300
7		EA032	11	Cuarzo		H ₂ O-NaCl	199.7/ 227.1 /269.7	-4.2/ -3.2 /-2.8	4.6/ 5.3 /6.7	14.8-52.9	0.872	319
8		EA097-B	6	Cuarzo		H ₂ O-NaCl	216.3/ 234.7 /262.5	-3.2/ -3.0 /-2.7	4.5/ 5.0 /5.3	20.8-47.3	0.860	363
9	Splay 66	EA007	13	Esfalerita	II	H ₂ O-NaCl	235.7/ 244.8 /254.8	-6.0/ -5.4 /-4.7	7.4/ 8.4 /9.2	29-40.7	0.877	400
10			5	Cuarzo		H ₂ O-NaCl	225.3/ 240.7 /253.1	-7.8/ -6.4 /-4.7	7.4/ 9.7 /11.5	23.6-39.7	0.894	368
11		EA089	8	Esfalerita	IIIB	H ₂ O-NaCl	206.3/ 214.3 /233.3	-7.6/ -5.7 /-4.5	7.2/ 8.8 /11.2	16.4-27.6	0.917	220
12		EA065	7	Esfalerita		H ₂ O-NaCl	252.9/ 259.6 /271.1	-4.2/ -3.6 /-3.1	5.1/ 5.9 /6.7	39.9-54	0.835	549
13		EA071	12	Esfalerita		H ₂ O-NaCl	226.7/ 231.9 /242.7	-7.0/ -6.5 /-6.0	9.2/ 9.8 /10.5	24.5-32.8	0.905	304
14		EA-01	10	Esfalerita		H ₂ O-NaCl	227.3/ 242.2 /262.6	-11/ -10.6 /-10.2	14.1/ 14.6 /15.0	23.7-43.7	0.934	348
15			10	Cuarzo	H ₂ O-NaCl	186.3/ 244.5 /272.3	-4.9/ -4.3 /-3.6	5.9/ 6.9 /7.7	11.1-54.1	0.863	432	
16		EA104-B	9	Esfalerita	IIIC	H ₂ O-NaCl	209.8/ 245.5 /283.3	-4.3/ -3.7 /-2.7	4.5/ 6.0 /6.9	18.1-64.6	0.852	486
17		EA006	37	Esfalerita		H ₂ O-NaCl	204.4/ 238.9 /253.3	-8.3/ -5.1 /-3.9	6.3/ 8.0 /12.0	16.3-39.5	0.881	365
18		EA084-B	24	Cuarzo	VIA	H ₂ O-NaCl	242.4/ 276.0 /291.0	-4.7/ -3.7 /-3.4	5.6/ 6.0 /7.4	33.1-72.6	0.811	747
19		EA104-A	10	Cuarzo	VIB	H ₂ O-NaCl	227.4/ 255.0 /273.1	-5.7/ -4.9 /-2.8	4.6/ 7.7 /8.8	25.1-54.6	0.858	497
20		EA084-C	9	Cuarzo amatista		H ₂ O-NaCl	233.6/ 248.6 /259.1	-7.0/ -6.7 /-6.6	10.0/ 10.2 /10.5	27.7-43	0.888	419

Tabla 6. Resultados de los datos microtermométricos de las inclusiones fluidas para el sistema mineralizado de Altagracia.

#	Veta	Muestra	No. de inclusiones analizadas	Mineral	Etapas	Sistema químico	Temperatura de homogenización mínima, promedio y máxima (°C)	Temperatura de fusión de hielo mínima, promedio y máxima (°C)	Salinidad (wt.% NaCl equiv.) mínima, promedio y máxima	Presión de homogenización (bar)	Densidad (g/cm ³)	Profundidad (m)
1	El Huaje	AG-022	10	Cuarzo	I	H ₂ O-NaCl	200.1/ 230.9 /262.4	-2.0/ -1.7 /-1.4	2.4/ 2.9 /3.4	15.2-47.7	0.848	351
2		AG-164	10	Cuarzo		H ₂ O-NaCl	202.8/ 224.1 /239.1	-2.0/ -1.7 /-1.3	2.2/ 2.8 /3.4	16.1-32.2	0.857	297
3		AG-166	9	Cuarzo		H ₂ O-NaCl	218.1/ 225.5 /233.8	-2.4/ -2.1 /-1.9	3.2/ 3.6 /4.0	21.7-29.1	0.861	297
4		AG-009	6	Cuarzo	II	H ₂ O-NaCl	190.5/ 205.8 /219.8	-2.7/ -1.9 /-1.4	2.4/ 3.1 /4.5	12.3-22.6	0.882	203
5		AG-023A	11	Cuarzo		H ₂ O-NaCl	178.5/ 200.8 /223.6	-1.7/ -1.5 /-1.3	2.2/ 2.6 /2.9	9.5-24.2	0.884	186
6		AG-008	9	Cuarzo		H ₂ O-NaCl	178.1/ 201.9 /244.7	-3.6/ -1.9 /-1.0	1.7/ 3.2 /5.9	9.4-35.4	0.886	206
7		AG-070	4	Cuarzo		H ₂ O-NaCl	174.1/ 185.2 /190.2	-1.2/ -1.1 /-1.0	1.7/ 1.9 /2.1	8.6-12.4	0.898	128
8		AG-013	10	Cuarzo	III	H ₂ O-NaCl	174.8/ 209.4 /241.2	-1.8/ -0.9 /-0.3	0.5/ 1.6 /3.1	8.7-33.7	0.865	236
9		AG-071	20	Cuarzo		H ₂ O-NaCl	177/ 198.8 /208.7	-2.6/ -1.7 /-0.3	0.5/ 2.9 /4.3	9.1-18.3	0.889	172
10		AG-134	11	Calcita	V	H ₂ O-NaCl	213.7/ 227.6 /247.8	-3.4/ -2.0 /-1.1	1.9/ 3.3 /5.6	19.7-37.6	0.856	318

CAPÍTULO 6: ISÓTOPOS ESTABLES

6.1. Generalidades de los isótopos

Cada elemento químico está definido por el número de protones (Z) en su núcleo, que define la posición de los elementos en la tabla periódica. En cada posición existe varios isótopos del mismo elemento, que se diferencian por el número de neutrones (N) (Allègre, 2008). La suma de número de protones y neutrones en los núcleos de un átomo es el número de masa (A).

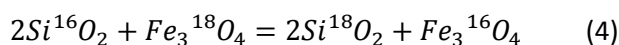
El núclido es una especie de átomo que está constituido por un número específico de protones y neutrones. Se le representa de la siguiente manera A_ZC : Z = número de protones, A = número de masa y C = elemento químico (Faure, 1998). Los núclidos se clasifican en isótopos, isótonos e isóbaros. Los isótopos de un elemento tienen propiedades químicas idénticas y difieren solo en su masa. Los isótonos tienen el mismo número de neutrones y diferente número de protones. Los isóbaros tienen igual valor de número de masa y diferente número de protones y neutrones. En total, existen 2500 núclidos, pero sólo 270 son estables (Faure, 1998).

Los isótopos se clasifican en estables y radioactivos. Los isótopos estables no decaen en otros elementos, mientras que los radioactivos son inestables y pueden decaer en otros elementos (Faure, 1998). La radioactividad es un fenómeno por el cual ciertos núclidos se transforman espontáneamente en otro núcleo (Allègre, 2008).

6.2. Isótopos estables de O, C y S

Fraccionamiento. Es el proceso de segmentación del isótopo entre dos sustancias o dos fases de la misma sustancia con diferente relación isotópica (Hoefs, 2015). El fraccionamiento está controlado por la temperatura, presión, contenido de agua y actividad del oxígeno (Rollinson, 1993). Los principales fenómenos que producen el fraccionamiento son:

1) Reacciones de intercambio isotópico. Involucra la distribución del isótopo de un elemento entre diferentes sustancias químicas que contiene dicho elemento (Hoefs, 2015). Por ejemplo, el intercambio entre cuarzo y magnetita reacción 3.



a) Factor de fraccionamiento (α). Se define como la proporción de los números de dos isótopos en un compuesto químico. Por ejemplo, la relación isotópica de cuarzo dividida por la proporción isotópica de la magnetita.

$$\alpha_{\text{Cuarzo-magnetita}} = \frac{{}^{18}O/{}^{16}O \text{ en cuarzo}}{{}^{18}O/{}^{16}O \text{ en magnetita}}$$

b) El valor delta (δ). Para dos compuestos, cuarzo y magnetita, donde la composición isotópica se ha medido en el laboratorio por espectrometría de masas convencional.

$$\delta_{\text{Cuarzo}} = \left(\frac{{}^{18}O/{}^{16}O \text{ cuarzo}}{{}^{18}O/{}^{16}O \text{ estándar}} - 1 \right) \cdot 10^3 (\text{‰})$$
$$\delta_{\text{Magnetita}} = \left(\frac{{}^{18}O/{}^{16}O \text{ magnetita}}{{}^{18}O/{}^{16}O \text{ estándar}} - 1 \right) \cdot 10^3 (\text{‰})$$

2) Efecto isotópico. Se le denomina efecto isotópico cuando las diferencias en las propiedades químicas y físicas surgen de la variación en la masa atómica de un elemento (Hoefs, 2015).

3) Efecto isotópico cinético. Se asocia a procesos incompletos y unidireccionales como la evaporación, reacción de disociación, reacción biológicamente mediada y la difusión. El último proceso es de especial importancia para fines geológicos. Además, ocurre cuando la velocidad de una reacción química es sensible a la masa atómica en una posición particular en una de las especies que reaccionan (Hoefs, 2015; Sharp, 2007).

4) Efecto isotópico en equilibrio. Este efecto se produce en la masa atómica sobre la energía de enlace. En una reacción, el isótopo ligero de una molécula es sustituido por un isótopo pesado (Sharp, 2007).

6.2.1. Oxígeno (O)

El oxígeno es el elemento más abundante de la Tierra. El oxígeno puede estar formando compuestos sólidos, líquidos y gaseosos, la mayoría de estas especies son muy estables a grandes intervalos de temperatura (Hoefs, 2015). El oxígeno tiene tres isótopos estables (^{16}O , ^{17}O y ^{18}O) según Rosman y Taylor (1998) (Tabla 7).

Tabla 7. Abundancia de los isótopos de oxígeno en la naturaleza.

Isótopo	Abundancia (%)
^{16}O	99.757
^{17}O	0.038
^{18}O	0.205

En depósitos epitermales la medición de los isótopos de oxígeno se realizan en inclusiones fluidas y en minerales ganga como cuarzo, adularia, arcillas y carbonatos. Además, el ascenso de los fluidos calientes a través de las fracturas produce una interacción entre agua y roca, cambiando su composición isotópica de O, de forma que el fluido se empobrece en ^{16}O y la roca se enriquece en ^{16}O . Estos cambios se deben a tres procesos principales: 1) pérdida de vapor por ebullición, 2) mezcla de fluidos, e 3) interacción agua/roca (Faure y Mensing, 2005; Simmons *et al.*, 2005; Camprubí y Albinson, 2006). Además, las rocas graníticas, metamórficas y sedimentarias están enriquecidas en $\delta^{18}\text{O}$ respecto al valor del manto, mientras el agua del mar y meteórica están empobrecidas en $\delta^{18}\text{O}$ (Rollinson, 1993).

Variación isotópica en aguas naturales

Las aguas naturales pueden ser fluidos formadores de minerales si son calentadas por la interacción de cuerpos de magma o aguas de circulación profunda en la corteza. Las aguas que estarían implicadas en la formación de minerales son las siguientes:

a) Agua meteórica. Las variaciones isotópicas de H_2O en lluvia, nieve, hielo glaciar, vapor, lagos, ríos y muchas aguas subterráneas de baja temperatura, son sistemáticas, a mayor latitud y elevación, los valores δD y $\delta^{18}\text{O}$ son más bajos (Taylor Jr, 1979).

b) Agua marina. Su composición isotópica en la actualidad es generalmente uniforme a $\delta D = 0$ y $\delta^{18}\text{O} = 0$. Por esta razón el SMOW es una estándar isotópico adecuado (El valor del SMOW posee la siguiente razón $D/H = 155.76 \pm 0.10 \times 10^6$, $^{18}\text{O}/^{16}\text{O} = 2,005.20 \pm 0.43 \times 10^6$, estos valores se tomaron de Hoefs, 2015), excepto en áreas donde la evaporación es muy intensa ya que los valores

$\delta^{18}O$ llegan a ser de +2‰ y los δD alcanzan +11 ‰, debido a un incremento de la salinidad. Además, se observa una dilución apreciable con respecto a las aguas continentales (Taylor Jr, 1979).

c) Aguas geotérmicas. Los valores de $\delta^{18}O$ y δD en aguas calentadas y vapor en campos geotérmicos del mundo muestran que todo el H_2O deriva de la superficie (Graig, 1963). La interacción entre agua/roca produce un intercambio isotópico con los silicatos y carbonatos de las rocas encajantes. Esa interacción hace que el $\delta^{18}O$ se enriquezca en el agua geotérmica (Taylor Jr, 1979).

d) Aguas connatas o de formación. Las aguas de formación tienen un rango muy amplio de $\delta^{18}O$, δD y salinidad dentro de una cuenca sedimentaria. Los valores más altos de $\delta^{18}O$ se asocian típicamente a temperatura y salinidades altas. Los valores δD generalmente se incrementan con la salinidad y el contenido $\delta^{18}O$, debido a la mezcla de las aguas meteóricas con aguas connatas o de otro origen (Taylor Jr, 1979).

e) Agua de origen metamórfico. Presentan un rango relativamente restringido de δD (-20 a -65 ‰) pero amplio rango en $\delta^{18}O$ (+5 a +25 ‰). Dado que el factor de fraccionamiento isotópico depende de la temperatura, las aguas metamórficas de baja temperatura típicamente tienen alto δD y bajo $\delta^{18}O$, mientras las aguas de alta temperatura tienen bajo δD y alto $\delta^{18}O$ (Taylor Jr, 1979).

El amplio rango de $\delta^{18}O$ en aguas metamórficas se debe al hecho de que las rocas sedimentarias e ígneas metamorfizadas conservan en gran parte sus valores originales de $\delta^{18}O$ durante el metamorfismo. Las lutitas, calizas y chert tienden a ser ricas en $\delta^{18}O$ (de 15 a 35 ‰), mientras las rocas ígneas y areniscas, grauvacas, arcosa y sedimentos volcanogénicos tienden a ser bajas en $\delta^{18}O$ (de 5 a 13 ‰) (Taylor Jr, 1979).

f) Aguas magmáticas o agua juvenil. Este tipo de agua se encuentra en equilibrio con un magma o son fluidos ricos en volátiles que derivaron de un magma, son impulsadas desde grandes profundidades, por movimientos ascendentes de rocas intrusivas. Para poder obtener los valores de isótopos de aguas magmáticas, se toma muestra de vapor de H_2O en volcanes activos que podrían provenir directamente de un magma prístino y no está contaminado.

Los magmas de la corteza se forman en un rango de temperatura de 700 a 1,000 °C debido a que la mayoría de las rocas ígneas volcánicas y plutónicas suelen tener valores $\delta^{18}O$ muy uniformes (+5.5 a 10 ‰) pero variables de δD (-50 a 85 ‰), el rango isotópico normal de las aguas magmáticas es mucho más restringido que el rango isotópico de aguas metamórfica (Taylor Jr, 1979).

6.2.2. Carbono (C)

El carbono es uno de los elementos más abundante en el manto, plantas, carbón orgánico en sedimentos, metano, CO_2 atmosférico y la corteza (Sharp, 2007). El carbono forma parte desde compuestos orgánicos reducidos en la biosfera hasta compuestos inorgánicos oxidados como CO_2 y carbonatos en la corteza terrestre (Hoefs, 2015). El carbono tiene dos isótopos estables (^{12}C y ^{13}C) según Rosman y Taylor (1998) (Tabla 8).

En los depósitos minerales hidrotermales el carbono generalmente está en forma de carbonatos. Para la cristalización de los minerales carbonatados los fluidos deben contener especies de carbono oxidado (CO_2 , H_2CO_3 , HCO_3^- y CO_3^{2-}), el cual se origina de fuentes magmáticas, por

oxidación de carbón reducido y por lixiviación de los carbonatos sedimentarios (Ohmoto y Rye, 1979).

Tabla 8. Abundancia de los isótopos de carbono en la naturaleza.

Isótopo	Abundancia (%)
^{12}C	98.93
^{13}C	1.07

Los carbonatos de origen magmático-hidrotermal (rocas ígneas) presentan una composición isotópica entre -5 a -8 ‰ $\delta^{13}\text{C}$ (Ohmoto, 1972). El manto tiene una composición isotópica $\delta^{13}\text{C}$ de -6.0 ‰, mientras que los basaltos tipo MOR tienen un valor promedio de -6.6 ‰ (Exley *et al.*, 1986). El valor promedio de $\delta^{13}\text{C}$ en los carbonatos marinos no alterados es próximo a 0 ‰, en los carbonatos en equilibrio con aguas superficiales es de 2 a 4 ‰ (Sharp, 2007), y los carbonatos continentales tienen valores $\delta^{13}\text{C}$ negativos debido a la contribución de carbón orgánico. Finalmente, la materia orgánica tiene valores $\delta^{13}\text{C}$ alrededor de -25 ‰ (Sharp, 2007).

6.2.3. Azufre (S)

En azufre es un constituyente importante en la litosfera, biosfera, hidrosfera y atmósfera, se puede encontrar como sulfatos, sulfuros, gases (H_2S y SO_2) e iones oxidados y reducidos en solución (Rollinson, 1993). El azufre tiene cuatro isótopos estables que, ordenados por abundancia son: ^{32}S , ^{33}S , ^{34}S y ^{36}S (De Laeter *et al.*, 2003) (ver Tabla 9).

Tabla 9. Abundancia de los isótopos de azufre en la naturaleza.

Isótopo	Abundancia (%)
^{32}S	95.04
^{33}S	0.75
^{34}S	4.20
^{36}S	0.01

En los depósitos epitermales el azufre se encuentra en forma de sulfuros y sulfatos, de origen magmático y marino. El azufre de origen magmático puede derivar de fluidos magmáticos o lixiviados de rocas ígneas, mientras que el azufre de fuentes marinas ocurre como sulfatos acuosos que son incorporados a los depósitos minerales (Ohmoto y Rye, 1979).

El valor de $\delta^{34}\text{S}$ de algunos reservorios se detalla a continuación: los basaltos tipo MOR tienen un rango de 0.3 ± 0.5 ‰ (Sakai *et al.*, 1984); las rocas ígneas máficas, ultramáficas y ácidas tienen un promedio de 1.3 ‰ y 10 ± 5 ‰, y las rocas de la corteza tienen un valor de 6.6 ± 2.3 ‰ (Ohmoto y Rye, 1979). Los gases volcánicos y fuentes termales se encuentran en un intervalo de 0.9 a 2.9 ‰ (Hoefs, 2015). Los sulfatos evaporíticos marinos están en un rango de ca. 10 a 30 ‰ (Field, 1985) y el agua marina varía entre 18.5 y 21.0 ‰ (Rollinson, 1993).

6.3. Resultados de los análisis isotópicos para el estudio, y su interpretación

Para evaluar la procedencia de los isótopos de oxígeno, carbono y azufre se tomaron 46 muestras de sulfuros y carbonatos: en la zona mineralizada de Arista se obtuvieron 36 muestras de sulfuros y 3 muestras de calcita; en la zona mineralizada Altagracia se analizaron 4 muestras de sulfuros y 3 de calcita.

6.3.1. Isótopos de oxígeno y carbono

Zona mineralizada Arista

Se analizaron un total de tres muestras de calcita a escala microscópica a diferentes profundidades de las vetas Splay 5 y Splay 66. Los resultados se muestran en la Tabla 10 y se han representado en el diagrama de reservorios naturales (Figuras 52, 53).

Los resultados analíticos ($\delta^{18}\text{O}_{VSMOW}$) está en un rango de 5.1 a 12.6 ‰. La muestra EA054 de la veta Splay 5 está empobrecida en ^{18}O con respecto a la muestra EA094 de la veta Splay 66 (ver Figura 52). El $\delta^{13}\text{C}_{VPDB}$ oscila en un rango de -1.2 a -4.9 ‰ en cambio, la muestra más profunda de la veta Splay 66 (EA094) está ligeramente enriquecida en ^{13}C con respecto a la muestra EA054 (veta Splay 5) (ver Figura 53).

Los valores de isótopos de oxígeno (Figura 52) son ligeramente mayores a los reservorios de aguas magmáticas y basalto rico en alcalinos y están enriquecidos en ^{18}O . Los valores de isótopos de carbono (Figura 53) están levemente fuera del rango de los isótopos de manto (-8 a -3 ‰ por Rollinson, 1993).

Zona mineralizada Altagracia

En esta zona se recolectaron tres muestras de calcita a escala microscópica a diferentes profundidades. Los resultados están recopilados en la Tabla 10 y representados respecto a los reservorios naturales en las Figuras 52 y 53.

El $\delta^{18}\text{O}_{VSMOW}$ es relativamente uniforme y se encuentra en un rango estrecho de 5.8 a 8.6 ‰ (Figura 52). El $\delta^{13}\text{C}_{VPDB}$ oscila en un rango más reducido de -2.0 a -3.8 ‰ (Figura 53).

Los valores isotópicos de oxígeno (Figura 52) están dentro del rango de los reservorios de aguas magmáticas y basalto rico en alcalinos pero estos valores son mayores a los reservorios naturales de condritas, basalto MOR, OIB y a los basaltos de subducción. Los valores isotópicos de carbono (Figura 53) están muy levemente fuera del rango de los isótopos de manto (-8 a -3 ‰ por Rollinson, 1993).

Tabla 10. Resultado los análisis de isótopos de oxígeno y carbono en las zonas mineralizadas de Arista y Altagracia.

No. de muestras	Zona Mineralizada	$\delta^{18}\text{O}_{VPDB}$ (‰)	$\delta^{18}\text{O}_{VSMOW}$ (‰)	$\delta^{13}\text{C}_{VPDB}$ (‰)	Altura (m.s.n.m.)
EA094	Arista	-17.8	12.6	-1.2	472
EA080		-19.7	10.6	-1.7	539
EA054		-25.1	5.1	-4.9	662
PAG136	Altagracia	-24.4	5.8	-3.8	1360
PAG131		-23.7	6.5	-2.0	1548
PAG111		-21.6	8.6	-3.4	1557

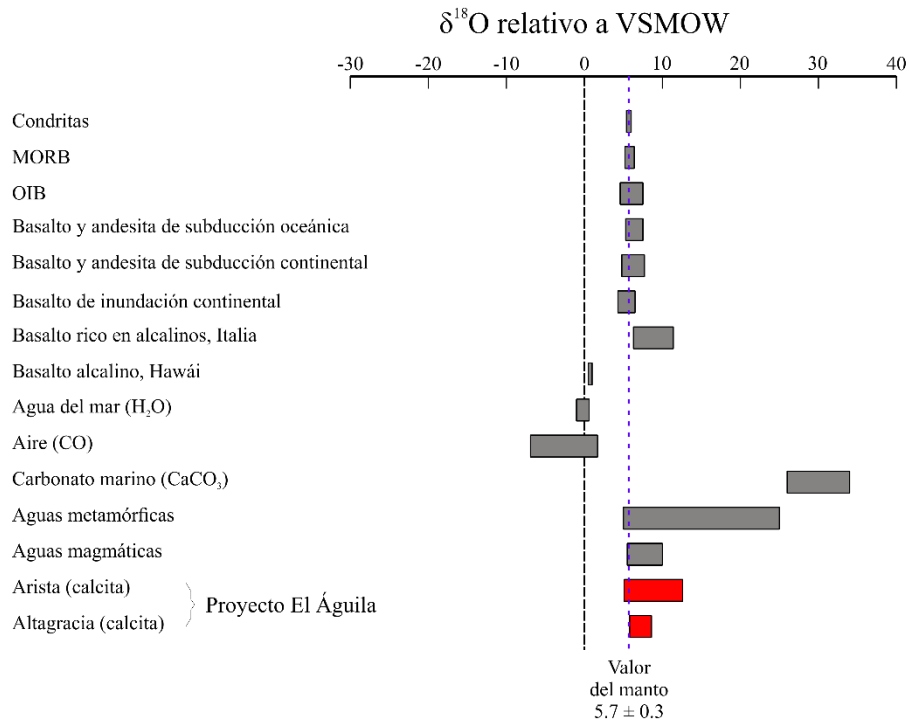


Figura 52. Composición isotópica de $\delta^{18}\text{O}$ en diferentes reservorios naturales y en los carbonatos de las zonas mineralizadas Arista y Altagracia (barras rojas), la línea azul discontinua representan el valor promedio del manto (Rollinson, 1993). Datos tomados de Harmon y Hoefs (1995), Taylor (1974; 1980), Kyser *et al.* (1982), Craig (1967), Brenninkmeijer (1993) y Murata *et al.* (1969).

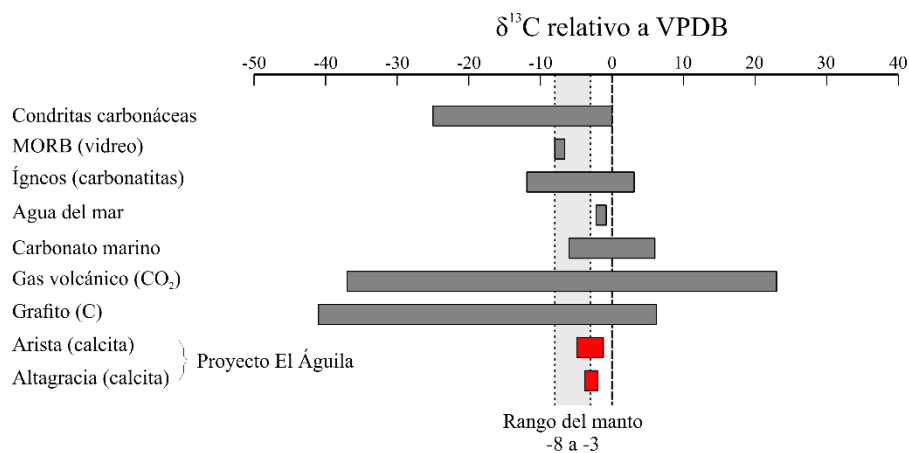


Figura 53. Composición isotópica de $\delta^{13}\text{C}$ en diferentes reservorios naturales y en los carbonatos de las zonas mineralizadas de Arista y Altagracia (Barras rojas), la región gris representa el rango del manto (Rollinson, 1993). Datos tomados de Kerridge (1985), Exley *et al.* (1986), Deines y Gold (1973), Kroopnick (1985), Land (1970), Valysaev *et al.* (1985), Deines (1980) y Ghent y O'Neil (1985).

6.3.2. Isótopos de azufre

Zona mineralizada Arista

En esta zona se analizaron 36 muestras de sulfuros a escala microscópica en cinco muestras diferentes que corresponden a las etapas II, IIIB y IV. Las muestras de textura bandeada se orientaron de acuerdo a su temporalidad (bandas tempranas y bandas tardías) y se tomaron muestras en cada banda (Figura 54). Los sulfuros analizados fueron esfalerita (amarilla, verde, marrón), galena, calcopirita, pirita, sulfosal de plata y arsenopirita. Los resultados se muestran en la Tabla 11 y se representaron un histograma (Figura 55).

En la etapa II se tomaron dos muestras (EA007, EA089) con valores de isótopo de azufre ($\delta^{34}\text{S}_{VCDT}$) de -3.11 a 2.74 ‰. En la muestra EA007 se analizó esfalerita y galena, la esfalerita varía de -2.17 a -0.55 ‰ y la galena tiene un valor de -3.11 ‰. En la muestra EA089 se analizó en pirita y arsenopirita, la pirita tiene -1.11 ‰ y la arsenopirita tiene 2.74 ‰.

En la etapa IIIB se recolectaron dos muestras (EA006 y EA-11) que tienen un rango de $\delta^{34}\text{S}_{VCDT}$ -4.39 a -0.09 ‰. En la muestra EA006 (Figura 49) se analizó esfalerita y galena, la esfalerita está en un rango de -2.39 a -0.76 ‰ y la galena tiene -4.20 a -0.09 ‰. En la muestra EA-11 se analizó en calcopirita, esfalerita y galena, la calcopirita tiene un valor de -3.69 ‰, la esfalerita se encuentra en un rango de -4.39 a -0.60 ‰ y la galena oscila entre -3.29 y -1.96 ‰.

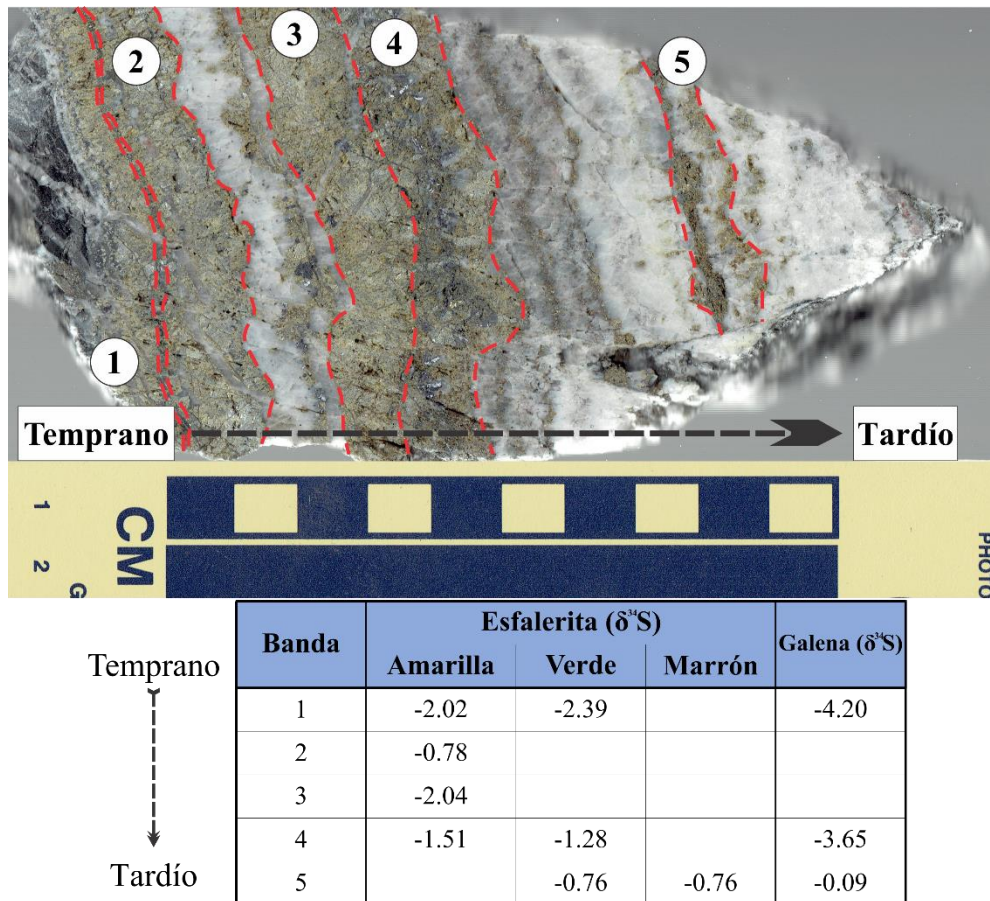


Figura 54. Isótopos de azufre ($\delta^{34}\text{S}$) en la muestra con textura bandeada (EA006).

En la etapa IV se analizaron isótopos de azufre ($\delta^{34}\text{S}_{VCDT}$) en la muestra EA-11, su valor se encuentra en un rango de -3.52 a 1.35 ‰ (Figura 55). Para esta etapa se examinaron calcopirita, galena y sulfosales de plata. La calcopirita tiene un valor de 1.35 ‰, galena de -3.52 ‰ y la sulfosales de plata de -1.70 ‰.

La muestra EA056 se recolectó de la roca encajante “roca caja”, el análisis de $\delta^{34}\text{S}_{VCDT}$ se realizó en pirita y tiene un valor de -5.45 ‰ (Figura 55).

Zona mineralizada Altagracia

En esta zona se recolectaron cinco muestras de sulfuros a escala microscópica en dos diferentes muestras que corresponde a la etapa II. Estas muestras presentan textura masiva y los sulfuros analizados fueron pirita y sulfosales de plata. Los resultados se muestran en la Tabla 11.

En la Etapa II se tomaron dos muestras (AG-11 y AG09) y el valor de $\delta^{34}\text{S}_{VCDT}$ oscila entre -2.75 y 2.05 ‰ (Figura 55). En la muestra AG-11 se analizó en pirita y sulfosales de plata, la pirita tiene un valor de -2.75 ‰, las sulfosales de plata tiene un valor de 2.05 ‰. En la muestra AG-09 se analizó en pirita y platas rojas, la pirita tiene un valor de -2.11 ‰ y las platas rojas de -1.53 ‰.

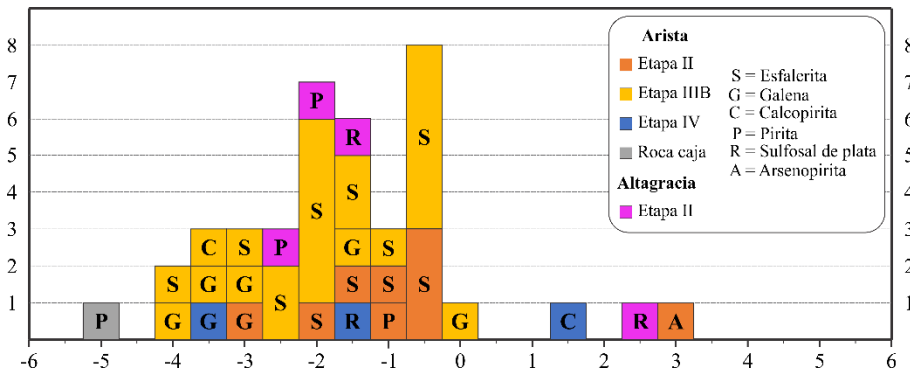


Figura 55. Histograma de frecuencia para los análisis de $\delta^{34}\text{S}_{VCDT}$ en sulfuros las zonas mineralizadas de Arista y Altagracia.

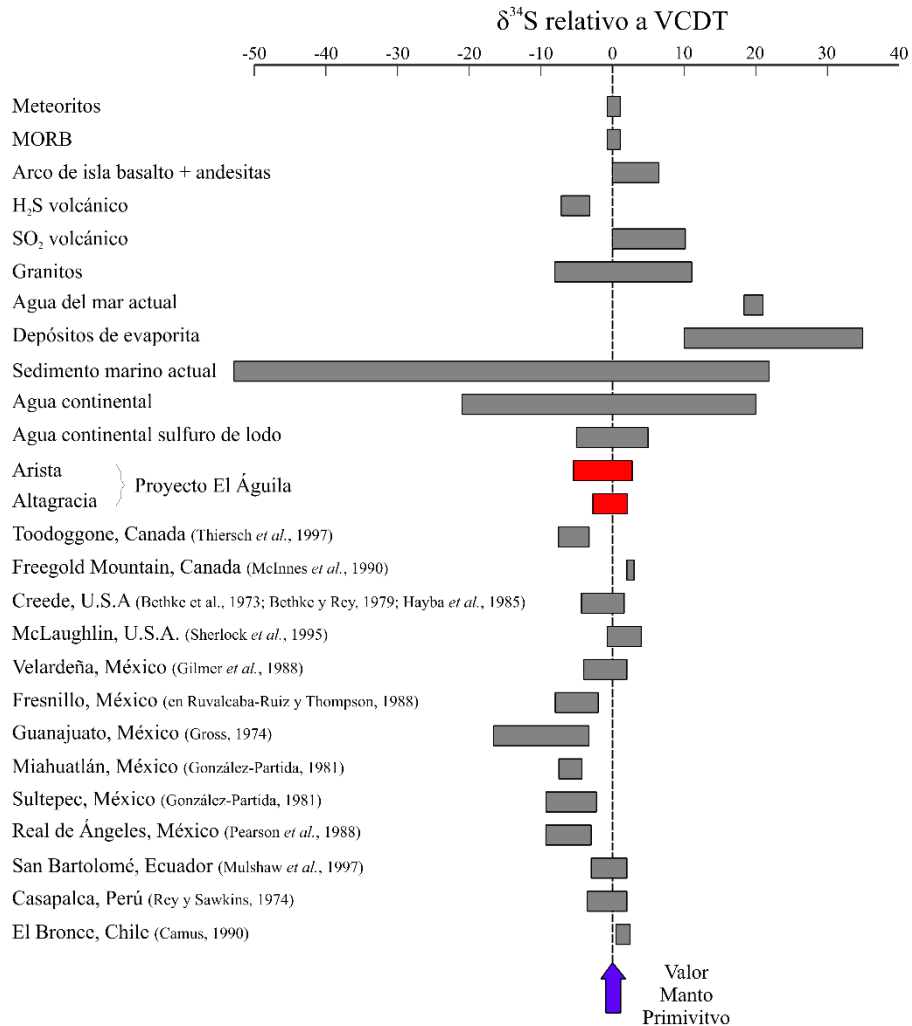


Figura 56. Composición isotópica de $\delta^{34}\text{S}$ en diferentes reservorios naturales y en los sulfuros de las zonas mineralizadas de Arista y Altagracia (barras rojas). Datos tomados de Rollinson (1993) y Camprubí (1999).

