

UNIVERSIDAD DE SONORA

División de Ciencias Exactas y Naturales

Departamento de Geología

CARACTERIZACIÓN GEOLÓGICA Y
MODELO MAGMÁTICO-HIDROTHERMAL
UTILIZANDO SWIR EN BARRIDOS
HIPERESPECTRALES EN EL YACIMIENTO
TIPO PÓRFIDO DE COBRE LOS HUMOS,
CABORCA, SONORA

TESIS

Que para obtener el Grado de:

Maestro en Ciencias-Geología.

P R E S E N T A:

JORGE ALONSO BELTRÁN CABRERA

Director de Tesis:

Dr. Lucas Hilario Ochoa Landin

Departamento de Geología



UNISON

Hermosillo, Sonora, Febrero de 2020

Universidad de Sonora

Repositorio Institucional UNISON



**"El saber de mis hijos
hará mi grandeza"**



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



"El saber de mis hijos
hará mi grandeza"

UNIVERSIDAD DE SONORA

Departamento de Geología
División de Ciencias Exactas y Naturales

F01

Hermosillo, Sonora, a 3 de Febrero del 2020

Dr. Rogelio Monreal Saavedra

Coordinador de Programa
Maestría en Ciencias-Geología
Departamento de Geología

Por este conducto y de la manera más atenta, me permito informarle que el alumno **JORGE ALONSO BELTRÁN CABRERA** con expediente **208210165**, ha concluido con su trabajo de tesis bajo mi dirección y considero que es adecuado para continuar con el trámite para la obtención del Grado de la Maestría en Ciencias-Geología, por lo tanto, someto a su consideración, para su aprobación el siguiente tema de tesis, intitulado:

"CARACTERIZACIÓN GEOLÓGICA Y MODELO MAGMÁTICO-HIDROTHERMAL UTILIZANDO SWIR EN BARRIDOS HIPERESPECTRALES EN EL YACIMIENTO TIPO PÓRFIDO DE COBRE LOS HUMOS, CABORCA, SONORA, MÉXICO"

Adjunto a la presente los borradores del trabajo de tesis para su revisión por el Comité de Tesis.

Sin otro en particular quedo de Usted.

ATENTAMENTE

Dr. Lucas Hilario Ochoa Landín

Director de Tesis

C.c.p. Interesado
C.c.p. Archivo





"El saber de mis hijos
hará mi grandeza"

UNIVERSIDAD DE SONORA

F02

División de Ciencias Exactas y Naturales
Departamento de Geología

Hermosillo, Sonora a 12 de febrero de 2020

Dr. Lucas Hilario Ochoa Landin
Director de Tesis

Por este conducto le comunico que ha sido aprobado el tema de tesis propuesto por Usted, intitulado:

"CARACTERIZACIÓN GEOLÓGICA Y MODELO MAGMÁTICO-HIDROTHERMAL UTILIZANDO SWIR EN BARRIDOS HIPERESPECTRALES EN EL YACIMIENTO TIPO PÓRFIDO DE COBRE LOS HUMOS, CABORCA, SONORA, MÉXICO"

Esto, con el fin de que el alumno **JORGE ALONSO BELTRÁN CABRERA** pueda presentar su examen profesional, para la obtención del título de Grado. Asimismo le comunico que han sido asignados los siguientes sinodales:

Dr. Efrén Pérez Segura	Presidente
Dra. Diana Meza Figueroa	Secretario
Dr. Lucas H. Ochoa Landin	Vocal
Dr. Martín Valencia Moreno	Vocal (Sinodal Externo)

Sin otro en particular quedo de Usted

Atentamente

Dr. Rogelio Monreal Saavedra
Coordinador de Programa
Maestría en Ciencias-Geología



El saber de mis hijos
hará mi grandeza
**MAESTRIA EN
CIENCIAS
GEOLOGIA
DEPARTAMENTO
DE GEOLOGIA**

C.c.p. Interesado
C.c.p. Archivo



"El saber de mis hijos
hará mi grandeza"

UNIVERSIDAD DE SONORA

F06

División de Ciencias Exactas y Naturales
Departamento de Geología

NOMBRE DE LA TESIS:

"CARACTERIZACIÓN GEOLÓGICA Y MODELO MAGMÁTICO-HIDROTHERMAL UTILIZANDO SWIR EN BARRIDOS HIPERESPECTRALES EN EL YACIMIENTO TIPO PÓRFIDO DE COBRE LOS HUMOS, CATORCE, SONORA, MÉXICO"

NOMBRE DEL SUSPENDIENTE:

JORGE ALONSO BELTRÁN CABRERA

El que suscribe, certifica que ha revisado esta tesis y que la encuentra en forma y contenido adecuada, como requerimiento parcial para obtener el Título de Grado en la Universidad de Sonora.

Dr. Efrén Pérez Segura

El que suscribe, certifica que ha revisado esta tesis y que la encuentra en forma y contenido adecuada, como requerimiento parcial para obtener el Título de Grado en la Universidad de Sonora.

Dra. Diana Meza Figueroa

El que suscribe, certifica que ha revisado esta tesis y que la encuentra en forma y contenido adecuada, como requerimiento parcial para obtener el Título de Grado en la Universidad de Sonora.

Dr. Lucas Ochoa Landin

El que suscribe, certifica que ha revisado esta tesis y que la encuentra en forma y contenido adecuada, como requerimiento parcial para obtener el Título de Grado en la Universidad de Sonora.

Dr. Martín Valencia Moreno

Atentamente

Dr. Rogelio Monreal Saavedra
Coordinador de Programa
Maestría en Ciencias-Geología



El saber de mis hijos
hará mi grandeza

**MAESTRIA EN
CIENCIAS**

**DEPARTAMENTO
DE GEOLOGIA**



"El saber de mis hijos
hará mi grandeza"

UNIVERSIDAD DE SONORA

División de Ciencias Exactas y Naturales
Departamento de Geología

F07

Hermosillo, Sonora, a 13 de Febrero de 2020

Dr. Rogelio Monreal Saavedra
Coordinador de Programa
Maestría en Ciencias-Geología
Departamento de Geología

Por medio de la presente, nos permitimos informarle que después de revisar y aprobar el trabajo de tesis del alumno **JORGE ALONSO BELTRÁN CABRERA**, hemos acordado que la presentación del examen de grado de la alumna se lleve a cabo el día Viernes 28 de febrero del 2020 a las 11:00 horas.

Sin otro particular, quedamos a la espera de su respuesta.

ATENTAMENTE
Comité de Tesis



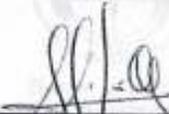
Dra. Diana Maria Meza Figueroa



Dr. Efrén Pérez Segura



Dr. Martin Valencia Moreno



Dr. Lucas Hilarío Ochoa Landin
Director de Tesis



C.c.p. Archivo



"El saber de mis hijos
hará mi grandeza"

UNIVERSIDAD DE SONORA

F08

División de Ciencias Exactas y Naturales
Departamento de Geología

Hermosillo, Sonora a 17 de febrero de 2020

Dr. Lucas Hilario Ochoa Landin
Director de Tesis

Por este conducto y en atención a la solicitud recibida el día de hoy, 17 de febrero del presente, le comunico que ha sido aprobada la fecha para la presentación de Examen de Grado del alumno **JORGE ALONSO BELTRÁN CABRERA** propuesta por el Comité de Tesis.

Dicho examen se llevará a cabo el día **viernes 28 de febrero del 2020 a las 11:00 horas** en el *Auditorio del Departamento de Investigación en Física*.

Sin otro en particular quedo de Usted

Atentamente

Dr. Rogelio Monreal Saavedra
Coordinador de Programa
Maestría en Ciencias-Geología



El saber de mis hijos
hará mi grandeza
**MAESTRIA EN
CIENCIAS
GEOLOGIA
DEPARTAMENTO
DE GEOLOGIA**

C.c.p. Archivo

DEDICATORIAS

A MI ESPOSA GABY

Este trabajo fue posible gracias a tu apoyo incondicional y aprecio. ¡Te agradezco el haberme ayudado en este trabajo, y llegar a mi vida! Te amo.

A MI MADRE Y HERMANAS

Les agradezco todo el apoyo y el amor incondicional todos estos años.

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, quisiera agradecer al Ing. Héctor Gutiérrez, gerente de Exploraciones Mineras Peñoles Hermosillo, por el apoyo incondicional para la elaboración de este estudio de tesis y por apoyar el desarrollo profesional.

Al Ing. Jaime López, por la paciencia, por todas las enseñanzas en campo, por transmitir todos esos años de experiencia.

A los demás compañeros Abel Botiller, Jorge Fuentes, Luis Matus, Miguel Jerónimo, Indira Guerrero y Verenice Carreño.

Mi más sincero agradecimiento al Dr. Lucas Ochoa, quien siempre con la disposición de ayudar y transmitir su conocimiento en yacimientos minerales, y cosas de la vida, ¡gracias profé!

Al Dr. Martin Valencia, por sus acertadas observaciones a esta tesis y la geoquímica del trabajo.

A la Dr. Diana Meza Figueroa, por el apoyo incondicional a lo largo del trayecto y sus valiosas enseñanzas y gusto por las ciencias.

Al Dr. Efrén Pérez, por sus valiosas observaciones a esta tesis y la ayuda con inclusiones fluidas.

A todas las personas que se han cruzado en mi camino y por haber influenciado en ser siempre una mejor persona, que me han enseñado cosas valiosas en la vida, y que siempre han mostrado fascinación por la vida y las ciencias, esto es un esfuerzo por dejar lo mejor de mí. ¡Siempre hay que mirar hacia las estrellas!

Contenido	
1. Introducción	22
1.1 Localización área de estudio.....	23
1.2 Fisiografía, clima y vegetación	24
1.3 Antecedentes	24
1.4 Objetivos	26
2. Marco teórico	27
2.1 Pórfidos de cobre.....	27
2.2 Pórfidos de cobre en el noroeste de México	29
3. Marco geológico regional	30
3.1 Rocas proterozoicas.....	30
3.2 Rocas paleozoicas	32
3.3 Rocas mesozoicas.....	32
3.4 Rocas cenozoicas.....	34
4. Geología área Los Humos	35
4.1 Rocas laramídicas / Cretácico	36
4.1.1 Rocas volcánicas	36
4.1.2 Rocas ígneas (Intrusivas).....	39
4.1.3 <i>Stocks</i> hipabísales cuarzo feldespáticos	45
4.2 Volcanismo Oligoceno-Mioceno.....	48
4.3 Estructuras.....	50
5. Metodología y procedimientos analíticos	53
5.1 Cartografía y muestreo	53
5.2 Petrografía	54
5.3 SWIR (Terracore)	55
5.3.1 Principios teóricos	56
5.3.2 Procedimiento e interpretación al modelo de alteración hidrotermal de sistemas pórfido de cobre.....	59
5.3.3 Selección de barrenos.....	62
5.4 Inclusiones fluidas	64
5.5 Geoquímica	66
6. Resultados	69
6.1 SWIR (TerraCore).....	69
6.2 Inclusiones fluidas	72

6.3	Geoquímica	76
6.4	Geoquímica de elementos mayores y trazas.....	78
7.	Mineralización y alteración hidrotermal (Paragénesis)	87
7.1	Mineralización	87
7.1.1	Estilo de mineralización.....	89
7.2	Tipos de vetillas	90
7.2.1	Vetillas pegmatíticas	90
7.2.2	Vetillas cuarzo – feldespato K.....	91
7.2.3	Vetillas cuarzo – sericita – sulfuro.....	91
7.2.4	Vetillas clorita ± carbonato ± epidota ± cuarzo	92
7.3	Alteración hidrotermal	94
7.3.1	Alteración de biotita secundaria	94
7.3.2	Alteración sericítica pervasiva	94
7.3.3	Alteración de clorita y propilítica	95
7.3.4	Alteración argílica	95
8.	Discusión	98
8.1	Geoquímica	98
8.2	Alteración hidrotermal (perspectiva espectral).....	98
8.2.1	Zonas con alteración argílica.....	114
8.2.2	Zonas de alteración fílica	114
8.2.3	Zonas con biotización.....	115
8.2.4	Zonas transicionales sódico-cálcicas.....	117
8.3	Zoneamiento de sulfuros.....	119
8.4	Sistema de mineralización y vectores	119
9.	Conclusiones	122
10.	Bibliografía	125
11.	Anexos	136

Lista de tablas y figuras

LISTA DE FIGURAS	Pág.
Figura 1. Mapa de localización del yacimiento Los Humos, Sonora, México	18
Figura 2. Esquema global de las mayores provincias de cobre (se habla en la figura de Cu fino contenido) clasificado en depósitos >24Mt y distritos supergigantes (Tomado y modificado de Sillitoe, 2012).	23
Figura 3. Esquema de la columna estratigráfica propuesta para el área del yacimiento pórfido de cobre Los Humos.	32
Figura 4. Plano geológico 1:2500 del área Los Humos, Caborca, Sonora.	33
Figura 5. Plano geológico del área Los Humos, mostrando lineamientos y fallas principales en el distrito. En líneas rojas, se resalta la presencia de los cuerpos de Cu-Mo en este proyecto.	47
Figura 6. Parte del espectro electromagnético donde se ubica la porción del infrarrojo de onda corta o SWIR (Tomado de Hauff, 2008).	52
Figura 7. Plataforma Intelicore, visualizador de barridos hiperespectrales y rasgos de absorción. Alu: Aluninta, Am: Anfíbol, Bt: Biotita, Car: Carbonato, Chl: Clorita, FltRsp: Sin Respuesta, Gp: yeso, H2O: Agua, Ill: Ilita, Kln: Caolinita, Mnt: Montmorillonita, Musc: Muscovita, Non: Nontronita.	54
Figura 8. Diagrama de asociaciones minerales de sistemas de alteración hidrotermal de Leach & Corbett, 1995.	56
Figura 9. Rangos composicionales dependiendo de la variación en nanómetros de la longitud de onda en SWIR.	57
Figura 10. Plano geológico del área de Los Humos, mostrando zonas seleccionadas para los barrenos analizados.	58
Figura 11. Equipo de laboratorio para inclusiones fluidas, microscopio Olympus, con equipo de micro termometría LINKAM, ubicado en el Laboratorio de microtermometría de la UNAM campus Juriquilla.	61
Figura 12. Resumen grafico del barrenos LH-302. Donde se observa una gráfica representando la relación de abundancia de distintos minerales hidrotermales del yacimiento. La asociación del mineral ilita por sí solo (longitud de onda 2200w), o a veces como una asociación ilita>esmectita, representa la zona fílica del sistema de los Humos, existen otras zonas con relaciones de ilita-muscovita (sericita) donde se pueden observar tendencias a zonas de mayor temperatura. Y la cual representa una transición hacia las zonas más potásicas y más calientes del yacimiento, dando a mostrar relaciones minerales como biotita (en escasas ocasiones se llega a observar inalterada o con sobreimposición de clorita y se puede observar sus principales rasgos de absorción en 2250w y 2340w) en donde muchas ocasiones se encuentra con una alteración muy representativa de estas zonas potásicas con biotita, de clorita, clorita-esmectita-seponita, que se puede reconocer como	66

una superposición en las etapas de enfriamiento de la zona causando la mineralización del sistema. Alu: Aluninta, Am: Anfíbol, Bt: Biotita, Car: Carbonato, Chl: Clorita, FltRsp: Sin Respuesta, Gp: yeso, H₂O: Agua, Ill: Illita, Kln: Caolinita, Mnt: Montmorillonita, Musc: Muscovita, Non: Nontronita, Sap: Saponita.

Figura 13. Microfotografías de inclusiones del yacimiento Los Humos, mostrando en A y B, inclusiones bifásicas en vetillas de Cz + Mo + Fk + Sul de la muestra 375-15m; relacionadas a mineralización tipo pórfido de cobre, en C y D de muestras LH-IF04 y LH-IF-07 que corresponden a inclusiones bifásicas L+V en vetillas de cuarzo + sulfuro. Cz: cuarzo; Mo: molibdenita; Fk: feldespato potásico; Sul: sulfuro. 68

Figura 14. Histograma de salinidad y temperatura de homogenización de las inclusiones fluidas en vetillas mineralizadas del yacimiento tipo pórfido de cobre Los Humos. 69

Figura 15. Gráfica de salinidad Vs temperatura de homogenización, de las inclusiones fluidas estudiadas, mostrando poblaciones diferentes. Notar el cambio de temperaturas en vetillas cuarzo + molibdeno, con respecto a vetillas de cuarzo + biotita. 70

Figura 16. Diagramas de variación de sílice de elementos mayores tipo Harker. Los resultados de elementos mayores en óxidos fueron recalculados al 100%, con base anhidra. En el diagrama de variación K₂O vs Si₂O se muestran los límites de Peccerillo and Taylor (1976). 75-76

Figura 17. Diagrama de clasificación de rocas plutónicas propuesto por Middlemost, 1994. Alcalis totales (K₂O + Na₂O) Vs SiO₂. La línea sólida refiere a los campos sub-alcalino y alcalino de acuerdo con Irvine and Baragar (1971). Notar que todas las muestras del prospecto Los Humos corresponden al campo sub-alcalino, y corresponden a rocas que van desde monzonita a granito. 77

Figura 18. Diagrama AFM mostrando los límites para rocas calco-alcalinas y toleíticas de Irvine and Baragar (1971). Todas las muestras describen un patrón de evolución reduciendo su contenido en FeO y MgO. Donde A: K₂O + Na₂O; F: Fe total, recalculado de Fe₂O₃ (FeO^T = FeO + 0.89981 * Fe₂O₃); M: MgO. Los valores para esta gráfica fueron recalculados al 100%. 78

Figura 19. Patrones de tierras raras normalizado a condrita de Sun & McDonough, 1989, del pórfido de cobre Los Humos, donde el espectro de REE se caracteriza por valores relativamente mayores de LREE comparado con las HREE, y presentan todas estas rocas intrusivas una leve anomalía negativa de Eu. En banda roca se presentan el espectro de las rocas intrusivas laramídicas de la porción centro de Sonora (Valencia-Moreno et al, 2001). 79

Figura 20. Patrones de elementos multi-elementales de muestras del pórfido de cobre Los Humos, normalizado a manto primitivo de Sun & McDonough, 1989. Todas las concentraciones son en ppm, K, P y Ti fueron calculados de los resultados de elementos mayores en óxidos dados en la tabla 5. Todas las rocas muestran patrones similares, caracterizados por las anomalías negativas de Nb-Ta, P, Ti, y suavemente en Y. además de anomalías positivas de Rb, Th, y K. Estas anomalías son características de magmas generados en ambientes tectónicos de arcos volcánicos. 80

Figura 21. Diagrama de discriminación tectónica de Y-Nb indicando los campos de Pearce et al, 1984. Todas las muestras se encuentran dentro de una misma región en el campo de 81

los Granitos de arco volcánico (VAG). VAG + Syn-COLG: arcos volcánicos y granitos sin-colisionales; WPG: Granitos intraplaca; ORG: Granitos de limite oceánico.

Figura 22. Muestras representativas del yacimiento Los Humos, donde se observan distintos estilos de mineralización y halo de alteración en vetillas. En A) vetilla de cuarzo- feldespato K-calcopirita-pirita-molibdenita con halo de alteración potásica. Menor alteración de biotita secundaria y calcopirita diseminada presente. LH-170 138.8M. B) Calcopirita diseminada en monzonita de grano medio con alteración de biotita secundaria. LH-124. C) Vetilla pegmatítica con cuarzo-feldespato K-calcopirita-molibdenita en monzonita de grano medio-fino. LH-184 487m. D) Vetilla de cuarzo-calcopirita-molibdenita con halo de alteración filica en monzonita de grano medio. LH-515. E) Vetilla de cuarzo-molibdeno con alteración de biotita secundaria con superposición de alteración filica. LH-514. F) Vetilla cuarzo-feldespato-k-molibdenita con halo de alteración potásica y menor biotita secundaria. Qz: cuarzo, Bt: biotita, Ser: sericita, FldK: feldespato potásico, Mo: molibdenita, Py: pirita, Cpy: calcopirita. 88

Figura 23. Secuencia paragenética propuesta para la evolución de la alteración-mineralización del pórfido de cobre Los Humos. 92

Figura 24. Sección L00 geológica y de alteración, donde se observan parámetros interpretativos de las zonas de alteración hidrotermal relacionadas a la mineralización del yacimiento en envolventes punteadas. 97

Figura 25. Resumen grafico del barreno LH-308. Donde se observa una gráfica representando la relación de abundancia de distintos minerales hidrotermales del yacimiento. La figura muestra una zona en los primeros 350m del barreno con alteraciones superpuestas en donde posiblemente hubo biotización, la superposición se distingue con agregados finos de Clorita – Carbonato los cuales están reemplazando. En los patrones de longitud de onda 2200W se aprecia un incremento en mineralogías ricas en K en estas zonas, y en 2240W se observa un incremento en minerales ricos en Mg. Alu: Alunita, Am: Anfíbol, Bt: Biotita, Car: Carbonato, Chl: Clorita, FltRsp: Sin Respuesta, Gp: yeso, H2O: Agua, Ill: Ilita, Kln: Caolinita, Mnt: Montmorillonita, Musc: Muscovita, Non: Nontronita. 98

Figura 26. Sección NE150 geológica y de alteración, donde se observan parámetros interpretativos de las zonas de alteración hidrotermal relacionadas a la mineralización del yacimiento en envolventes punteadas. 100

Figura 27. Resumen grafico del barreno LH-302. Donde se observa una gráfica representando la relación de abundancia de distintos minerales hidrotermales del yacimiento. La asociación del mineral ilita por sí solo, o a veces como una asociación ilita>esmeclita, representa la zona filica del sistema de los Humos, existen otras zonas con relaciones de ilita-muscovita (sericita) donde se pueden observar tendencias a zonas de mayor- -temperatura. Y la cual representa una transición hacia las zonas más potásicas y más calientes del yacimiento, dando a mostrar relaciones minerales como biotita (en escasas ocasiones se llega a observar inalterada o con superposición de clorita) en donde muchas ocasiones se encuentra con una alteración muy representativa de estas zonas potásicas con biotita, de clorita, clorita-esmeclita-seponita, que se puede reconocer como una superposición en las etapas de enfriamiento de la zona causando la mineralización del sistema. Alu: Alunita, Am: Anfíbol, Bt: Biotita, Car: Carbonato, Chl: Clorita, FltRsp: Sin Respuesta, Gp: yeso, H2O: Agua, Ill: Ilita, Kln: Caolinita, Mnt: Montmorillonita, Musc: Muscovita, Non: Nontronita. 101

-
- Figura 28. LH-290 donde se muestra variación en longitud de onda W2180-2232, en la cual se observan variaciones composicionales en Al-OH en la parte superior del barreno con variaciones en la longitud de onda entre 2205-2210 nm que indican una variedad de arcillas (ilita) con K en su estructura, la cual indica mayor índice de temperatura formacional. Alu: Aluninta, Am: Anfíbol, Bt: Biotita, Car: Carbonato, Chl: Clorita, FltRsp: Sin Respuesta, Gp: yeso, H2O: Agua, Ill: Iilita, Kln: Caolinita, Mnt: Montmorillonita, Musc: Muscovita, Non: Nontronita. 102
- Figura 29. Sección SW150 geológica y de alteración, donde se observan parámetros interpretativos de las zonas de alteración hidrotermal relacionadas a la mineralización del yacimiento en envolventes punteadas. 104
- Figura 30. Se observa de izquierda a derecha, cajas de núcleo con alteraciones sobreimpuestas, mascara general de presencia de distintas alteraciones. Última imagen se observan patrones de cambio de los minerales aluminosilicatos (en los rasgos de 2200W sericita de ilita), donde se pueden observar cambios en la longitud de onda de estos minerales con mayor tendencia a Al<K en las longitudes de onda w2200, salvo en la zona más superficial del barreno con sericita rica en Al. Alu: Alunita, Am: Anfíbol, Bt: Biotita, Car: Carbonato, Chl: Clorita, FltRsp: Sin Respuesta, Gp: yeso, H2O: Agua, Ill: Iilita, Kln: Caolinita, Mnt: Montmorillonita, Musc: Muscovita, Non: Nontronita. 105
- Figura 31. Sección SW450 geológica y de alteración, donde se observan parámetros interpretativos de las zonas de alteración hidrotermal relacionadas a la mineralización del yacimiento en envolventes punteadas. 107
- Figura 32. Mostrando diversas longitudes de onda W2180-2232 variaciones de Al en filosilicatos (Al-OH) donde se observan ligeras variaciones en las zonas media superior del barreno con tendencias en longitudes de onda >2205 (Al/K) y en W2300-2370 variaciones en los minerales ferromagnesianos (entre 2320-2340nm) se observan principalmente valores intermedios donde se destacan minerales como clorita-Mg, flogopita, y anfíbol (actinolita-horblenda). Alu: Alunita, Am: Anfíbol, Bt: Biotita, Car: Carbonato, Chl: Clorita, FltRsp: Sin Respuesta, Gp: yeso, H2O: Agua, Ill: Iilita, Kln: Caolinita, Mnt: Montmorillonita, Musc: Muscovita, Non: Nontronita. 108
- Figura 33. LH-514, mostrando de izquierda a derecha, cajas de núcleo con sobreimposición de colores de alteración, resumen de presencia de alteraciones en barreno, y características de longitudes de onda de W2200 y W2340, donde se puede destacar que en W2200 corresponde a una transición en el barreno de arcillas meramente Al/K a sericita de mayor contenido de Al en el fondo. En W2340 se observa principalmente en la zona de cloritas y biotita una media en las longitudes de onda entre 2320-2340 que correspondería a minerales mayormente magnesianos como clorita-biotita. A su vez se observa la relación de mineralización a la extrema derecha. Alu: Alunita, Am: Anfíbol, Bt: Biotita, Car: Carbonato, Chl: Clorita, FltRsp: Sin Respuesta, Gp: yeso, H2O: Agua, Ill: Iilita, Kln: Caolinita, Mnt: Montmorillonita, Musc: Muscovita, Non: Nontronita. 111
- Figura 34. Barreno LH-265, mostrando de izquierda a derecha, esquema de cajas de núcleo con sobreimposición de colores de alteración, resumen de presencia de alteraciones en todo el núcleo, y características de longitudes de onda W2200 y W2340, en donde destaca en W2200 las características principales de arcillas al comienzo del barreno con una tendencia más Al/K, mientras que al fondo se logra apreciar una zona levemente rica en Al, que se sobrepone a otra alteración de clorita-anfíbol, esta se observa en W2340 con un dominio de 113

minerales magnesianos al fondo del barreno. Alu: Alunita, Am: Anfíbol, Bt: Biotita, Car: Carbonato, Chl: Clorita, FltRsp: Sin Respuesta, Gp: yeso, H₂O: Agua, Ill: Ilita, Kln: Caolinita, Mnt: Montmorillonita, Musc: Muscovita, Non: Nontronita

Figura 35. Esquema representativo geológico y paragenético de la distribución de vetillas y mineralización del sistema pórfido Cu-Mo Los Humos. 115

LISTA DE FOTOGRAFÍAS Pág.

Foto 1. Fotografía de afloramiento de rocas andesíticas correlacionables con el complejo volcánico El Charro, con alteración propilítica en arroyo al norte del área. 34

Foto 2. Roca Monzonita de grano fino a medio, en A) se observa roca con alteración argílica selectiva moderada en feldespatos, y vetilla de Qz + Mo + halo de alteración filica. B) y C) Microfotografía en sección delgada de la muestra Pjb-29, en 4X en nicols paralelos y nicols cruzados. Se observa monzonita de grano fino, con intecrecimiento de cuarzo y vetilla de sulfuro cortando a la roca. Vtl: Vetilla, Qz: Cuarzo, Mo: Molibdenita, Fl: Filica, Sul: sulfuro 36

Foto 3. A) Roca cuarzomonzonita con textura porfídica, con presencia de alteración de biotita secundaria con sulfuros diseminados. B) y C) Microfotografía en luz transmitida de la muestra Pjb-11, en 4X con nicols paralelos y nicols cruzados. Se muestra parte de la alteración de biotita secundaria con sulfuros diseminados opacos que a su vez están siendo alterados por clorita, y una mineralogía de cristales de cuarzo-feldespato. Bt: Biotita, Chl: Clorita, Sul: Sulfuro, Fldk: Feldespato potásico 37

Foto 4. Fotografía de obra minera, la roca corresponde a la roca de caja cuarzomonzonita de grano medio, y se logra apreciar una serie de vetillas sub-paralelas en forma de enjambre. Vtl: Vetilla, Qz: Cuarzo, Cu: Cobre, Mo: Molibdenita. 37

Foto 5. En A) y B) roca granodiorita de grano medio, microfotografía en luz transmitida de la muestra Pjb-23. Nicols Paralelos y Nicols Cruzados en aumento de 4X. Qz: Cuarzo, Bt: Biotita, Fk: Feldespato potásico, Plg: Plagioclasa. 39

Foto 6. Mostrando en un afloramiento el stock de cuarzo-feldespato, con textura porfídica, con cristales blancos de feldespatos (2-4mm) en compañía de cuarzo, sostenidos en una matriz fina. 41

Foto 7. Microfotografía de luz transmitida de la muestra Pjb-26. Roca hipabisal con textura porfídica y composición monzonítica, presentando alteración potásica de biotita en hojuelas alterando posibles anfíboles, 4x, LN. Bt: Biotita, Hid: Hidrotermal. 41

Foto 8. Microfotografía de luz transmitida de la muestra Pjb-20. 4x nicols paralelos/nicols cruzados en A) y B). Mostrando en NP y NC, fragmento de cristal de cuarzo con textura golfos de corrosión en roca pórfido cuarzo feldespático. Microfotografía de luz transmitida de la muestra Pjb-26. 4x nicols paralelos/nicols cruzados en C) y D); mostrando textura porfídica, cristales de cuarzo sub-redondeados, con tamaños de hasta 3 mm los mayores. Se pueden observar pequeños conjuntos de minerales café-verdosos en parte de la matriz donde además se observan minerales opacos que corresponden a sulfuros de pirita-calcopirita fina. 42

E) y F); cristales de feldespato-K y plagioclasa levemente alterados por sericita y matriz, a la vez siendo cortado por vetilla de cuarzo + sulfuro (cpy>py). Qz: Cuarzo, Plg: Plagioclasa, Vtlla: Vetilla, Sul: Sulfuro.	
Foto 9. Mostrando zona alta de la sierra San Manuel al este del yacimiento Los Humos, que corresponde a una secuencia de lavas con composiciones riolíticas – andesíticas en las partes bajas.	44
Foto 10. Mostrando microscopio petrográfico marca Olympus, donde se realizaron los estudios con luz transmitida y reflejada, ubicado en el Departamento de Geología de la Universidad de Sonora.	49
Foto 11. Microfotografía de la muestra IFJB-02 en sección pulida realizada de zona de enriquecimiento del yacimiento Los Humos. Se observa una matriz de cuarzo, con óxidos de hierro rodeando pequeños cristales de cobre nativo. Qz: cuarzo, Fe: fierro, Ox: óxidos, Cu na: cobre nativo. NC. A: nicoles no cruzados, B: nicoles cruzados.	82
Foto 12. Microfotografía de la muestra IFJB-03, mostrando en luz reflejada la presencia de cristales subhedrales de pirita (Py) y calcopirita (Cpy) con una textura de disolución 10x, NC.	83
Foto 13. Microfotografía de la muestra 370.45, mostrando en A y B la presencia de una delgada vetilla de cuarzo (Qz) – molibdenita (Mo) de 4mm de ancho, con un halo potásico en los bordes, 10x, NC. A: nicoles no cruzados, B: nicoles cruzados	84

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Principales rasgos de absorción distinguidos en el infrarrojo de onda corta (SWIR) y grupos minerales asociados (tomado y modificado de Hauff, 2008).	53
Tabla 2. Muestras para geoquímica tomadas en el área de Los Humos.	63
Tabla 3. Mostrando resultados de análisis microtermométricos en inclusiones fluidas. T _{m-ice} = Temperatura de fusión de hielo; T _h = Temperatura de homogeneización; Qz = Cuarzo; SUL = Sulfuros (pirita, calcopirita); Bt = Biotita; Mo = Molibdenita; Fk = Feldespato Alcalino.	67
Tabla 4. Análisis de concentración de elementos mayores, obtenidos mediante fluorescencia de rayos-X (XRF-26) por ALS Minerals. # Mg: número de magnesio representa 100 veces el radio molar de MgO / (MgO + FeO). A/CNK: radio de álcalis basado en las proporciones molares Al ₂ O ₃ / (CaO + Na ₂ O + K ₂ O).	71
Tabla 5. Análisis de concentración de elementos trazas y REE obtenidos mediante ICP-MS, con la excepción del Pb. Datos medidos en los laboratorios de ALS Minerals.	72

Resumen

El yacimiento tipo pórfido de cobre Los Humos (Cu-Mo), se ubica en la zona mineralizada San Manuel a 55 Km de la ciudad de Caborca. El yacimiento muestra características magmático-hidrotermal bien desarrolladas por el emplazamiento de stocks porfídicos y el desarrollo de alteraciones tipo pórfido. En este yacimiento se pueden observar zonas de alteración tipo fílica, argílica, y potásica con variaciones interesantes las cuales suelen tener asociaciones con mineralización de Cu-Mo, en minerales como calcopirita, bornita, asociaciones de óxidos verdes de Cu como malaquita, crisocola, azurita.

El estudio se utilizaron diversas técnicas analíticas para poder caracterizar los diferentes procesos asociados a la formación del yacimiento, en la que se realizaron análisis petrográficos-minerográficos, análisis de elementos mayores, trazas y tierras raras, barridos hiperspectrales SWIR, inclusiones fluidas. Con el uso de estas técnicas, las observaciones en el yacimiento fueron más asertivas en cuanto a formación, alteración y paragénesis mineral las cuales fue clave para entender los procesos dentro del yacimiento.

De acuerdo con los resultados de este trabajo, las rocas intrusivas relacionadas al arco volcánico laramídico están compuestas principalmente de rocas graníticas a monzonitas, con variaciones texturales y contenido en cuarzo que se designan como stocks hipabísales cuarzomonzoníticas y cuarzo-feldespáticos. El sistema pórfido Los Humos también se caracteriza por contener un intrincado vetilleo con mineralización económica de Cu-Mo asociada al yacimiento, y tanto las alteraciones constriñen relaciones importantes en el zoneamiento y acumulación de la mineralización.

El desarrollo de este trabajo principalmente los barridos hiperespectrales, llevan a la apreciación de zonas fuertemente erosionadas en esta zona del país, que puede ser muy eficaz en la generación de nuevas áreas de exploración.

Abstract

Los Humos Deposit (Cu-Mo), localized in the mineralized zone called San Manuel in the Northwest of Sonora, belongs to a porphyry copper deposit type, which presents characteristics of a very well developed magmatic-hydrothermal system. It can be seen swarms of veinlets with Cu-Mo mineralization, and hydrothermal alteration very well developed in which are composed principally by filic, potassic and propylitic alterations the most developed. In addition, the denudation of upper parts of the system resulted in the creation of conditions of supergenesis in the San Manuel mineralized zone, its characteristics are comprised of areas of argillic alteration where it is replacing much of the host rocks in the area, with developments of local enrichment areas.

This research was developed based on knowing the aspects related to mineralization and alteration, where hyperspectral analyzes were used to define the areas of alteration. In addition, the geochemistry of total rock and trace elements presents its evolutionary and compositional context of quartzmonzonitic rocks and its relationship with porphyry copper systems such as Los Humos.

According to the results of this work, the volcanic arc rocks related to the deposit are composed principally by granitoids of the monzonite, quartzmonzonite, granite and granodiorite rock type, among sub-volcanic rock bodies with porphyric textures, alteration and mineralization associated to the porphyry system of Los Humos. These characteristics were fundamental for the intricate development of veining and economic mineralization associated with the deposit, in addition, the alterations constrict important relationships for the accumulation of metallic minerals in the zones of potassic alteration.

The development of this work leads to the appreciation of spectral analysis methodologies for heavily eroded areas in this part of the country, which can be very useful for the generation of new exploration areas.

1. Introducción

El yacimiento Los Humos está ubicado en las inmediaciones de la sierra San Manuel en el municipio de Altar, Sonora. Consiste esencialmente de rocas andesíticas del Cretácico tardío que son intrusionadas por una serie de eventos magmáticos relacionados al arco magmático Larámide, que varían en composición de monzonita, cuarzomonzonita, stocks porfídicos hipabísales hasta granito. Los intrusivos relacionados al arco Larámide están asociados con mineralización estilo pórfido de Cu-Mo que ocurre en algunos centros, que incluyen las zonas La Margarita (Damon, 1983), el Arenoso, Elizabeth, Elizabeth sur, La Pipa, Picacho, Mina Los Leones (Damon, 1983), entre otras. En las rocas Larámide y otras rocas huéspedes se encuentran sobrepuestas una serie de vetillas y alteración magmático-hidrotermal que conforman el depósito pórfido de Cu-Mo, y la distribución e intensidad de éstas han servido como guía de exploración hacia los centros mineralizados del sistema.

La zona por su posición geográfica fue afectada severamente por la extensión del Mioceno conocida como *Basin & Range* (Dickinson, 2002), la cual erosionó parte del yacimiento, y sobre las rocas intrusivas se depositaron secuencias volcánicas máficas y félsicas subáreas, así como el emplazamiento de diques y sedimentos recientes del Cuaternario.

El actual estudio, se utiliza la tecnología SWIR en barridos hiperespectrales para identificar las distintas características que posee el yacimiento, en cuanto a estilos de mineralización, alteración, y rocas afectadas en el área. Dichos estudios se presentan de tal manera que se pueda comprender mejor esta porción del noroeste de Sonora, y poder extrapolar estas aplicaciones y metodologías para la exploración mineral.

1.1 Localización área de estudio

El yacimiento Los Humos, está ubicada en la porción nor-oeste del estado de Sonora, México, en el municipio de Altar. El acceso al área es por la carretera conocida como “El Arenoso” rumbo al norte recorriendo una distancia de 55 kilómetros desde la ciudad de Caborca, dentro de las coordenadas 397000 E, 3443000 N. El área de estudio se encuentra dentro de la provincia árida del Desierto de Altar, con una altitud variable entre los 600 y 700 msnm (Figura 1).

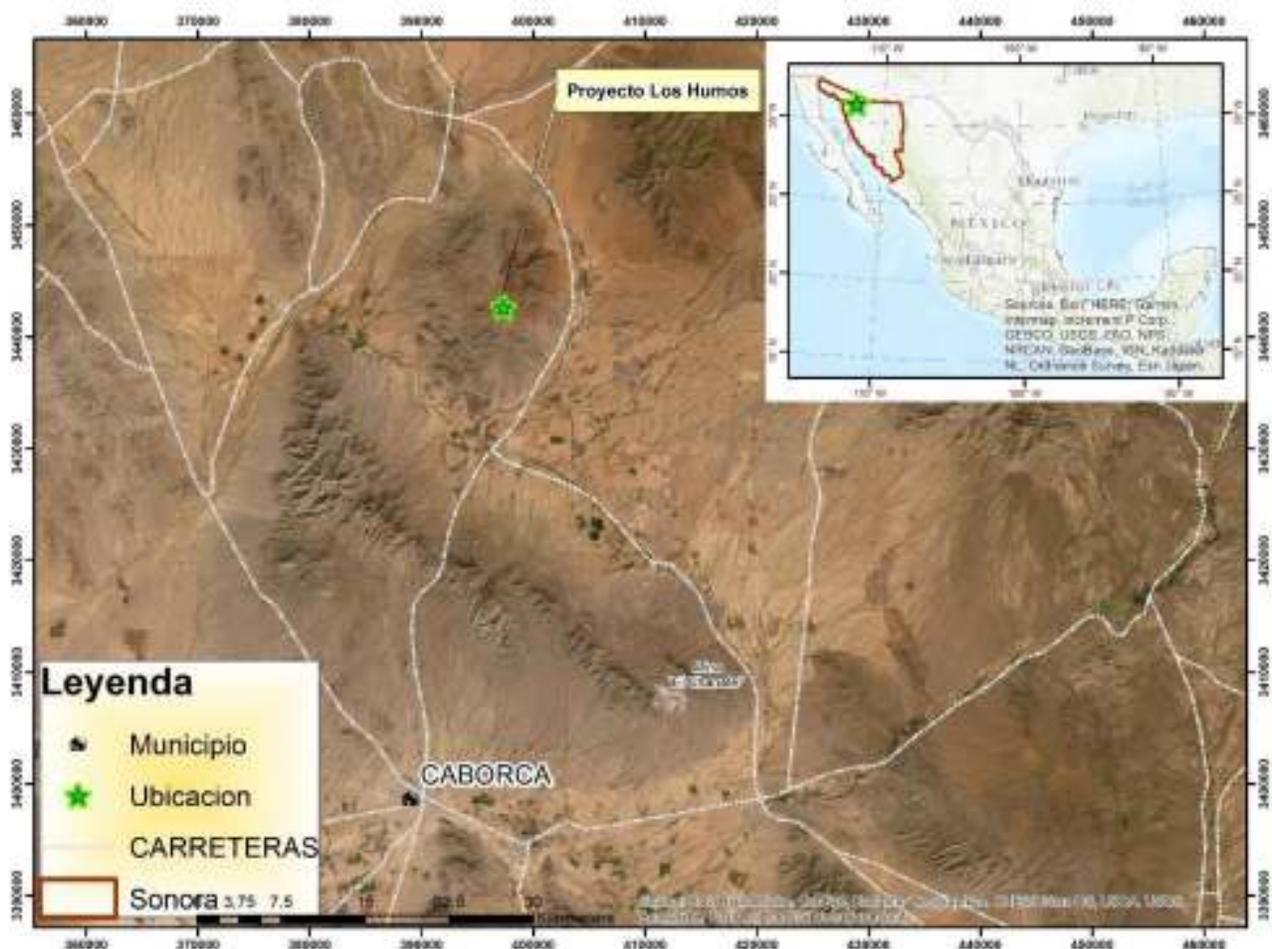


Figura 1. Mapa de localización del yacimiento Los Humos, Sonora, México

1.2 Fisiografía, clima y vegetación

El área donde se localiza el yacimiento Los Humos, ubicada a 55 km al norte de la ciudad de Caborca, es incluida dentro de una región que ha sido descrita y definida de diferentes formas por diversos autores. Dentro de los más destacados se tiene a Ordóñez, (1936) que lo define como Desierto de Sonora, Provincia de sierras sepultadas por Raisz, (1959), Provincia desértica de Sonora por Álvarez (1961), Llanura del noroeste por Alcorta (1964), Provincia de Sonora por López-Ramos, (1979), Llanura sonorensis por Quiñones, (1987) y Sierras y valles de Sonora por De Cserna, (1989).

Esta región ha sido expuesta a etapas de deformación y metamorfismo durante el Precámbrico, Paleozoico, y el Mesozoico, con rocas tan antiguas como 1700-1800 Ma, fechadas por Anderson y Silver, (1981). Fisiográficamente, esta provincia está formada fundamentalmente de sierras paralelas, con dirección NNW-SSE delimitadas por llanuras extensas de aluviones, los cuales se hacen más amplias hacia la costa. Esta provincia en la que domina el clima árido, consiste de una planicie extensa sobre la que hay numerosas montañas y elevaciones que van aumentando gradualmente desde la costa del Golfo de California hacia el oriente conforme se acerca a la provincia de la Sierra Madre Occidental.

1.3 Antecedentes

La zona del proyecto Los Humos, ha sido amplia e intensamente explorada por diversas compañías mineras, entre las que destacan Asarco, Magma (BHP), Rio Algom, y P cobre (asociación Peñoles-Codelco). La compañía minera Magma (BHP), en su campaña de barrenación interceptó una zona de 100-200 metros de ancho con mineralización de

sulfuros oxidados, con un delgado e irregular “*blanquet*” de enriquecimiento supergénico compuesto de calcosita y menor presencia de sulfuros primarios del tipo calcopirita.

El principal objetivo de las campañas previas a Peñoles fue el de verificar el cuerpo mineralizado identificado por Magma (BHP), implementando programas de exploración con el propósito de evaluar esta zona e incrementar el potencial con zonas de mayor ley susceptibles a explotarse.

Por otro lado, el proyecto Los Humos, cuenta con pocas publicaciones en artículos académicos donde describen algunas edades de la mineralización y rocas hospedantes, breves estudios sobre inclusiones fluidas y muy poca descripción de la geología del área. El primero en publicar un artículo relacionado al área del yacimiento Los Humos, fue Damon et al, (1983), donde sugiere una edad del yacimiento, fechando un intrusivo granítico; otro fue Esquivias-Flores J.A. (1998), con una tesis de Maestría en la Universidad de Arizona, donde relaciono, mediante inclusiones fluidas medidas en vetillas mineralizadas de rocas intrusivas de los yacimientos, varios depósitos tipo pórfido de cobre en el noroeste de México. Barra y Valencia (2014) publicaron una edad para la mineralización del depósito, utilizando la técnica de Re-Os en molibdenita, y lo relacionan con otros depósitos de este tipo en la región. Recientemente, Beltrán-Cabrera (2016) en una tesis de Licenciatura de la Universidad de Sonora, realizó un estudio de la alteración hidrotermal del depósito, utilizando Espectrometría De Reflectancia Del Infrarrojo Cercano (SWIR, por sus siglas en inglés).

1.4 Objetivos

El objetivo principal en el estudio del proyecto Los Humos, es el de realizar un análisis e investigación centrada en la relación espacial, temporal y genética del magmatismo laramídico con el desarrollo y formación de este depósito magmático hidrotermal tipo pórfido de cobre.

En este estudio se pretende caracterizar geológica y geoquímicamente este yacimiento, definir su evolución tectónica y caracterizar sus diferentes etapas de mineralización-alteración, llevando a cabo diversas metodologías, entre las que estarían:

- Cartografiar el área de estudio a una escala 1:2500, además de definir eventos y paragénesis mineralógicas del depósito.
- Caracterización geoquímica de los intrusivos, y rocas que afloran en el área de estudio.
- Determinar ambientes de formación de este yacimiento (T, P, densidad y composición de los fluidos), utilizando técnicas de microtermometría.
- Definición del modelo de alteración mediante barridos hiperespectrales SWIR, con la elaboración de secciones geológicas estratégicas.

2. Marco teórico

2.1 Pórfidos de cobre

Los sistemas pórfidos de cobre comprenden una gama de depósitos relacionados a menas de cobre, cobre-molibdeno, cobre-oro y otras menas importantes de W, Sn, como subproductos de estos. A su vez están relacionados a diversos yacimientos que incluyen diferentes tipos de depósitos de menor magnitud, volumen y estilo de mineralización, como aquellos en contacto o cercanos a las intrusiones, formando cuerpos de skarn, reemplazamientos, zonas de vetas y cuerpos brechados relacionados a los *stocks* hipabísales y, en las zonas más altas de estos sistemas, depósitos de alta a baja sulfuración (Lowell & Guilbert, 1970; Sillitoe, 1973, 1985, 2010; Richards, 2003).

En la actualidad este tipo de yacimientos contienen las mayores reservas mundiales en Cu-Mo, se encuentran principalmente relacionados a arcos magmáticos en zonas de subducción en límites de placas convergentes con presencia de actividad sub-volcánica del arco (Figura 2), y están asociados al emplazamiento de cuerpos magmáticos a poca profundidad y subsiguiente enfriamiento de intrusiones porfidicas (Sillitoe, 1972, 1996).

Son sistemas someros relacionados a procesos de diferenciación magmática, metasomatismo profundo, y alteración hidrotermal a lo largo de su complejo sistema evolutivo. Principalmente se refieren a sus zonas de alteración y mineralización como sistemas concéntricos, que presentan zoneamiento y superposición de alteraciones producidas por efectos metasomáticos que interactúan por fluido-roca y despliegan una serie de alteraciones, de las cuales las más tradicionales y conocidas corresponden a: sódico-

cálcica, feldespato potásico, fílica, argílica y propílica (Sillitoe, 1973, 1985, 2010; Lowell & Guilbert, 1970).

Las zonas de alteración-mineralización cubren extensos kilómetros cúbicos de roca alterada y grandes volúmenes de mineral, en algunos casos con extraordinario contenido de cobre (Singer, 1995, Laznicka, 1999).

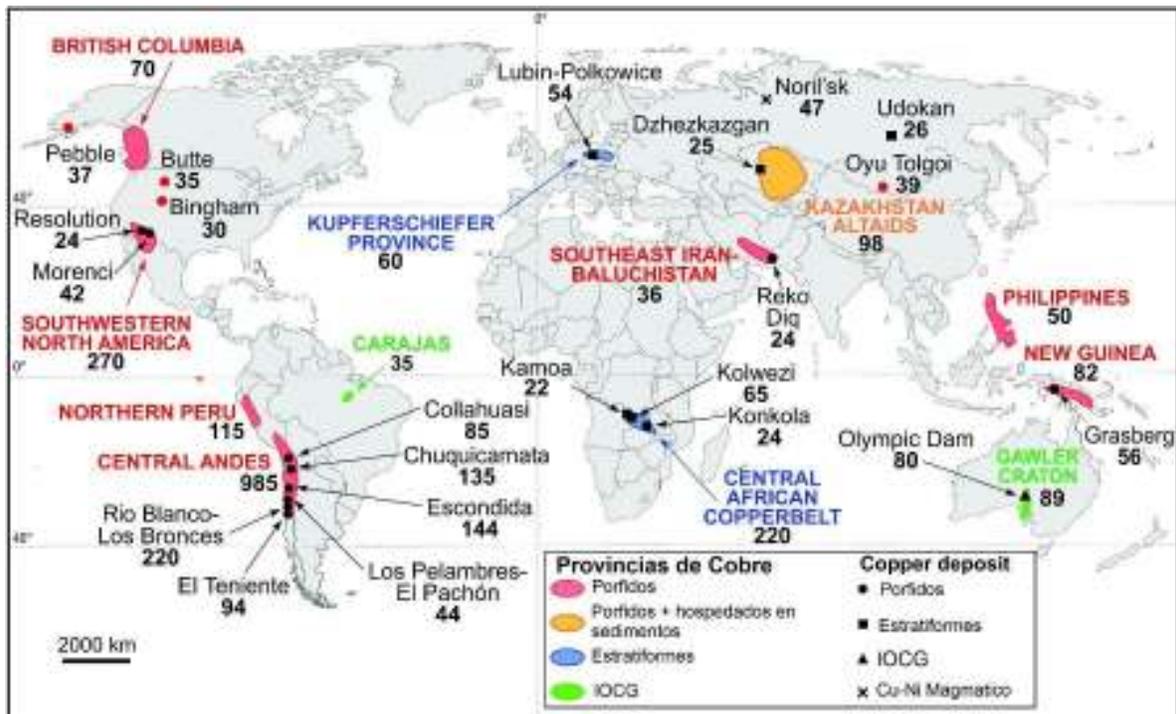


Figura 2. Esquema global de las mayores provincias de cobre (se habla en la figura de Cu metálico contenido) clasificado en depósitos >24Mt y distritos supergigantes (Tomado y modificado de Sillitoe, 2012).

2.2 Pórfidos de cobre en el noroeste de México

En el noroeste de México se conocen varios yacimientos minerales asociados a sistemas pórfido de cobre, estos se han detallado como parte de la evolución del arco magmático laramídico, la mayoría formados entre el Cretácico superior al Eoceno temprano (Valencia-Moreno *et al.*, 2006, 2007). Entre estos depósitos dos de ellos pueden ser catalogados de clase mundial, como es el caso de Buenavista del Cobre en Cananea Sonora y La Caridad en Nacozari de García, los cuales se incluyen dentro del cinturón de pórfidos de Cu-Mo en la franja oeste de Norte América.

En la parte centro-este de Sonora, algunos depósitos de este tipo se encuentran en la etapa de explotación, como es el caso de Buenavista del Cobre, La Caridad, Milpillas, Mariquita y Piedras Verdes y muchos proyectos en fase de exploración. En cambio, en el noroeste del Estado nuevos prospectos están surgiendo para su exploración como el caso de la porción de Caborca, la cual contiene dos de los yacimientos tipo pórfido más antiguos en relación al arco magmático laramídico, tales como Fortuna de Cobre (74.6 ± 1.3 Ma) *in* Salvatierra-Domínguez, 2000 y Los Humos (73.5 ± 0.2 Ma) *in* Barra & Valencia, 2014, caracterizados por rocas encajonantes del tipo cuarzomonzonita, intrusionadas por *stocks* porfídicos de carácter monzonítico – cuarzomonzonítico. Este tipo de yacimiento tipo pórfido de cobre presentan estilos de mineralización muy similares con mineralización diseminada, zonas de “stockwork” y brechas magmático-hidrotermales, las cuales presentan mineralización tanto en óxidos de cobre-ferro relacionado a las zonas supergénicas muy erosionadas, además en la zona de sulfuros se observa calcopirita – molibdenita principalmente. Estos depósitos se encuentran al oeste de la principal franja de pórfidos.

El noroeste de México se han descubierto cantidad de yacimientos de Cu de gran tamaño, los cuales han sido importantes para la economía del país, el desarrollo de exploración e investigación en conjunto de estos depósitos seguramente llevaran a mayores descubrimientos y un mejor enfoque en la exploración y optimización de recursos para los mismos. El reto en las porciones costeras de Sonora, y gran parte del Noroeste de México, conlleva un desafío aun mayor debido a la gran erosión de estos sistemas y sepultamiento de los yacimientos, por lo que el uso y evaluación de diferentes técnicas será crucial para este tipo de búsquedas en zonas complejas.

3. Marco geológico regional

La geología expuesta en gran parte de la región del noroeste de Sonora se compone de una amplia gama de rocas que abarcan desde sedimentos metamórficos del Proterozoico, hasta intrusiones complejas de arcos magmáticos hasta volcanismo depositado en esta región, con un amplio rango de edades que van desde el Precámbrico hasta el reciente. En este capítulo se describen, de manera general, las unidades litológicas que afloran en el noroeste del estado, iniciando desde las más antiguas a las más recientes.

3.1 Rocas proterozoicas

De las rocas más antiguas y que comprenden a los cinturones de corteza precámbrica con edades de más de 1.8 Ga, en el noroeste de México, es aquel que corresponde al bloque Caborca. Este bloque se compone principalmente de protolitos de rocas volcánicas, granitos y pegmatitas con edades entre 1.6 – 1.8 G.a correspondientes al Paleoproterozoico (Silver y Anderson, 1974; Anderson y Silver, 1981; Iriondo y Premo, 2011). Valenzuela-Navarro *et al.*, (2003 y 2005) describen rocas paleoproterozoicas en la región de Opodepe en Sonora

central, así como la unidad granítica El Crestón con edades de U-Pb en zircones de $1,730 \pm 9$ Ma. Trabajos más recientes reportan la presencia de un basamento Paleoproterozoico en Sierra Prieta y Cerro Prieto-Carina al NW de Caborca (Izaguirre-Pompa e Iriondo, 2007; Izaguirre *et al.*, 2008; Izaguirre-Pompa, 2009), los de Cerro San Luisito (Gutiérrez-Coronado *et al.*, 2008). En otra zona más cercana a la región de Caborca, al este del rancho Bámori, se encuentra el Cerro Rajón, un intrusivo con una edad U-Pb de $1,703 \pm 12$ Ma fue fechado por Premo *et al.*, (2003). Trabajos más recientes del basamento Paleoproterozoico (Iriondo y Premo, 2011) han descrito unidades que afloran en la provincia conocida como Yavapai, y que los describen como granitoides de ambientes de arco de islas.