Las zonas mineralizadas de Arista y Altagracia tienen valores $\delta^{34}\text{S}_{\text{VCDT}}$ relativamente uniformes. El valor de $\delta^{34}\text{S}_{\text{VCDT}}$ en la zona mineralizada de Arista se encuentra en un rango de -4.39 a 2.74 ‰, la calcopirita y arsenopirita están enriquecidas en $\delta^{34}\text{S}$ y la pirita de la roca de caja está más empobrecida en $\delta^{34}\text{S}$; además, las bandas tempranas (Figura 54) de sulfuros (bandas de sulfuros muy cercanas a la roca encajante) están más empobrecidas en $\delta^{34}\text{S}$ respecto a las bandas tardías (bandas de sulfuros en el centro de la veta). El valor de $\delta^{34}\text{S}_{\text{VCDT}}$ en la zona mineralizada de Altagracia se encuentra en un rango de -2.75 a 2.05 ‰; las sulfosales de plata están más enriquecidas en $\delta^{34}\text{S}$. Estos valores son similares a los depósitos minerales de Creede (U.S.A.), Velardeña (México), San Bartolomé (Ecuador) y Casapalca (Perú) (Figura 56).

Tabla 11. Análisis de isótopos de azufre en los sulfuros de las zonas mineralizadas de Arista y Altagracia.

Zona	Muestra	Etapa	Banda	Sph ($\delta^{34}\text{S}$)			Gn ($\delta^{34}\text{S}$)	Cpy ($\delta^{34}\text{S}$)	R ($\delta^{34}\text{S}$)	Py ($\delta^{34}\text{S}$)	Apy ($\delta^{34}\text{S}$)
				Rubio	Verde	Marrón					
Arista	EA007	II	1	-2.17							
			2			-0.76					
			3	-1.89		-1.47					
			4	-0.55							
			5		-0.93		-3.11				
	EA089	II							-1.11		
										2.74	
	EA006	IIIB	1	-2.02	-2.39		-4.20				
			2	-0.78							
			3	-2.04							
			4	-1.51	-1.28		-3.65				
			5		-0.76	-0.76	-0.09				
	EA-11	IIIB	1		-4.39			-3.69			
			2	-2.87	-2.42		-1.96				
			3	-3.01	-2.87						
4			-0.60	-1.87		-3.29					
5				-0.65							
6				-2.18							
	IV					-3.52	1.35	-1.70			
EA056	RC*								-5.45		
Altagracia	AG-11	II							-2.75		
								2.05			
	AG-09	II							-2.11		
								-1.53			

Abreviaturas utilizadas: Sph=esfalerita, Gn=galena, Cpy=calcopirita, R=sulfosales de plata, Apy=arsenopirita, RC*=roca caja, 1=banda temprano, 5=banda tardía.

CAPÍTULO 7: DISCUSIÓN

7.1. Evolución del depósito y tipología

La formación de los yacimientos epitermales de Arista y Altagracia (distrito de Tlacolula, Oaxaca) está asociada al magmatismo somero correspondiente a la terminación oriental de la Sierra Madre del Sur durante el Mioceno. Estos yacimientos se disponen en forma de vetas constituidas por eventos hidrotermales multiepisódicos reconocibles macroscópicamente como etapas y subetapas de mineralización (Figuras 17 y 20). Éstas contienen asociaciones metálicas constituidas por pirita, arsenopirita, esfalerita, galena, calcopirita, sulfosales de plata, miargirita, sulfosales de cobre-plata y *electrum* en Arista; y por pirita, esfalerita, calcopirita, sulfosales de plata y argentita en Altagracia. Ambos depósitos minerales están emplazados en rocas volcánicas del Mioceno. El comportamiento polifásico y la mineralización de metales preciosos y básicos es el más común en los yacimientos de sulfuración intermedia a baja (Camprubí y Albinson, 2007).

En Arista, las temperaturas de precipitación de los minerales metálicos se obtuvieron mediante microtermometría de inclusiones fluidas y el uso de geotermómetros minerales/composicionales para las vetas Splay 5 y Splay 66 (Tabla 5, Figuras 41 al 46). Éstas varían entre 160 y 288.1 °C en la veta Splay 5, y entre 186.3 y 291 °C en la veta Splay 66. Las salinidades calculadas en inclusiones fluidas son similares en ambas vetas, entre 4.5 y 15 % en peso de NaCl equiv. Las asociaciones de sulfuros se encuentran en las etapas I, II, III y IV, que presentan las siguientes secuencias mineralógicas y temperaturas de precipitación (Figura 57):

Etapas I. Cuarzo → pirita → arsenopirita → esfalerita → galena → arsenopirita + calcopirita → proustita-pirargirita → tetraedrita-tennantita → *electrum* → cuarzo → calcita. La temperatura de formación de la arsenopirita es de 312 °C.

Etapas II. Cuarzo → pirita → arsenopirita → esfalerita → arsenopirita + galena → pirita + arsenopirita + calcopirita → calcopirita → calcopirita + proustita-pirargirita + tetraedrita-tennantita → pirita + proustita-pirargirita + tetraedrita-tennantita + *electrum* → tetraedrita-tennantita → cuarzo + calcita. Las temperaturas de precipitación en la veta Splay 5 son las siguientes: de esfalerita entre 179.1 y 242.3 °C, de tetraedrita-tennantita entre 170 y 250 °C, y de *electrum* a 160 °C. Los sulfuros y cuarzo de la veta Splay 66 precipitaron en los siguientes rangos: la esfalerita entre 235.7 y 254.8 °C, y el cuarzo entre 225.3 y 253.1 °C.

Etapas IIIB. Cuarzo → pirita → arsenopirita + pirita → esfalerita → galena + arsenopirita → calcopirita + arsenopirita → proustita-pirargirita + tetraedrita-tennantita + *electrum* → tetraedrita-tennantita → calcita. Las temperaturas de precipitación son las siguientes: en la veta Splay 5, la arsenopirita precipitó a 432 °C, la esfalerita entre 222.5 y 239.5 °C, la tetraedrita-tennantita rica en Sb entre 200 y 250 °C, y la tetraedrita-tennantita rica en As entre 160 y 170 °C; en la veta Splay 66, el cuarzo precipitó entre 186.3 y 272.3 °C, y la esfalerita entre 206.3 y 271.1 °C.

Etapas IIIC. Cuarzo → pirita → arsenopirita → esfalerita + calcopirita → arsenopirita + galena → arsenopirita + calcopirita → proustita-pirargirita + tetraedrita-tennantita + *electrum* → tetraedrita-tennantita → cuarzo + calcita. Las temperaturas de precipitación son las siguientes: en la veta Splay 5, de esfalerita entre 174.3 y 288.1 °C, de tetraedrita-tennantita entre 170 y 200 °C; la esfalerita de la veta Splay 66 precipitó entre 204.4 y 283.3 °C.

Etapa IV. Cuarzo → pirita → arsenopirita → esfalerita → arsenopirita + galena → arsenopirita + calcopirita → calcopirita → proustita-pirargirita + miargirita → proustita-pirargirita + miargirita + tetraedrita-tennantita → tetraedrita-tennantita + *electrum* → tetraedrita-tennantita. Las temperaturas de precipitación en la veta Splay 5 son las siguientes: la arsenopirita precipitó a 405 °C, el cuarzo entre 199.7 y 269.7 °C, la esfalerita entre 230.3 y 232 °C, la miargirita a 250 °C, la tetraedrita-tennantita entre 170 y 250 °C, y el *electrum* a 220 °C.

Etapa VI. Cuarzo marrón → cuarzo blanco-hialino → cuarzo amatista. Las temperaturas de precipitación del cuarzo de la veta Splay 66 son las siguientes: el cuarzo marrón entre 242.4 y 291 °C, el cuarzo blanco-hialino entre 227.4 y 273.1 °C, y el cuarzo amatista entre 233.6 y 259.1 °C.

La arsenopirita en asociación con pirita, calcopirita y esfalerita en la veta Splay 5 tiene un contenido de arsénico que varía entre 27.6 y 33.2 %at. As, que se asocian a temperaturas *a priori* anómalamente altas para ambiente epitermal (>400 °C; en base a Kretschmar y Scott, 1976).

En la zona mineralizada de Altagracia, la temperatura de precipitación de los sulfuros y minerales de ganga se obtuvo mediante microtermometría de inclusiones fluidas para la veta El Huaje (Tabla 6). La temperatura de precipitación de los sulfuros, cuarzo y calcita varía entre 174.1 y 262.4 °C, con salinidades calculadas entre 0.5 y 5.9 % en peso de NaCl equiv. Los sulfuros metálicos precipitaron en la etapa II, y la secuencia paragenética de la veta y sus temperaturas de precipitación son las siguientes (Figura 58):

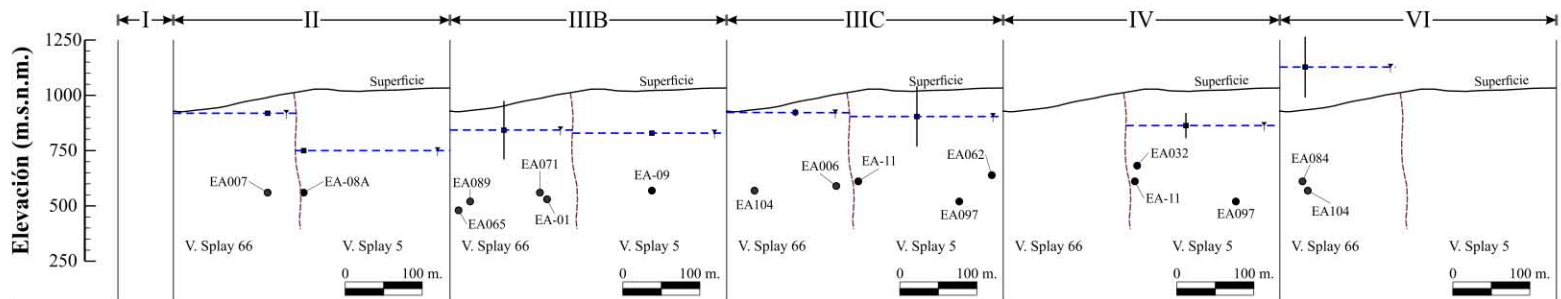
Etapa I. En esta etapa el cuarzo hialino-lechoso con trazas de pirita y calcopirita precipitó entre 200.1 y 262.4 °C.

Etapa II. Cuarzo → pirita → esfalerita → galena → calcopirita → argentita → proustita-pirargirita → hematita → covelina → cuarzo. La temperatura de precipitación de los minerales metálicos y cuarzo es la siguiente: la esfalerita entre 232.8 y 240.5 °C, y el cuarzo entre 174.1 y 244.7 °C.

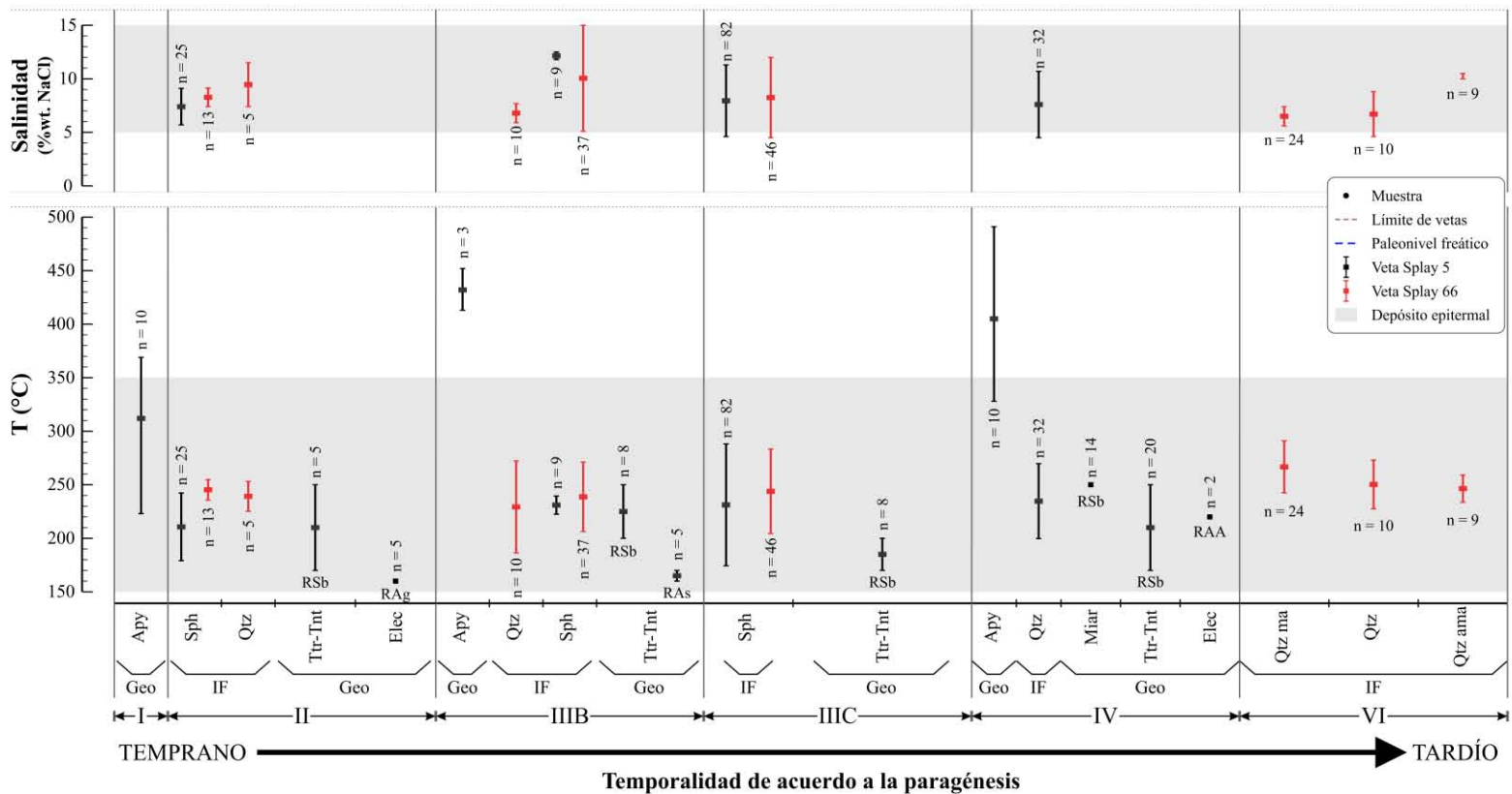
Etapa III. En esta etapa el cuarzo amatista y cuarzo hialino precipitaron entre 177.0 y 208.7 °C.

Etapa IV. En esta etapa la calcita con trazas de sulfuros (esfalerita, galena, calcopirita y pirita) precipitó entre 213.7 y 247.8 °C.

La temperatura de precipitación de los sulfuros en las zonas mineralizadas de Arista y Altagracia (Figura 57) se encuentra dentro de los rangos de 150 y 350 °C, común en depósitos epitermales (Hedenquist *et al.*, 1998; Albinson *et al.*, 2001; Simmons *et al.*, 2005; Camprubí y Albinson, 2006, 2007). Las asociaciones minerales de los depósitos de Arista y Altagracia se encuentran dentro del campo de estabilidad de pirita, calcopirita y tetraedrita-tennantita (Figura 59), iniciando que se formaron aproximadamente a 245 °C en Arista y 237 °C en Altagracia y a $\log f(S_2)$ de -12.7 en Arista y -13.3 en Altagracia (Figura 42). La evolución de los fluidos mineralizantes lleva a la precipitación de sulfosales de plata y cobre a fugacidades de azufre relativamente más bajas. De este modo, las asociaciones minerales y su evolución dentro del campo $\log f(S_2)$ -temperatura (o "estado de sulfuración", Figura 59), y las salinidades de los fluidos mineralizantes permiten ubicar a estos yacimientos globalmente en el campo de sulfuración intermedia. En concreto, se ubican alrededor del límite entre sulfuración intermedia y baja a lo la-



Paleo Nivel Freático y distribución del muestreo en las etapas de mineralización



rgo de la historia del paleo-sistema hidrotermal (Figura 59). Sin embargo, la presencia de salmueras de hasta 15 % en peso de NaCl equiv. sugiere la presencia de una componente importante de fluidos de sulfuración intermedia (Camprubí y Albinson, 2006, 2007).

Se estimó la posición del paleonivel freático en función de las curvas de ebullición de Haas (1971), la salinidad de los fluidos, la distribución estadística de temperaturas de homogeneización, la presencia o ausencia de evidencias de ebullición, y la posición vertical de las muestras analizadas para cada etapa de mineralización (ver detalles de la construcción de este tipo de estimaciones en Camprubí *et al.*, 2001b).

En Arista, la posición del paleo-nivel freático durante la formación de la mineralización en las etapas II, IIIB, IIIC, IV y VI se ubica a elevaciones que varían entre 750 y 1130 m (Figuras 57 y 60). A través del tiempo, la posición del paleo-nivel freático en Arista alterna ascensos y descensos dentro de un rango de elevación relativamente limitado (de 200 a 250 m). Arista se ubica dentro de un sistema de fallas principales de orientación NW-SE y otras secundarias que atraviesan las zonas mineralizadas. A su vez, las fallas NW-SE forman estructuras de tipo *horst* y *graben* (Figura 60) y que pueden alcanzar profundidades considerables.

A diferencia de lo que se documentó en Arista, el paleo-nivel freático en Altagracia varía entre 1730 y 1920 m de elevación para las etapas I, II, III y V, describiendo un descenso continuo y sostenido con el tiempo (Figuras 58 y 60). Altagracia se ubica dentro un sistema de fallas de orientaciones NE-SW y E-W, en que las orientaciones NE-SW presentan mayor recorrido lateral y en profundidad y que, al igual que en Arista, forman estructuras tipo *horst* y *graben* (Figura 60).

Las variaciones cíclicas del paleo-nivel freático en ambas zonas mineralizadas se encuentran posiblemente sujetas a variaciones climáticas y a la reactivación de fallas NW-SE. Durante el Mioceno las condiciones climáticas fueron muy variadas, llegando a registrarse un máximo de temperatura (de 14 a 20 °C) ambiental durante el Mioceno medio (globalmente) (Uriarte, 2003; Field *et al.*, 2009; Verducci *et al.*, 2009; Korasidis *et al.*, 2019), más que necesariamente, pudo haber afectado la distribución y profundidad de los acuíferos. Asimismo, la reactivación de fallas NW-SE profundas pudiera haber modificado el drenaje de agua subterránea durante el tiempo de vida del paleo-sistema hidrotermal. Sin embargo, el comportamiento tan contrastante del paleo-nivel freático en Altagracia (ciclicidad ascenso–descenso vs. abatimiento sostenido) sugiere que el factor estructural gobernó el descenso del paleo-nivel freático en Altagracia. Las estructuras mineralizadas en dicha zona se encuentran, en su mayoría, dentro de lo que actualmente es un *graben* delimitado por fallas NW-SE (Figura 60). Considerando las observaciones de campo, estructural y geológico se sugiere que el bloque (actualmente descendido) que contiene las mineralizaciones se comportó como un *horst* durante la formación de los yacimientos, a menos que un estudio estructural detallado rebata esta posibilidad. A pesar de que en el presente trabajo

Figura 57. Diagrama de evolución de los fluidos por etapas de mineralización y distribución del muestreo (círculos sólidos negros) en sección longitudinal de la zona mineralizada de Arista. Abreviaturas: ama = amatista, Apy = arsenopirita, Elec = Electrum, Geo = geotermómetro, IF = inclusión fluida, I-II-IIIB-IIIC-IV-VI = etapas de mineralización, m = metros, ma = marrón, Miar = miargirita, n = número de análisis, Qtz = cuarzo, RAA = rico en plata-oro, RAg = rico en plata, RAs = rico en arsénico, RSb = rico en antimonio, Sph = esfalerita, T = temperatura, Tnt = tennantita, Ttr = tetraedrita. Leyenda incluida en la figura.

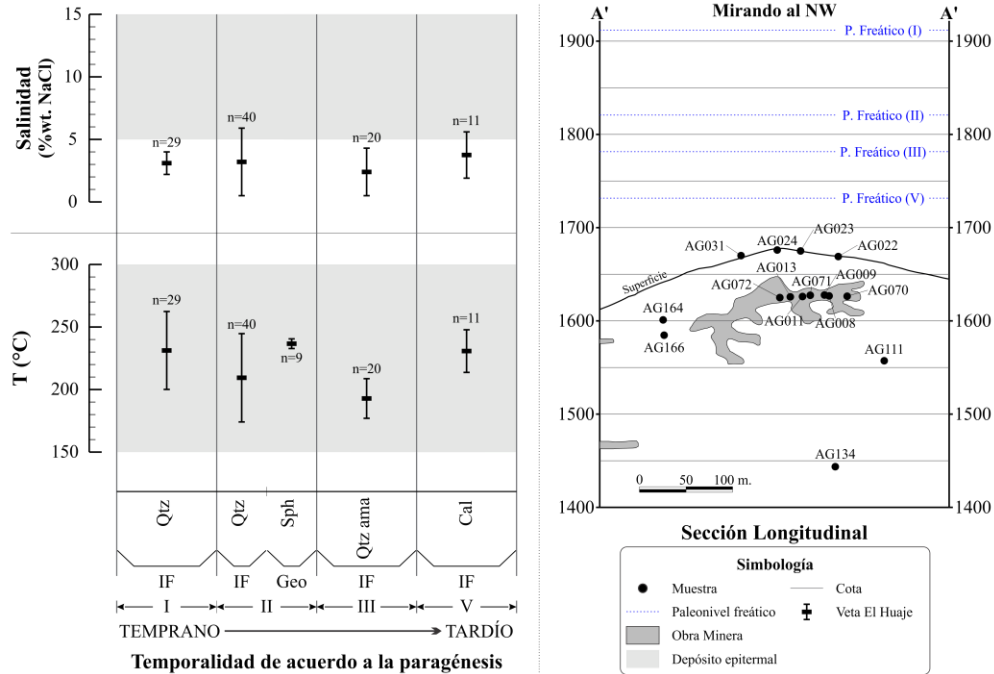


Figura 58. Diagrama de evolución de los fluidos por etapas de mineralización y distribución del muestreo en una sección longitudinal de la zona mineralizada de Altargracia. Abreviaturas: ama = amatista, Cal = calcita, Geo = geotermómetro de química mineral, IF = inclusiones fluidas, I-II-III-V = etapas de mineralización, n = número de análisis, P. = paleonivel, Qtz = cuarzo, Sph = esfalerita, T = temperatura.

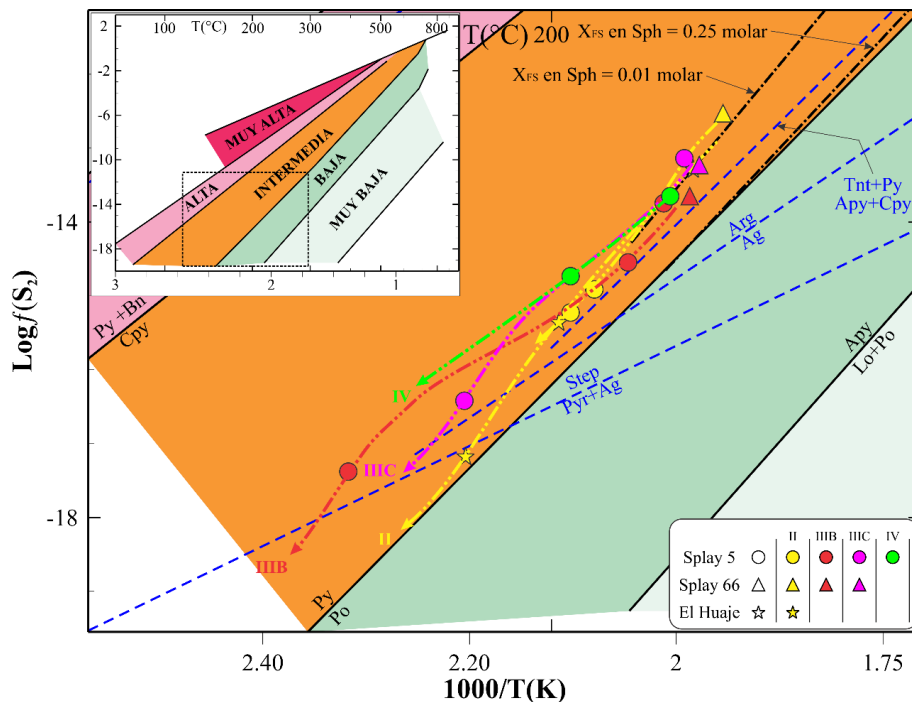


Figura 59. Diagrama de $\log f(S_2)$ vs. Temperatura en sulfuros de las zonas mineralizadas de Arista y Altargracia. Modificado de Einaudi *et al.* (2003), Camprubí y Albinson (2007). Abreviaturas: Ag = plata nativa, Apy = arsenopirita, Arg = argentita, Bn = bornita, Cpy = calcopirita, Lo = Löllingita, Po = pirrotita, Py = pirita, Pyr = pirargirita, Sph = esfalerita, Step = estefanita, Tnt = tennantita, X_{FeS} = fracción molar de FeS en esfalerita. Referencia de las abreviaturas de los minerales. Leyenda incluida en la figura.

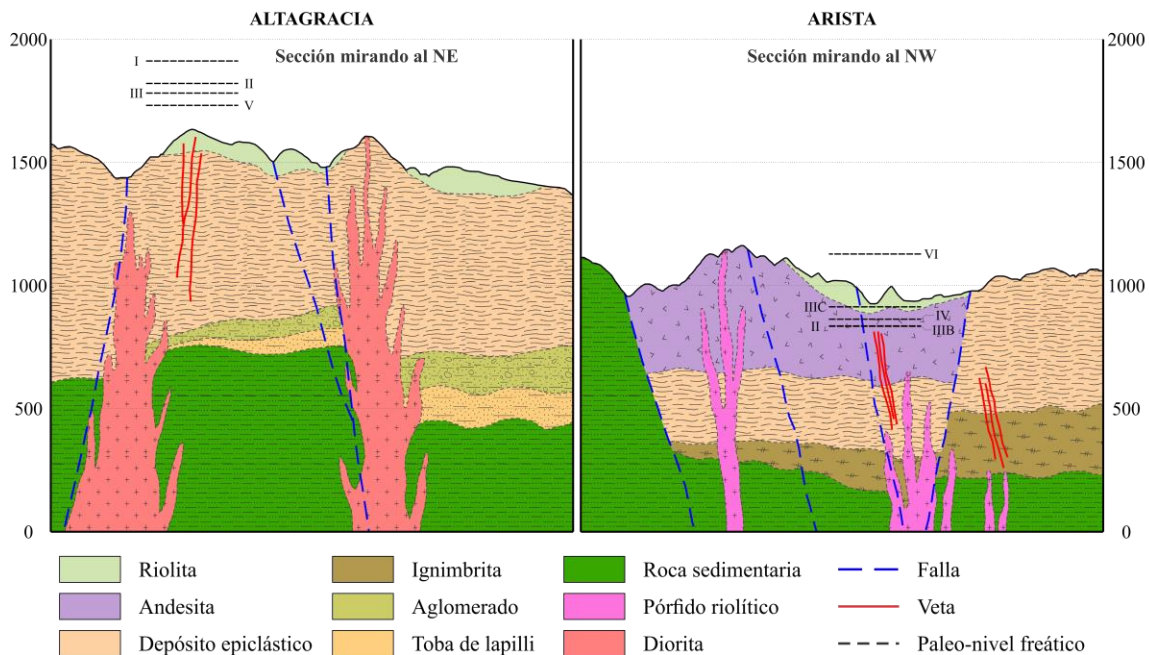


Figura 60. Secciones geológicas representativas de las zonas mineralizadas de Arista y Altagracia elaboradas a partir de la información obtenida en este trabajo. Leyenda incluida en la figura.

no se ha determinado el alcance de la actividad de las fallas en una u otra zona mineralizada, el salto de falla de las estructuras en Altagracia es notablemente mayor que en las que se encuentran en Arista (Figura 60), lo cual apoya la argumentación de una mayor actividad de éstas en Altagracia que en Arista. El ascenso continuo del posible *horst* (durante el Mioceno) en Altagracia tendría que haber sido de tal magnitud que no permitiera detectar variaciones de tipo climático en la posición del paleo-nivel freático, siempre y cuando las variaciones en el paleo-nivel freático debidas a causas climáticas o estacionales fuera la misma en ambas áreas mineralizadas. La diferencia de elevación total determinada para el nivel freático entre las etapas I y V en Altagracia es de ~200 m (Figura 58), muy similar a la variación registrada entre las etapas II y V en Arista (de hasta 380 m considerando también la etapa VI; Figura 57). Por ello, las variaciones de plaeo-nivel freático causadas únicamente por variaciones estacionales o climáticas en Altagracia deberían de haber sido de menor magnitud que en Arista.

Existen varios factores que obligan a analizar la posible existencia de mineralizaciones económicas desconocidas en esta zona: (1) el control que la posición del paleo-nivel freático y sus variaciones ejercen sobre la distribución de mineralizaciones económicas debidas a ebullición en depósitos epitermales (Simmons, 1991; Simmons *et al.*, 2005; Vikre, 2018); (2) la existencia de ebullición en ambas zonas mineralizadas, que es particularmente prominente en Altagracia (ver secciones subsiguientes); (3) el comportamiento diferencial a través del tiempo del paleo-nivel freático entre Arista y Altagracia; (4) la escasa variación en las salinidades determinadas para las diferentes etapas de mineralización en el área de Altagracia; y (5) el ostensiblemente menor grado de mineralización metálica conocida en Altagracia con respecto a Arista, aún cuando las diferentes etapas de mineralización son correlacionables en ambas áreas y varias etapas con mineralización metálica en Arista son aparentemente estériles en Altagracia. La existencia de ebullición no conlleva necesariamente la precipitación de asociaciones de minerales metálicos por el simple

hecho que los componentes de dichos minerales pueden estar ausentes en los fluidos epitermales (Camprubí *et al.*, 2006; Camprubí y Albinson, 2007). Dicho de otro modo, lo que no esté en solución no puede precipitar. Por ello, las evidencias de ebullición de cualquier tipo no son necesariamente conducentes al hallazgo de recursos minerales incógnitos. Sin embargo, la existencia probada de casos de este tipo no invalida el hecho que el caso general sea el contrario (Simmons, 1991; Hedenquist *et al.*, 2000; Albinson *et al.*, 2001). Ahora bien, la distribución de zonas mineralizadas con respecto a la presencia de evidencias de mineralización, si bien suele ser cercana, no conlleva una adyacencia inmediata (Albinson y Rubio, 2001; Camprubí *et al.*, 2001a, b; Camprubí y Albinson, 2007). De este modo, las zonas mineralizadas suelen encontrarse hasta varios cientos de metros por debajo de zonas de alteración argílica o argílica avanzada debidas a ambientes de aguas calentadas por vapor (Albinson y Rubio, 2001; Camprubí y Albinson, 2007). En el caso que nos ocupa —*vg.*, la escasez relativa de mineralización metálica en Altagracia a pesar de la presencia de evidencias de ebullición en esta área—existen dos posibilidades, en función de las evidencias disponibles: 1) las mineralizaciones en Altagracia presentan, efectivamente, mineralización relativamente débil debido a la ausencia de metales disueltos en los fluidos mineralizantes; y 2) el alcance actual de la minería y la exploración en esta zona todavía no alcanzan las mineralizaciones de más alto contenido metálico. La primera posibilidad pudiera argumentarse tentativamente por la presencia de salmueras menos salinas en Altagracia que en Arista (máximas de ~6 y ~15 % en peso de NaCl equiv., respectivamente), debido a una menor capacidad de transporte de metales por medio de complejos clorurados. Sin embargo, todas las salmueras hidrotermales encontradas en ambas áreas mineralizadas son perfectamente capaces de haber generado mineralizaciones de metales básicos y preciosos (Albinson *et al.*, 2001; Silliteo y Hedenquist, 2003; Pan *et al.*, 2018). Por ello, se considera que la primera posibilidad es muy incierta, máxime por el hecho que se trata de yacimientos de marcado carácter multiepisódico. En cambio, la segunda posibilidad puede argumentarse razonablemente mediante el abatimiento relativo del paleo-nivel freático asociado al ascenso estructural del bloque en que se encuentran las mineralizaciones. De este modo, a mayor profundización del paleo-nivel freático es esperable una mayor profundización de las mineralizaciones, siempre y cuando éstas estén asociadas a ebullición. Teniendo en cuenta que la variación en salinidad de los fluidos mineralizantes en Altagracia es muy escasa entre las diversas etapas de mineralización que constituyen estos yacimientos, sería esperable que la diferencia de elevación entre el paleo-nivel freático y la zona mineralizada (por medio de ebullición) en cada una de las etapas reconocidas fuera muy parecida. De ser esto cierto, cabría prospectar las estructuras mineralizadas hasta profundidades de ~200 m por debajo de las zonas mineralizadas conocidas hasta el momento. Dicha profundidad es razonable pues, bajo la hipótesis que la mineralización se hubiera producido mayoritariamente por medio de ebullición de fluidos con contenidos metálicos importantes en solución, es esperable hallarla en el mismo intervalo de profundidad conocido para el abatimiento del paleo-nivel freático en Altagracia.

7.2. Origen de componentes de los yacimientos

Orígen de los fluidos mineralizantes

Las salmueras en las etapas mineralizadas, con salinidades entre 5 y 14.6 % en peso de NaCl equiv. en Arista, y entre 0.5 y 5.9 % en peso de NaCl equiv. en Altagracia, pueden explicarse mediante la confluencia de fluidos de diversos orígenes, así como, localmente, por el descenso de

salinidad esperable tras la precipitación de sustancias en solución. Las altas salinidades registradas (de 10.2 a 14.6 % en peso de NaCl) en esfalerita probablemente derivan de salmueras magmáticas, debido a la ausencia de evaporitas en la región o de salmueras sedimentarias de cualquier tipo (Motolinía-García *et al.*, 2002; Vergara-Martínez *et al.*, 2003). Estas salmueras derivarían de la “primera ebullición” en el medio magmático, diluidas por aguas meteóricas de circulación profunda (equilibradas química, térmica e isotópicamente con las rocas circundantes). Este tipo de comportamiento es común en depósitos epitermales de sulfuración intermedia a baja en México (Simmons *et al.*, 1988; Albinson *et al.*, 2001; Camprubí *et al.*, 2001b, 2006; Wilkinson *et al.*, 2013). Aún en ausencia de mayores datos geoquímicos que lo corroboren, puede considerarse que los fluidos menos salinos están constituidos mayormente por mezclas entre fluidos de origen magmático y agua meteórica de circulación profunda (e.g., Camprubí *et al.*, 2006). Entre los magmáticos, puede haber contribuciones tanto de salmueras hipersalinas como de vapores condensados, en ambos casos, derivados de una “primera ebullición” (Camprubí *et al.*, 2006; Camprubí y Albinson, 2007; Wilkinson *et al.*, 2013; Rottier *et al.*, 2018).

Los valores de $\delta^{18}\text{O}_{VSMOW}$ (entre 5.1 y 12.6‰) y $\delta^{13}\text{C}_{VPDB}$ (entre -4.9 y -1.2‰) en la calcita hidrotermal del distrito Tlacolula son parecidos a los de otros depósitos epitermales mexicanos de sulfuración intermedia y baja como Fresnillo (entre 1.7 y 10 ‰ de $\delta^{18}\text{O}$), Temascaltepec (entre 1.1 y 6.4 ‰ de $\delta^{18}\text{O}$) o La Colorada (entre 4 y 7 ‰ de $\delta^{18}\text{O}$) (Simmons *et al.*, 1988; Albinson *et al.*, 2001; Camprubí *et al.*, 2001b) (Figura 56). Estos valores isotópicos de oxígeno y carbono sugieren la existencia de contribuciones de origen mixto, probablemente entre fuentes magmáticas y meteóricas, que habrían interactuado con carbonatos de la Formación Yucunama infrayacente. Las contribuciones meteóricas someras, en global, se consideran poco probables por el hecho de que el contenido de hierro en esfalerita es prácticamente constante en la vertical. Este hecho denota una escasa variación en las fugacidades de S_2 y O_2 en esfalerita. En caso de haberse producido una interacción importante entre los fluidos hidrotermales ascendentes y las aguas meteóricas someras (ricas en O_2), se hubieran producido variaciones significativas en la fugacidad de O_2 , lo que se hubiera reflejado en el contenido en hierro de la esfalerita (ver sección 7.3).

Origen del azufre

La composición isotópica del azufre en Arista y Altagracia varía entre -4.39 y 2.74 ‰, y denota esencialmente un origen mixto del azufre entre magmático y sedimentario/metasedimentario, similar a otros yacimientos epitermales de sulfuración intermedia a baja en general (Camprubí *et al.*, 2001b; Echevarría *et al.*, 2006; Camprubí y Albinson, 2007; Torres *et al.*, 2019). Los valores $\delta^{34}\text{S}$ menor a 3 ‰ y cercanos a 0 ‰ son típicos de una fuente magmática de azufre, y los valores menores a 0 ‰ pueden indicar azufre lixiviado de rocas sedimentarias o metasedimentarias. Ello, sin contar con azufre derivado de sulfatorreducción bacteriogénica, que conlleva valores isotópicos mucho más bajos (e.g., Camprubí *et al.*, 2001b). Dicha lixiviación se habría producido por medio de aguas meteóricas de circulación profunda equilibradas isotópicamente y térmicamente con las rocas circundantes, e incorporadas al paleo-sistema hidrotermal. Además, los sulfuros cercanos a la roca hospedante y pertenecientes a etapas mineralizantes tempranas presentan composiciones isotópicas más próximas a un origen metasedimentario, mientras que los sulfuros de etapas más tardías tienden a presentar composiciones más cercanas a un origen magmático.

7.3. Mecanismos de precipitación mineral

Los múltiples eventos hidrotermales registrados en la zona mineralizada de Arista generaron cinco etapas de mineralización económica, una etapa en Altagracia, y se identificaron los siguientes elementos de juicio que permiten explicar los posibles mecanismos de precipitación mineral:

- a) En las etapas II, III y IV se encontraron texturas crustiformes, coliformes de calcedonia, mosaico y texturas de reemplazamiento pseudo-aciculares, y se identificó además la textura *parallel-bladed* en la etapa IV, que resulta del reemplazamiento de calcita hojosa.
- b) La roca encajante presenta una extensa alteración argílica en superficie, que presentan una transición lateral a zonas características por fílica y propilítica, con asociaciones mineralógicas ricas en kaolinita-esmectita-montmorillonita e illita-esmectita (Aguilar-Austria, 2019).
- c) El estudio de la química mineral indica una variación composicional muy escasa en esfalerita, que presenta sistemáticamente bajas concentraciones de hierro. Por lo tanto, la precipitación de la esfalerita se desarrolló a fugacidades de azufre muy similares independientemente de la elevación en las vetas (ver sección 7.2).
- d) La salinidad de los fluidos mineralizantes en las cuatro etapas es muy variada, siendo la etapa IIIB la que presenta fluidos de mayor salinidad, en las etapas II y IIIC se encontraron salinidades intermedias, y en la etapa IV las salinidades más bajas. Asimismo, la temperatura de los fluidos mineralizantes disminuye desde niveles profundos hacia la superficie, y la composición isotópica del oxígeno en calcita es esencialmente constante en la zona de bonanza.

En Arista la calcita hojosa (y sus pseudomorfo o fantasmas) es un mineral típico de ambientes en ebullición, particularmente en yacimientos epitermales o sus equivalentes actuales, los campos geotérmicos en ambientes volcánicos y subvolcánicos (Simmons y Christenson, 1994; Simmons y Browne, 2000; Camprubí y Albinson, 2007). De acuerdo con las evidencias registradas en la etapa IV (Figura 61), al menos en ésta la precipitación de las asociaciones metálicas se produjo en un ambiente en ebullición. Asimismo, en Altagracia la presencia de las asociaciones de alteración argílica a argílica avanzada cartografiadas por Aguilar-Austria (2019) en superficie puede ser debida a tres tipos de ambientes distintos en yacimientos epitermales (Camprubí y Albinson, 2006, y referencias en éste): 1) ambiente hipogénico profundo o magmático-hidrotermal, 2) ambiente hipogénico somero o de aguas calentadas por vapor (*steam-heated grounds*), o 3) ambiente supergénico, derivado de fluidos ácidos debidos a la disolución de pirita. Aguilar-Austria (2019) interpretó, en base a las características mineralógicas y texturales de las asociaciones, así como por la geometría de su disposición espacial (particularmente, en relación a las vetas y a fallas aparentemente sin mineralización), que la opción más plausible para la formación de éstas alteraciones es la condensación de vapor en mantos freáticos, en ambientes de aguas calentadas por vapor. Este vapor procedería razonablemente de la existencia de ebullición en profundidad, lo cual constituye una evidencia indirecta de una ebullición generalizada durante la formación de los yacimientos epitermales estudiados. Las evidencias obtenidas en el presente estudio son compatibles con la interpretación de Aguilar-Austria (2019), que refuerza la noción de que la ebullición constituyó uno de los principales mecanismos de precipitación mineral en el yacimiento, particularmente en asociaciones ricas en minerales metálicos. Una vez más, cabe recordar que la

existencia de ebullición no necesariamente conlleva la precipitación de asociaciones minerales metálicas, ya que la existencia de éstas como resultado de ebullición se ha asociado a pulsos hidrotermales con una prominente componente magmática (Camprubí *et al.*, 2001a, b, 2006).

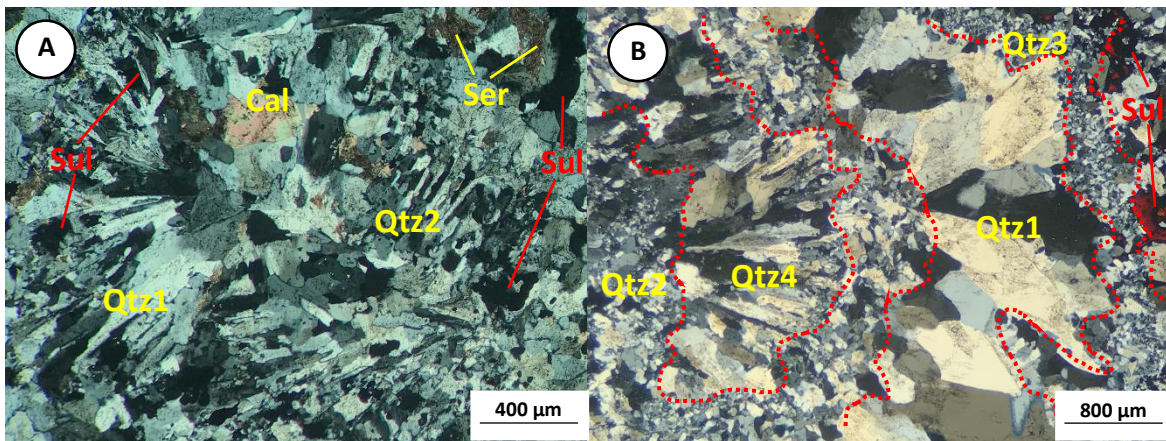


Figura 61. Fotomicrografía de la veta Splay 5, Etapa IV, en la zona mineralizada de Arista **A)** Texturas pseudo acicular (Qtz1) y *parallel bladed* (Qtz2) y cristales de calcita reemplazados por cuarzo. **B)** Calcita reemplazado por cuarzo formando textura pseudo acicular (Qtz4) y tres variedades de cuarzo subedral y anedral (Qtz1, Qtz2 y Qtz3). Abreviaturas: Cal = calcita, Mos = mosaico, Qtz = cuarzo, Ser = sericita, Sul = sulfuro. Referencia de las abreviaturas. Simbología incluida en la imagen.

Adicionalmente, 1) el descenso conjunto de la temperatura y de la salinidad de los fluidos en las etapas II y III, 2) el descenso de la temperatura con la elevación en todas las etapas de mineralización sin cambios relevantes en la salinidad de los fluidos, y 3) la escasa variación en la composición isotópica del oxígeno en calcita, sugieren (de acuerdo con Camprubí *et al.*, 2001b; Camprubí y Albinson, 2007; Leach y Corbett, 2008) que las asociaciones metálicas en estas etapas posiblemente precipitaron mediante una combinación de enfriamiento conductivo y de mezcla con agua meteórica relativamente somera y escasamente equilibrada térmicamente con las rocas circundantes. En cualquier caso, el proceso de mineralización tiene que ser congruente con una escasa variación en la fugacidad de azufre (ver sección 7.2 y Figura 59), de modo que ello refuerza la noción de que el mecanismo dominante de mineralización más plausible en ausencia de procesos de ebullición es el enfriamiento conductivo.

CAPÍTULO 8: CONCLUSIONES

Los depósitos Arista y Altagracia, en el distrito de Tlacolula (Oaxaca), son yacimientos epitermales mayormente argento-auríferos en forma de vetas con un marcado carácter multiepisódico, y están circunscritos a la evolución del magmatismo somero del Mioceno en el extremo oriental del Sierra Madre del Sur, en Oaxaca central.

El carácter polifásico de estos yacimientos se apoya en la determinación de siete etapas de mineralización en Arista y cinco en Altagracia, correlacionables entre sí. De dichas etapas, cuatro contienen mineralizaciones metálicas con oro y plata en Arista (etapas I, II, III, IV) y una con plata en Altagracia (etapa II). La asociación mineralógica polimetálica típica en Arista consiste en sulfuros de metales básicos, seguidos de sulfosales de cobre-plata y de plata, mientras que en Altagracia consiste en sulfuros de metales básicos y sulfosales de plata. En todo el depósito, la esfalerita es pobre en hierro.

Los rangos de temperatura y de salinidad obtenidos en los depósitos (160 a 291 °C y 4.5 a 15 % en peso de NaCl equiv. en Arista, 172 a 262 °C y 0.5 a 6 % en peso de NaCl equiv. en Altagracia), obtenidos mediante microtermometría de inclusiones fluidas y geotermómetros composicionales, así como las características morfológicas y mineralógicas, permiten clasificar estos yacimientos como epitermales de sulfuración intermedia.

Las composiciones isotópicas de C y O en carbonatos y de S en sulfuros ($\delta^{34}\text{S}$, $\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^{13}\text{C}$) apuntan a fuentes mixtas para dichos componentes, incluidas fuentes magmáticas. En el caso del S, se pueden también argumentar fuentes sedimentarias/metasedimentarias para éste. En el caso de C y O, son posibles otras fuentes (carbonatos sedimentarios, agua meteórica, agua marina, agua de formación, agua de origen metamórfico) y se precisarían estudios adicionales para identificarlas con precisión. En ambos casos, tales interpretaciones son compatibles con la presencia de rocas sedimentarias y metasedimentarias del terreno Cuicateco y con el magmatismo al que se relaciona la formación de los yacimientos durante el Mioceno.

La presencia de calcita hojosa, sus reemplazamientos o fantasmas, y la presencia de asociaciones de alteración en ambientes de aguas freáticas calentadas por vapor (*steam-heated grounds*), constituyen evidencias independientes de la existencia de ebullición en los depósitos. Como tal, éste constituye uno de los principales procesos de precipitación mineral, junto con el enfriamiento conductivo, que pudiera ser el mecanismo de mineralización predominante. Ello se sugiere por la escasa variación de la fugacidad de azufre, determinada en base a la composición química de la esfalerita, con respecto a la elevación en las vetas. La mezcla de los fluidos ascendentes con aguas meteóricas superficiales, evidenciada en secciones someras de las vetas, puede haber ejercido un papel adicional en la precipitación mineral.

Las variaciones determinadas para la posición del paleo-nivel freático a través del tiempo en ambos conjuntos de vetas se entienden mayormente como variaciones en el paleo-régimen hídrico, esencialmente 1) de tipo estacional o climático, o bien 2) debidas a actividad de fallas sindeposicionales. El caso paradigmático del caso 1 es el de la zona mineralizada de Arista, en que el ascenso en el paleo-nivel freático se alternan con descensos a lo largo del tiempo, manteniéndose así las zonas mineralizadas en un rango de elevación relativamente angosto. En cambio, en Altagracia el paleo-nivel freático desciende ostensiblemente y de forma continua a

través del tiempo, lo cual puede argumentarse mediante un ascenso estructural del bloque que contiene las vetas en dicha zona (descendido con posterioridad a la mineralización) (caso 2), y explica el hecho de que sólo una de las etapas de mineralización contenga asociaciones metálicas. De este modo, es esperable que las etapas reconocidas como estériles en el alcance actual de observación en Altagracia se encuentren mineralizadas en profundidad.

Referencias Bibliográficas

- Aguilar-Austria, S. (2019). Distribución de las asociaciones de alteración en el yacimiento epitermal del proyecto Altigracia, Oaxaca; Tesis, Universidad Nacional Autónoma de México.
- Aguilera-Martínez, M. A., Zárate-López, J., De La Calleja-Moctezuma, A., Cureño-Suriano, R., & López-Gallardo, A. (2000). Carta Geológico-minero Minatitlán E15-7, 1:250000: Veracruz, Oaxaca y Tabasco, México. Consejo de Recursos Minerales, 1 mapa.
- Albinson F, T. (1988). Geologic reconstruction of paleosurfaces in the Sombrerete, Colorado, and Fresnillo districts, Zacatecas State, Mexico. *Society of Economic Geologists*, 83(8), 1647-1667.
- Albinson, T., & Rubio, M. A. (2001). Mineralogic and thermal structure of the Zuloaga vein, San Martín de Bolaños district, Jalisco, Mexico. *Society of Economic Geologists, Special Publication*, 8, 115-132.
- Albinson, T., Norman, D. I., Cole, D., & Chomiak, B. (2001). Controls on formation of low-sulfidation epithermal deposits in Mexico: constraints from fluid inclusion and stable isotope data. *Special Publication-Society of Economic Geologists*, 8, 1-32.
- Allard, P. (1983). The origin of hydrogen, carbon, sulphur, nitrogen and rare gases in volcanic exhalations: Evidence from isotope geochemistry. Chapter 25 in. *Forecasting volcanic events*, 337-386.
- Allègre, C. J. (2008). *Isotope Geology*: Cambridge.
- Allen, K. D., & Redak, S. (2015). Geology and Mineralization of the San Sebastian Vein Systems, Saladillo Mining District, Durango Mexico: Examples of Concurrent Intermediate-Sulfidation and Low-Sulfidation Epithermal Environments. *GSN Symposium: New Concepts and Discoveries. The Geological Society of Nevada*, (2), 677-694.
- Atkinson Jr, A. B. (2002). A model for the PTX properties of H₂O-NaCl. Virginia Tech.
- Barton Jr, P. B. (1970). Sulfide petrology. *Mineralogical Society of America Special Paper*, 3, 187-198.
- Barton Jr, P. B. (1978). Some ore textures involving sphalerite from the Furutobe mine, Akita Prefecture, Japan. *Mining Geology*, 28(150), 293-300.
- Barton Jr, P. B., & Skinner, B. J. (1979). Sulfide mineral stabilities. *Geochemistry of hydrothermal ore deposits*, 278-403.
- Barton Jr, P. B., & Toulmin III, P. (1964). The electrom-tarnish method for the determination of the fugacity of sulfur in laboratory sulfide systems. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 28(5), 619-640.
- Barton Jr, P. B., & Toulmin III, P. (1966). Phase relations involving sphalerite in the Fe-Zn-S system. *Economic Geology*, 61(5), 815-849.
- Barton Jr, P. B., Bethke, P. M., & Roedder, E. (1977). Environment of ore deposition in the Creede mining district, San Juan Mountains, Colorado; Part III, Progress toward interpretation of the chemistry of the ore-forming fluid for the OH Vein. *Economic Geology*, 72(1), 1-24.
- Bodnar, R. (1983). A method of calculating fluid inclusion volumes based on vapor bubble diameters and PVTX properties of inclusion fluids. *Society of Economic Geologists*, 78(3), 535-542.
- Bodnar, R. (1993). Revised equation and table for determining the freezing point depression of H₂O-NaCl solutions. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 57(3), 683-684.
- Bodnar, R., & Vityk, M. O. (1994). Interpretation of microthermometric data for H₂O-NaCl fluid inclusions. in. *Fluid inclusions in minerals: methods and applications*, 117-130.
- Brenninkmeijer, C. A. (1993). Measurement of the abundance of ¹⁴C in the atmosphere and the ¹³C/¹²C and ¹⁸O/¹⁶O ratio of atmospheric CO with applications in New Zealand and Antarctica. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 98(D6), 10595-10614.

- Campa, M. F., & Coney, P. J. (1983). Tectono-stratigraphic terranes and mineral resource distributions in Mexico. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 20(6), 1040-1051.
- Campa-Uranga, M. F., García-Díaz, J. L., Bustamante-García, J., Torreblanca-Castro, T. J., Aguilera-Martínez, M. A., & Vergara-Martínez, Á. (1998). Carta Geológico-minero Chilpancingo E14-8, 1:250000: Guerrero, Oaxaca y Puebla, México. Consejo de Recursos Minerales, 1 mapa.
- Camprubí, A. (1999). Los Depósitos epitermales de Ag-Au de Temascaltepec (Estado de México), México: Publicacions Universitat de Barcelona.
- Camprubí, A. (2013). Tectonic and metallogenic history of Mexico. *Tectonics, metallogeny, and discovery: The North American Cordillera and similar accretionary settings*, 201-243.
- Camprubí, A., & Albinson, T. (2006). Depósitos epitermales en México: actualización de su conocimiento y reclasificación empírica. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 58(1), 27-81.
- Camprubí, A., & Albinson, T. (2007). Epithermal deposits in México-Update of current knowledge, and an empirical reclassification. *Geological Society of America Special Papers*, 422, 377-415.
- Camprubí, A., Cabrera-Roa, M. A., González-Partida, E., & López-Martínez, M. (2019). Geochronology of Mexican mineral deposits. VIII: the Zacatepec polymetallic skarn, Oaxaca. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 71(1), 207-218.
- Camprubí, A., Cardellach, E., Canals, À., & Lucchini, R. (2001b). The La Guitarra Ag-Au low sulfidation epithermal deposit, Temascaltepec district, Mexico: fluid inclusion and stable isotope data: *Society of Economic Geologists, Special Publication*, 8, 159-185.
- Camprubí, A., Canals, À., Cardellach, E., Prol-Ledesma, R.M., & Rivera, R. (2001a). The La Guitarra Ag-Au low sulfidation epithermal deposit, Temascaltepec district, Mexico: vein structure, mineralogy, and sulfide-sulfosalt chemistry: *Society of Economic Geologists, Special Publication*, 8, 133-158.
- Camprubí, A., Chomiak, B. A., Villanueva-Estrada, R. E., Canals, À., Norman, D. I., Cardellach, E., & Stute, M. (2006). Fluid sources for the La Guitarra epithermal deposit (Temascaltepec district, Mexico): Volatile and helium isotope analyses in fluid inclusions. *Chemical Geology*, 231(3), 252-284.
- Carfantan, J. C. (1981). Evolución estructural del sureste de México: Paleogeografía e historia tectónica de las zonas internas mesozoicas. *Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología*, 5, 207-216.
- Carfantan, J. C. (1983). Les ensembles géologiques du Mexique meridional. *Evolution geodynamique durante le Mésozoïque et le Cénozoïque. Geofísica Internacional*, 22, 9-37.
- Carman, G. (2003). Geology, mineralization, and hydrothermal evolution of the Ladolam gold deposit, Lihir Island, Papua New Guinea. *Special Publication-Society of Economic Geologists*, 10, 247-284.
- Cerca, M., Ferrari, L., López-Martínez, M., Martiny, B., & Iriondo, A. (2007). Late Cretaceous shortening and early Tertiary shearing in the central Sierra Madre del Sur, southern Mexico: Insights into the evolution of the Caribbean–North American plate interaction. *Tectonics*, 26(3).
- Chambers, L. (1982). Sulfur isotope study of a modern intertidal environment, and the interpretation of ancient sulfides. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 46(5), 721-728.
- Chaussidon, M., & Lorand, J.-P. (1990). Sulphur isotope composition of orogenic spinel lherzolite massifs from Ariège (North-Eastern Pyrenees, France): An ion microprobe study. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 54(10), 2835-2846.
- Chutas, N. I., & Sack, R. O. (2004). Ore genesis at La Colorada Ag-Zn-Pb deposit in Zacatecas, Mexico. *Mineralogical Magazine*, 68(6), 923-937.
- Coplen, T. B., Kendall, C., & Hopple, J. (1983). Comparison of stable isotope reference samples. *Nature*, 302(5905), 236.

- Coplen, T. B., Hoppole, J., Boehike, J., Peiser, H., & Rieder, S. (2002). Compilation of minimum and maximum isotope ratios of selected elements in naturally occurring terrestrial materials and reagents.
- Craig, H. (1963). The Isotopic geochemistry of water and carbon in geothermal areas, Nuclear geology on geothermal areas. Spoleto 1963, 17-53.
- Craig, H. (1967). Ocean water, isotopic composition of. McGraw-Hill Yearbook Science and Technology (pp. 268–271): New York (McGraw-Hill).
- Cruz-López, D. E., Sánchez-Andraca, H. R., & Lemus-Bustos, O. (2000). Carta Geológico-minero Acapulco E14-11, 1:250000: Guerrero y Oaxaca, México. Consejo de Recursos Minerales, 1 mapa.
- Davis, D. W., Lowenstein, T. K., & Spencer, R. J. (1990). Melting behavior of fluid inclusions in laboratory-grown halite crystals in the systems NaCl-H₂O, NaCl-KCl-H₂O, NaCl-MgCl₂-H₂O, and NaCl-CaCl₂-H₂O*. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 54(3), 591-601.
- De Groot, P. A. (2009). Handbook of stable isotope analytical techniques (Vol. 2): Elsevier.
- De Laeter, J. R., Böhlke, J. K., De Bièvre, P., Hidaka, H., Peiser, H. S., Rosman, K. J. R., & Taylor, P. D. P. (2003). Atomic weights of the elements. Review 2000 (IUPAC Technical Report). *Pure and applied chemistry*, 75(6), 683-800.
- Deer, W. A., Howie, R. A., & Zussman, J. (1992). An introduction to the rock-forming minerals. Hong Kong: Longman Scientific & Technical., 696(2nd edition Longman), 598-602.
- Deines, P. (1980). The isotopic composition of reduced organic carbon. *Handbook of environmental isotope geochemistry*, 329-406.
- Deines, P., & Gold, D. (1973). The isotopic composition of carbonatite and kimberlite carbonates and their bearing on the isotopic composition of deep-seated carbon. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 37(7), 1709-1733.
- Devlin, B. D. (2016). Report on estimates of reserves and mineralized material at the Oaxaca Mining Unit, Oaxaca, Mexico. Gold Resource Corporation. Technical report.
- Echavarría, L., Nelson, E., Humphrey, J., Chavez, J., Escobedo, L., & Iriondo, A. (2006). Geologic evolution of the Caylloma epithermal vein district, southern Peru. *Society of Economic Geology*, 101(4), 843-863.
- Einaudi, M. T., Hedenquist, J. W., & Inan, E. E. (2003). Sulfidation state of fluids in active and extinct hydrothermal systems: Transitions from porphyry to epithermal environments. *Special Publication-Society of Economic Geologists*, 10, 285-314.
- Exley, R., Matthey, D., Clague, D., & Pillinger, C. (1986). Carbon isotope systematics of a mantle "hotspot": a comparison of Loihi Seamount and MORB glasses. *Earth and Planetary Science Letters*, 78(2-3), 189-199.
- Faure, G. (1998). Principles and applications of geochemistry: a comprehensive textbook for geology students: Prentice Hall.
- Faure, G., & Mensing, T. M. (2005). Isotopes: principles and applications: Wiley-Blackwell.
- Ferrusquía-Villafranca, I. (1976). Estudios geológico-paleontológicos en la region Mixteca, Pt. 1: geología del area Tamazulapan-Teposcolula-Yanhuitlan, Mixteca Alta, estado de Oaxaca, Mexico. Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología.
- Ferrusquía-Villafranca, I. (1992). Contribución al conocimiento del Cenozoico en el sureste de México y de su relevancia en el entendimiento de la evolución regional, in *Actas de las sesiones científicas del III Congreso Geológico de España y VIII Congreso Latinoamericano de Geología*. Facultad de Ciencias, 40-44.
- Ferrusquía-Villafranca, I. (1999). Contribución al conocimiento geológico de Oaxaca, México, el área Laollaga-Lachivizá: Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología.

- Ferrusquía-Villafranca, I. (2001). Contribución al conocimiento geológico del estado de Oaxaca, México - el área Nejapa de Madero. Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología, 111.
- Ferrusquía-Villafranca, I., & McDowell, F. (1991). The Cenozoic sequence of selected areas in Southeastern Mexico, its bearing in understanding regional basin development there. Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología, Memoria, II Convención sobre la evolución geológica de México, Pachuca, Hidalgo, 1, 45-50.
- Ferrusquía-Villafranca, I., Segura, L. R., & Rodrigues-Torres, T. (1970). Geología del área Tamazulapan-Teposcolula-Yanhuitlán, Mixteca Alta, Estado de Oaxaca. Excursión geológica México-Oaxaca. Sociedad Geológica Mexicana, 97-119.
- Ferrusquía-Villafranca, I., Wilson, J. A., Denison, R. E., McDowell, F. W., & Solorio-Munguia, J. (1974). Tres Edades Radiométricas Oligocénicas y Miocénicas de Rocas Volcánicas de las Regiones Mixteca Alta y Valle de Oaxaca, Estado de Oaxaca (in Spanish) Three Oligocene and Miocene Radiometric Ages of Volcanic Rocks of the Mixteca Alta and Valle de Oaxaca regions, Oaxaca State.
- Field, C. (1985). Light stable-isotope systematics in the epithermal environment. in *Geology and Geochemistry of Epithermal Systems*. Reviews Society of Economic Geologists, 2, 99-128.
- Field, B. D., Crundwell, M. P., Lyon, G. L., Mildenhall, D. C., Morgans, H. E. G., Ohneiser, C., Wilson, G. S., Kennett, J. P., & Chanier, F. (2009). Middle Miocene paleoclimate change at Bryce Burn, southern New Zealand. *New Zealand Journal of Geology and Geophysics*, 52(4), 321-333.
- Galina-Hidalgo, S. M. (1996). Geocronología y paleomagnetismo de rocas intrusivas y volcánicas del área de Huajuapán de León, Oaxaca: México, D. F. (Maestría), Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Ingeniería.
- Gemmell, J. B., Simmons, S. F., & Zantop, H. (1988). The Santo Nino silver-lead-zinc vein, Fresnillo District, Zacatecas, Mexico; Part I, Structure, vein stratigraphy, and mineralogy. *Society of Economic Geologists*, 83(8), 1597-1618.
- Ghent, E. D., & O'Neil, J. R. (1985). Late Precambrian marbles of unusual carbon-isotope composition, southeastern British Columbia. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 22(3), 324-329.
- Ghosal, S., & Sack, R. O. (1995). As-Sb energetics in argentinean sulfosalts. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 59(17), 3573-3579.
- Gibson, P. C., Noble, D. C., & Larson, L. T. (1990). Multistage evolution of the Calera epithermal Ag-Au vein system, Orcopampa District, southern Peru; first results. *Society of Economic Geologists*, 85(7), 1504-1519.
- Goldstein, R. H., & Reynolds, T. J. (1994). Systematics of fluid inclusions in diagenetic minerals. *SEPM short course*, 31, 199.
- González, A. J. (1970) Prospecto área Chilapa-Tlaxiaco: México, Distrito Federal, Petróleos Mexicanos, I.G.Z.S., informe técnico, 548 pp.
- González-Alvarado, J. (1969). Geología del Área Matías Romero, Oaxaca, Pemex, Superintendencia General de Exploración Geológica Zona Sur, Informe Geológico, Inédito, Núm. 533, 78 p.
- González-Alvarado, J. (1970). Estudio geológico del área Chilapa-Tlaxiaco. PEMEX-IGZS, Informe inédito, 548p.
- González-Ramos, A., Sánchez-Rojas, L. E., Mota-Mota, S., Arceo y Cabrilla, F. A., Onofre-Espinosa, L., Zárate-López, J., & Soto-Araiza, R. (2000). Carta Geológico-minero Oaxaca E14-9, 1:250000: Oaxaca y Puebla, México. Consejo de Recursos Minerales, 1 mapa.
- Guerrero-García, J., & Herrero-Bervera, E. (1993). Timing of break-up and sense of motion along the Pacific margin of southwestern Mexico. Paper presented at the First Circum Pacific and Circum Atlantic Terrane Conference Proceedings.

- Haas, J. L. (1971). The effect of salinity on the maximum thermal gradient of a hydrothermal system at hydrostatic pressure. *Society of Economic Geologists*, 66(6), 940-946.
- Harmon, R. S., & Hoefs, J. (1995). Oxygen isotope heterogeneity of the mantle deduced from global ^{18}O systematics of basalts from different geotectonic settings. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 120(1), 95-114.
- Hedenquist, J. W., Arribas, A., & Gonzalez-Urien, E. (2000). Exploration for epithermal gold deposits. *Reviews in Society of Economic Geologists*, 13(2), 45-77.
- Hedenquist, J. W., Arribas, A., & Reynolds, T. J. (1998). Evolution of an intrusion-centered hydrothermal system; Far Southeast-Lepanto porphyry and epithermal Cu-Au deposits, Philippines. *Society of Economic Geologists*, 93(4), 373-404.
- Herrmann, U. R., Nelson, B. K., & Ratschbacher, L. (1994). The origin of a terrane: U/Pb zircon geochronology and tectonic evolution of the Xolapa complex (southern Mexico). *Tectonics*, 13(2), 455-474.
- Hoefs, J. (2015). *Stable Isotope Geochemistry* (Seventh ed.): Springer.
- Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI), 1979, Carta topográfica Ciudad Acapulco de Juárez E14-11, escala 1:250,000: México. D.F., Secretaría de Programación y Presupuesto, Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática, 1 mapa.
- Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI), 1979, Carta topográfica Ciudad Chilpancingo de los Bravos E14-08, escala 1:250,000: México. D.F., Secretaría de Programación y Presupuesto, Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática, 1 mapa.
- Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI), 1979, Carta topográfica Ciudad Cuernavaca E14-5, escala 1:250,000: México. D.F., Secretaría de Programación y Presupuesto, Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática, 1 mapa.
- Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI), 1979, Carta topográfica Ciudad Juchitan E15-10, D15-1 escala 1:250,000: México. D.F., Secretaría de Programación y Presupuesto, Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática, 1 mapa.
- Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI), 1979, Carta topográfica Ciudad Minatitlan E15-7, escala 1:250,000: México. D.F., Secretaría de Programación y Presupuesto, Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática, 1 mapa.
- Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI), 1979, Carta topográfica Ciudad Oaxaca de Juárez E14-9, escala 1:250,000: México. D.F., Secretaría de Programación y Presupuesto, Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática, 1 mapa.
- Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI), 1979, Carta topográfica Ciudad Orizaba E14-6, escala 1:250,000: México. D.F., Secretaría de Programación y Presupuesto, Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática, 1 mapa.
- Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI), 1979, Carta topográfica Ciudad Puerto Escondido D14-3, escala 1:250,000: México. D.F., Secretaría de Programación y Presupuesto, Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática, 1 mapa.
- Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI), 1979, Carta topográfica Ciudad Zaachila E14-12, escala 1:250,000: México. D.F., Secretaría de Programación y Presupuesto, Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática, 1 mapa.
- Iriondo, E., Kunk, M. J., Winick, J. A., & Minerales, C. D. R. (2004). $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ dating studies of minerals and rocks in various areas. In *Mexico: USGS/CRM Scientific Collaboration (Part II)*. United States Geological Survey, Open-File Report 04-1444.
- Keith, M., Haase, K. M., Schwarz-Schampera, U., Klemd, R., Petersen, S., & Bach, W. (2014). Effects of temperature, sulfur, and oxygen fugacity on the composition of sphalerite from submarine hydrothermal vents. *Geology*, 42(8), 699-702.

- Keppie, J. D., Nance, R., Dostal, J., Lee, J., & Ortega-Rivera, A. (2012). Constraints on the subduction erosion/extrusion cycle in the Paleozoic Acatlán Complex of southern Mexico: geochemistry and geochronology of the type Piaxtla Suite. *Gondwana Research*, 21(4), 1050-1065.
- Kerridge, J. F. (1985). Carbon, hydrogen and nitrogen in carbonaceous chondrites: Abundances and isotopic compositions in bulk samples. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 49(8), 1707-1714.
- Kerridge, J. F., Haymon, R. M., & Kastner, M. (1983). Sulfur isotope systematics at the 21 N site, East Pacific Rise. *Earth and Planetary Science Letters*, 66, 91-100.
- Korasidis, V. A., Wallace, M. W., Wagstaff, B. E., & Hill, R. S. (2019). Terrestrial cooling record through the Eocene-Oligocene transition of Australia. *Global and planetary change*, 173, 61-72.
- Kretschmar, U., & Scott, S. D. (1976). Phase relations involving arsenopyrite in the system Fe-As-S and their application. *Mineralogical Association of Canada*, 14(3), 364-386.
- Kroopnick, P. (1985). The distribution of ^{13}C of ΣCO_2 in the world oceans. *Deep Sea Research Part A. Oceanographic Research Papers*, 32(1), 57-84.
- Kyser, T. K., O'Neil, J. R., & Carmichael, I. S. (1982). Genetic relations among basic lavas and ultramafic nodules: evidence from oxygen isotope compositions. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 81(2), 88-102.
- Land, L. S. (1980). The isotopic and trace element geochemistry of dolomite: the state of the art. in Zenger, D.A., ed., *Concepts and Models of Dolomite Formation*. Society Economic Paleontology Mineralogy, 28, 87-110.
- Leach, T., & Corbett, G. (2008). Fluid mixing as a mechanism for bonanza grade epithermal gold formation. In *Terry Leach Symposium*.
- Liotta, M., Rizzo, A., Paonita, A., Caracausi, A., & Martelli, M. (2012). Sulfur isotopic compositions of fumarolic and plume gases at Mount Etna (Italy) and inferences on their magmatic source. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 13(5).
- Lyubimtseva, N. G., Bortnikov, N. S., Borisovsky, S. E., Prokofiev, V. Y., & Vikent'eva, O. V. (2018). Fahlore and Sphalerite from the Darasun Gold Deposit in the Eastern Transbaikal Region, Russia: I. Mineral Assemblages and Intergrowths, Chemical Composition, and Its Evolution. *Geology of Ore Deposits*, 60(2), 93-120.
- Martínez-Amador, H., Castro-Rodríguez, M. G., Motolinía-García, O., Salinas-Rodríguez, J. M., Aranda-Osorio, J. N., & Zárate-Barradas, R. (1999). Carta Geológico-minera Salina Cruz-Juchitán E15-10 Escala 1:250,000, Estado Oaxaca, México. Consejo de Recursos Minerales, Archivo Técnico.
- Martínez-Amador, H., Motolinía-García, O., Castro-Rodríguez, M. G., Aranda-Osorio, J. N., Zárate-Barradas, R., & Salinas-Rodríguez, J. M. (2000). Carta Geológico-minero Juchitán E15-10 D15-1, 1:250000: Oaxaca y Chiapas, México. Consejo de Recursos Minerales, 1 mapa.
- Martínez-Amador, H., Zárate-Barradas, R., Loaeza-García, J. P., Saenz-Pita, R., & Cardoso-Vázquez, E. A. (2001). Carta Geológico-minero Orizaba E14-6, 1:250000: Veracruz, Puebla y Oaxaca, México. Consejo de Recursos Minerales, 1 mapa.
- Martínez-Serrano, R. G., Solís-Pichardo, G., Flores-Márquez, E. L., Macías-Romo, C., & Delgado-Durán, J. (2008). Geochemical and Sr-Nd isotopic characterization of the Miocene volcanic events in the Sierra Madre del Sur, central and southeastern Oaxaca, Mexico. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 25(1), 1-20.
- Martiny, B., Martínez-Serrano, R. G., Morán-Zenteno, D. J., Macías-Romo, C., & Ayuso, R. A. (2000). Stratigraphy, geochemistry and tectonic significance of the Oligocene magmatic rocks of western Oaxaca, southern Mexico. *Tectonophysics*, 318(1-4), 71-98.
- McCrea, J. M. (1950). On the isotopic chemistry of carbonates and a paleotemperature scale. *The Journal of Chemical Physics*, 18(6), 849-857.