Rocas graníticas anorogénicas del Mesoproterozoico en Sonora, han sido definidas en Cananea, en lo que se conoce como granito Cananea, con edades de U-Pb en zircones de $1,440 \pm 15$ Ma (Anderson y Silver, 1977). Otro evento magmático al SSW de Caborca, con las mismas características es el que corresponde al granito Aibó, fechado por diferentes autores con una edad de ~ 1.1 Ga, y que recibió su nombre por el rancho donde se ubica.

Afloramientos de rocas neo-proterozoicas en la zona de Caborca, están representados por la formación Gamuza, la cual consiste de cientos de metros de espesor, compuestos de una secuencia con estratos de material clástico de carbonatos y areniscas, que además contienen estromatolitos (Anderson y Silver, 1981). De acuerdo con lo que describe Arellano (1956), y Copper y Arellano (1946), la formación Gamuza consiste en al menos 1500 m a más de 2000 metros de espesor compuestos de rocas de material clástico y carbonatos. El miembro inferior de esta formación se encuentra bien expuesto en la región sur de Caborca, en los cerros del Arpa, y consisten principalmente de intercalaciones de caliza, dolomita, dolomita-arenosa, lutita, y arenisca. Mientras que capas más jóvenes de la secuencia Gamuza

aflora en el cerro Gachupín, justo al norte del cerro el Arpa, al este de la zona montañosa Chino-Rajón (Anderson y Silver, 1981).

3.2 Rocas paleozoicas

El Paleozoico (Cámbrico) en esta región, se presenta como afloramientos aislados al sur y poniente en la región de Caborca. Gran parte de estas unidades fueron descritas inicialmente por Copper y Arellano (1952), y comprenden las formaciones Puerto Blanco, Cuarcita Proveedora, Buelna, Cerro Prieto, Arrojos, y formación Tren. En su mayoría, estas unidades están conformadas principalmente de rocas sedimentarias de origen calcáreo, entre horizontes de lutita, arenisca, caliza, aunque además algunos autores (Eells, 1972; Longoria, 1981) mencionan en algunas formaciones como Puerto Blanco, la presencia de secuencias vulcano-sedimentarias, que incluyen rocas volcánicas como flujos basálticos y aglomerados volcánicos.

3.3 Rocas mesozoicas

Las rocas plutónicas de composición granítica de edad Pérmico-Triásico superior afloran exclusivamente en los alrededores de la sierra Los Tanques que se localiza al oeste de Sonoyta, y los cuales fueron fechados en 225 Ma utilizando el método U-Pb en zircones (Stewart *et al.*, 1986). Las relaciones espaciales con las rocas adyacentes presentan complicaciones estructurales; sin embargo, los plutones intrusionan a las rocas del basamento cristalino Paleoproterozoico, las cuales no solo cabalgan al basamento, sino también a las rocas del arco jurásico, formándose un sistema imbricado de estructuras tipo *duplex*, con indicadores cinemáticos. (Stewart *et al.*, 1986). Estos intrusivos probablemente fueron formados por fusión cortical y se correlacionan a plutones con similares características

expuestos en las montañas Trigo del suroeste de Arizona. No obstante, no se conocen otros afloramientos de esta edad en Sonora (Stewart *et al.*, 1986).

En la región de Caborca, un complejo vulcano-sedimentario se encuentra bien expuesto, compuesto de rocas sedimentarias y una gran variedad de rocas intrusivas de distintas composiciones, las cuales conforman parte un arco magmático continental del Jurásico. En las proximidades de la región, hasta el municipio de Santa Ana, afloran varios grupos de unidades importantes del Mesozoico sedimentario; por ejemplo, el grupo Bisbee pertenecientes al Jurásico tardío - Cretácico temprano, aflora en las cercanías en la región de Caborca-Santa Ana, estas unidades afloran en el Puerto El Álamo, con cerca de 820m de espesor, e incluye el conglomerado Glance, la caliza Mural, y la formación Arroyo Sásabe, mientras que al norte de la sierra El Chanate aflora solo el conglomerado Glance (Jacques-Ayala, 1993). Este grupo se estima que en la región de Caborca-Santa Ana tiene un espesor de hasta 1900 metros en su mayor expresión.

El grupo El Chanate del Cretácico superior, aflora en la parte norte de la Sierra con el mismo nombre, y corresponde a una secuencia continental de más de 2,800m, y ha sido dividida en tres formaciones denominadas Pozo Duro (antigua), Anita y Escalante (Jacques-Ayala, 1993).

El Cretácico superior en esta región es caracterizada por actividad magmática calco-alcalina que se extiende hasta principios del Cenozoico, y que comprenden parte del batolito de Sonora, y que en conjunto con rocas volcánicas relacionadas constituyen el arco magmático que registra el progreso de convergencia de placas y deformación continental que afectó a la región durante esta época. En este tiempo comenzó un volcanismo de composición andesita-dacita distribuidas ampliamente en el estado de Sonora de afinidad calco-alcalina, representado por la evolución del arco magmático laramídico. Con la progresión de la

subducción de la placa Farallón por debajo de la placa norteamericana, las cámaras magmáticas ascienden hasta niveles superiores de la corteza en donde se estacionaron estas y siguieron su proceso de enfriamiento para formar los conocidos batolitos sonorenses (Farmer *et al*, 1983; Valencia-Moreno, 2007). Estos acontecimientos trajeron consigo masas ígneas con características hipabísales e importante actividad hidrotermal la cual tuvieron una gran relevancia en la generación y emplazamiento de numerosos yacimientos en el cinturón de pórfidos del noroeste de México, y del suroeste de Norte América (Damon *et al.*, 1981).

3.4 Rocas cenozoicas

En la región del NW de Sonora, se encuentran rocas ampliamente distribuidas que comprenden diferentes tipos de rocas, que van desde rocas intrusivas, volcánicas y sedimentos no consolidados. Principalmente durante el Eoceno, se continúan observando rocas intrusivas que aún no cesaron del evento laramídico, que corresponden a facies posteriores como granitos de dos micas con granate, con un contenido en alúmina que le da un carácter per-aluminoso, y se consideran anatéxicos producidos por fusión cortical, y post-arco volcánico laramídico, sin extrusiones similares, ni en edad, ni en composición y de las cuales son las más antiguas del Cenozoico (Damon *et al*, 1983).

Además, en la región se logra observar unidades volcánicas del Mioceno en la sierra San Manuel, estas rocas varían en composición que van desde riolíticas – andesitas con diferencias texturales claramente observables como cristales quebrados, en las tobas, y algunos diques andesíticos con texturas porfídicas. En otras localidades como en los cerros de Las Trincheras, La Ventana, en la sierra La Manteca, en el área del rancho El Tullido, se

observan tobas riolíticas ignimbritas, que se presentan pseudoestratificadas en capas delgadas casi horizontales lo que indican que no han sufrido basculamiento.

Otras unidades presentes del Oligoceno - Mioceno, como unidades volcánicas de composición andesita – basalto, se encuentran cubriendo discordantemente a la unidad anterior de tobas riolíticas, en los alrededores de la sierra San Manuel, en la sierra La Nariz, y La Angostura, en afloramientos dispersos al noroeste del rancho El Ejemplo, donde cubre discordantemente al intrusivo laramídico y a las volcánicas del Mioceno (Jacques-Ayala, 1993).

4. Geología área Los Humos

El proyecto Los Humos abarca una superficie de aproximadamente 15 km², donde las rocas que afloran en esta zona corresponden en su gran mayoría a volcánicas que varían de andesitas a tobas andesíticas con alteración propilítica y edades pertenecientes al Cretácico Superior, las cuales en su mayoría son expuestas en las zonas bajas y han sido correlacionables con el complejo volcánico El Charro (Jacques-Ayala, 1993). Rocas contemporáneas a las descritas líneas arriba, pero de carácter intrusivo, fueron observadas en la descripción de barrenos y en algunos afloramientos en superficie, las cuales corresponden a rocas ígneas batolíticas y “stocks” de composición félsica con variaciones en su composición de monzonita a granito pertenecientes al arco Larámide.

Múltiples eventos de fallamiento, exhumación y basculamiento de bloques en esta región de Sonora, producto de la extensión terciaria del *Basin & Range*, dio lugar a una morfología de extensos valles y abruptas montañas, con volcanismo bimodal reciente relacionado a la apertura del golfo cubriendo gran parte del área (Vidal-Solano *et al*, 2006).

En esta sección se describen en detalle las distintas unidades que afloran en el área y se mencionan características geológicas, tectónicas, variaciones texturales como se puede observar en las Figuras 3 y 4.

4.1 Rocas laramídicas / Cretácico

4.1.1 Rocas volcánicas

En el área de Los Humos se tiene la presencia de rocas volcánicas correspondientes al Cretácico tardío, mayormente dispuestas en el lado sur y oeste del área de estudio (Figura 4; Foto 1), las cuales de acuerdo con Jacques-Ayala, (1993), están ligadas al inicio de la migración del arco pre-larámide. En superficie este tipo de rocas puede formar secuencias de más de 200 m de espesor, conformada por flujos y unidades piroclásticas intercaladas de composición andesítica. Al oeste del área de estudio en la sierra San Manuel, afloran rocas con texturas piroclásticas formadas de cristales quebrados y sostenidas en una matriz de vidrio, las cuales han sido definidas como tobas de andesitas. Mientras tanto en la región de la sierra El Batamote se describió esta unidad correlacionable con el complejo volcánico El Charro (Foto 1), o equivalente a la formación Tarahumara por Jacques-Ayala (1993), quien estimo una potencia de hasta 1500 m como parte de un volcanismo bimodal y constituida por secuencias de composición andesítica, toba andesítica, ocasionalmente aglomerados y toba riolítica con pseudo-estratificación de rumbo NW-SE con echados hacia el NE (Jacques-Ayala, 1993). Esta secuencia ha sido fuertemente afectada por alteración, en la que se incluyen zonas con fuerte silicificación y otras áreas con presencia de clorita-epidota, las cuales en parte cubren parcial o totalmente la textura original de la roca, sobre todo en partes cercanas a los intrusivos mineralizadores en esta zona.

MEZOZOICO CENOZOICO

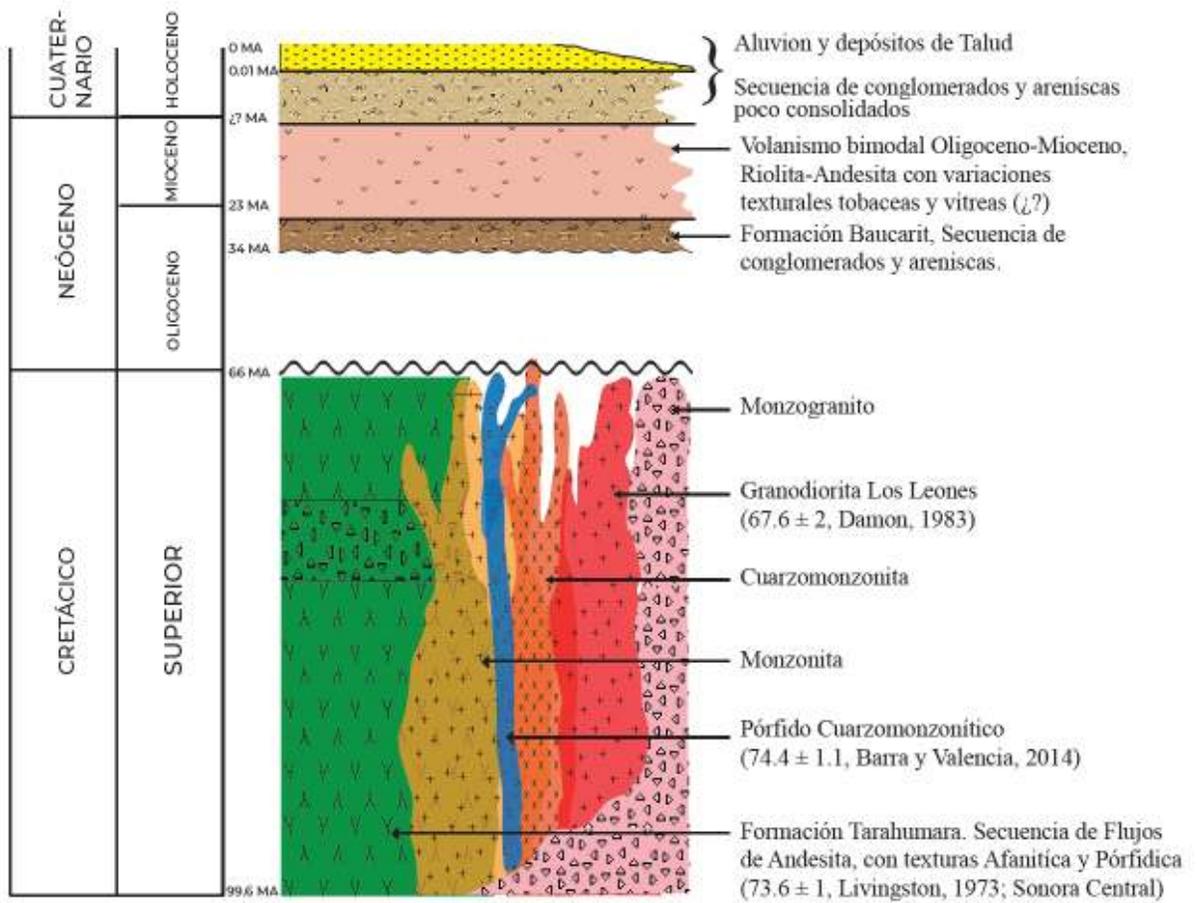


Figura 3. Esquema de la columna estratigráfica propuesta para el área del yacimiento pórfido de cobre Los Humos.

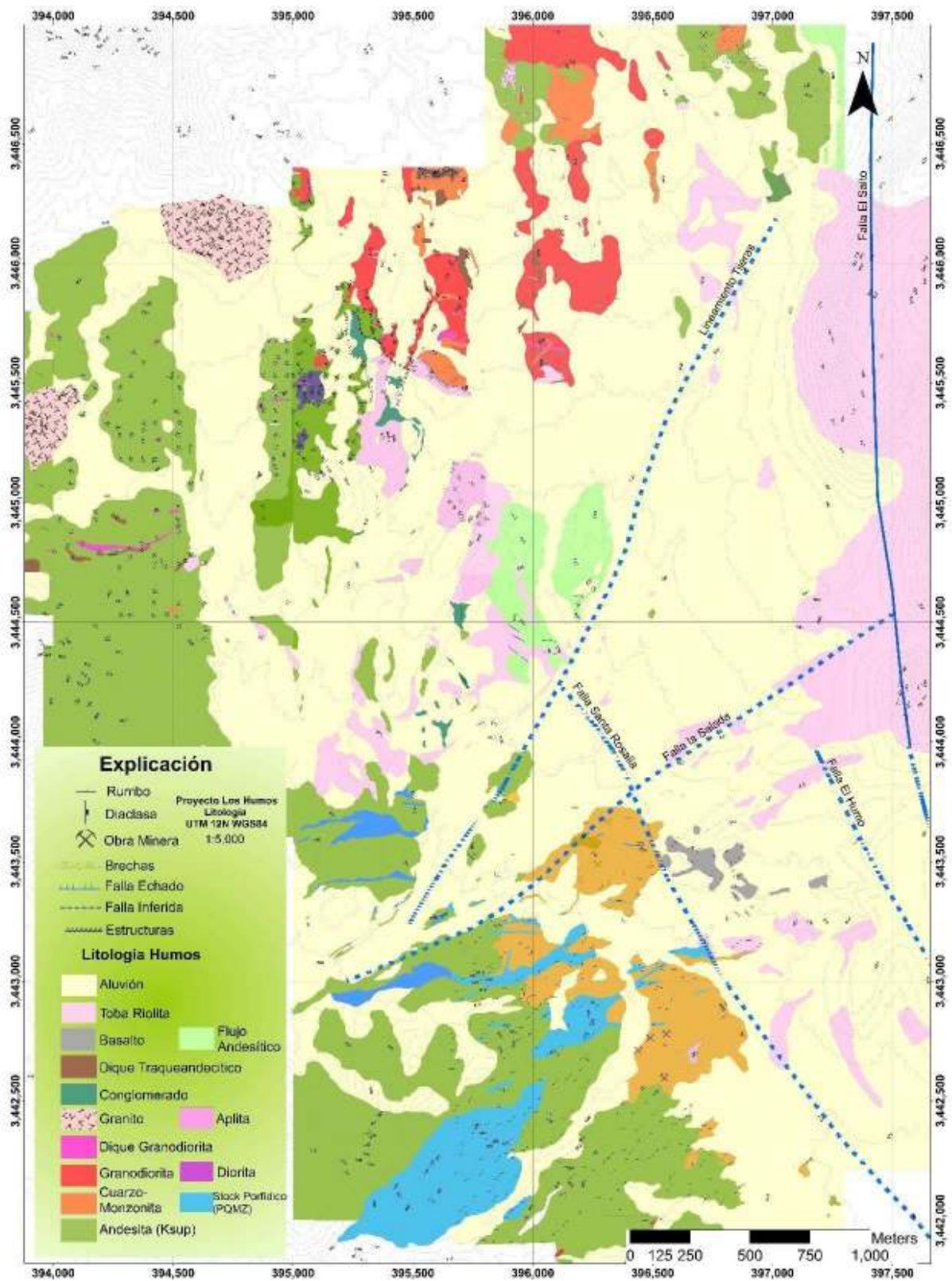


Figura 4. Plano geológico 1:2500 del área Los Humos, Caborca, Sonora.



Foto 1. Fotografía de afloramiento de rocas andesíticas correlacionables con el complejo volcánico El Charro, con alteración propilítica en arroyo al norte del área.

4.1.2 Rocas ígneas (Intrusivas)

Las rocas ígneas laramídicas en el área de estudio, corresponden a la roca encajonante de la mineralización de Cu-Mo, y presentan una variedad en su composición que van desde granitos a granodiorita que afloran mayormente al norte del distrito y rocas de composición más intermedio del tipo cuarzo-monzonita variando a monzonitas y distribuidas principalmente en el centro del área, y rocas intrusivas graníticas al norte y zonas profundas del yacimiento. En el área las primeras rocas intrusivas estudiadas en el área, localizadas al norte del área fueron fechadas en 67.6 ± 2.0 Ma por Damon (1983) y caracterizadas como granodioritas y granitos en área de La Margarita y Mina Los Leones en las inmediaciones de la sierra San Manuel. En recientes estudios, Barra y Valencia (2014) fecharon rocas pertenecientes al yacimiento Los Humos, las cuales han sido descritas petrográficamente como monzonitas y cuarzomonzonitas, además de una serie de intrusiones de *stocks*

porfídicos de composiciones cuarzo-feldespáticas, datando 4 muestras en molibdenita por Re-Os en 73.5 ± 0.2 Ma y U-Pb en zircones de 2 muestras 74.4 ± 1.1 y 74.5 ± 1.3 Ma, mostrando edades del Cretácico Superior para el emplazamiento de este depósito.

De estos dos tipos de unidades, las de principal interés económico corresponde a las de composición monzonita y cuarzo-monzonita, ya que es la roca hospedante de los principales cuerpos mineralizados en el área de estudio.

En particular estas unidades por variaciones texturales y mineralógicas corresponden a rocas ígneas de composición monzonita con presencia de plagioclasa y feldespato potásico en más del 60% del volumen total y distribuidos en cantidades similares, con débil presencia de cuarzo y biotita en un 5-10%.

La mejor exposición de la mineralización ocurre en la monzonita de grano medio, con alteración de biotita hidrotermal y subsecuentemente reemplazada por calcopirita (\pm pirita, molibdenita).

El grado de alteración que presenta esta roca suele ser perversivo a débilmente selectivo en las zonas más alejadas del sistema hidrotermal, suele presentar vetillas orientadas en una dirección 70-80NE; 60 NW, con presencia de cuarzo + molibdenita + calcopirita \pm un halo de feldespato potásico \pm un halo sericitico o simplemente vetillas de cuarzo con epidota – clorita en zonas de más baja temperatura (Foto 2).

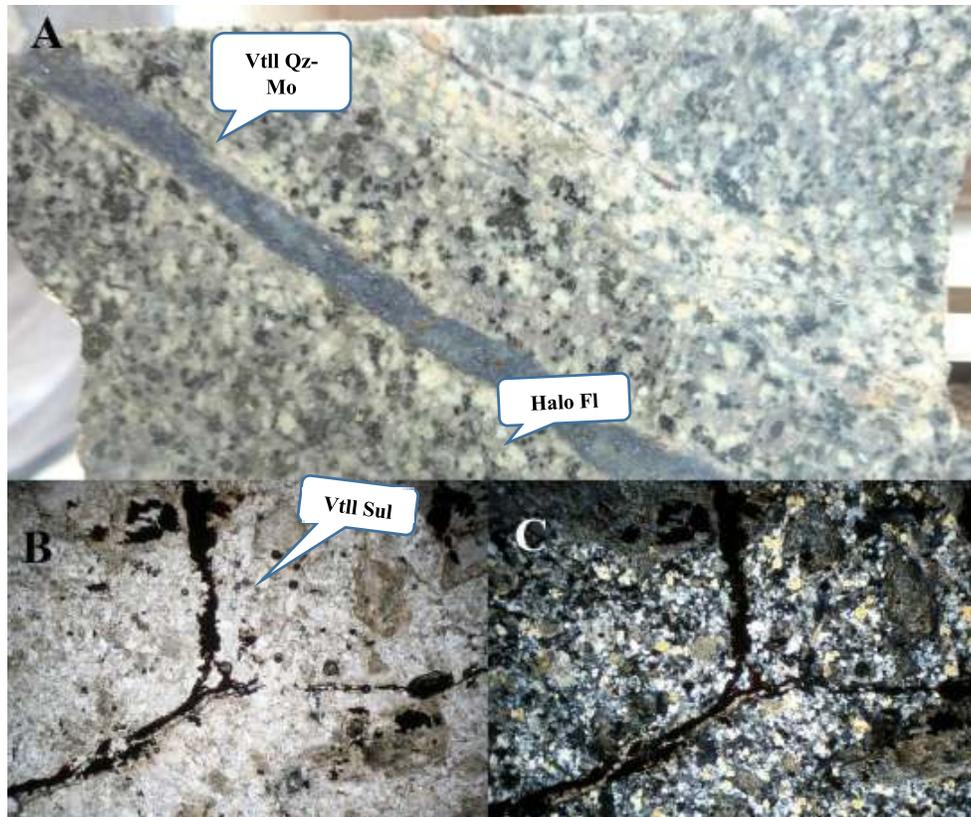


Foto 2. Roca Monzonita de grano fino a medio, en A) se observa roca con alteración argílica selectiva moderada en feldespatos, y vetilla de Qz + Mo + halo de alteración filica. B) y C) Microfotografía en sección delgada de la muestra Pjb-29, en 4X en nicóles paralelos y nicóles cruzados. Se observa monzonita de grano fino, con intercrecimiento de cuarzo y vetilla de sulfuro cortando a la roca. Vtll: Vetilla, Qz: Cuarzo, Mo: Molibdenita, Fl: Filica, Sul: sulfuro

En cambio, la cuarzo-monzonita es de grano medio con textura granular y presencia de plagioclasa y feldespato potásico en cantidades similares con cuarzo en algunas zonas hasta en un 10-15% del volumen total de la roca. En ocasiones, suele presentar texturas porfídicas e intercrecimiento de abundantes cristales de biotita hidrotermal, y suele presentarse en algunas partes hasta en un 15-25% (Foto 3).

Esta roca tiene carácter muy significativo en el yacimiento, dado que hospeda la mineralización de Cu-Mo diseminado en los cuerpos mineralizados denominados como Elizabeth y Elizabeth Sur en las inmediaciones de la sierra San Manuel y en algunas pequeñas obras en superficie se puede apreciar enjambre de vetillas de cuarzo con Cu-Mo (Foto 4).

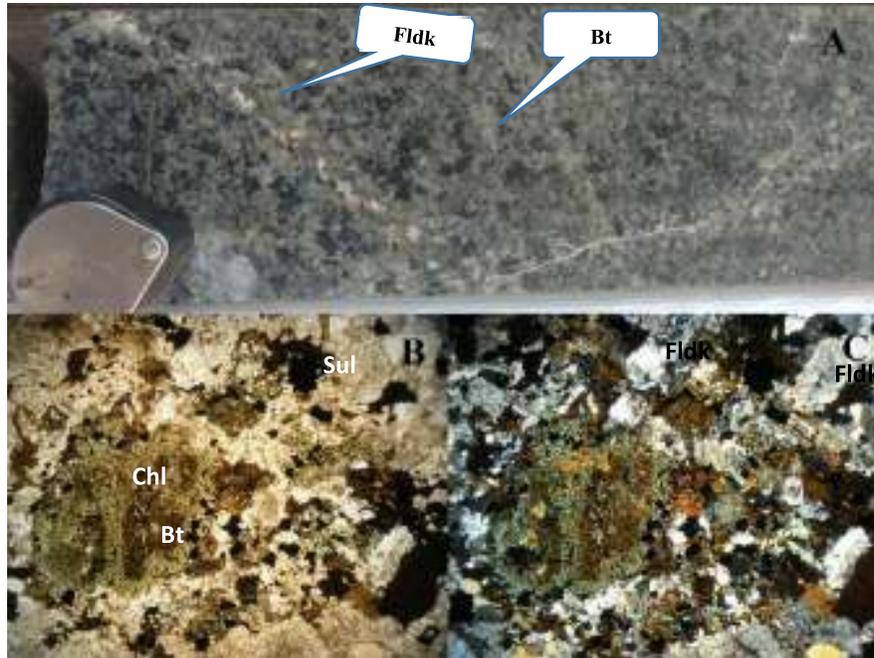


Foto 3. A) Roca cuarzomonzonita con textura porfídica, con presencia de alteración de biotita secundaria con sulfuros diseminados. B) y C) Microfotografía en luz transmitida de la muestra Pjb-11, en 4X con nicoles paralelos y nicoles cruzados. Se muestra parte de la alteración de biotita secundaria con sulfuros diseminados opacos que a su vez están siendo alterados por clorita, y una mineralogía de cristales de cuarzo-feldespato. Bt: Biotita, Chl: Clorita, Sul: Sulfuro, Fldk: Feldespato potásico



Foto 4. Fotografía de obra minera, la roca corresponde a la roca de caja cuarzomonzonita de grano medio, y se logra apreciar una serie de vetillas sub-paralelas en forma de enjambre. Vtl: Vetilla, Qz: Cuarzo, Cu: Cobre, Mo: Molibdenita.

Las rocas ígneas intrusivas de composición que varían de granodioritas hasta granitos y que afloran mayormente en el norte del área, son un poco más jóvenes a la roca de caja del yacimiento (monzonitas-cuarzomonzonitas).

Las rocas del tipo granodiorita presenta una textura granular de grano medio (hipidiomórfica), con cristales de plagioclasa, feldespato potásico (ortoclasa) y cuarzo, con biotita-hornblenda como minerales accesorios. Los cristales de plagioclasa son tabulares con tamaños de hasta 1-2 mm en tamaño y pueden alcanzar hasta en un 40% del volumen total de la roca. Regularmente se presentan débilmente alterados, los cuales por su grano muy fino, aspecto terroso y baja birrefringencia podrían corresponder a arcillas. El feldespato –K tienen hábitos más definidos y se presentan en cristales más grandes y prismáticos, algunos de ellos presentándose maclas simples tipo Carlsbad, pudiendo alcanzar hasta un 20% del volumen total, presentando una incipiente alteración a arcillas. Los cristales de cuarzo son de formas anhedrales a subedrales con tamaños del orden de 2-3mm y se presenta en la roca hasta en un 25% en promedio. Se tiene la presencia de ferromagnesianos del 5-10% principalmente del tipo biotita en mayor proporción que hornblenda, los cuales muchos de estos presentan alteración de clorita.

En la Foto 5, se observan las características ópticas principales observadas en este tipo de roca.

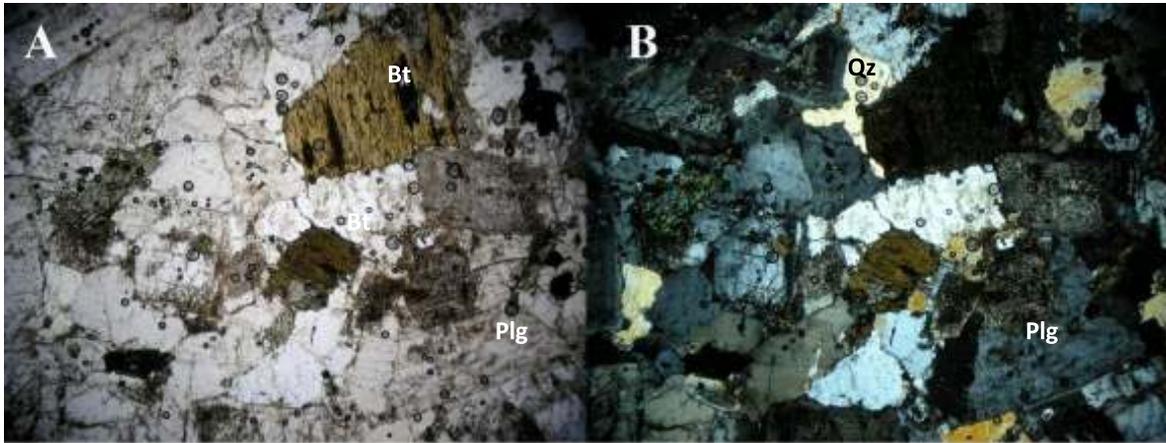


Foto 5. En A) y B) roca granodiorita de grano medio, microfotografía en luz transmitida de la muestra Pjb-23. Nícoles Paralelos y Nícoles Cruzados en aumento de 4X. Qz: Cuarzo, Bt: Biotita, Fk: Feldespato potásico, Plg: Plagioclasa.

Por otro lado, se aprecia en algunos afloramientos y zonas profundas un monzogranito de grano grueso-medio con presencia de plagioclasa (35-45%), feldespato alcalino (20-30%), cuarzo (20-30%) y biotita en calidad de accesorios en un 5-10 % el volumen total y en algunas partes esta roca presenta variaciones a granito. Aunque este tipo de roca se presenta de manera esporádica y aislada en superficie (Figura 4), ha sido comúnmente encontrado en las zonas profundas del yacimiento a partir de descripción de barrenos. Diques y sills de escalas métricas a decenas de metro son presentes cortando a las rocas encajonantes como la monzonita y la cuarzomonzonita. Muchos barrenos finalizan en zonas profundas de aproximadamente 400-500 metros justo cuando aparece el monzogranito en estas zonas de Los Humos (Ver Anexo 1).

4.1.3 *Stocks* hipabísales cuarzo feldespáticos

En el distrito Los Humos se tienen rocas hipabísales o *stocks* porfídicos, los cuales se concentran más en el centro del área de estudio (Figura 4) y se presentan intrusionando a la cuarzomonzonita que corresponde a la roca hospedante de la mineralización descrita líneas arriba. Regularmente estos *stocks* porfídicos han impreso un fuerte y sistemático fracturamiento a la roca de caja, produciendo sobreimposiciones de alteraciones hidrotermales en el sistema. De manera general, estas rocas presentan una textura porfídica con fenocristales de feldespatos (60%) y cuarzo (20%) sostenidos en una matriz fina microcristalina, como se puede observar en la Foto 6. Estos *stocks* presentan composiciones más cuarzo-feldespáticas y con características texturales generalmente porfídicas, con eventos mineralizantes en algunos de ellos.

Algunos de estos *stocks* presentan alteraciones de alta temperatura con evidencias de feldespato potásico, y biotita hidrotermal en forma de parches o “flakes” y diseminada hasta en un 20% de la roca, y en muchas zonas se observan minerales opacos del grupo de los sulfuros intercrecidos en los clivajes de estas mineralogías, la cual en algunas intrusiones llegan a presentar mineralización de Cu en forma diseminada en la roca como se aprecia en la Foto 7.

En sección delgada, presentan una textura porfídica con cristales de subedrales de feldespato alcalinos (45%) con tamaños del orden de 2 hasta 5mm en tamaño principalmente y cuarzo sub-redondeado en un 20% del volumen total y de 1-3mm en tamaño, presentando golfos de corrosión que los identifica (Foto 8, A y B). Otras características se muestran en una serie de variaciones texturales de este tipo de rocas, además de presentar mineralización

diseminada en la matriz (Foto 8, C y D) y zonas con alteración filica agregados intersticiales en la matriz y afectando a los feldespatos con una débil biotización (Foto 8, E y F).



Foto 6. Mostrando en un afloramiento el stock de cuarzo-feldespato, con textura porfídica, con cristales blancos de feldespatos (2-4mm) en compañía de cuarzo, sostenidos en una matriz fina.



Foto 7. Microfotografía de luz transmitida de la muestra Pjb-26. Roca hipabisal con textura porfídica y composición monzonítica, presentando alteración potásica de biotita en hojuelas alterando posibles anfíboles, 4x, LN. Bt: Biotita, Hid: Hidrotermal.

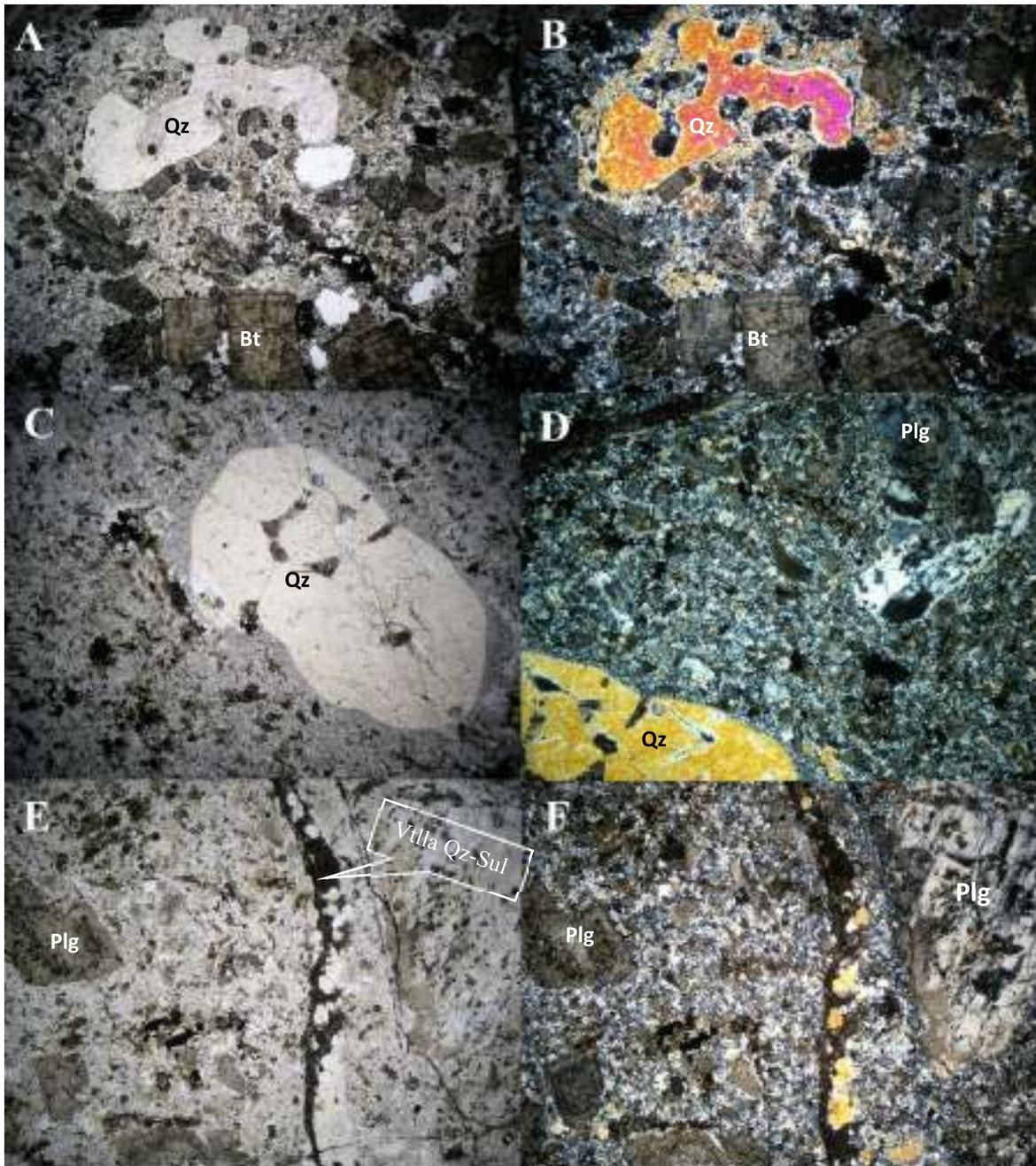


Foto 8. Microfotografía de luz transmitida de la muestra Pjb-20. 4x nicoles paralelos/nicoles cruzados en A) y B). Mostrando en NP y NC, fragmento de cristal de cuarzo con textura golfos de corrosión en roca pórfido cuarzo feldespático. Microfotografía de luz transmitida de la muestra Pjb-26. 4x nicoles paralelos/nicoles cruzados en C) y D); mostrando textura porfídica, cristales de cuarzo subredondeados, con tamaños de hasta 3 mm los mayores. Se pueden observar pequeños conjuntos de minerales café-verdosos en parte de la matriz donde además se observan minerales opacos que corresponden a sulfuros de pirita-calcopirita fina. E) y F); cristales de feldespato-K y plagioclasa levemente alterados por sericita y matriz, a la vez siendo cortado por vetilla de cuarzo + sulfuro (cpy>py). Qz: Cuarzo, Plg: Plagioclasa, Vtlla: Vetilla, Sul: Sulfuro.

En descripción de barrenos se tuvo la oportunidad de identificar este tipo de rocas y se pudieron identificar ciertas características, como es que ellos presentan una tendencia de alinearse hacia el SE, lo que podría sugerir un basculamiento relacionado a fallamiento con dirección NE-SW, indicando que estos *stocks* tuvieron inicialmente una orientación hacia la vertical y posteriormente fueron rotados. Es posible pensar lo anterior, por la presencia de fallas como las de El Salto que desplazan bloques de roca >200m en la porción Este de la zona.

4.2 Volcanismo Oligoceno-Mioceno

Hacia las parte oriental y occidental del área de estudio se tiene la presencia de rocas volcánicas compuestas de flujos y tobas de composición andesita-basalto y riolitas conformando una secuencia de ~ 800m de espesor, las cuales se presentan de forma de extensos lomeríos como sucede en el área del Arenoso y sierra San Manuel hacia el poniente con altitudes hasta de 800 msnm. Esta secuencia ha sido relacionada a un volcanismo bimodal de edad Oligoceno-Mioceno por algunos autores como: (McDowell y Keizer, 1977; McDowell y Clabaugh, 1979; Cochemé, 1985; Mora-Álvarez y McDowell, 2000) quienes lo mencionan como parte del mecanismo de “*roll back*” de la placa y parte de la extensión. Esta secuencia biomodal inicia con un conglomerado polimíctico, formado de fragmentos rocas volcánicas del Cretácico tardío, fragmentos alterados de rocas intrusivas laramídicas provenientes del sistema pórfido de cobre, todos ellos sostenidos dentro de una matriz arenosa rojiza. Este conglomerado se extiende en forma discontinua en partes encima o cubriendo a los intrusivos; aunque, en algunas zonas se encuentra ausente o de escasos metros de espesor. En las zonas más bajas del sector, los espesores más potentes pueden alcanzar ~160 metros de espesor con horizontes levemente basculados ~10° hacia el

NW. Por su distribución y actitud, esta unidad parece indicar una fuerte denudación de las rocas intrusivas laramídicas, y por su ubicación se le puede atribuir una edad del Oligoceno, previo al comienzo del volcanismo bimodal.

Estos conglomerados, a su vez, son cubiertos discordantemente por una secuencia de rocas volcánicas del Mioceno formadas principalmente de riolitas e ignimbritas en las porciones altas de la sierra San Manuel, mientras que hacia el poniente en las zonas del Arenoso se observan las unidades inferiores de este volcanismo que corresponden a andesita – basalto. Esta secuencia presenta un espesor de ~550 metros, los cuales ~300 metros se exponen en los cerros de la sierra San Manuel delimitada al poniente por una falla normal de ángulo alto, la cual tiene un desplazamiento de ~200 metros.



Foto 9. Mostrando zona alta de la sierra San Manuel al este del yacimiento Los Humos, que corresponde a una secuencia de lavas con composiciones riolíticas – andesíticas en las partes bajas.

La sierra San Manuel se encuentra ubicada en un semi-graben delimitada por una falla normal de alto ángulo mayor a 70° con buzamiento hacia el Este y pertenecientes al *Basin & Range*, levantando bloques y exponiendo rocas del Cretácico superior al Oeste. La Foto 9, presenta una panorámica de esta sierra, orientada en una dirección NNW.

4.3 Estructuras

En el área de Los Humos, se logran observar rasgos fisiográficos bien definidos por parte de los eventos magmáticos-volcánicos laramídicos y la exhumación de estos por los eventos más recientes producto de la etapa extensiva durante el *Basin & Range*, los cuales imprimieron los principales rasgos geomorfológicos actuales en todo noroeste de México. Los efectos de denudación y levantamiento han expuesto rocas intrusivas profundas y descubierto el sistema pórfido de cobre Los Humos.

En el yacimiento mineral Los Humos, se presentan una serie de estructuras producto de varias etapas geológicas afectaron el marco evolutivo del depósito. Una de las principales estructuras del distrito corresponde a la falla El Salto (Figura 5), la cual mantiene una dirección preferencial N-S y fue interpretada con magnetometría terrestre y barrenación con diamante. En base a estudios geofísicos de magnetometría y resistividad, esta estructura se ha interpretado como de emplazamiento profundo producto de la compresión NE-SW y habría controlado sucesivos pulsos graníticos correspondientes al Cretácico superior (Reporte interno Peñoles, 2003). Otro de los sistemas estructurales observados en el distrito, corresponde a eventos de compresión ENE a WNW que sería resultado de la compresión Larámide, los sistemas de fallas relacionados son principalmente locales en comparación con las fallas relacionadas a la extensión *Basin & Range*, y que controla los sistemas de vetillas y fallas como La Salada y el lineamiento Tijeras (Figura 5).

Se piensa que este sistema de fallas transversales habría propiciado las condiciones para el alzamiento de pulsos magmáticos laramídicos en el área, esto es posible debido a las condiciones generadas por el arco magmático y la tectónica compresional en ciertas regiones del arco.

El levantamiento ocurrido durante el Oligoceno habría dado por resultado la exhumación del sistema pórfido de cobre, dando comienzo a los primeros ciclos de oxidación y enriquecimiento supergénico, generando zonas con calcosita y óxidos verdes de cobre.

Cabe mencionar que posiblemente, en esta etapa estructural se produjo una dislocación importante en sentido transversal a la falla La Salada y el lineamiento Tijeras, dando como resultado la dislocación de los cuerpos Elizabeth (norte y sur), determinando el bloque norte con erosión débil debido a la gran magnitud de rocas del Cretácico, generando poca oxidación en estas zonas, y el bloque sur como el bloque alto con erosión profunda.

Además, por las características presentes en el yacimiento, como el nivel de erosión, se piensa que la fase extensional del *Basin & Range* generó rasgos importantes en la zona, y generó estructuras mayores con tendencias N-S y NNW que habrían controlado cuencas de depósito de sedimentos clásticos asignados a la Fm. Tubutama en el sector (Reporte Interno Peñoles, 2003).

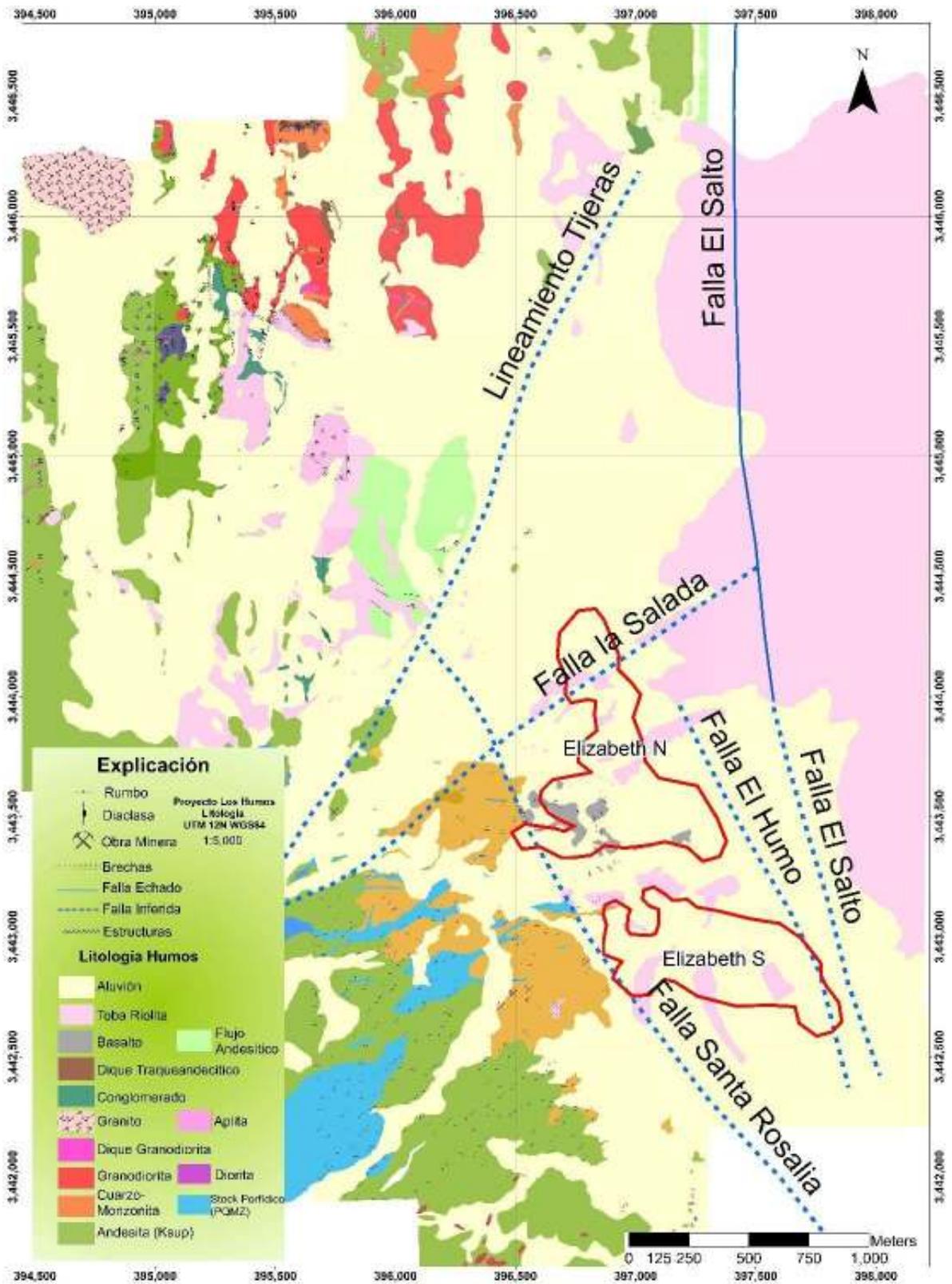


Figura 5. Plano geológico del área Los Humos, mostrando lineamientos y fallas principales en el distrito. En líneas rojas, se resalta la presencia de los cuerpos de Cu-Mo en este proyecto.

5. Metodología y procedimientos analíticos

5.1 Cartografía y muestreo

La etapa de cartografía del área del yacimiento se realizó en diferentes jornadas de campo y se enfocó en la disposición litológica de las unidades que afloran en el área, en un área aproximada de 850 hectáreas, las cuales se integraron a un plano geológico y se incluyeron mapas geológicos más antiguos elaborados por geólogos de la compañía minera Exploraciones Mineras Peñoles S.A. de C.V., en los años 2015 y 2016, y posteriormente en 2017 para esta tesis. Durante los levantamientos se recolectaron algunas muestras representativas de los eventos magmáticos intrusivos, estos con el fin de realizar estudios de geoquímica por métodos de elementos mayores y trazas con algunas muestras para estudios petrográficos-minerográficos de los diferentes tipos de roca y de zonas alterada y mineralizadas.

Se realizó una descripción en detalle de núcleos de barrenación a diamante de 37 barrenos en el área de estudio, especialmente dentro de las zonas mineralizadas. Durante esta etapa, la toma de datos y descripción de los barrenos fue efectiva y bastante provechosa, ya que se recolectaron muestras para estudios microtermométricos (inclusiones fluidas) y para estudios mineralógicos de las asociaciones mineralógicas metálicas y de alteración, las cuales fueron acompañadas por estudios de espectrometría.

5.2 Petrografía

Las muestras para estudios y análisis de petrografía fueron recolectadas a lo largo de los trabajos realizados en campo y durante las revisiones y logueos de núcleo de la zona. Se recolectaron aproximadamente 31 muestras para petrografía (ver Anexo A) bajo el enfoque característico para definir variaciones texturales en los intrusivos y además las alteraciones presentes en estos, y variaciones en rasgos particulares detectados mediante SWIR.

Los análisis petrográficos fueron llevados a cabo bajo un microscopio petrográfico Olympus (Foto 10), en los laboratorios del Departamento de Geología de la Universidad De Sonora.



Foto 10. Mostrando microscopio petrográfico marca Olympus, donde se realizaron los estudios con luz transmitida y reflejada, ubicado en el Departamento de Geología de la Universidad de Sonora.

Estos datos fueron utilizados para ejemplificar cualidades de las rocas y texturas además para corroborar las alteraciones descritas mediante los análisis hiperespectrales con SWIR, con esto el trabajo presente tiene como fin una descripción clara de las unidades de roca pertenecientes a la zona de Los Humos, además de alteración y texturas características del sistema pórfido.

5.3 SWIR (Terracore)

Uno de los factores clave en este estudio ha sido la caracterización de la alteración del depósito mineral, en el cual se prepararon 37 barrenos del proyecto Los Humos, con un total de 14,000 metros en total para barridos hiperespectrales, los cuales se seleccionaron específicamente para definir un modelo de alteración hidrotermal del yacimiento. Dichos barrenos se prepararon (se les dio limpieza) para ser enviados a la compañía que se dedica al estudio y análisis de barridos hiperespectrales TERRACORE GEO, la cual opera en conjunto con ALS MINERALS. Los barrenos fueron llevados a sus instalaciones para posteriormente ser escaneados e interpretados por el personal analista.

El equipo cuenta con una configuración de 2 cámaras para la adquisición de los datos, una cámara de alta resolución a color (RGB), y la cámara Fénix (registra VNIR y SWIR) que proporciona información espectral con un rango desde los 380-2500 nm con 174/274 bandas respectivamente con un tamaño de píxel de $\pm 1.2\text{mm}$ para la cámara espectral y $\pm 0.12\text{mm}$ para la cámara RGB.

El estudio de barridos hiperespectrales llevado a cabo en núcleos de barrenación en el proyecto Los Humos, mostró que la mineralogía de alteración adquirida mediante espectros del Infrarrojo de onda corta (SWIR), puede estar ligada a la distribución de la mineralización con ley de Cu. Como se esperaba, el detalle que otorga las imágenes hiperespectrales SWIR, pueden proporcionar información más detallada acerca de la alteración hidrotermal de estos yacimientos.

La información recolectada e interpretada en secciones longitudinales del yacimiento Los Humos, han dado un claro entendimiento de la variabilidad y zoneamiento de la alteración hidrotermal y distribución, por lo que se detalló en varias secciones representativas del depósito. Las características de estas secciones contemplan las partes más centrales y más económicas del yacimiento, además de otras más alejadas para observar el comportamiento y zoneamiento de la alteración en estas.

La tarea de definir y hacer un modelo de alteración relacionado a un sistema pórfido de cobre ha sido fundamentada con observaciones en barrenos y las relaciones mineralógicas detectadas por los barridos hiperespectrales SWIR en 37 barrenos.

Las alteraciones relacionadas suelen presentarse como potásica de biotita (secundaria), fílica, sub-propilitica, argílica y en algunas zonas se pudo observar alteración sódica relacionada a partes más profundas del sistema.

5.3.1 Principios teóricos

El análisis llevado a cabo está enfocado en técnicas basadas en una longitud de onda específica del espectro electromagnético conocido como Infrarrojo de Onda Corta o *Short Wave Infrared*, por sus siglas en inglés SWIR (Figura 6) y se ubica entre los 1000 nm a los 2500 nm. Esta longitud de onda del espectro electromagnético es posible distinguir ciertas moléculas que vibran mediante un haz de luz que es dirigido hacia una muestra de roca y a su vez una parte de este es reflejada. La longitud de onda NIR y el SWIR que van desde los 350 nm a los 2500 nm se ha estado utilizando cada vez de una manera más amplia en la exploración minera por lo que se le empezó a dar el nombre del “Espectro Electromagnético para la Exploración Mineral”.

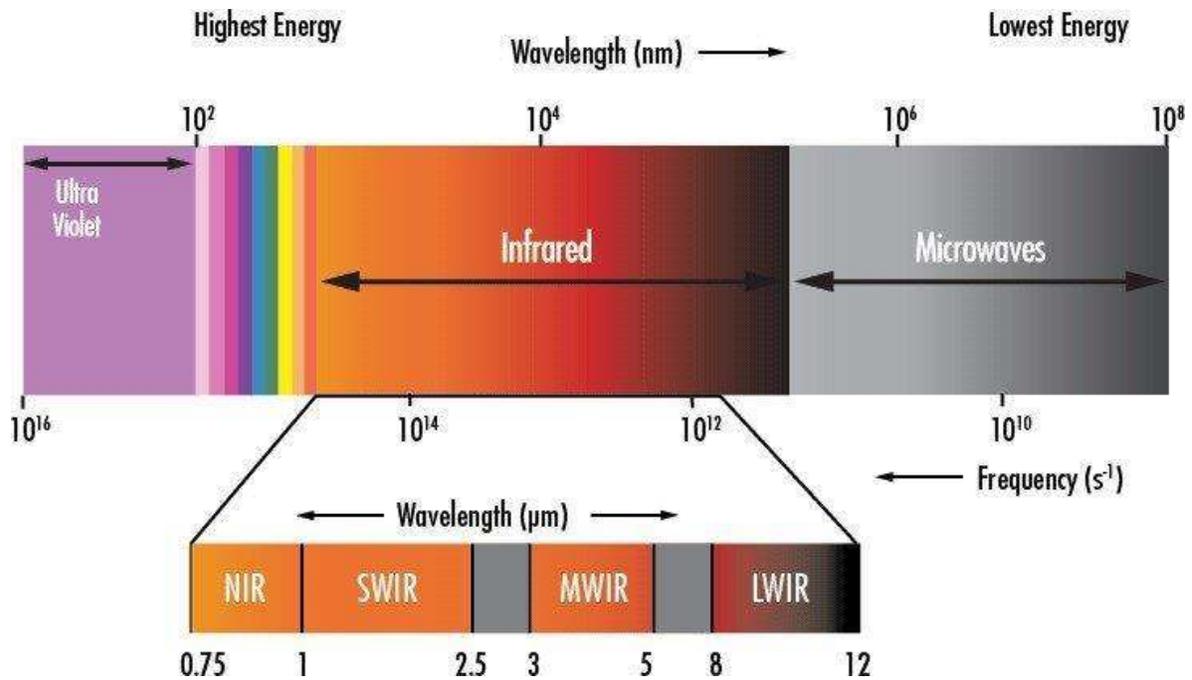


Figura 6. Parte del espectro electromagnético donde se ubica la porción del infrarrojo de onda corta o SWIR (Tomado de Hauff, 2008).

Estos datos que pueden ser obtenidos desde espectrómetros de mano, hasta cámaras de alta resolución con sensores montados con la capacidad para hacer barridos que capturan parte del espectro electromagnético.

La utilización de estos datos ha causado un impacto importante y revolucionario en la industria extractiva y de exploración por las cualidades que presenta debido a su eficiencia, practicidad, y gran portabilidad a la hora de tomar los datos en el campo.

Los datos que son obtenidos están en función de las relaciones de absorción y reflexión de cada mineral y corresponden a rasgos en la composición elemental del mineral, de tal manera que ciertos elementos vibran bajo la influencia del haz de luz proporcionado por el espectrómetro. Los datos vibracionales corresponden a diferentes niveles de energía de la molécula examinada y estos ocurren en porciones de una longitud de onda bien definida, debido a que los niveles de energía que se definen en la longitud de onda están en función del radio iónico de los cationes que forman enlaces con las diferentes moléculas. Por estas

cualidades es posible predecir las composiciones y variaciones composicionales que presentan todo el conjunto de minerales que puedan ser analizados y representados en una longitud de onda (Tabla 1) (Clark, 1999; Goetz et al, 1982; Hauff, 1999; Hunt, 1971).

POSICION	MECANISMO	GRUPO MINERAL
1.4 μm	OH y Agua	Arcillas, Sulfatos, Hidróxidos, Zeolitas
1.56 μm	NH_4	Especies NH_4
1.8 μm	OH	Sulfatos
1.9 μm	Agua	Esmectita
2.02-2.12 μm	NH_4	Especies NH_4
2.2 μm	AL-OH	Arcillas, Sulfatos, Micas
2.29 μm	Fe-OH	Arcillas-Fe
2.31 μm	Mg-OH	Arcillas-Mg, Orgánicos
2.34 μm	Mg-OH	Cloritas
2.35 \pm μm	CO_3^{-2}	Carbonatos
2.35 \pm μm	Fe-OH	Cloritas-Fe

Tabla 1. Principales rasgos de absorción distinguidos en el infrarrojo de onda corta (SWIR) y grupos minerales asociados (tomado y modificado de Hauff, 2008).

En estos espectros se pueden también observar cambios composicionales dependiendo de las inflexiones que reflejen en la porción del infrarrojo de onda corta que va desde los $\sim 800\text{nm}$ a los 2500 nm aproximadamente. Dentro de estas porciones es posible discriminar variaciones composicionales entre grupos minerales, el cual puede ser muy importante en relación al sistema de alteración en función de temperatura y composición de los fluidos hidrotermales y la proximidad a zonas de mineralización que pudieran estar asociadas a diversos ensamblajes mineralógicos.

5.3.2 Procedimiento e interpretación al modelo de alteración hidrotermal de sistemas pórfido de cobre

La información recabada de los barridos hiperespectrales fue otorgada por la empresa TerraCore Geo. La cual se encarga de realizar y entregar la información interpretada de los pixeles tomados por las cámaras que utilizan y posteriormente suben dichos datos en una plataforma para visualizarlos y poder comparar diversos parámetros sobre datos geológicos y ensayos de laboratorio que otorgan los intérpretes.

Estos datos, se pueden observar de la siguiente forma en la plataforma Intellicore:

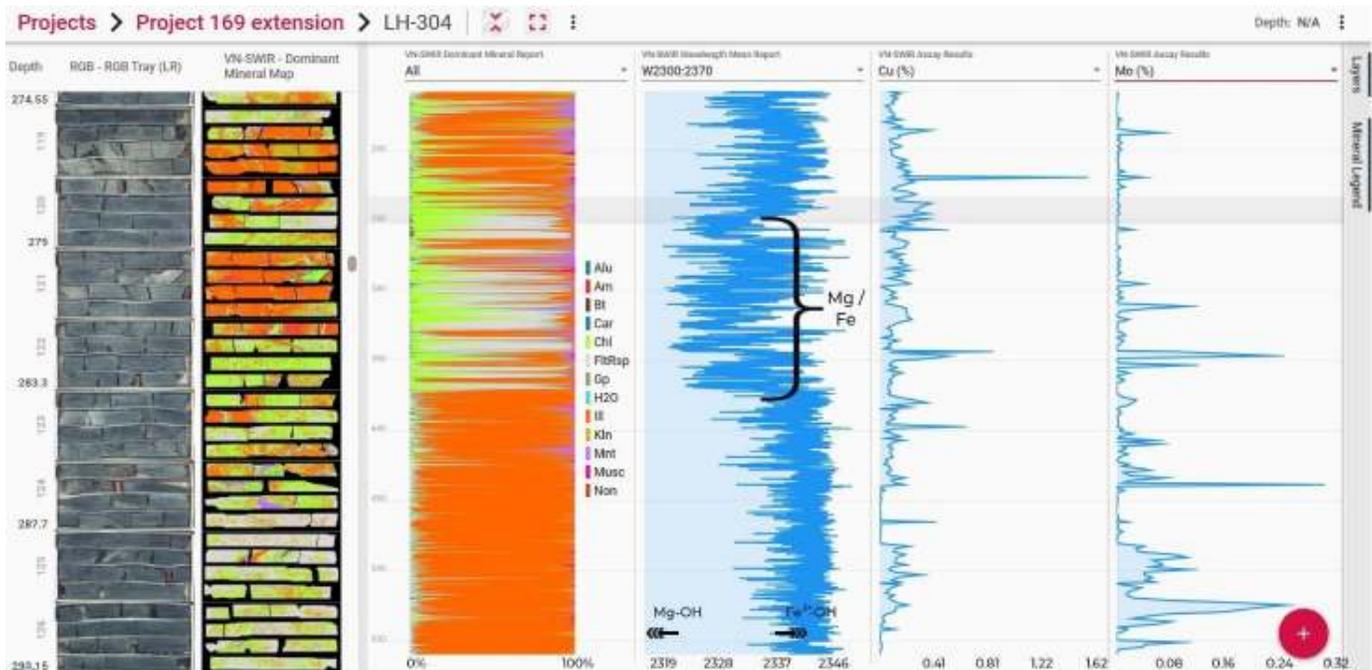


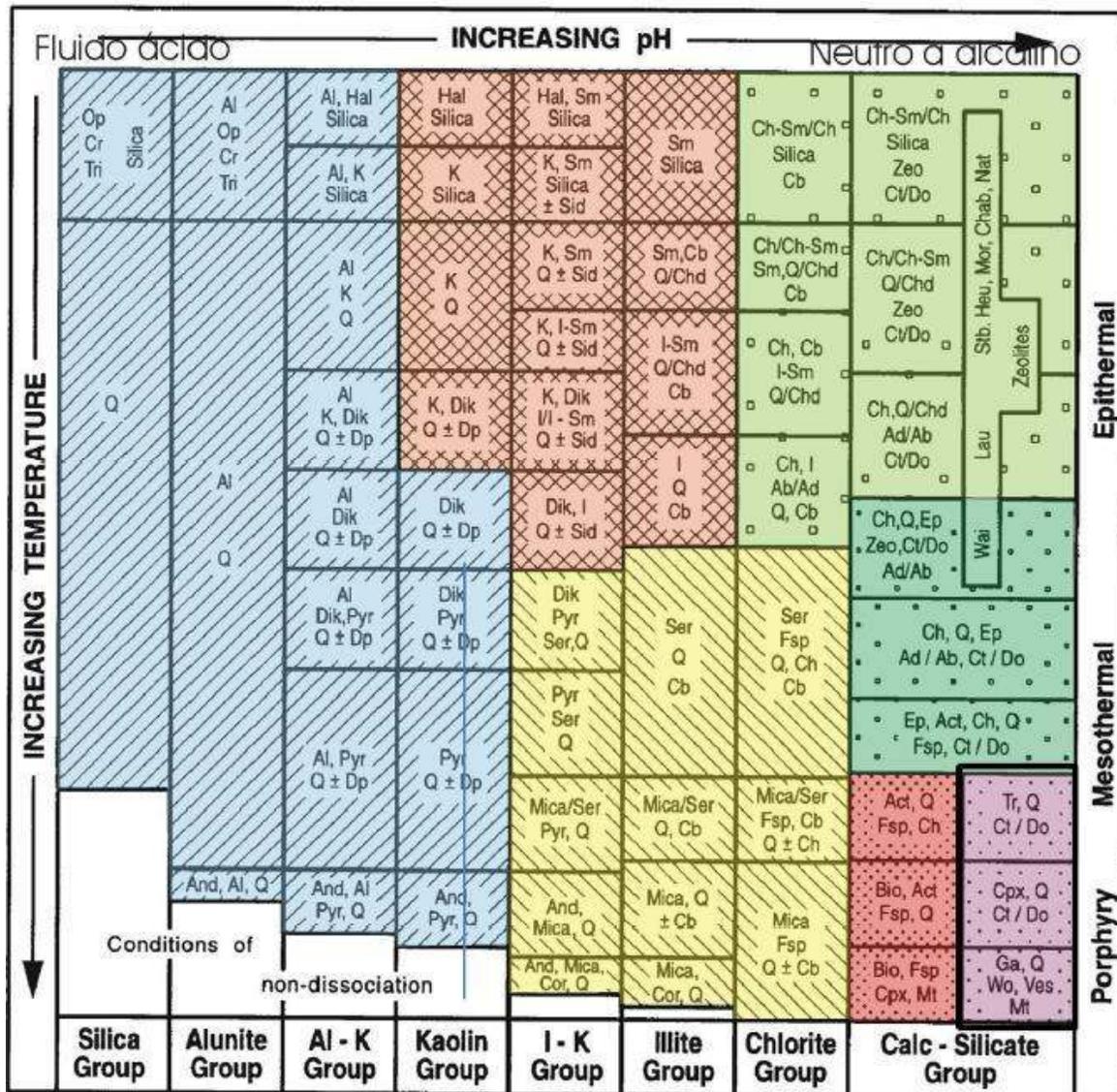
Figura 7. Plataforma Intellicore, visualizador de barridos hiperespectrales y rasgos de absorción. Alu: Aluninta, Am: Anfíbol, Bt: Biotita, Car: Carbonato, Chl: Clorita, FltRsp: Sin Respuesta, Gp: yeso, H2O: Agua, Ill: Ilita, Kln: Caolinita, Mnt: Montmorillonita, Musc: Muscovita, Non: Nontronita.

Se les otorgan distintos colores a las mineralogías similares, y mediante otros aspectos entre las longitudes de onda se pueden observar patrones composicionales entre las mismas mineralogías, esto se puede observar de en varias secciones del barreno con distintos aspectos tales como: imágenes RGB del barreno, con máscaras de la mineralogía detectada por SWIR,

presencia de estos minerales en el barrenado, variaciones en distintas longitudes de onda, ensayos, logueo, etc.

El mapeo de estas variaciones permite a los geólogos evaluar zonas de mineralización / alteración y posicionarse en un sistema de alteración extenso.

Además de reconocer los ensambles mineralógicos de cada porción del barrenado, es posible correlacionar estas asociaciones mediante diagramas propuestos de alteración, algunos como de Leach & Corbett (1995); el cual ha funcionado para reconocer distintos tipos de sistemas con mineralogías en SWIR (Figura 8).



-  Potassic
-  Skarn
-  Phyllic
-  Propylitic
-  Argillic
-  Outer / Sub Propylitic
-  Advanced Argillic

Mineral Abbreviations :

Ab - albite; Act - actinolite; Ad - adularia; Al - alunite; And - andalusite; Bio - biotite; Cb - carbonate (Ca, Mg, Mn, Fe); Ch - chlorite; Chab - chabazite; Chd - chalcedony; Ch-Sm - chlorite-smectite; Cor - corundum; Cpx - clinopyroxene; Cr - cristobalite; Ct - calcite; Do - dolomite; Dik - dickite; Dp - diaspore; Ep - epidote; Fsp - feldspar; Ga - garnet; Hal - halloysite; Heu - heulandite; I - illite; I-Sm - illite-smectite; K - kaolinite; Lau - laumontite; Mt - magnetite; Mor - mordenite; Nat - natrolite; Op - opaline silica; Pyr - pyrophyllite; Q - quartz; Ser - sericite; Sid - siderite; Sm - smectite; Stb - stilbite; Tr - tremolite; Tri - tridymite; Ves - vesuvianite; Wai - wairakite; Wo - wollastonite; Zeo - zeolite

Figura 8. Diagrama de asociaciones minerales de sistemas de alteración hidrotermal de Leach & Corbett (1995).

Otro factor importante en la recolección e interpretación de datos espectrales, ha sido la caracterización composicional de estos minerales reconocidos mediante la espectrometría SWIR, donde particularmente en el yacimiento Los Humos, se registraron variaciones composicionales en la alteración filica, donde presenta patrones y variaciones en zonas de más alta temperatura (dentro de la misma zona filica), y estas tienen una mayor afinidad a minerales del grupo de las micas blancas con características en su longitud de onda con incrementos en sus picos de W2200 presentando rangos de hasta 2210-2212 nm (Figura 9).

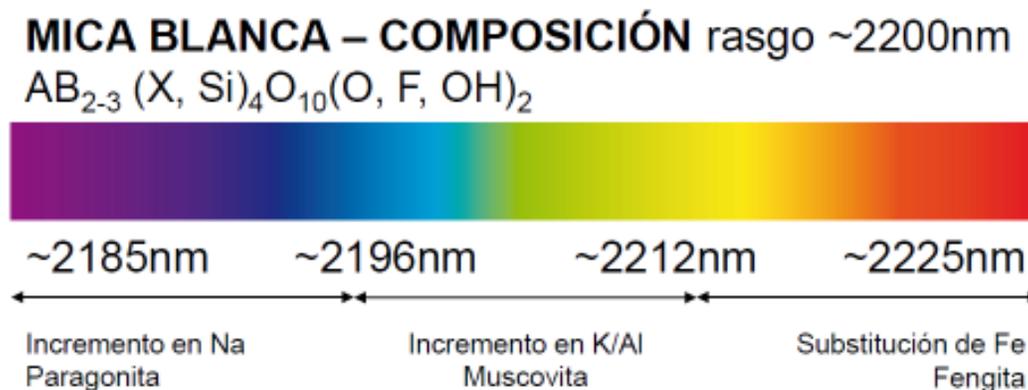


Figura 9. Rangos composicionales dependiendo de la variación en nanómetros de la longitud de onda en SWIR.

5.3.3 Selección de barrenos

El objetivo principal del análisis hiperespectral en núcleos de barrenación en el proyecto Los Humos, fue el de identificar y generar un modelo de alteración asociado, este modelo fue realizado a través de los escaneos de 37 barrenos con un total de 14,000 metros de escaneo y los cuales se localizan a lo largo de 4 secciones que comprenden las partes más centrales del yacimiento, y una parte más distal como se puede apreciar en la Figura 10.

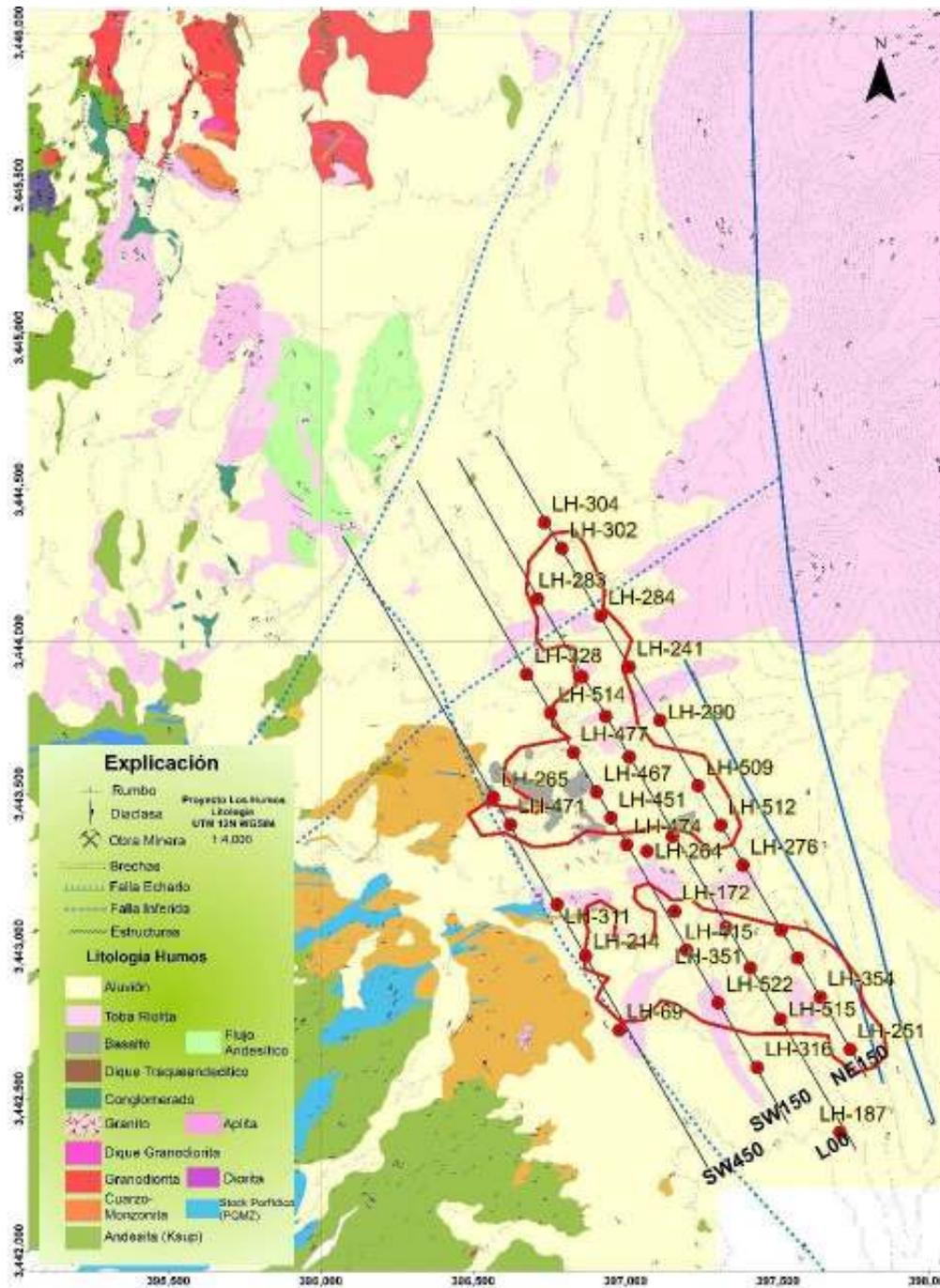


Figura 10. Plano geológico del área de Los Humos, mostrando zonas seleccionadas para los barrenos analizados.

Los barrenos fueron seleccionados y limpiados propiamente para su envío a los laboratorios de ALS Minerals, en Hermosillo, donde TerraCore Geo tiene su laboratorio instalado para el escaneo de núcleo. Posteriormente al escaneo, estos resultados se envían a

las oficinas centrales en Reno, Nevada, Estados Unidos para la parte de interpretación y caracterización de fases minerales por parte del staff geológico de TerraCore.

Los resultados se presentaron en una plataforma virtual donde se pudieron revisar todos los datos, tanto espectrales proporcionados por Exploraciones Mineras Peñoles, como ensayos de laboratorio y logeos, para poder asociarlos con los resultados hiperespectrales, como se observa en la Figura 7.

En cuanto al esquema de caracterización conceptual para integrarlo a un modelo de alteración relacionado a sistemas pórfido de cobre, se comenzó por realizar una base de datos con características de asociaciones mineralógicas de alteración basadas en las relaciones de formación Temperatura-pH que ayudara a constreñir el zoneamiento que existe en yacimientos de este tipo.

5.4 Inclusiones fluidas

La información recabada en el estudio y medición de inclusiones fluidas, proporcionan información directa sobre la temperatura, presión, salinidad, densidad y composición de los fluidos hidrotermales responsables del transporte y depósito de los metales. A lo largo de los años se han hecho varios estudios descriptivos de la técnica y utilidad del análisis de inclusiones fluidas en los sistemas hidrotermales, entre los que destacan los realizados por Roedder (1984), Shepperd et al., (1985), Roedder y Bodnar (1997) y Wilkinson (2001), entre otros.

Las inclusiones fluidas pueden ser clasificadas como: primarias son las que se forman durante, el crecimiento del cristal huésped; pseudo-secundarias si se tiene un fracturamiento

que ocurra durante el crecimiento del cristal, donde algunas inclusiones fluidas pueden quedar atrapadas mientras el cristal continúa desarrollándose y secundarias si el cristal se fractura después de formado y entra algo de fluido lo largo de las fracturas.

La preparación de las muestras es crítica ya que son secciones doblemente pulidas, con tamaños de sección delgada normal, pero mucho más gruesas que las usadas para estudios petrográficos. Las muestras que se prepararon para el estudio microtermométrico fueron estratégicamente seleccionadas y tomadas metódicamente sobre vetillas características del yacimiento. Las inclusiones fluidas fueron estudiadas en detalle con petrografía, ya que clasificación temporal es crítica para su interpretación sobre su origen y evolución, e importante es el de identificar los tipos de inclusiones representativas de los fluidos y eventos mineralizantes.

El estudio microtermométrico se realizó en el laboratorio de la UNAM campus Juriquilla, en la División de Geociencias a cargo del Dr. Eduardo González Partida, el cual brindó apoyo logístico para la realización de las mediciones. Se utilizó un microscopio petrográfico Olympus, con una adaptación de una platina para microtermometría LINKAM THMSG 600, esta con capacidad de enfriamiento a base de nitrógeno líquido de -130°C , y una platina de calentamiento con posibilidad de hasta $\leq 600^{\circ}\text{C}$. Para la toma de fotografías se le adaptó una cámara especial para microscopios, de la marca ZEISS AxioCam, a color con 5 MP de resolución (Figura 11).

El estudio de inclusiones fluidas se llevó a cabo en 6 muestras de núcleo de barrenación y las cuales fueron estratégicamente recolectadas en distintos tipos de vetillas con cuarzo, a distintas profundidades en el yacimiento.



Figura 11. Equipo de laboratorio para inclusiones fluidas, microscopio Olympus, con equipo de micro termometría LINKAM, ubicado en el Laboratorio de microtermometría de la UNAM campus Juriquilla.

5.5 Geoquímica

Con el propósito de clasificar y definir el ambiente geoquímico-tectónico de las rocas presentes en el distrito Los Humos, se recolectaron 15 muestras selectivamente tomadas de los intrusivos presentes en este distrito y los cuales corresponden al arco Larámide. Las muestras seleccionadas corresponden a intrusivos pre-mineralizados, stocks porfídicos y post-mineralizados y fueron tomados directamente de afloramientos y barrenos, escogiéndose muestras representativas y poco alteradas para evitar contaminación de la muestra, las cuales, a pesar de ser una zona fuertemente erosionada y alterada por los eventos hidrotermales de presentes en toda la región, la mayoría de las muestras presentan una débil alteración.

Una relación y descripción general de cada una de estas muestras seleccionadas, se da en la Tabla 2.

Todas estas muestras fueron limpiadas y trituradas hasta el tamaño de gravilla mediante el uso de una quebradora de quijada con placas de acero inoxidable, con el proceso de limpieza con agua de grifo, sílica, para evitar contaminación residual de muestras anteriormente trituradas. Después el material triturado se pulverizó utilizando un contenedor con puck de cerámica marca Herzog. El tratamiento de las muestras se realizó en el Laboratorio de preparación de muestras del Instituto de Geología de Universidad Autónoma de México, Estación Regional del Noroeste (ERNO).

Las rocas tomadas para la caracterización y clasificación geoquímica fueron seleccionadas y enviadas a los laboratorios locales de ALS Minerals, en donde se escogieron paquetes de análisis de elementos mayores y trazas para las muestras seleccionadas, los paquetes que consta de los elementos mayores fue el ME-XRF26, el cual integra 14 elementos mayores formadores de roca. Por otro lado, también se consideró el análisis de elementos traza de dichas muestras con el fin de caracterizar la zona en diferentes aspectos geológicos y dar una interpretación más completa y precisa del origen de estas rocas. El paquete para los análisis de elementos traza fue el ME-MS81, que consta del análisis en partes por millón (ppm) de los elementos que se encuentran en proporciones menores a 0.5% del total de la roca y en el cual se otorgan un total de 30 elementos los cuales abarcan desde tierras raras (LREE-HREE), y otros elementos inmóviles para identificar particularidades de las rocas de la zona.

Tabla 2. Muestras para geoquímica tomadas en el área de Los Humos.

Muestra	Coordenada	Descripción
<i>JB-01</i>	E 396735 N 3442773	Roca de composición granítica, abundante cuarzo, feldespato potásico, sin vetillas, intemperismo débil, sin Alt.
<i>JB-02</i>	E 396693 N 3443115	Stock Pórfidico Qz-Monz? Con pequeños cristales de cuarzo, y matriz fina encajonado en Qz-Monzonita.
<i>JB-04</i>	E 393811 N 3445015	Intrusivo granítico con cristales de Qz, con textura granular, presenta variación textural más fina a pocos metros, y alteración en Bt-Hbl de Chl.
<i>JB-05</i>	E 394903 N 3446036	Cerro Amarillo, Rx intrusivo granítico con vetillas E-W, con feld K-Moli. Cuarzo intersticial >15%.
<i>JB-06</i>	E 395666 N 3445686	Stock porfidico? Cuarzo-Diorítico, con Py>Cpy en vetillas. Sin Alteración
<i>JB-07</i>	E 396186 N 3446742	Roca intrusiva granodiorítica con textura granular, abundantes cristales de cuarzo, plagioclasa y feldespato, poco intemperizada.
<i>JB-08</i>	E 396207 N 3443405	Roca Intrusiva Qz-Monzonita con rumbo E-W, más rosada, muestra poco alterada con arcillas en feldespatos
<i>JB-09</i>	Barreno: LH- 261@348.3m	Roca Qz-monzonita grano medio, con biotita, poco Qz.
<i>JB-11</i>	E 396197 N 3442709	Roca porfidica? Fuerte silicificación en contacto al Norte Qz-Monzonita. Afloramiento a lado de obra minera con veta de Qz-Esp-CuOx.
<i>JB-12</i>	E 396552 N 3447571	Roca granodiorita Leones (Damon et al, 1983), sin alt, abundantes cristales de Qz, ferromagnesianos Bt-Hbl.
<i>JB-13</i>	Barreno: LH- 351@312.5	Stock Hipabisal Qz-Monzonítico con diss de sulfuros (Cpy>Mo>Py)
<i>JB-14</i>	Barreno: LH- 275@389.95	Stock Hipabisal Qz- Monzonítico, presenta Alt. Filica moderada,
<i>JB-15</i>	Barreno: LH- 275@515	Roca intrusiva Monzo-granito de grano medio, con books de biotita (2%)
<i>JB-16</i>	Barreno: LH- 145@399.25	Stock Hipabisal Qz- Monzonítico? fuerte Alt filica, Il>musc, diferente textura a los demás pórfidos.
<i>JB-17</i>	Barreno: LH- 371@352.25	Stock Hipabisal Qz- Monzonítico.

6. Resultados

6.1 SWIR (TerraCore)

De acuerdo con sus tipos y estilos de mineralización-alteración de Cu-Mo y potásica, fílica, argílica, y sódico-cálcica con cierto grado de zoneamiento hacen que el yacimiento Los Humos sea considerado del tipo pórfido de cobre. Dentro de este distrito, se tienen varias zonas con manifestaciones de alteración y mineralización atractivas, sin embargo, las principales zonas mineralizadas con mayor interés económico para la compañía Peñoles S.A. de C.V., corresponden a las zonas reconocidas como cuerpos Elizabeth Norte y Elizabeth Sur (ver Figura 10). Las variaciones en tipos e intensidad de alteración en conjunto con su mineralización y estructuras son una serie de factores que pueden dificultar la exploración y evaluación de este tipo de sistemas magmático-hidrotermal en esta región de Sonora.

Con el uso del análisis hiperespectral ayuda en obtener una mejor comprensión y comportamiento de las asociaciones mineralógicas de alteración presentes detectadas y variaciones dentro de los mismos complejos minerales presentes. La adquisición de datos VNIR y SWIR permitió la caracterización de estos complejos minerales, como carbonatos y silicatos hidratados.

El análisis hiperespectral realizado, muestra una clara correlación de la mineralización-alteración con respecto al zoneamiento típico de los sistemas pórfido de cobre, en este caso las alteraciones principales presentes en este proyecto corresponden a; biotización (detectable en el infrarrojo de onda corta –SWIR–), presenta como diminutas hojuelas de biotita (hidrotermal), en algunos casos acompañada de clorita y actinolita. En algunos casos se da una mineralogía sobreimpuesta ante el enfriamiento de esta fase de

temperatura alta, como minerales del grupo de las esmécticas y una variedad de saponita – arcilla con Mg derivado de la alteración de los minerales magnesianos (Figura 12); alteración fílica, compuesta con asociaciones mineralógicas de illita-muscovita \pm cuarzo; alteración argílica, la cual en base a “logueo” y relaciones de corte, esta alteración no es de gran presencia dentro del sistema, más bien por su disposición espacial, parece estar asociada a procesos supergénicos relacionada a estructuras que han aprovechado para la percolación de aguas meteóricas. Esta alteración está definida por ensambles mineralógicos de illita-caolinita-montmorillonita; también se logró apreciar alteración propilítica, donde en un principio se pensaba que estaba relacionada al mismo sistema de alteración tipo pórfido de cobre, y mediante “logueo” se logró apreciar que existe otra intrusión profunda más tardía que genera un ensamble mineralógico similar a esta alteración, y suele aparecer como clorita >> illita-esmectita \pm carbonato, en la Figura 12, se podrían apreciar dichas observaciones.

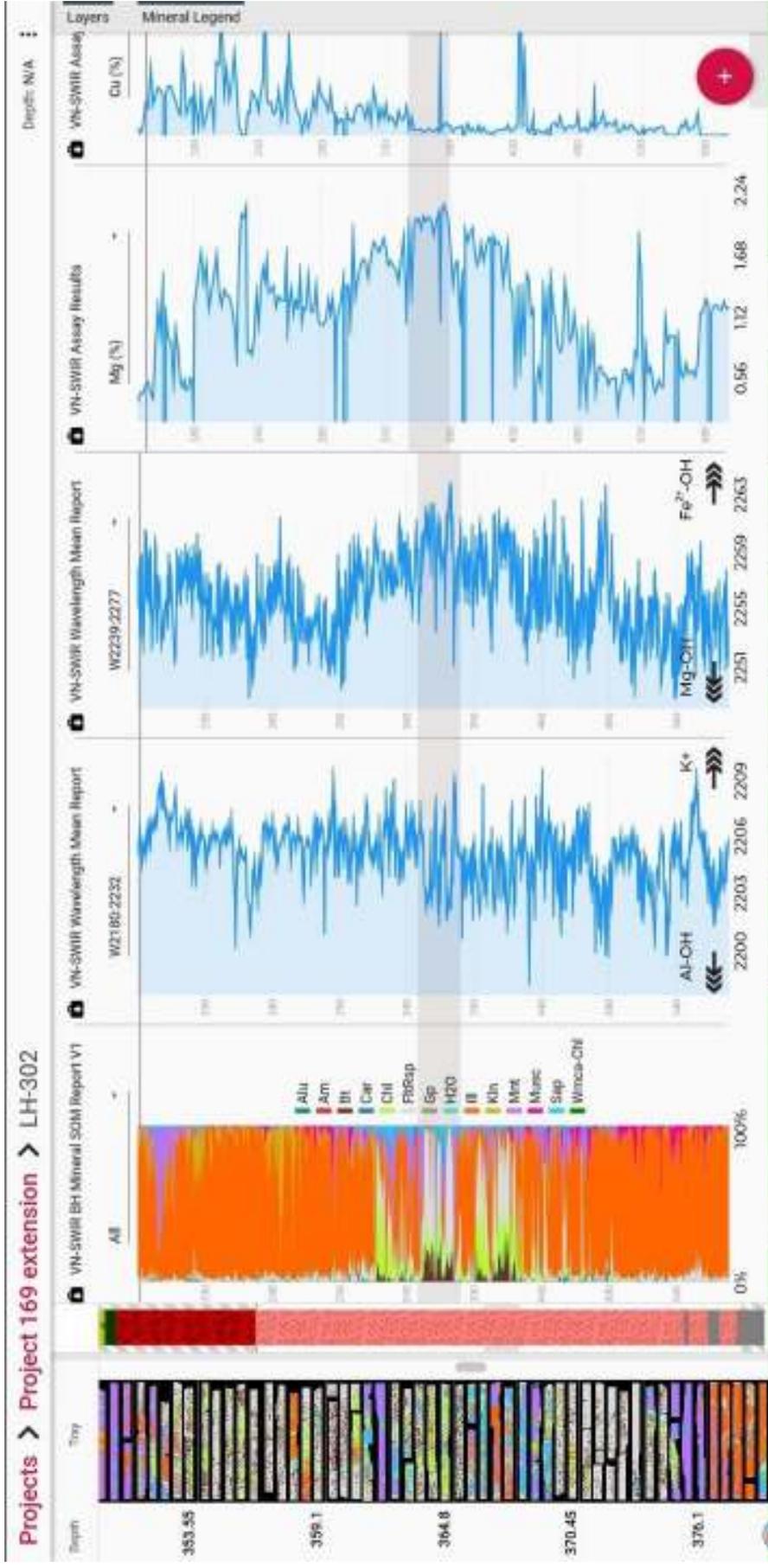


Figura 12. Resumen gráfico del barreno LH-302. Donde se observa una gráfica representando la relación de abundancia de distintos minerales hidrotermales del yacimiento. La asociación del mineral illita por sí solo (longitud de onda 2200w), o a veces como una asociación illita>esmectita, representa la zona filica del sistema de los Humos, existen otras zonas con relaciones de illita-muscovita (sericita) donde se pueden observar tendencias a zonas de mayor temperatura. Y la cual representa una transición hacia las zonas más potásicas y más calientes del yacimiento, dando a mostrar relaciones minerales como biotita (en escasas ocasiones se llega a observar inalterada o con sobreimpresión de clorita y se puede observar sus principales rasgos de absorción en 2250w y 2340w) en donde muchas ocasiones se encuentra con una alteración muy representativa de estas zonas potásicas con biotita, de clorita, clorita-esmectita-seponita, que se puede reconocer como una sobreimpresión en las etapas de enfriamiento de la zona causando la mineralización del sistema. Alu: Aluminita, Am: Anfíbol, Bt: Biotita, Car: Carbonato, Chl: Clorita, FltRsp: Sin Respuesta, Gp: yeso, H2O: Agua, Il: Illita, Kln: Caolinita, Mnt: Montmorillonita, Musc: Muscovita, Non: Nontronita, Sap: Saponita.

6.2 Inclusiones fluidas

Los datos obtenidos a través de las mediciones realizadas en alrededor de 160 mediciones a lo largo de 6 muestras del yacimiento, de las cuales la gran mayoría resultaron ser inclusiones bifásicas secundarias y pseudosecundarias de las cuales, la mayoría homogenizaron en fase líquida durante su proceso de calentamiento, y además se calculó las salinidades usando la temperatura de fusión del hielo (T_m), utilizando la hoja de cálculo HOKIEFLINCS_H₂O-NaCl publicada por Steele-MacInnis et al (2012) ver. Tabla 3.

Muestra	Tipo Vetilla	Num.	T _{m-ice} (°C)	T _{m-ice} prom (°C)	T _h (°C)	T _h prom (°C)	NaCl Eq%	NaCl Prom.
375-15m	Qz-Fk-Mo-Sul	26	-15° a -6°	-9.3	183° a 430°	219.08	9.2 a 18.6	13
LH-IF01	Qz-Bt-Sul	20	-21° a -1°	-9.6	170° a >600°	318.35	7.8 a 23.5	12
LH-IF02	Qz-Sul	32	-8° a -3°	-5.2	180° a 220°	199.91	5 a 11.7	8
LH-IF03	Qz-Sul	22	-18° a -1°	-9.1	130° a 222°	176.05	1.7 a 20.9	12
LH-IF04	Qz-Fk-Mo-Sul	40	-21° a -6°	-14.0	150° a 440°	251.98	9.2 a 23	17
LH-IF07	Qz-Sul	26	-14° a -3°	-8.8	190° a 325°	235.81	4.9 a 19.4	12

Tabla 3. Mostrando resultados de análisis microtermométricos en inclusiones fluidas. T_{m-ice} = Temperatura de fusión de hielo; T_h = Temperatura de homogeneización; Qz = Cuarzo; SUL = Sulfuros (pirita, calcopirita); Bt = Biotita; Mo = Molibdenita; Fk = Feldespato Alcalino.

En este estudio se logró identificar dos tipos de vetillas con mineralización de Cu y Mo, donde en algunas de ellas los sulfuros son acompañados con feldespato potásico (Qz-Fk-Mo-Sul) y otras con biotita (Qz-Bt-Sul), las cuales fueron identificadas haciendo uso de la distribución en tiempo y espacio (paragénesis).

Las inclusiones medidas en las vetillas con halo feldespático y mineralización de Cu-Mo (mineralizadas), son bifásicas con líquido + vapor y por su distribución fueron interpretadas como del tipo pseudo-secundarias. Sus temperaturas de homogenización fueron en el rango de 150° a 440 °C, con salinidades de 9.2 hasta 23 NaCl wt% equivalente (Figura 13).

En cambio, las vetillas con biotita presentan temperaturas mayores, son bifásicas con líquido + vapor. Este tipo de inclusión presenta características solo con líquido mayor que gas, la cual las salinidades en promedio de estas inclusiones son del orden de 7.8 a 23.5 wt% NaCl y presentan temperaturas de homogenización del orden desde 170° hasta >600°C.

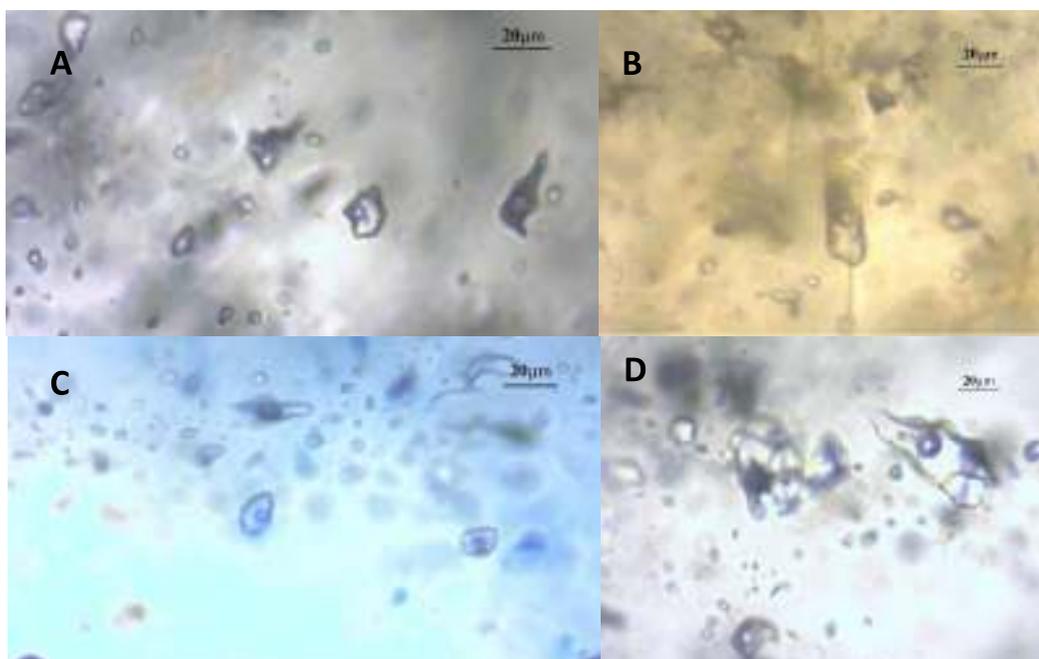


Figura 13. Microfotografías de inclusiones del yacimiento Los Humos, mostrando en A y B, inclusiones bifásicas en vetillas de Cz + Mo + FK + Sul de la muestra 375-15m; relacionadas a mineralización tipo pórfido de cobre, en C y D de muestras LH-IF04 y LH-IF-07 que corresponden a inclusiones bifásicas L+V en vetillas de cuarzo + sulfuro. Cz: cuarzo; Mo: molibdenita; FK: feldespatos potásico; Sul: sulfuro.

Por otro lado, las vetillas de cuarzo + sulfuros tienen temperaturas de homogenización que van desde los 130° a los 325° C, con salinidades que varían desde 5 a 20.9 wt% NaCl equivalente con inclusiones bifásicas pseudosecundarias principalmente del tipo líquido – vapor.

La distribución de inclusiones fluidas en los tipos de vetillas estudiadas refleja una mayor proporción de inclusiones en las vetillas del tipo cuarzo + sulfuros (pirita – calcopirita), mientras que la distribución de las vetillas de cuarzo + molibdenita tienden a ser

menos frecuentes y corresponden a un rango de salinidades mayores a las inclusiones con salinidades menores a 15% de NaCl equivalente (Figura 14).

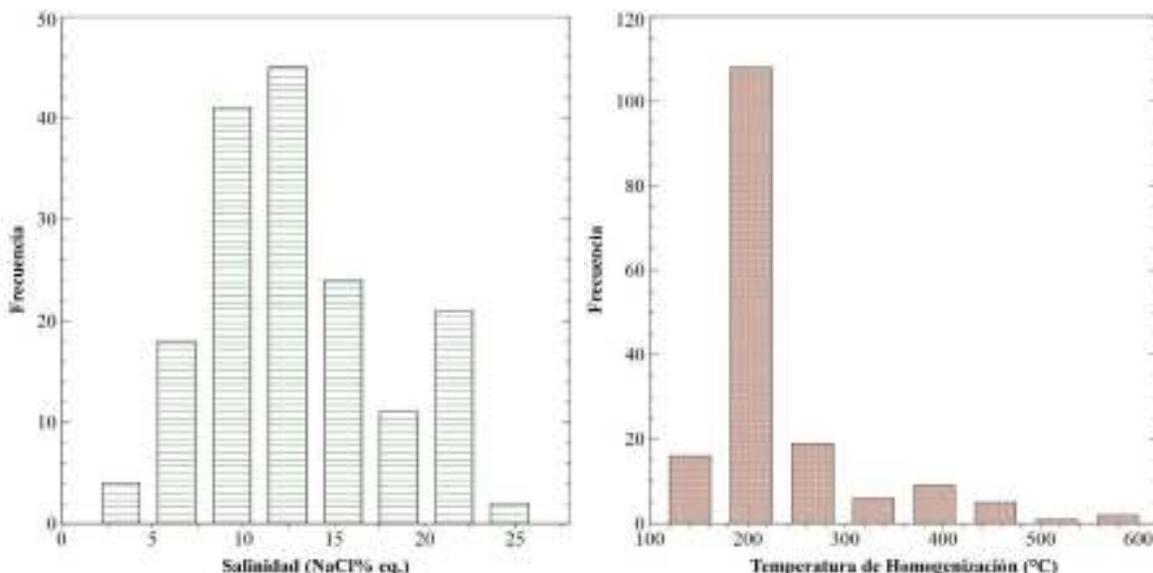


Figura 14. Histograma de salinidad y temperatura de homogenización de las inclusiones fluidas en vetillas mineralizadas del yacimiento tipo pórfido de cobre Los Humos.

La distribución de las inclusiones en el yacimiento se encuentra bien marcada en los diferentes tipos de vetillas, en las cuales se encontraron principalmente que las vetillas de cuarzo + biotita + sulfuros (pirita – calcopirita) corresponden a eventos mineralizantes de mayor temperatura y con salinidades variables. Por otro lado, las vetillas de cuarzo + molibdenita + halo feldespato potásico, en su mayoría se presentan mayormente con rangos de temperaturas menores y con salinidades >17% NaCl equivalente. Mientras que la distribución de las vetillas de cuarzo + biotita se presentan con menor incidencia, pero mayor temperatura asociada y con mineralización de Cu principalmente (Figura 15).

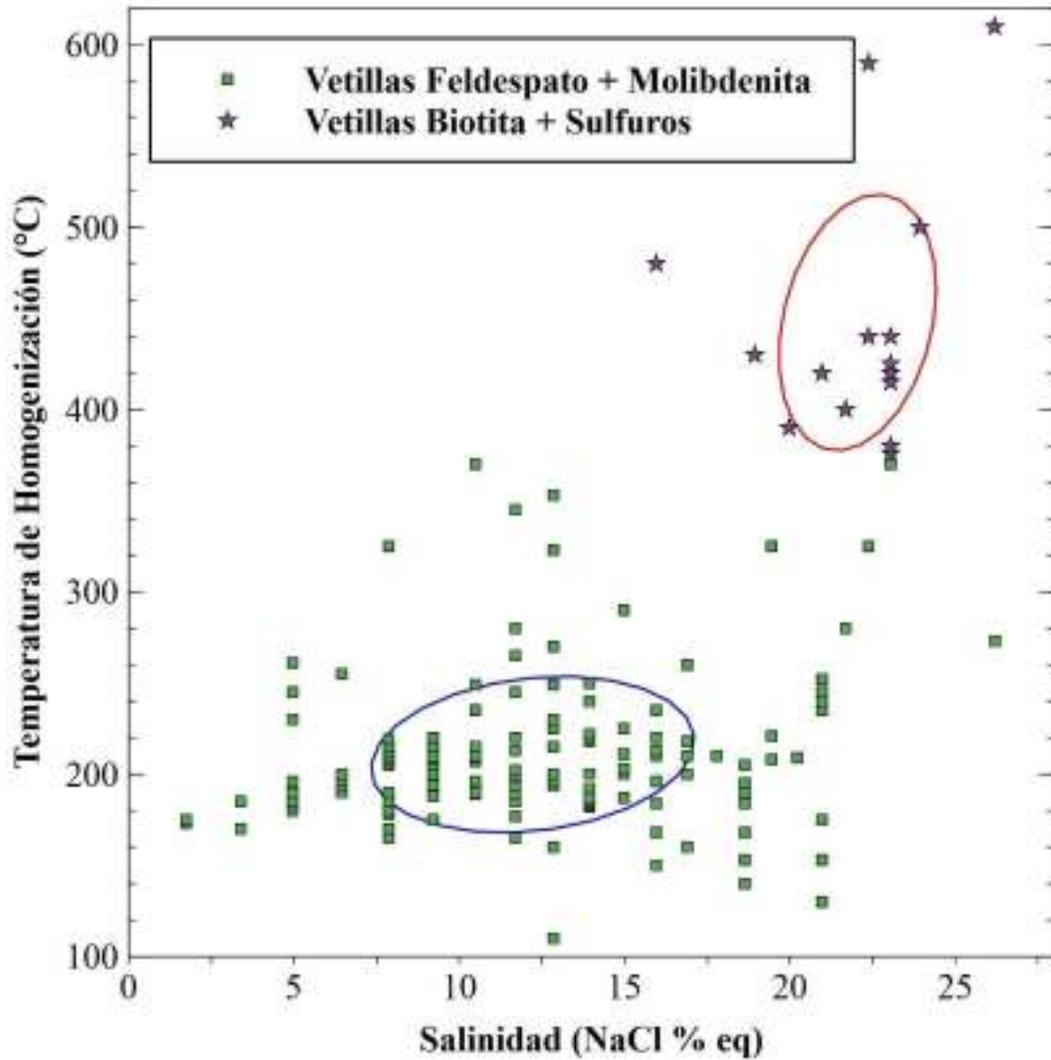


Figura 15. Grafica de salinidad Vs temperatura de homogenización, de las inclusiones fluidas estudiadas, mostrando poblaciones diferentes. Notar el cambio de temperaturas en vetillas cuarzo + molibdeno, con respecto a vetillas de cuarzo + biotita.

6.3 Geoquímica

Los resultados de los análisis de elementos mayores, elementos trazas y tierras raras (REE) son mostrados en las Tablas 4 y 5 y fueron analizados mediante lecturas y recomendaciones de Rollinson, 1993.

Tabla 4. Análisis de concentración de elementos mayores, obtenidos mediante fluorescencia de rayos-X (XRF-26) por ALS Minerals. # Mg: número de magnesio representa 100 veces la proporción molar de MgO / (MgO + FeO). A/CNK: relación de álcalis basado en las proporciones molares Al₂O₃ / (CaO + Na₂O + K₂O).

Localización	Plutones Pre-Mineralizados					Stocks Porfídicos							Granodiorita Leones (Damon et al, 1983)	Intrusivos Post- Mineralización	
	JB-04	JB-05	JB-07	JB-08	JB-09	JB-02	JB-06	JB-11	JB-13	JB-14	JB-16	JB-17	JB-12	JB-15	JB-01
	E 393811 N 3445015	E 394903 N 3446036	E 396186 N 3446742	E 396207 N 3443405	LH- 261@348.3m	E 396693 N 3443115	E 395666 N 3445686	E 396197 N 3442709	LH- 351@312.5M	LH- 275@389.95m	LH- 145@399.25m	LH- 371@252.25m	E 396552 N 3447571	LH- 275@551m	E 396735 N 3442773
SiO ₂	68.2	71.8	64.5	61.61	66.20	67.77	66.24	72.23	62.04	63.02	67.12	70.89	66.53	66.81	74.70
TiO ₂	0.39	0.32	0.65	0.71	0.49	0.40	0.44	0.27	0.56	0.54	0.44	0.29	0.48	0.46	0.21
Al ₂ O ₃	15.1	14.2	16.2	17.86	15.86	16.58	15.67	14.04	15.22	15.60	14.52	14.46	16.07	15.62	13.32
Fe ₂ O ₃	3.00	2.18	3.98	5.72	3.39	2.64	4.12	1.90	3.55	4.18	2.61	1.25	3.15	3.22	1.58
MnO	0.03	0.02	0.06	0.17	0.06	0.01	0.03	0.02	0.04	0.05	0.04	0.02	0.04	0.06	0.01
MgO	1.18	0.91	2.01	1.74	1.57	0.75	1.56	0.07	2.23	1.96	1.20	0.98	1.40	1.22	0.05
CaO	3.13	1.70	3.57	0.92	3.46	1.60	2.76	0.93	2.99	3.37	1.93	1.25	3.31	3.31	0.40
Na ₂ O	4.93	2.83	3.75	5.12	3.88	3.21	3.41	3.43	3.16	3.13	2.60	2.40	3.86	3.73	3.22
K ₂ O	0.88	4.36	3.83	2.87	3.31	3.75	3.71	4.18	3.00	3.50	4.44	5.34	3.37	3.45	5.23
P ₂ O ₅	0.12	0.07	0.18	0.20	0.15	0.17	0.13	0.08	0.16	0.16	0.11	0.08	0.16	0.13	0.06
BaO	0.02	0.10	0.11	0.08	0.10	0.11	0.10	0.13	0.07	0.14	0.11	0.13	0.10	0.10	0.07
SrO	0.06	0.02	0.04	0.04	0.05	0.03	0.05	0.02	0.04	0.05	0.15	0.03	0.06	0.05	0.02
LOI	1.82	0.66	0.49	2.14	0.98	1.84	0.85	1.03	5.23	4.00	3.86	2.40	0.56	1.10	0.52
Total %	98.9	99.1	99.4	99.18	99.50	98.86	99.07	98.33	98.29	99.70	99.13	99.52	99.09	99.26	99.39
# Mg	41.24	42.68	47.38	35.14	45.20	33.64	40.28	6.15	52.79	45.50	45.04	58.27	44.10	40.29	5.33
A/CNK	1.03	1.14	0.96	1.35	0.98	1.35	1.07	1.18	1.10	1.04	1.15	1.21	1.00	0.98	1.14

Tabla 5. Análisis de concentración de elementos trazas y REE obtenidos mediante ICP-MS, con la excepción del Pb. Datos medidos en los laboratorios de ALS Minerals.