- Morán-Zenteno, D. J., Martiny, B., Tolson, G., Solís-Pichardo, G., Alba-Aldave, L., Hernández-Bernal, M. D. S., Macías-Romo, C., Martínez-Serrano, R.G., Schaaf, P., & Silva Romo, G. (2000). Geocronología y características geoquímicas de las rocas magmáticas terciarias de la Sierra Madre del Sur: Bol. de la Sociedad Geológica Mexicana, T.
- Morán-Zenteno, D. J., Tolson, G., Martínez-Serrano, R. G., Martiny, B., Schaaf, P., Silva-Romo, G., Macías-Romo, C., Alba-Aldave, L., Hernández-Bernal, M. S., Solís-Pichardo, G. N. (1999). Tertiary arc-magmatism of the Sierra Madre del Sur, Mexico, and its transition to the volcanic activity of the Trans-Mexican Volcanic Belt. *Journal of South American Earth Sciences*, 12(6), 513-535.
- Motolinía-García, O., Barrios-Rodríguez, F., & Lemus-Bustos, O. (2002). Carta Geológico-minero San Pedro Quiatoni E14-D59, Escala 1:50000: Estada Oaxaca, México. Consejo de Recursos Minerales, Archivo Técnico.
- Motolinía-García, O., Barrios-Rodríguez, F., & Lemus-Bustos, O. (2003). Carta Geológico-minero San Pedro Quiatoni E14-D59, 1:50000: Oaxaca, México. Consejo de Recursos Minerales, 1 mapa.
- Motolinía-García, O., Cardoso-Vázquez, E. A., Castro-Rodríguez, M. G., & Loaeza-García, J. P. (2002). Carta Geológico-minero Puerto Escondido D14-3, 1:250000: Oaxaca, México. Consejo de Recursos Minerales, 1 mapa.
- Murata, K. J., Friedman, I., & Madsen, B. M. (1969). Isotopic composition of diagenetic carbonates in marine Miocene formations of California and Oregon: US Government Printing Office.
- Murillo-Muñetón, G., & Torres-Vargas, R. (1987). Mapa petrogenético y radiométrico de la República Mexicana: Instituto Mexicano del Petróleo. Subdirección de Tecnología de Exploración, informe del proyecto C-2010.
- Nieto-Samaniego, A., Alaniz-Álvarez, S., Silva-Romo, G., Eguiza-Castro, M., & Mendoza-Rosales, C. (2006). Latest Cretaceous to Miocene deformation events in the eastern Sierra Madre del Sur, Mexico, inferred from the geometry and age of major structures. *Geological Society of America Bulletin*, 118(1-2), 238-252.
- Ohmoto, H. (1972). Systematics of sulfur and carbon isotopes in hydrothermal ore deposits. *Society of Economic Geologists*, 67(5), 551-578.
- Ohmoto, H., & Rye, R. O. (1979). Isotopes of sulfur and carbon. *Geochemistry of hydrothermal ore deposits*, 509-567.
- Ortega-González, J. V., & Lambarria-Silva, C. (1991). Informe geológico del prospecto Hoja Oaxaca, compilación geológica I. G. R. S. 1129: PEMEX, Coordinación Divisional de Exploración, Gerencia de Exploración Región Sur, Subgerencia de Geología superficial y Geoquímica, Inédito, 190 p.
- Ortega-Gutiérrez, F. O., & González-Arreola, C. (1985). Una edad cretácica de las rocas sedimentarias deformadas de la Sierra de Juárez, Oaxaca. *Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología*, 6, 100-101.
- Pan, J. Y., Ni, P., Chi, Z., Yang, Y. L., Li, S. N., Bao, T., Wang, W. B., Zeng, W., & Xue, K. (2018). Spatial distribution and variation of ore body, alteration and ore-forming fluid of the giant Zijinshan epithermal Cu-Au deposit, SE China: implication for mineral exploration. *Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis*, 18(4), 279-293.
- Pérez-Gutiérrez, R. (2010). Geología del terreno Cuicateco en el Istmo de Tehuantepec y sus implicaciones tectónicas en la evolución del sur de México. (Doctor), Universidad Nacional Autónoma de México.
- Poliquin, M. J. (2009). *Geology, Geochemistry and Age of Intrusion-Related Mineralisation in Eastern Mexico*. University of Exeter.
- Qiu, Z.-J., Fan, H.-R., Liu, X., Yang, K.-F., Hu, F.-F., Xu, W.-G., & Wen, B.-J. (2016). Mineralogy, chalcopyrite ReOs geochronology and sulfur isotope of the Hujiaoyu Cu deposit in the Zhongtiao Mountains, North China Craton: Implications for a Paleoproterozoic metamorphogenic copper mineralization. *Ore Geology Reviews*, 78, 252-267.

- Roedder, E. (1984). Fluid Inclusions. *Reviews in Mineralogy*. Mineralogical Society of America, 12, 644.
- Roedder, E., & Bodnar, R. J. (1980). Geologic pressure determinations from fluid inclusion studies. *Annual review of earth and planetary sciences*, 8(1), 263-301.
- Rollinson, H. R. (1993). *Using geochemical data: evaluation, presentation, interpretation*: Routledge.
- Rosman, K., & Taylor, P. (1998). *Isotopic compositions of the elements 1997 (Technical Report)*. *Pure and applied chemistry*, 70(1), 217-235.
- Rottier, B., Kouzmanov, K., Casanova, V., Wälle, M., & Fontboté, L. (2018). Cyclic dilution of magmatic metal-rich hypersaline fluids by magmatic low-salinity fluid: a major process generating the giant epithermal polymetallic deposit of Cerro de Pasco, Peru. *Society of Economic Geologists*, 113(4), 825-856.
- Sack, R. O. (2005). Internally consistent database for sulfides and sulfosalts in the system $\text{Ag}_2\text{S}-\text{Cu}_2\text{S}-\text{ZnS}-\text{FeS}-\text{Sb}_2\text{S}_3-\text{As}_2\text{S}_3$: Update. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 69(5), 1157-1164.
- Sack, R. O., & Ebel, D. S. (1993). As-Sb exchange energies in tetrahedrite-tennantite fahlores and bournonite-seligmannite solid solutions. *Mineralogical Magazine*, 57(389), 635-642.
- Sack, R. O., & Ebel, D. S. (2006). Thermochemistry of sulfide mineral solutions. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 61(1), 265-364.
- Sack, R. O., Kuehner, S. M., & Hardy, L. S. (2002). Retrograde Ag-enrichment in fahlores from the Coeur d'Alene mining district, Idaho, USA. *Mineralogical Magazine*, 66(1), 215-229.
- Sack, R. O., Lynch, J. V. G., & Foit, F. (2003). Fahlore as a petrogenetic indicator: Keno Hill Ag-Pb-Zn District, Yukon, Canada. *Mineralogical Magazine*, 67(5), 1023-1038.
- Sack, R. O., Fredericks, R., Hardy, L. S., & Ebel, D. S. (2005). Origin of high-Ag fahlores from the galena Mine, Wallace, Idaho, USA. *American Mineralogist*, 90(5-6), 1000-1007.
- Sakai, H., Casadevall, T. J., & Moore, J. G. (1982). Chemistry and isotope ratios of sulfur in basalts and volcanic gases at Kilauea Volcano, Hawaii. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 46(5), 729-738.
- Sakai, H., Des Marais, D., Ueda, A., & Moore, J. (1984). Concentrations and isotope ratios of carbon, nitrogen and sulfur in ocean-floor basalts. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 48(12), 2433-2441.
- Samson, I., Anderson, A., & Marshall, D. D. (2003). *Fluid inclusions: analysis and interpretation (Vol. 32)*: Mineralogical Association of Canada.
- Sánchez-Rojas, L. E., Aranda-Osorio, J. N., Zárate-López, J., & Castro-Rodríguez, M. G. (2000). Carta Geológico-minero Zaachila E14-12, 1:250000: Oaxaca, México. Consejo de Recursos Minerales, 1 mapa.
- Sánchez-Rojas, L. E., Castro-Rodríguez, M. G., Aranda-Osorio, J. N., Zárate-López, J., Zárate-Barradas, R., & Salinas-Rodríguez, J. M. (1998). Informe de la carta geológico-minero y geoquímica, Zaachila E14-12, Escala 1:250,000: Oaxaca, México. Consejo de Recursos Minerales, Archivo Técnico.
- Santamaría-Díaz, A., Alaniz-Álvarez, S. A., & Nieto-Samaniego, Á. F. (2008). Deformaciones cenozoicas en la cobertura de la falla Caltepec en la región de Tamazulapam, sur de México. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 25(3), 494-516.
- Scott, S. D. (1983). Chemical behaviour of sphalerite and arsenopyrite in hydrothermal and metamorphic environments. *Mineral. Mag*, 47(4), 427-435.
- Sedlock, R. L., Ortega-Gutiérrez, F., & Speed, R. C. (1993). Tectonostratigraphic terranes and tectonic evolution of Mexico. *Geological Society of America*, 278.
- Sharp, Z. (2007). *Principles of stable isotope geochemistry*: Pearson.

- Sillitoe, R. H., & Hedenquist, J. W. (2003). Linkages between volcanotectonic settings, ore-fluid compositions, and epithermal precious metal deposits. *Special Publication-Society of Economic Geologists*, 10, 315-343.
- Simmons, S. F. (1991). Hydrologic implications of alteration and fluid inclusion studies in the Fresnillo District, Mexico; evidence for a brine reservoir and a descending water table during the formation of hydrothermal Ag-Pb-Zn orebodies. *Society of Economic Geologists*, 86(8), 1579-1601.
- Simmons, S. F., & Browne, P. R. (2000). Hydrothermal minerals and precious metals in the Broadlands-Ohaaki geothermal system: Implications for understanding low-sulfidation epithermal environments. *Society of Economic Geologists*, 95(5), 971-999.
- Simmons, S. F., & Christenson, B. W. (1994). Origins of calcite in a boiling geothermal system. *American Journal of Science*, 294(3), 361-400.
- Simmons, S. F., & Sawkins, F. J. (1986). Physico-chemical nature of the mineralizing solutions of the St. Niño vein, Fresnillo, Zacatecas, Mexico. In *Geological Society of America, Abstracts with Programs* (Vol. 18, p. 751).
- Simmons, S. F., Gemmell, J. B., & Sawkins, F. J. (1988). The Santo Nino silver-lead-zinc vein, Fresnillo District, Zacatecas; Part II, Physical and chemical nature of ore-forming solutions. *Society of Economic Geologists*, 83(8), 1619-1641.
- Simmons, S. F., White, N. C., & John, D. A. (2005). Geological characteristics of epithermal precious and base metal deposits. *Society of Economic Geologists*, 100, 485-522.
- Solé, J., Salinas, J. C., González-Torres, E., & Cendejas Cruz, J. E. (2007). Edades K/Ar de 54 rocas ígneas y metamórficas del occidente, centro y sur de México. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 24(1), 104-119.
- Steele-MacInnis, M., Lecumberri-Sanchez, P., & Bodnar, R. J. (2012). Short note: HokieFlincs_H₂O-NaCl: a Microsoft Excel spreadsheet for interpreting microthermometric data from fluid inclusions based on the PVTX properties of H₂O-NaCl. *Computers & Geosciences*, 49, 334-337.
- Stefánsson, A., & Seward, T. (2003). Experimental determination of the stability and stoichiometry of sulphide complexes of silver (I) in hydrothermal solutions to 400 C. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 67(7), 1395-1413.
- Taylor Jr, H. P. (1974). The application of oxygen and hydrogen isotope studies to problems of hydrothermal alteration and ore deposition. *Society of Economic Geologists*, 69(6), 843-883.
- Taylor Jr, H. P. (1979). Oxygen and hydrogen isotope relationships in hydrothermal mineral deposits. *Geochemistry of hydrothermal ore deposits*, 239-302.
- Taylor Jr, H. P. (1980). The effects of assimilation of country rocks by magmas on ¹⁸O/¹⁶O and ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr systematics in igneous rocks. *Earth and Planetary Science Letters*, 47(2), 243-254.
- Toulmin III, P., & Barton Jr, P. B. (1964). A thermodynamic study of pyrite and pyrrhotite. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 28(5), 641-671.
- Torres, B., Melgarejo, J. C., Torró, L., Camprubí, A., Castillo-Oliver, M., Artiaga, D., Campeny, M., Tauler, E., Jiménez-Franco, A., Alfonso, P., & Arce-Burgoa, O. R. (2019). The Poopó Polymetallic Epithermal Deposit, Bolivia: Mineralogy, Genetic Constraints, and Distribution of Critical Elements. *Minerals*, 9(8), 472.
- Tulloch, A. J. (1982). Mineralogical observation on carbonate scaling in geothermal wells at Kawerau and Broadlands. In *Proc. 4th New Zealand Geothermal Workshop, October 1982, Auckland*. 131-134.
- Uriarte, A. (2003). *Historia del Clima de la Tierra*. Servicio Central de Publicaciones del Gobierno Vasco.
- Valysaev, B., Erokhin, V., Grinchenko, Y., Prokhorov, V., & Titkov, G. (1985). Isotopic composition of gases from mud volcanoes. *Lithology and Mineral Resources (USSR)*, 20, 62-75.

- Varela, M. (1983). Estudio geológico petrolero de la porción sur de la cuenca de Tlaxiaco, Oaxaca. Tesis profesional Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Ingeniería.
- Vaughan, D. J. (1997). Sulphide ore mineral stabilities, morphologies, and intergrowth textures. *Geochemistry of Hydrothermal Ore Deposites*, 367-434.
- Vázquez, O. A. (1983). Informe geológico No 868 BIS Prospecto Mitla (PEMEX).
- Verducci, M., Foresi, L. M., Scott, G. H., Sprovieri, M., Lirer, F., & Pelosi, N. (2009). The Middle Miocene climatic transition in the Southern Ocean: evidence of paleoclimatic and hydrographic changes at Kerguelen plateau from planktonic foraminifers and stable isotopes. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 280(3-4), 371-386.
- Vergara-Martínez, Á., Islas-Tenorio, J. J., & Salinas-Rodríguez, J. M. (2003). Carta Geológico-minero San Pedro Totolapam E14-D69, 1:50000: Oaxaca, México. Consejo de Recursos Minerales, Texto, 1 mapa.
- Vikre, P. G. (1981). Silver mineralization in the Rochester district, Pershing County, Nevada. *Society of Economic Geologists*, 76(3), 580-609.
- Vikre, P. G. (2018). Pressure Gradients during Ore Formation in John, D. A., Vikre, P. G., du Bray, E. A., Blakely, R. J., Fey, D. L., Rockwell, B. W., Mauk, J. L., Anderson, E. D., & Graybeal, F. T. (2018). Descriptive models for epithermal gold-silver deposits: Chapter Q in *Mineral deposit models for resource assessment (No. 2010-5070-Q)*. US Geological Survey.
- Wiggins, L. B., & Craig, J. R. (1980). Reconnaissance of the Cu-Fe-Zn-S system; sphalerite phase relationships. *Society of Economic Geologists*, 75(5), 742-751.
- Wilkinson, J. J. (2001). Fluid inclusions in hydrothermal ore deposits. *Lithos*, 55(1-4), 229-272.
- Wilkinson, J. J., Simmons, S. F., & Stoffell, B. (2013). How metalliferous brines line Mexican epithermal veins with silver. *Scientific reports*, 3, 2057.
- Zeebe, R. E., & Wolf-Gladrow, D. (2001). *CO₂ in seawater: equilibrium, kinetics, isotopes*: Gulf Professional Publishing.
- Zhai, D., Liu, J., Cook, N. J., Wang, X., Yang, Y., Zhang, A., & Jiao, Y. (2018). Mineralogical, textural, sulfur and lead isotope constraints on the origin of Ag-Pb-Zn mineralization at Bianjiadayuan, Inner Mongolia, NE China. *Mineralium Deposita*, 54(1), 47-66.

ANEXO A

Muestras de mano y núcleos de barreno

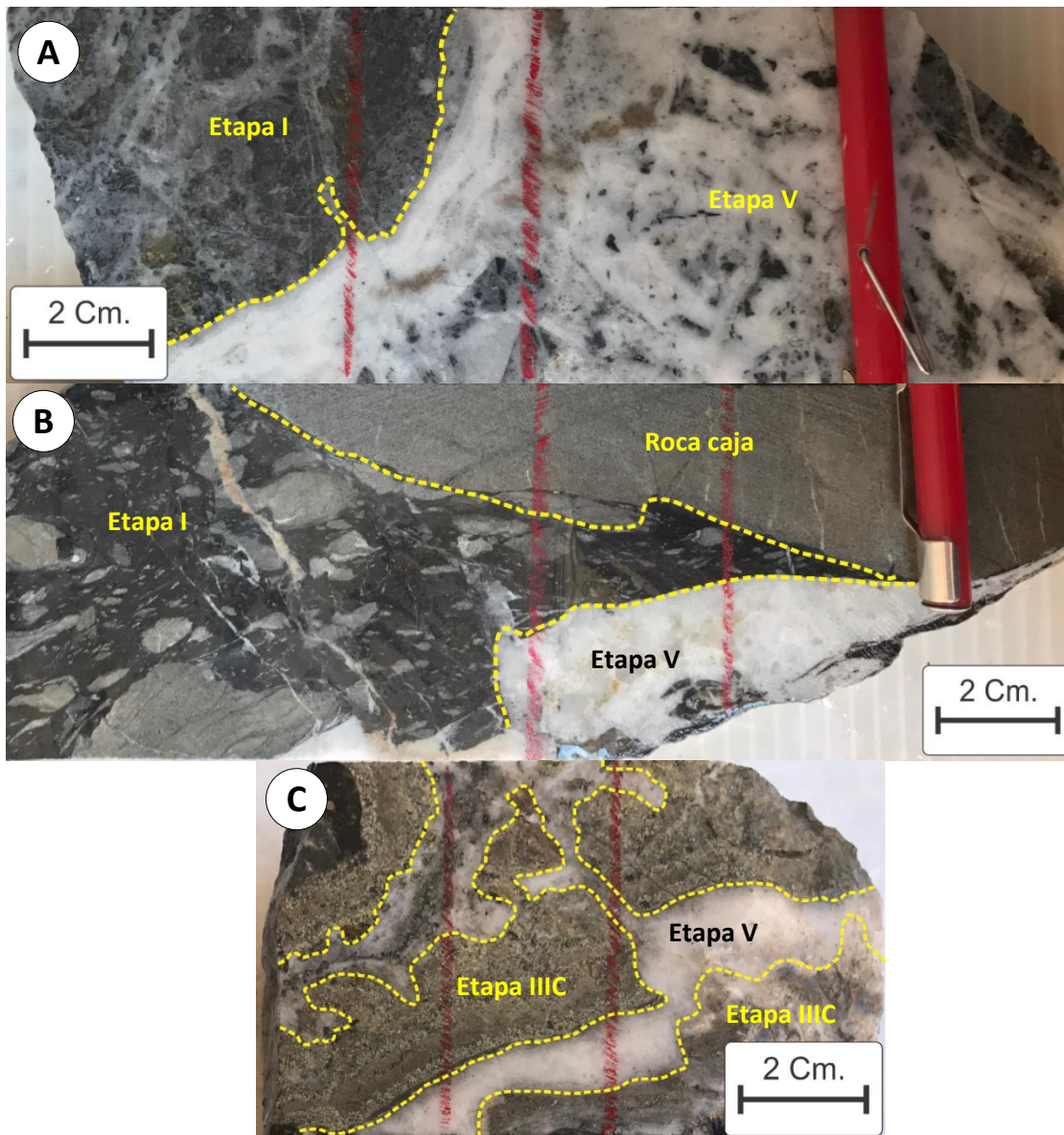


Figura 1. Fotografía de los contactos irregulares entre diferentes etapas de la Veta Splay 5. **A)** Nivel 14 donde se observan dos eventos hidrotermales: i) Etapa I con textura masiva de grano fino, microcristales de galena, esfalerita, calcopirita, pirita y cuarzo, y venillas milimétricas de cuarzo blanquecino; ii) Etapa V con textura brechada, clastos silicificado de lutita y toba inmersa en una matriz de cuarzo microcristalino de textura coliforme. **B)** Nivel 14 donde se observa roca encajante y dos eventos hidrotermales: i) Toba andesíticas alterado como roca encajante; ii) Etapa I con matriz masiva gris oscuro, microcristales de pirita y sulfuros diseminado; iii) Etapa V con textura masiva de grano medio, cristales de cuarzo, calcita y sericita. **C)** Nivel 14 donde se observa dos eventos hidrotermales: i) Etapa III C con textura masiva de grano fino y medio, microcristales de esfalerita (marrón amarillento a verdoso), calcopirita, pirita, galena, cuarzo y ankerita; ii) Etapa V con textura masiva de grano fino, microcristales de cuarzo, calcita y sericita.

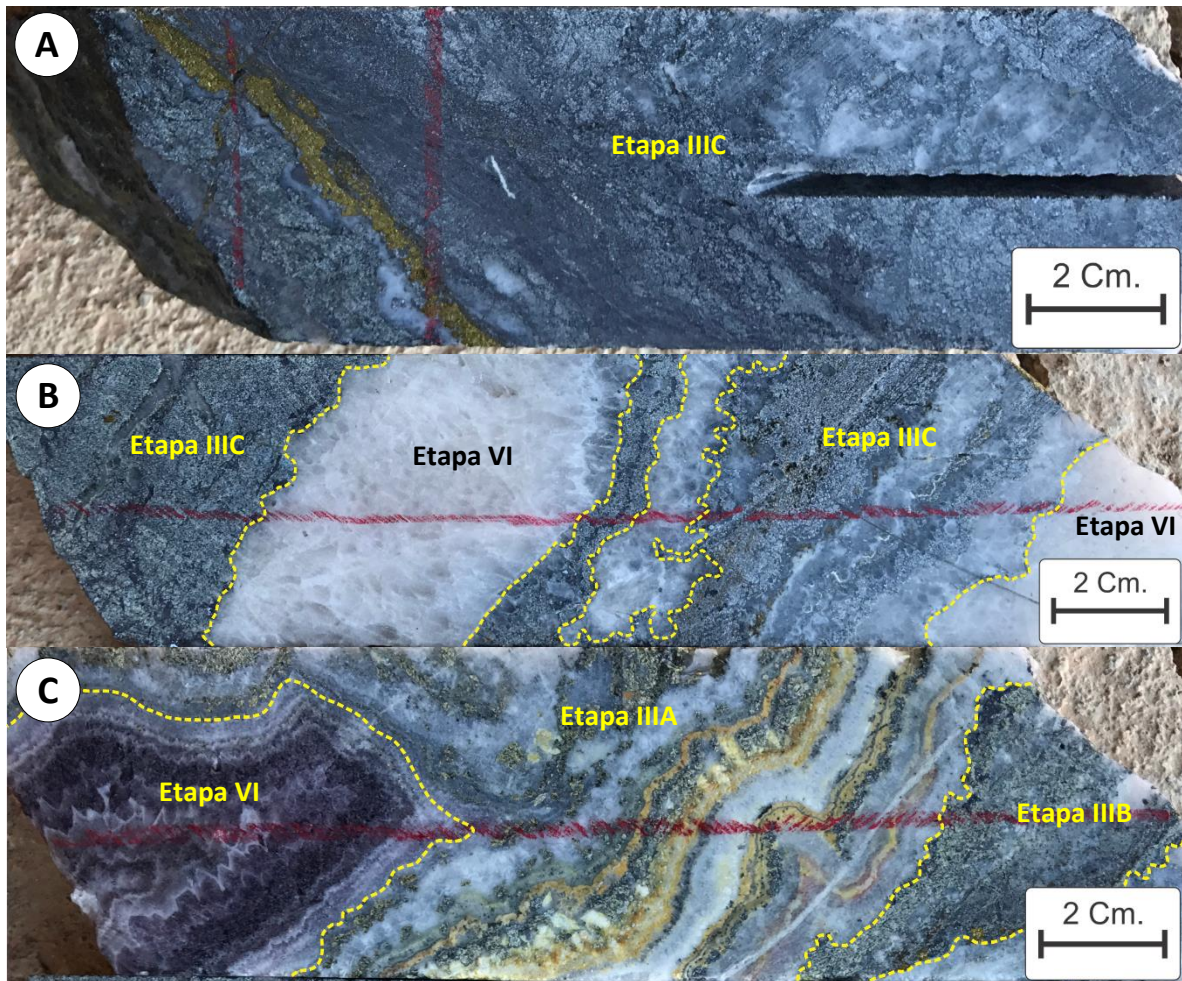


Figura 2. Fotografía de los contactos irregulares entre diferentes etapas de la Veta Splay 66. **A)** Nivel 16 textura masiva de grano fino, medio y grueso, cristales de esfalerita (gris verdoso) y microcristales de calcopirita, galena, pirita y cuarzo (gris blanquecino), y venilla de calcopirita (5 mm de espesor) que corresponde a la etapa IIIC. **B)** Nivel 16 donde se observa dos eventos hidrotermales: i) Etapa IIIC con textura masiva, microcristales de esfalerita (gris verdoso), calcopirita, pirita, glena y cuarzo; y ii) Etapa VI con textura masiva, macrocristales de cuarzo gris marrón. **C)** Nivel 16 donde se aprecian tres eventos hidrotermales: i) Etapa IIIA con textura colorme de grano fino, microcristales de esfalerita, galena, calcopirita, cuarzo, ankerita y calcita; ii) Etapa IIIB con textura masiva de grano fino, microcristales de esfalerita (gris verdoso), calcopirita, pirita y cuarzo; y iii) Etapa VI con textura crustiforme de grano fino y grueso, microcristales de cuarzo blanco y macrocristales de cuarzo amatista.

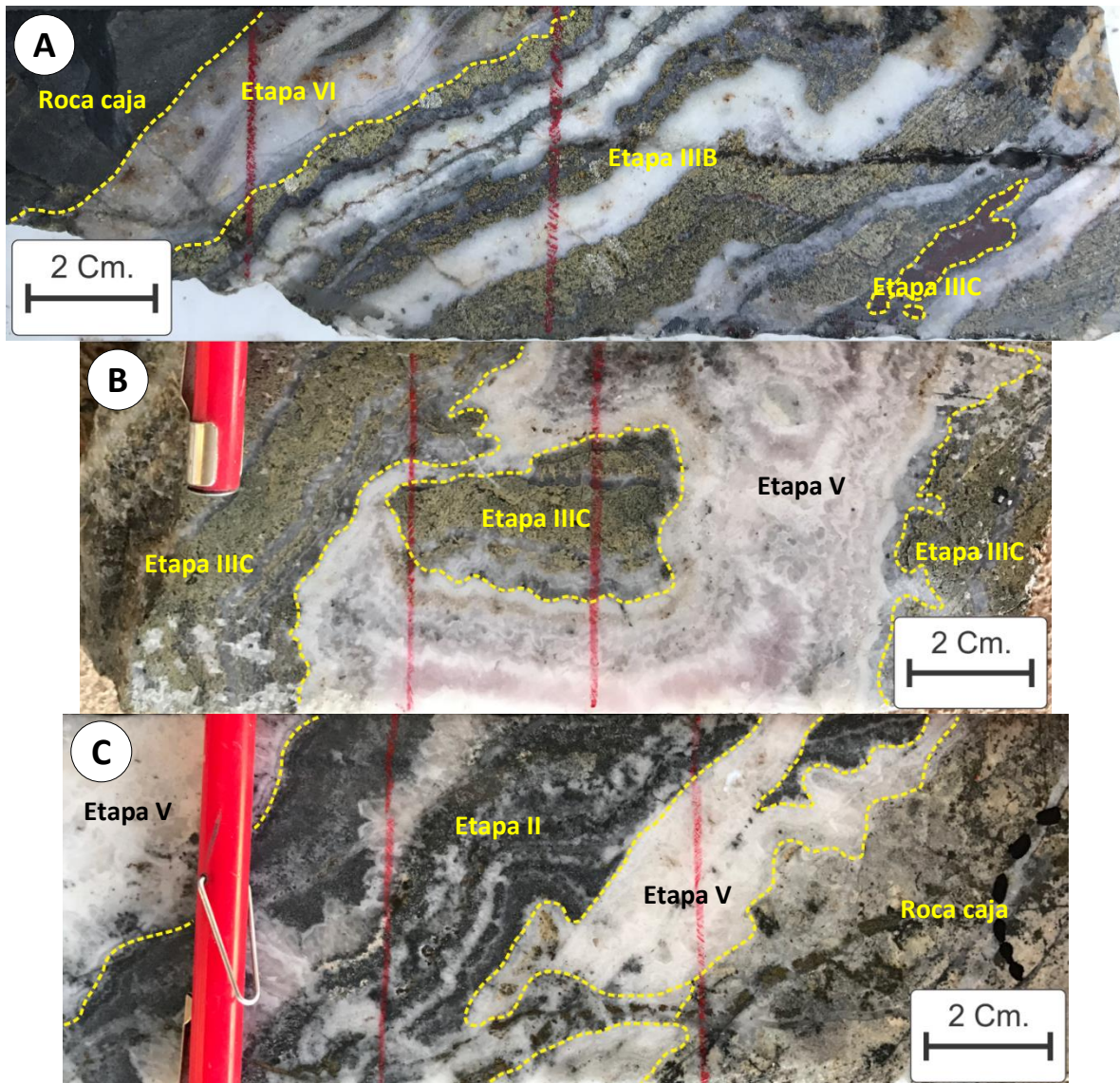


Figura 3. Fotografía de los contactos irregulares entre diferentes etapas de la Veta Splay 66. **A)** Nivel 18 donde se observa la roca encajante y tres eventos hidrotermales: i) toba andesítica alterado (clorita y epidota); ii) Etapa IIIB con textura coliforme de grano fino, cristales de esfalerita (amarillo verdoso) y microcristales de calcopirita, pirita, cuarzo, ankerita y calcita; y iii) Etapa IIIC con textura masiva de grano fino, microcristales de hematita, calcopirita y pirita. **B)** Nivel 18 donde se aprecia dos eventos hidrotermales: i) Etapa IIIC con texturas masiva y coliforme de grano fino, microcristales de esfalerita (amarillo verdoso), calcopirita, pirita y cuarzo; y ii) Etapa V con textura crustiforme de grano fino y grueso, microcristales de cuarzo y sulfuros diseminados, y macrocristales de cuarzo marrón claro. **C)** Nivel 18 donde se aprecia roca encajante y dos eventos hidrotermales: i) toba andesítico fuerte alterado; ii) Etapa II con textura coliforme de grano fino y grueso, microcristales de esfalerita, pirita, galena, calcopirita y cuarzo; y iii) Etapa V con textura masiva de grano fino, microcristales de cuarzo y calcita.

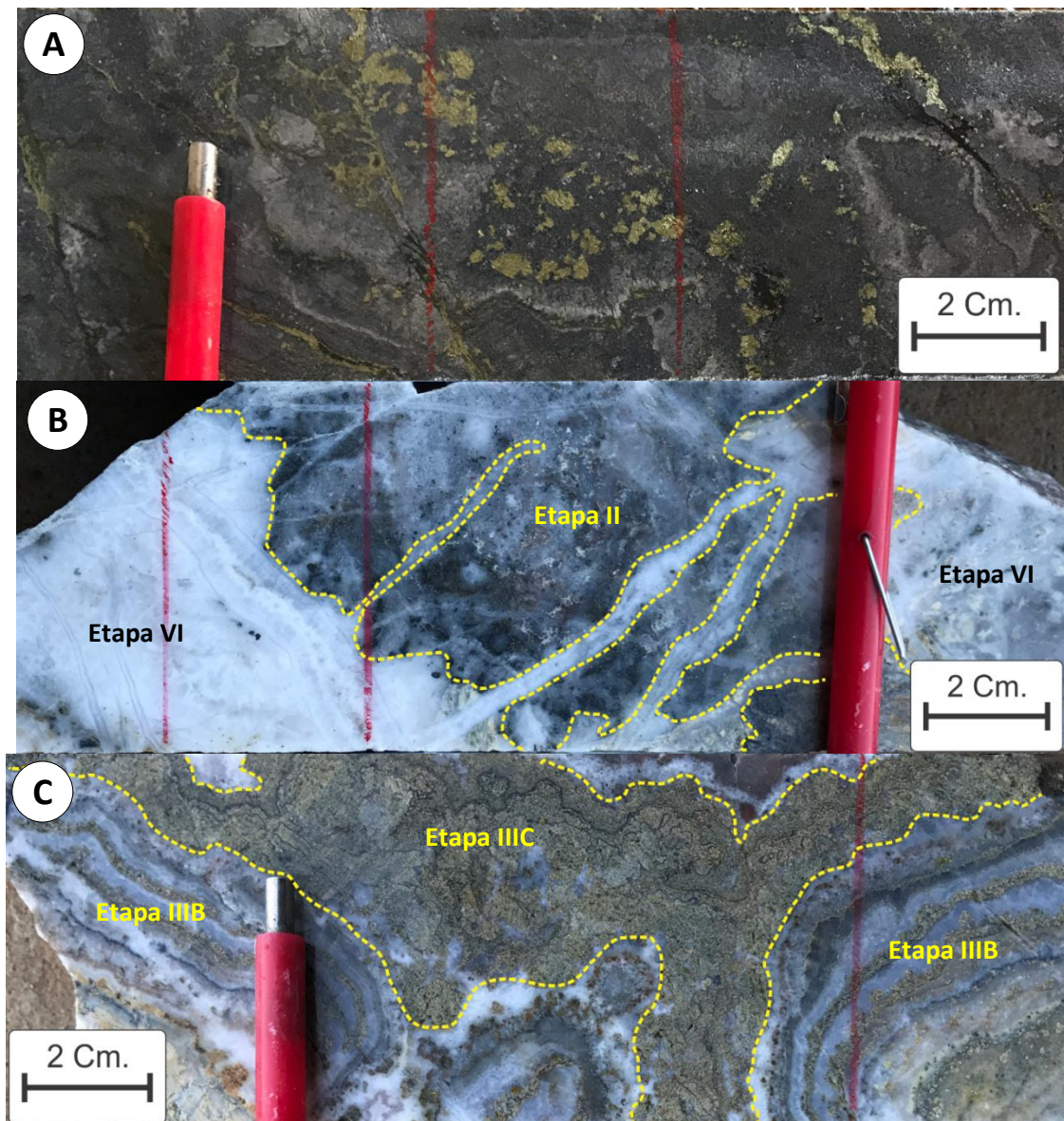


Figura 4. Fotografía de los contactos irregulares entre diferentes etapas de la Veta Splay 66. **A)** Etapa II de nivel 18 con textura masiva de grano grueso y fino, macrocristales de pirita y microcristales de galena, esfalerita, calcopirita, pirita y cuarzo, y venillas milimétricas de pirita. **B)** Nivel 20 donde se observa dos eventos hidrotermales: i) Etapa II con textura masiva de grano fino, microcristales de mineral gris oscuro, calcopirita, pirita, cuarzo y sericita; y ii) Etapa VI con textura masiva de grano fino, microcristales sulfuros y cuarzo, y venillas milimétrica de cuarzo hialino. **C)** Nivel 20 donde se aprecia dos eventos hidrotermales: i) Etapa III B con textura colorforme de grano fino, microcristales de esfalerita (amarillo marrón), calcopirita, pirita y cuarzo; y ii) Etapa III C con textura masiva de grano fino, microcristales de esfalerita (amarillo marrón), calcopirita, pirita y cuarzo.