Localización	Plutones Pre-Mineralizados					Stocks Porfídicos							Granodiorita Leones (Damon et al, 1983)	Intrusivos Post-Mineralización	
	JB-04	JB-05	JB-07	JB-08	JB-09	JB-02	JB-06	JB-11	JB-13	JB-14	JB-16	JB-17	JB-12	JB-15	JB-01
	E 393811.326 N 3445015.77	E 394903.007 N 3446036	E 396186.348 N 3446742.11	E 396207.662 N 3443405.29	LH- 261@348.3m	E 396693.432 N 3443115.13	E 395666.302 N 3445686.14	E 396197 N 3442709	LH- 351@312.5M	LH- 275@389.95m	LH- 145@399.25m	LH- 371@252.25m	E 396552 N 3447571	LH- 275@551m	E 396735.072 N 3442773.33
La	26	28.5	36.2	42	29.6	29.5	29.4	35.6	31.7	28.6	33	27.1	27.3	30.5	33.8
Ce	48.5	57.7	73.7	89.9	56.7	58.3	54.6	65	59.1	56.8	58.1	52	48.5	55.4	71.5
Pr	5.44	5.63	8.76	9.83	6.31	6.38	6.01	6.81	6.5	6.74	6.35	5.78	5.34	6.13	8.03
Nd	17.3	17.1	31.3	34.6	21.1	21.3	20.5	20.7	23.2	23.8	20.8	19.5	17.6	20.8	26.9
Sm	2.84	2.54	5.71	6.5	3.75	3.44	3.41	3.15	3.81	4.1	3.58	3.12	2.83	3.56	4.7
Eu	0.64	0.55	1.23	1.34	0.9	0.94	0.96	0.69	1.15	1.05	0.8	0.78	0.96	0.94	0.59
Gd	2.52	2.18	5.57	5.25	2.67	2.83	2.81	2.63	3.23	3.4	2.52	2.22	2.46	2.69	4.13
Tb	0.33	0.33	0.82	0.83	0.35	0.31	0.38	0.32	0.44	0.51	0.43	0.35	0.29	0.37	0.56
Dy	1.72	1.76	4.09	4.25	2.03	1.89	2.12	1.77	2.49	2.61	2.34	1.85	1.75	2.02	3.67
Ho	0.32	0.3	0.77	0.87	0.38	0.37	0.41	0.38	0.42	0.54	0.43	0.35	0.31	0.37	0.67
Er	1.06	1.11	2.27	2.37	1.22	1.14	1.16	1.09	1.18	1.58	1.24	0.91	0.86	1.07	2.27
Tm	0.13	0.14	0.33	0.33	0.12	0.13	0.16	0.15	0.2	0.24	0.2	0.16	0.09	0.16	0.34
Yb	0.91	0.99	2.56	2.08	1.02	0.98	1.16	0.94	1.11	1.32	1.44	0.9	0.95	1.02	2.53
Lu	0.15	0.15	0.39	0.32	0.13	0.17	0.22	0.16	0.2	0.26	0.21	0.16	0.13	0.2	0.36
ΣREE	107	118	173	200	126	127	123	139	134	131	131	115	109	125	160
Cs	4.53	9.79	4.44	2.96	3.65	3.62	6.02	2.88	5.2	8.58	11.75	2.17	2.71	4.98	2.19
Rb	56.6	194	146.5	139	126	142	204	144.5	154.5	132	218	167	120	137.5	190
Sr	542	200	366	394	502	276	439	218	413	469	1405	295	506	515	154
Ba	121	830	982	765	851	1035	892	1065	656	1295	933	1140	826	881	537
Zr	102	120	238	269	142	158	136	121	136	147	147	147	117	142	142
Y	10.1	9.8	24	22.2	11	9.9	12.2	10.7	13.5	15.8	13.4	10.5	9	11.6	21
U	3.47	5.18	6.48	3.51	5.14	3.99	4.57	2.75	7.03	4.49	7.31	8.61	3.97	4.78	3.68
Th	19.7	35.4	22.4	22.8	13.1	14.75	20.8	21.8	14.2	16.65	26.9	14.4	12.2	17.15	55.9
Ta	0.8	1.2	1.1	1.2	0.8	0.8	0.9	1	0.7	0.7	0.9	1	0.6	0.8	2.2
Hf	3.3	3.9	6.3	7	4.2	4.5	4	3.8	3.9	4.1	4.6	4.5	3.3	4.2	5.2
Nb	8.2	9.8	13.2	14.5	8.7	8.9	9.1	11	8.5	9.1	9.5	9.2	6.9	8.9	13.2

En general, las rocas intrusivas varían en su contenido de SiO₂ de 61.61 a 74.7 wt%, lo cual las ubica dentro de las rocas de carácter félsico, y con contenidos de Na₂O varían desde 2.4 a 5.12 wt% y en K₂O varían desde 0.88 a 5.34 wt%. El contenido en Al₂O₃ varia en las rocas desde 13.3 a 17.8 wt%. Los valores de pérdida por calcinación (LOI) están elevados en 7 muestras con rangos desde 1.82% a 5.23% el mayor de la muestra JB-13, reflejando los efectos de alteración coincidiendo con los estudios petrográficos previos y se consideraron para poder graficarlas en los diagramas de álcalis totales vs sílice (Na₂O + K₂O vs. SiO₂), esto debido a que los aspectos petrográficos de las rocas suelen presentar aspectos relativamente débiles de alteración para poderlos utilizar en la geoquímica de dichas rocas. Los resultados de los análisis de tierras raras muestran valores más altos en las tierras raras ligeras (LREE) con respecto a las tierras raras pesadas (HREE), mientras que la sumatoria de tierras raras ronda entre las muestras del orden de los 107 a los 200 ppm.

6.4 Geoquímica de elementos mayores y trazas

Las rocas analizadas corresponden a intrusivos relativamente félsicos, mostraron en la geoquímica una serie de rocas diferenciadas de origen calco-alcálico, y con una evolución claramente observada en su geoquímica de elementos mayores (Figura 16). En la mayoría de las rocas intrusivas, muestran en los resultados de los óxidos de elementos mayores, se observan patrones negativos con el incremento del contenido de SiO₂, excepto por el K₂O el cual presenta una tendencia creciente en relación a la sílice que indica una mayor disponibilidad de potasio conforme los magmas evolucionaron. Las muestras se ubican en el campo de rocas con alto-K en el diagrama de variación de Peccerillo and Taylor (1976), excepto la muestra Pjb-04 que tienen menor contenido en K₂O y más en Na₂O y cae en la zona de bajo-K (Figura 16). El Na₂O presenta una variación más dispersa lo cual es algo

común en rocas de este tipo. Se piensa que el contexto geoquímico del sistema en que evolucionaron los magmas, pudo haber mayor contaminación por K, aportando mayor contenido por la alteración potásica que se encuentra distribuida de distintas formas en rocas con esta alteración en el yacimiento.

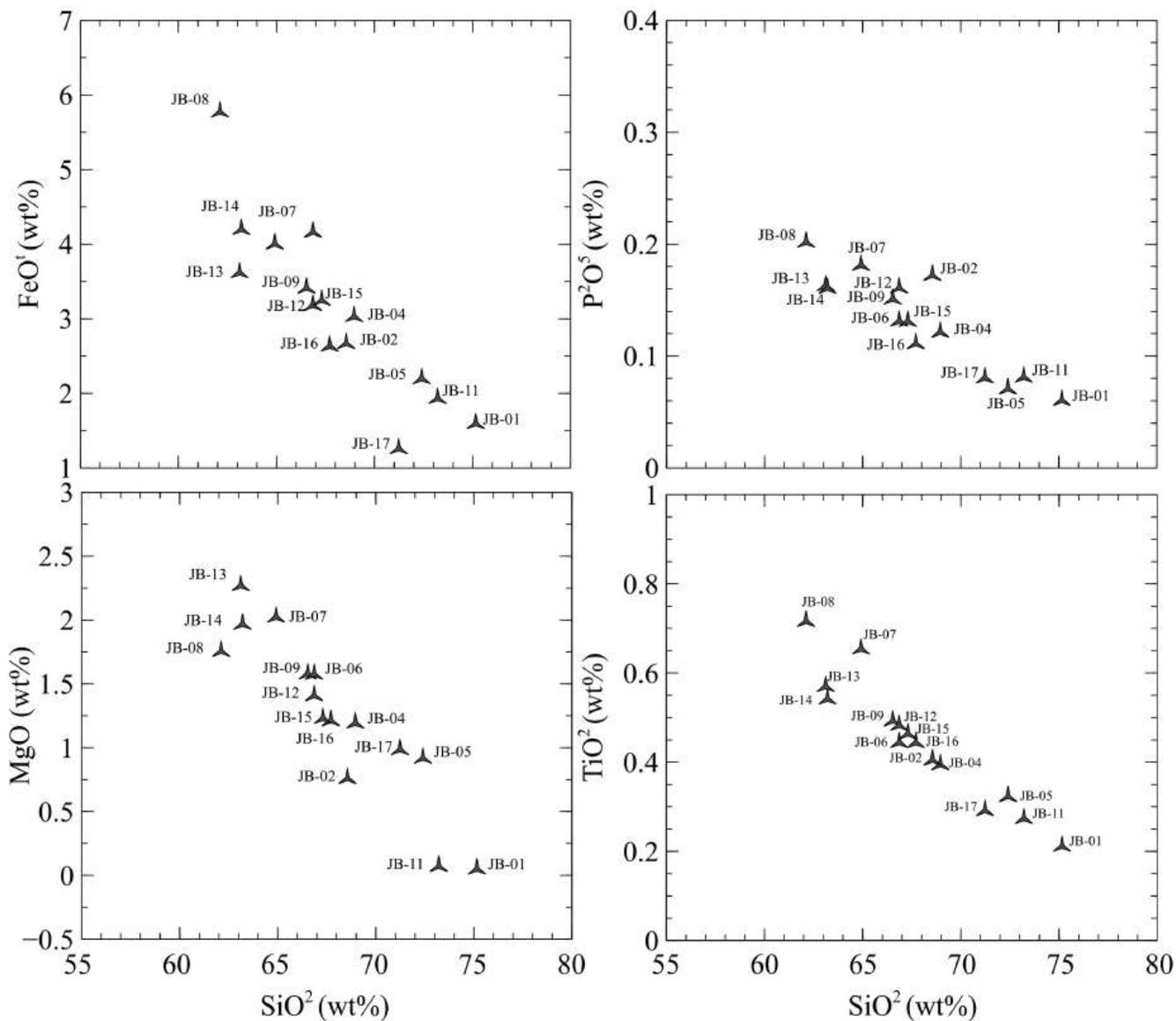


Figura 16. Diagramas de variación de sílice de elementos mayores tipo Harker. Los resultados de elementos mayores en óxidos fueron recalculados al 100%, con base anhidra. En el diagrama de variación K₂O vs Si₂O se muestran los límites de Peccerillo and Taylor (1976).

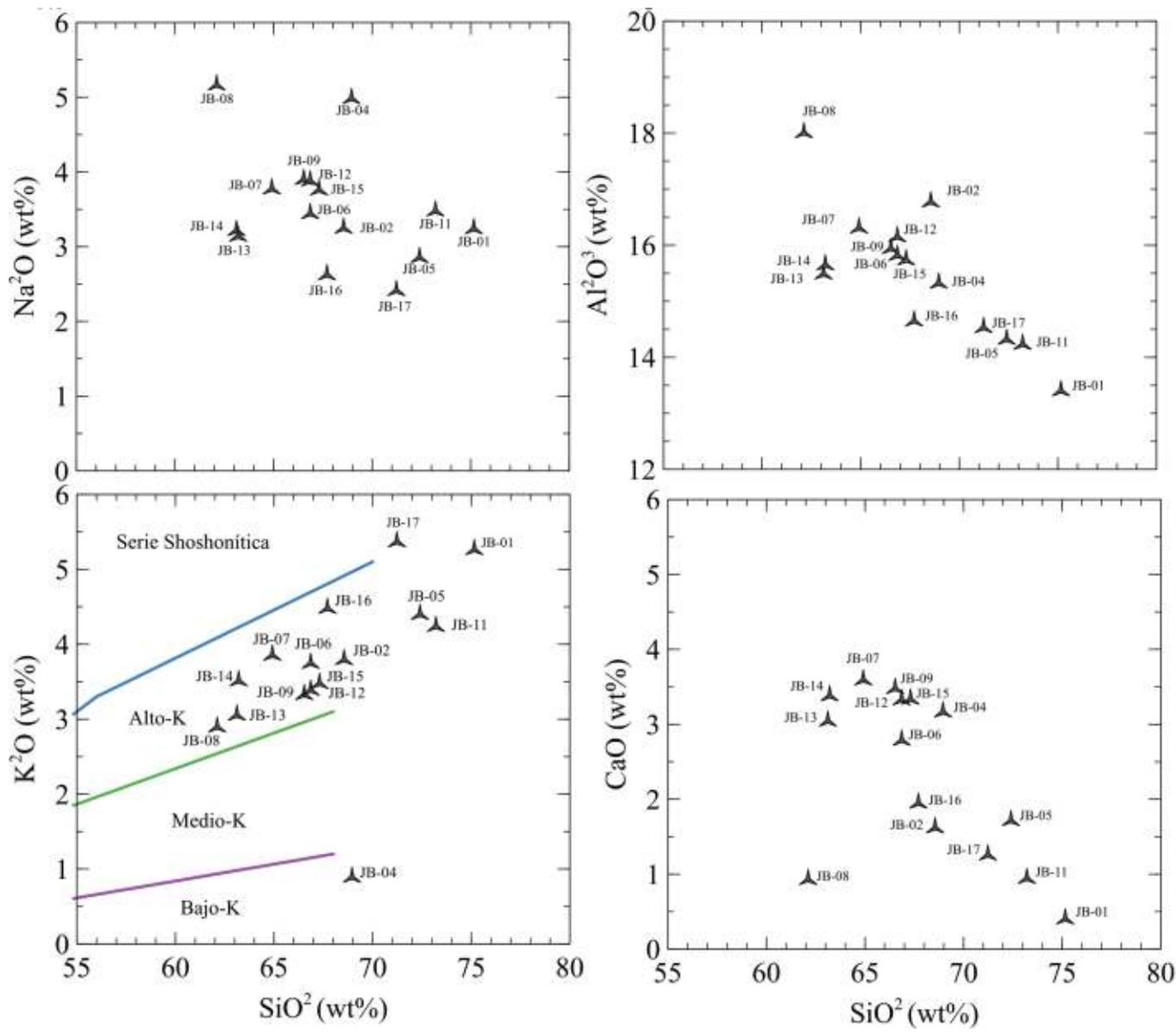


Figura 16. Continuación...

La información presentada indica relaciones interesantes de magmatismo de arco, la cual está relacionado al arco volcánico del Larámide en este caso a finales del Cretácico tardío, por los datos de geocronología que hay en distintas rocas intrusivas del área se corrobora esta hipótesis (Barra & Valencia, 2014). De acuerdo con el diagrama de álcalis total contra sílice (TAS), la composición de las muestras varía desde monzonita hasta granito de carácter sub-alkalino o calcoalcalino (Figura 17). En el diagrama AFM se puede ver que todas las muestras se ubican en la región de las rocas calcoalcalinas y describen una tendencia hacia el vértice rico en álcalis, por lo que se piensa que el pórfido de cobre Los Humos, corresponde a un magma derivado de una fuente diferenciada (Gill, 2010).

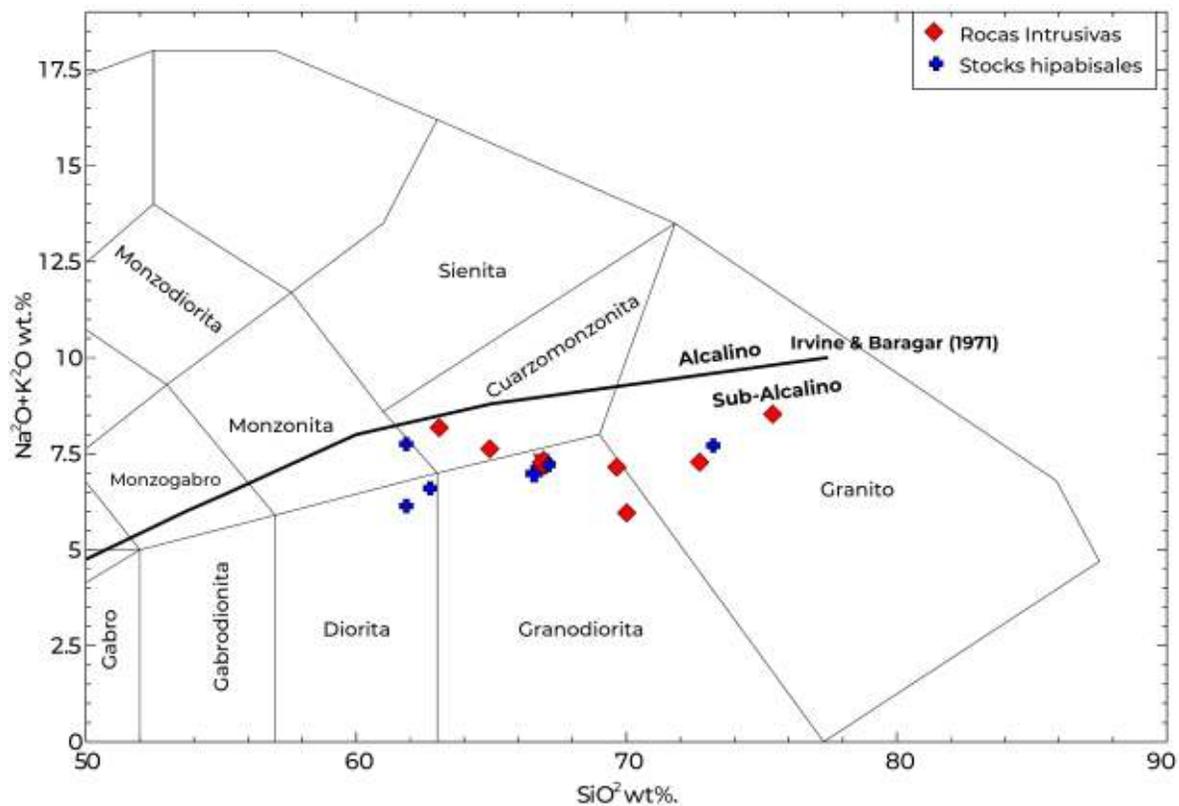


Figura 17. Diagrama de clasificación de rocas plutónicas propuesto por Middlemost (1994). Álcalis totales ($K_2O + Na_2O$) Vs SiO_2 . La línea sólida divide a los campos sub-alkalino y alcalino de acuerdo con Irvine and Baragar (1971). Notar que todas las muestras del prospecto Los Humos corresponden al campo sub-alkalino, y corresponden a rocas que van desde monzonita a granito.

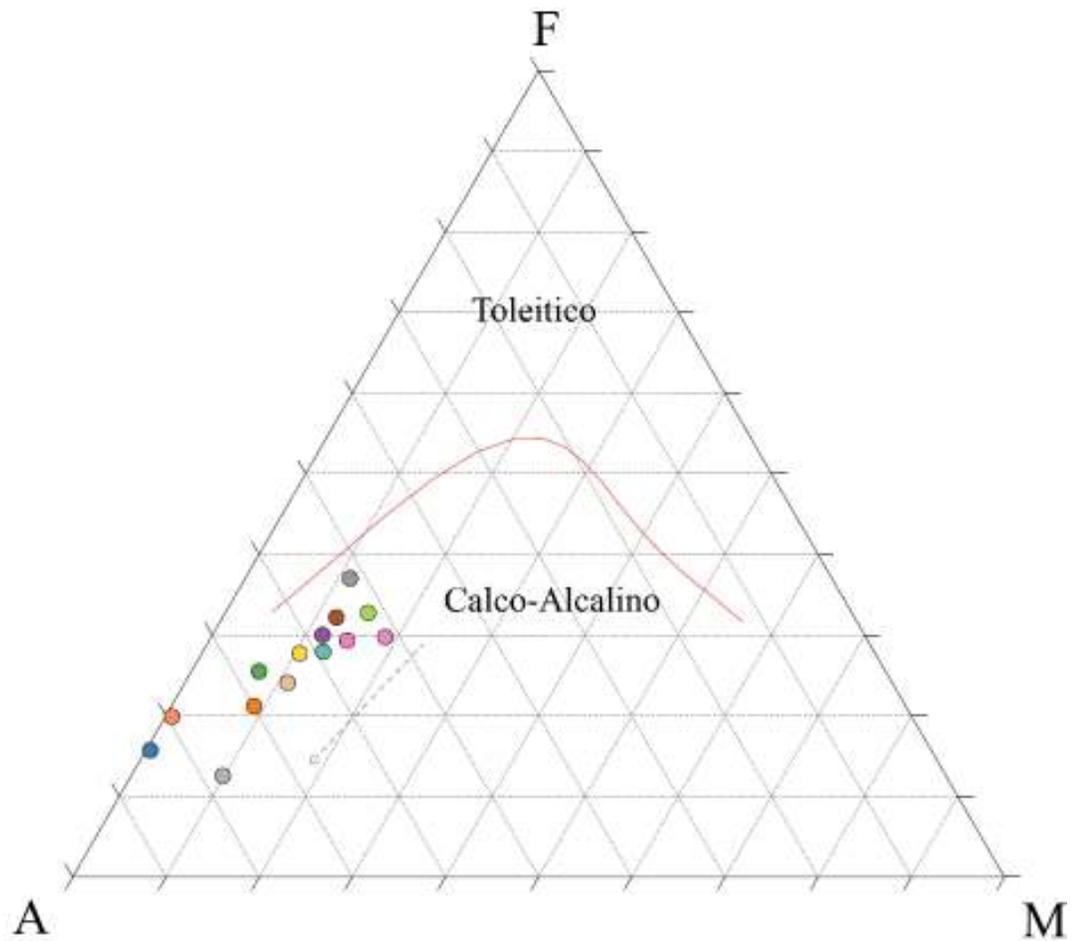


Figura 18. Diagrama AFM mostrando los límites para rocas calco-alcálicas y toleíticas de Irvine and Baragar (1971). Todas las muestras describen un patrón de evolución reduciendo su contenido en FeO y MgO. Donde A: $K_2O + Na_2O$; F: Fe total, recalculado de Fe_2O_3 ($FeO^T = FeO + 0.89981 * Fe_2O_3$); M: MgO. Los valores para esta grafica fueron recalculados al 100%.

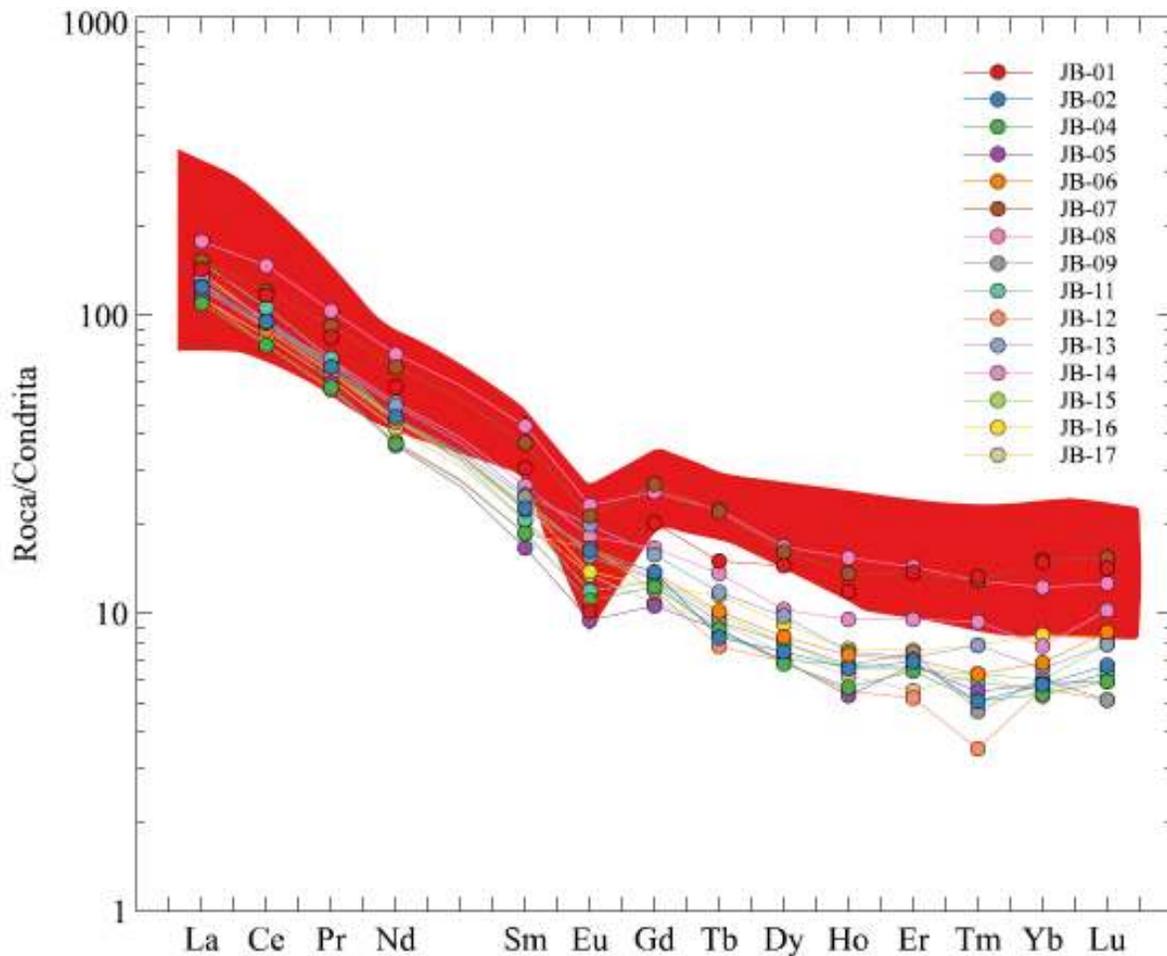


Figura 19. Patrones de tierras raras normalizados a valores condriticos de Sun & McDonough (1989), del pórfido de cobre Los Humos, donde el espectro de REE se caracteriza por valores relativamente mayores de LREE comparado con las HREE, y presentan todas estas rocas intrusivas una leve anomalía negativa de Eu. En banda roca se presentan el espectro de las rocas intrusivas laramídicas de la porción centro de Sonora (Valencia-Moreno et al, 2001).

En los diagramas de tierras raras (REE) de la Figura 19, muestran un patrón característico de rocas félsicas diferenciadas, las cuales han sufrido un empobrecimiento en tierras raras pesadas (HREE) con anomalías negativas de europio bien definidas, a anomalías negativas muy discretas a casi nulas, es posible que se asocie a ausencia o muy poca plagioclasa en la fuente. Algunos autores como Seedorf (2005), mencionan que suele ser una característica de rocas asociadas a mineralización de Cu. En la Figura 19, estos diagramas están referidos al espectro de rocas plutónicas del dominio norte del cinturón Larámide,

donde se puede notar una composición normalizada bastante parecida, aunque en las muestras de ellos Humos presentan anomalías negativas menos pronunciadas.

Los datos presentados en el diagrama de elementos multielementales en la Figura 20, fueron normalizados a manto primitivo, donde se muestran rasgos particulares de arco magmático continental como la anomalía negativa de Nb-Ta, P y Ti, acoplado a K enriquecido, Rb, Ba, U. Estos rasgos son particulares en magmas generados en zonas de subducción, esta afirmación está sustentada además con un diagrama discriminador de Y-Nb en la Figura 21, donde las muestras se encuentran localizadas en el campo de granitos de arco volcánico.

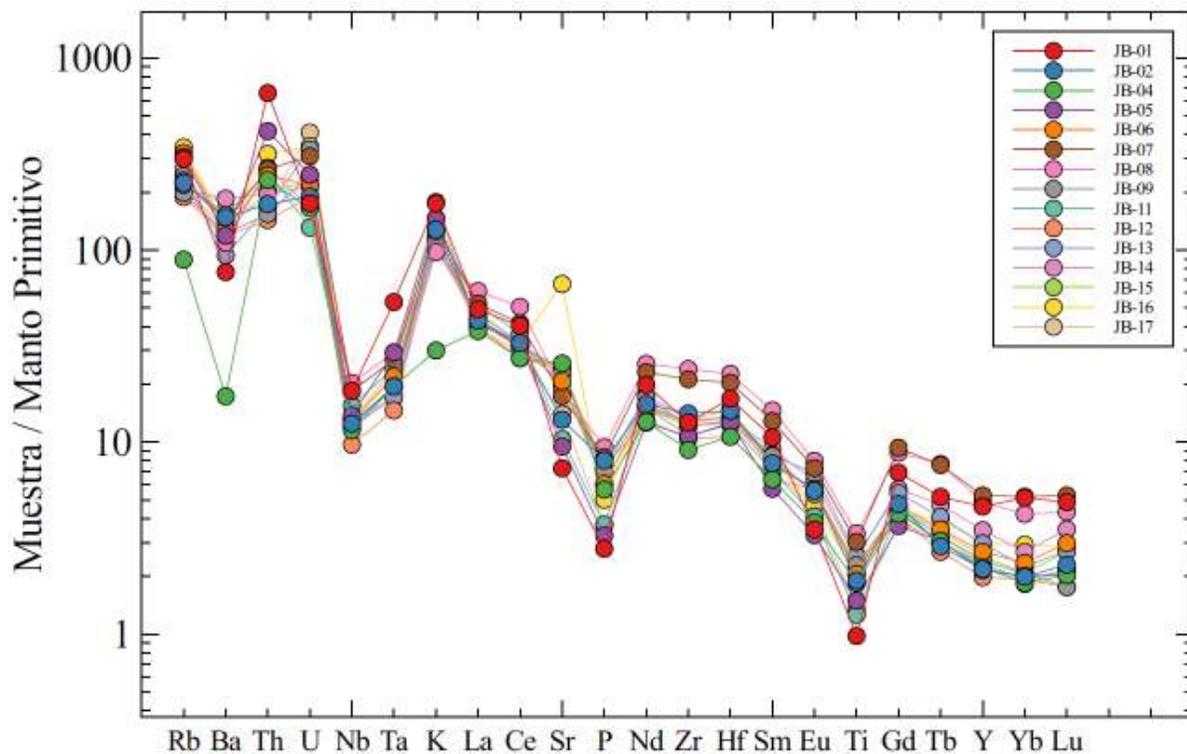


Figura 20. Patrones multi-elementales de muestras del pórfido de cobre Los Humos, normalizado a manto primitivo de Sun & McDonough (1989). Todas las concentraciones son en ppm, K, P y Ti fueron calculados de los resultados de elementos mayores en óxidos dados en la tabla 5. Todas las rocas muestran patrones similares, caracterizados por las anomalías negativas de Nb-Ta, P, Ti, y suavemente en Y, además de anomalías positivas de Rb, Th, y K. Estas anomalías son características de magmas generados en ambientes tectónicos de arcos volcánicos.

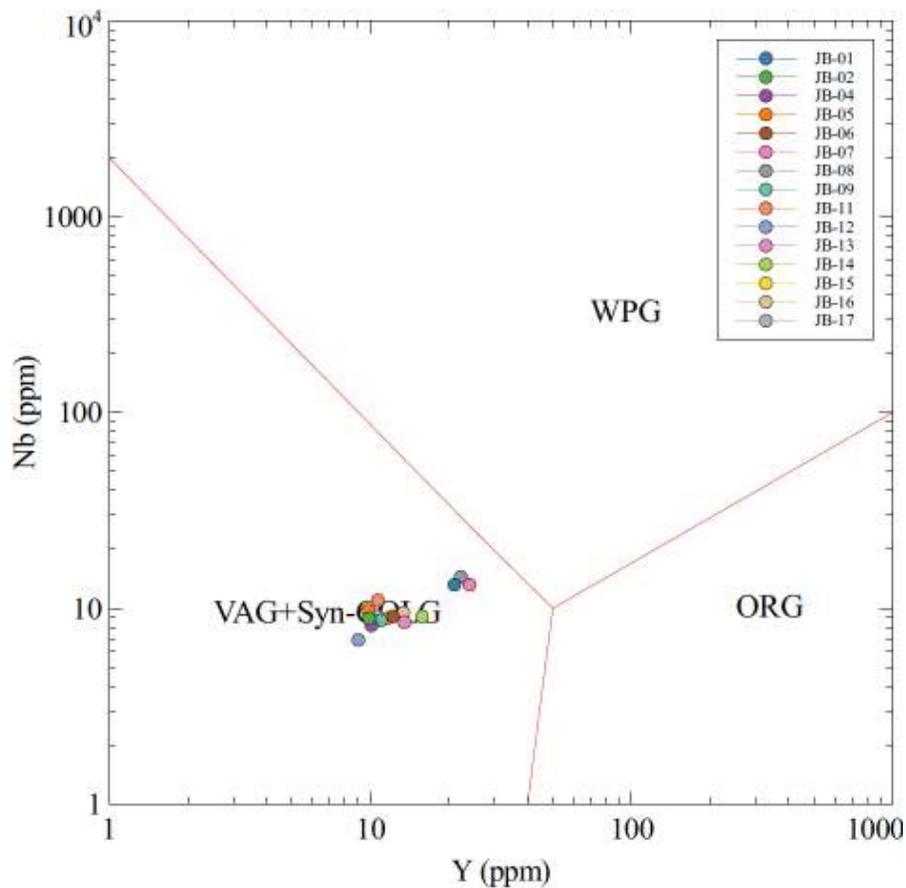


Figura 21. Diagrama de discriminación tectónica de Y-Nb indicando los campos de Pearce *et al.* (1984). Todas las muestras se encuentran dentro de una misma región en el campo de los Granitos de arco volcánico (VAG). VAG + Syn-COLG: arcos volcánicos y granitos sin-colisionales; WPG: Granitos intraplaca; ORG: Granitos de límite oceánico.

Los resultados de geoquímica del pórfido de cobre Los Humos, muestran claras correlaciones magmas calco-alcalinos relacionados a lo zonas de subducción, lo cual es típico en los magmas encontrados en el cinturón Larámide del noroeste de México. Los datos de elementos mayores y trazas de Los Humos no muestran diferencias significativas en comparación de los demás sistemas localizados en el cinturón de pórfidos del noroeste de México.

7. Mineralización y alteración hidrotermal (Paragénesis)

7.1 Mineralización

Las zonas mineralizadas principales que se logran observar en superficie en el área de estudio, afloran principalmente en la porción central del plano geológico dentro de las áreas denominadas Elizabeth norte y sur (Figura 5). En estas zonas las ocurrencias de Cu-Mo se observan principalmente dentro de rocas monzoníticas, las cuales son cortadas por vetillas sub-paralelas con rumbo E-W, con inclinaciones >70-80° al N. Dichas estructuras se observan rellenas con sulfuros del tipo calcopirita, pirita, molibdenita, magnetita y en zonas donde la oxidación fue extrema, se logran apreciar óxidos de cobre y cobre nativo en raras ocasiones (Foto 11).

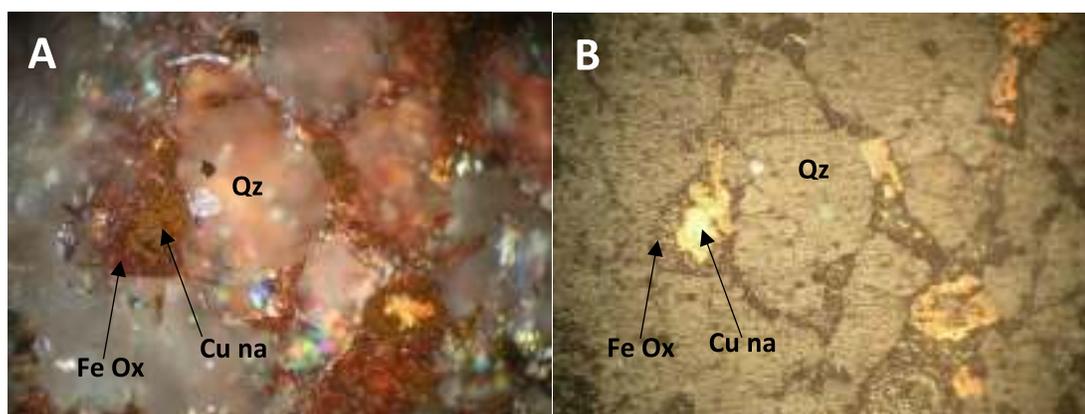


Foto 11. Microfotografía de la muestra IFJB-02 en sección pulida realizada de zona de enriquecimiento del yacimiento Los Humos. Se observa una matriz de cuarzo, con óxidos de hierro rodeando pequeños cristales de cobre nativo. Qz: cuarzo, Fe: fierro, Ox: óxidos, Cu na: cobre nativo. NC. A: nicoles no cruzados, B: nicoles cruzados.

Dentro de estas mismas zonas mineralizadas, el estudio y “logueo” de núcleos de barrenación a diamante muestran claramente una distribución de zonas oxidadas compuestas de calcosita, malaquita, crisocola, cobre nativo, entre los principales. Esta zona ha sido interpretada como un pequeño blanquet de enriquecimiento compuesto de pequeñas zonas irregulares, débilmente desarrolladas y en partes destruida debido probablemente a una fuerte

etapa de erosión sufrida del yacimiento. Además, la pobre presencia de pirita como sulfuro generador de ácido, sugiere que este cuerpo oxidado no solamente fue profundamente erosionado, sino también pobre en el contenido de cobre supergénico.

En una porción más profunda del yacimiento se delimita la zona con sulfuros hipogénicos del tipo pirita, calcopirita, molibdenita, con menor presencia de covelita, bornita en zonas de mejor ley de Cu. En las fotos 12 y 13, se puede apreciar la relación y presencia de pirita, calcopirita y delgadas vetillas de cuarzo con molibdenita.

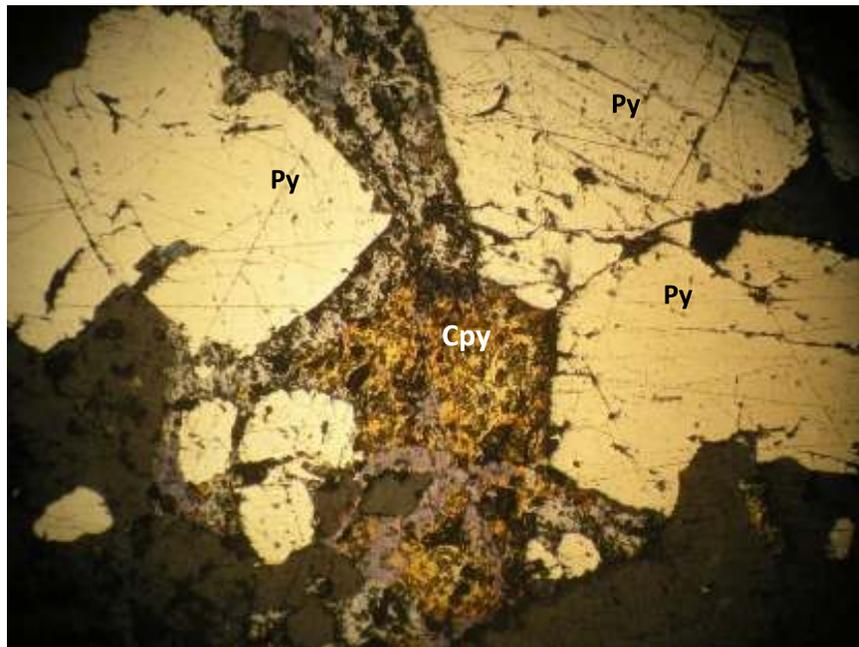


Foto 12. Microfotografía de la muestra IFJB-03, mostrando en luz reflejada la presencia de cristales subhedrales de pirita (Py) y calcopirita (Cpy) con una textura de disolución 10x, NC.

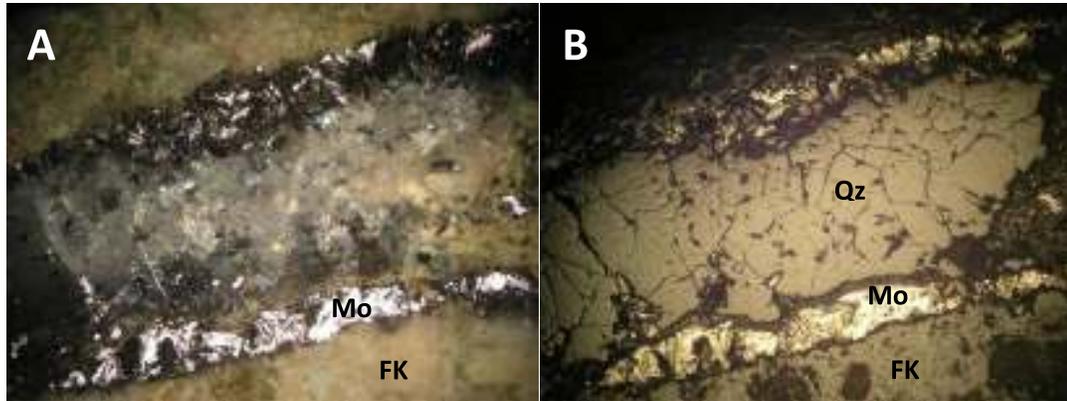


Foto 13. Microfotografía de la muestra 370.45, mostrando en A y B la presencia de una delgada vetilla de cuarzo (Qz) – molibdenita (Mo) de 4mm de ancho, con un halo potásico en los bordes (FK), 10x, NC. A: nicoles no cruzados, B: nicoles cruzados

7.1.1 Estilo de mineralización

El estilo en que se presenta la mineralización en este distrito presenta características muy particulares y similares a aquellas presentes en ambientes magmático-hidrotermal tipo pórfido de cobre. Dentro de las zonas mineralizadas en el depósito Los Humos se presentan varios tipos de vetillas con distintas asociaciones mineralógicas de alteración y mineralización, las cuales por su distribución y tiempos de formación (corte de vetillas), podrían dar edades relativas de diferentes etapas de eventos hidrotermales mostrando una evolución del yacimiento. Por ejemplo, se presentan vetillas con variaciones en su mineralogía y alteración, unas con cuarzo + feldespato K + calcopirita-pirita-molibdenita con su clásico halo potásico; vetilla de cuarzo + feldespato K con calcopirita-molibdenita, otra con cuarzo + calcopirita-molibdenita con un halo de alteración filica y otras con algunas variaciones en su contenido de biotita dentro del halo de alteración potásico. Además, se presentan estilos de mineralización disseminada con sulfuros de calcopirita – pirita, principalmente asociada a zonas de alteración con presencia de biotita fina hidrotermal o biotización.

Por las relaciones de corte observadas entre estas vetillas, y de acuerdo con Seedorff y Einaudi (2004) y Sillitoe (2010), el tipo de vetillas y su asociación mineralógica de alteración y metálica, parece ser indicativa de condiciones profundas y correspondientes a las etapas hidrotermales en la formación del depósito. Por otro lado, se tiene la presencia de biotita fina (<1mm) metasomática (producto de la alteración potásica), la cual se observa mayormente en la monzonita de grano medio y con ocurrencias menos desarrolladas en otras monzonitas acompañadas con cuarzo fino. La presencia de esta alteración, en conjunto con las vetillas presentes confirma las observaciones arriba mencionadas, sobre niveles de exposición profunda del depósito Los Humos.

Las vetillas presentes en el yacimiento Los Humos, por lo regular son de escala milimétrica y donde estas vetillas atraviesan la alteración de biotita secundaria, los cristales finos de biotita son reemplazados por cantidades significativas de calcopirita salvo en zonas periféricas que son dominadas por pirita, desarrollándose zonas extensas alterando estos cristales. La monzonita de grano medio es particularmente favorable para el desarrollo de estas alteraciones de biotita y la mineralización diseminada de sulfuros.

7.2 Tipos de vetillas

7.2.1 Vetillas pegmatíticas

Las vetillas con cuarzo – feldespato K están ampliamente distribuidas en el yacimiento, y están presentes en todos los barrenos descritos en este estudio. Las vetillas varían desde 1mm a 5 cm de ancho y están compuestas principalmente de cristales de cuarzo – feldespato K acomodado a lo largo de la vetilla de manera irregular, en partes con un halo de alteración potásico. La molibdenita es comúnmente encontrada en cristales y en agregados

radiales a lo largo de las paredes de la vetilla y/o distribuida a lo largo de ella. Los márgenes de las vetillas varían desde muy rectas hasta sinuosas y difusas y en algunas zonas varían en cuerpos aplíticos y pegmatíticos, (Figura 22, foto F).

Estas vetillas han sido descritas como pegmatíticas debido a que aparentan ser una gradación de zonas pegmatíticas con molibdenita dentro de los diques de aplita/pegmatita a las vetillas de cuarzo – feldespato K con molibdenita dentro de los mismos diques, a vetas similares alojadas dentro de los mismos tipos de roca.

7.2.2 Vetillas cuarzo – feldespato K

Las vetillas de cuarzo – feldespato K – sulfuro con halo de alteración potásica (ortoclasa), corresponden al tipo de vetilla más común y probablemente de mayor distribución en el yacimiento Los Humos. Estas vetillas contienen comúnmente cantidades variables de calcopirita, pirita y molibdenita y van desde zonas con pirita >>calcopirita a calcopirita >> pirita el cual aparenta ser un patrón de zoneamiento. En algunas partes las vetillas ricas en pirita descienden a profundidad a zonas con vetillas más ricas en calcopirita. En muchos casos, el contenido de molibdenita parece aumentar a profundidad, particularmente al acercarse y dentro del monzogranito.

En algunas zonas, las vetillas de este tipo contienen biotita y magnetita/hematita (ver Figura 22; foto A). Algunas de estas vetillas presentan carbonato, epidota y clorita que aparenta ser parte de un relleno tardío y componente de otra alteración.

7.2.3 Vetillas cuarzo – sericita – sulfuro

Las vetillas con cuarzo – sericita – pirita y la alteración asociada a estas, se observa en muchas de las zonas de este depósito y representan un componente importante en el

sistema pórfido, con anchos que van desde pocos milímetros hasta de centímetro de ancho y regularmente presentan un angosto halo de alteración con ensambles de cuarzo-sericita(muscovita). La alteración relacionada a este tipo de vetillas es de cuarzo – sericita acompañada comúnmente con piritita fina diseminada (Figura 22, foto D). Estas vetillas comúnmente son parte de la alteración “Fílica” de los modelos generales de pórfidos de cobre (Sillitoe, 1973, 2010).

7.2.4 Vetillas clorita ± carbonato ± epidota ± cuarzo

Como una última etapa de alteración de este sistema pórfido de Cu-Mo, se encuentran varias combinaciones de vetillas conteniendo clorita, carbonato, epidota y cuarzo, las cuales se observan ampliamente distribuidas y fueron formadas en varios estadios del sistema hidrotermal. Las vetillas de clorita-epidota-carbonato generalmente son de escala milimétrica y son comunes en todos los tipos de roca presentes en el yacimiento, salvo las volcánicas más recientes, aunque suelen ser más abundantes en rocas andesíticas pertenecientes a la Fm. El Charro (Tarahumara?). En rocas más félsicas, la epidota es menos común y las vetillas están compuestas principalmente de clorita y carbonatos. Muchas de las vetillas de cuarzo – feldespatos K – sulfuro (y vetillas pegmatíticas) son cortadas por las vetillas de clorita – epidota – carbonato que parecen ser un estadio más tardío del sistema pórfido de cobre.

En muchos lugares, se encuentran vetillas dominadas por cuarzo-carbonato con texturas finas, bandeadas y con cuarzo oqueroso, con cristales de cuarzo de grano grueso como relleno y carbonato. Este tipo de vetillas se encuentran cortando todos los eventos del sistema pórfido, como un evento tardío y probablemente y además pueden estar ligadas al volcanismo Terciario.

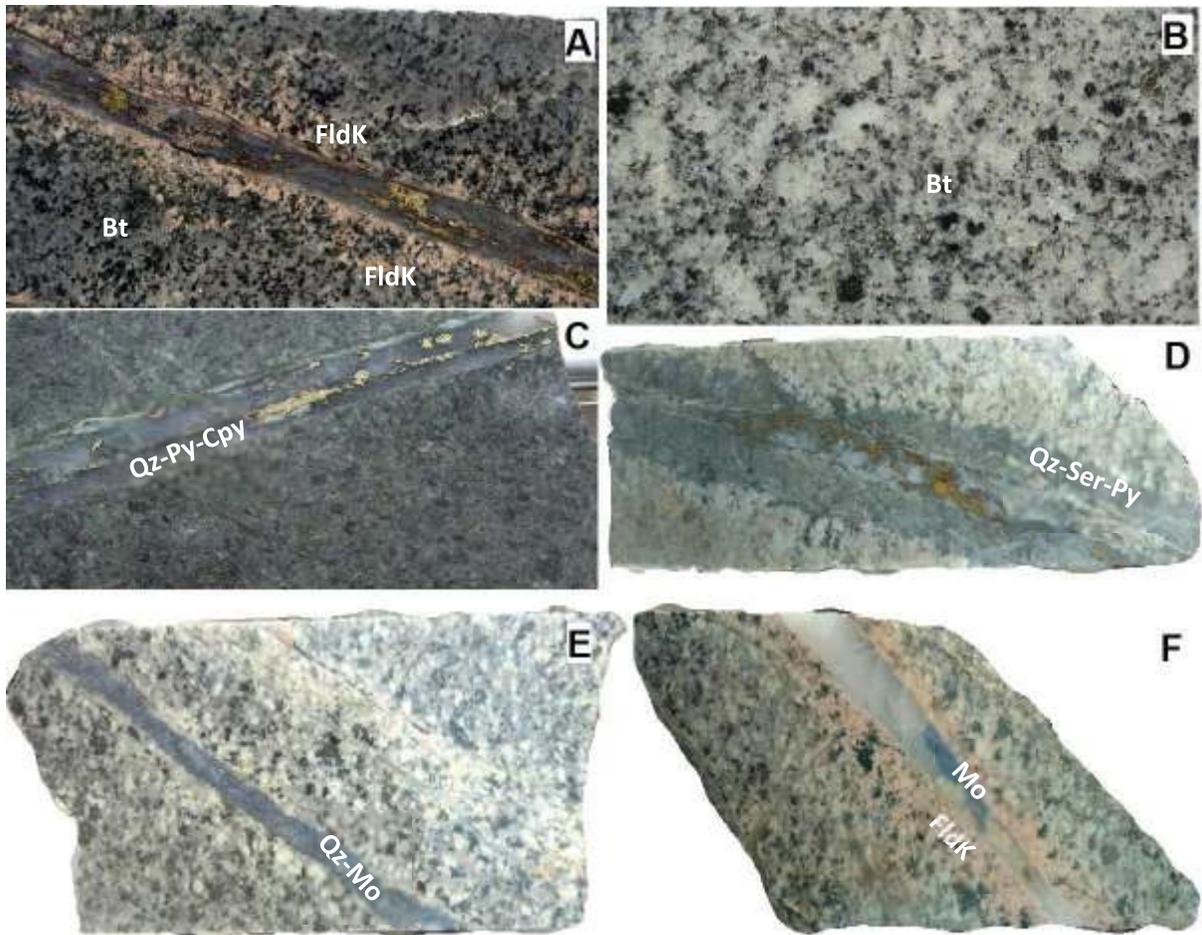


Figura 22. Muestras representativas del yacimiento Los Humos, donde se observan distintos estilos de mineralización y halo de alteración en vetillas. En A) vetilla de cuarzo- feldespato K-calcopirita-pirita-molibdenita con halo de alteración potásica. Menor alteración de biotita secundaria y calcopirita diseminada presente. LH-170 138.8M. B) Calcopirita diseminada en monzonita de grano medio con alteración de biotita secundaria. LH-124. C) Vetilla pegmatítica con cuarzo-feldespato K-calcopirita-molibdenita en monzonita de grano medio-fino. LH-184 487m. D) Vetilla de cuarzo-calcopirita-molibdenita con halo de alteración fílica en monzonita de grano medio. LH-515. E) Vetilla de cuarzo-molibdeno con alteración de biotita secundaria con sobreimposición de alteración fílica. LH-514. F) Vetilla cuarzo-feldespato-k-molibdenita con halo de alteración potásica y menor biotita secundaria. Qz: cuarzo, Bt: biotita, Ser: sericita, FldK: feldespato potásico, Mo: molibdenita, Py: pirita, Cpy: calcopirita.

7.3 Alteración hidrotermal

7.3.1 Alteración de biotita secundaria

Esta alteración de biotita hidrotermal o biotización (producto de la alteración potásica), es un componente clave en la mineralización del yacimiento Los Humos, la cual involucra el reemplazamiento de cristales milimétricos euhedrales de biotita ortomagmática por agregados finos de microcristales milimétricos generalmente menores a <1mm, y de biotita fina en vetillas irregulares. La alteración de biotita hidrotermal se desarrolla bien en la monzonita de grano medio y con menor expresión o en ocurrencias menos desarrolladas en otras rocas ígneas como cuarzomonzonitas con variaciones texturales, cuarzo y de grano más fino. La monzonita de grano medio generalmente presenta en algunas zonas mineralización de hasta >0.4% de Cu diseminado en calcopirita principalmente (Ver Figura 16, foto B).

7.3.2 Alteración sericítica pervasiva

En numerosos lugares los minerales ferro-magnesianos y silicatados que contienen las rocas intrusivas de la zona (biotita, incluyendo biotita secundaria, feldespato), están siendo reemplazados por sericita principalmente de ilita (ver sección Terracore), y las plagioclasas toman un color verdoso debido a esta alteración. En zonas de mayor intensidad de alteración, los feldespatos y micas originales son reemplazados por sericita (ilita > muscovita) y sílice. Esta alteración pervasiva comúnmente se forma en una escala de pocos a cientos de metros y aparentemente relacionado a amplias zonas de fracturamiento tardío.

La alteración sericítica no está asociada con la mineralización directamente, y representa zonas de hidrofracturamiento donde fluidos fríos ganaron acceso a través de fracturas durante las etapas menguantes de la alteración hidrotermal del sistema.

7.3.3 Alteración de clorita y propilítica

La presencia de minerales del grupo de la clorita es bastante regular en el yacimiento, una de las principales características de esta alteración es que se superpone principalmente solo con ensambles de clorita de manera diseminada sobre la alteración de biotita hidrotermal, presentando variaciones en el contenido de Mg en dichas zonas, posiblemente por el agregado de minerales magnesianos a dichas zonas.

Las asociaciones de clorita en otras zonas más lejanas a los centros potásicos y principalmente en rocas volcánicas de la zona como en andesitas y tobas andesíticas, es posible encontrarse con zoneamiento de ensambles de clorita – epidota – magnetita ± calcita la cual propiamente es conocida como alteración propilítica, y corresponde a zonas de metasomatismo alejado de los centros mineralizados del sistema pórfido.

Se piensa que los centros potásicos con superposición de clorita en ferromagnesianos corresponderían a una etapa posiblemente similar a la formación de la alteración propilítica en zonas más alejadas del sistema, aunque carece de ensambles mineralógicos característicos de la alteración propilítica.

7.3.4 Alteración argílica

Se piensa que los niveles hipogénicos de alteración argílica que existieron en el yacimiento ya no se encuentran actualmente debido a las tasas de exhumación del depósito mineral. Aunque se cuenta con grandes zonas con mineralogías similares conteniendo

caolinita – esmectita y variaciones ligadas a las distintas alteraciones presentes en el sistema hidrotermal (como el caso de la generación de minerales secundarios del grupo de las esmécticas, saponita y nontronitas derivadas de la hidrólisis de ferromagnesianos). En zonas no tan profundas donde existió alteración de biotita hidrotermal (biotización) es posible observar variaciones en el grupo de las esmectitas, donde el proceso de lixiviación de Mg-Fe, dio como resultado arcillas de baja temperatura como saponita y nontronita.

La mayor exposición de arcillas del tipo caolinita – esmectita se observa particularmente en las zonas de fallas de centenas de metros como la falla La Salada, y falla El Humo (ver Figura 5), donde la percolación de aguas meteóricas a lo largo de estas zonas permeables ha generado mediante hidrólisis de minerales como el grupo de los feldespatos este tipo de asociaciones mineralógicas de alteración de carácter supergénico.

7.4 Paragénesis mineral

A través del conjunto de datos observados e interpretados en núcleos de barrenación, en el mapeo en superficie, análisis petrográfico-mineragráfico, y SWIR, la combinación de estas técnicas se definió una propuesta paragenética para el pórfido de cobre Los Humos, tomando en cuenta los eventos observados y el desarrollo de la alteración-mineralización del depósito en la siguiente figura 23.

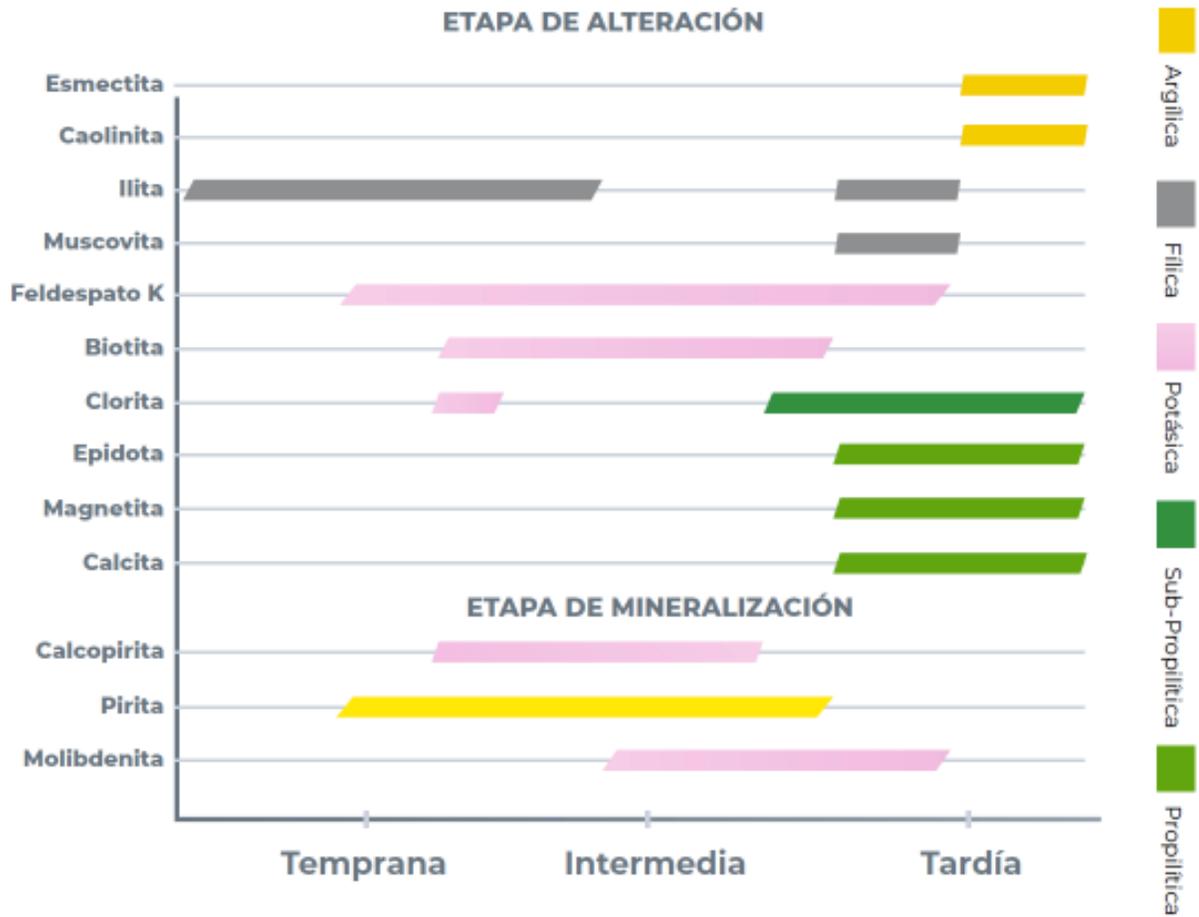


Figura 23. Secuencia paragenética propuesta para la evolución de la alteración-mineralización del pórfido de cobre Los Hornos.

8. Discusión

8.1 Geoquímica

Los nuevos datos geoquímicos de las rocas del yacimiento Los Humos, indicaron que es derivado de la subducción relacionado a magmas calcoalcalinos, mayormente ligados con el arco volcánico laramídico. Los elementos mayores y trazas de las rocas del yacimiento Los Humos muestran poca diferencia comparado con otros sistemas con otros sistemas ubicados en el cinturón de pórfidos del noreste de Sonora (Valencia-Moreno et al., 2007).

Los patrones de tierras raras y multielementales son relativamente similares a los reportados de Sonora central (Valencia-Moreno et al., 2001), salvo por las anomalías negativas de Eu las cuales son algo más tenues que los intrusivos laramídicos ya conocidos. Debido a las características de los intrusivos del yacimiento Los Humos, por consecuencia de las alteraciones y la adición de potasio en el sistema, cabe la posibilidad de que se asocie a ausencia o muy poca plagioclasa en la fuente magmática. Las demás características importantes como las anomalías de Nb-Ta, P y Ti además del enriquecimiento en Rb, Th-U y K son relacionados a materiales de la corteza involucrados en la fuente de los magmas.

8.2 Alteración hidrotermal (perspectiva espectral)

La serie de barrenos descritos desde su punto mineralógico de alteración-mineralización y presentes en las distintas secciones orientadas en dirección NNW-SSE (ver Figura 10) que cortan a los cuerpos mineralizados más importantes del proyecto denominados como Elizabeth norte y sur, fueron interpretadas dando como resultado una gama de zonas de alteración y mineralización relacionadas a sistemas tipo pórfido de cobre. Además, de definir la distribución de zonas de alteración conformando un zoneamiento, se

reconocieron nuevas tendencias sobre la mineralización y su disposición con respecto a la alteración y mostrando una clara relación con la geología estructural de la zona como se puede observar en las siguientes Figuras 24, 26, 29 y 31.

El análisis realizado para los resultados hiperespectrales (Figuras 25, 27, 28, 30 y 32) muestran una clara correlación mineralización-alteración, con respecto al zoneamiento típico de los sistemas pórfido de cobre. En el proyecto Los Humos, los principales tipos de alteración presente corresponden a:

- biotización (detectable en el infrarrojo de onda corta –SWIR–), la cual se presenta con un ensamble mineralógico muy particular con biotita hidrotermal – clorita – actinolita y una mineralogía sobreimpuesta con minerales del grupo de las esmécticas y una variedad de saponita – arcilla con Mg derivado de la alteración de los minerales magnesianos ante el enfriamiento de esta fase de alta temperatura de la alteración potásica (Figura 27);
- alteración fílica, la cual se presenta principalmente como un ensamble mineral con variaciones de illita > muscovita ± cuarzo;
- alteración argílica, la cual en base a logueo, relaciones de corte y distribución espacial permitió establecer que no es de gran presencia dentro del sistema y que más bien es producto de procesos supergénicos desarrollado a lo largo de estructuras producto de la percolación de aguas meteóricas. Esta alteración está definida por ensambles mineralógicos del tipo caolinita-montomorillonita;
- alteración sub-propíltica, la cual inicialmente se suponía que estaba relacionada al mismo sistema de alteración tipo pórfido de cobre; sin embargo, mediante descripción de barrenos se logró apreciar que existe otra intrusión profunda más tardía que genera

un ensamble mineralógico similar a esta alteración, y suele aparecer como clorita>>ilita-esmectita ± carbonato.

Los análisis hiperspectrales nos proporcionan datos importantes y relativamente rápidos con respecto a la geoquímica de exploración (MEMS61), con estos datos, es posible conocer y observar las variaciones composicionales que presenta el barreno, datos mineralógicos importantes, y definir relaciones paragenéticas.

La Figura 24, la sección L00 muestra las principales zonas del yacimiento Los Humos, Elizabeth norte y sur, las cuales en dichas zonas se puede observar una gama de alteraciones relacionadas a sistemas hidrotermales tipo pórfido de cobre. Estas características mineralógicas pudieron ser descritas mediante análisis hiperspectrales en núcleo de barrenación y donde se presentan características y cambios composicionales de las mineralogías desarrolladas e interpretadas en secciones esquemáticas. En la Figura 25, se logró reconocer una superposición de eventos secundarios sobre una biotización relacionado a centros mineralizados en dicha zona, lo cual sirvió para entender procesos posteriores a los eventos mineralizantes de la alteración potásica, ya que por lo general los núcleos potásicos en el yacimiento Los Humos comprenden mineralización diseminada y en vetillas con valores de cobre $>0.3\%$. Estos núcleos presentan características variadas a lo largo del yacimiento debido a la superposición de estas alteraciones por lo que su análisis suele ser complicado al momento de tratar de solo buscar biotización en dichas zonas

Sección L00

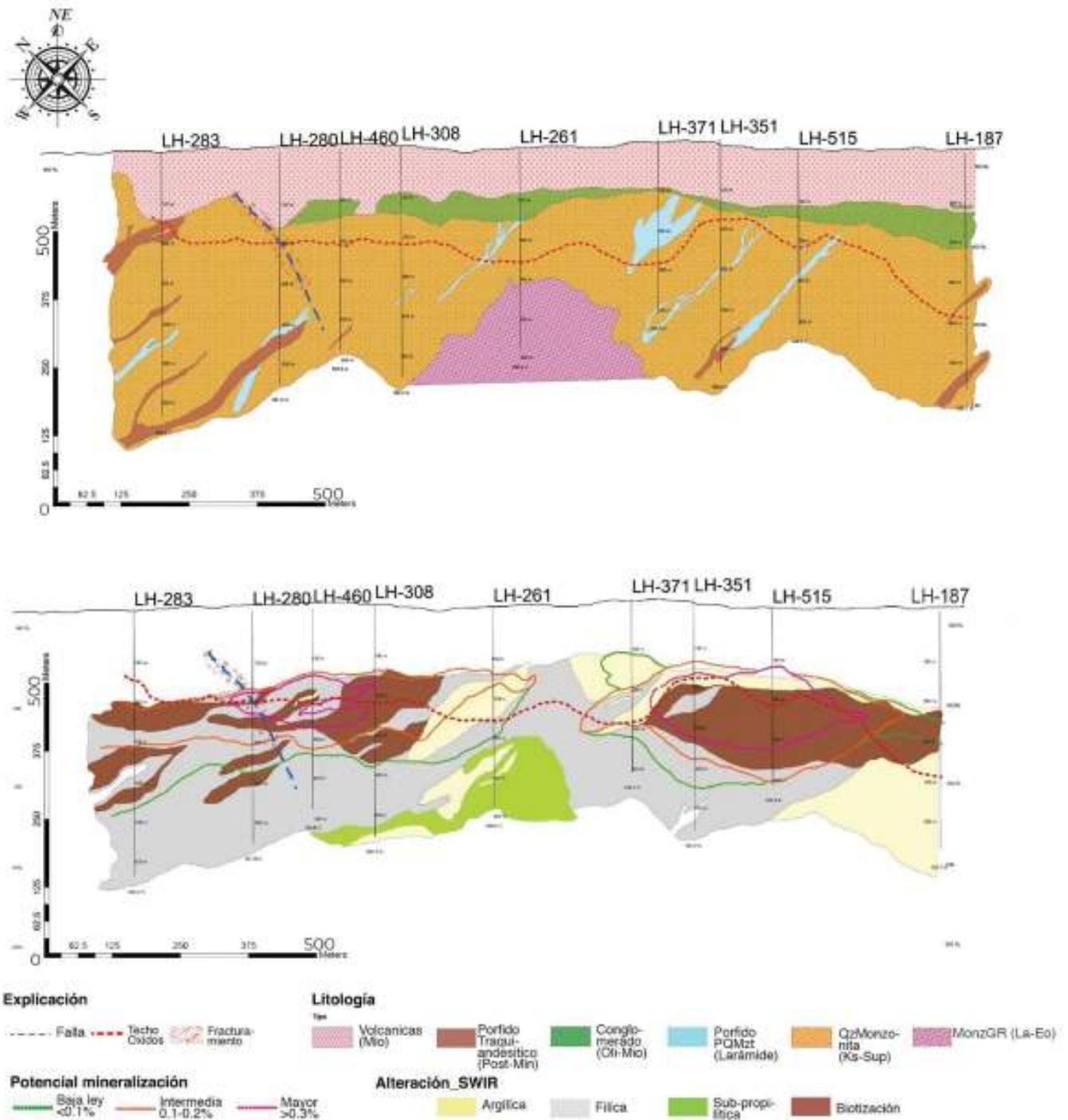


Figura 24. Sección L00 geológica y de alteración, donde se observan parámetros interpretativos de las zonas de alteración hidrotermal relacionadas a la mineralización del yacimiento en envoltentes punteadas.

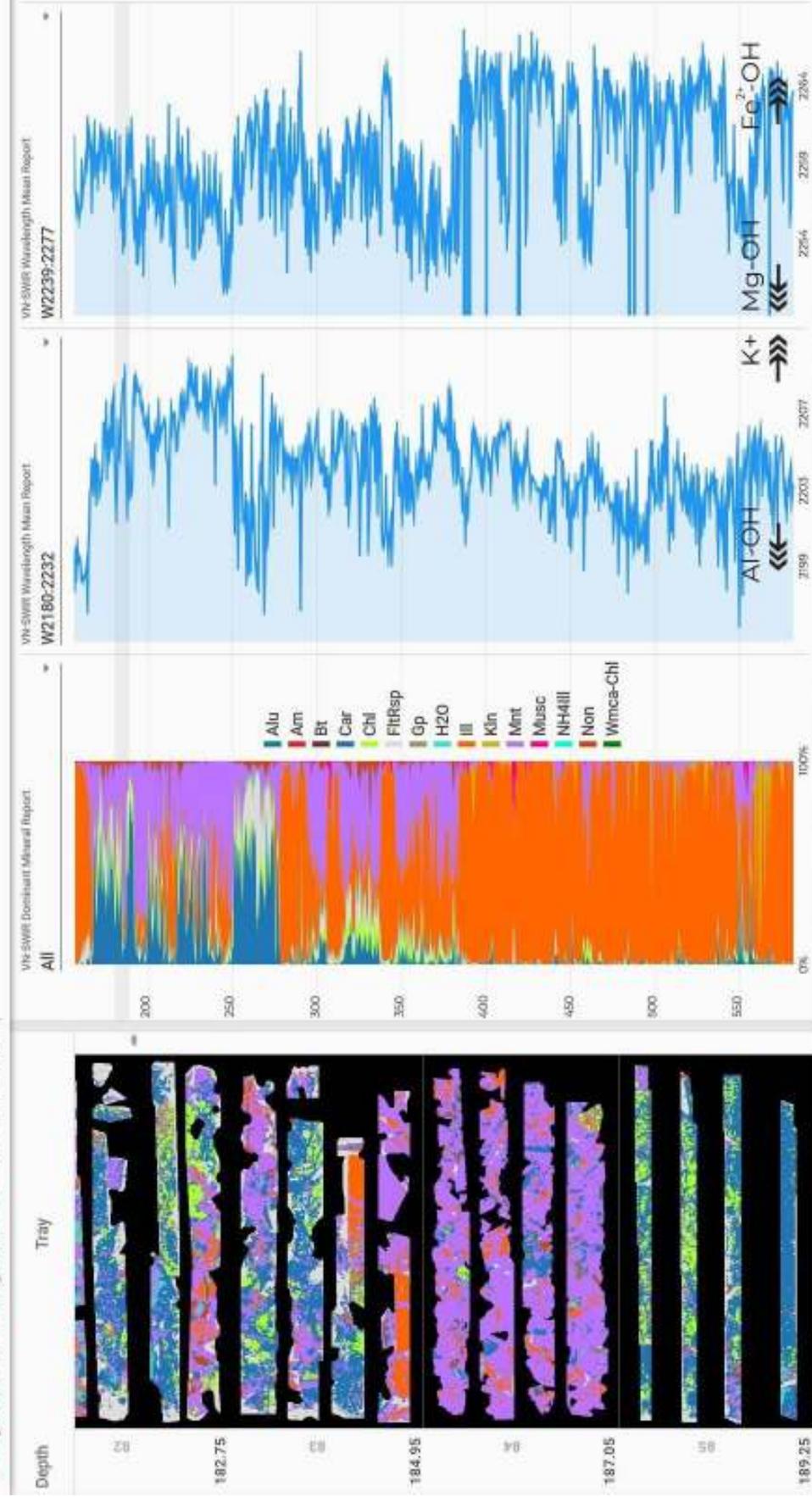


Figura 25. Resumen grafico del barreno LH-308. Donde se observa una gráfica representando la relación de abundancia de distintos minerales hidrotermales del yacimiento. La figura muestra una zona en los primeros 350m del barreno con alteraciones sobreimpuestas en donde posiblemente hubo biotización, la sobreimposición se distingue con agregados finos de Clorita – Carbonato los cuales están reemplazando. En los patrones de longitud de onda 2200W se aprecia un incremento en mineralogías ricas en K en estas zonas, y en 2240W se observa un incremento en minerales ricos en Mg. Alu: Alunita, Am: Anfíbol, Bt: Biotita, Car: Carbonato, Chi: Clorita, FltRsp: Sin Respuesta, Gp: yeso, H2O: Agua, Ill: Illita, Kln: Caolinita, Mnt: Montmorillonita, Musc: Muscovita, Non: Nontronita.

En la Figura 26, la sección NE 150 muestra zonas más periféricas al yacimiento y zona mineralizada, y claramente observable en la alteración potásica de biotita, donde se observa un decremento en la presencia de estas zonas hacia el nor-oeste. En la Figura 27, es posible observar la alteración hidrotermal de biotita donde es posible ser reconocida debido a que no fue tan afectada por otras alteraciones, salvo por la cloritización, que sirvió como indicador de los núcleos potásicos. Por otro lado, en esta sección en la Figura 28 se aprecia una zona mineralizada de importancia en la parte centro de la sección, donde hay mineralización en una zona de alteración filica con $>0.3\%$ de Cu. Particularmente dentro de esta zona en los 4 barrenos que se encuentran el LH-290, LH-509, LH-512, LH-276, la alteración presente se observa como illita mayormente con variaciones en la longitud de onda entre 2205-2210nm que indican una variedad de illita con Al/K (potasio) en su estructura (ver Figura 9), y que indica mayor temperatura en la formación de esta, por lo que puede ser un telescopio de las zonas más calientes en otras partes alejadas de las zonas de biotita secundaria.

Sección NE 150

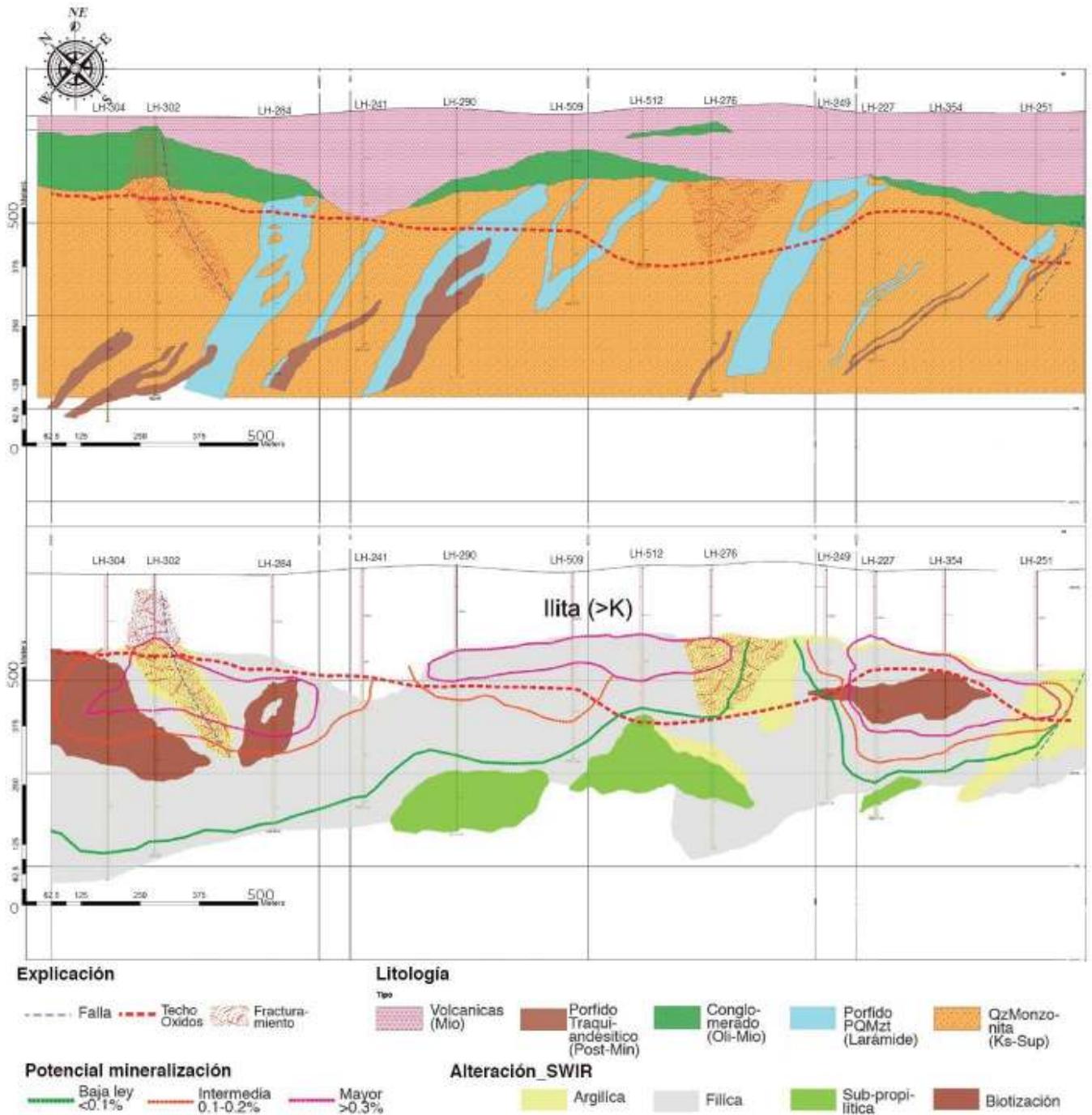


Figura 26. Sección NE150 geológica y de alteración, donde se observan parámetros interpretativos de las zonas de alteración hidrotermal relacionadas a la mineralización del yacimiento en envolventes punteadas.

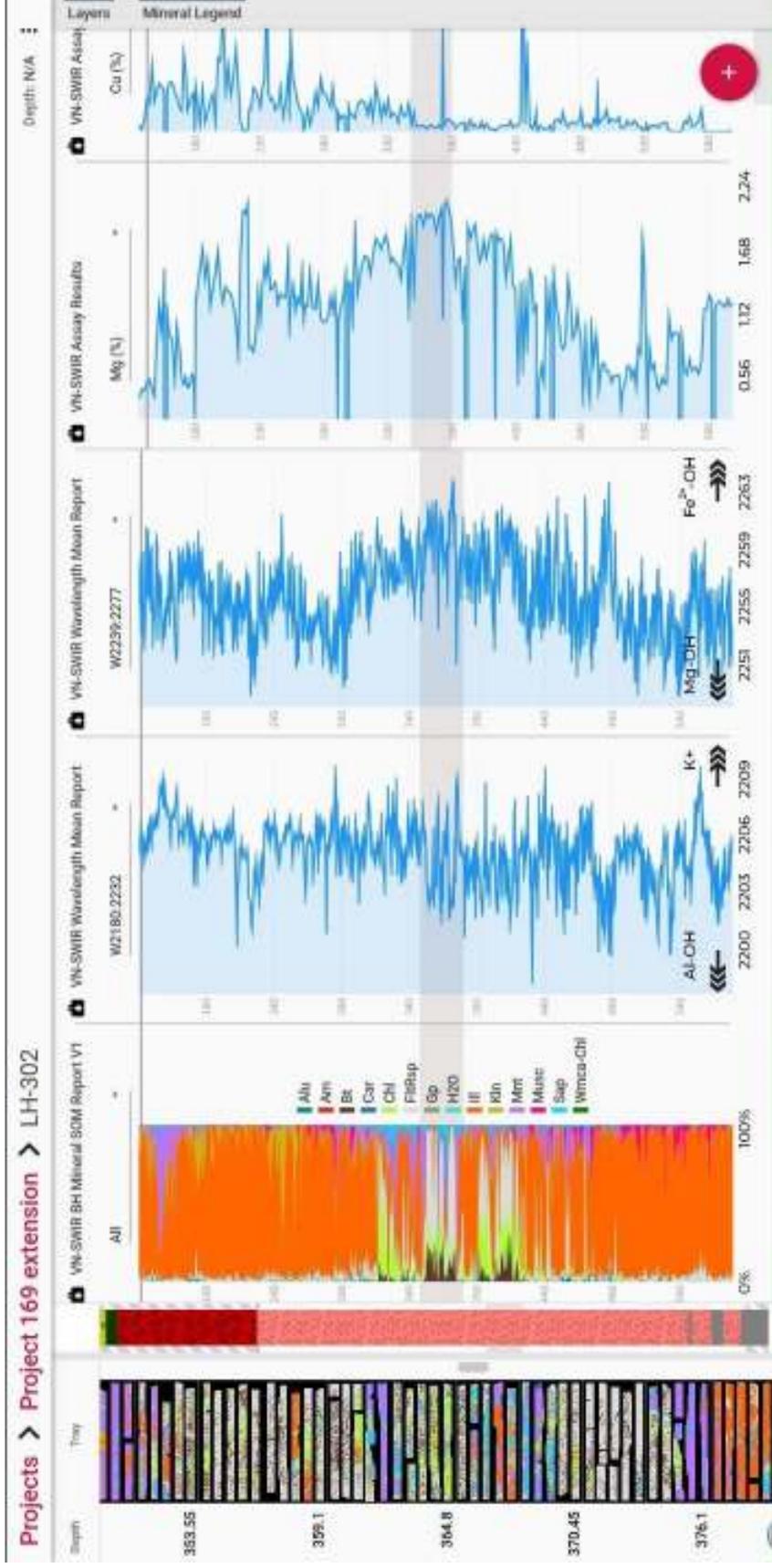


Figura 27. Resumen grafico del barrenno LH-302. Donde se observa una gráfica representando la relación de abundancia de distintos minerales hidrotermales del yacimiento. La asociación del mineral illita por sí solo, o a veces como una asociación illita>esmectita, representa la zona fría del sistema de los Humos, existen otras zonas con relaciones de illita-muscovita (sericita) donde se pueden observar tendencias a zonas de mayor temperatura. Y la cual representa una transición hacia las zonas más potásicas y más calientes del yacimiento, dando a mostrar relaciones minerales como biotita (en escasas ocasiones se llega a observar inalterada o con sobreimpresión de clorita) en donde muchas ocasiones se encuentra con una alteración muy representativa de estas zonas potásicas con biotita, de clorita, clorita-esmectita-seponita, que se puede reconocer como una sobreimpresión en las etapas de enfriamiento de la zona causando la mineralización del sistema. Alu: Alunita, Am: Anfíbol, Bt: Biotita, Car: Carbonato, Chl: Clorita, FltRsp: Sin Respuesta, Gp: yeso, H2O: Agua, Ill: Illita, Kln: Caolinita, Mnt: Montmorillonita, Musc: Muscovita, Non: Nontronita.

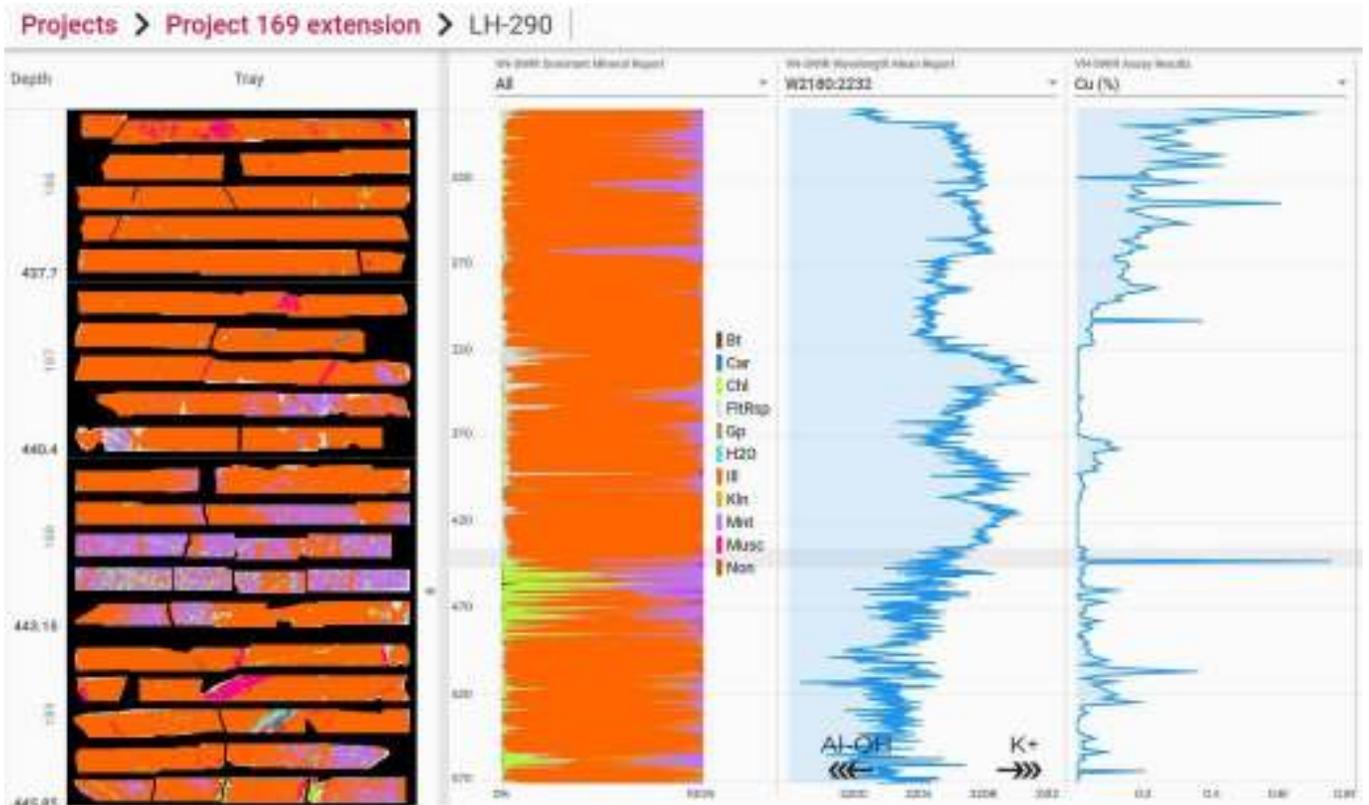


Figura 28. LH-290 donde se muestra variación en longitud de onda W2180-2232, en la cual se observan variaciones composicionales en Al-OH en la parte superior del barreno con variaciones en la longitud de onda entre 2205-2210 nm que indican una variedad de arcillas (ilita) con K en su estructura, la cual indica mayor índice de temperatura formacional. Alu: Aluninta, Am: Anfíbol, Bt: Biotita, Car: Carbonato, Chl: Clorita, FltRsp: Sin Respuesta, Gp: yeso, H2O: Agua, Ill: Ilita, Kln: Caolinita, Mnt: Montmorillonita, Musc: Muscovita, Non: Nontronita.

En la Figura 29, la sección SW150 se observa una mayor propagación de la alteración argílica, esto debido a que se observaron zonas con un intenso fracturamiento y se encuentran relacionados a esta alteración, por la generación de arcillas debido a la alteración principalmente de feldspatos con asociaciones mineralógicas de caolinita – esmectita como subproductos de la hidrólisis de otros minerales. Estas áreas generalmente se extienden a lo largo de zonas de falla y zonas brechadas por las mismas fallas, donde la percolación de aguas meteóricas logra penetrar hasta ciertas profundidades y genera la suficiente acidez para hidrolizar minerales como feldspatos y otros con características afines susceptibles a alterarse a bajas temperaturas. Además, estas zonas están relacionadas a mineralización de Cu supergénico con leyes normalmente altas de hasta 0.8% con respecto a la mineralización hipogénica del yacimiento.

La alteración potásica de biotita se observa abundante en la zona sur y norte de los cuerpos Elizabeth, con una relación ligada a la mineralización. Parte de la alteración fílica en estas zonas podría servir como un vector de mineralización debido a las diferencias marcadas por los rangos espectrales que estas presentan, estas variaciones están definidas por los cambios composicionales en su longitud de onda y se pueden observar el comportamiento en estos minerales (Figura 30)

Sección SW150

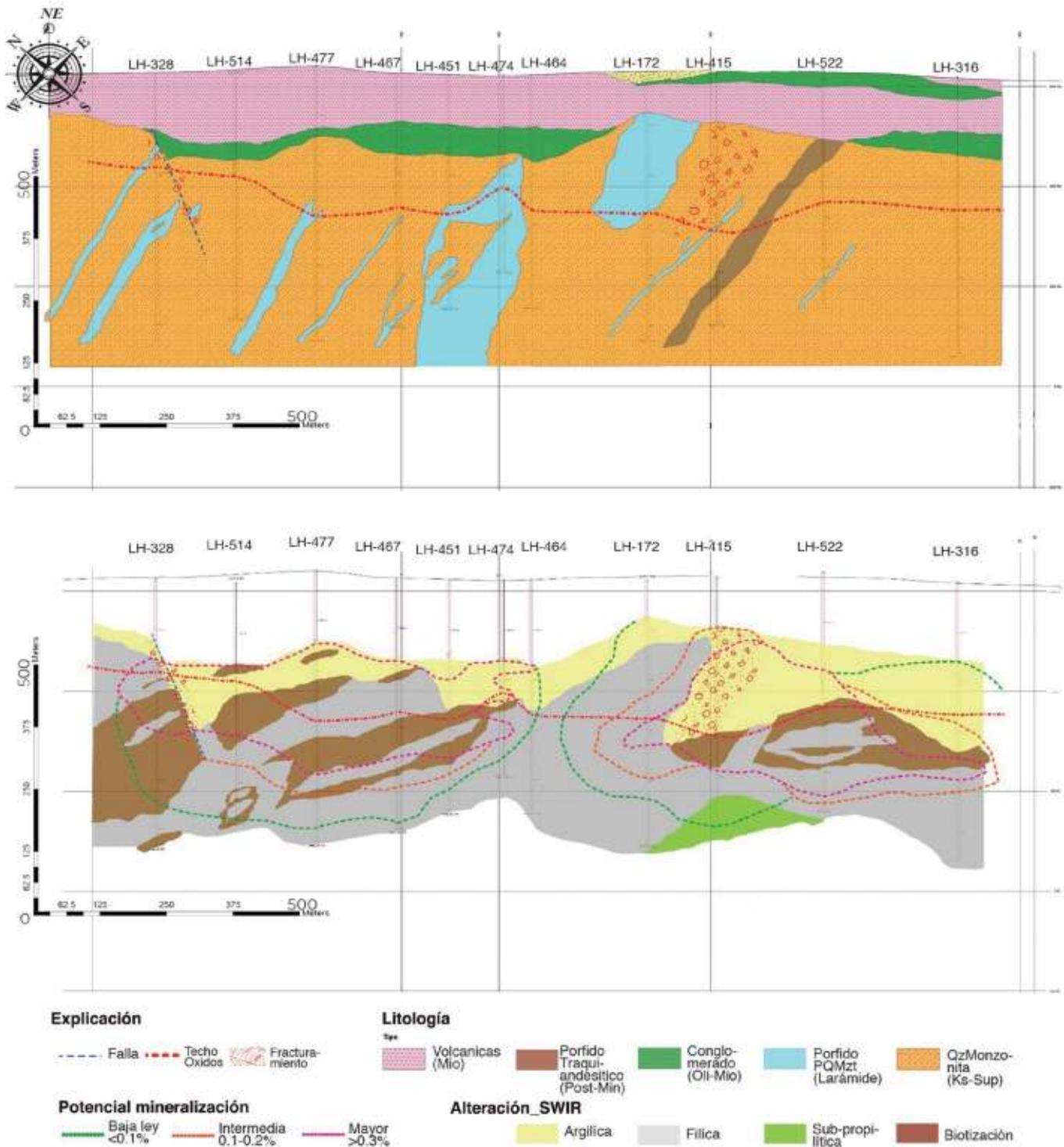


Figura 29. Sección SW150 geológica y de alteración, donde se observan parámetros interpretativos de las zonas de alteración hidrotermal relacionadas a la mineralización del yacimiento en envolventes punteadas.

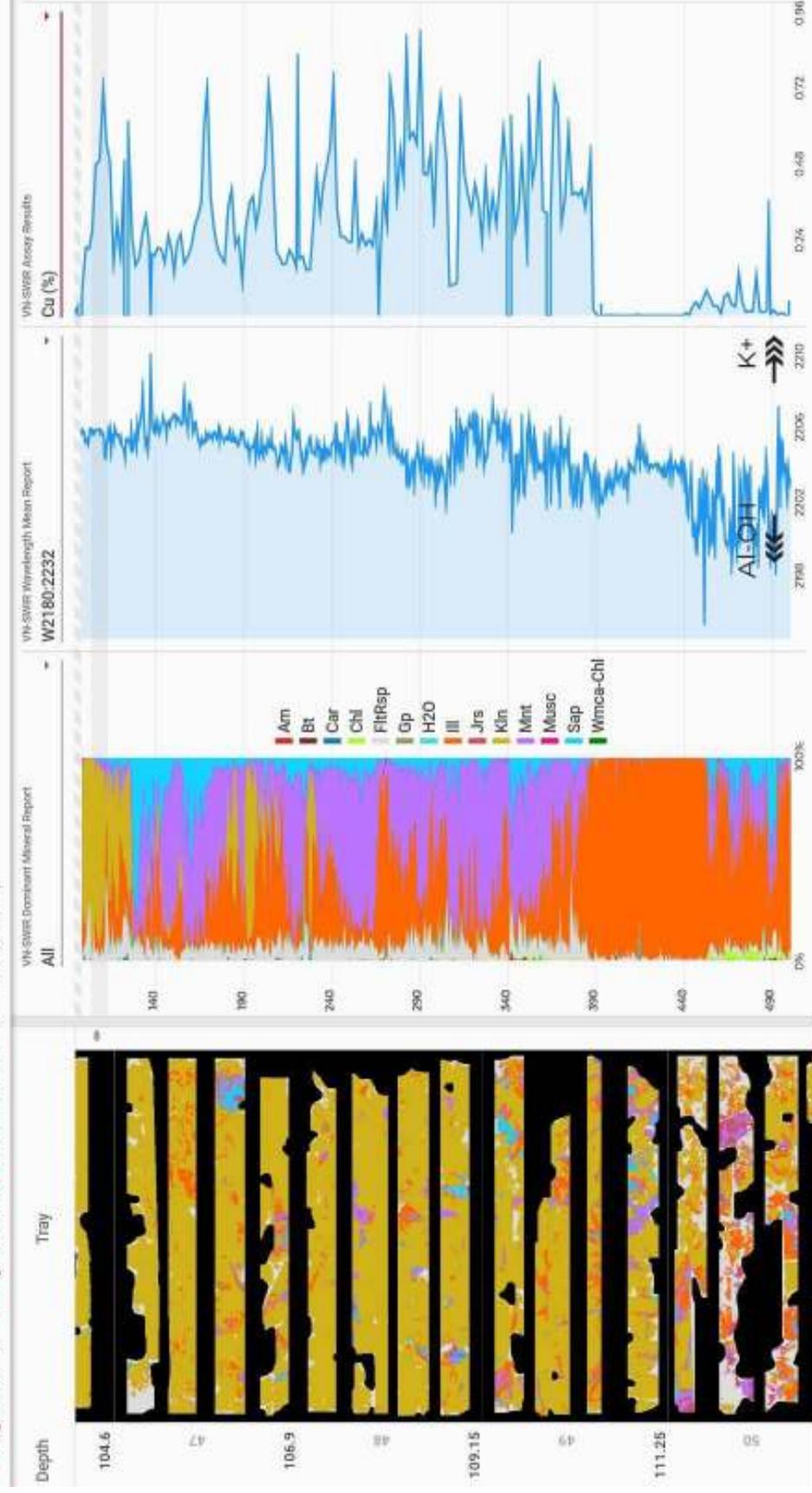


Figura 30. Se observa de izquierda a derecha, cajas de núcleo con alteraciones sobreimpuestas, mascara general de presencia de distintas alteraciones. Última imagen se observan patrones de cambio de los minerales aluminosilicatos (en los rasgos de 2200W sericita de illita), donde se pueden observar cambios en la longitud de onda de estos minerales con mayor tendencia a Al<K en las longitudes de onda w2200, salvo en la zona más superficial del barreno con sericita rica en Al. Alu: Alunita, Am: Anfíbol, Bt: Biotita, Car: Carbonato, Chl: Clorita, FitRsp: Sin Respuesta, Gp: yeso, H2O: Agua, Ill: Illita, Klin: Caolinita, Mint: Montmorillonita, Musc: Muscovita, Non: Nontronita.

En la Figura 31, la sección SW450 se encuentra en los bordes de los cuerpos Elizabeth, esta zona se encuentra paralela a la falla Santa Rosalía, la cual se evidencia en las zonas de alteración argílica representada en la sección SW450, donde al menos tiene una potencia en el nivel de oxidación de aproximadamente ~300 metros relacionados a mineralogías representantes como caolinita – esmectita ± illita, donde el mineral caolinita mediante lo observado está directamente correlacionado a las estructuras generadas durante el fallamiento relacionado a la extensión Basin & Range, y además donde la alteración argílica se vuelve intensamente destructiva y difícil de considerar si oculto ante esta alteración se encuentra una alteración hipogénica.

En la misma zona hay evidencias de una zona transicional a la alteración biotización, la cual se caracteriza como una transición a sódico-cálcica que presenta relaciones mineralógicas muy similares a la biotización, salvo esta se compone principalmente de anfíbol (actinolita) – clorita – muscovita (las últimas se piensa que fueron formadas tras el enfriamiento de la etapa intensa de temperatura), estas zonas están subordinadas a los bordes del yacimiento y presentan menor ley de Cu-Mo, y particularmente las relaciones de Molibdeno / Cobre aumentan en estas porciones (Figura 32) por lo que se piensa que esta zona corresponde a una transición a una zona más caliente y con fluidos involucrados posiblemente una alteración transicional sódico-cálcica.

Sección SW450

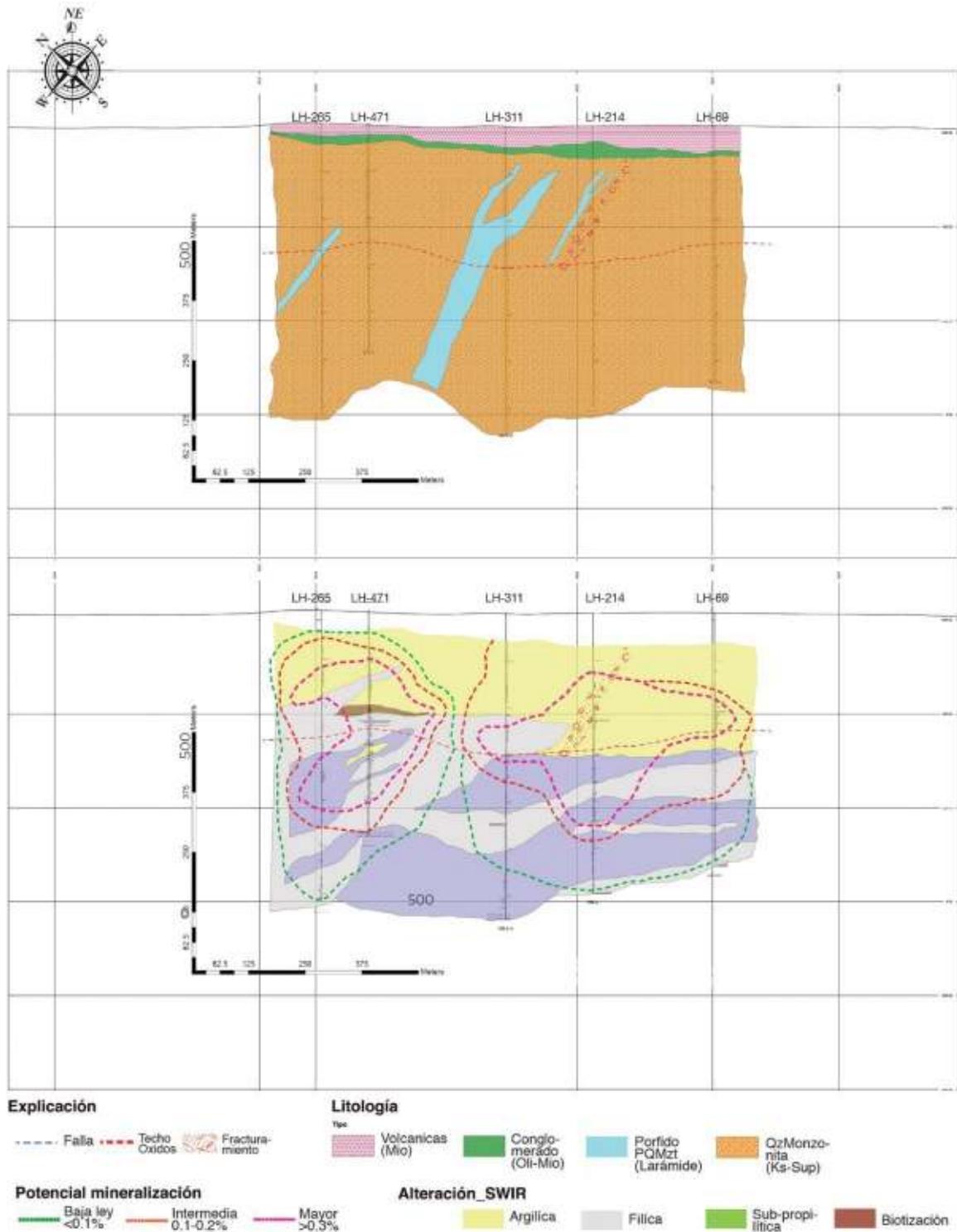


Figura 31. Sección SW450 geológica y de alteración, donde se observan parámetros interpretativos de las zonas de alteración hidrotermal relacionadas a la mineralización del yacimiento en envolturas punteadas.

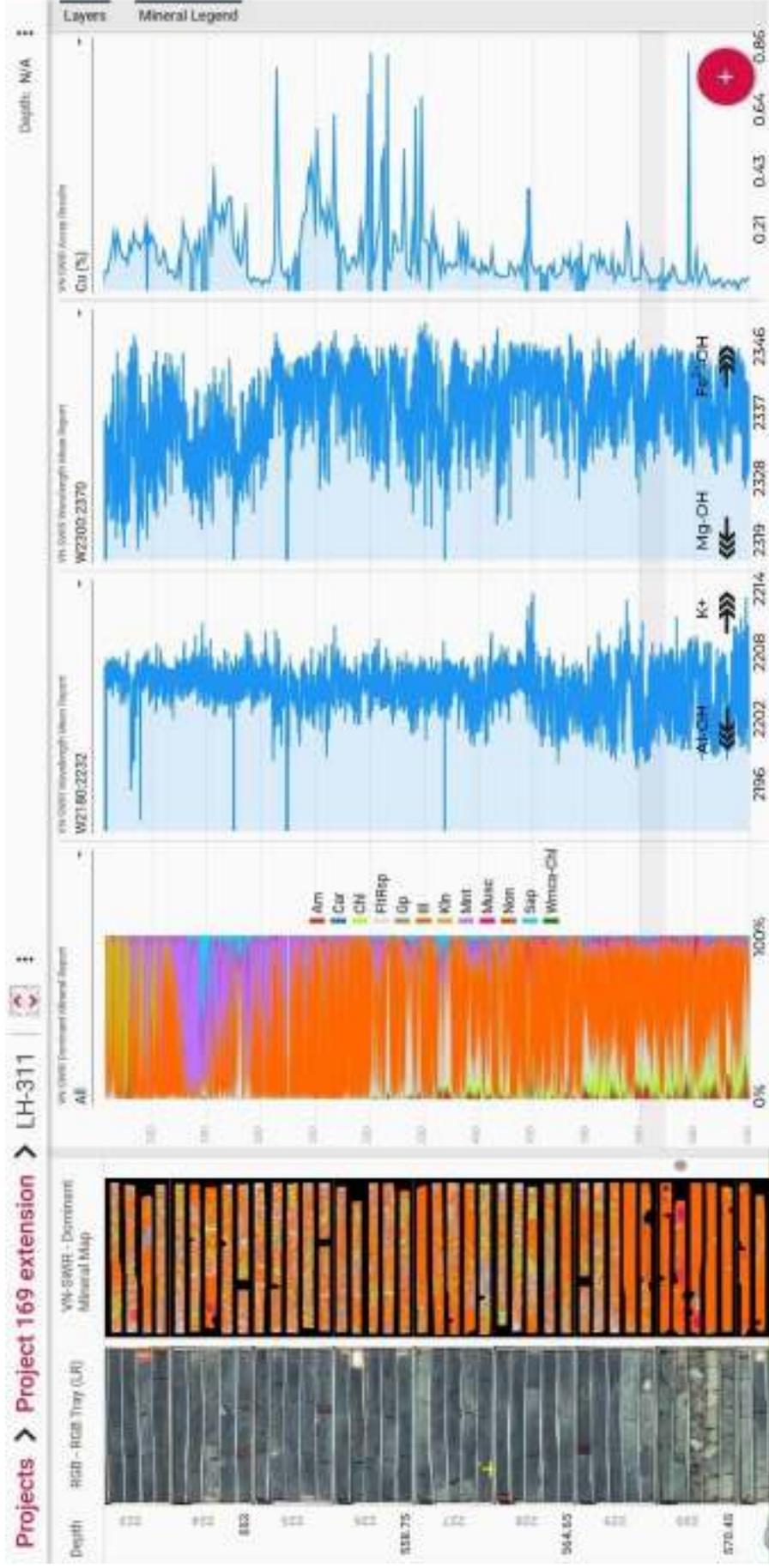


Figura 32. Mostrando diversas longitudes de onda W2180-2232 variaciones de Al en filosilicatos (Al-OH) donde se observan ligeras variaciones en las zonas media superior del barreno con tendencias en longitudes de onda >2205 (Al/K) y en W2300-2370 variaciones en los minerales ferromagnesianos (entre 2320-2340nm) se observan principalmente valores intermedios donde se destacan minerales como clorita-Mg, flogopita, y anfíbol (actinolita-horblenda). Alu: Alunita, Am: Anfíbol, Bt: Biotita, Car: Carbonato, Chl: Clorita, FltRsp: Sin Respuesta, Gp: yeso, H2O: Agua, Ill: Illita, Kln: Caolinita, Mnt: Montmorillonita, Musc: Muscovita, Non: Nontronita.

8.2.1 Zonas con alteración argílica

Existen zonas con potencia considerable en el yacimiento Los Humos, donde además corresponden a zonas con mineralización de interés en recursos oxidados de Cu. Por lo que en los resultados del análisis hiperespectrales realizado se detallan dichas zonas en las secciones principales del yacimiento. Las principales características que se encontraron fueron relaciones minerales característicos de esta alteración argílica con minerales como: montmorillonita- saponita – illita ± caolinita. Y donde particularmente son minerales que contienen Ca en ambas partes, y se presentan en buen medida dentro del yacimiento (montmorillonita; Formula: $(\text{Na,Ca})_{0.33}(\text{Al,Mg})_2(\text{Si}_4\text{O}_{10})(\text{OH})_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$; saponita; $\text{Ca}_{0.25}(\text{Mg,Fe})_3((\text{Si,Al})_4\text{O}_{10})(\text{OH})_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$). Además, estos minerales pueden ser producto de la lixiviación o alteración hidrotermal de fases menos calientes del sistema, de mineralogías de ferromagnesianas, como biotita-actinolita principalmente.

8.2.2 Zonas de alteración filica

Estas zonas están definidas en gran parte por asociaciones minerales que no varían en gran proporción aunque la mineralogía dominada principalmente por illita ± muscovita ± esmectita en menor proporción, y la illita presenta variaciones composicionales importantes debido a que esta tiene una estructura química interesante debido a que en algunas ocasiones presenta K en su estructura primaria $((\text{K,H}_3\text{O})(\text{Al,Mg,Fe})_2(\text{Si,Al})_4\text{O}_{10}[(\text{OH})_2,(\text{H}_2\text{O})])$, y agua estructuralmente ligada, por lo que se le conoce como hidromuscovita. Estas variaciones composicionales marcan una tendencia en zonas del yacimiento dado que en las longitudes de onda W2200 nm se pueden observar los rasgos principales de estos minerales que corresponden a los picos de absorción del Al (ver Figura 9), algunas zonas se discuten en el apartado de resultados donde se observaron patrones mineralógicos que corresponden a

variaciones en Illita con rangos de longitud de onda entre 2205-2210 nm por lo que esta mineralogía en ciertas zonas del yacimiento tiene mayor tendencia a contener K en su estructura y por lo tanto su correlación con mineralización con leyes de Cu hipogénico en dichas zonas.

8.2.3 Zonas con biotización

Las zonas con una intensa biotización se presentan principalmente en las rocas cuarzo-monzoníticas y monzoníticas las cuales han sufrido un metasomatismo de alta temperatura y han formado estos minerales, los cuales se han observado hasta >25% en algunas zonas de manera pervasiva y reemplazando cualquier otro mineral anterior, estas zonas particularmente guardan una relación estrecha con la mineralización de Cu con leyes que rondan entre 0.1 -0.5 % de Cu hipogénico, y en algunas zonas con poco de molibdeno, mientras este suele apreciarse con anomalías mayores en las zonas de alteración fílica. Además, se observaron comportamientos de estas zonas en las longitudes de onda W2340 donde se pueden observar rasgos con tendencias de minerales ricos en Mg>Fe y sus transiciones, como una alteración sobreimpuesta en las biotitas secundarias de cloritas particularmente (ver Figura 33).