ANEXO B

Fotomicrografía de láminas delgadas

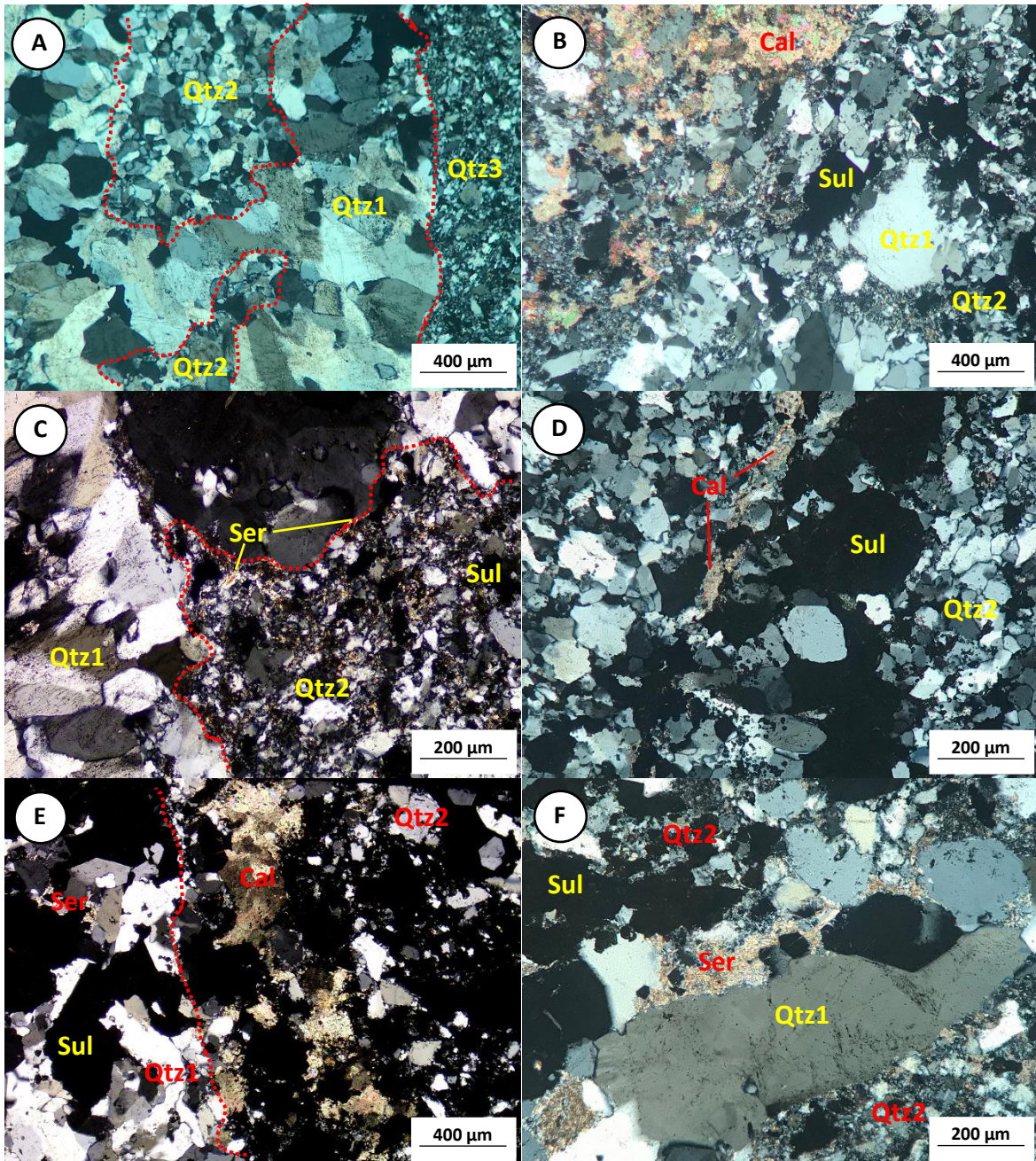


Figura 5 Fotomicrografía Veta Splay 5, Nivel 12, Etapa II, luz transmitida con nicóles cruzados. **A)** Los puntos discontinuos representan el contacto de los eventos hidrotermales (Qtz1 de 0.7 a 2.0 mm, Qtz2 de 150 a 400 μm , Qtz3 de 25 a 250 μm). **B)** Cristales anedrales de cuarzo de grano grueso (Qtz1) y fino (Qtz2), sulfuros y calcita. **C)** Se observa dos eventos hidrotermales limitadas por la línea discontinua: i) cristales anedrales y subedrales de cuarzo (Qtz1); y ii) cristales anedrales de sulfuro, cuarzo (Qtz2) y sericita. **D)** Textura mosaico, cristales anedrales de cuarzo y sulfuros, y venilla (de 10 a 50 μm de espesor) de cristales anedrales de calcita. **E)** Cristales anedrales de cuarzo (Qtz1 y Qtz2), calcita y sulfuros. **F)** Cristales anedrales de sericita relleno los espacios de cuarzo de grano grueso (Qtz1) y medio (Qtz2). Abreviaturas: Cal = calcita, Qtz = cuarzo, Ser = sericita, Sul = sulfuro. Referencia de las abreviaturas de los minerales. Simbología incluida en la figura.

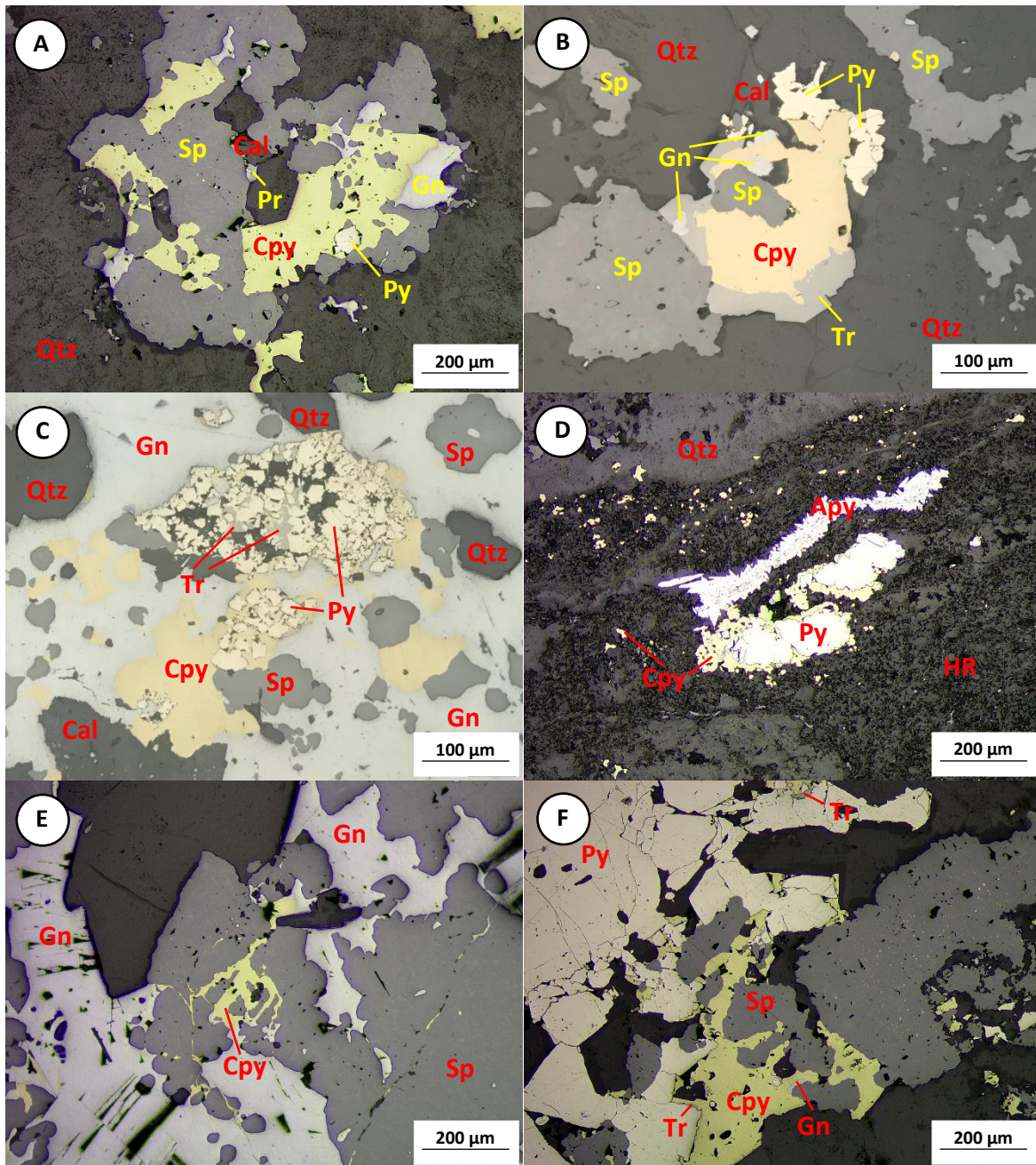


Figura 6. Fotomicrografía Veta Splay 5, Nivel 17, Etapa II. **A)** Bordes de esfalerita muy irregulares y algunas esfaleritas están englobados por calcopirita. **B)** Contacto irregular entre los minerales calcopirita-tetraedrita-tennantita-esfalerita-galena formando textura de reemplazamiento. **C)** calcopirita y tetraedrita-tennantita rellenan las fracturas de los granos de pirita. **D)** Roca encajante con calcopirita y pirita diseminada, y venilla de cristales subedrales de arsenopirita y cuarzo. **E)** Cristales anedrales de calcopirita rellenan las fracturas de esfalerita y galena. **F)** Calcopirita relleno los espacios de pirita y esfalerita con calcopirita diseminada. Abreviaturas: Apy = arsenopirita, Cal = calcita, Cpy = calcopirita, Gn = galena, Pr = proustita-pirargirita, Py = pirita, Qtz = cuarzo, RH = roca hospedante, Sp = esfalerita, Tr =tetrahedrita-tennantita. Referencia de las abreviaturas de los minerales. Simbología incluida en la figura.

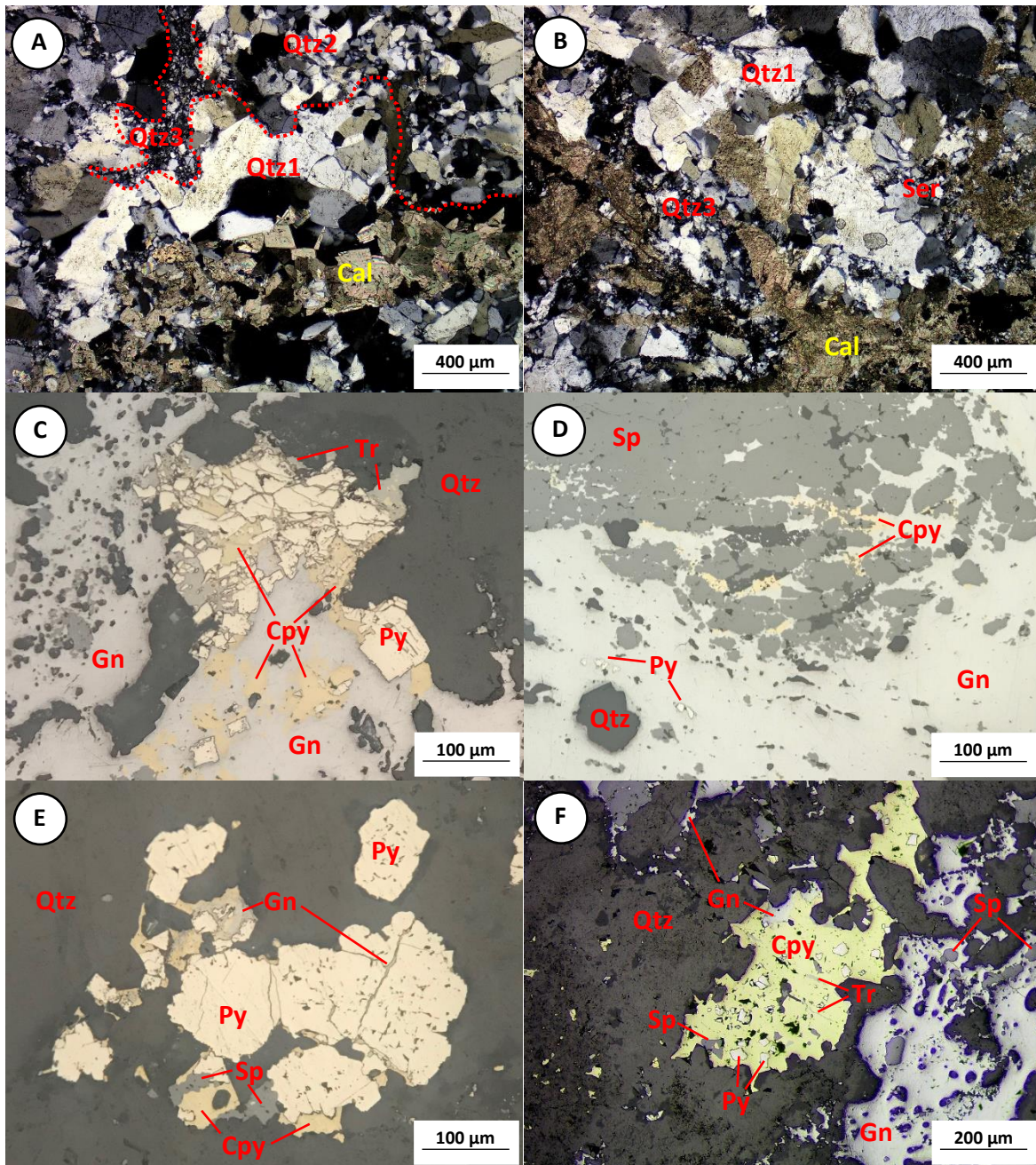


Figura 7. Fotomicrografía Veta Splay 5, Nivel 18, Etapa II. **A)** Tres variedades de granos de cuarzo (Qtz1, Qtz2 y Qtz3) y cristales subedrales de calcita. **B)** Cristales anedrales de cuarzo (Qtz1, Qtz2 y Qtz3), calcita y sericita, y la calcita rellenando los espacios entre cuarzo. **C)** Textura de reemplazamiento con cristales anedrales de galena, calcopirita y tetradrita-tennantita rellenando las fracturas de los granos de pirita. **D)** Textura de reemplazamiento con galena y calcopirita rellenando las fracturas de esfalerita, y galena englobando a la pirita. **E)** Esfalerita, galena y calcopirita rellenando las fracturas de pirita, y contacto irregular entre ellas. **F)** Calcopirita englobando a pirita, tetradrita-tennantita rellenando las fracturas de calcopirita y galena englobando a esfalerita. Abreviaturas: Cal = calcita, Cpy = calcopirita, Gn = galena, Py = pirita, Tr = tetradrita-tennantita, Qtz = cuarzo, Ser = sericita, Sp = esfalerita. Referencia de las abreviaturas de los minerales. Simbología incluida en la figura.

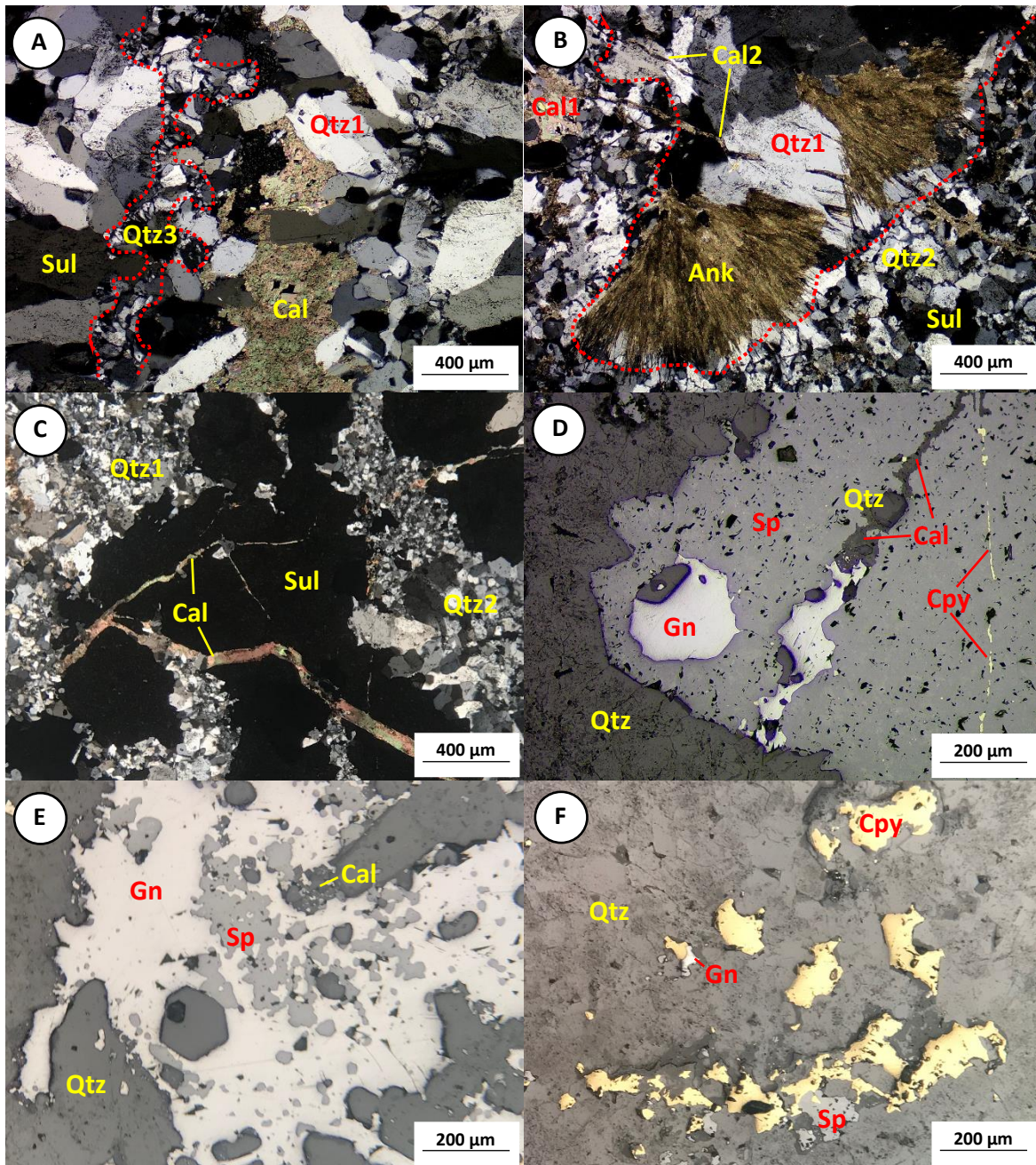


Figura 8. Fotomicrografía Veta Splay 5, Nivel 19, Etapa IIIA. **A)** Se observa dos etapas de cuarzo: i) cristales anedrales y subedrales de cuarzo (Qtz1), sulfuros y calcita; y ii) cristales anedrales de cuarzo (Qtz3). **B)** se observa dos etapas de cuarzo y dos tipos de carbonatos: i) cristales anedrales de cuarzo (Qtz1 y Qtz2) y sulfuros; y ii) cristales subedrales de ankerita y la calcita (Cal1 y Cal2) en venillas y rellenando fracturas. **C)** Calcita (de 10 a 100 μm de espesor) rellenando las fracturas de los sulfuros y cuarzo (Qtz1), y se observa dos variedades de cuarzo. **D)** Galena y calcopirita rellenando las fracturas de la esfalerita, y la esfalerita presenta inclusiones de calcopirita. **E)** Textura de reemplazamiento con cristales de galena englobando a esfalerita. **F)** Cristales anedrales de calcopirita y esfalerita englobados por cuarzo. Abreviaturas: Ank = ankerita, Cal = calcita, Cpy = calcopirita, Gn = galena, Qtz = cuarzo, Sp = esfalerita, Sul = sulfuro. Referencia de las abreviaturas de los minerales. Simbología incluida en la figura.

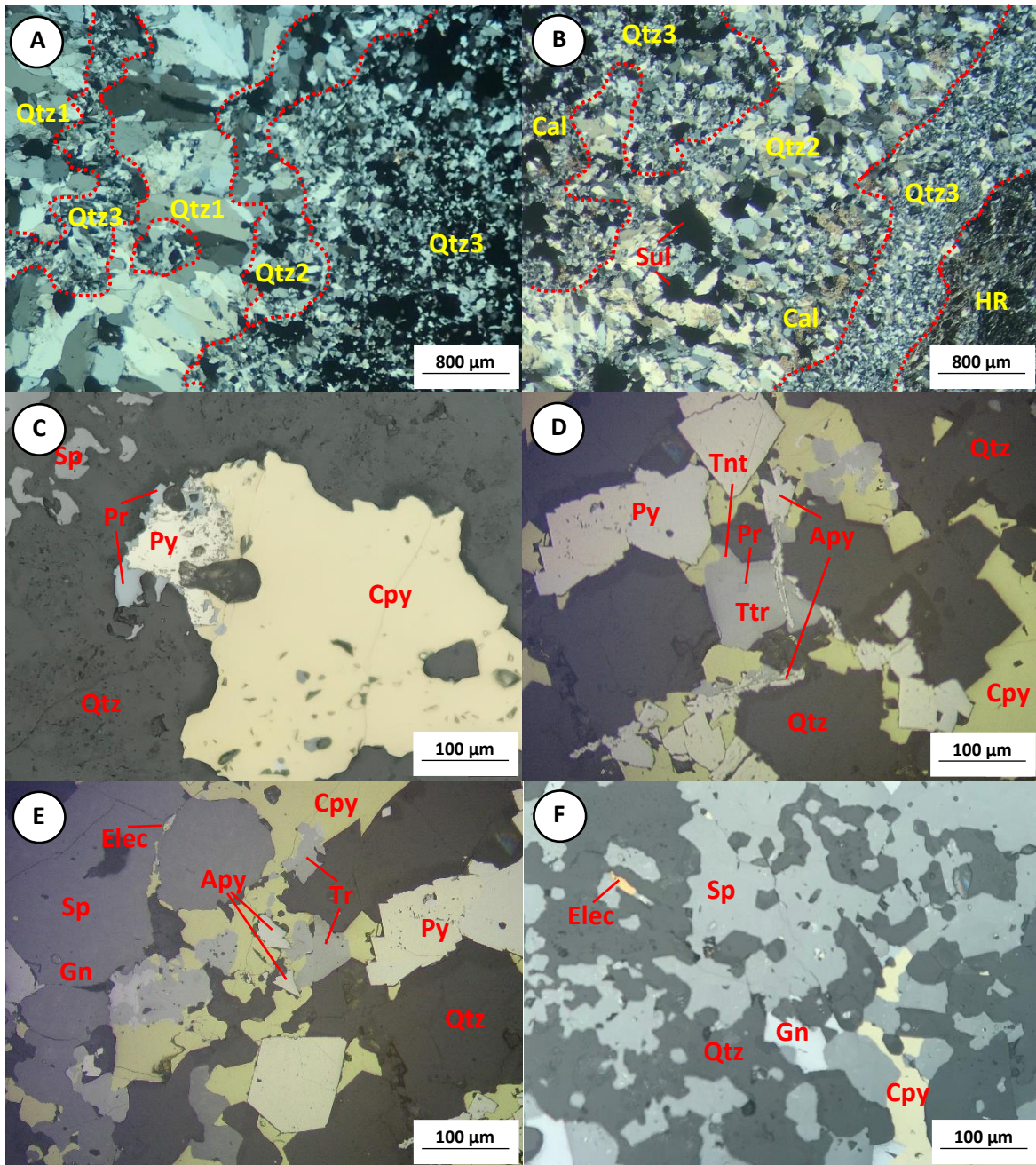


Figura 9. Fotomicrografía Veta Splay 5, Nivel 12, Etapa III B. **A)** Se observa tres variedades de granos de cuarzo: i) grano grueso (Qtz1) de 0.8 a 3 mm; ii) grano medio (Qtz2) de 300 a 600 μm ; y iii) grano fino (Qtz3) de 50 a 500 μm . **B)** Se aprecia dos variedades de granos de cuarzo: i) grano medio (Qtz2) y ii) grano fino (Qtz3), y la calcita relleno los espacios entre cristales de cuarzo. **C)** Contactos irregulares entre los cristales anedrales de calcopirita, pirita y proustita-pirargirita formando textura de reemplazamiento. **D)** Cristales subedrales de pirita y arsenopirita, y anedrales de calcopirita, tetraedrita-tennantita, proustita-pirargirita. **E)** Asociación de cristales anedrales de Tetraedrita-tennantita, arsenopirita, calcopirita, galena, pirita, esfalerita y *electrum*. **F)** Asociación de cristales anedrales de esfalerita, galena, calcopirita y *electrum*. Abreviaturas: Apy = arsenopirita, Cal = calcita, Cpy = calcopirita, Elec = *electrum*, HR = roca hospedante, Pr = proustita-pirargirita, Py = pirita, Qtz = cuarzo, Sp = esfalerita, Tnt = tennantita, Ttr = tetraedrita. Referencia de las abreviaturas de los minerales. Simbología incluida en la figura.

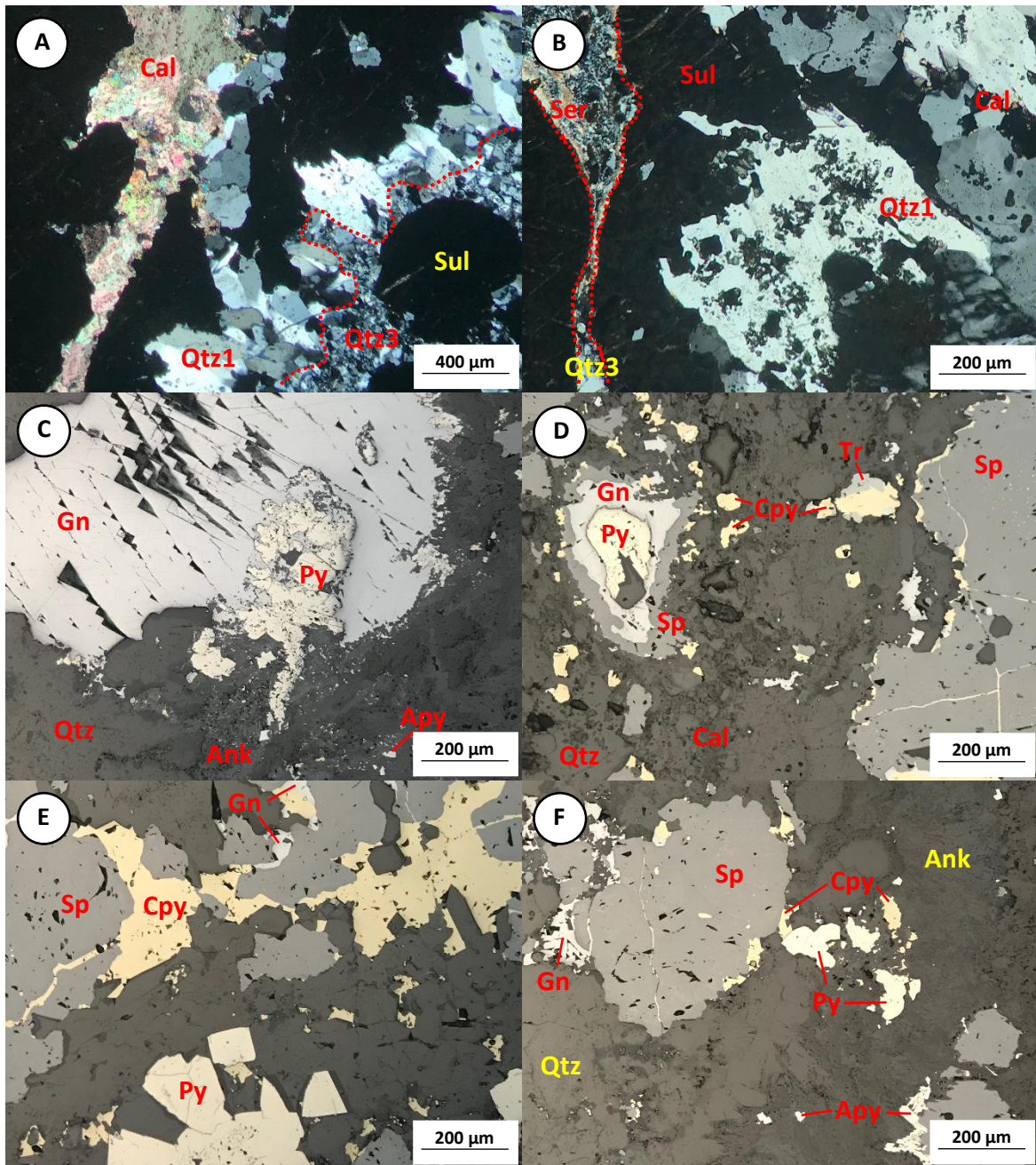


Figura 10. Fotomicrografía Veta Splay 5, Nivel 16, Etapa IIIC. **A)** Calcita rellenando las fracturas de sulfuros y cuarzo, y se observa dos variedades de cuarzo: i) grano grueso (Qtz1) de 150 a 550 μm y ii) grano fino (Qtz3) de 10 a 70 μm . **B)** Sericita rellenando las fracturas de los sulfuros y granos de cuarzo con textura plumosa. **C)** Textura de reemplazamiento donde se observa que la galena rellenando las fracturas de pirita y la ankerita engloba a la arsenopirita. **D)** Pirita englobado por galena y esfalerita, calcopirita rellenando las fracturas de esfalerita, esfalerita con diseminación de calcopirita y contacto irregular entre calcopirita, tetraedrita-tennantita. **E)** Asociación de cristales anhedrales y subedrales de pirita, esfalerita, galena y calcopirita, y calcopirita rellenando las fracturas de esfalerita. **F)** Asociación de cristales anhedrales de arsenopirita, pirita, esfalerita y calcopirita englobados por cuarzo y ankerita. Abreviaturas: Ank = ankerita, Apy = arsenopirita, Cal = calcita, Cpy = calcopirita, Gn = galena, Py = pirita, Qtz = cuarzo, Sp = esfalerita, Sul = sulfuro, Tr = tetraedrita-tennantita. Referencia de las abreviaturas de los minerales. Simbología incluida en la figura.

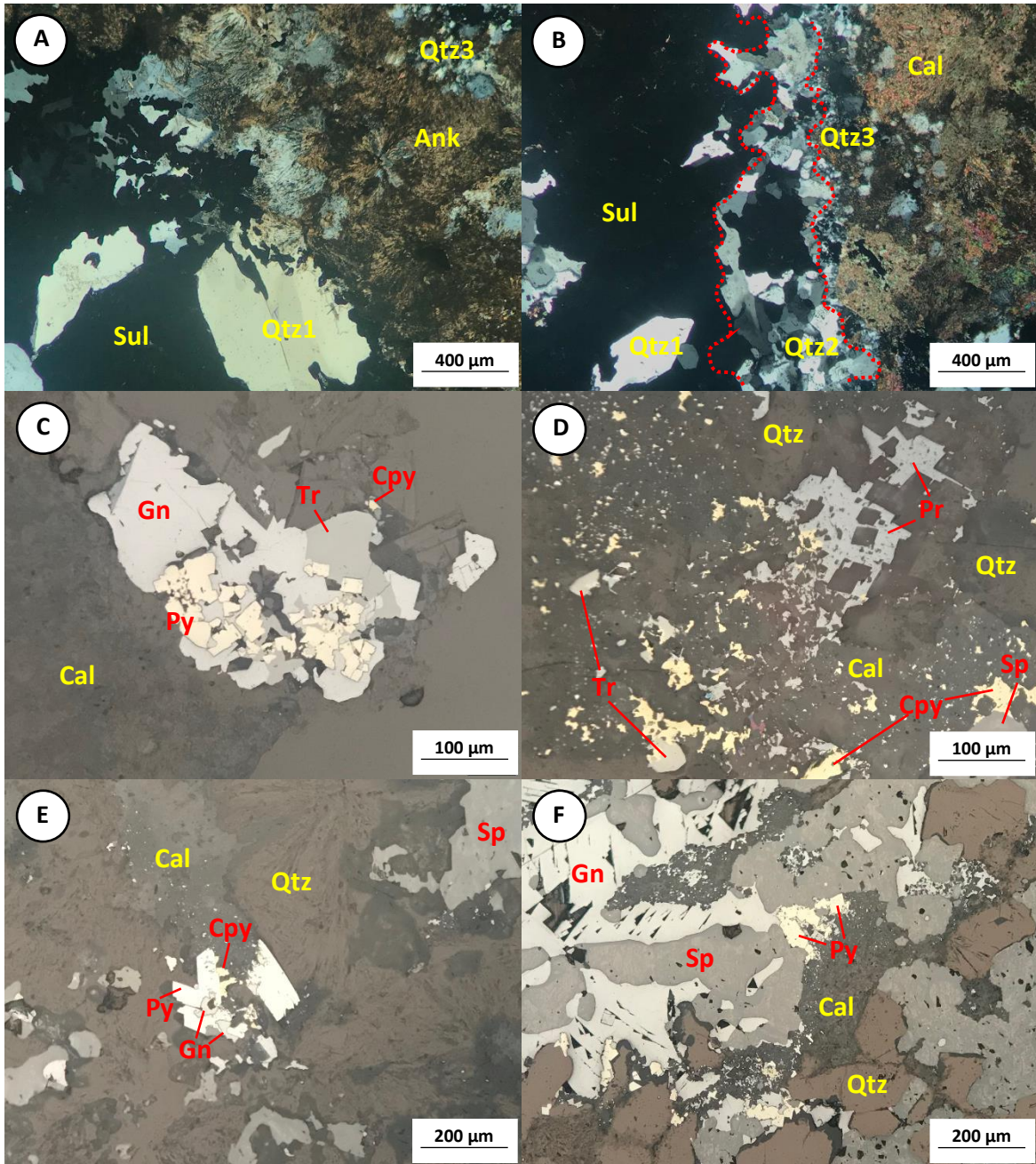


Figura 11. Fotomicrografía Veta Splay 5, Nivel 20, Etapa IIIC. **A)** Asociación de cristales anedrales y subedrales de cuarzo, calcita, ankerita y sulfuro. **B)** Asociación de cristales anedrales de cuarzo, calcita y sulfuros, y se observa tres variedades de granos de cuarzo: i) grano grueso (Qtz1) de 300 a 650 μm ; ii) grano medio (Qtz2) de 80 a 250 μm ; y iii) grano fino (Qtz3) de 10 a 70 μm . **C)** Galena y tetraedrita-tennantita relleno de las fracturas de los granos de pirita y englobados por calcita. **D)** Tetraedrita-tennantita reemplazando a la calcopirita y los cristales de proustita-pirargirita relleno de los espacios entre los cristales de calcita. **E)** Pirita presentan bordes de corrosión en contacto con la galena. **F)** Galena reemplazando a la pirita y relleno de las fracturas de esfalerita. Abreviaturas: Ank = ankerita, Cal = calcita, Cpy = calcopirita, Gn = galena, Py = pirita, Qtz = cuarzo, Sp = esfalerita, Sul = sulfuro, Tr = tetraedrita-tennantita. Referencia de las abreviaturas de los minerales. Simbología incluida en la figura.

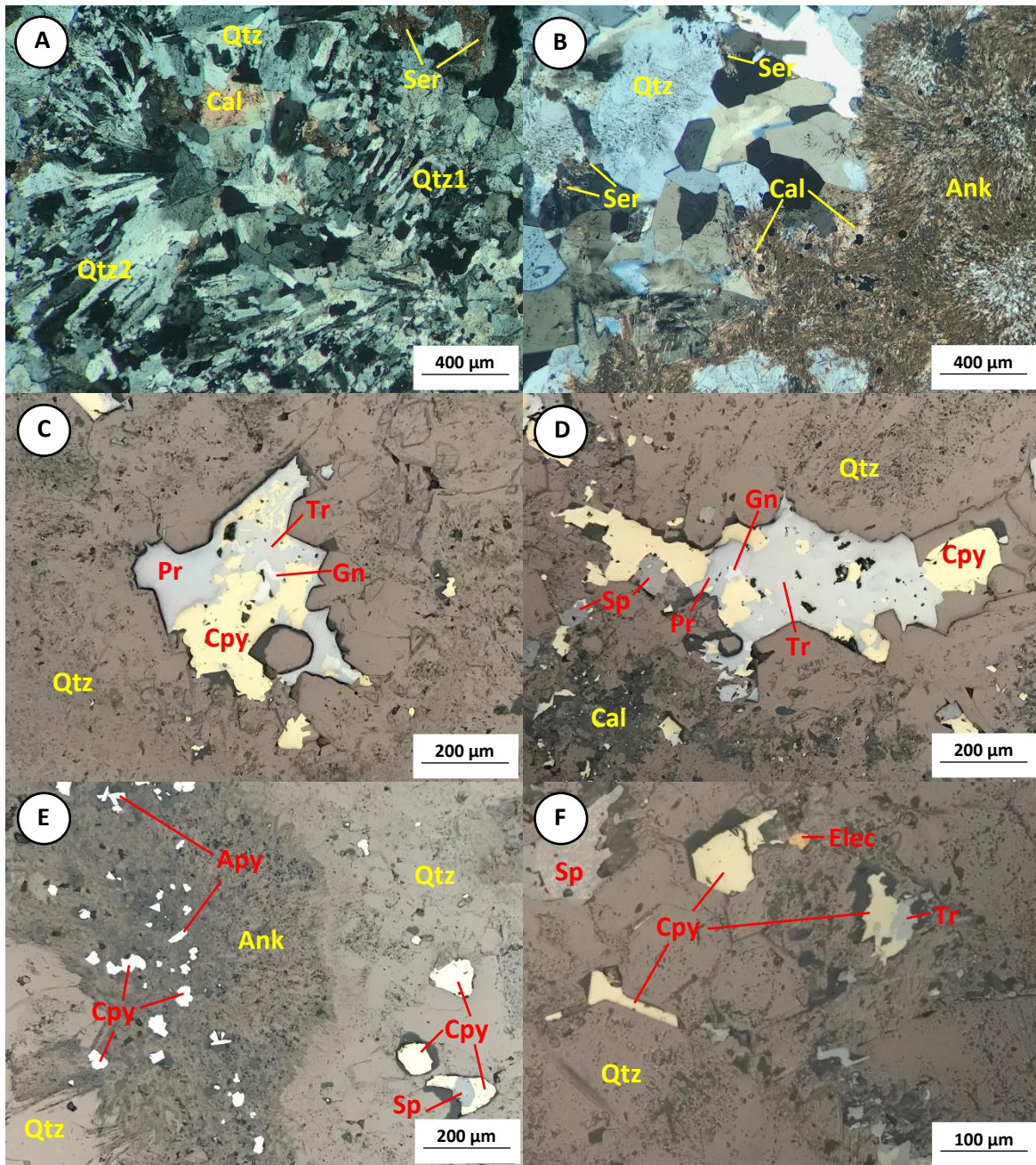


Figura 12. Fotomicrografía Veta Splay 5, Nivel 16, Etapa IV. **A)** Textura laminar paralelo (Qtz1) y pseudo acicular (Qtz2) de la recrystalización de calcita, y cristales anedrales de cuarzo (Qtz) y calcita. **B)** Asociación de cristales anedrales y subedrales de cuarzo, ankerita, calcita y sericita, y recrystalización de cuarzo formando textura plumosa. **C)** Asociación de cristales anedrales de galena, calcopirita, proustita-pirargirita y tetraedrita-tennantita, y la tetraedrita-tennantita reemplazando a la calcopirita. **D)** Tetraedrita-tennantita englobando a la calcopirita y galena, y coexistiendo con proustita-pirargirita. **E)** Cristales subedrales de calcopirita y arsenopirita inmerso dentro de la ankerita. **F)** Granos de calcopirita, *electrum* y tetraedrita-tennantita englobados por cuarzo. Abreviaturas: Ank = ankerita, Apy = arsenopirita, Cal = calcita, Cpy = calcopirita, Elec = *electrum*, Gn = galena, Pr = proustita-pirargirita, Qtz = cuarzo, Ser = sericita, Sp = esfalerita, Tr = tetraedrita-tennantita. Referencia de las abreviaturas de los minerales. Simbología incluida en la figura.