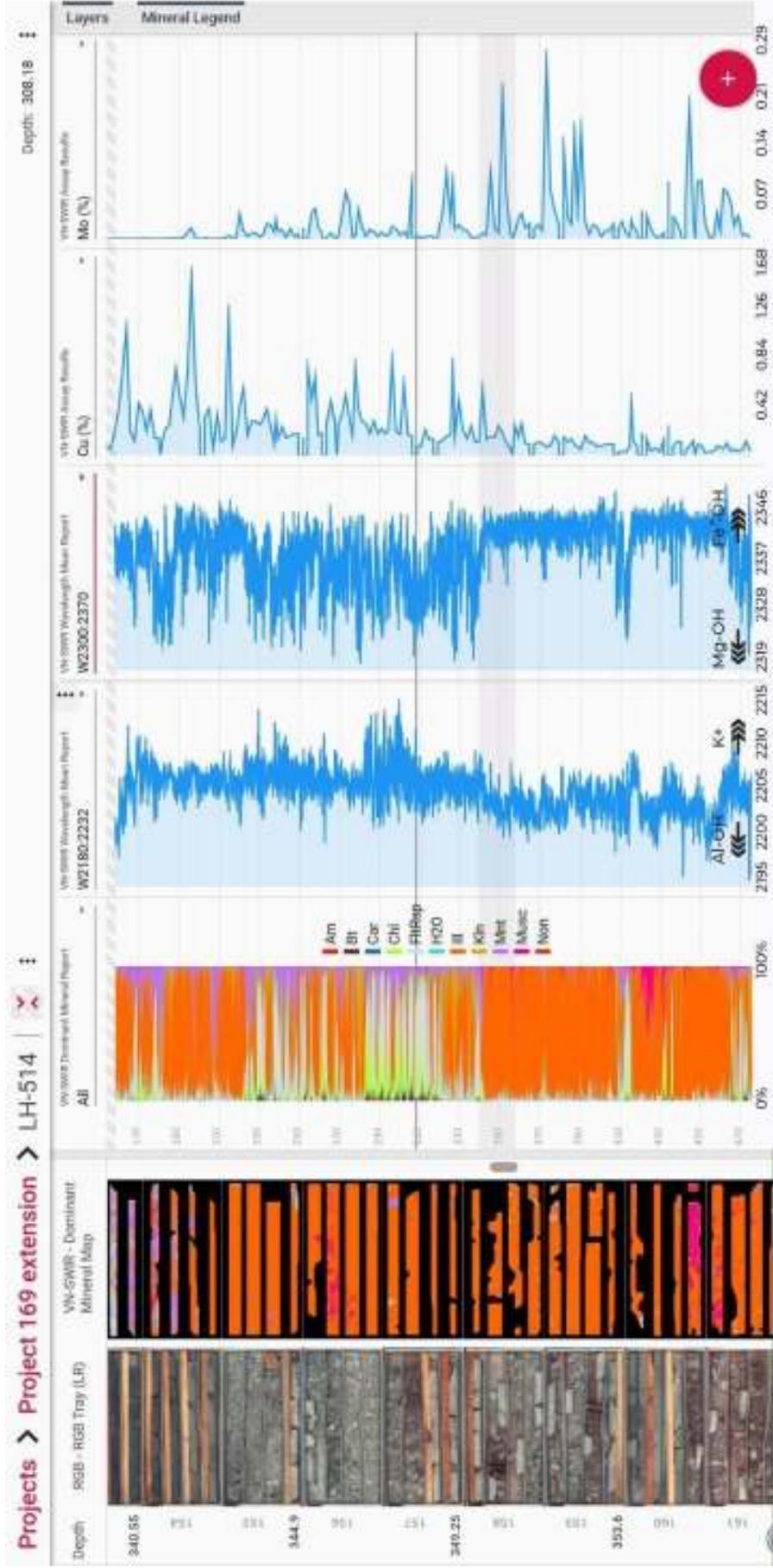


Figura 33. LH-514, mostrando de izquierda a derecha, cajas de núcleo con sobreimpresión de colores de alteración, resumen de presencia de alteraciones en barreno, y características de longitudes de onda de W2200 y W2340, donde se puede destacar que en W2200 corresponde a una transición en el barreno de arcillas meramente Al/K a sercita de mayor contenido de Al en el fondo. En W2340 se observa principalmente en la zona de cloritas y biotita una media en las longitudes de onda entre 2320-2340 que correspondería a minerales mayormente magnesianos como clorita-biotita. A su vez se observa la relación de mineralización a la extrema derecha. Alu: Alunita, Am: Anfíbol, Bt: Biotita, Car: Carbonato, Chl: Clorita, FltRsp: Sin Respuesta, Gp: yeso, H2O: Agua, Ill: Illita, Kln: Kaolinita, Mt: Montmorillonita, Musc: Muscovita, Non: Nontronita.

8.2.4 Zonas transicionales sódico-cálcicas

Estas zonas están caracterizadas en la sección SW450, donde se logró apreciar a lo largo de 5 barrenos la misma tendencia y asociaciones mineralógicas, particularmente se observa una relación mayor o casi neta de alteraciones pervasiva de anfíboles de grano muy fino que no se logran apreciar al ojo, y estos presentan características hiperespectrales en longitudes de onda en W2340, donde además de observar patrones al comienzo del barreno con mineralogías magnesianas que corresponden principalmente a arcillas del tipo saponita-smectita que una de ellas está constituida principalmente por Mg. Seguido se observa una transición en la longitud de onda con variaciones entre 2330-2340 nm que corresponden a mineralogías con asociaciones intermedias entre Mg-Fe, donde se encuentra clorita-anfíbol, y donde particularmente este anfíbol podría ser de carácter actinolita el cual está constituido principalmente por Mg-Fe y además Ca, donde el Ca tuvo que estar sobresaturado para poder formar estas variedades mineralógicas, y con respecto a la mineralización de Cu disminuye drásticamente en estas zonas alteradas (ver figura 34).

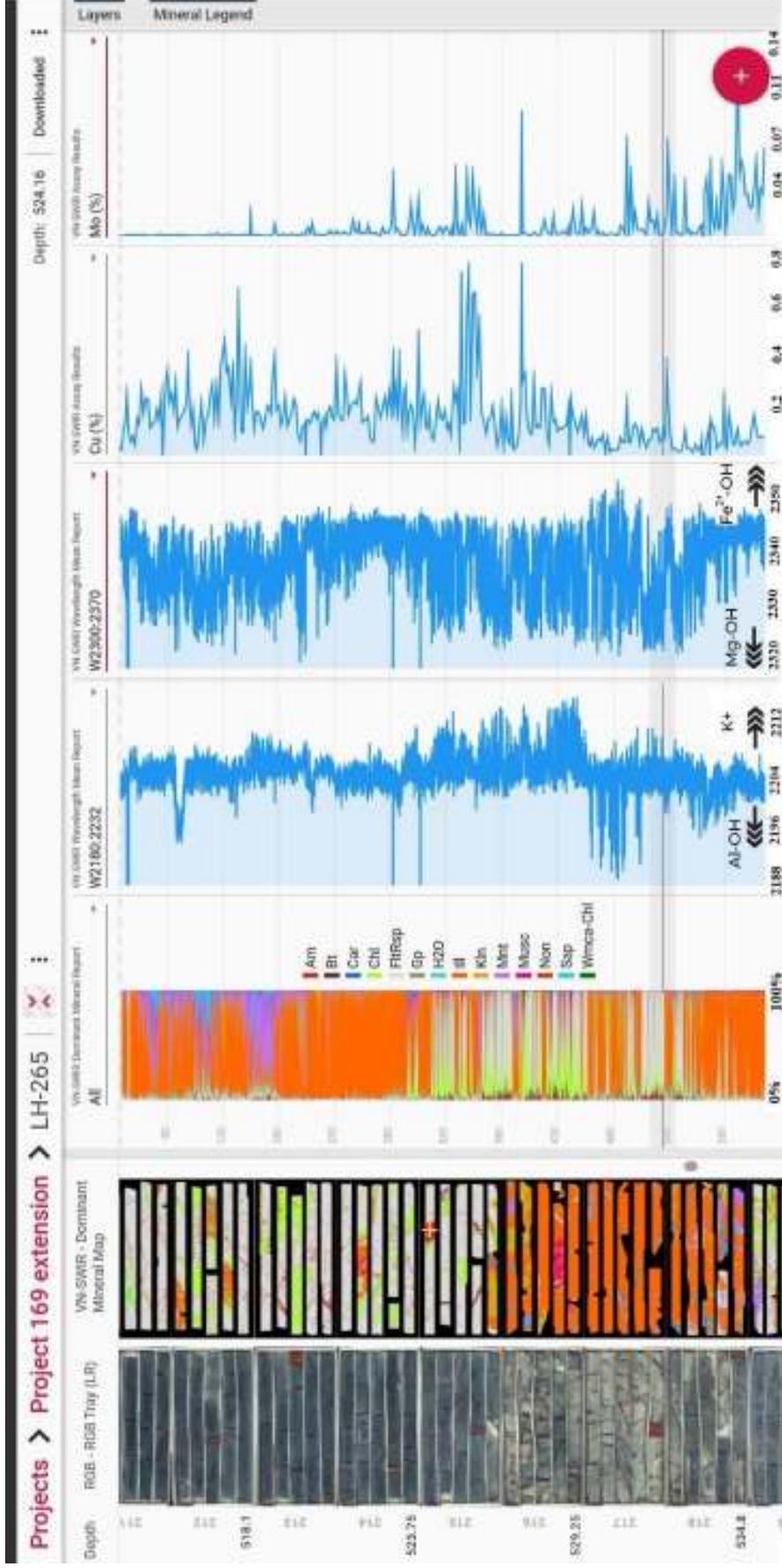


Figura 34. Barreno LH-265, mostrando de izquierda a derecha, esquema de cajas de núcleo con sobreimposición de colores de alteración, resumen de presencia de alteraciones en todo el núcleo, y características de longitudes de onda W2200 y W2340, en donde destaca en W2200 las características principales de arcillas al comienzo del barreno con una tendencia más Al/K, mientras que al fondo se logra apreciar una zona levemente rica en Al, que se sobrepone a otra alteración de clorita-anfíbol, esta se observa en W2340 con un dominio de minerales magnesianos al fondo del barreno. Alu: Alunita, Am: Anfíbol, Bt: Biotita, Car: Carbonato, Chl: Clorita, FltRsp: Sin Respuesta, Gp: Gp, H2O: Agua, Il: Ilita, Kln: Kln, Caolinita, Mt: Montmorillonita, Musc: Muscovita, Non: Nontronita

8.3 Zoneamiento de sulfuros

El zoneamiento de sulfuros en el proyecto Los Humos está presente tanto en una dirección vertical como horizontal. La pirita aparenta ser más abundante por encima y muy debajo de los barrenos descritos (Figura 10), donde es típicamente asociado con vetillas de cuarzo-sericita-pirita y vetillas de cuarzo-feldespato K-sulfuro con pirita como el sulfuro dominante. Además, la pirita aparenta ser más abundante que la calcopirita en las zonas más profundas donde comúnmente es asociado con el incremento de la molibdenita en vetillas de aplitas y pegmatitas, y especialmente donde el monzogranito es la roca huésped.

8.4 Sistema de mineralización y vectores

Este principal elemento del sistema de mineralización se muestra en un esquema en la figura 35, donde se observa principalmente el estilo en que las vetillas están orientadas en el sistema de manera subvertical en las zonas centrales (Figura 10) y con más inclinación en las zonas laterales del sistema basado en simulaciones de fracturas alrededor de las intrusiones. También se muestran zonas de vetillas laminadas y mineralización en forma de ramaleo sub-paralelo, más que un *stockwork*. Las vetillas pegmatíticas son más abundantes en las partes internas (junto con las aplíticas – pegmatíticas) y las vetillas de sílice sericita en las partes profundas y externas del sistema. En cambio, las zonas con biotita hidrotermal y las zonas asociadas al reemplazo con sulfuros, presentan una tendencia sub-horizontal, siguiendo aparente la distribución de la monzonita de grano medio y el emplazamiento de los stocks porfídicos mineralizados.

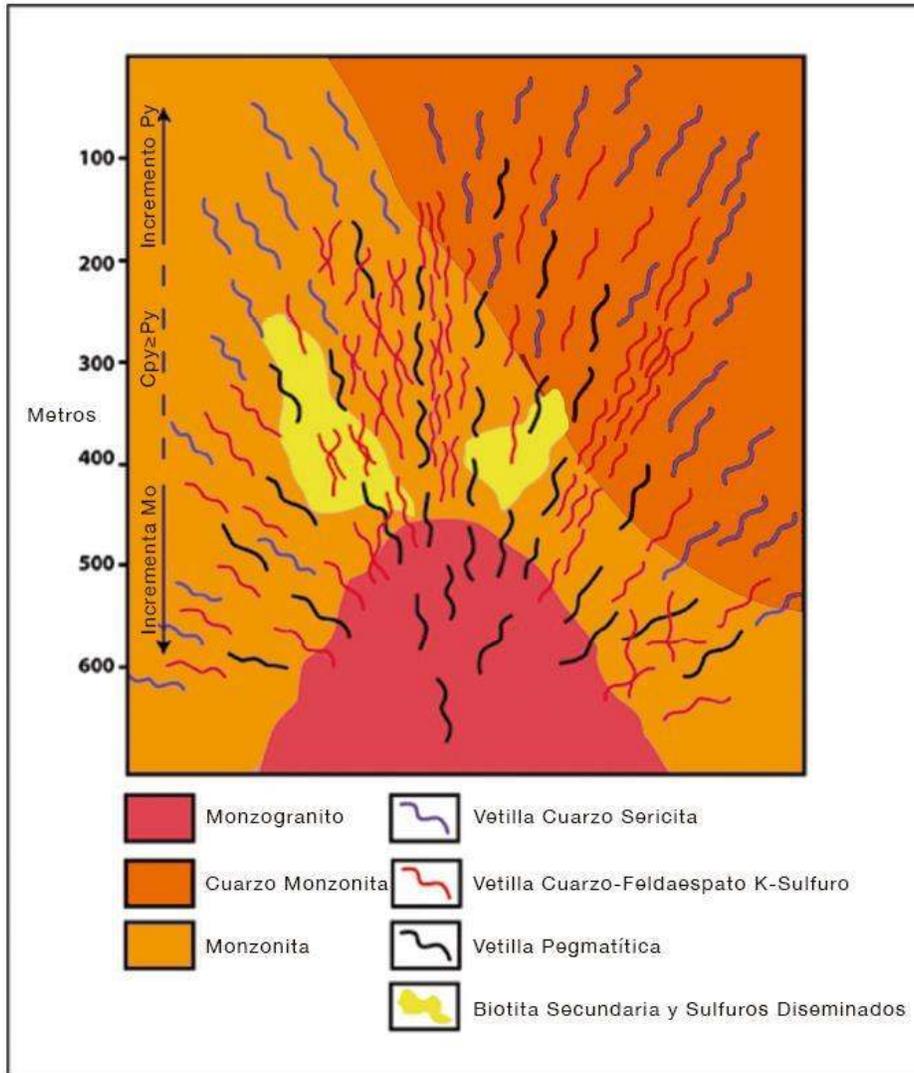


Figura 35. Esquema representativo geológico y paragenético de la distribución de vetillas y mineralización del sistema pórfido Cu-Mo Los Humos.

En Los Humos, la serie de barrenos programados y examinados dentro y en los límites de las zonas mineralizadas conocidas como Elizabeth norte y Sur (sureste de la figura 5), aportaron una valiosa información acerca de las vetillas hidrotermales y asociaciones mineralógicas de alteración que ayudaron a identificar o vectorizar un mayor o menor acercamiento a zonas de mineralización del sistema pórfido.

Esta serie de barrenos mostró, además, que varias características como lo es la presencia de biotita hidrotermal, vetillas con sulfuros, y la diseminación de sulfuros asociada, generalmente se vuelven más abundantes en las zonas mayormente mineralizadas y más profundas del sistema. La presencia de calcopirita y molibdenita se vuelven más abundantes mientras que la bornita y la magnetita son componentes raros en la zona mineralizada. La pirita se vuelve más abundante relativa a la calcopirita lejana a la zona de mineralización y las vetillas de cuarzo – sericita –sulfuro ocupan un lugar intermedio en respecto a la mineralización, con valores significativos de calcopirita y molibdenita en algunos lugares y en otros con pirita como el único mineral. De igual manera, las vetillas de cuarzo – sericita – pirita y parte de la alteración suele ser más común en las zonas externas de la zona mineralizada de interés y del sistema en sí.

9. Conclusiones

Los resultados obtenidos mediante observaciones de campo, métodos analíticos y sobre todo la metodología de barridos hiperespectrales SWIR, han sustentado que el yacimiento Los Humos, tiene las características magmático-hidrotermales presentes de un sistema pórfido de cobre tradicional, tal como varios autores lo han definido (Lowell y Guilbert, 1970; Leach, 1999; Richards, 2003; Seedorff *et al*, 2005a; Seedorff *et al*, 2008; Sillitoe, 1973; 2010).

El yacimiento Los Humos se caracterizó por tener estos rasgos particulares de este tipo de depósito, como es el caso de los tipos de asociaciones de alteraciones hidrotermales y mineralización que son contemporáneas a las intrusiones de stocks porfídicos de composiciones monzoníticas que mantienen una relación directa con los eventos hidrotermales y la mineralización de Cu-Mo. Este tipo de relaciones hidrotermales desde superficie tienen una intensa alteración hidrolítica por la presencia de pirita >calcopirita y sugiriendo la generación de condiciones ácidas que promovió la formación de un delgado “*blanquet*” de calcosita formado a niveles más profundos del yacimiento. La geología y tectónica en Los Humos, permite definir que los niveles de erosión en el área fueron profundos con una fuerte denudación del terreno, lo cual permitió la exposición de la mayoría del yacimiento en sus partes más profundas y posiblemente gran parte del “*blanquet*” de calcosita fue erosionado. Por lo cual, la exposición de las alteraciones tipo pórfido es complicada de observar en superficie, salvo al pasar el nivel de oxidación en los barrenos es fácil apreciarlas.

El zoneamiento de la alteración y mineralización son parte de un yacimiento de orden importante, los cuales corresponden principalmente a asociaciones de partes profundas del

sistema compuestas de feldespato potásico principalmente ortoclasa, muchas veces observado de manera pervasiva en la roca encajonante y como halo de alteración en vetillas de cuarzo. Además, como parte de la misma alteración de alta temperatura se asocia la diseminación de ferro-magnesianos del tipo biotita, en agregados hidrotermales que varía en las rocas encajonantes y llega a tener presencia hasta en un 25% la cual en zonas importantes se asocia genéticamente a calcopirita de manera diseminada en el yacimiento llegando a contar con leyes de hasta 0.8% de Cu en zonas de mejor ley. La importancia del reconocimiento de las zonas con biotita hidrotermal es fundamental para la evaluación de este yacimiento debido principalmente a la diseminación y asociación de sulfuros de Cu-Mo. El gran apoyo del análisis hiperespectral fue el poder reconocer de manera semi-cuantitativa las principales zonas de alteración y su distribución; además el de diferenciar otras alteraciones sobreimpuestas a zonas mineralizadas para poder generar vectores de mineralización no observados con técnicas tradicionales. Los análisis hiperespectrales muestran una buena metodología propuesta para el análisis con respecto a estas observaciones:

- La distinción entre distintos tipos de vetillas observadas en el yacimiento, entre vetillas con halo y la composición; además definiciones de relaciones de corte entre vetillas, como es el caso de reconocer si el talco o la calcita son parte de la misma vetilla.
- La densidad de vetillas basado en la abundancia en la superficie analizada del barreno.
- La evaluación del azimut de los distintos tipos de vetillas.
- La distinción entre la alteración pervasiva y la relacionada a las vetillas a través de mapas minerales y la distribución de vetillas.

-
- El nivel de automatización con respecto a técnicas antiguas de mapeo de alteraciones.
 - El gran potencial que muestra la técnica para el análisis de datos numéricos y composicionales al ser integrados en software de modelamiento 3D en campañas de barrenación activas.

Otra parte importante en la mineralización de cobre se encuentra definido en los tipos y arreglos de vetillas dentro de algunas rocas monzoníticas en el área, principalmente relacionado a los eventos transicionales entre la alteración filica y potásica con vetillas de cuarzo + sulfuros y que guardan orientaciones preferentes y con tendencias a ser más paralelas que en forma de *stockworks* tradicionales en estos sistemas mineralizados.

En el presente estudio se realizó la caracterización geológica, geoquímica y de alteraciones del depósito mineral Los Humos, estos nuevos datos contribuyen al análisis y modelos de exploración para yacimientos del tipo pórfido de cobre en la parte costera con mayor nivel de erosión dentro del territorio del Noroeste de México.

El depósito mineral Los Humos (Beltrán, 2016, este estudio) y el depósito mineral documentado como La Fortuna de Cobre (Salvatierra-Domínguez, 2000) presentan características tanto de alteración-mineralización-estructural muy similares en la región, por lo que es adecuado aplicar este tipo de técnicas implementado en este estudio que lleven a la orientación adecuada para la exploración de estos yacimientos en estas regiones tan erosionadas y sepultadas en el NW de México.

10. Bibliografía

- Alcorta, G.R., 1964, Caminos de México –Esquema geográfico de México: México, D.F., Atlas Goodrich Euzkadi, 7 p.
- Álvarez, Manuel, Jr., 1961, Provincias fisiográficas de la República Mexicana: Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, v. 24, núm. 2. P. 5-20.
- Anderson, T.H., y Silver, L.T., 1977a, U-Pb isotope ages of granitic plutons near Cananea, Sonora: *Economic Geology*, v. 72, p. 827–836.
- Anderson, T.H., y Silver, L.T., 1981, An overview of Precambrian rocks in Sonora: Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología, *Revista*, v. 5, p. 131–139.
- Anderson, T.H., y Silver, L.T., 2005, The Mojave-Sonora megashear—field and analytical studies leading to the conception and evolution of the hypothesis, in Anderson, T.H.; Nourse, J.A.; McKee, J.W.; y Steiner, M.B., eds., *The Mojave-Sonora megashear hypothesis—development, assessment, and alternatives: Geological Society of America Special Paper 393*, p. 1–50.
- Arellano, A.R.V., 1956, Relaciones del Cámbrico de Caborca, especialmente con la base del Paleozoico: In Rodgers, J., ed., *El sistema Cámbrico, su paleogeografía y el problema de su base; pt II: Australia, América*. México, D.F., Cong. Geol. Internal., 20, p.509-527.
- Barra, F., Valencia, V. 2014, Late Cretaceous porphyry copper mineralization in Sonora, Mexico: Implications for the evolution of the Southwest North America porphyry copper province. *Mineralium Deposita*, Volume 49, Issue 7, pp 879-884.
- Beltrán-Cabrera, J. A., 2016, Espectrometría de reflectancia del infrarrojo cercano, utilizando el espectrómetro terraspec en la caracterización de fases minerales de la alteración

hidrotermal en el proyecto Los Humos, noroeste de Sonora. Tesis de Licenciatura, Departamento de Geología, Universidad de Sonora, 82pp.

Cassady L. Harraden, Brian A. McNulty, Melissa J. Gregory, James R. Lang, 2013. Shortwave Infrared Spectral Analysis of Hydrothermal Alteration Associated with the Pebble Porphyry Copper-Gold-Molybdenum Deposit, Iliamna, Alaska. Society of Economic Geologists, Inc. *Economic Geology*, v. 108, pp. 483–494

Clark, R.N., 1999. Spectroscopy of rocks and minerals, and principles of spectroscopy. In: Rencz, A.N. (Ed.), *Manual of Remote Sensing, Volume 3, Remote Sensing for the Earth Sciences*. John Wiley and Sons, New York, pp. 3–58.

Cochemé, J-J., 1985, Le magmatisme dans le Nord-Ouest du Mexique. Cartographie de la région de Yécora–Maicoba–Mulatos. Illustration magmatique de la fin d'un regime en subduction et du passage a un régime distensif: Université Aix–Marseille III, Thèse d'Etat, 209 p.

Consejo de Recursos Minerales, 2000. Informe de la carta geológico-minera puerto peñasco clave h12-1, escala 1:250,000, municipios de san luis rio colorado, puerto peñasco, sonoyta, caborca y altar, sonora.

Cooper, G.A., and Arellano, A.R.V., 1946, Stratigraphy near Caborca, northwest Sonora, Mexico: *Am. Assoc. Petroleum Geologists Bull.*, v. 30, p. 606-611.

Cooper, G.A., Arellano, A.R.V., Johnson, J.H., Okulitch, V.J., Stoyanow, A., and Lochman, C., 1952, Cambrian stratigraphy and paleontology near Cabora, northwest Sonora, Mexico: *Smithsonian miscellaneous Collections*, v. 119, no. 1, 184p.

Damon, P.E.; Shafiqullah, M.; y Clark, K.F, 1981, Evolución de los arcos magmáticos en México y su relación con la metalogé- nesis: Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología, *Revista*, v. 5, p. 223–238.

-
- Damon, P.E., Shafiqullah, M., and Clark, K.F. 1983 Geochronology of the porphyry copper deposits and related mineralization of Mexico; *Canadian Journal of Earth Sciences*; v.20, p.1052-1071.
- De Cserna, Z., 1989, An outline of the geology of Mexico, in the *Geology of North America- An overview*: Bulder, Co., Geological Society of America, p. 233-264.
- Dickinson, W.R., 2002, The Basin and Range Province as a composite extensional domain: *International Geology Review*, v. 44 p.1–38.
- Esquivias-Flores, J., 1998, Fluid inclusion and geochemistry of intrusions related to porphyry copper deposits in Northern Sonora, Mexico. MS Thesis. University of Arizona. Department of Geosciences, Tucson, USA, 112pp.
- Eells, J.L., 1972, Geology of the Sierra de la Berruga, northwestern Sonora, Mexico [M.S. tesis]: San Diego, California, San Diego State University, 77 p.
- Seedorff, C. E., & Einaudi, M. T. 2004. Henderson porphyry molybdenum system, Colorado: II. Decoupling of introduction and deposition of metals during geochemical evolution of hydrothermal fluids. *Economic Geology*, 99(1), 39-72.
- Farmer, G. L. and DePaolo, D. J. 1983. Origin of Mesozoic and Tertiary Granites in the western United States and Implications for Pre-Mesozoic Crustal Structure: 1-Nd and Sr Isotopic Studies in the Geocline of Northern Great Basin. *Journal of Geophysical Research*, Vol. 88, pag. 3379-3401.
- Goetz, A. F. H., Rowan, L. C., & Kingston, M. J. (1982). Mineral identification from orbit: initial results from the shuttle multispectral infrared radiometer. *Science*, 218, 1020–1024.

-
- Gill, R., 2010. *Igneous Rocks and Processes: a Practical Guide*. Wiley-Blackwell. Irvine, T.N., Baragar, W.R.A., 1971. A guide to the chemical classification of the common volcanic rocks. *Can. J. Earth Sci.* 8, 523–548.
- Gustafson, L & P. Hunt, J. (1975). The porphyry copper deposit at El Salvador, Chile. *Economic Geology*. 70. 857-912. 10.2113/gsecongeo.70.5.857.
- Gutiérrez-Coronado, A.; Iriondo, Alexander; Rodríguez-Castañeda, J.L.; Wooden, J.L.; Budahn, J.R.; Lozano-Santa Cruz, Rufino; y Hernández-Treviño, T., 2008, Paleoproterozoic gneisses of the San Luisito Hills in NW Sonora—extending the Mexican Yavapai province of SW Laurentia: Joint Annual Meeting, Geological Society of America Abstracts with Programs, v. 40, núm. 6, p. 144 (resumen).
- Hauff, P. L. 1999. An Overview of VIS-NIR-SWIR Field Spectroscopy as Applied to Precious Metals Exploration. Pp. 71.
- Hauff, P. (2008). An overview of VIS-NIR-SWIR field spectroscopy as applied to precious metals exploration. Spectral International Inc., Arvada (Colorado), 71 pp.
- Hunt, G. R., and Salisbury, J.W., 1971, Visible and near infrared spectra of minerals and rocks. II. Carbonates, *Mod. Geology* 2, 23-30.
- Iriondo, Alexander, y Premo, W.R., 2011, Las rocas cristalinas proterozoicas de Sonora y su importancia para la reconstrucción del margen continental SW de Laurentia—La pieza mexicana del rompecabezas de Rodinia, in Calmus, Thierry, ed., *Panorama de la geología de Sonora, México*: Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología, Boletín 118, cap. 2, p. 25–55, 10 figs., 2 tablas.
- Irvine, T.N., Baragar, W.R.A., 1971. A guide to the chemical classification of the common volcanic rocks. *Can. J. Earth Sci.* 8, 523–548.

Izaguirre-Pompa, A., 2009, El basamento paleoproterozoico (~1.71- 1.68 Ga) Yavapai de la región Mina La Herradura en el NW de Sonora—sus implicaciones para el desarrollo del margen continental activo mesozoico-cenozoico del NW de México: Querétaro, México, Universidad Nacional Autónoma de México, Programa de Posgrado en Ciencias de la Tierra, Centro de Geociencias, tesis de maestría en ciencias, 201 p. (inérita).

Izaguirre-Pompa, A., e Iriondo, Alexander, 2007, Mesoproterozoic (~1.2 Ga) quartzite and intruding anorthosite (~1.08 Ga) from Sierra Prieta, NW Sonora—Mexican additions to the Precambrian history of SW Laurentia: Symposium Ores & Orogenesis, Circum-Pacific Tectonics, Geologic Evolution and Ore Deposits, Tucson, Arizona, Arizona Geological Society, p. 147–148 (resumen).

Izaguirre, A.; Iriondo, Alexander; Wooden, J.L.; Budahn, J.R.; y Schaaf, Peter, 2008,
- Paleoproterozoic orthogneisses from the Cerro Prieto area—a new addition to the Mexican Yavapai province in NW Sonora: Joint Annual Meeting, Geological Society of America Abstracts with Programs, v. 40, núm. 6, p. 143–144.

Jacques-Ayala, C. Grajales N., J.M. and Terrel, D., 1990d, early Cretaceous marine sedimentation and volcanism in some localities of northern Sonora, México: Geological Society of America, Abstracts whit Programs, V. 22, p. 31.

Jacques-Ayala, C., 1993, The Lower Cretaceous Glance Conglomerate and Morita Formation of the Sierra el Chanate, northwestern Sonora: Revista del Instituto de Geología, Universidad Nacional Autónoma de México, 10, núm. 1, p.37-46.

Jacques-Ayala, C., 1995, Paleogeography and provenance of the Early Cretaceous Bisbee Group in the Caborca-Santa Ana region in Jacques-Ayala, C., González-León, C.M. y Roldán-

-
- Quintana, J., eds., Studies on the Mesozoic of Sonora and Adjacent areas: Geological Society of America, Special Paper 301, pp. 79-98.
- Laznicka, P., 1999, Quantitative relationships among giant deposits of metals: *Economic Geology*, v. 94, p. 455–473.
- Leach, T.M. and Corbett, G.J. (1995) Characteristics of low sulphidation gold-copper systems in the Southwest Pacific. *In Pacific Rim Congress 95, 19-22 November 1995, Auckland, New Zealand Proceedings, Carlton South, AusIMM, pgs. 327-332.*
- Leach, T.M. (1999) Evolution of selected porphyry copper-gold systems in the Southwest Pacific region and its relevance to exploration. *In PacRim '99, 10-13 Oct 199, Bali, Indonesia, Proceedings, Carlton South, AusIMM, pgs. 211-225.*
- Livingston, D.E., 1973, Geology, K–Ar ages and Sr isotopy at La Caridad, Nacozari district, Sonora, Mexico: Tucson, Arizona, University of Arizona, M.S. thesis, 31pp.
- Longoria, J.F., 1981, Geology features of northwestern Sonora, *in Longoria, J.F., ed., Regional geology of northwestern Sonora: Dallas, Texas, University of Texas, Guidebook, Field trip 4, Geological Society of America, Cordilleran section Annual Meeting, Hermosillo, Mexico, 174p.*
- López-Ramos, Ernesto, 1979, Geología de México: México, D.F., edición privada; t. 2. 454 p.: t.3, 453 p.
- Lowell, J. D.; y Guilbert, J. M. 1970. Lateral and Vertical Alteration-Mineralization zoning in Porphyry Ore Deposits. Society of Economic Geologist, Inc. *Economic Geology*, V. 65. Pp. 373-408.
- McDowell, F.W., Keizer, R.P., 1977, Timing of mid– Tertiary volcanism in the Sierra Madre Occidental between Durango city and Mazatlán, Mexico: *Bulletin of the Geological Society of America*, 88, 1479–1487.

-
- McDowell, F.W., Clabaugh, S.E., 1979, Ignimbrites of the Sierra Madre Occidental and their relation to the tectonic history of western Mexico, *en* Chapin, CE., Elston, W.E. (eds.), Ash-flow tuffs: Geological Society of America, Special Paper 180, 113–124.
- Mora- Álvarez, G., McDowell, F.W., 2000, Miocene volcanism during late subduction and early rifting in the Sierra Santa Ursula of western Sonora, Mexico, *en* Delgado-Granados, H., Aguirre-Díaz, G., Stock, J.M. (eds.), Cenozoic tectonics and volcanism of Mexico: Geological Society of America, Special Paper 334, 123–141.
- Merriam, Richard, Eells, J. L., 1979, Reconnaissance geologic map of the Caborca Quadrangle, Sonora, co: Univ. Sonora, Dept. Geología, Bol., v. 1, p. 87-94.
- Middlemost, Eric, A.K., 1994. Naming materials in the magma / igneous rock system. *Earth Sciences Reviews*, ELSEVIER. V. 37. P. 215-224.
- Navarro F., J. C., 1989, Estratigrafía del Cretácico Inferior en el área de Santa Ana, Sonora, México [B. Sc. Thesis]: Ensenada, B. C., Universidad Autón. De Baja California, 98 P.
- Ordóñez, Ezequiel, 1936, Physiographic provinces of Mexico: American Association of Petroleum Geologists, v. 20, p. 1277-1307. –1941, Las provincias fisiográficas de México: *Revista Geográfica del Instituto Panamericano de Geografía e Historia*, v. 1, p. 134-181.
- Pearce, Julian A., Nigel BW Harris, and Andrew G. Tindle. "Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks. "*Journal of petrology* 25.4 (1984): 956-983.
- Peccerillo, A., Taylor, S.R., 1976. Geochemistry of eocene calc-alkaline volcanic rocks from the Kastamonu area, northern Turkey. *Contrib. Mineral. Petrol.* 58, 63–81.

-
- Premo, W.R.; Iriondo, Alexander; y Nourse, J.A., 2003, U-Pb zircón geochronology of Paleoproterozoic basement in northwestern Sonora, Mexico—evidence for affinity to SW US provinces: Geological Society of America Abstracts with Programs, v. 35, núm. 4, p. 67 (resumen).
- Quiñones, Huberto, 1987, El sistema fisiográfico de la Dirección General de Geografía: Revista de Geografía, v. 1, núm. 2, p. 13-20.
- Raisz, Erwin, 1959, Landforms of Mexico: Cambridge, Mass., mapa de escala 1:3 000 000
- Richards, J. P. 2003. Tectono-Magmatic Precursors for Porphyry Cu-(Mo-Au) Deposit Formation. *Economic Geology*. Vol. 98. Pp. 1515-1533.
- Roedder, E. (1984) Fluid Inclusions. *Reviews in Mineralogy*, Vol. 12, Mineralogical Society of America, 644 p.
- Roedder, E., Bodnar, R.J., 1997, Fluid inclusions studies of hydrothermal ore deposits, in Barnes, H.L. (ed.), *Geochemistry of Hydrothermal Ore Deposits*: Wiley Interscience, 3a. edición, 657–698.
- Rollinson H.R. 1993. *Using geochemical data: Evaluation, presentation, interpretation*. Longman, London, pp 1–352.
- Salvatierra-Domínguez, E., 2000. Petrografía y geoquímica de los depósitos de tipo pórfido cuprífero de La Fortuna de Cobre y El Americano en el noroeste de México. Un pub. M.S. Thesis, Universidad de Sonora, 79 pp.
- Seedorf, E., Barton, M. D., William J. A., Stavast, and David J. Maher. 2008. Root Zones of Porphyry Systems: Extending the Porphyry Model to Depth. *Society of Economic Geologists, Inc. Economic Geology*, v. 103, pp. 939–956.

Seedorff, E., Dilles, J.H., Proffett, Jr., J.M., Einaudi, M.T., Zurcher, L., Stavast, W.J.A., Johnson, D.A., and Barton, M.D., 2005, Porphyry deposits—Characteristics and origin of hypogene features: Society of Economic Geologists, Economic Geology 100th Anniversary Volume, p. 251–298.

Sillitoe, R. H., 1972. A plate tectonic model for the origin of porphyry copper deposits. Economic Geology. Vol. 67. Pp. 184-197.

Sillitoe, R. H., 1973. Tops and bottoms of porphyry copper deposits. Economic Geology. Vol. 68. Pp. 799-815.

Sillitoe, R. H., 1985. Ore-related breccias in volcanoplutonic ores. Economic Geology, 80: 1467-1514.

Sillitoe, R.H., 1996, Granites and metal deposits: Episodes, 19, 126-133.

Sillitoe, R. H., 2010, Porphyry copper systems, Economic Geology, v. 105, p. 3–41.

Sillitoe, R. H., 2012, Copper Provinces, Society of Economic Geologist, Special Publication 16, pp. 1-18.

Silver, L.T., y Anderson, T.H., 1974, Possible left-lateral early to middle Mesozoic disruption of the southwestern North American Craton margin: Geological Society of America Abstracts with Programs, v. 6, p. 955 (resumen).

Singer, D.A., 1995, World class base and precious metal deposits—A quantitative analysis: Economic Geology, v. 90. p. 88–104.

Steele-MacInnis, M., Lecumberri-Sanchez, P., Bodnar, R. J., 2012. HOKIEFLINCS_H2O-NACL: A Microsoft Excel spread sheet for interpreting microthermometric data from fluid inclusions based on the PVTX properties of H²O–NaCl. Computers & Geosciences 49, Pp. 334-337.

-
- Stewart, J. H. et al., 1986. Late Triassic paleogeography of the southern cordillera; the problem of a source for voluminous volcanic detritus in the Chinle Formation of the Colorado Plateau region, U.S. Geol. Survey, p. 567-570, vol. 14; No. 7.
- Shepherd, T, Rankin, A.H. & Alderton, D.H.M. 1985: A practical guide to fluid inclusion studies. Blackie, Glasgow, 239 pp.
- Sun, S.S. and McDonough, W.F. (1989). Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts; implications for mantle composition and processes. In: Magmatism in the ocean basins. Saunders, A.D. and Norry, M.J. (Editors), Geological Society of London, London. 42: 313-345.
- Thompson, A. J. B., Hauff, P.L., Robitaille, A.J., 1999. Alteration mapping in exploration: application of short-wave infrared (SWIR) spectroscopy. Soc. Econ. Geol. Newslet. 39, 16–27.
- USGS Digital Spectral Library, 2007 Clark, R.N., Swayze, G.A., Wise, R., Livo, E., Hoefen, T., Kokaly, R., Sutley, S.J., 2007, USGS digital spectral library splib06a: U.S. Geological Survey, Digital Data Series 231.
- Valencia-Moreno, Martín; Ruiz, Joaquín; Barton, M.D.; Patchett, P.J.; Zürcher, Lukas; Hodkinson, D.; y Roldán-Quintana, Jaime, 2001, A chemical and isotopic study of the Laramide granitic belt of northwestern Mexico—identification of the southern edge of the North American Precambrian basement: Geological Society of America Bulletin, v. 113, p. 1409–1422.
- Valencia-Moreno, M. Ruiz, J. Ochoa-Landín, L., Martinez-Serrano, R., Vargas-Navarro, P., 2003, Geology and Geochemistry of the Coastal Sonora Batholit, NorthWestern Mexico. Canadian Journal Of Earth Sciences, vol. 40, pag. 819-831.

-
- Valencia-Moreno, M., Ochoa-Landín, L., Noguez-Alcántara, B., Ruiz, J., y Pérez-Segura, E., 2006., Características de los depósitos de pórfido cuprífero en México y su situación en el contexto mundial. Publicación Especial, Sociedad Geológica Mexicana y GSA Special Paper. Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana 58, 1: 1-26.
- Valencia-Moreno, Martin & Ochoa-Landín, Lucas & Noguez-Alcántara, Benito & Ruiz, Joaquin & Pérez-Segura, Efrén. (2007). Geological and metallogenic characteristics of the porphyry copper deposits of México and their situation in the world context. Special Paper of the Geological Society of America. 422.
- Valenzuela-Navarro, L.C.; Valencia-Moreno, M.; Iriondo, Alexander; y Premo, W.R., 2003, The Crestón granite—new confirmed Paleoproterozoic locality in the Opodepe area, north-central Sonora, Mexico: Geological Society of America Abstracts with Programs, v. 35, núm. 4, p. 83 (resumen).
- Valenzuela-Navarro, L.C.; Valencia-Moreno, M.; Calmus, Thierry; Ochoa-Landín, Lucas; y González-León, C.M., 2005, Marco geológico del pórfido de molibdeno El Crestón, Sonora central, México: Revista Mexicana de Ciencias Geológicas, v. 22, núm. 3, p. 345–357.
- Vidal-Solano, J.R., Lapierre H., Stock J.M., Demant A., Paz-Moreno F.A., Bosch D., Brunet P., Amortegui A., 2006, Isotope geochemistry and petrogenesis of peralkaline Middle Miocene ignimbrites from Central Sonora: relationship with continental break-up and the birth of the Gulf of California, en Reunion Scientifique Henriette Lapierre, Grenoble, France: Géologie Alpine, Serie speciale "Colloques et Excursions", N 8, 16–22.
- Wilkinson, J.J., 2001. Fluid inclusion in hydrothermal ore deposits. Lithos 55, p. 229 – 272.

11. Anexos

Anexo A: Análisis Petrográficos

Muestra: PJB-23

Coordenadas: E396552

N3447571

Descripción en sección delgada:

La roca presenta una textura granular de grano medio, hipidiomórfica (hábitos no bien desarrollados), holocristalina, inequigranular. La asociación principal consiste en fenocristales de plagioclasa y feldespato potásico (ortoclasa), Los cristales de cuarzo que se observan en la sección tienen formas anhedrales a subhedrales, de tamaño medio y se presenta en la roca hasta un 25% en promedio. Mientras los cristales de feldespato –K tienen hábitos más definidos y se presentan en cristales más grandes y prismáticos, estos se observan en lámina hasta en un 20%, pueden mostrar en algunos casos maclas simple tipo Carlsbad o no mostrar. Presentan una incipiente alteración por minerales de grano muy fino posiblemente arcillas por lo cual aparentan un aspecto sucio en los cristales. Los cristales de plagioclasa presentan cristales alargados tabulares hasta en un 40% de la lámina delgada, estos presentan una alteración de leve a moderada de minerales de grano muy fino con aspecto terroso y baja birrefringencia que podrían ser arcillas.

Clasificación y comentarios:

La clasificación resulta en una roca intermedia-ácida, tipo granodiorita, con una moderada alteración selectiva sobre los cristales de feldespatos alterados a arcillas, y una leve cloritización en los minerales máficos presentes en la roca como en el caso de las biotitas.



Foto A1. Microfotografía en luz transmitida de la muestra Pjb-23. En NP y NC en 4X.

Muestra: PJB-28

LH-145 @ 399.25m

Descripción en sección delgada:

La muestra en sección delgada presenta una gran cantidad de matriz y fenocristales embebidos de feldespato subhedrales y anhedrales de formas tabulares hasta en un 20%, de grano medio (2-4mm). La textura se presenta de manera porfídica con una matriz de grano muy fino, la matriz está compuesta principalmente por cuarzo-sericita lo que podría estar asociado al evento de alteración filica del evento de alteración hidrotermal. La mayoría de los cristales de feldespato-k y plagioclasa que se pueden apreciar por sus maclas polisintéticas y zoneamiento, se observan con un aspecto terroso, mientras que con nicoles cruzados se puede observar la birrefringencia coloreada de mica blanca (sericita). Por otro lado, el cuarzo se puede observar de distintas maneras en sección delgada, el cuarzo primario, corresponde a formas anhedrales en forma de óvalos y prismas redondeados, y en algunos cristales aparenta haber sufrido una disolución parcial (golfos de corrosión) y re-cristalización, estos se estiman que formen un total del 10%. Por otro lado, se aprecia cuarzo secundario en la matriz de la roca, de grano muy fino, en los intersticios de la roca original.



Foto A2. Microfotografía en luz transmitida de la muestra Pjb-28. En NP y NC en 4X.

Clasificación y comentarios:

La roca por sus características y grado de alteración la hacen difícil de clasificar, pero considerando el contenido de cuarzo primario la roca podría tratarse de una roca intermedia porfídica tipo monzonita-cuarzomonzonita, y donde la alteración de la roca puede estar directamente relacionado al evento hidrotermal de alteración filica, en donde hubo precipitación de minerales opacos como pirita principalmente en los cristales de los feldespatos. Además, se presenta un ramadeo de vetillas milimétricas (<1mm) de cuarzo+sulfuros (principalmente pirita), las cuales se encuentran cortando a la roca.



Foto A3. Microfotografía en luz transmitida de la muestra Pjb-28. En NP y NC en 4X.

Muestra: PJB-24

Coordenadas: E396197

N3442709

Descripción en sección delgada:

Gran parte de la lámina se observa una textura holocristalina hipidiomórfica con una fuerte recristalización en la matriz de cristales de cuarzo de grano muy fino, y poca sericita (mica blanca), todo este material aparenta ser producto de alteración de un grado fuerte, la cual se encuentra borrando la textura original de la roca. Entre los minerales que se alcanzan a conservar fueron ferromagnesianos del tipo biotita que se encuentran embebidos en la matriz y se encuentran levemente alterados a clorita, con formas anhedrales (<1mm) alcanzando menos del 2% en presencia en la lámina delgada. Al igual, los vestigios de los feldespatos

algunos conservan sus formas tabulares, algunos se pueden observar sus maclas, estos cristales de formas anhedrales (<2mm)

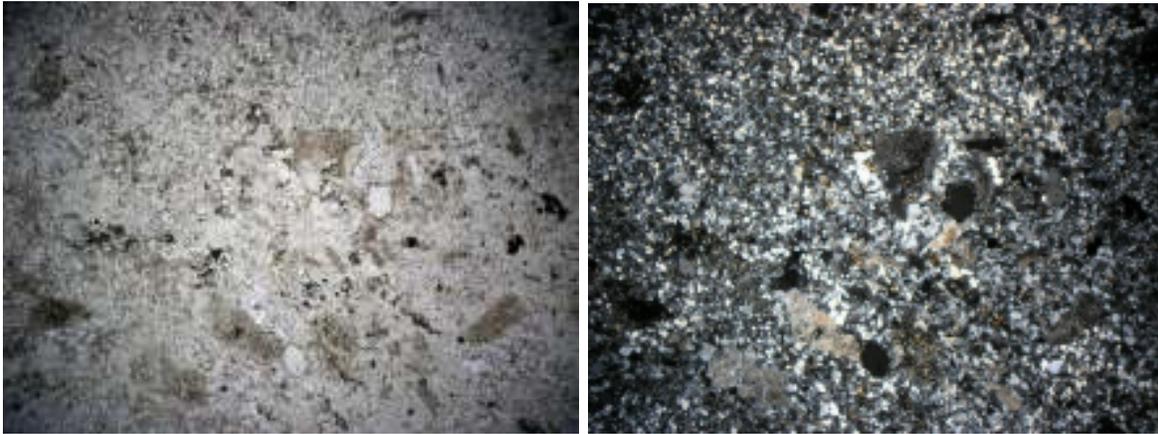


Foto A4. Microfotografía de luz transmitida de la muestra Pjb-24. En NP y NC en 4X.

Clasificación y comentarios:

La roca bajo los criterios de campo en donde se tomó, y sus características petrográficas, corresponde una roca fuertemente silicificada y recrystalizada, donde se alcanzan a observar cristales sostenidos en la matriz de cuarzo (textura porfídica), lo cual hace difícil su identificación.

Muestra: PJB-26

LH-351 @ 312.5 m

Descripción en sección delgada:

En lámina se observa una textura porfídica con matriz holocristalina compuesta principalmente de cuarzo y feldespatos-k-plagioclasa de tamaño fino con hábitos anhedrales y euhedrales tabulares con maclas carlsbag, y zoneamiento por el recalentamiento. La asociación principal de los fenocristales es de Feldespato-k, plagioclasa y cuarzo, presentan hábitos subhedrales a euhedrales con tamaños de hasta 3mm los mayores (plagioclasas-feldespatos-k), mientras que el cuarzo no se presenta de manera abundante, solo cristales

aislados de tamaños <2mm. Se observan 2 tipos de alteración importantes, se observa una primera alteración principalmente en la matriz como cristales de feldespato potásico, posiblemente ortoclasa hasta en un 5%, en algunos casos se observa bordeando los fenocristales más grandes de feldespato ocasionando bordes de reacción.

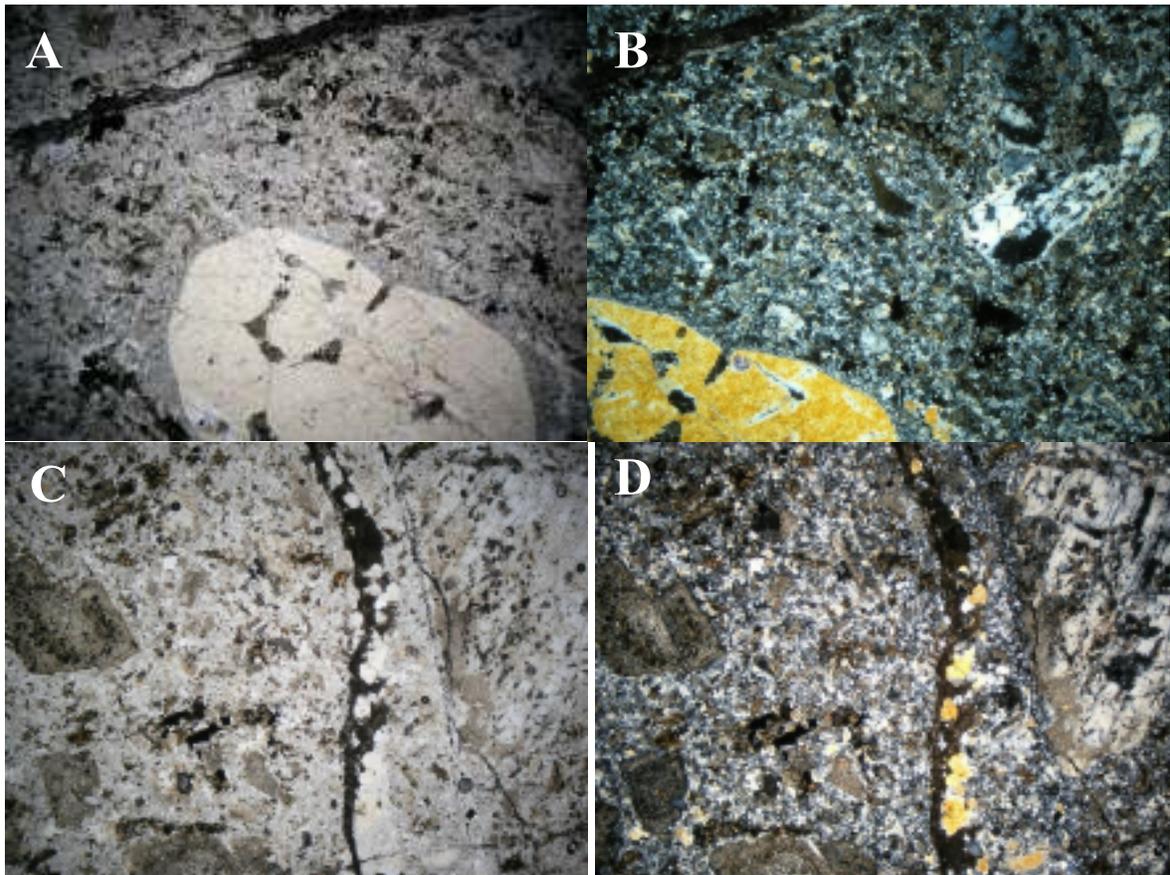


Foto A5. Microfotografía de luz transmitida de la muestra Pjb-26. 4x Nícoles paralelos/Nícoles cruzados. Roca Hipabisal con textura porfídica y composición monzonítica. A y B: Cristal de cuarzo (ojo) porfídico, soportado en matriz compuesta principalmente de Cuarzo + Feldespato, con una débil alteración de sericita y calcita en la matriz. C y D: Cristales de Feldespato-K y plagioclasa levemente alterados por sericita y matriz, a la vez siendo cortado por vetilla de Cuarzo + Sulfuros (cpy>py).

Por otro lado, se observan minerales de biotita muy finos acomodados de manera intersticial con hábitos en pequeñas hojuelas (flakes), de manera abundante en la roca hasta un 6-8% (Foto A6). Muchos de estos minerales presentan minerales oscuros (sulfuros) intercrecidos en el hábito de la biotita,



Foto A6. Microfotografía de luz transmitida de la muestra Pjb-26. Roca Hipabisal con textura porfídica y composición monzonítica. La roca presenta alteración potásica de biotita en hojuelas intersticial en aumento de 4x, Luz Natural.

Otra alteración presente, pero más selectiva se encuentra como sericita (mica blanca) en cristales de plagioclasa de manera moderada y en los cristales de feldespato-k en menor intensidad con un aspecto terroso.

Clasificación y comentarios:

La roca está compuesta principalmente por un agregado entre feldespato-k y plagioclasa en una relación muy similar, y poco contenido de cuarzo (<10%) alguno de estos recrystalizado posiblemente por los efectos de la alteración (filica). En gran medida la roca presenta una alteración potásica de feldespato-k intersticial moderado, y de biotita secundaria un poco más abundante hasta en un 8%. Particularmente este stock hipabisal correspondería a un pórfido monzonítico, el cual ha sido afectado por procesos hidrotermales.

Muestra: PJB-29

LH-371 @ 352.25 m

Descripción en sección delgada:

En sección delgada la roca presenta una textura porfídica holocristalina, y está compuesta principalmente de cuarzo – feldespato k y plagioclasa, los minerales porfídicos tienen formas subhedrales – euhedrales con tamaños que varían en feldespatos de hasta 3mm los más grandes, y componen un 25 % en feldespato potásico y 30% de plagioclasa, el cuarzo se observa de varias formas, una en forma de mosaico de tamaño fino en la matriz y la otra como fenocristales de tamaño entre 1-2mm flotando sobre la matriz de la roca, la cual es poco, y en cristales subhedrales de hasta 2mm los más grandes, y componen un 12% del total de la roca. Por otro lado, el cuarzo que se encuentra en la matriz corresponde en partes a una silicificación en forma de mosaicos de grano fino formando aglomerados por la recristalización de estos en la matriz de la roca. Los fenocristales de feldespato (potásico y plagioclasa), es difícil reconocer el tipo debido a su grado de alteración, salvo se pueden observar en ciertas partes de la lámina por sus formas y vestigios de sus maclados. La alteración se encuentra de manera selectiva en estos minerales, y principalmente está compuesta por un blanqueamiento (arcillas) posiblemente de caolinita-esméctica, posiblemente por efectos de hidrólisis en estos minerales, que se puede comprobar por la presencia de hematitas de manera abundante en la sección delgada.



Foto A7. Microfotografía en luz transmitida de la muestra Pjb-29. Corresponde a una roca intrusiva hipabisal con textura porfídica, con características de una roca intermedia de carácter monzonítico. Se observa un mosaico de minerales principalmente cuarzo – feldespato – biotita – hematita a su vez, siendo cortado por vetillas con sulfuros. 4x Nícoles paralelos/Nícoles cruzados.

Clasificación y comentarios:

Por sus características petrográficas la roca presenta una silicificación débil a moderada en forma de aglomerados de cristales de cuarzo de grano fino, además se observa una alteración selectiva de arcillas > sericita (mica blanca) en los cristales de plagioclasa y feldespato-k, esto podría ubicar el stock porfídico en una zona transicional de alteraciones tipo filica-argílica dentro del ambiente hidrotermal de un pórfido de cobre. La roca compuesta principalmente por una asociación de minerales de feldespato-k – plagioclasa < cuarzo y por su textura se trata como una roca hipabisal (en forma de stock y que corta a las rocas adyacentes por lo descrito en observaciones de campo) de carácter porfídico y composición monzonítica.

Muestra: PJB-27

LH-275 @ 389.95 m

Descripción en sección delgada:

En sección delgada la roca presenta una textura porfídica con fenocristales de grano medio (1-5mm), compuesta principalmente por plagioclasa – feldespato-k de tamaños de 1-4mm los mayores, muchos de estos feldespatos presentan maclas tipo albita y polisintético con proporciones de plagioclasa (albita-oligoclasa 40%) > feldespato-k (ortoclasa 30%) respectivamente tanto en matriz como en fenocristales. Los cristales de cuarzo que se observan como fenocristales soportados por la matriz de la roca, suelen ser cristales medianos 1-3mm, con formas subredondeadas en formas de ojos, y en la matriz de la roca en forma de agregados intersticiales que forman el 15% de la roca. Como minerales accesorios se observan cristales hexagonales de biotita en forma de libros, de tamaños medianos de hasta 3mm los mayores, y menores minerales tabulares de horblenda, en sus planos están siendo alterados parcialmente por cloritas y con agregados de sulfuros en muchas partes observadas de la lamina, los sulfuros se componen principalmente de pirita > calcopirita, todo este conjunto de minerales accesorios corresponde a el 15% de la roca en proporciones más o menos similares. Como producto de la alteración hidrotermal del sistema se observa de manera débil, principalmente en las biotitas ortomagmáticas, que están siendo afectadas por cloritas

de baja temperatura y en los feldespatos por muy poca sericita. Además de la presencia de vetillas tardías de calcita que se encuentran cortando a la roca y alteraciones presentes.

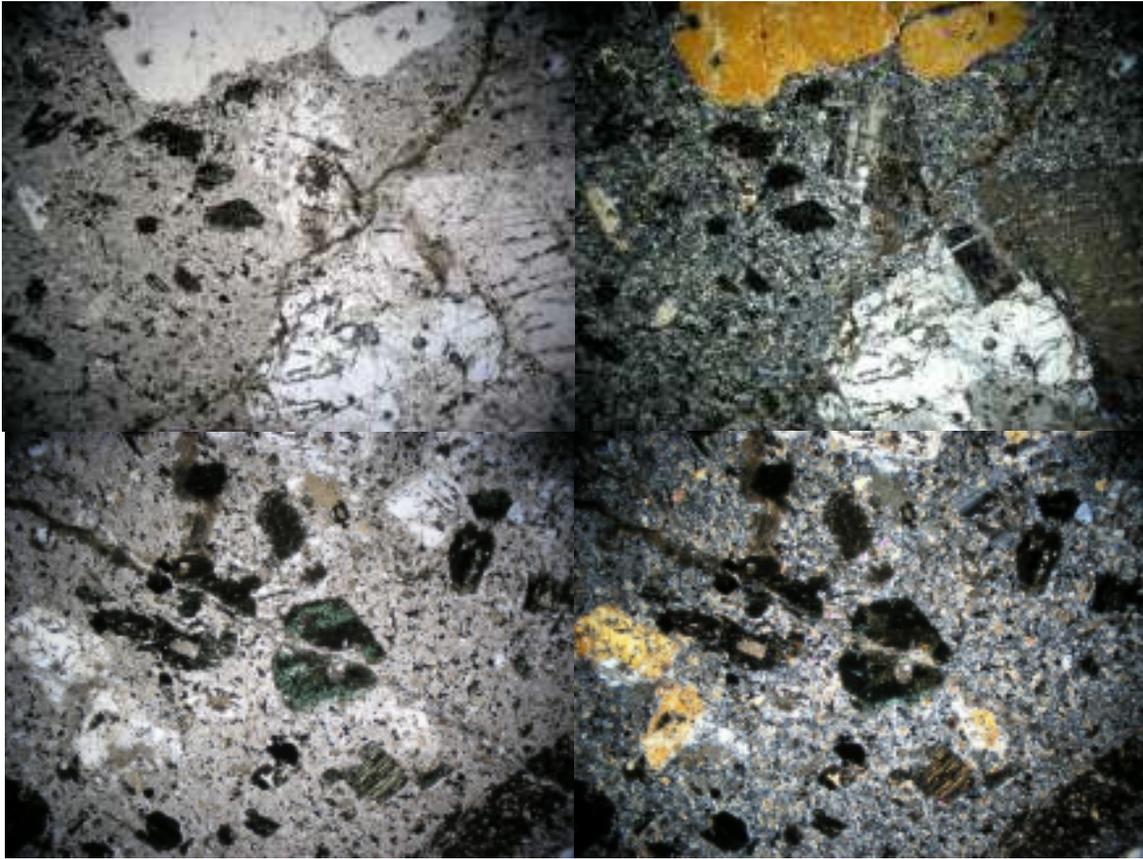


Foto A8. Microfotografía en luz transmitida de la muestra Pjb-27. Se observa una roca porfídica compuesta principalmente por Plagioclasa – Feldespato-k –Cuarzo. 4x Nicoles paralelos/Nicoles cruzados

Clasificación y comentarios:

Por sus características petrográficas la roca presenta una alteración filica débil y cloritización selectiva que pudo haber actuado posteriormente, las cuales se encuentran afectando feldespatos y minerales accesorios de manera selectiva. La roca por sus características texturales y composicionales corresponde a una roca porfídica cuarzo-feldespática de composición cuarzo-monzonítica y corresponde a un cuerpo hipabisal dentro del sistema pórfido de cobre.

Muestra: PJB-19

Coordenadas: E394643

N3446073

Descripción en sección delgada:

En sección delgada se observa una roca con textura holocristalina, granular xenomórfica o aplítica fina, en el que los minerales son aproximadamente similares en tamaño (equigranular), y los cristales son sin formas claras (anhedrales), incluso estos se encuentran intercrecidos entre si. La asociación principal consiste en cristales de cuarzo – feldespato-k con maclas tipo carlsbad y microclina, , el contenido en cuarzo excede el 30-35% del total de la roca, y el de feldespato-k llega hasta un 60-70%.



Foto A9. Microfotografía en luz transmitida de la muestra Pjb-19. 4x Nicoles paralelos/Nicles cruzados

Clasificación y comentarios:

Por sus características petrográficas y texturales, la muestra corresponde a una roca intrusiva de carácter félsico, con una textura holocristalina equigranular xenomórfica (cristales de cuarzo se tocan entre si con bordes sencillos y arqueados con formas irregulares intercrecidos entre sí), la cual se clasifica como un microgranito.

La alteración y el afloramiento parece corresponder a un evento posterior o tardío, con materiales residuales de un ambiente alcalino félsico, lo que implica zonas de metasomatismo y alteraciones retrogradas como filica, argílica lejanas al sistema pórfido.

Muestra: PJB-05

Coordenadas: E 394806

N 3445968

Descripción en sección delgada:

Las características observadas en microscopio presentan principalmente una textura holocristalina, inequigranular, hipidiomorfica, que esta compuesta principalmente por cuarzo – feldespato-k (del tipo ortoclasa – microclina por sus maclas en forma de rejillas). El cuarzo se observa de distintas formas, sin cristales bien definidos, y mal formados, y en algunas zonas recrystalizado, lo que puede indicar un proceso metasomático relacionado. Por el lado de los cristales de feldespato-k que se alcanzan a observar se aprecian unos con cristales tabulares bien definidos que alcanzan hasta 3mm, y otra etapa de menor tamaño y con cristales hipideomorfos que pudieran ser producto del metasomatismo potásico?.

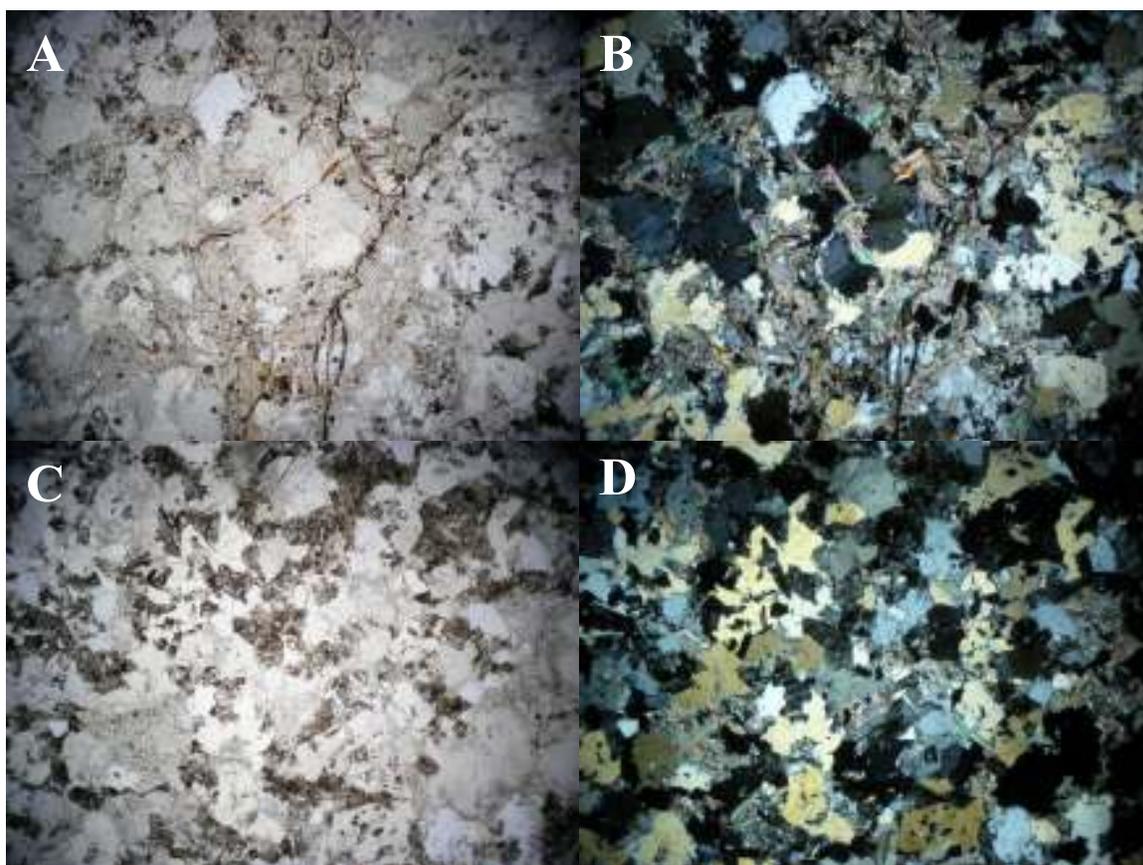


Foto A10. Microfotografía con luz transmitida de la muestra Pjb-05. A y B. Características de alteración filica pervasiva reemplazando gran cantidad de minerales e intercrecimiento de cuarzo. C y D. Remanentes de Feldespato-K intersticiales producto de metasomatismo potásico?. 4x Nícoles paralelos/Nícoles cruzados

Además, se pueden observar una mineralogía muy coloreada con colores de birrefringencia de segundo orden, que corresponden a cristales de muscovita como cristales elongados, dichos cristales se encuentran alterando en gran manera otra mineralogía presente en la muestra, como plagioclasa y feldespato-k, además de minerales accesorios como biotita-horblenda.

Clasificación y comentarios:

Por sus características, textura y alteración, es difícil clasificar la roca, debido a la fuerte alteración que se presenta. La textura granular prácticamente sin caras bien definidas, puede ser indicativo de una roca ígnea hipabisal, pero también puede tratarse en este caso de alteración metasomática potásica la cual posteriormente ha sufrido una alteración cuarzo-sericita que se ha sobreimpuesto. Dicha roca es seguro que estuvo sometida a metasomatismo profundo, con hidrotermalismo intenso posterior.

Muestra: PJB-15

LH-261@288 m

Descripción en sección delgada:

La roca al microscopio presenta características texturales de una roca holocristalina, granular, e hipidiomorfa, la mineralogía principal está compuesta por cristales de cuarzo – feldespato k – plagioclasa y como minerales secundarios se observan particularmente biotita, sulfuros y otros minerales de alteración como arcillas blancas y sericita.

Las características principales de la roca es el contenido en cuarzo que se presenta en cristales anhedrales de tamaño medio, de hasta 3 mm los mayores y con texturas que parecen haber sido recrystalizadas por metasomatismo, y equivale a un 20% de la roca. Por el lado del feldespato se observa una mayor presencia de feldespato alcalino, de carácter ortoclasa-microclina por sus maclas en forma de rejilla, y componen cerca del 40% del total de la roca, además de la plagioclasa apreciables por sus maclas tipo albita, y constituyen 20%. Estos cristales de feldespato se encuentran parcialmente alterados por arcillas > sericita, por posibles causas hidrotermales ya que presentan al centro de los cristales mayor presencia de

sericita (mayor temperatura) y hacia los bordes presencia de microcristales de filosilicatos posiblemente de caolinita, de esta manera se podría observar un zoneamiento por los efectos del hidrotermalismo del sistema.

Los minerales secundarios se aprecian en mayor cantidad como biotita, estos cristales se observan en agregados finos, sin formas bien definidas, anhedrales, muchos de los cuales están siendo alterados por cloritas. Estos minerales de biotita constituyen cerca del 6-7% del total de la roca, dado que pudieran ser efecto de una biotización? (foto A11; A y B). De hecho, justo a los bordes de una vetilla de cuarzo + sulfuros (molibdenita), se puede observar a los bordes un halo de feldespatos-k definido (foto A11; C y D), y conforme más a los bordes comienza a aparecer de este modo la biotita en dichas formas en arreglos pobremente definidos.

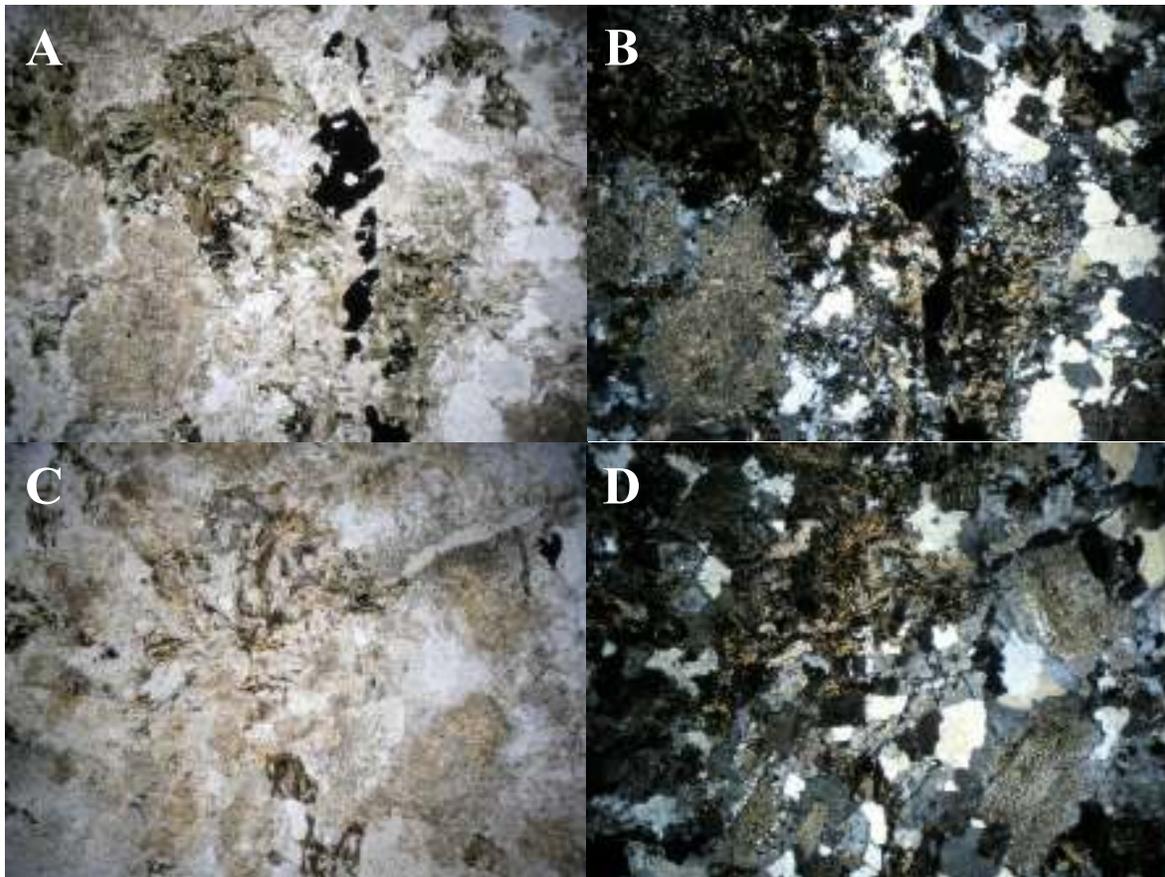


Foto A11. Microfotografía en luz transmitida de la muestra Pjb-15. 4x Nicoles paralelos/Nicoles cruzados

Clasificación y comentarios:

Por sus características y texturas, la roca corresponde a una roca intrusiva, holocristalina granular, de carácter granítico – monzo-granítico, la cual ha sufrido alteración por metasomatismo potásico en forma agregados minerales de biotita, que posteriormente ha sufrido una alteración por clorita. La mayoría de estos cristales de biotita han sido afectados y se observa a lo largo de sus cruceros dos tipos de minerales opacos en muestra de mano, uno con coloraciones más rojizas que le dan una tonalidad naranja –rojiza en luz transmitida, la cual son indicativa de que han perdido Fe por efectos de lixiviación. Los otros minerales opacos en algunos casos con tamaños >2mm, ocurren como precipitados de calcopirita – molibdenita en forma diseminada cerca de los bordes de la vetilla pegmatítica.

Muestra: PJB-01

E 393964

N 3445362

Descripción en sección delgada:

La muestra en sección delgada presenta una textura holocristalina, hipidiomórfica, granular, donde se observa un agregado de minerales compuesto principalmente por cuarzo – feldespato y minerales accesorios gran parte como producto de alteración de la mineralogía original de la roca.

Los cristales de cuarzo se observan en un mosaico de variados tamaños y formas que van de anhedrales a subhedrales, y tamaños de hasta 2 mm los mayores, y que se encuentran hasta en un 25-30% del total de la roca. Muchos de estos minerales, presentan disolución parcial, ¿lo que podría estar ligado a los efectos de la alteración cuarzo-sericita?, además de observar un mosaico de cristales que varían en tamaños, lo que pudiera ser adición de sílice producto de esta misma alteración.

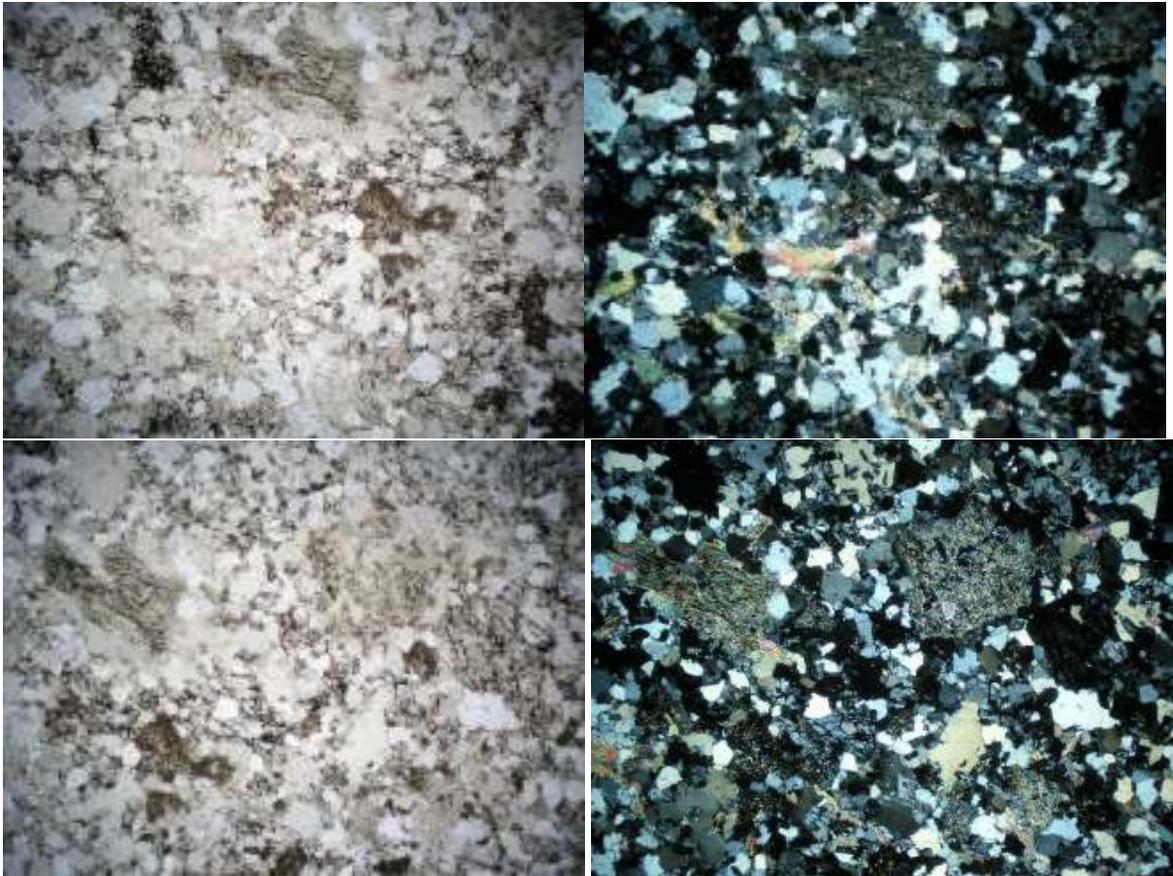


Foto A12. Microfotografía en luz transmitida de la muestra Pjb-01. 4x Nícoles paralelos/Nícoles cruzados

Por otro lado, lo que se alcanza a apreciar como feldespato de manera muy sutil debido al grado de alteración de la muestra, es indistinguible que tipo de feldespato sea, debido a que gran parte de este se presenta de formas subhedrales, y fuertemente reemplazados por arcillas-sericita, que pudiera representar un 20% del total de la roca, suponiendo por las formas de estos, aunque no se pueden diferenciar entre feldespato alcalino y plagioclasa para su clasificación.

Gran parte de la sección delgada presenta una moderada a fuerte alteración de cuarzo-sericita (muscovita), donde los minerales accesorios que corresponderían a ferromagnesianos del tipo biotita – horblenda, están siendo reemplazados completamente por muscovita, que se presenta en minerales fibrosos, de tamaño medio, con colores de birrefringencia de segundo orden. Y, además, en los feldespatos por otro lado la alteración supergena ha actuado hidrolizando los minerales más susceptibles como el caso del feldespato en gran parte de la

lámina, cómo arcillas blancas del tipo caolinita una gran cantidad de óxidos de hierro. Y corresponden en conjunto hasta 40% del total de la muestra.

Clasificación y comentarios:

Por sus características, la muestra no puede ser caracterizada por su grado de alteración y adición de cuarzo, producto de la alteración hidrotermal de la zona, aunque sin más la roca corresponde a un cuerpo ígneo intrusivo que por sus características en la región seguramente de composición félsica.

Muestra: PJB-10

E 395666

N 3445686

Descripción en sección delgada:

La muestra al microscopio petrográfico presenta características de una roca intrusiva hipabisal, con una textura porfídica, holocristalina, hipidiomórfica, la cual no presenta signos de una fuerte alteración, simplemente hidrolisis de los minerales más susceptibles.

Como mineralogía primaria se encuentra plagioclasa con fenocristales que ocurren en la matriz de la roca y de tamaños hasta 5mm (de tipo albita-oligoclasa, con sus maclas polisintéticos y de albita-carlsbad), y corresponde hasta un 60% del total de la roca, por otro lado, se observan en menor proporción feldespatos-k (ortoclasa, zoneadas) con tamaños de hasta 2mm los mayores, y representan hasta un 20% del total de la roca. Por otro lado, los minerales accesorios corresponden un 5% de la roca, principalmente a biotita >> horblenda, en donde la biotita se presenta con cristales bien desarrollados, tabulares y en forma de libros, con sus cruceros paralelos bien definidos, con unas coloraciones café-verdosas en algunos casos donde está siendo levemente alterada por cloritas, se presentan en cristales de hasta 5mm los mayores y los de horblenda se presentan en tamaños más pequeños de hasta 1mm los mayores. En algunos casos, la biotita presenta minerales opacos precipitados que corresponden principalmente a magnetita que además se observa de manera diseminada en la roca hasta en un 4%. En conjunto los minerales accesorios que constan de biotita – clorita – horblenda – magnetita se presentan hasta en un 15% del total de la roca.

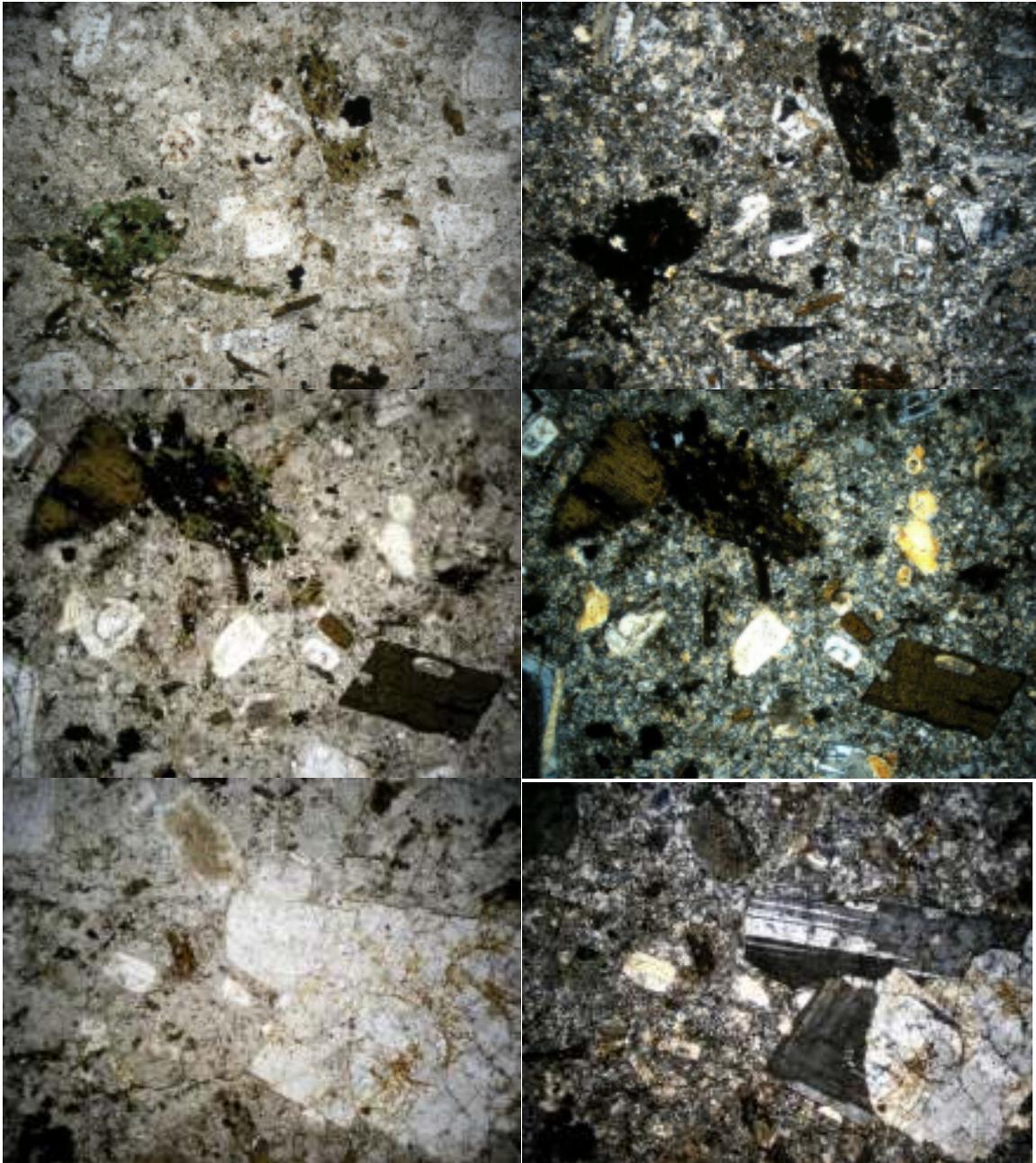


Foto A13. Microfotografía en luz transmitida de la muestra Pjb-10. 4x Nicoles paralelos/Nicoles cruzados

Clasificación y comentarios:

La muestra por sus características al microscopio y en afloramiento, corresponde a una roca intrusiva hipabisal pórfido diorítico

Muestra: PJB-11

E396186

N3446742

Descripción en sección delgada:

La muestra se observa una textura holocristalina, granular, y está compuesta principalmente por una mineralogía por plagioclasa (del tipo albita-oligoclasa que presentan sus maclas polisintéticas y albita-carlsbad), feldespato-k (del tipo ortoclasa y presenta un maclado zoneado de centro a borde, que refleja un evento metasomático que afecto dichos minerales), y cuarzo.

En cuanto a la plagioclasa, se observa en fenocristales ehedrales tabulares, de tamaños de hasta 3-4mm los mayores. La presencia de estos minerales puede llegar hasta en un 25-30% del total de roca. Mientras que el feldespato alcalino, se presenta en cristales tabulares menos elongados, ehedrales de tamaños de hasta 2mm los mayores, y con presencia de maclas simples (Carlsbad) o sin ellos, además se observa un zoneamiento que se asocia a un recalentamiento de estos. La presencia llega a ser abundante hasta un 30-35% del total de la roca muy similar al de la plagioclasa en algunas zonas. El cuarzo, se presenta en formas anhedrales, de tamaños <1mm, los cuales se encuentran principalmente en intersticios de los cristales de plagioclasa y feldespato-k y llega a componer hasta el 10-13% en el total de la roca. En el caso de los minerales accesorios como lo es la biotita en este caso, llama la atención, que corresponde a cristales semiformados hipidiomorfos, de subhedrales a ehedrales de tamaños de hasta 3mm los mayores, en algunos casos, se observa en cristales pequeños y con grados de alteración de clorita, lo que pudiera referirse como una biotización débil?, y en gran parte de estos cristales han precipitado sulfuros de magnetita-pirita observables en muestra de mano y hasta en un 3%. La biotita en algunas zonas se observa

como formas de clústers que llegan hasta un 20%, y en promedio en la roca llega hasta un 10% del total de esta.

La alteración por otro lado se observa de manera muy débil en esta muestra, principalmente como clorita llegando a alterar parte de las biotitas (Foto A14; A y B). Y en otro grado de alteración, se observa presencia de filosilicatos de manera muy débil en algunos feldespatos (Foto A14; C y D). En general, la roca comprendería una zona de alteración con una cloritización débil, y hasta una biotización de bajo grado.

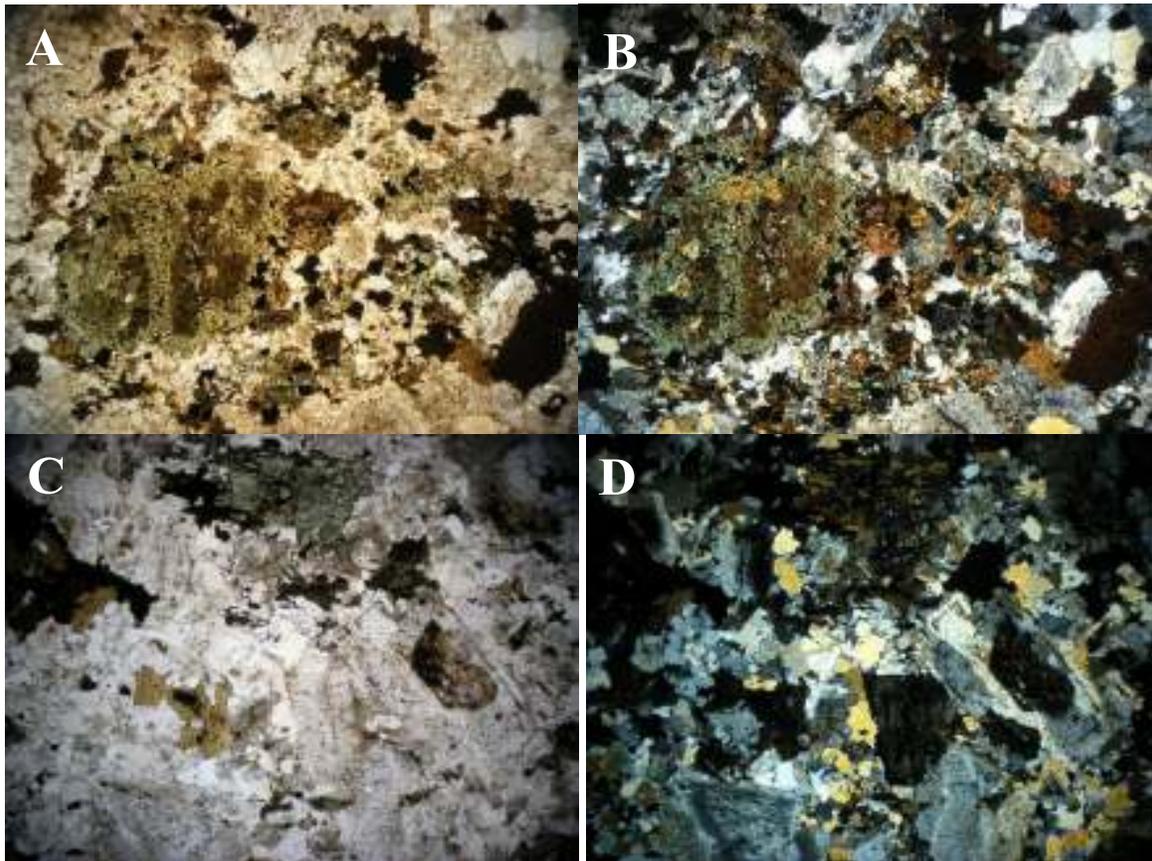


Foto A14. Microfotografía en luz transmitida de la muestra Pjb-11. 4x Nícoles paralelos/Nícoles cruzados

Clasificación y comentarios:

Por sus características en muestra de mano y al microscopio, la roca se clasifica como una cuarzomonzonita levemente porfídica, con una alteración de biotita débil, y posteriormente una cloritización débil selectiva.

Muestra: PJB-07

E 394844

N 3446022

Descripción en sección delgada:

En sección delgada se observa un mosaico de cristales holocristalino, granular, de formas anhedrales a subhedrales de tamaño fino <1mm. La mineralogía se compone principalmente por cuarzo – feldespato-k, en lo que la textura de la roca tanto en muestra de mano como en sección delgada aparenta ser una solución magmática derivada de procesos evolutivos muy diferenciados.

El cuarzo se presenta desde cristales subhedrales hasta anhedrales mal cristalizados en los intersticios de la roca, y de tamaños finos, y se presenta en hasta un 40% de la roca. Mientras que el feldespato se presenta en algunos casos con maclas simples, tipo Carlsbad (ortoclasa) y en otros como maclas en rejilla de variedad microclina, las formas de los feldespatos varían desde subhedrales hasta euhedrales en algunas zonas, y comprende hasta un 60% del total de la roca.

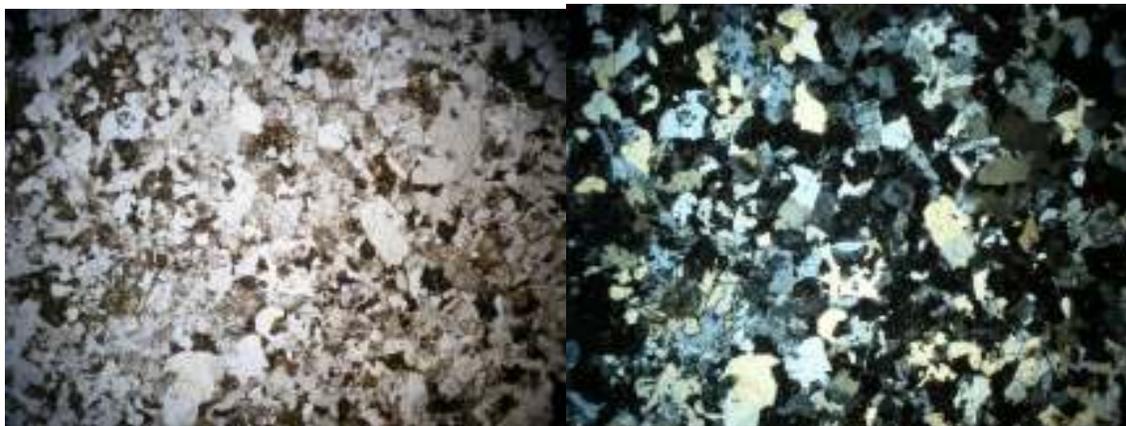


Foto A15. Microfotografía en luz transmitida de la muestra Pjb-07. 4x Nicoles paralelos/Nicoles cruzados

Clasificación y comentarios:

Por sus características en afloramiento y en sección delgada, la roca podría clasificar como un stock o dique aplítico derivado de residuos magmáticos de rocas graníticas.

Muestra: PJB-06

E 394903

N 3446036

Descripción en sección delgada:

En sección delgada se observa una textura holocristalina, hipidiomórfica, con cristales de euhedrales a subhedrales de feldespato y anhedrales de cuarzo.

Principalmente el cuarzo se observa de tamaño fino y con formas poco definidas, en algunas zonas de la lámina puede llegar a contenerse de manera muy abundante, hasta 35%, pero en promedio llega a alcanzar solo un 25% del total de la roca. Por el lado del feldespato potásico (Ortoclasa-microclina) se observa de tamaño medio de hasta 3-4mm los mayores, y presenta maclas simples zoneados y tipo Carlsbad en algunos casos y en enrejillado de microclina, la presencia de este mineral se contabiliza hasta un 40% y constituye el mineral principal en la roca. La plagioclasa se observa principalmente tipo albita-oligoclasa (con ángulos de extinción de 20-25°, y maclas tipo albita-carlsbad y polisintético) por otro lado se observa de tamaños más pequeños de hasta 2mm los mayores y se observan de forma tabulares euhedrales y se observan en un promedio de hasta un 32%.

Por otro lado, como minerales accesorios se observan principalmente como biotita de grano medio, en formas subhedrales a euhedrales con su clivaje paralelo bien definido y sin alteración.

En cuanto a la alteración en la roca generalmente está ausente, solo en contadas ocasiones en los feldespatos observado como arcillas producto de intemperismo.

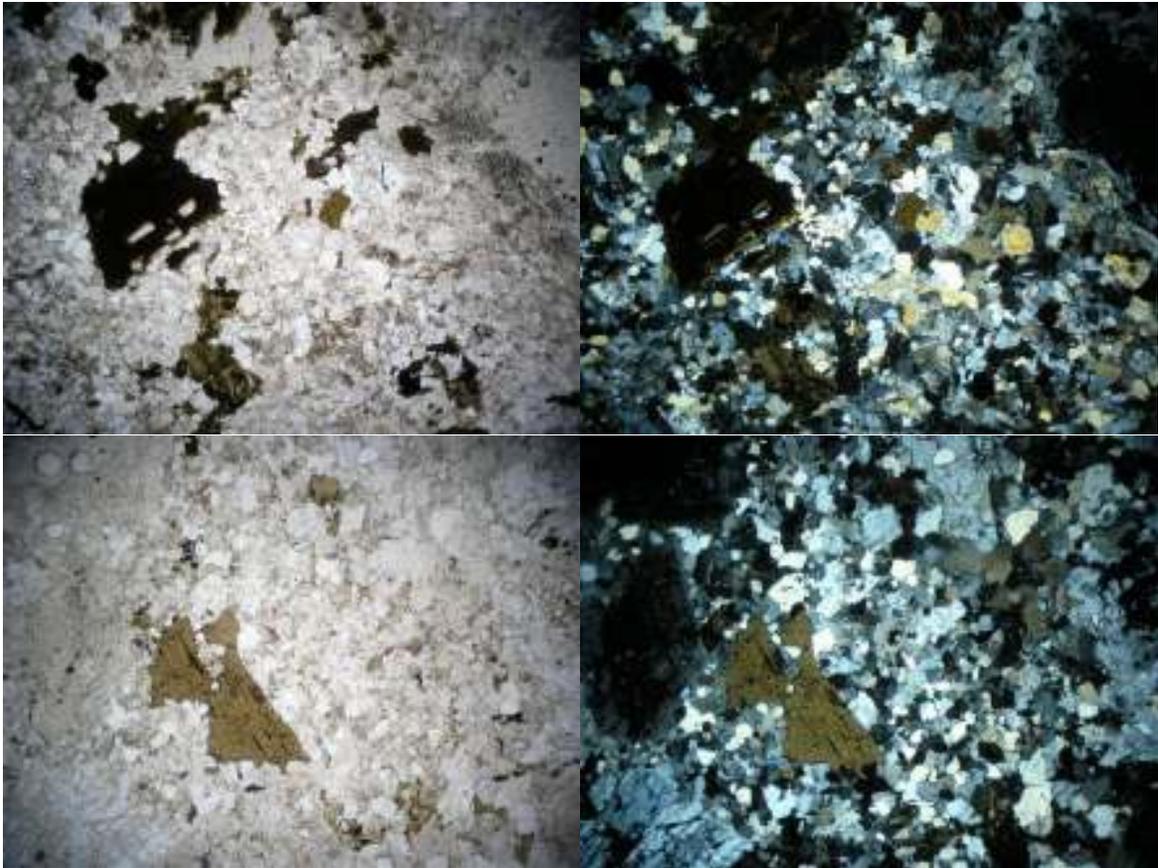


Foto A16. Microfotografía en luz transmitida de la muestra Pjb-06. 4x Nícoles paralelos/Nícoles cruzados

Clasificación y comentarios:

Por sus características en muestra de mano y al microscopio la roca puede clasificarse como una roca intrusiva holocristalina, granular, monzogranito de biotita.

Muestra: PJB-20

LH-448@262 m

Descripción en sección delgada:

La muestra en sección delgada presenta una textura holocristalina, porfídica con una matriz muy fina, la mineralogía principal es complicada con respecto a los feldespatos debido al grado de alteración donde no se observan claramente de que especie son, por otro lado, puede hablarse de las formas de estos, son de tamaños medios subhedrales – euhedrales de hasta 5mm los mayores, bien desarrollados, por lo que se puede saber que corresponden a feldespatos. El cuarzo se encuentra de formas subhedrales – anhedrales de tamaños de hasta 2-3mm los mayores y son frecuentemente escasos en sección delgada, que podría representar solo el 5% de la roca. La demás composición está distribuida entre la relación de feldespato-k – plagioclasa que no es posible distinguir, y minerales accesorios como el caso de la biotita, y en este caso se encuentra completamente reemplazada por sericita y en algunas ocasiones remanentes de lo que pudo haber sido clorita a lo largo de sus cruceros.

Esta roca presenta una alteración de moderada a intensa en ciertas partes de la lámina, ya que se realizó un corte en el cual se tomó una vetilla de sulfuro con halo filico (cuarzo – sericita), donde en las fotografías se puede observar el zoneamiento hacia cerca de la transición hasta este halo de alteración más intenso,

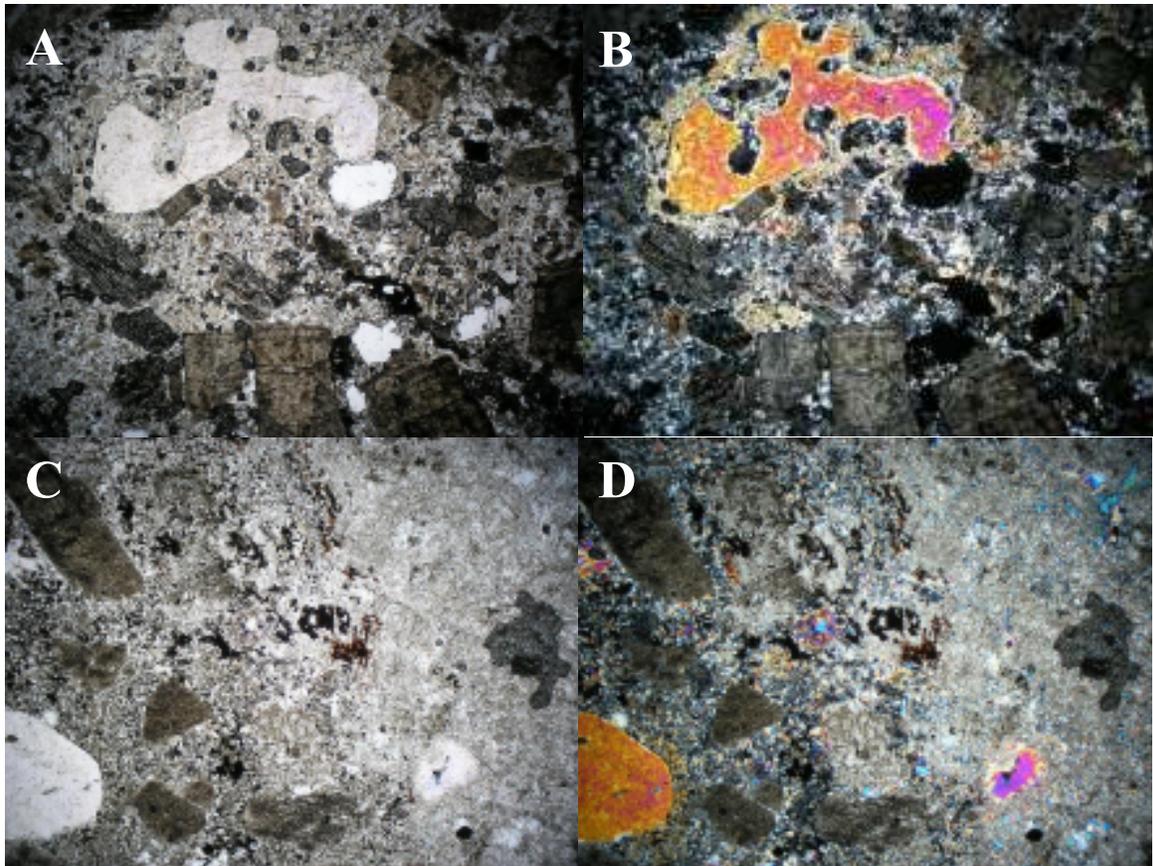


Foto A17. Microfotografía en luz transmitida de la muestra Pjb-20. En A) y B) se observa textura porfídica y conjunto de cuarzo y feldespato con un aspecto terroso manchado, alterados a arcillas principalmente, y minerales accesorios como biotita reemplazada completamente por sericita (muscovita) y poca clorita. En C) y D) en luz paralela y nicoles cruzados en aumento de 4x, se observa halo de alteración cuarzo-sericita de vetilla tipo B, y alterando gran parte de la roca huésped.

Clasificación y comentarios:

Por lo observado en características de campo y al microscopio, la roca es difícil clasificarla como tal, salvo que por su textura y relaciones de corte correspondería a un stock porfídico hipabisal de composición relativa félsica sobresaturada en sílice. Y además corresponde a una zona de alteración filica del sistema hidrotermal con presencia de vetillas de sulfuro (py) y halo sericitico.

Muestra: PJB-16

LH-261@385.8m

Descripción en sección delgada:

En sección delgada la roca presenta una textura ígnea holocristalina, granular, y se encuentra compuesta principalmente por fenocristales de feldespato – cuarzo, debido a la alteración de la roca es imposible saber qué tipo de feldespato está presente en ella, aunque por sus formas y tamaños podría tratarse de feldespato-k en su mayoría. Los minerales accesorios se presentan principalmente como biotita – magnetita. Por orden de contenido se describe la mineralogía que la compone, en este caso el feldespato que representa más del 75% en su conjunto, este se presenta en formas subhaciales – euhedrales de tamaños que van hasta los 5 mm los mayores, y tiene caras bien definidas, solo que el grado de alteración en estos minerales actuó de manera intensa y borro todas sus propiedades al microscopio óptico y es difícil caracterizar de manera precisa la especie de estos. El cuarzo representa en esta roca hasta un 15% de su totalidad y se observa en formas anhaciales de tamaños variantes desde 1mm hasta 3 mm los mayores. Por otro lado, los minerales accesorios corresponden a biotita que se presenta de formas bien desarrolladas euhedrales con tamaños de hasta 2 mm los mayores y corresponde en su conjunto con minerales precipitados en muchas zonas en los cruceros de la biotita, como magnetita se pueden observar hasta en un 3-5% del total de la roca.

La alteración se presenta de manera pervasiva en los minerales que fueron susceptible a ella, en la muestra se observa principalmente como arcillas del tipo caolinita por sus características ópticas e interpretadas, minerales de grano muy fino, de colores de interferencia muy bajos en tonos de grises. Además, se observa en menor proporción zonas con alteración filica afectando en algunas zonas a los feldespatos.

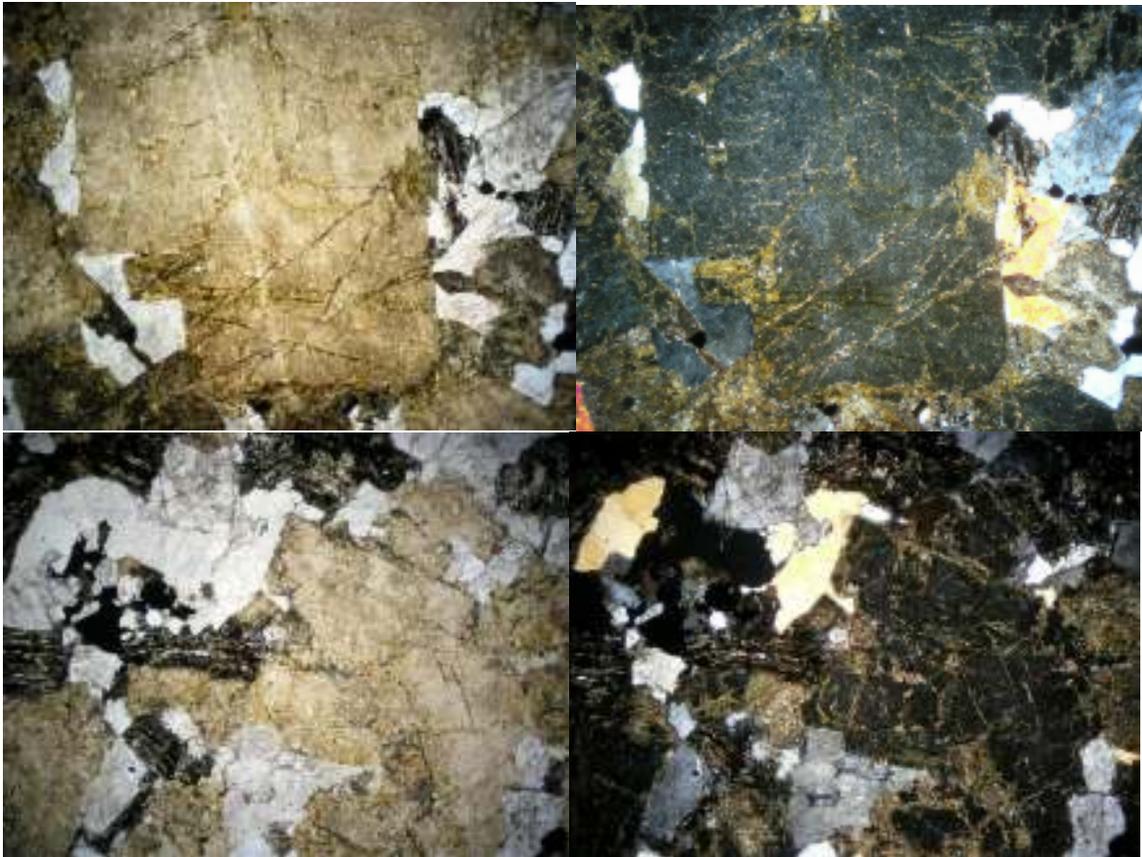


Foto A18. Microfotografía en luz transmitida de la muestra Pjb-16. 4x Nícoles paralelos/Nícoles cruzados

Clasificación y comentarios:

Por sus características en muestra de mano y sección delgada, corresponde a una roca ígnea félsica, holocristalina, muy posiblemente de composición granítica por sus características, y se encuentra con una alteración argílica pervasiva de fuerte que reemplazo todos los minerales susceptibles a procesos de hidrólisis de temperaturas relativamente bajas.

Muestra: PJB-02

E 394000

N 3445383

Descripción en sección delgada:

La roca en sección delgada presenta una textura holocristalina, con las características de una roca intrusiva granular, no se observa textura porfídica como se describió en muestra de mano, posiblemente fue por el grado de oxidación y alteración de la roca.

La mineralogía principal de la roca está compuesta principalmente por feldespato (difícil saber el tipo debido al grado de alteración en ellos, solo se aprecian sus formas originales) – cuarzo y minerales accesorios como biotita. En la gran mayoría de la lámina los minerales más susceptibles están siendo alterados por minerales fibrosos con las características de sericita (muscovita), de grano fino y con colores de birrefringencia de segundo orden. Es difícil decir que tipo de feldespato constituye la composición de la roca, y en el caso del cuarzo también hay características para pensar en una adición de cuarzo como producto de una alteración filica (cuarzo + sericita).

En este caso la alteración es característica en estos sistemas hidrotermales tan variantes, y se presenta como un mosaico de cuarzo de grano fino, sin formas aparentes y además de minerales fibrosos mal desarrollados en el caso de la sericita y pirita como sulfuro, mismo como parte de la misma alteración. Y que se encuentra alterando gran parte de la mineralogía de la roca presente. Dicha alteración se hizo cargo de alterar tanto feldespato-k –plagioclasa y minerales accesorios como biotita-horblenda.

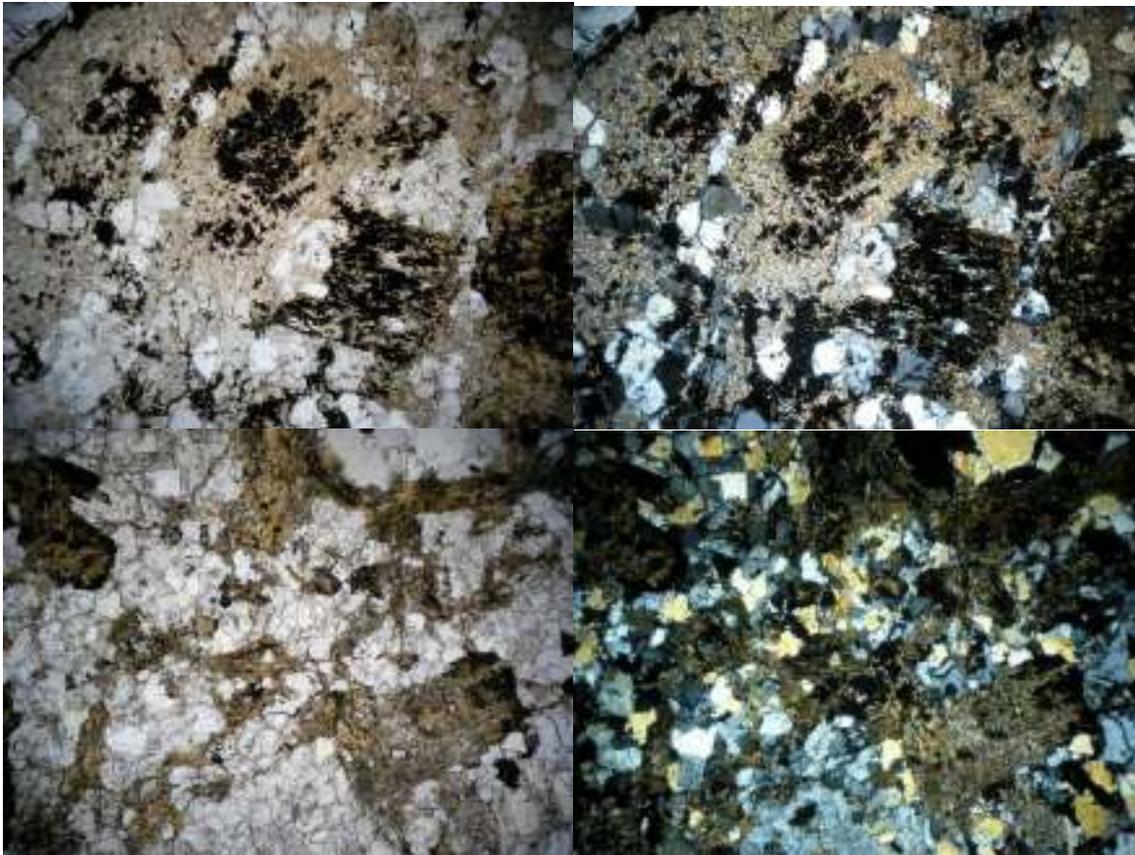


Foto A19. Microfotografía en luz transmitida de la muestra Pjb-02. Características de alteración filica. 4x Nicoles paralelos/Nicoles cruzados

Clasificación y comentarios:

La roca por sus características y grado de alteración hace difícil su clasificación como tal, solo se puede apreciar el tipo de alteración filica (cuarzo + sericita + pirita), que ha afectado a una gran variedad de minerales presentes en la roca. Y posiblemente corresponde a una zona filica o halo filico del sistema pórfido de cobre.