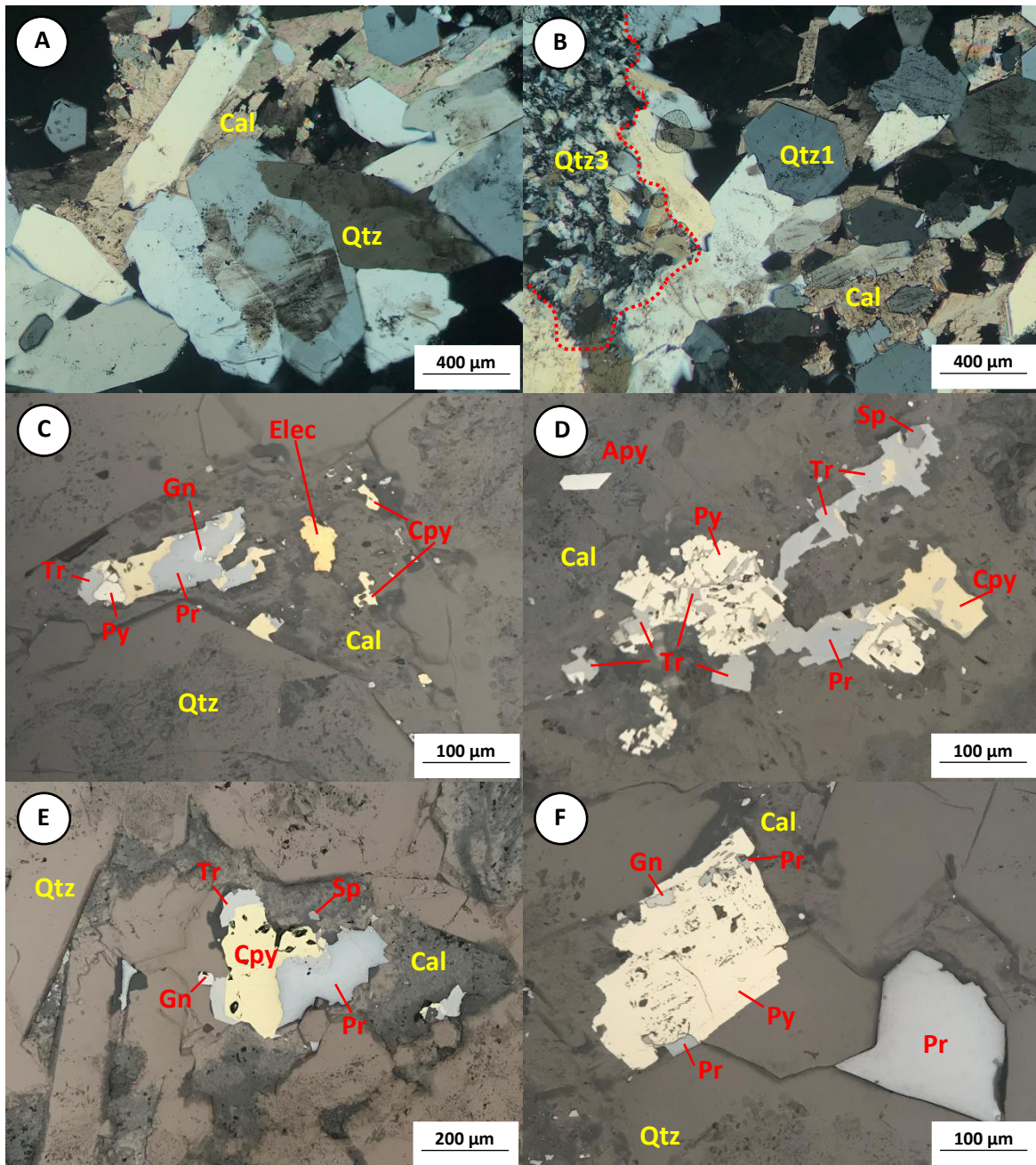


Figura 13. Fotomicrografía Veta Splay 5, Nivel 20, Etapa IV. **A)** Asociación de cristales subedrales de cuarzo y calcita y la calcita relleno los espacios de cuarzo. **B)** Cristales anedrales de calcita rellanando los espacios entre cuarzo y se observa dos variedades de granos de cuarzo: i) grano grueso (Qtz1) de 300 a 600 μm y ii) grano fino (Qtz3) de 50 a 100 μm. **C)** Asociación de cristales anedrales de proustita-pirargirita, calcopirita, *electrum*, pirita, tetraedrita-tennantita y galena en una matriz de calcita y cuarzo. **D)** Asociación de cristales anedrales de pirita, arsenopirita, calcopirita y esfalerita, y la tetraedrita-tennantita relleno los espacios entre los granos de pirita. **E)** Asociación de calcopirita, proustita-pirargirita, tetraedrita-tennantita, galena y esfalerita englobado por calcita y cuarzo. **F)** Contacto irregular y bahías entre pirita, galena y proustita-pirargirita formando textura de reabsorción. Abreviaturas: Apy = arsenopirita, Cal = calcita, Cpy = calcopirita, Elec = *electrum*, Gn = galena, Pr = proustita-pirargirita, Py = pirita, Qtz = cuarzo, Sp = esfalerita, Tr = tetraedrita-tennantita. Referencia de las abreviaturas de los minerales. Simbología incluida en la figura.

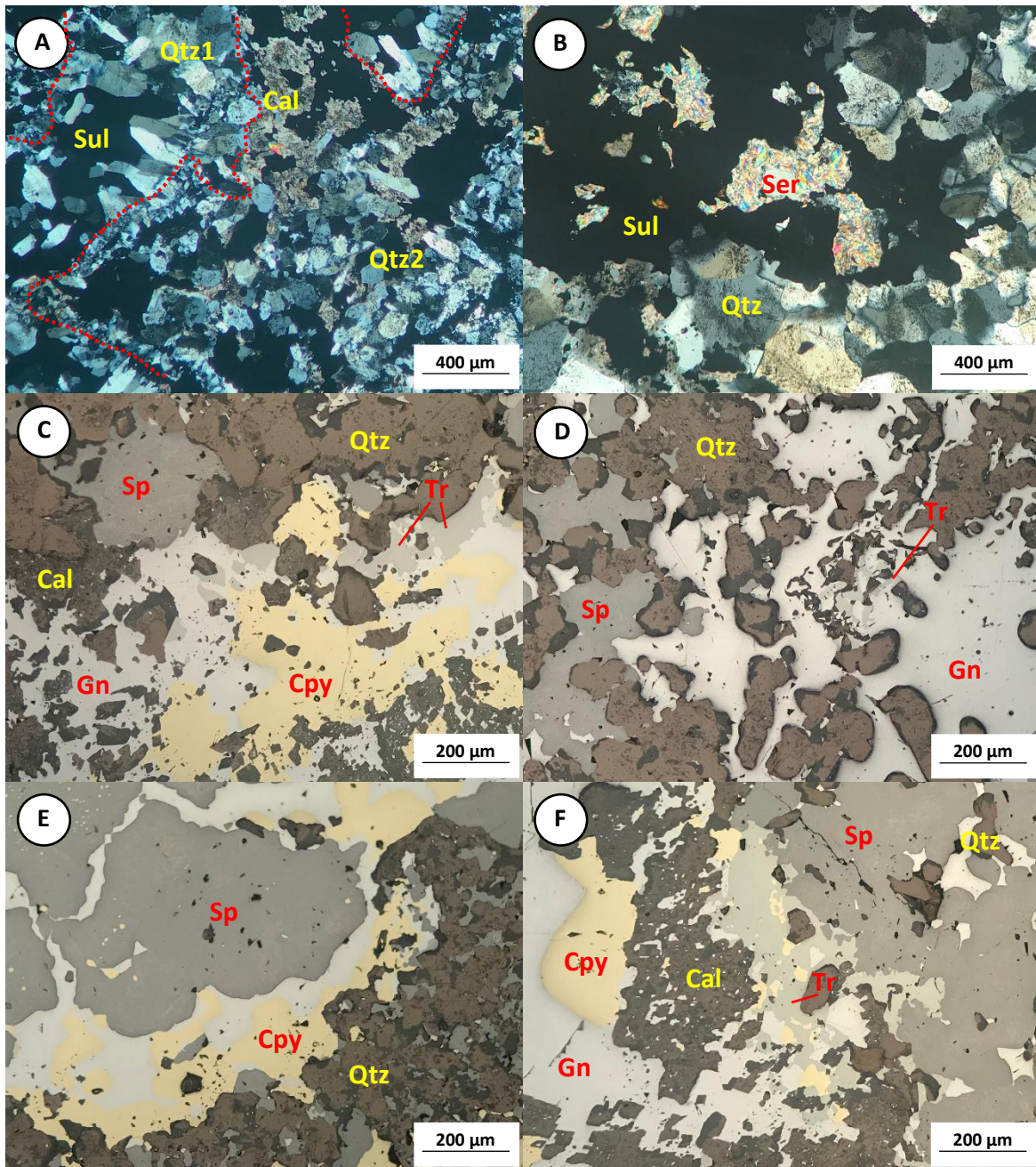


Figura 14. Fotomicrografía Veta Splay 66, Nivel 18, Etapa II. **A)** La línea discontinuos limita las etapas de cuarzo: i) primario (Qtz1) y ii) recristalizado (Qtz2), y cristales anhedrales de calcita y sulfuros. **B)** Cuarzo recristalizado formando textura plumosa, y cristales anhedrales de sericita rellanado los espacios entre cuarzo. **C)** Contacto irregular y bahías entre los cristales galena, calcopirita y tetraedrita-tennantita y cristales anhedrales de cuarzo y calcita. **D)** Galena englobando a los cristales anhedrales de tetraedrita-tennantita. **E)** Esfalerita con micro-inclusiones de calcopirita, y la galena rellanado las fracturas de esfalerita. **F)** Contacto irregular y bahías entre los cristales anhedrales de esfalerita, galena y tetraedrita-tennantita que forman textura de reemplazamiento. Abreviaturas: Cal = calcita, Cpy = calcopirita, Gn = galena, Qtz = cuarzo, Ser = sericita, Sp = esfalerita, Sul = sulfuro, Tr = tetraedrita-tennantita. Referencia de las abreviaturas de los minerales. Simbología incluida en la figura.

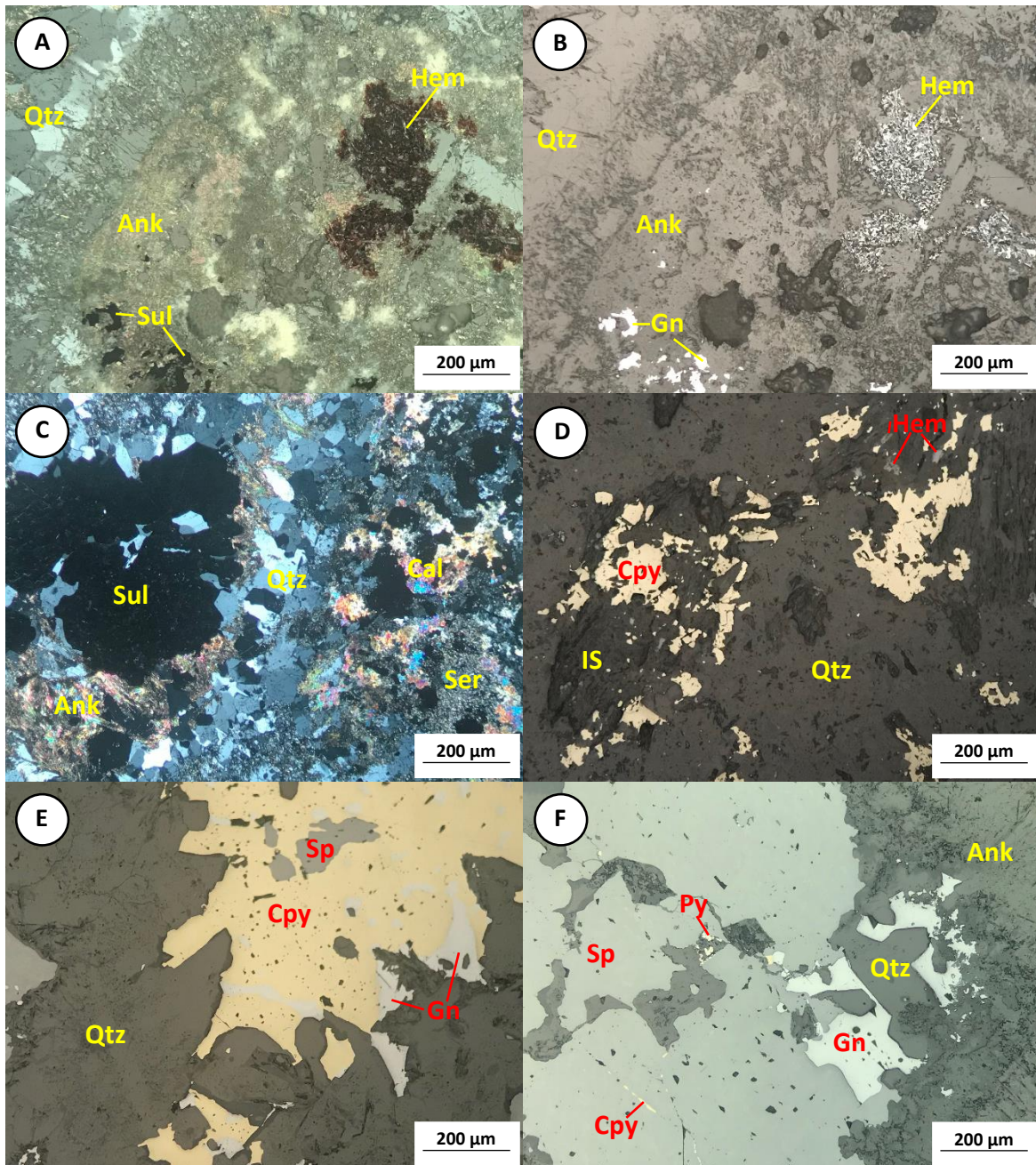


Figura 15. Fotomicrografía Veta Splay 66, Nivel 22, Etapa IIIA. **A y B)** Luz transmitida y reflejada, asociación de cristales anedrales de galena, hematita, ankerita y cuarzo, y la hematita englobado por ankerita. **C)** Asociación de cristales de cuarzo, sulfuro, calcita, ankerita y sericita. **D)** Cristales ferromagnesianos con calcopirita y hematita diseminada, y los ferromagnesianos alterados a ilita-esméctica. **E)** Contacto irregular y bahías entre los cristales de calcopirita, esfalerita y galena, y forman textura de reemplazamiento. **F)** La calcopirita y galena rellenan las fracturas de la esfalerita, y están englobados por ankerita. Abreviaturas: Ank = ankerita, Cal = calcita, Cpy = calcopirita, Gn = galena, Hem = hematita, IS = ilita-esméctica, Py = pirita, Qtz = cuarzo, Ser = sericita, Sp = esfalerita, Sul = sulfuro. Referencia de las abreviaturas de los minerales. Simbología incluida en la figura.

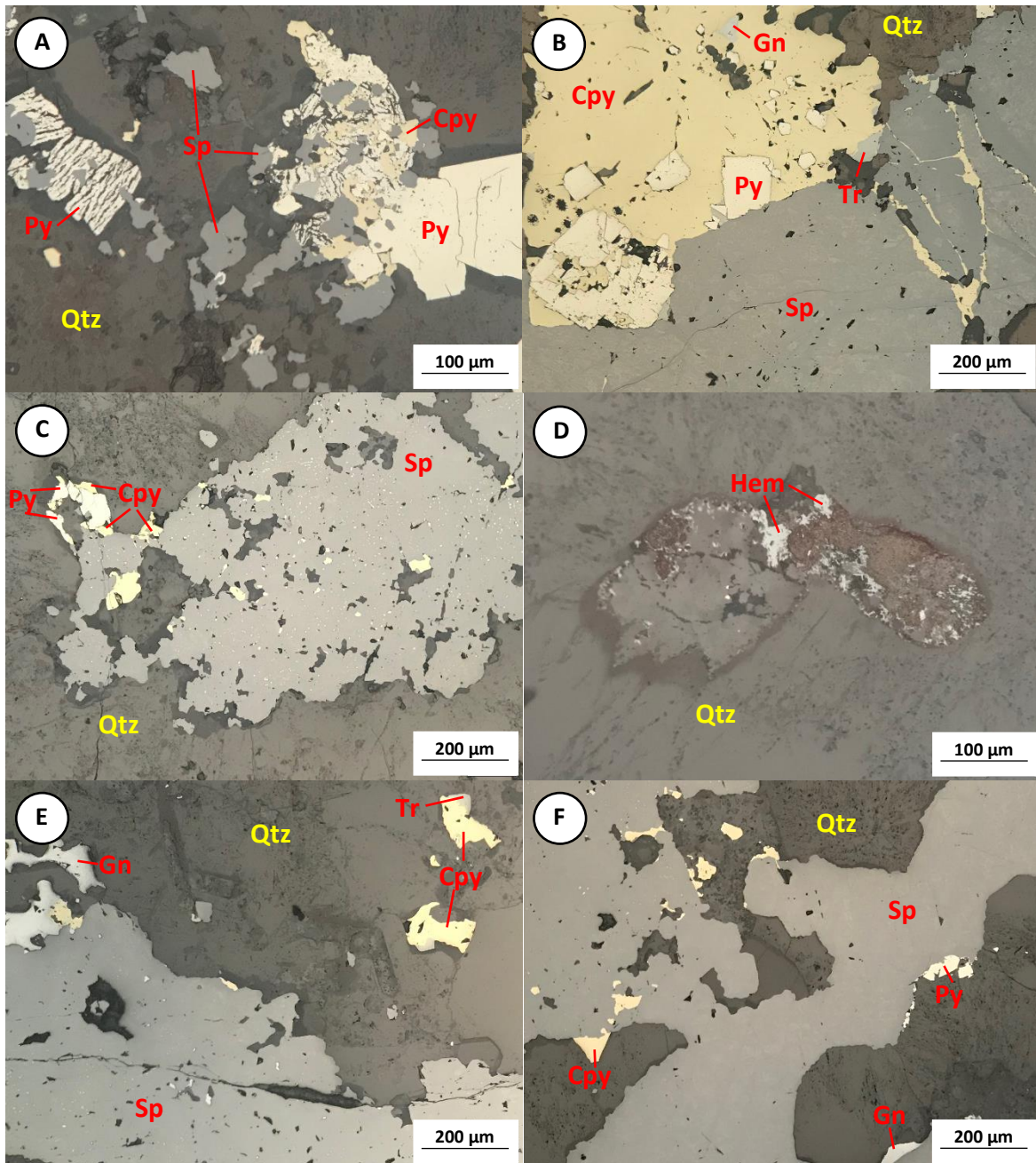


Figura 16. Fotomicrografía Veta Splay 66, Nivel 20, Etapa IIIB. **A)** La esfalerita y la calcopirita rellenan las fracturas de los granos de pirita que forman textura de reemplazamiento. **B)** Calcopirita englobando y rellanado las fracturas de pirita y esfalerita que forman texturas de reemplazamiento. **C)** La esfalerita presenta micro-inclusiones de calcopirita de forma aleatoria. **D)** Cristales anedrales de hematita englobados por cuarzo. **E)** La esfalerita presenta inclusiones microscópicas de calcopirita y el contacto irregular entre tetradrita-tennantita y calcopirita. **F)** La esfalerita de la esquina superior izquierdo presentan micro-inclusiones de calcopirita y las fracturas rellanadas por calcopirita. Abreviaturas: Cpy = calcopirita, Gn = galena, Hem = hematita, Py = pirita, Qtz = cuarzo, Sp = esfalerita, Tr = tetradrita-tennantita. Referencia de las abreviaturas de los minerales. Simbología incluida en la figura.

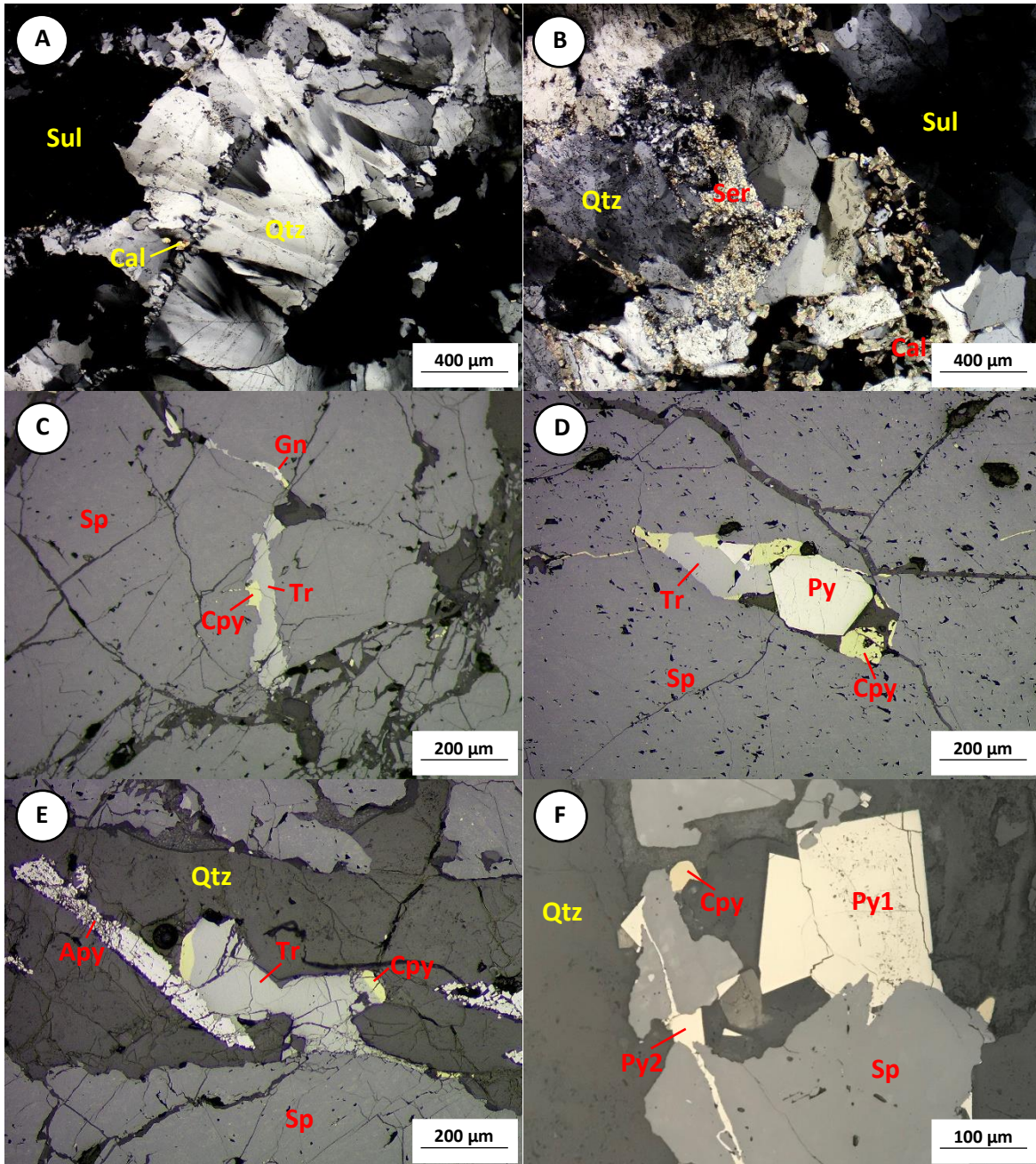


Figura 17. Fotomicrografía Veta Splay 66, Nivel 17.5, Etapa IIIC. **A)** Granos de cuarzo recrystalizado formando textura flameado y la calcita relleno las fracturas y espacios de cuarzo. **B)** Asociación de cristales anedrales de cuarzo, calcita, sulfuros y sericita, los cuarzos de la izquierda superior ligeramente recrystalizado. **C)** La calcopirita, tetraedrita-tennantita y galena relleno las fracturas de esfalerita. **D)** Los cristales calcopirita, pirita y tetraedrita-tennantita relleno las fracturas de esfalerita. **E)** Los cristales tetraedrita-tennantita, arsenopirita, calcopirita y cuarzo relleno las fracturas de esfalerita, y el contacto irregular entre tetraedrita-tennantita y arsenopirita. **F)** Se observa dos variedades de pirita: i) cristal subedral de pirita (Py1) y ii) cristal anedral de pirita (Py2) relleno las fracturas de esfalerita. Abreviaturas: Apy = arsenopirita, Cal = calcita, Cpy = calcopirita, Gn = galena, Py = pirita, Qtz = cuarzo, Ser = sericita, Sp = esfalerita, Sul = sulfuro, Tr = tetraedrita-tennantita. Referencia de las abreviaturas de los minerales. Simbología incluida en la figura.

ANEXO C

Análisis de microsonda electrónica

Arsenopirita

Muestra	Etap	Veta	Nivel	Fe %	As %	Sb %	S %	Se %	Te %	Total	#Fe	#As	#Sb	#S	#Se	#Te
EA099	1	Splay 5	12	35.85	42.94	0.00	21.74	0.00	0.01	100.56	1.00	0.93	0.00	1.10	0.00	0.00
EA099	1	Splay 5	12	35.65	42.22	0.00	22.06	0.00	0.00	99.92	1.00	0.90	0.00	1.10	0.00	0.00
EA099	1	Splay 5	12	36.04	41.60	0.00	22.22	0.00	0.00	99.86	1.00	0.88	0.00	1.10	0.00	0.00
EA099	1	Splay 5	12	35.99	42.16	0.00	22.04	0.00	0.00	100.19	1.00	0.90	0.00	1.10	0.00	0.00
EA099	1	Splay 5	12	36.01	42.58	0.00	21.82	0.00	0.00	100.41	1.00	0.92	0.00	1.10	0.00	0.00
EA099	1	Splay 5	12	36.18	41.51	0.00	22.42	0.00	0.00	100.10	1.00	0.87	0.00	1.10	0.00	0.00
EA099	1	Splay 5	12	36.55	41.05	0.00	22.88	0.00	0.00	100.48	1.00	0.84	0.00	1.10	0.00	0.00
EA099	1	Splay 5	12	36.68	39.97	0.00	23.89	0.00	0.04	100.57	1.00	0.79	0.00	1.10	0.00	0.00
EA099	1	Splay 5	12	36.46	40.68	0.58	22.74	0.08	0.00	100.53	1.00	0.84	0.01	1.10	0.00	0.00
EA099	1	Splay 5	12	36.12	41.09	0.00	22.73	0.00	0.01	99.95	1.00	0.85	0.00	1.10	0.00	0.00
Promedio				36.15	41.58	0.06	22.45	0.01	0.01	100.26		0.87	0.00	1.10	0.00	0.00
EA099	3B	Splay 5	12	34.91	45.21	0.00	20.29	0.22	0.05	100.68	1.00	0.95	0.00	1.00	0.00	0.00
EA099	3B	Splay 5	12	34.94	44.45	0.04	20.54	0.20	0.00	100.16	1.00	0.92	0.00	1.00	0.00	0.00
EA099	3B	Splay 5	12	35.15	44.06	0.02	20.89	0.17	0.03	100.32	1.00	0.90	0.00	1.00	0.00	0.00
Promedio				35.00	44.57	0.02	20.57	0.20	0.03	100.39		0.92	0.00	1.00	0.00	0.00
EA032	4	Splay 5	12	35.15	42.03	0.81	21.63	0.22	0.00	99.84	1.00	0.91	0.01	1.10	0.00	0.00
EA032	4	Splay 5	12	34.07	45.27	0.44	19.27	0.19	0.02	99.26	1.00	1.00	0.01	1.00	0.00	0.00
EA032	4	Splay 5	12	34.39	42.38	0.84	20.57	0.12	0.02	98.33	1.00	0.88	0.01	1.00	0.00	0.00
EA032	4	Splay 5	12	33.78	44.85	0.59	19.16	0.20	0.03	98.61	1.00	1.00	0.01	1.00	0.00	0.00
EA032	4	Splay 5	12	33.67	45.03	0.32	19.82	0.22	0.00	99.07	1.00	0.97	0.00	1.00	0.00	0.00
EA032	4	Splay 5	12	35.67	41.96	0.67	22.13	0.17	0.00	100.60	1.00	0.89	0.01	1.10	0.00	0.00
EA032	4	Splay 5	12	35.19	43.71	0.65	20.89	0.19	0.00	100.64	1.00	0.89	0.01	1.00	0.00	0.00
EA032	4	Splay 5	12	35.62	42.21	0.92	21.91	0.19	0.00	100.84	1.00	0.90	0.01	1.10	0.00	0.00
EA032	4	Splay 5	12	35.26	41.76	1.37	22.04	0.19	0.01	100.62	1.00	0.89	0.02	1.10	0.00	0.00
EA032	4	Splay 5	12	34.60	44.30	1.11	20.15	0.22	0.02	100.40	1.00	0.94	0.01	1.00	0.00	0.00
Promedio				34.74	43.35	0.77	20.76	0.19	0.01	99.82		0.93	0.01	1.04	0.00	0.00

Electrum

Muestra	Etap	Veta	Nivel	Cu %	Ag %	Au %	Bi %	Te %	Total	#Cu	#Ag	#Au	#Bi	#Te
EA032	II	Splay 5	12	1.16	62.64	36.48	0.05	0.00	100.33	0.02	0.74	0.24	0.00	0.00
EA032	II	Splay 5	12	0.03	39.47	60.70	0.00	0.00	100.20	0.00	0.54	0.46	0.00	0.00
EA032	II	Splay 5	12	0.04	63.21	35.41	0.01	0.00	98.67	0.00	0.76	0.23	0.00	0.00
EA032	II	Splay 5	12	0.00	64.09	34.93	0.00	0.00	99.02	0.00	0.77	0.23	0.00	0.00
EA032	II	Splay 5	12	0.40	66.09	33.69	0.00	0.00	100.18	0.01	0.78	0.22	0.00	0.00
Promedio				0.33	59.10	40.24	0.01	0.00	99.68	0.01	0.72	0.27	0.00	0.00
EA062	IIIC	Splay 5	14	0.09	35.98	63.57	0.00	0.00	99.64	0.00	0.51	0.49	0.00	0.00
EA062	IIIC	Splay 5	14	0.02	35.41	63.95	0.00	0.00	99.39	0.00	0.50	0.50	0.00	0.00
Promedio				0.06	35.70	63.76	0.00	0.00	99.51	0.00	0.50	0.49	0.00	0.00
EA097	IV	Splay 5	20	0.05	45.46	55.60	0.00	0.00	101.12	0.00	0.60	0.40	0.00	0.00
EA097	IV	Splay 5	20	0.04	46.24	54.89	0.11	0.00	101.29	0.00	0.61	0.39	0.00	0.00
Promedio				0.05	45.85	55.25	0.06	0.00	101.20	0.00	0.60	0.40	0.00	0.00

Esfalerita

Muestra	Etap	Veta	Nivel	Cu %	Fe %	Zn %	Ga %	Ge %	Cd %	S %	Total	#Cu	#Fe	#Zn	#Ga	#Ge	#Cd	#S
EA032	II	Splay 5	12	0.28	0.66	66.47	0.00	0.00	0.60	32.51	100.51	0.00	0.01	1.00	0.00	0.00	0.01	1.00
EA032	II	Splay 5	12	0.00	0.47	66.79	0.00	0.00	0.62	32.35	100.23	0.00	0.01	1.01	0.00	0.00	0.01	1.00
EA032	II	Splay 5	12	0.15	0.74	65.72	0.00	0.00	0.62	32.37	99.61	0.00	0.01	1.00	0.00	0.00	0.01	1.00
EA032	II	Splay 5	12	0.04	0.44	66.70	0.00	0.00	0.61	32.21	100.00	0.00	0.01	1.02	0.00	0.00	0.01	1.00
EA032	II	Splay 5	12	0.00	0.46	65.97	0.01	0.00	0.66	32.17	99.27	0.00	0.01	1.01	0.00	0.00	0.01	1.00
EA032	II	Splay 5	12	0.00	0.51	66.76	0.01	0.00	0.67	31.92	99.88	0.00	0.01	1.03	0.00	0.00	0.01	1.00
EA032	II	Splay 5	12	0.00	0.41	66.57	0.00	0.00	0.59	32.04	99.62	0.00	0.01	1.02	0.00	0.00	0.01	1.00
EA032	II	Splay 5	12	0.02	0.45	66.35	0.00	0.00	0.58	32.05	99.45	0.00	0.01	1.02	0.00	0.00	0.01	1.00
EA032	II	Splay 5	12	0.00	0.46	66.00	0.01	0.00	0.64	31.93	99.05	0.00	0.01	1.01	0.00	0.00	0.01	1.00
EA032	II	Splay 5	12	0.00	0.55	66.13	0.03	0.00	0.55	31.97	99.23	0.00	0.01	1.01	0.00	0.00	0.00	1.00
EA032	II	Splay 5	12	0.00	0.47	65.74	0.00	0.00	0.64	32.27	99.13	0.00	0.01	1.00	0.00	0.00	0.01	1.00
Promedio				0.05	0.51	66.29	0.01	0.00	0.62	32.16	99.63	0.00	0.01	1.01	0.00	0.00	0.01	

Esfalerita

Muestra	Etapa	Veta	Nivel	Cu %	Fe %	Zn %	Ga %	Ge %	Cd %	S %	Total	#Cu	#Fe	#Zn	#Ga	#Ge	#Cd	#S
EA099	IIIB	Splay 5	12	0.02	0.48	66.96	0.00	0.00	0.61	32.53	100.60	0.00	0.01	1.01	0.00	0.00	0.01	1.00
EA099	IIIB	Splay 5	12	0.08	0.51	65.52	0.00	0.00	0.63	32.44	99.17	0.00	0.01	0.99	0.00	0.00	0.01	1.00
EA099	IIIB	Splay 5	12	0.15	0.69	66.12	0.00	0.00	0.65	32.81	100.41	0.00	0.01	0.99	0.00	0.00	0.01	1.00
EA099	IIIB	Splay 5	12	0.04	0.41	66.38	0.01	0.00	0.66	32.78	100.28	0.00	0.01	0.99	0.00	0.00	0.01	1.00
EA099	IIIB	Splay 5	12	0.19	0.68	65.78	0.00	0.00	0.69	32.43	99.78	0.00	0.01	0.99	0.00	0.00	0.01	1.00
EA099	IIIB	Splay 5	12	0.01	0.43	66.13	0.00	0.00	0.73	32.54	99.84	0.00	0.01	1.00	0.00	0.00	0.01	1.00
EA099	IIIB	Splay 5	12	0.00	0.44	66.10	0.00	0.00	0.73	32.55	99.81	0.00	0.01	1.00	0.00	0.00	0.01	1.00
EA099	IIIB	Splay 5	12	0.00	0.47	65.68	0.00	0.00	0.74	32.34	99.23	0.00	0.01	1.00	0.00	0.00	0.01	1.00
EA099	IIIB	Splay 5	12	0.02	0.46	66.30	0.00	0.00	0.72	32.69	100.19	0.00	0.01	0.99	0.00	0.00	0.01	1.00
Promedio				0.06	0.51	66.11	0.00	0.00	0.68	32.57	99.92	0.00	0.01	1.00	0.00	0.00	0.01	
EA062	IIIC	Splay 5	14	0.01	0.36	66.19	0.00	0.00	0.57	32.79	99.92	0.00	0.01	0.99	0.00	0.00	0.00	1.00
EA062	IIIC	Splay 5	14	0.00	0.44	66.04	0.03	0.00	0.58	32.47	99.56	0.00	0.01	1.00	0.00	0.00	0.01	1.00
EA062	IIIC	Splay 5	14	0.00	0.62	65.85	0.01	0.00	0.62	32.47	99.57	0.00	0.01	0.99	0.00	0.00	0.01	1.00
EA062	IIIC	Splay 5	14	0.00	0.51	69.79	0.00	0.00	0.54	30.43	101.27	0.00	0.01	1.12	0.00	0.00	0.01	1.00
EA062	IIIC	Splay 5	14	0.00	0.52	65.84	0.00	0.00	0.60	32.61	99.57	0.00	0.01	0.99	0.00	0.00	0.01	1.00
EA062	IIIC	Splay 5	14	0.01	0.42	66.31	0.03	0.00	0.00	32.65	99.42	0.00	0.01	1.00	0.00	0.00	0.00	1.00
EA062	IIIC	Splay 5	14	0.05	0.46	66.55	0.00	0.00	0.00	32.39	99.46	0.00	0.01	1.01	0.00	0.00	0.00	1.00
EA062	IIIC	Splay 5	14	0.00	0.48	67.06	0.00	0.00	0.03	32.28	99.84	0.00	0.01	1.02	0.00	0.00	0.00	1.00
EA062	IIIC	Splay 5	14	0.00	0.44	66.55	0.00	0.00	0.19	32.51	99.69	0.00	0.01	1.00	0.00	0.00	0.00	1.00
EA062	IIIC	Splay 5	14	0.04	0.49	66.34	0.00	0.00	0.37	32.41	99.64	0.00	0.01	1.00	0.00	0.00	0.00	1.00
EA062	IIIC	Splay 5	14	0.06	0.44	66.78	0.00	0.00	0.48	32.47	100.24	0.00	0.01	1.01	0.00	0.00	0.00	1.00
EA062	IIIC	Splay 5	14	0.00	0.42	66.56	0.01	0.00	0.58	32.43	100.00	0.00	0.01	1.01	0.00	0.00	0.01	1.00
EA062	IIIC	Splay 5	14	0.02	0.36	66.41	0.05	0.00	0.51	32.36	99.72	0.00	0.01	1.01	0.00	0.00	0.00	1.00
EA062	IIIC	Splay 5	14	0.00	0.42	66.93	0.00	0.00	0.47	32.39	100.21	0.00	0.01	1.01	0.00	0.00	0.00	1.00
EA062	IIIC	Splay 5	14	0.05	0.47	66.88	0.03	0.00	0.57	32.33	100.33	0.00	0.01	1.01	0.00	0.00	0.01	1.00
Promedio				0.02	0.46	66.67	0.01	0.00	0.41	32.33	99.90	0.00	0.01	1.01	0.00	0.00	0.00	
EA-11	IIIC	Splay 5	16	0.00	0.32	66.31	0.00	0.00	0.51	32.61	99.75	0.00	0.01	1.00	0.00	0.00	0.00	1.00
EA-11	IIIC	Splay 5	16	0.00	0.30	66.64	0.00	0.00	0.49	32.25	99.69	0.00	0.01	1.01	0.00	0.00	0.00	1.00
EA-11	IIIC	Splay 5	16	0.02	0.28	66.48	0.03	0.00	0.49	32.65	99.95	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	1.00

Esfalerita

Muestra	Etapa	Veta	Nivel	Cu %	Fe %	Zn %	Ga %	Ge %	Cd %	S %	Total	#Cu	#Fe	#Zn	#Ga	#Ge	#Cd	#S
EA-11	IIIC	Splay 5	16	0.00	0.26	66.66	0.01	0.00	0.48	32.47	99.88	0.00	0.00	1.01	0.00	0.00	0.00	1.00
EA-11	IIIC	Splay 5	16	0.00	0.27	66.30	0.05	0.00	0.50	32.42	99.55	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	1.00
EA-11	IIIC	Splay 5	16	0.01	0.29	66.62	0.00	0.00	0.52	32.49	99.94	0.00	0.01	1.01	0.00	0.00	0.00	1.00
EA-11	IIIC	Splay 5	16	0.00	0.33	66.54	0.00	0.00	0.54	32.61	100.02	0.00	0.01	1.00	0.00	0.00	0.00	1.00
EA-11	IIIC	Splay 5	16	0.09	0.35	66.33	0.00	0.00	0.46	32.35	99.57	0.00	0.01	1.01	0.00	0.00	0.00	1.00
EA-11	IIIC	Splay 5	16	0.03	0.35	66.68	0.00	0.00	0.50	32.53	100.09	0.00	0.01	1.01	0.00	0.00	0.00	1.00
EA-11	IIIC	Splay 5	16	0.03	0.33	66.42	0.00	0.00	0.50	32.45	99.72	0.00	0.01	1.00	0.00	0.00	0.00	1.00
EA-11	IIIC	Splay 5	16	0.00	0.26	66.27	0.00	0.00	0.58	32.34	99.45	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.01	1.00
EA-11	IIIC	Splay 5	16	0.05	0.31	65.44	0.03	0.00	0.47	32.34	98.64	0.00	0.01	0.99	0.00	0.00	0.00	1.00
EA-11	IIIC	Splay 5	16	0.13	0.54	65.78	0.00	0.00	0.28	32.28	99.01	0.00	0.01	1.00	0.00	0.00	0.00	1.00
Promedio				0.03	0.32	66.34	0.01	0.00	0.49	32.45	99.64	0.00	0.01	1.00	0.00	0.00	0.00	
EA097	IIIC	Splay 5	20	0.02	0.13	66.03	0.00	0.00	0.59	31.99	98.76	0.00	0.00	1.01	0.00	0.00	0.01	1.00
EA097	IIIC	Splay 5	20	0.07	0.17	66.52	0.00	0.00	0.59	32.07	99.42	0.00	0.00	1.02	0.00	0.00	0.01	1.00
EA097	IIIC	Splay 5	20	0.00	0.13	66.73	0.02	0.00	0.61	31.66	99.15	0.00	0.00	1.03	0.00	0.00	0.01	1.00
EA097	IIIC	Splay 5	20	0.03	0.18	66.46	0.00	0.00	0.64	31.98	99.29	0.00	0.00	1.02	0.00	0.00	0.01	1.00
EA097	IIIC	Splay 5	20	0.00	0.16	66.44	0.00	0.00	0.55	32.17	99.33	0.00	0.00	1.01	0.00	0.00	0.00	1.00
EA097	IIIC	Splay 5	20	0.02	0.17	66.58	0.00	0.00	0.54	32.21	99.52	0.00	0.00	1.01	0.00	0.00	0.00	1.00
EA097	IIIC	Splay 5	20	0.00	0.11	66.86	0.00	0.00	0.68	32.20	99.85	0.00	0.00	1.02	0.00	0.00	0.01	1.00
EA097	IIIC	Splay 5	20	0.02	0.16	66.69	0.00	0.00	0.57	32.34	99.78	0.00	0.00	1.01	0.00	0.00	0.01	1.00
EA097	IIIC	Splay 5	20	0.08	0.22	66.77	0.00	0.00	0.59	32.51	100.17	0.00	0.00	1.01	0.00	0.00	0.01	1.00
EA097	IIIC	Splay 5	20	0.01	0.17	66.44	0.00	0.00	0.58	32.45	99.65	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.01	1.00
EA097	IIIC	Splay 5	20	0.02	0.15	66.70	0.00	0.00	0.56	32.87	100.31	0.00	0.00	0.99	0.00	0.00	0.00	1.00
EA097	IIIC	Splay 5	20	0.04	0.16	66.82	0.00	0.00	0.67	32.61	100.30	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.01	1.00
EA097	IIIC	Splay 5	20	0.14	0.18	66.66	0.00	0.00	0.68	32.15	99.80	0.00	0.00	1.02	0.00	0.00	0.01	1.00
EA097	IIIC	Splay 5	20	0.00	0.12	66.83	0.00	0.00	0.63	32.62	100.20	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.01	1.00
EA097	IIIC	Splay 5	20	0.07	0.12	67.11	0.03	0.00	0.58	32.65	100.57	0.00	0.00	1.01	0.00	0.00	0.01	1.00
EA097	IIIC	Splay 5	20	0.05	0.12	67.19	0.00	0.00	0.54	32.66	100.56	0.00	0.00	1.01	0.00	0.00	0.00	1.00
EA097	IIIC	Splay 5	20	0.06	0.12	66.88	0.00	0.00	0.63	32.50	100.18	0.00	0.00	1.01	0.00	0.00	0.01	1.00
EA097	IIIC	Splay 5	20	0.01	0.10	66.76	0.00	0.00	0.57	32.53	99.96	0.00	0.00	1.01	0.00	0.00	0.00	1.00
EA097	IIIC	Splay 5	20	0.04	0.17	66.78	0.00	0.00	0.60	32.33	99.92	0.00	0.00	1.01	0.00	0.00	0.01	1.00

Esfalerita

Muestra	Etap	Veta	Nivel	Cu %	Fe %	Zn %	Ga %	Ge %	Cd %	S %	Total	#Cu	#Fe	#Zn	#Ga	#Ge	#Cd	#S
EA097	IIIC	Splay 5	20	0.03	0.42	66.41	0.00	0.00	0.55	32.35	99.77	0.00	0.01	1.01	0.00	0.00	0.00	1.00
Promedio				0.04	0.16	66.68	0.00	0.00	0.60	32.34	99.82	0.00	0.00	1.01	0.00	0.00	0.01	
EA032	IV	Splay 5	12	0.01	0.39	65.35	0.00	0.00	1.22	32.27	99.24	0.00	0.01	0.99	0.00	0.00	0.01	1.00
EA032	IV	Splay 5	12	0.00	0.34	66.08	0.00	0.00	0.63	32.64	99.69	0.00	0.01	0.99	0.00	0.00	0.01	1.00
Promedio				0.00	0.37	65.72	0.00	0.00	0.92	32.46	99.46	0.00	0.01	0.99	0.00	0.00	0.01	
EA-11	IV	Splay 5	16	0.01	0.29	66.35	0.00	0.00	0.63	32.45	99.74	0.00	0.01	1.00	0.00	0.00	0.01	1.00
EA-11	IV	Splay 5	16	0.02	0.41	65.83	0.02	0.00	0.56	32.60	99.45	0.00	0.01	0.99	0.00	0.00	0.00	1.00
EA-11	IV	Splay 5	16	0.04	0.34	66.92	0.00	0.00	0.63	32.37	100.30	0.00	0.01	1.01	0.00	0.00	0.01	1.00
EA-11	IV	Splay 5	16	0.00	0.40	66.30	0.00	0.00	0.64	32.33	99.67	0.00	0.01	1.01	0.00	0.00	0.01	1.00
EA-11	IV	Splay 5	16	0.05	0.27	66.45	0.00	0.00	0.57	32.92	100.26	0.00	0.00	0.99	0.00	0.00	0.00	1.00
Promedio				0.02	0.34	66.37	0.00	0.00	0.61	32.53	99.88	0.00	0.01	1.00	0.00	0.00	0.01	
EA104	II	Splay 66	18	0.24	0.31	66.09	0.04	0.00	0.68	32.60	99.96	0.00	0.01	0.99	0.00	0.00	0.01	1.00
EA104	II	Splay 66	18	0.01	0.09	66.72	0.00	0.00	0.59	32.43	99.83	0.00	0.00	1.01	0.00	0.00	0.01	1.00
EA104	II	Splay 66	18	0.07	0.08	66.85	0.01	0.00	0.65	32.51	100.17	0.00	0.00	1.01	0.00	0.00	0.01	1.00
EA104	II	Splay 66	18	0.00	0.07	67.05	0.00	0.00	0.68	32.55	100.35	0.00	0.00	1.01	0.00	0.00	0.01	1.00
EA104	II	Splay 66	18	0.02	0.07	66.75	0.05	0.00	0.66	32.57	100.13	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.01	1.00
EA104	II	Splay 66	18	0.09	0.17	67.07	0.00	0.00	0.57	32.61	100.51	0.00	0.00	1.01	0.00	0.00	0.00	1.00
Promedio				0.07	0.13	66.76	0.02	0.00	0.64	32.54	100.16	0.00	0.00	1.01	0.00	0.00	0.01	
EA-01	IIIB	Splay 66	20	0.02	1.11	66.11	0.01	0.00	0.42	32.52	100.19	0.00	0.02	1.00	0.00	0.00	0.00	1.00
EA-01	IIIB	Splay 66	20	0.06	1.12	65.71	0.06	0.00	0.50	32.58	100.03	0.00	0.02	0.99	0.00	0.00	0.00	1.00
EA-01	IIIB	Splay 66	20	0.00	0.99	66.14	0.00	0.00	0.42	32.41	99.96	0.00	0.02	1.00	0.00	0.00	0.00	1.00
EA-01	IIIB	Splay 66	20	0.04	0.97	66.11	0.00	0.00	0.39	32.64	100.15	0.00	0.02	0.99	0.00	0.00	0.00	1.00
EA-01	IIIB	Splay 66	20	0.00	1.02	66.25	0.00	0.00	0.42	32.91	100.60	0.00	0.02	0.99	0.00	0.00	0.00	1.00
EA-01	IIIB	Splay 66	20	0.01	1.13	65.92	0.00	0.00	0.46	33.03	100.55	0.00	0.02	0.98	0.00	0.00	0.00	1.00
EA-01	IIIB	Splay 66	20	0.00	1.14	65.90	0.00	0.00	0.45	32.63	100.12	0.00	0.02	0.99	0.00	0.00	0.00	1.00
EA-01	IIIB	Splay 66	20	0.03	1.13	65.50	0.00	0.00	0.46	32.88	100.00	0.00	0.02	0.98	0.00	0.00	0.00	1.00
EA-01	IIIB	Splay 66	20	0.00	1.19	65.64	0.05	0.00	0.46	33.03	100.36	0.00	0.02	0.97	0.00	0.00	0.00	1.00

Esfalerita

Muestra	Etapa	Veta	Nivel	Cu %	Fe %	Zn %	Ga %	Ge %	Cd %	S %	Total	#Cu	#Fe	#Zn	#Ga	#Ge	#Cd	#S
EA-01	IIIB	Splay 66	20	0.00	1.08	66.07	0.00	0.00	0.38	32.81	100.33	0.00	0.02	0.99	0.00	0.00	0.00	1.00
EA-01	IIIB	Splay 66	20	0.00	1.51	65.30	0.03	0.00	0.44	32.71	99.99	0.00	0.03	0.98	0.00	0.00	0.00	1.00
EA-01	IIIB	Splay 66	20	0.00	1.61	65.39	0.00	0.00	0.42	32.65	100.08	0.00	0.03	0.98	0.00	0.00	0.00	1.00
EA-01	IIIB	Splay 66	20	0.00	1.67	65.09	0.01	0.00	0.48	32.92	100.16	0.00	0.03	0.97	0.00	0.00	0.00	1.00
EA-01	IIIB	Splay 66	20	0.00	1.67	65.16	0.01	0.00	0.45	33.06	100.35	0.00	0.03	0.97	0.00	0.00	0.00	1.00
EA-01	IIIB	Splay 66	20	0.04	1.63	65.30	0.00	0.00	0.47	31.79	99.24	0.00	0.03	1.01	0.00	0.00	0.00	1.00
EA-01	IIIB	Splay 66	20	0.00	1.67	65.33	0.00	0.00	0.43	32.86	100.30	0.00	0.03	0.97	0.00	0.00	0.00	1.00
EA-01	IIIB	Splay 66	20	0.02	1.60	65.41	0.00	0.00	0.47	32.98	100.48	0.00	0.03	0.97	0.00	0.00	0.00	1.00
EA-01	IIIB	Splay 66	20	0.03	1.62	65.41	0.06	0.00	0.45	33.00	100.58	0.00	0.03	0.97	0.00	0.00	0.00	1.00
EA-01	IIIB	Splay 66	20	0.00	1.53	65.25	0.00	0.00	0.43	32.82	100.04	0.00	0.03	0.97	0.00	0.00	0.00	1.00
EA-01	IIIB	Splay 66	20	0.00	1.34	65.53	0.00	0.00	0.42	32.53	99.83	0.00	0.02	0.99	0.00	0.00	0.00	1.00
EA-01	IIIB	Splay 66	20	0.23	1.22	65.94	0.00	0.00	0.49	32.59	100.47	0.00	0.02	0.99	0.00	0.00	0.00	1.00
EA-01	IIIB	Splay 66	20	0.13	1.17	65.25	0.00	0.00	0.42	32.72	99.70	0.00	0.02	0.98	0.00	0.00	0.00	1.00
EA-01	IIIB	Splay 66	20	0.11	1.19	66.29	0.00	0.00	0.49	32.50	100.59	0.00	0.02	1.00	0.00	0.00	0.00	1.00
EA-01	IIIB	Splay 66	20	0.01	1.01	66.13	0.00	0.00	0.42	32.50	100.07	0.00	0.02	1.00	0.00	0.00	0.00	1.00
EA-01	IIIB	Splay 66	20	0.05	1.07	65.00	0.00	0.00	0.42	32.13	98.67	0.00	0.02	0.99	0.00	0.00	0.00	1.00
Promedio				0.03	1.30	65.65	0.01	0.00	0.44	32.69	100.11	0.00	0.02	0.98	0.00	0.00	0.00	
EA089	IIIB	Splay 66	20	0.02	1.08	65.46	0.00	0.00	0.41	32.92	99.90	0.00	0.02	0.97	0.00	0.00	0.00	1.00
EA089	IIIB	Splay 66	20	0.06	1.20	65.24	0.00	0.00	0.48	32.68	99.66	0.00	0.02	0.98	0.00	0.00	0.00	1.00
EA089	IIIB	Splay 66	20	0.02	1.13	65.74	0.00	0.00	0.38	32.77	100.03	0.00	0.02	0.98	0.00	0.00	0.00	1.00
EA089	IIIB	Splay 66	20	0.00	1.09	66.04	0.00	0.00	0.39	32.50	100.03	0.00	0.02	1.00	0.00	0.00	0.00	1.00
EA089	IIIB	Splay 66	20	0.00	1.29	65.06	0.00	0.00	0.35	32.33	99.03	0.00	0.02	0.99	0.00	0.00	0.00	1.00
EA089	IIIB	Splay 66	20	0.01	0.97	66.44	0.00	0.00	0.47	32.51	100.39	0.00	0.02	1.00	0.00	0.00	0.00	1.00
EA089	IIIB	Splay 66	20	0.04	1.00	66.20	0.00	0.00	0.47	32.54	100.25	0.00	0.02	1.00	0.00	0.00	0.00	1.00
EA089	IIIB	Splay 66	20	0.04	0.84	66.69	0.02	0.00	0.49	32.57	100.64	0.00	0.01	1.00	0.00	0.00	0.00	1.00
EA089	IIIB	Splay 66	20	0.00	0.60	65.77	0.00	0.00	0.45	32.89	99.71	0.00	0.01	0.98	0.00	0.00	0.00	1.00
EA089	IIIB	Splay 66	20	0.00	0.64	66.43	0.00	0.00	0.44	32.66	100.17	0.00	0.01	1.00	0.00	0.00	0.00	1.00
EA089	IIIB	Splay 66	20	0.06	0.77	66.19	0.00	0.00	0.45	32.79	100.27	0.00	0.01	0.99	0.00	0.00	0.00	1.00
EA089	IIIB	Splay 66	20	0.00	0.65	66.74	0.08	0.00	0.46	32.33	100.26	0.00	0.01	1.01	0.00	0.00	0.00	1.00
EA089	IIIB	Splay 66	20	0.02	0.67	66.38	0.05	0.00	0.43	32.57	100.12	0.00	0.01	1.00	0.00	0.00	0.00	1.00

Esfalerita

Muestra	Etap	Veta	Nivel	Cu %	Fe %	Zn %	Ga %	Ge %	Cd %	S %	Total	#Cu	#Fe	#Zn	#Ga	#Ge	#Cd	#S
EA089	IIIB	Splay 66	20	0.00	0.69	66.25	0.00	0.00	0.52	32.27	99.73	0.00	0.01	1.01	0.00	0.00	0.00	1.00
EA089	IIIB	Splay 66	20	0.00	0.67	66.30	0.00	0.00	0.48	32.41	99.86	0.00	0.01	1.00	0.00	0.00	0.00	1.00
EA089	IIIB	Splay 66	20	0.00	0.71	66.61	0.00	0.00	0.51	32.53	100.35	0.00	0.01	1.00	0.00	0.00	0.00	1.00
EA089	IIIB	Splay 66	20	0.03	0.64	66.51	0.00	0.00	0.46	32.42	100.05	0.00	0.01	1.01	0.00	0.00	0.00	1.00
EA089	IIIB	Splay 66	20	0.03	0.89	65.37	0.01	0.00	0.42	32.53	99.26	0.00	0.02	0.99	0.00	0.00	0.00	1.00
Promedio				0.02	0.86	66.08	0.01	0.00	0.45	32.57	99.98	0.00	0.02	0.99	0.00	0.00	0.00	
EA084	IIIC	Splay 66	16	0.00	0.19	65.75	0.02	0.00	0.54	31.70	98.20	0.00	0.00	1.02	0.00	0.00	0.00	1.00
EA084	IIIC	Splay 66	16	0.02	0.13	66.56	0.00	0.00	0.61	31.83	99.15	0.00	0.00	1.03	0.00	0.00	0.01	1.00
EA084	IIIC	Splay 66	16	0.03	0.20	66.46	0.00	0.00	0.61	32.06	99.36	0.00	0.00	1.02	0.00	0.00	0.01	1.00
EA084	IIIC	Splay 66	16	0.05	0.13	65.56	0.00	0.00	0.48	32.15	98.37	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	1.00
EA084	IIIC	Splay 66	16	0.00	0.16	66.31	0.00	0.00	0.58	32.27	99.32	0.00	0.00	1.01	0.00	0.00	0.01	1.00
EA084	IIIC	Splay 66	16	0.02	0.22	66.24	0.00	0.00	0.60	32.22	99.31	0.00	0.00	1.01	0.00	0.00	0.01	1.00
EA084	IIIC	Splay 66	16	0.02	0.25	66.13	0.00	0.00	0.59	32.04	99.02	0.00	0.00	1.01	0.00	0.00	0.01	1.00
EA084	IIIC	Splay 66	16	0.02	0.22	66.31	0.00	0.00	0.56	32.29	99.39	0.00	0.00	1.01	0.00	0.00	0.00	1.00
EA084	IIIC	Splay 66	16	0.07	0.12	65.78	0.00	0.00	0.52	32.14	98.64	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	1.00
EA084	IIIC	Splay 66	16	0.00	0.15	66.08	0.00	0.00	0.58	32.21	99.02	0.00	0.00	1.01	0.00	0.00	0.01	1.00
EA084	IIIC	Splay 66	16	0.21	0.46	65.96	0.00	0.00	0.53	32.11	99.27	0.00	0.01	1.01	0.00	0.00	0.00	1.00
EA084	IIIC	Splay 66	16	0.01	0.18	66.16	0.00	0.00	0.54	32.07	98.97	0.00	0.00	1.01	0.00	0.00	0.00	1.00
EA084	IIIC	Splay 66	16	0.10	0.14	66.06	0.03	0.00	0.43	32.38	99.15	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	1.00
EA084	IIIC	Splay 66	16	0.05	0.20	66.28	0.00	0.00	0.51	32.34	99.38	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	1.00
EA084	IIIC	Splay 66	16	1.08	1.32	64.65	0.04	0.00	0.53	32.39	100.02	0.02	0.02	0.98	0.00	0.00	0.00	1.00
EA084	IIIC	Splay 66	16	0.06	0.18	66.20	0.00	0.00	0.52	32.37	99.33	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	1.00
EA084	IIIC	Splay 66	16	0.09	0.23	65.63	0.00	0.00	0.48	32.28	98.70	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	1.00
EA084	IIIC	Splay 66	16	0.08	0.22	65.82	0.00	0.00	0.50	32.50	99.12	0.00	0.00	0.99	0.00	0.00	0.00	1.00
EA084	IIIC	Splay 66	16	0.10	0.21	66.03	0.01	0.00	0.47	32.42	99.25	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	1.00
EA084	IIIC	Splay 66	16	0.00	0.20	66.18	0.00	0.00	0.49	32.20	99.07	0.00	0.00	1.01	0.00	0.00	0.00	1.00
EA084	IIIC	Splay 66	16	0.00	0.18	65.99	0.00	0.00	0.51	32.23	98.92	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	1.00
EA084	IIIC	Splay 66	16	0.00	0.17	66.03	0.15	0.00	0.55	32.32	99.22	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	1.00
EA084	IIIC	Splay 66	16	0.00	0.25	65.48	0.04	0.00	0.49	32.06	98.32	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	1.00
Promedio				0.09	0.25	65.99	0.01	0.00	0.53	32.20	99.07	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	

Esfalerita

Muestra	Etap	Veta	Nivel	Minerals	Cu %	Fe %	Zn %	Ga %	Ge %	Cd %	S %	Total	#Cu	#Fe	#Zn	#Ga	#Ge	#Cd	#S
AG070	II	El Huaje	1620	Sph	0.06	0.91	64.04	0.00	0.00	0.06	33.60	98.68	0.00	0.02	0.93	0.00	0.00	0.00	1.00
AG070	II	El Huaje	1620	Sph	0.00	0.67	65.01	0.00	0.00	0.20	33.33	99.20	0.00	0.01	0.96	0.00	0.00	0.00	1.00
AG070	II	El Huaje	1620	Sph	0.00	0.48	65.57	0.02	0.03	0.13	33.08	99.31	0.00	0.01	0.97	0.00	0.00	0.00	1.00
AG070	II	El Huaje	1620	Sph	0.00	0.79	65.93	0.00	0.00	0.00	33.30	100.02	0.00	0.01	0.97	0.00	0.00	0.00	1.00
AG070	II	El Huaje	1620	Sph	0.00	0.80	66.37	0.00	0.05	0.00	33.74	100.95	0.00	0.01	0.96	0.00	0.00	0.00	1.00
AG070	II	El Huaje	1620	Sph	0.00	0.80	66.18	0.02	0.02	0.00	33.44	100.47	0.00	0.01	0.97	0.00	0.00	0.00	1.00
AG070	II	El Huaje	1620	Sph	0.00	0.97	64.61	0.01	0.02	0.15	33.66	99.41	0.00	0.02	0.94	0.00	0.00	0.00	1.00
AG070	II	El Huaje	1620	Sph	0.36	1.13	64.89	0.00	0.00	0.12	33.54	100.04	0.01	0.02	0.95	0.00	0.00	0.00	1.00
AG070	II	El Huaje	1620	Sph	0.32	0.96	63.85	0.00	0.04	0.02	34.10	99.29	0.00	0.02	0.92	0.00	0.00	0.00	1.00
Promedio					0.08	0.83	65.16	0.01	0.02	0.08	33.53	99.71	0.00	0.01	0.95	0.00	0.00	0.00	

Miargirita

Muestra	Etap	Veta	Nivel	S %	Fe %	Cu %	Zn %	Se %	Sb %	Ag %	Pb %	As %	Total	#Fe	#Zn	#Pb	#Cu	#Ag	#Sb	#As	#S	#Se
EA032	IV	Splay 5	12	21.46	0.01	0.03	0.07	0.12	37.75	37.58	0.04	2.62	99.68	0.00	0.00	0.00	0.00	1.04	0.92	0.10	2.00	0.00
EA032	IV	Splay 5	12	21.42	0.01	0.05	0.00	0.00	37.93	37.72	0.06	2.93	100.11	0.00	0.00	0.00	0.00	1.05	0.93	0.12	2.00	0.00
EA032	IV	Splay 5	12	22.14	0.00	0.05	0.01	0.03	38.13	36.90	0.00	3.02	100.27	0.00	0.00	0.00	0.00	0.99	0.91	0.12	2.00	0.00
EA032	IV	Splay 5	12	22.09	0.02	0.08	0.01	0.17	35.54	37.01	0.00	4.34	99.26	0.00	0.00	0.00	0.00	0.99	0.84	0.17	2.00	0.01
EA032	IV	Splay 5	12	21.85	0.00	0.00	0.00	0.23	38.52	36.75	0.00	2.01	99.36	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.92	0.08	2.00	0.01
EA032	IV	Splay 5	12	21.52	0.03	0.06	0.02	0.22	38.49	36.42	0.17	1.85	98.80	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.94	0.07	2.00	0.01
EA032	IV	Splay 5	12	21.43	0.03	0.06	0.01	0.18	38.66	35.69	1.22	1.32	98.60	0.00	0.00	0.02	0.00	0.99	0.95	0.05	2.00	0.01
EA032	IV	Splay 5	12	21.73	0.00	0.06	0.00	0.32	37.12	37.07	0.00	2.91	99.21	0.00	0.00	0.00	0.00	1.01	0.89	0.11	2.00	0.01
EA032	IV	Splay 5	12	21.50	0.00	0.03	0.01	0.19	37.77	36.99	0.25	2.13	98.86	0.00	0.00	0.00	0.00	1.02	0.92	0.08	2.00	0.01
EA032	IV	Splay 5	12	21.34	0.00	0.06	0.00	0.14	38.47	36.60	0.26	2.62	99.49	0.00	0.00	0.00	0.00	1.02	0.95	0.10	2.00	0.01
EA032	IV	Splay 5	12	21.60	0.02	0.06	0.00	0.20	38.41	36.19	0.14	2.60	99.21	0.00	0.00	0.00	0.00	0.99	0.93	0.10	2.00	0.01
EA032	IV	Splay 5	12	21.42	0.00	0.06	0.01	0.22	38.70	36.53	0.21	2.52	99.66	0.00	0.00	0.00	0.00	1.01	0.95	0.10	2.00	0.01
EA032	IV	Splay 5	12	21.92	0.04	0.01	0.06	0.05	34.80	37.36	0.01	5.14	99.38	0.00	0.00	0.00	0.00	1.01	0.84	0.20	2.00	0.00
EA032	IV	Splay 5	12	21.95	0.00	0.01	0.01	0.08	35.44	36.61	0.15	4.79	99.04	0.00	0.00	0.00	0.00	0.99	0.85	0.19	2.00	0.00
Promedio				21.67	0.01	0.04	0.01	0.15	37.55	36.81	0.18	2.91	99.35	0.00	0.00	0.00	0.00	1.01	0.91	0.11		0.01

Proustita-pirargirita

Muestra	Etap	Veta	Nivel	Fe %	Zn %	Pb %	Cu %	Ag %	Sb %	As %	S %	Se %	Total	#Fe	#Zn	#Pb	#Cu	#Ag	#Sb	#As	#S	#Se
EA099	I	Splay 5	12	0.10	0.00	0.00	1.63	64.44	1.14	14.07	18.55	0.06	99.99	0.01	0.00	0.00	0.13	3.09	0.05	0.97	3.00	0.00
EA099	I	Splay 5	12	0.07	0.00	0.00	2.50	63.51	2.27	13.62	18.33	0.04	100.36	0.01	0.00	0.00	0.21	3.09	0.10	0.95	3.00	0.00
EA099	I	Splay 5	12	0.06	0.03	0.05	1.53	62.55	1.99	13.31	19.03	0.00	98.55	0.01	0.00	0.00	0.12	2.93	0.08	0.90	3.00	0.00
EA099	I	Splay 5	12	0.08	0.02	0.06	1.52	62.04	2.50	13.06	19.21	0.00	98.48	0.01	0.00	0.00	0.12	2.88	0.10	0.87	3.00	0.00

Proustita-pirargirita

Muestra	Etap	Veta	Nivel	Fe %	Zn %	Pb %	Cu %	Ag %	Sb %	As %	S %	Se %	Total	#Fe	#Zn	#Pb	#Cu	#Ag	#Sb	#As	#S	#Se
EA099	I	Splay 5	12	0.02	0.00	0.00	1.66	62.59	1.64	13.44	19.74	0.00	99.08	0.00	0.00	0.00	0.13	2.83	0.07	0.87	3.00	0.00
EA099	I	Splay 5	12	0.11	0.00	0.00	0.32	67.84	1.60	12.88	18.40	0.08	101.24	0.01	0.00	0.00	0.03	3.28	0.07	0.90	3.00	0.00
EA099	I	Splay 5	12	0.09	0.00	0.00	0.34	64.85	6.75	10.29	18.19	0.07	100.58	0.01	0.00	0.00	0.03	3.17	0.29	0.73	3.00	0.00
EA099	I	Splay 5	12	0.09	0.00	0.00	0.28	64.16	11.23	7.40	17.75	0.09	100.99	0.01	0.00	0.00	0.02	3.22	0.50	0.53	3.00	0.00
EA099	I	Splay 5	12	0.29	0.06	0.00	0.23	66.44	7.53	8.99	17.84	0.19	101.57	0.03	0.01	0.00	0.02	3.31	0.33	0.64	3.00	0.00
EA099	I	Splay 5	12	0.04	0.00	0.00	0.26	66.81	5.93	9.78	17.83	0.11	100.77	0.00	0.00	0.00	0.02	3.33	0.26	0.70	3.00	0.00
EA099	I	Splay 5	12	0.02	0.00	0.00	0.16	64.92	5.90	11.03	18.29	0.11	100.43	0.00	0.00	0.00	0.01	3.16	0.25	0.77	3.00	0.00
Promedio				0.09	0.01	0.01	0.95	64.56	4.41	11.62	18.47	0.07	100.18	0.01	0.00	0.00	0.08	3.12	0.19	0.80		0.00
EA032	II	Splay 5	12	0.00	0.00	0.00	0.23	61.93	20.74	0.53	16.68	0.20	100.30	0.00	0.00	0.00	0.02	3.30	0.98	0.04	3.00	0.00
EA032	II	Splay 5	12	0.01	0.05	0.00	0.20	60.66	20.86	0.45	17.79	0.24	100.26	0.00	0.00	0.00	0.02	3.02	0.92	0.03	3.00	0.01
EA032	II	Splay 5	12	0.02	0.00	0.00	0.21	60.03	21.43	0.06	16.98	0.18	98.91	0.00	0.00	0.00	0.02	3.14	0.99	0.00	3.00	0.00
EA032	II	Splay 5	12	0.01	0.01	0.00	0.43	60.98	21.38	0.44	17.18	0.16	100.59	0.00	0.00	0.00	0.04	3.15	0.98	0.03	3.00	0.00
EA032	II	Splay 5	12	0.07	0.47	0.00	0.09	60.75	21.58	0.06	16.20	1.81	101.03	0.01	0.04	0.00	0.01	3.20	1.01	0.00	3.00	0.04
EA032	II	Splay 5	12	0.11	0.35	0.00	0.16	61.36	21.32	0.10	16.34	1.54	101.28	0.01	0.03	0.00	0.01	3.22	0.99	0.01	3.00	0.04
EA032	II	Splay 5	12	0.19	0.49	0.00	0.16	60.38	21.66	0.06	16.61	1.48	101.04	0.02	0.04	0.00	0.01	3.13	0.99	0.00	3.00	0.03
Promedio				0.06	0.20	0.00	0.21	60.87	21.28	0.24	16.83	0.80	100.49	0.01	0.02	0.00	0.02	3.17	0.98	0.02		0.02
EA099	IIIB	Splay 5	12	0.10	0.01	0.00	1.42	57.42	22.25	0.03	16.45	1.72	99.41	0.01	0.00	0.00	0.13	2.99	1.03	0.00	3.00	0.04
EA099	IIIB	Splay 5	12	0.08	0.05	0.00	0.35	59.63	22.52	0.06	17.24	0.04	99.97	0.01	0.00	0.00	0.03	3.08	1.03	0.00	3.00	0.00
EA099	IIIB	Splay 5	12	0.07	0.00	0.03	0.43	57.90	22.42	0.36	17.79	0.00	99.02	0.01	0.00	0.00	0.04	2.90	1.00	0.03	3.00	0.00
EA099	IIIB	Splay 5	12	0.09	0.07	0.00	0.40	57.99	22.66	0.39	17.50	0.00	99.10	0.01	0.01	0.00	0.03	2.96	1.02	0.03	3.00	0.00
EA099	IIIB	Splay 5	12	0.09	0.02	0.00	0.43	58.54	23.06	0.33	17.26	0.00	99.74	0.01	0.00	0.00	0.04	3.02	1.06	0.02	3.00	0.00
EA099	IIIB	Splay 5	12	0.02	0.42	0.00	0.14	64.89	5.60	11.03	17.77	1.06	100.93	0.00	0.03	0.00	0.01	3.18	0.24	0.78	3.00	0.02
EA099	IIIB	Splay 5	12	0.03	0.39	0.00	0.15	58.49	22.44	0.06	16.77	0.81	99.13	0.00	0.03	0.00	0.01	3.05	1.04	0.00	3.00	0.02
EA099	IIIB	Splay 5	12	0.00	0.19	0.00	0.19	65.65	2.75	12.69	17.96	0.38	99.80	0.00	0.02	0.00	0.02	3.23	0.12	0.90	3.00	0.01
Promedio				0.06	0.14	0.00	0.44	60.06	17.96	3.12	17.34	0.50	99.64	0.01	0.01	0.00	0.04	3.05	0.82	0.22		0.01
EA032	IV	Splay 5	12	0.00	0.04	0.00	0.13	61.23	18.08	3.26	17.57	0.11	100.43	0.00	0.00	0.00	0.01	3.10	0.81	0.24	3.00	0.00
EA032	IV	Splay 5	12	0.03	0.00	0.00	0.10	58.98	20.86	1.32	17.28	0.13	98.70	0.00	0.00	0.00	0.01	3.03	0.95	0.10	3.00	0.00
EA032	IV	Splay 5	12	0.03	0.00	0.01	0.07	58.05	23.06	0.34	17.81	0.05	99.43	0.00	0.00	0.00	0.01	2.90	1.02	0.02	3.00	0.00
EA032	IV	Splay 5	12	0.00	0.00	0.06	0.06	58.38	22.94	0.35	18.09	0.04	99.92	0.00	0.00	0.00	0.00	2.88	1.00	0.03	3.00	0.00
EA032	IV	Splay 5	12	0.00	0.00	0.00	0.10	58.40	22.91	0.37	18.31	0.06	100.14	0.00	0.00	0.00	0.01	2.84	0.99	0.03	3.00	0.00
EA032	IV	Splay 5	12	0.00	0.03	0.00	0.08	58.33	21.51	1.13	18.70	0.06	99.83	0.00	0.00	0.00	0.01	2.78	0.91	0.08	3.00	0.00
EA032	IV	Splay 5	12	0.01	0.00	0.00	0.11	58.48	22.09	0.83	18.68	0.00	100.19	0.00	0.00	0.00	0.01	2.79	0.93	0.06	3.00	0.00
EA032	IV	Splay 5	12	0.00	0.00	0.06	0.08	57.85	21.97	0.93	18.69	0.12	99.70	0.00	0.00	0.00	0.01	2.75	0.93	0.06	3.00	0.00
EA032	IV	Splay 5	12	0.00	0.00	0.00	0.06	59.05	20.35	2.05	18.63	0.00	100.14	0.00	0.00	0.00	0.00	2.83	0.86	0.14	3.00	0.00
EA032	IV	Splay 5	12	0.01	0.04	0.00	0.11	59.91	17.90	3.50	17.94	0.00	99.40	0.00	0.00	0.00	0.01	2.98	0.79	0.25	3.00	0.00
EA032	IV	Splay 5	12	0.02	0.02	0.00	0.08	61.52	15.42	4.42	17.86	0.09	99.42	0.00	0.00	0.00	0.01	3.07	0.68	0.32	3.00	0.00

Proustita-pirargirita

Muestra	Etapa	Veta	Nivel	Fe %	Zn %	Pb %	Cu %	Ag %	Sb %	As %	S %	Se %	Total	#Fe	#Zn	#Pb	#Cu	#Ag	#Sb	#As	#S	#Se
EA032	IV	Splay 5	12	0.02	0.00	0.00	0.10	63.41	14.59	4.65	17.75	0.12	100.64	0.00	0.00	0.00	0.01	3.18	0.65	0.34	3.00	0.00
EA032	IV	Splay 5	12	0.00	0.00	0.00	0.11	62.39	18.75	1.79	17.13	0.09	100.25	0.00	0.00	0.00	0.01	3.24	0.86	0.13	3.00	0.00
EA032	IV	Splay 5	12	0.00	0.00	0.00	0.14	63.15	18.72	1.89	17.18	0.09	101.17	0.00	0.00	0.00	0.01	3.27	0.86	0.14	3.00	0.00
EA032	IV	Splay 5	12	0.01	0.00	0.00	0.13	63.47	16.54	3.10	17.44	0.10	100.80	0.00	0.00	0.00	0.01	3.24	0.75	0.23	3.00	0.00
EA032	IV	Splay 5	12	0.02	0.01	0.00	0.12	64.35	14.06	4.96	17.70	0.11	101.33	0.00	0.00	0.00	0.01	3.23	0.63	0.36	3.00	0.00
EA032	IV	Splay 5	12	0.00	0.00	0.08	0.08	61.74	16.49	3.76	16.76	0.07	98.98	0.00	0.00	0.00	0.01	3.28	0.78	0.29	3.00	0.00
EA032	IV	Splay 5	12	0.01	0.04	0.07	0.08	61.50	16.90	3.65	17.29	0.06	99.61	0.00	0.00	0.00	0.01	3.17	0.77	0.27	3.00	0.00
EA032	IV	Splay 5	12	0.00	0.02	0.00	0.14	62.11	16.39	3.85	16.65	0.00	99.16	0.00	0.00	0.00	0.01	3.33	0.78	0.30	3.00	0.00
EA032	IV	Splay 5	12	0.00	0.04	0.00	0.12	62.32	14.56	4.70	17.08	0.00	98.83	0.00	0.00	0.00	0.01	3.25	0.67	0.35	3.00	0.00
EA032	IV	Splay 5	12	0.00	0.07	0.00	0.12	61.81	16.56	3.68	16.64	0.01	98.89	0.00	0.01	0.00	0.01	3.31	0.79	0.28	3.00	0.00
Promedio				0.01	0.01	0.01	0.10	60.78	18.60	2.60	17.68	0.06	99.85	0.00	0.00	0.00	0.01	3.07	0.83	0.19		0.00
EA-11	IV	Splay 5	16	0.03	0.00	0.00	0.26	60.08	22.18	0.12	17.00	0.10	99.78	0.00	0.00	0.00	0.02	3.14	1.03	0.01	3.00	0.00
EA-11	IV	Splay 5	16	0.00	0.00	0.00	0.13	59.81	21.94	0.29	17.34	0.26	99.78	0.00	0.00	0.00	0.01	3.06	0.99	0.02	3.00	0.01
EA-11	IV	Splay 5	16	0.00	0.00	0.00	0.13	59.67	21.95	0.39	17.11	0.15	99.39	0.00	0.00	0.00	0.01	3.10	1.01	0.03	3.00	0.00
EA-11	IV	Splay 5	16	0.00	0.02	0.00	0.13	60.50	22.12	0.47	17.00	0.12	100.36	0.00	0.00	0.00	0.01	3.16	1.02	0.04	3.00	0.00
Promedio				0.01	0.01	0.00	0.16	60.02	22.05	0.32	17.11	0.16	99.83	0.00	0.00	0.00	0.01	3.12	1.01	0.02		0.00
EA097	IV	Splay 5	20	0.08	0.00	0.00	0.74	58.96	22.02	0.62	17.84	0.06	100.32	0.01	0.00	0.00	0.06	2.94	0.97	0.04	3.00	0.00
EA097	IV	Splay 5	20	0.09	0.01	0.00	0.61	59.52	22.09	0.63	17.87	0.04	100.87	0.01	0.00	0.00	0.05	2.97	0.98	0.05	3.00	0.00
EA097	IV	Splay 5	20	0.20	0.04	0.00	0.80	58.73	22.12	0.58	17.43	0.09	99.98	0.02	0.00	0.00	0.07	3.00	1.00	0.04	3.00	0.00
EA097	IV	Splay 5	20	0.00	0.05	0.00	0.16	60.54	20.87	0.38	17.19	0.21	99.40	0.00	0.00	0.00	0.01	3.13	0.95	0.03	3.00	0.00
EA097	IV	Splay 5	20	0.03	0.00	0.00	0.21	62.42	14.36	4.55	17.67	0.18	99.41	0.00	0.00	0.00	0.02	3.14	0.64	0.33	3.00	0.00
EA097	IV	Splay 5	20	0.00	0.00	0.00	0.17	60.10	22.35	0.33	17.54	0.18	100.67	0.00	0.00	0.00	0.01	3.04	1.00	0.02	3.00	0.00
EA097	IV	Splay 5	20	0.03	0.00	0.05	0.16	60.60	22.33	0.36	17.58	0.15	101.26	0.00	0.00	0.00	0.01	3.06	1.00	0.03	3.00	0.00
EA097	IV	Splay 5	20	0.00	0.00	0.00	0.16	60.74	21.84	0.69	17.25	0.14	100.82	0.00	0.00	0.00	0.01	3.13	1.00	0.05	3.00	0.00
EA097	IV	Splay 5	20	0.00	0.00	0.00	0.26	59.58	22.10	0.12	17.08	0.24	99.38	0.00	0.00	0.00	0.02	3.09	1.02	0.01	3.00	0.01
EA097	IV	Splay 5	20	0.02	0.00	0.00	0.35	62.75	19.29	1.41	16.70	0.76	101.28	0.00	0.00	0.00	0.03	3.29	0.90	0.11	3.00	0.02
EA097	IV	Splay 5	20	0.00	0.00	0.11	0.29	59.69	22.28	0.35	18.27	0.27	101.26	0.00	0.00	0.00	0.02	2.90	0.96	0.02	3.00	0.01
EA097	IV	Splay 5	20	0.01	0.02	0.00	0.25	61.02	21.05	1.11	16.32	0.27	100.05	0.00	0.00	0.00	0.02	3.31	1.01	0.09	3.00	0.01
EA097	IV	Splay 5	20	0.02	0.01	0.03	0.30	60.69	21.96	0.61	16.50	0.32	100.44	0.00	0.00	0.00	0.03	3.25	1.04	0.05	3.00	0.01
Promedio				0.04	0.01	0.01	0.34	60.41	21.13	0.90	17.33	0.22	100.39	0.00	0.00	0.00	0.03	3.10	0.96	0.07		0.01

Proustita - pirargirita

Muestra	Etapa	Veta	Nivel	S %	Fe %	Cu %	Zn %	Se %	Sb %	Ag %	Pb %	As %	Total	#Fe	#Zn	#Pb	#Cu	#Ag	#Sb	#As	#S	#Se
AG070	II	El Huaje	1620	16.96	0.00	0.03	0.02	0.00	20.06	60.49	0.00	1.91	99.46	0.00	0.00	0.00	0.00	3.18	0.93	0.14	3.00	0.00
AG070	II	El Huaje	1620	17.16	0.03	0.09	0.05	0.00	20.27	60.25	0.00	1.66	99.50	0.00	0.00	0.00	0.01	3.13	0.93	0.12	3.00	0.00

Proustita - pirargirita

Muestra	Etap	Veta	Nivel	S %	Fe %	Cu %	Zn %	Se %	Sb %	Ag %	Pb %	As %	Total	#Fe	#Zn	#Pb	#Cu	#Ag	#Sb	#As	#S	#Se
AG070	II	El Huaje	1620	17.29	0.00	0.26	0.10	0.00	18.46	61.07	0.00	1.62	98.79	0.00	0.01	0.00	0.02	3.15	0.84	0.12	3.00	0.00
AG070	II	El Huaje	1620	17.41	0.01	0.32	0.12	0.00	16.40	60.58	0.00	4.25	99.09	0.00	0.01	0.00	0.03	3.10	0.74	0.31	3.00	0.00
AG070	II	El Huaje	1620	17.76	0.02	0.29	0.39	0.00	18.18	59.01	0.00	3.34	99.00	0.00	0.03	0.00	0.02	2.96	0.81	0.24	3.00	0.00
AG070	II	El Huaje	1620	16.93	0.07	0.34	0.03	0.00	18.52	61.80	0.00	2.66	100.35	0.01	0.00	0.00	0.03	3.26	0.86	0.20	3.00	0.00
AG070	II	El Huaje	1620	16.57	0.05	0.34	0.05	0.00	18.32	62.39	0.00	2.73	100.44	0.00	0.00	0.00	0.03	3.36	0.87	0.21	3.00	0.00
AG070	II	El Huaje	1620	16.86	0.05	0.35	0.02	0.00	17.64	61.51	0.00	2.89	99.33	0.01	0.00	0.00	0.03	3.25	0.83	0.22	3.00	0.00
AG070	II	El Huaje	1620	16.78	0.00	0.05	0.00	0.00	17.36	61.42	0.00	4.01	99.63	0.00	0.00	0.00	0.00	3.26	0.82	0.31	3.00	0.00
AG070	II	El Huaje	1620	18.31	0.00	0.01	0.00	0.00	8.01	63.22	0.00	9.20	98.74	0.00	0.00	0.00	0.00	3.08	0.35	0.65	3.00	0.00
AG070	II	El Huaje	1620	17.96	0.02	0.04	0.02	0.00	15.91	61.96	0.00	5.10	101.01	0.00	0.00	0.00	0.00	3.08	0.70	0.36	3.00	0.00
Promedio				17.27	0.02	0.19	0.07	0.00	17.19	61.25	0.00	3.58	99.57	0.00	0.01	0.00	0.02	3.16	0.79	0.26		0.00

Tetraedrita - tennantita

Muestra	Etap	Veta	Nivel	Cu %	Ag %	Fe %	Zn %	Sb %	As %	S %	Bi %	Total	#Cu	#Ag	#Fe	#Zn	#Sb	#As	#S	#Bi
EA032	II	Splay 5	12	23.17	20.73	4.22	2.39	26.88	0.32	22.94	0.00	100.65	6.52	3.44	1.35	0.65	3.95	0.08	13.00	0.00
EA032	II	Splay 5	12	20.97	23.75	4.41	2.07	26.10	0.70	22.30	0.00	100.30	5.98	3.99	1.43	0.57	3.88	0.17	13.00	0.00
EA032	II	Splay 5	12	18.76	26.60	3.61	2.73	25.98	0.46	21.88	0.00	100.02	5.45	4.55	1.19	0.77	3.94	0.11	13.00	0.00
EA032	II	Splay 5	12	21.00	23.26	3.76	2.61	26.38	0.48	22.34	0.00	99.82	5.97	3.90	1.22	0.72	3.92	0.11	13.00	0.00
EA032	II	Splay 5	12	23.80	19.92	1.99	4.83	26.67	0.43	22.77	0.00	100.41	6.70	3.30	0.64	1.32	3.92	0.10	13.00	0.00
Promedio				21.54	22.85	3.60	2.92	26.40	0.48	22.45	0.00	100.24	6.13	3.84	1.17	0.81	3.92	0.12		0.00
EA099	IIIB	Splay 5	12	15.66	32.31	4.95	1.35	24.63	0.98	20.71	0.00	100.59	4.62	5.61	1.66	0.39	3.79	0.25	13.00	0.00
EA099	IIIB	Splay 5	12	27.17	19.78	5.49	1.62	9.64	12.45	24.88	0.00	101.02	7.05	3.03	1.62	0.41	1.31	2.74	13.00	0.00
EA099	IIIB	Splay 5	12	27.39	18.40	5.78	1.49	5.60	15.20	25.85	0.06	99.77	6.95	2.75	1.67	0.37	0.74	3.27	13.00	0.00
EA099	IIIB	Splay 5	12	22.04	24.17	4.99	1.26	13.22	10.08	23.86	0.00	99.62	5.92	3.82	1.52	0.33	1.85	2.30	13.00	0.00
EA099	IIIB	Splay 5	12	15.97	30.35	4.52	1.49	26.65	0.52	21.01	0.00	100.52	4.60	5.15	1.48	0.42	4.01	0.13	13.00	0.00
EA099	IIIB	Splay 5	12	17.38	29.62	5.13	1.30	20.24	5.89	22.20	0.00	101.76	4.78	4.80	1.61	0.35	2.91	1.37	13.00	0.00
EA099	IIIB	Splay 5	12	28.63	15.63	5.41	2.17	4.99	15.95	26.34	0.00	99.11	7.13	2.29	1.53	0.52	0.65	3.37	13.00	0.00
EA099	IIIB	Splay 5	12	15.35	31.24	4.58	1.43	26.12	0.61	20.02	0.08	99.42	4.37	5.24	1.48	0.40	3.88	0.15	13.00	0.01
EA099	IIIB	Splay 5	12	28.41	18.60	5.77	1.49	7.19	13.60	25.40	0.00	100.47	7.34	2.83	1.69	0.37	0.97	2.98	13.00	0.00
EA099	IIIB	Splay 5	12	16.39	29.43	4.62	1.16	26.63	0.48	21.11	0.08	99.90	4.78	5.06	1.53	0.33	4.05	0.12	13.00	0.01
EA099	IIIB	Splay 5	12	16.74	28.99	4.65	1.13	26.50	0.51	21.66	0.21	100.39	4.87	4.97	1.54	0.32	4.03	0.13	13.00	0.02
EA099	IIIB	Splay 5	12	14.14	32.15	4.31	1.32	25.50	0.54	20.97	0.00	98.93	4.22	5.65	1.46	0.38	3.97	0.14	13.00	0.00
EA099	IIIB	Splay 5	12	15.27	32.77	4.87	1.26	26.22	0.08	20.71	0.00	101.17	4.47	5.65	1.62	0.36	4.00	0.02	13.00	0.00
Promedio				20.04	26.42	5.01	1.42	18.70	5.91	22.67	0.03	100.20	5.47	4.37	1.57	0.38	2.78	1.30		0.00

Tetraedrita - tennantita

Muestra	Etapa	Veta	Nivel	Cu %	Ag %	Fe %	Zn %	Sb %	As %	S %	Bi %	Total	#Cu	#Ag	#Fe	#Zn	#Sb	#As	#S	#Bi
EA062	IIIC	Splay 5	14	27.48	15.56	4.65	2.50	22.55	3.82	23.77	0.00	100.34	7.41	2.47	1.43	0.66	3.17	0.87	13.00	0.00
EA062	IIIC	Splay 5	14	27.69	15.16	4.83	2.38	22.52	3.55	23.77	0.00	99.90	7.58	2.45	1.50	0.63	3.22	0.83	13.00	0.00
EA062	IIIC	Splay 5	14	30.34	13.68	5.86	1.41	13.57	10.10	25.30	0.00	100.26	7.75	2.06	1.70	0.35	1.81	2.19	13.00	0.00
EA062	IIIC	Splay 5	14	29.82	13.14	5.41	1.40	12.25	11.09	25.77	0.00	98.87	7.59	1.97	1.57	0.35	1.63	2.39	13.00	0.00
EA062	IIIC	Splay 5	14	29.64	13.62	5.57	1.45	12.98	10.50	25.81	0.00	99.58	7.53	2.04	1.61	0.36	1.72	2.26	13.00	0.00
Promedio				28.99	14.23	5.26	1.83	16.77	7.81	24.88	0.00	99.79	7.57	2.20	1.56	0.47	2.31	1.71		0.00
EA-11	IIIC	Splay 5	16	22.69	19.61	3.19	3.62	26.66	0.69	23.42	0.00	99.89	6.36	3.24	1.02	0.99	3.90	0.16	13.00	0.00
EA-11	IIIC	Splay 5	16	22.62	19.73	3.47	3.40	26.56	0.69	23.30	0.00	99.77	6.37	3.27	1.11	0.93	3.90	0.17	13.00	0.00
EA-11	IIIC	Splay 5	16	21.43	21.45	4.00	2.99	26.90	0.64	23.18	0.03	100.63	6.06	3.58	1.29	0.82	3.97	0.15	13.00	0.00
Promedio				22.25	20.27	3.55	3.34	26.71	0.68	23.30	0.01	100.10	6.26	3.36	1.14	0.91	3.92	0.16		0.00
EA032	IV	Splay 5	12	22.06	22.38	4.39	2.22	25.21	1.51	22.49	0.00	100.26	6.19	3.70	1.40	0.61	3.69	0.36	13.00	0.00
EA032	IV	Splay 5	12	25.11	20.43	4.72	2.29	17.73	6.68	23.91	0.00	100.87	6.78	3.25	1.45	0.60	2.50	1.53	13.00	0.00
EA032	IV	Splay 5	12	23.74	21.00	4.25	2.32	21.17	4.28	23.27	0.00	100.01	6.54	3.41	1.33	0.62	3.04	1.00	13.00	0.00
EA032	IV	Splay 5	12	22.46	22.96	4.55	2.00	22.06	3.34	22.74	0.00	100.12	6.33	3.81	1.46	0.55	3.25	0.80	13.00	0.00
EA032	IV	Splay 5	12	23.45	22.71	4.88	1.77	18.84	5.55	23.20	0.00	100.41	6.48	3.70	1.53	0.48	2.72	1.30	13.00	0.00
EA032	IV	Splay 5	12	22.09	22.64	4.50	2.23	23.70	2.16	22.53	0.00	99.84	6.28	3.79	1.46	0.62	3.52	0.52	13.00	0.00
EA032	IV	Splay 5	12	21.50	23.33	4.81	2.05	24.11	2.00	22.56	0.00	100.35	6.06	3.87	1.54	0.56	3.55	0.48	13.00	0.00
Promedio				22.92	22.21	4.58	2.13	21.83	3.65	22.96	0.00	100.27	6.38	3.65	1.45	0.58	3.18	0.86		0.00
EA-11	IV	Splay 5	16	16.70	29.65	4.54	1.72	25.64	0.34	21.04	0.00	99.63	4.93	5.15	1.53	0.49	3.95	0.08	13.00	0.00
EA-11	IV	Splay 5	16	16.93	29.60	4.52	1.78	25.59	0.40	21.13	0.00	99.95	4.97	5.12	1.51	0.51	3.92	0.10	13.00	0.00
EA-11	IV	Splay 5	16	21.17	23.46	4.11	2.30	26.71	0.19	22.23	0.00	100.17	6.05	3.95	1.34	0.64	3.99	0.05	13.00	0.00
EA-11	IV	Splay 5	16	18.41	27.78	4.17	2.15	26.33	0.25	21.53	0.00	100.62	5.31	4.72	1.37	0.60	3.96	0.06	13.00	0.00
EA-11	IV	Splay 5	16	16.90	29.91	4.11	2.41	26.19	0.22	20.98	0.00	100.72	4.92	5.13	1.36	0.68	3.98	0.05	13.00	0.00
Promedio				18.02	28.08	4.29	2.07	26.09	0.28	21.38	0.00	100.22	5.24	4.81	1.42	0.58	3.96	0.07		0.00
EA097	IV	Splay 5	20	23.08	19.06	2.83	4.17	24.81	1.88	23.91	0.00	99.73	6.43	3.13	0.90	1.13	3.61	0.44	13.00	0.00
EA097	IV	Splay 5	20	22.57	19.69	2.54	4.08	23.84	2.24	23.63	0.07	98.66	6.36	3.27	0.82	1.12	3.51	0.54	13.00	0.01
EA097	IV	Splay 5	20	20.48	22.58	3.27	3.17	25.05	1.38	23.46	0.00	99.39	5.86	3.81	1.06	0.88	3.74	0.33	13.00	0.00
EA097	IV	Splay 5	20	21.80	21.17	3.29	3.20	24.58	1.87	23.69	0.12	99.71	6.13	3.51	1.05	0.88	3.61	0.45	13.00	0.01
EA097	IV	Splay 5	20	24.95	19.83	4.57	2.26	20.62	4.79	23.78	0.00	100.79	6.78	3.17	1.41	0.60	2.92	1.10	13.00	0.00
EA097	IV	Splay 5	20	25.32	18.79	3.67	3.27	20.57	5.25	23.76	0.00	100.62	6.72	2.94	1.11	0.84	2.85	1.18	13.00	0.00
EA097	IV	Splay 5	20	18.31	26.66	4.26	1.92	24.23	2.02	22.49	0.00	99.90	5.22	4.48	1.38	0.53	3.60	0.49	13.00	0.00

Tetraedrita - tennantita

Muestra	Etapa	Veta	Nivel	Cu %	Ag %	Fe %	Zn %	Sb %	As %	S %	Bi %	Total	#Cu	#Ag	#Fe	#Zn	#Sb	#As	#S	#Bi
EA097	IV	Splay 5	20	18.96	25.66	4.11	2.01	22.78	2.71	22.78	0.00	99.01	5.42	4.32	1.34	0.56	3.40	0.66	13.00	0.00
Promedio				21.93	21.68	3.57	3.01	23.31	2.77	23.44	0.02	99.73	6.11	3.58	1.13	0.82	3.40	0.65		0.00
EA104	II	Splay 66	18	39.24	1.48	0.30	7.43	14.00	10.89	26.46	0.00	99.78	9.65	0.21	0.08	1.78	1.80	2.27	13.00	0.00
EA104	II	Splay 66	18	38.59	1.48	0.26	7.65	16.39	8.85	26.26	0.00	99.48	9.64	0.22	0.07	1.86	2.14	1.87	13.00	0.00
EA104	II	Splay 66	18	37.83	1.85	0.13	7.63	18.53	7.61	25.88	0.00	99.46	9.52	0.27	0.04	1.87	2.43	1.62	13.00	0.00
EA104	II	Splay 66	18	39.11	1.16	0.25	7.60	11.87	11.83	26.75	0.00	98.57	9.59	0.17	0.07	1.81	1.52	2.46	13.00	0.00
EA104	II	Splay 66	18	41.28	0.86	0.82	7.38	8.52	14.67	27.27	0.00	100.79	9.85	0.12	0.22	1.71	1.06	2.97	13.00	0.00
EA104	II	Splay 66	18	41.35	0.90	0.81	7.16	9.28	14.05	27.18	0.00	100.72	9.98	0.13	0.22	1.68	1.17	2.88	13.00	0.00
EA104	II	Splay 66	18	37.56	2.85	0.31	7.25	22.80	4.47	25.34	0.00	100.56	9.65	0.43	0.09	1.81	3.06	0.97	13.00	0.00
EA104	II	Splay 66	18	34.50	5.56	0.22	7.26	26.85	1.37	24.52	0.00	100.28	9.16	0.87	0.07	1.87	3.72	0.31	13.00	0.00
Promedio				38.68	2.02	0.39	7.42	16.03	9.21	26.21	0.00	99.96	9.63	0.30	0.11	1.80	2.11	1.92		0.00
EA089	IIIB	Splay 66	20	40.96	2.17	7.24	0.04	5.46	16.93	27.71	0.00	100.49	9.62	0.30	1.93	0.01	0.67	3.37	13.00	0.00
EA089	IIIB	Splay 66	20	42.52	1.28	7.42	0.04	1.76	19.51	28.27	0.00	100.79	9.79	0.17	1.94	0.01	0.21	3.81	13.00	0.00
EA089	IIIB	Splay 66	20	42.68	1.18	7.38	0.08	1.59	19.71	28.36	0.00	100.97	9.80	0.16	1.93	0.02	0.19	3.84	13.00	0.00
EA089	IIIB	Splay 66	20	34.91	5.93	2.49	4.87	23.74	3.60	25.06	0.00	100.60	9.14	0.91	0.74	1.24	3.24	0.80	13.00	0.00
EA089	IIIB	Splay 66	20	34.70	5.76	2.50	4.98	23.62	3.86	25.01	0.00	100.43	8.96	0.88	0.73	1.25	3.18	0.85	13.00	0.00
EA089	IIIB	Splay 66	20	33.21	7.23	4.16	2.94	27.31	0.90	24.35	0.00	100.11	8.94	1.15	1.28	0.77	3.84	0.21	13.00	0.00
EA089	IIIB	Splay 66	20	32.51	8.36	3.96	3.16	28.14	0.36	24.20	0.00	100.70	8.74	1.32	1.21	0.83	3.95	0.08	13.00	0.00
EA089	IIIB	Splay 66	20	37.12	3.47	2.91	4.85	19.18	6.70	25.55	0.00	99.78	9.53	0.52	0.85	1.21	2.57	1.46	13.00	0.00
EA089	IIIB	Splay 66	20	39.11	1.38	1.00	7.56	17.44	8.06	26.05	0.00	100.59	9.85	0.20	0.29	1.85	2.29	1.72	13.00	0.00
Promedio				37.52	4.08	4.34	3.17	16.47	8.85	26.06	0.00	100.49	9.38	0.62	1.21	0.80	2.24	1.79		0.00
EA084	IIIC	Splay 66	16	43.06	0.32	1.92	6.56	0.05	20.22	28.44	0.00	100.56	9.93	0.04	0.50	1.47	0.01	3.95	13.00	0.00
EA084	IIIC	Splay 66	16	42.32	0.81	6.10	1.88	2.68	18.89	28.04	0.00	100.72	9.83	0.11	1.61	0.42	0.32	3.72	13.00	0.00
EA084	IIIC	Splay 66	16	41.68	0.91	4.82	3.27	2.97	18.47	28.11	0.00	100.23	9.73	0.12	1.28	0.74	0.36	3.66	13.00	0.00
EA084	IIIC	Splay 66	16	42.97	0.48	2.39	5.88	0.00	20.30	28.46	0.00	100.49	9.91	0.07	0.63	1.32	0.00	3.97	13.00	0.00
Promedio				42.51	0.63	3.81	4.40	1.42	19.47	28.26	0.00	100.50	9.85	0.09	1.01	0.99	0.17	3.82		0.00

ANEXO D

Coordenadas de las muestras Arista y Altagracia

Descripción de muestras de mano zona mineralizada Arista

Muestra	Veta	Nivel	Este	Norte	Elevación	Descripción
EA032	Splay 5	12	808919.6	1846157.6	687.9	Esfalerita masiva de grano fino con calcopirita, pirita, galena y sulfosal de plata diseminado que es cortado por vetillas de cuarzo lechoso con sulfuros diseminados.
EA099	Splay 5	12	809057.1	1846112.6	691.7	Muestra con textura coliforme y brechada: i) textura coliforme con bandas de sulfuro masivo de grano grueso de esfalerita (verde amarillento), calcopirita y galena, e intercalas con bandas de cuarzo de grano fino gris blanquecino; y ii) textura brechada con clastos (lutita y tobas) silicificados y una matriz de cuarzo gris oscuro con sulfuros diseminados.
EA062	Splay 5	14	809091.2	1846101.1	633.8	Muestra de textura coliforme con bandas de sulfuros de grano fino y medio de esfalerita (amarillo verdoso), calcopirita, pirita y galena, e intercaladas con bandas de cuarzo gris oscuro con trazas de sulfuros. Cuarzo lechoso de grano fino que corta a los sulfuros de textura coliforme.
EA054	Splay 5	14	808872.9	1846174.5	662.3	Muestra de textura brechas con clastos de tobas (porilitizado y débil silicificado) inmersa en una matriz de cuarzo gris oscuro de grano fino. Venillas de cuarzo lechoso y carbonato cortando a los tramos de textura brechada.
EA-11	Splay 5	16	808888.9	1846122.5	611.0	Muestras de textura coliforme con bandas masivas de grano medio a fino de esfalerita (marrón amarillento a verdoso) y calcopirita y pirita diseminada, e intercaladas con bandas milimétricas de carbonato y cuarzo.
EA-14	Splay 5	17	809014.3	1846106.3	592.6	Muestra de textura masiva de grano fino a medio de esfalerita (marrón amarillento) y calcopirita con galena y pirita diseminada. Cuarzo lechoso de grano fino cortando a los sulfuros de textura masiva.
EA008	Splay 5	18	808887.4	1846107.8	572.8	Muestra de textura masiva de galena, calcopirita y esfalerita (amarillo caramelo). Cuarzo lechoso cortando a los sulfuros de textura masiva.
EA-09	Splay 5	18	808988.7	1846102.7	572.8	Muestras de textura masiva de cuarzo lechoso y carbonatos con esfalerita (amarillo verdoso) diseminada.
EA-08	Splay 5	19	808889.8	1846092.6	556.3	Muestra de textura brechada con clastos de sulfuros (esfalerita y galena) y carbonatos inversa en una matriz de cuarzo gris lechoso que presenta trazas de sulfuros.
EA-08A	Splay 5	19	808867.6	1846097.1	556.3	Muestra de textura brechada con clastos de sulfuros (esfalerita, galena y calcopirita) y carbonato inmersas en una matriz de cuarzo lechoso que tiene trazas de sulfuros.
EA097	Splay 5	20	809001.9	1846053.9	523.5	Sulfuro masivo de esfalerita (gris verdoso) de grano medio, cuarzo lechoso y carbonatos con calcopirita, pirita y galena diseminadas. En el cuarzo lechoso se observa geodas con cuarzo hialino milimétricas.
EA084	Splay 66	16	808979.6	1846474.3	612.0	Muestra de esfalerita (gris verdoso) y cuarzo de grano medio con calcopirita y pirita diseminada. Los cuarzos amatista y marrón corta a los tramos masivas de esfalerita.

Muestra	Veta	Nivel	Este	Norte	Elevación	Descripción
EA006	Splay 66	17.5	809012.7	1846331.7	583.4	Muestra de textura coloforme con bandas masivas de esfalerita con galena y calcopirita diseminada y bandas intercaladas de cuarzo lechoso.
EA071	Splay 66	18	809009.5	1846369.3	554.4	Muestra de textura coloforme con bandas masivas de esfalerita (amarillento) con calcopirita y galena diseminada, y bandas intercalada de cuarzo lechoso.
EA104	Splay 66	18	808973.1	1846454.8	576.1	Muestra de textura masiva con microcristales de galena y calcopirita, macrocristales de pirita diseminada. Venillas milimétricas de pirita cortando a los sulfuros.
EA007	Splay 66	19	809011.0	1846362.1	556.3	Muestra de textura masiva con esfalerita de grano fino con galena y calcopirita diseminada. Cuarzo gris blanquecino de grano medio corta los sulfuros masivos.
EA-01	Splay 66	20	809019.1	1846366.7	534.0	Muestras de textura coloforme con bandas de esfalerita (amarillo caramelo, verde amarillento) con calcopirita diseminada y bandas intercaladas de cuarzo gris blanquecino y carbonatos microcristalinos.
EA089	Splay 66	20	808973.1	1846471.2	516.1	Muestra de textura coloforme con bandas masivas de esfalerita (amarillo verdoso) con calcopirita diseminada y bandas intercalas de cuarzo gris blanquecino.
EA065	Splay 66	22	808962.2	1846482.1	476.7	Muestra de textura coloforme con bandas masivas de esfalerita con calcopirita y pirita diseminada y bandas intercaladas de cuarzo lechoso.

Descripción de muestras de mano zona mineralizada Altagracia

Muestra	Veta	Nivel	Este	Norte	Elevación	Descripción
AG008	El Huaje	1620	794798.9	1848634.4	1626.8	Muestra de textura masiva de cuarzo con sulfuros microscópicos diseminado y parches, óxidos de hierro rellenando las fracturas.
AG009	El Huaje	1620	794794.6	1848631.7	1627.7	Muestra de textura masiva de cuarzo blanquecino con sulfuros microscópicos diseminada y parches, carbonatos en oquedades y óxidos de hierro rellenando las fracturas.
AG011	El Huaje	1620	794776.4	1848616.5	1626.1	Muestra de textura brechada con clastos angulosos de composición riolítica inmerso en una matriz de cuarzo gris blanquecino con sulfuros diseminados.
AG013	El Huaje	1620	794757.5	1848622.2	1625.8	Muestra de textura masiva de cuarzo blanquecino con sulfuros microscópicas diseminado. Venillas milimétricas de cuarzo hialino cortando a los tramos masivos y óxidos de hierro rellenando las fracturas.
AG022	El Huaje	1660	794818.0	1848622.0	1669.0	Muestra de cuarzo lechoso microcristalino con tramos de cuarzo hialino que tiene sulfuros diseminados. Óxidos de hierro rellenando oquedades y fracturas.
AG023	El Huaje	1670	794784.0	1848600.0	1675.0	Muestra de textura masiva de cuarzo blanquecino con sulfuros diseminados y geodas con cuarzo milimétrico. Óxidos de hierro rellenando las fracturas y oquedades.

Muestra	Veta	Nivel	Este	Norte	Elevación	Descripción
AG024	El Huaje	1670	794765.0	1848583.0	1676.0	Muestra de textura masiva de cuarzo blanquecino con pirita y sulfuros microscópico diseminados. Venillas de cuarzo hialino cortando a los tramos masivos de cuarzo.
AG031	El Huaje	1670	794725.0	1848574.0	1670.0	Muestra de textura masiva de cuarzo con sulfuros microscópicos diseminados y presencia de geodas con cuarzo hialino milimétricas. Óxidos de hierro rellenado las fracturas y oquedades.
AG070	El Huaje	1620	794811.8	1848650.4	1626.4	Muestra de cuarzo masivo gris oscuro con diseminación microscópica de sulfuros, presencia esporádica de micro geodas de cuarzo hialino, óxidos de hierro rellenado las fracturas.
AG071	El Huaje	1620	794784.5	1848619.1	1627.5	Muestra de textura masiva de cuarzo blanquecino con sulfuros diseminados. Óxidos de hierro rellenando las fracturas y oquedades. Vetilla de cuarzo amatista de textura crustiforme corta al cuarzo de textura masiva.
AG072	El Huaje	1620	794749.4	1848613.9	1625.0	Muestra de textura masiva de cuarzo blanquecino con sulfuros diseminados. Óxidos de hierro rellenando oquedades y fracturas.
AG111	El Huaje	1560	794838.5	1848683.0	1557.2	Muestra de calcita-cuarzo blanquecino con trazas de sulfuros. Muerta recolectada de una veta.
AG134	El Huaje	1440	794803.4	1848639.7	1443.6	Muestra de cuarzo-calcita blanquecino con galena, esfalerita y pirita diseminado. Muestra tomada de una veta.
AG164	El Huaje	1600	794626.5	1848574.6	1601.1	Muestra de textura masiva de cuarzo lechoso y geodas con microcristales de cuarzo hialino. Muestra recolectada de una veta.
AG166	El Huaje	1580	794631.2	1848569.0	1584.6	Muestra de textura masiva de cuarzo blanquecino con pirita diseminada. Venillas de cuarzo hialino cortando a cuarzo de textura masiva. Óxidos de hierro rellenado fracturas y oquedades.