Muestra: PJB-14

LH-261@385.8

Descripción en sección delgada:

En sección delgada la muestra presenta varias particularidades entre los contactos de las relaciones de corte descritas anteriormente, la roca intrusiva se observa con una textura granular, holocristalina compuesta principalmente por feldespatos-k el cual es difícil reconocer debido a su grado de alteración, aunque este preserva sus formas bien definidas y es imposible reconocer la especie de estos. Se presenta cerca de un 60% del total de la roca y presenta particularmente en esta zona una alteración argílica selectiva sobre estos, que oculta todas sus maclas y zoneamientos. El cuarzo en esta zona se presenta de manera intersticial entre los cristales de feldespato y de tamaño fino con formas anhedrales generalmente, este se puede presentar hasta en un 8% en promedio del total de la roca. Por otro lado, los minerales, accesorios se encuentran totalmente alterados y quedan pocos vestigios de ellos, peculiarmente se observan minerales opacos alineados-paralelos dentro de cristales más grandes, estos minerales corresponden a biotitas alteradas que perdieron y como una forma de lixiviación perdiendo Fe por sus cruceros (Foto A20; A y B).

En la zona del dique aplítico se observa una disminución en el tamaño de grano a fino, y una relación cortante sobre el intrusivo (foto A20; C y D), donde generalmente se observa una relación mineralógica de cuarzo – feldespatos-k

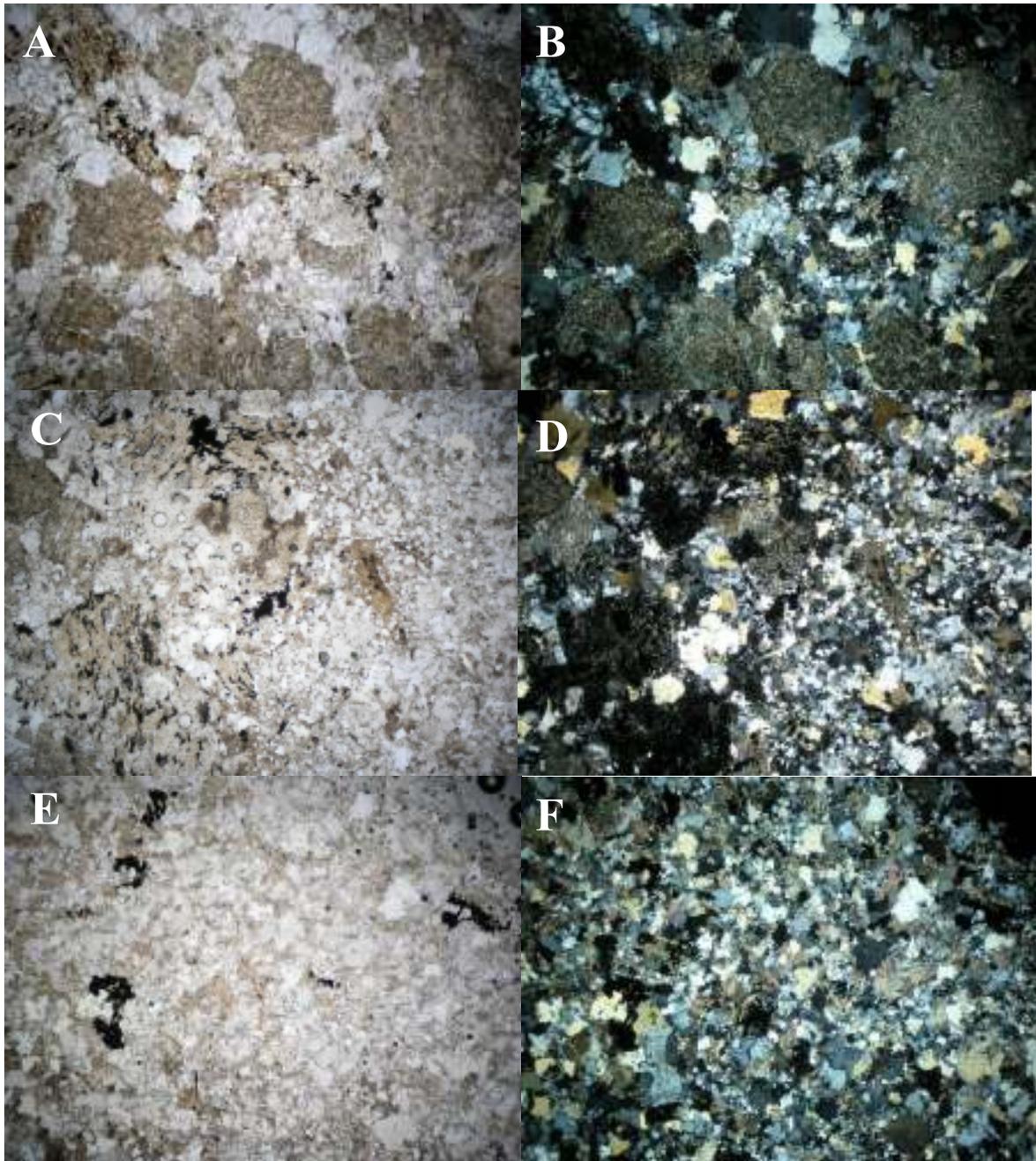


Foto A20. Microfotografía en luz transmitida de la muestra Pjb-14. En la figura A y B, tomada en aumento de 4X en nicoles paralelos y cruzados, se observan características de la roca intrusiva, donde se aprecia su relación mineralógica y de alteración sobre sus feldespatos argilizados con una superposición de sericita débil. En C y D, tomada en aumento de 4X con nicoles paralelos y cruzados, se observa la relación de corte entre intrusivo y dique centimétrico de aplita, además de los vestigios de las biotitas, observando minerales opacos sobre sus crucesos. En E y F, tomada en aumento de 4X con nicoles paralelos y cruzados, se observa una zona del halo de cuarzo – sericita (muscovita) de una vetilla tipo B.

Clasificación y comentarios:

Por sus características en sección delgada y muestra de mano, la roca es difícil su clasificación debido a su grado de alteración, aunque podría hablarse de una roca de carácter granítico-monzonítico por sus características.

Esta roca se encuentra cortada por dos eventos posteriores, los cuales uno corresponde a un dique de 5 cm de espesor con características de una aplita, este a su vez está siendo cortado por una vetilla milimétrica de sulfuros con un halo filico de 2 cm de espesor.

Muestra: PJB-09

E 395381

N 3445689

Descripción en sección delgada:

La muestra en sección delgada presenta una textura holocristalina, hipidiomórfica, granular, y se compone principalmente de cristales de cuarzo – feldespato-k – plagioclasa – biotita.

El cuarzo se presenta de forma muy abundante hasta un 30% y corresponden a cristales anhedrales de tamaño medio, sin formas definidas. En cuanto al feldespato-k está presente en la roca en un 35% y corresponde principalmente a ortoclasa-microclina donde se observa bien desarrollado con formas subhedrales – euhedrales bien definidos de tamaño medio de hasta 2-3 mm los mayores, algunos presentan maclas tipo carlsbad o microclina, algunos otros no presentan.

La plagioclasa se presenta principalmente como cristales alargados de albita con su maclado característico de albita, y oligoclasa con extinciones de 24°. Y se encuentran presentes en la roca hasta en un 25% del total de la roca.

En cuestión de los minerales accesorios, se presentan disseminados en toda la roca, y se observan de tamaño fino <1 mm, con formas tabulares mal desarrollados, posiblemente estén asociados a las fases finales de la cristalización del magma y no presentan ningún tipo de alteración.



Foto A20. Microfotografía en luz transmitida de la muestra Pjb-09. Mostrando mineralogía característica en un aumento de 4X, con nicols paralelos y nicols cruzados.

Clasificación y comentarios:

Por sus características en microscopio y muestra de mano, la roca puede clasificarse como un granito de biotita.

Muestra: PJB-04

E 393801

N 3445012

Descripción en sección delgada:

La muestra presenta una textura holocristalina, hipidiomórfica, y se compone principalmente de cristales de feldespato – cuarzo – biotita, los cuales muchos de los feldespatos están siendo afectados por arcillas, y se presentan con un aspecto terroso/manchado sobre ellos, aunque se alcanzan a apreciar sus tamaños y aún conservan parte de sus maclados y zoneamiento. Estos feldespatos (Plagioclasas) constituyen principalmente la roca (60%), (aunque no se descarta la presencia de plagioclasa en menor proporción) corresponden a cristales bien formados, de subhedrales – euhedrales con tamaños de hasta 3mm los mayores.

El cuarzo se presenta en formas y tamaños variados, desde 0.1mm hasta 2mm los mayores y se presentan en formas subhedrales – anhedrales y representan hasta un 20% del total de la roca.

En cuanto a los minerales accesorios se presentan principalmente como biotita, y se presenta hasta en un 8% de la lámina. Muchos de estos minerales se encuentran alterados por clorita muy selectivamente y sobre estos cristales se observan minerales opacos correspondientes a magnetitas por su susceptibilidad al imán.

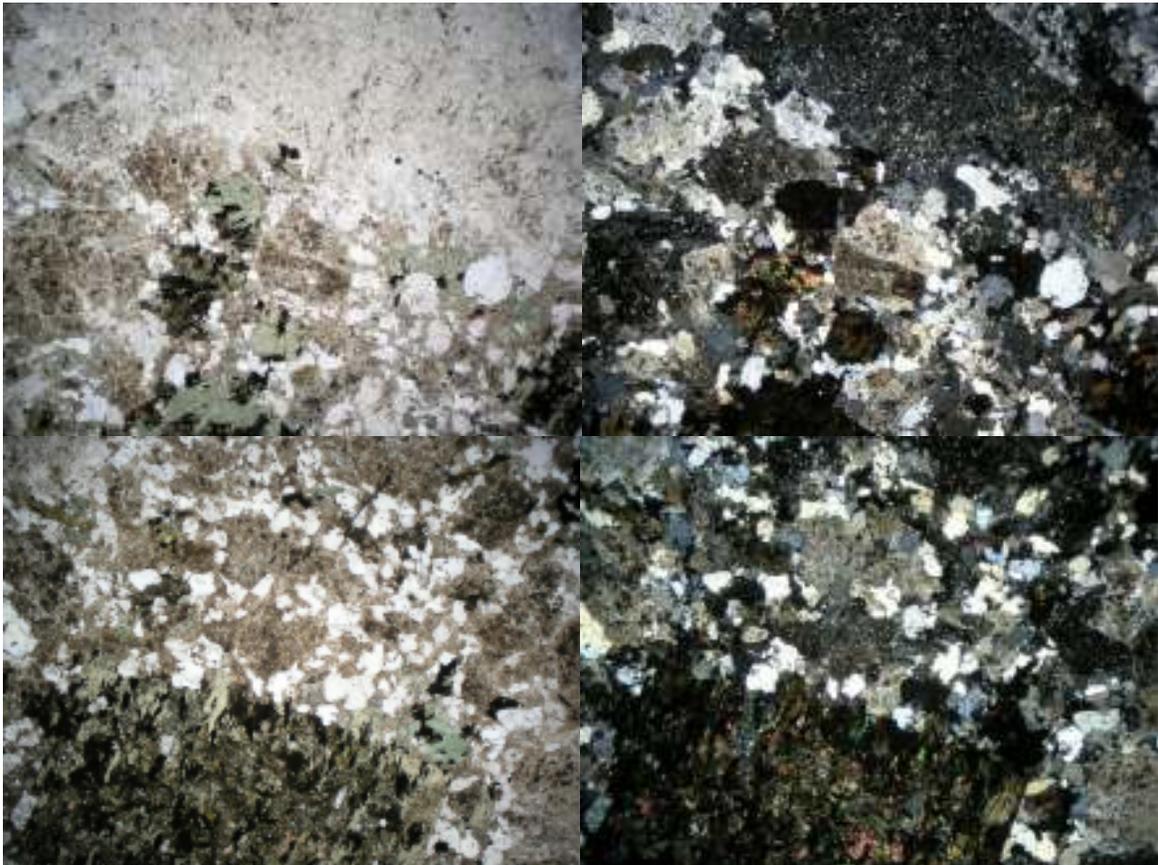


Foto A21. Microfotografía en luz transmitida de la muestra Pjb-04. Tomada en aumento de 4X, con NP y NC. En la fotografía se observan las principales características de la roca intrusiva, y sus alteraciones presentes en feldespato (arcillas) y en sus biotitas (cloritización).

Clasificación y comentarios:

La roca por sus características al microscopio y por sus características en muestra de mano, se puede clasificar como una Cuarzo Diorita de biotita, y presenta una alteración argílica débil a moderada selectiva que podría o no estar relacionada a un evento hidrotermal debido a su exposición en el afloramiento. Además, presenta una alteración selectiva moderada de clorita sobre las biotitas de esta roca.

Muestra: PJB-13

LH-261@296.45m

Descripción en sección delgada:

La muestra en sección delgada presenta una textura holocristalina, hipidiomórfica, con cristales de tamaños y formas distintas, en general se presenta de grano medio a fino en algunas zonas.

La mineralogía principal está compuesta por relaciones de feldespato-k – plagioclasa – cuarzo – y minerales accesorios como biotita principalmente. En cuanto al feldespato-k se observa en promedio hasta en un 45% en la roca, y se aprecia en cristales euhedrales y de tamaños que van hasta los 3mm los mayores y con formas bien desarrolladas tabulares poco elongados, muchos de estos cristales presentan zoneamiento debido al metasomatismo relacionado a las vetillas pegmatíticas que intrusionan la roca. La plagioclasa por otro lado se observa hasta en un 20% de la roca, y se presenta en cristales tabulares elongados y delgados, con tamaños de hasta 1mm y con maclas típicos de albita y polisintéticos. En cuanto al cuarzo, se observa de dos distintas maneras, una con cristales semiformados subhedrales de tamaños finos <1mm y que presentan los bordes corroídos que puede estar relacionado al calentamiento que sufrió la roca de caja. Otra forma en la que se presenta es cercana a la vetilla pegmatítica, es en formas intersticiales como si estuviera tratando de introducirse entre otros cristales y mal formados. Y puede llegar a presentarse hasta en un 15% en algunas zonas de la muestra.

Cercano a la zona de la vetilla se observa un incremento considerable en feldespato-k, con formas y texturas gráfica con cuarzo intercrecido en el feldespato potásico.

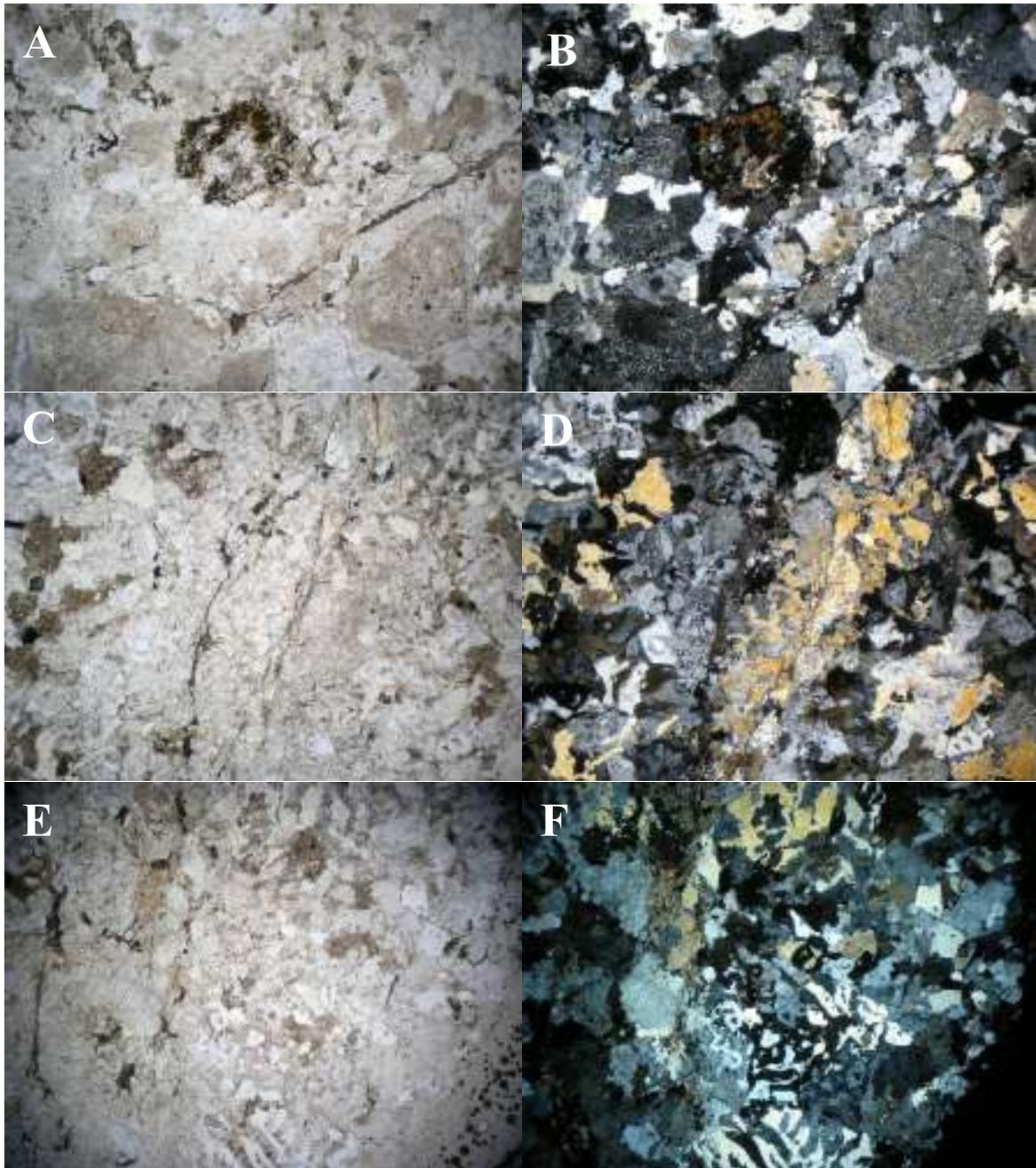


Foto A22. Microfotografía en luz transmitida de la muestra Pjb-13. Fotografías tomadas en aumento de 4X, en NP y NC. Mostrando en A y B, características texturales de roca cuarzomonzonita. En C y D, se observa vetilla Pegmatítica con cuarzo en el centro y feldespato alcalino en los bordes como halo. En E y F, se observa textura grafica con intercrecimiento de cuarzo en los feldespatos.

Clasificación y comentarios:

Por sus características en muestra de mano y en microscopio, la roca puede clasificarse como una cuarzomonzonita, con presencia de vetillas de tipo pegmatítica con características con cuarzo y halo potásico.

Muestra: PJB-08

E 395381

N 3445689

Descripción en sección delgada:

La muestra en sección delgada presenta una textura porfídica bien definida por fenocristales de feldespato alcalino, que estos son definidos particularmente por sus formas y tamaños tabulares, gruesos y poco elongados, además que es difícil clasificarlos debido al grado de alteración, en forma de óxidos de hierro, y se encuentran teñidos, y hacia los bordes se generaron arcillas enmascarando las características de estos minerales. En cuanto al cuarzo no se observa de manera abundante en esta roca, lo que se llega a observar en pequeños cristales de grano muy fino, y representan hasta un 2-3% en la muestra, y presencia de vetillas de cuarzo milimétricas sobre esta misma.

En la roca se observan zonas donde presenta características que podría decir que corresponden a feldespato alcalino impregnando la matriz de la roca de tamaño muy fino (foto A23; A y B). Además, se puede observar zonas donde el límite de la penetración de esta alteración, en la transición de esta alteración potásica, se puede observar otra alteración un poco débil de sericita – arcillas – sulfuros (pirita) finamente diseminados en esta zona de la lámina, y llega a observarse hasta en un 6-8% (foto A23, E y F).

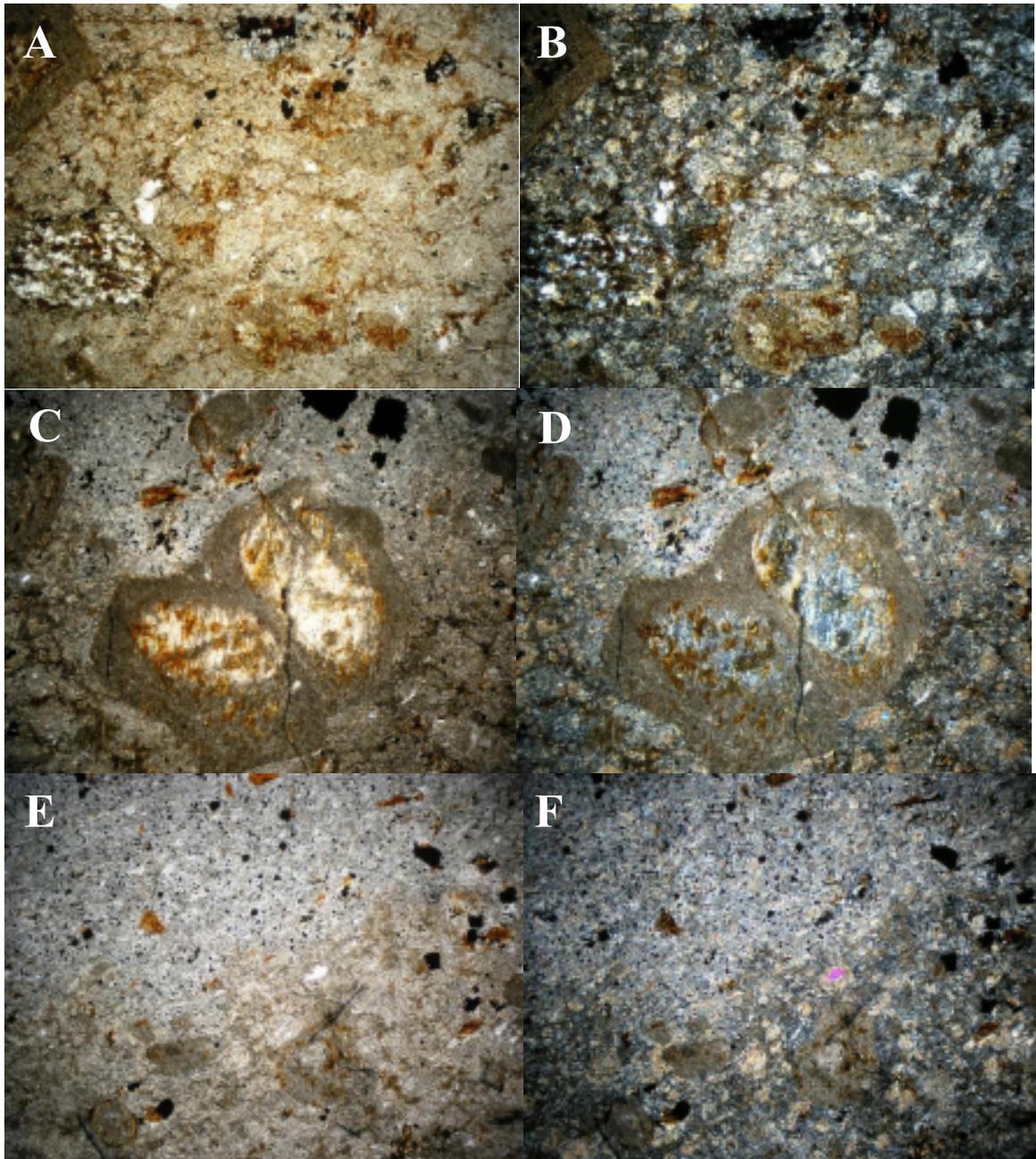


Foto A23. Microfotografía en luz transmitida de la muestra Pjb-08. Aumento 4X con NP y NC. En A y B, se observa zona con alteración potásica y oxidación afectando fenocristales de feldespato. C y D, se observa límite de alteración en las inmediaciones del fenocristal de feldespato, este se encuentra alterado de los bordes hacia afuera por arcillas y oxidación. E y F, se observa otra zona de la lámina donde se observa una alteración sericítica con abundante pirita asociada.

Clasificación y comentarios:

Por sus características en muestra de mano y petrográficas, la muestra es difícil de clasificar debido a su grado de alteración y afectación por oxidación, aunque sin más la roca se observa con muy poco contenido de cuarzo, y por las características texturales de esta misma podría corresponder a un pórfido feldespático con alteración de feldespato-k en la matriz y zonas transicionales a una alteración sericítica.

Muestra: PJB-12

E 396207

N 3443405

Descripción en sección delgada:

En lámina delgada se observa principalmente una textura holocristalina, hipidiomórfica, y se compone por cristales principalmente de feldespato-k – plagioclasa – cuarzo y cristales bien desarrollados de biotita.

El feldespato-k se observa como cristales grandes bien desarrollados de hasta 2-3mm, con formas poco elongadas y se observa con en forma terrosa debido a un grado débil de alteración por arcillas >> calcita en algunas zonas, estos minerales se llegan a observar de manera abundante en hasta 50% del total de la roca. Por otro lado, la plagioclasa, se observan un poco más pequeñas, se alcanzan a observar a pesar de la alteración que presentan, sus maclados típicos albita-carlsbad, y polisintético, de formas tabulares, elongados de hasta 2mm los mayores, y se llegan a observar hasta en 30-35% del total de la roca. En cuanto al cuarzo se observa de tamaño fino <1mm de manera intersticial, con formas anhedrales en su mayoría y llega a presentarse hasta en un 15%. Los minerales accesorios como los sulfuros y la biotita se llegan a observar como cristales bien desarrollados de subhedrales – anhedrales y en algunos lugares se llegan a observar como pequeños agrupamientos de estos y llegan a constar en la roca hasta en 6-7%.



Foto A24. Microfotografía en luz transmitida de la muestra Pjb-12. Tomada en aumento de 4X, con NP y NC.

La alteración se observa de manera débil – moderada en algunos casos como en la biotita, se encuentra parcialmente reemplazada por clorita y además se pueden observar cristales de minerales opacos como sulfuros precipitados en estas biotitas y que además están siendo oxidados. La alteración con respecto a los cristales de feldespato principalmente llega a ser débil salvo en algunas zonas un poco más intensa y no llega a verse las características de maclados o zoneamientos y se presenta principalmente como arcillas >> calcita.



Foto A25 Microfotografía en luz transmitida de la muestra Pjb-12. Tomada en aumento de 4X, con NP y NC.

Clasificación y comentarios:

Por sus características en muestra de mano y petrografía, la roca puede clasificarse como una cuarzomonzonita de grano medio, con alteración argílica débil y selectiva, además de una cloritización selectiva en ferromagnesianos.

Muestra: PJB-25

LH-448 @ 281.4

Descripción en sección delgada:

La muestra en sección delgada presenta una textura fina en la matriz holocristalina, se alcanza a reconocer que la roca está compuesta de lo mismo tanto en la matriz como los fenocristales más desarrollados, los cuales está compuesto principalmente por Feldespato alcalino (Ortoclasa en su gran mayoría), y cuarzo.

El feldespato potásico se observa principalmente en matriz de la roca, y no se observa alterado, presenta formas subhedrales, y además unos feldespatos mucho más desarrollados que van a tamaños de hasta 5mm, algunos de estos cristales presentan aspectos manchados por arcillas y muy poca calcita y representan la mayor cantidad de mineral en esta roca en hasta un 75%. El cuarzo por otro lado se presenta junto con la matriz de la roca de grano muy fino, y redondeado. Además del cuarzo en fenocristales más desarrollados o arrastrados por la matriz de la roca, se observan escasos, aunque de tamaños considerables de hasta 3-4 mm los mayores, en general pueden llegar a representar hasta un 13% de la roca.

Por otro lado, se encuentran algunos minerales accesorios en la roca, que van desde biotitas, levemente alteradas a clorita, pseudomorfos de sulfuros (calcopirita), y en algunas ocasiones se observan cristales de muscovita. Y vetillas milimétricas de calcita posteriores.



Foto A26. Microfotografía en luz transmitida de la muestra Pjb-25. Tomada en aumento de 4X, con NP y NC.

Clasificación y comentarios:

La roca por sus características texturales en muestra de mano – afloramiento y sección delgada, se puede clasificar como un pórfido cuarzo – feldespático con biotita, y se encuentra en una zona que pudiera estar relacionada a una alteración potásica.

Anexo B: Análisis Hiperespectral (TABLAS)

Tabla B1. Base de datos elaborada a partir de datos hiperespectrales de núcleo de barreno.

Bhid	from	to	Assamblage	alteration	pH	Observations
LH-187	206.1	210.55	Cao>Il-Sm-Cb	Argilica	4	
LH-187	210.55	211.1	Il>Cao-Sm-Cb	Argilica	5	
LH-187	211.1	214.5	Il>Sm	Filica	6	
LH-187	214.5	318.7	Sm(Mont>Sep)>Cb>>Il	Potasica Bt	7	Vetillas con halo K, coincide mineralización con descripción de Alt
LH-187	318.7	337	Sm(Mont>Sep)>>Il-CI	Argilica	6	Transición a subpropilitica?
LH-187	337	342.45	Sm(Mont)>Il>Cao	Argilica	5	
LH-187	342.45	351.4	Il>Cao	Argilica	5	
LH-187	351.4	358.5	Il-Sm (Mont)-Cao	Argilica	5	
LH-187	358.5	359.1	Il-Musc-Cao	Argilica	5	
LH-187	359.1	377	Il-Sm(Mont)-Cao	Argilica	5	
LH-187	377	453.85	Sm(Mont>Sep)>>Il-Cao	Argilica	5	
LH-187	453.85	518.1	Il-Sm-Cao	Argilica	5	
LH-187	518.1	523.55	Il-Sm-Musc-CI	Filica	5	
LH-187	523.55	595.65	Il-Sm-Cb	Argilica	6	Transición a filica, se presenta en halos de vetillas
LH-261	162.6	169.75	Il-Musc-Sm-Cao	Filica	5	
LH-261	169.75	260.85	Sm>Il-Cao	Argilica	5	
LH-261	260.85	293.7	Il>Sm	Filica	6	
LH-261	293.7	319.35	Il>Musc-CI	Filica	5	En Halos de Vtlls principalmente
LH-261	319.35	338.7	Il>Musc-Sm-Cao	Filica	5	
LH-261	338.7	343.45	Il-Sm-Cao	Argilica	5	
LH-261	343.45	347.6	Il-Musc-Sm	Filica	5	
LH-261	347.6	354.7	Il-CI-Sm	Potasica Bt	7	Muy leve presencia, barreno en los bordes!
LH-261	354.7	395.7	Il-Sm	Argilica	6	
LH-261	395.7	416.9	Il-Sm-CI-Musc	Potasica Bt	7	
LH-261	416.9	421.15	Il-Sm-Cb	Argilica	6	
LH-261	421.15	488.4	Il-Sm-CI	Potasica Bt	7	
LH-261	488.4	500.75	Il-Sm-Cao	Potasica Bt	7	Alteración argilica impuesta sobre alt Feld K
LH-515	142.5	170.9	Il-Cao-Sm-Musc-Cb>Biot	Argilica	5	Alt potasica biot con sobreimpresión de Argilica
LH-515	170.9	202.2	Biot>Il-Sm(Mont>Sep)-Cb	Potasica Bt	7	Alteración Feld-K<Biot reemplazada por argilización
LH-515	202.2	282.4	Biot>Il-Sm(Mont)	Potasica Bt	7	Caolinita selectiva, vetillas con Seponita y escasa Mont en matriz
LH-515	282.4	292	Il-Sm-Cao>Biot	Potasica Bt	5	Alt potasica biot con sobreimpresión de Argilica Il-Sm-Cao
LH-515	292	317.2	Il>Sm(Mont)	Filica	5	Illitic alteration, escasa y selectiva sm
LH-515	317.2	395.2	Il-Cao-Sm>Biot	Potasica Bt	7	CI (Overprints)selectiva y en pequeñas vtlls, Cb pervasivos, con algunas zonas de Bt diss,
LH-515	395.2	440.3	Il>Sm-Cb	Filica	5	
LH-351	152.2	192.1	Il-Cao>Musc-Sm	Argilica	5	
LH-351	192.1	213.75	Biot>Il-Sm(Mont)-CI-Cb	Potasica Bt	7	Escasa Clorita selectiva
LH-351	213.75	218.4	Il-Musc-Sm-Cao	Filica	5	Presenta Alt K biot con sobreimpresión de filica
LH-351	218.4	264.65	Il>>Cao-sm	Filica	6	Sobre imposición de Sericita en alt potasica de Biot.
LH-351	264.65	337.2	Biot>Il>>Sm	Potasica Bt	7	
LH-351	337.2	440	Il>Sm>Bt	Filica	5	Alteración filica Moderada sobre alteración potasica de biot
LH-351	440	511.3	Il>Sm>>Bt	Filica	5	Alteración filica intensa
LH-351	511.3	543.4	NA	NA	0	Dique traquiandesítico
LH-351	543.4	583.85	Il>	Filica	5	Monzogranito con alt filica mod perv.
LH-371	111.35	211	Cao>Il-Sm-Cb>Biot	Argilica	5	Caolinita abundante hasta los 200m reemplazando alteración Potasica Biot
LH-371	211	223.85	Il-Sm-Musc>>Cao	Filica	5	Escasa muy poca sericita
LH-371	223.85	229.15	Sm>Il	Argilica	6	
LH-371	229.15	261.25	Il-Musc-Sm	Filica	5	
LH-371	261.25	298.75	Sm>Il	Argilica	5	
LH-371	298.75	434.5	Il-Musc>Sm	Filica	5	
LH-308	156.5	167.7	Il>Sm>Musc	Filica	5	Zona de brecha, relacionada a contacto entre volc(post-min) y QMZT?
LH-308	167.7	278.2	Cb-CI-Sm(Mont>Non)>Biot	Potasica Bt	7	Carbonato pervasivo
LH-308	278.2	305.6	Il-Sm-Cb-CI>Biot	Potasica Bt	7	escasa muscovita y clorita diseminada
LH-308	305.6	313.25	Il-Musc	Filica	5	Clorita en zonas aislada, muscovita abundante en tramos
LH-308	313.25	337.9	Sm-Cb-CI-Il>Biot	Potasica Bt	7	Vetillas de CI en alt subpropilitica
LH-308	337.9	346.15	Il>Musc	Filica	5	
LH-308	346.15	384.2	CI-Cb-Sm	Potasica Bt	7	
LH-308	384.2	547.45	Il-Musc	Filica	5	
LH-308	547.45	559.5	Il-Sm-CI-Cb	Potasica Bt	7	Con sericita de musc asociada zona transicional
LH-308	559.5	582.4	Il-Cao	Argilica	5	
LH-460	156.9	193.3	Il>Sm-Cao-Mus	Filica	5	Posible sobreimpresión de filica sobre potasica de Bt?
LH-460	193.3	207.5	Cb-CI-Il-Sm(Mont>Non)	Potasica Bt	7	
LH-460	207.5	218.65	Il-Sm-CI-Cao	Argilica	6	
LH-460	218.65	227.3	Il-CI>Biot	Potasica Bt	7	
LH-460	227.3	237.9	Il>Sm-Cao	Filica	5	
LH-460	237.9	262.4	Sm-CI-Cb-Il>Biot	Potasica Bt	7	
LH-460	262.4	269.15	Il-Musc-	Filica	5	
LH-460	269.15	289.7	Il-CI-Sm>Biot	Potasica Bt	7	
LH-460	289.7	502.6	Il-Musc-CI	Filica	5	Alteración filica sobreimpuesta en alt Feld K

Tabla B2. Base de datos elaborada a partir de datos hiperespectrales de núcleo de barreno.

Bhid	from	to	Assablage	alteration	pH	Observations
LH-280	191	217.3	Il-musc-sm	Filica	5	
LH-280	217.3	223.4	Sm-CI-l>Biot	Potasica Bt	6	Alteración argílica sobreimpuesta sobre potasica de Biot
LH-280	223.4	261.9	Il-Musc-Sm	Filica	5	
LH-280	261.9	288.6	Cb-CI-Sm<Biot	Potasica Bt	7	Escasa caolinita en tramos
LH-280	288.6	352.4	Il-Musc>Cao-Sm	Filica	5	Zonas con alt de CI pervasiva intensa
LH-280	352.4	382.5	Bt-CI-Cb-Sm	Potasica Bt	7	
LH-280	382.5	394.35	Il-Musc>Sm	Potasica Bt	7	
LH-280	394.35	430.55	CI-Cb-Sm>Biot	Potasica Bt	7	
LH-280	430.55	454.9	Il-Musc-CI	Filica	5	Alteración filica pervasiva intensa con muscovita serícita
LH-280	454.9	492.05	NA	NA	0	Tetra
LH-280	492.05	581.85	Il-Musc-CI	Filica	5	
LH-283	200.8	244.4	NA	nA	0	204.4 a 224.75 tetra
LH-283	244.4	225.9	Il	Filica	5	
LH-283	225.9	295.15	CI-II-Sm-Cb	Potasica Bt	7	Alteracion potasica de Biot con sobre imposición de Filica y subpropilitica intercalada
LH-283	295.15	336.45	Il-Musc-Sm(Sepo)-CI	Filica	5	
LH-283	336.45	380.7	Il-CI-Sm-Cb	Potasica Bt	6	
LH-283	380.7	386.8	Il-Musc	Filica	6	
LH-283	386.8	411.3	NA	NA	0	Dique traquiandesítico
LH-283	411.3	438.2	Il-Musc-CI-Cb	Filica	5	
LH-283	438.2	541.2	Il-Sm-Cb-Cb>Musc	Potasica Bt	6	
LH-283	541.2	660.15	Il-Musc	Filica	5	Illitic alteration, Con transición a musc diss pervasiva
LH-264	169.25	384.2	Il-Sm-Cao-Cb	Argílica	5	Alteración filica ligada a estructuras en halos de vetillas
LH-264	384.2	460.2	Il>Sm-Cb	Argílica	5	Musc asociado a halos de vetillas, Posible roca monzogranito.
LH-172	71.85	130.6	Cao-II-Mus-Sm	Argílica	5	Argilización supergena? Posible sobreimpósición de arcillas sobre filica-illita-musc
LH-172	130.6	175.5	Il-Musc>>Cao-Sm	Filica	5	Leve caolinización entre fracturas posible sobreimpósición
LH-172	175.5	328.95	Il>Musc	Filica	5	
LH-172	260.6	524.35	Il>Musc-CI	Filica	5	Tz de clorita diss reemplazando bt? Posible. Escasa Cao.
LH-227	146.15	165	Cao-II	Argílica	5	
LH-227	165	259.7	Il>Sm-Sapo	Filica	5	Zona parcialmente argilizada, bastante fracturada, domina illita
LH-227	259.7	264	Il-Sapo-Amp-Bt	Potasica Bt	6	Zona con un cluster fuerte de Bt-Amp
LH-227	264	471.7	Il-Musc>>Sapo-CI	Filica	5	en muchas zonas la saponita sobreimpone en BT> hacia el fondo del barreno
LH-227	471.7	500.25	Il-Sepo-Bt	Potasica Bt	6	Zona con sobreimpósición en alt potasica de Bt
LH-227	500.25	524.65	Il-Musc>>Sapo-CI	Filica	5	en muchas zonas la saponita sobreimpone en BT> hacia el fondo del barreno
LH-241	281.45	506.25	Il-Musc-Sm	Filica	5	
LH-249	147.15	163.2	Cao-II-Mus	Filica	5	
LH-249	163.2	495.15	Il-Musc	Filica	5	Zona filica con vetillas tipo D
LH-251	236.1	270.9	Sm-II	Argílica	5	
LH-251	270.9	288.6	Il-Sm-Cao	Argílica	5	Zona de falla hasta los 392.4 a 448.5m
LH-251	288.6	403.5	Sm-II	Argílica	5	
LH-251	403.5	450.25	Il-Sm-Musc	Filica	5	Transición a zonas filicas
LH-276	147.6	320.8	Il-Cao-Sm-Sapo	Argílica	5	
LH-276	320.8	383.1	Il>Musc-Sm	Filica	5	
LH-276	383.1	415.6	Sm-II-Sapo	Argílica	5	Posible sobreimpósición de filica sobre potasica de Bt?
LH-276	415.6	500.45	Il-Sm-Chl	Sub-propilitica	7	Sobre imposición de Sericita en alt potasica k-Bt Nota: aparentemente puede ser subpropilitica
LH-276	500.45	601.45	Il-Musc	Filica	5	
LH-284	177.15	232.7	Il-Musc-Sm	Filica	5	
LH-284	232.7	270.35	Il-musc-Chl<Bt	Potasica Bt	6	Zona potasica con sobreimpósición de filica y Chl con w2205-2210 muscovitas potasicas
LH-284	270.35	303.65	Il-musc-Sm	Filica	5	
LH-284	303.65	391	Il-musc-Chl<Bt	Potasica Bt	6	Intervalo potasico con zonas de Chl sobreimpuesta en Bt, illita W2205-2210 (potasica, muscovita zonas calientes)
LH-284	391	471.7	Il-Musc>Chl-Sm	Filica	5	
LH-284	471.7	545.8	Il-Musc>Sm	Filica	5	
LH-290	179.25	234.3	Il-Chl-Sm	Sub-propilitica	6	
LH-290	234.3	343.1	Il>Sm-Musc	Filica	5	Poca clorita selectiva
LH-290	343.1	348.3	Il-Sm-Cao	Argílica	5	Zona de falla
LH-290	348.3	401.2	Il-Sm-Chl-Musc	Filica	5	Filica con transición a potasica de bt?
LH-290	401.2	439.3	Il	Filica	5	
LH-290	439.3	488	Bt-CI-II-Sm	Potasica Bt	6	Biotitas cloritizadas
LH-290	488	507.9	Il-Musc	Filica	5	
LH-290	507.9	571.65	Bt>Il-Sm-Musc	Potasica Bt	6	esta zona presenta sobreimpósición de illita (filica) moderada a perv enmascarando la alteración potasica de Bt
LH-302	140.4	260.9	Il-Sm-Cao-Cb	Argílica	5	
LH-302	260.9	308.3	Il-Musc-Cb	Filica	5	
LH-302	308.3	444.7	Bt-Chl>-Sm-II	Potasica Bt	6	Zona potasica bien evidente con abundante biotita y clorita sobreimpuesta
LH-302	444.7	578.95	Il-Musc-Sm>Bt	Filica	5	
LH-304	157.05	164.3	Il-Cao-Sm	Argílica	5	
LH-304	164.3	412	Sm-Chl-II<Bt	Potasica Bt	6	Zona con sobreimpósición de Chl en zona de biotita secundaria (Transicional) zona potasica de Bt con sobreimpósición de Filica
LH-304	412	464.9	Il-Musc-Sm	Filica	5	Zona filica sobreimpuesta sobre pequeñas zonas de potasica Bt
LH-304	464.9	657.4	Il-Musc-Sm	Filica	5	
LH-316	152.7	187	Cao-II	Argílica	5	Supergénico
LH-316	187	377.8	Sm-Sapo-II	Argílica	5	Zona de transición entre Argílica -> Filica (Presenta vetillas D), (Mucha esmectita indica zonas más frías dentro del sistema)
LH-316	377.8	550.7	Il>Sm	Filica	5	Termina en Mz Granito
LH-316	152.7	208.5	Il-Cao-Sm-Sapo	Argílica	5	
LH-316	208.5	286.7	Sm-Sapo-II	Argílica	5	
LH-316	286.7	340.8	Il-Cao-Sm	Argílica	5	
LH-316	340.8	370.5	Act-II-Sm	Potasica FK	7	Alteración potasica debil
LH-316	370.5	550.7	Il>Sm-Cao	Filica	5	

Tabla B3. Base de datos elaborada a partir de datos hiperespectrales de núcleo de barreno.

Bhid	from	to	Assamblage	alteration	pH	Observations
LH-328	134.45	199.8	Il-Musc>Sm	Filica	5	
LH-328	199.8	205.6	Chl-Il>Bt	Potasica Bt	7	Zona de alteración potasica Bt con sobre imposición debil de Chl
LH-328	205.6	222	Il-Musc>Sm-Cao	Filica	5	
LH-328	222	280.1	Chl-Il-act>Bt	Potasica Bt	7	Con sobreimposición de alteracion filica moderada Ilita-muscovita
LH-328	280.1	301.3	Il-Musc>Sm	Filica	5	
LH-328	301.3	472.5	Chl-Il-Act>Bt	Potasica Bt	7	Abundante Biotita-Act-Chl
LH-328	472.5	514.6	Il-Musc>Sm	Filica	5	
LH-328	514.6	532.55	Chl-Biot-Act	Potasica Bt	7	
LH-354	184.25	306.7	Il-Musc	Filica	5	Abundante Jarosita
LH-354	306.7	442.95	Il-Musc	Filica	5	Al fondo comienza a haber señas de alteración potasica vetillas tipo A, Chl
LH-415	98.05	126.8	Cao-Il-Sm-	Argilica	5	Argilica supergena
LH-415	126.8	384.8	Sapo-Sm-II	Argilica	5	Zona muy quebrada, posible zona de falla? Cercano a los 340 transición a zona más potasica
LH-415	384.8	443.85	Il	Filica	5	Dique traquiandesítico
LH-415	443.85	500.7	Il-Sm-Chl>Bt	Potasica Bt	7	Zona de alteración potasica Bt con sobre imposición debil de Chl y vetilleo con halo K
LH-451	139	253.2	Il>Sm-Sapo	Argilica	5	Al bajo presenta una pequeña zona que pudiera ser una zona transicional de Ilita>Sm (filica) relacionado a un zoneamiento
LH-451	253.2	293.2	Sm-Sapo>Chl-Amp	Potasica Bt	7	transición a potasica de baja intensidad (baja presencia de mineralogía Bt-Chl-Sm (zona relacionada a un porfido?)
LH-451	293.2	321.1	Il>Sm	Filica	5	zona filica, termina en falla, POSIBLE DESPLAZAMIENTO DE zona potasica al bajo.
LH-451	321.1	367.2	Sm-II>Chl	Potasica Bt	7	
LH-451	367.2	460.75	Il>>Sm	Filica	5	
LH-467	157.5	188.2	Il-Cao-Sm	Argilica	5	
LH-467	188.2	204.1	Sm-Sapo>Il-Chl(Bt)	Potasica Bt	7	Zona de alteración potasica debil. Zona relacionada minerales Mg
LH-467	204.1	280	Il-Musc>Sm	Filica	5	cambio en la composición mineral Fe>>Mg
LH-467	280	341.1	Sm-Sapo-Chl>Bt>Il	Potasica Bt	7	abundante zona de chl alterando a Bt Secundaria
LH-467	341.1	377.6	Il-Musc	Filica	5	Precencia de vetillas tipo B en zona filica intermedia-fuerte
LH-467	377.6	398.6	Il-Sm-Chl-Sapo>Bt	Potasica Bt	7	
LH-467	398.6	501.3	Il-Musc>Sm	Filica	5	
LH-471	35.1	133.4	Il-Sm-Cao	Argilica	5	Zona muy fracturada(fallada?)
LH-471	133.4	156.7	Il>Sm	Filica	5	
LH-471	156.7	198.4	Sm-II	Argilica	5	zona con fallas
LH-471	198.4	217.5	Sm-Sapo-Chl>Bt>Il	Potasica Bt	7	
LH-471	217.5	275.3	Il-Musc>Sm	Filica	5	
LH-471	275.3	283.3	Chl-Il-Sm>Bt	Potasica Bt	7	
LH-471	283.3	307.7	Il-Sm	Argilica	5	
LH-471	307.7	313.3	Sm-Sapo-Chl>Bt	Potasica Bt	7	
LH-471	313.3	348.8	Il-Musc-Sm	Filica	5	
LH-471	348.8	353	Sm-Sapo-Chl>Bt	Potasica Bt	7	
LH-471	353	472.4	Il-Musc>Sm	Filica	5	
LH-471	472.4	480	Chl-Bt-Musc	Potasica Bt	5	
LH-474	156.4	240.7	Sm-sapo>Il	Argilica	5	
LH-474	240.7	263.3	Sm-Sapo-Chl-Amp	Potasica Bt	7	
LH-474	263.3	387.9	Il-Musc>Sm	Filica	5	
LH-477	137.7	162.2	Il-Sm-Sapo	Argilica	5	
LH-477	162.2	176.9	Sm-Sapo-Chl>Bt	Potasica Bt	7	
LH-477	176.9	218.6	Il-Sm-Cao	Argilica	5	
LH-477	218.6	258.7	Sm-Sapo>Chl-Bt	Potasica Bt	7	
LH-477	258.7	329.7	Il>Sm	Filica	5	
LH-477	329.7	404.7	Chl-Bt>Il-Sm-Sapo	Potasica Bt	7	
LH-477	404.7	437.4	Il-Chl	Filica	5	
LH-477	437.4	458.9	Chl-Bt>Il-Sm-Sapo	Potasica Bt	7	
LH-477	458.9	542.75	Il-Chl	Filica	5	
LH-509	137.25	400.1	Il>Cb-Wt	Filica	7	Zona con abundante presencia de agua meteorica/ Mineralización asociada a oxidación? (PORFIDO) Zonas mineralizadas de 150-170 y 180-190 relacionadas a oxidación ? No se observa una relación en cuanto a alteración
LH-512	143.05	168.5	Il-Sm-Cb	Filica	5	
LH-512	168.5	311.1	Il-Cb>Sm	Filica	5	Se logra observar mineralización supergenica con valores de hasta 0.5% de Cu, no se observa correlación entre alteración.
LH-512	311.1	330.85	Cb>>Il	Sub-propilitica	7	

Tabla B4. Base de datos elaborada a partir de datos hiperespectrales de núcleo de barreno.

Bhid	from	to	Assamblage	alteration	pH	Observations
LH-514	158.3	164.3	Il>Sm	Filica	5	
LH-514	164.3	182.5	Sm-II>Chl	Potasica Bt	7	
LH-514	182.5	223.3	Il-Musc-Sm	Argilica	5	Zona con abundantes fallas.
LH-514	223.3	321.4	Chl-Bt-Sm-	Potasica Bt	7	
LH-514	321.4	408.8	Il-Musc	Filica	5	
LH-514	408.8	415.6	Chl-Bt-II	Potasica Bt	7	
LH-514	415.6	430.8	Il-Musc	Filica	5	
LH-514	430.8	436.8	Chl-Bt-II	Potasica Bt	7	
LH-514	436.8	465.3	Il-Musc	Filica	5	
LH-514	465.3	475.85	Il-Chl-Bt-Musc	Potasica Bt	7	
LH-522	187.75	269.2	Cao-Sm-II	Argilica	5	
LH-522	269.2	304.1	Il-Sm-Sapo	Potasica Bt	7	Potasica con argilica sobreimpuesta
LH-522	304.1	352.8	Il-Musc>Sm	Filica	5	
LH-522	352.8	364.3	Sm-Sapo-II-Chl-Bt	Potasica Bt	7	
LH-522	364.3	384.8	Il>Sm	Filica	5	
LH-522	384.8	389.7	Sm-Sapo>II-Chl	Potasica Bt	7	
LH-522	389.7	472	Il-Musc>Cao-Sm	Filica	5	
LH-69	60.25	103.9	Cao-II	Argilica	5	
LH-69	103.9	149	Sm-Sapo-Chl	Potasica Bt	7	
LH-69	149	189.9	Sm>Sapo	Argilica	5	
LH-69	189.9	197.6	Il-Musc>Sm	Filica	5	
LH-69	197.6	282.1	Cao-Sm-II	Argilica	5	
LH-69	282.1	319	Sm-Sapo-Act>II	Potasica Bt	7	
LH-69	319	399.1	Il>Sm-Sapo	Filica	5	
LH-69	399.1	452.6	Sm-Sapo>Act-Chl	Potasica Bt	7	
LH-69	452.6	465.1	Il-Cao	Argilica	5	
LH-69	465.1	502.9	Sm-Sapo-Chl-II	Potasica Bt	7	
LH-69	502.9	538.8	Il>Sm-Cao	Filica	5	
LH-214	66.8	131.6	Cao-II-Sm	Argilica	5	
LH-214	131.6	299.3	Sm-Sapo>II	Argilica	5	
LH-214	299.3	366.3	Sm-Sapo-Chl	Potasica Bt	7	
LH-214	366.3	391.5	Il>Sm	Filica	5	
LH-214	391.5	438.6	Sm-Sapo-Chl	Potasica Bt	7	
LH-214	438.6	464.7	Il>Sm-Chl	Filica	5	
LH-214	464.7	566.4	Chl-Sm-II	Potasica Bt	7	
LH-214	566.4	595.95	Il-Musc	Filica	5	
LH-265	38.85	155.1	Sm-II-Cao-Sapo	Argilica	5	
LH-265	155.1	175.2	Sm-Sapo>Act-Chl	Potasica Bt	7	
LH-265	175.2	294.9	Il>Sm	Filica	5	Zona de falla hasta los 223 -265M
LH-265	294.9	456.6	Chl-II-Musc-Act-Bt	Potasica Bt	7	
LH-265	456.6	505.5	Il>Cao-sm	Filica	5	
LH-265	505.5	543	Il-Chl-Act-Bt	Potasica Bt	7	
LH-265	543	617.05	Il-Musc	Filica	5	
LH-311	55.85	121.8	Il-Cao-Sm	Argilica	5	
LH-311	121.8	210.4	Sm-Sapo	Argilica	5	
LH-311	210.4	302.2	Il>>Sm	Filica	5	
LH-311	302.2	428.8	Il>Chl-Act-Sm-Sapo	Potasica Bt	7	relacionado a otra cosa? No presenta valores interesantes de Cu, se presentan por encima de esta alteración
LH-311	428.8	489.2	Il-Chl-Musc	Filica	5	
LH-311	489.2	650.35	Chl-Act-II	Filica	5	No esta relacionado a alteración potasica de Bt

Anexo C: Espectros SWIR

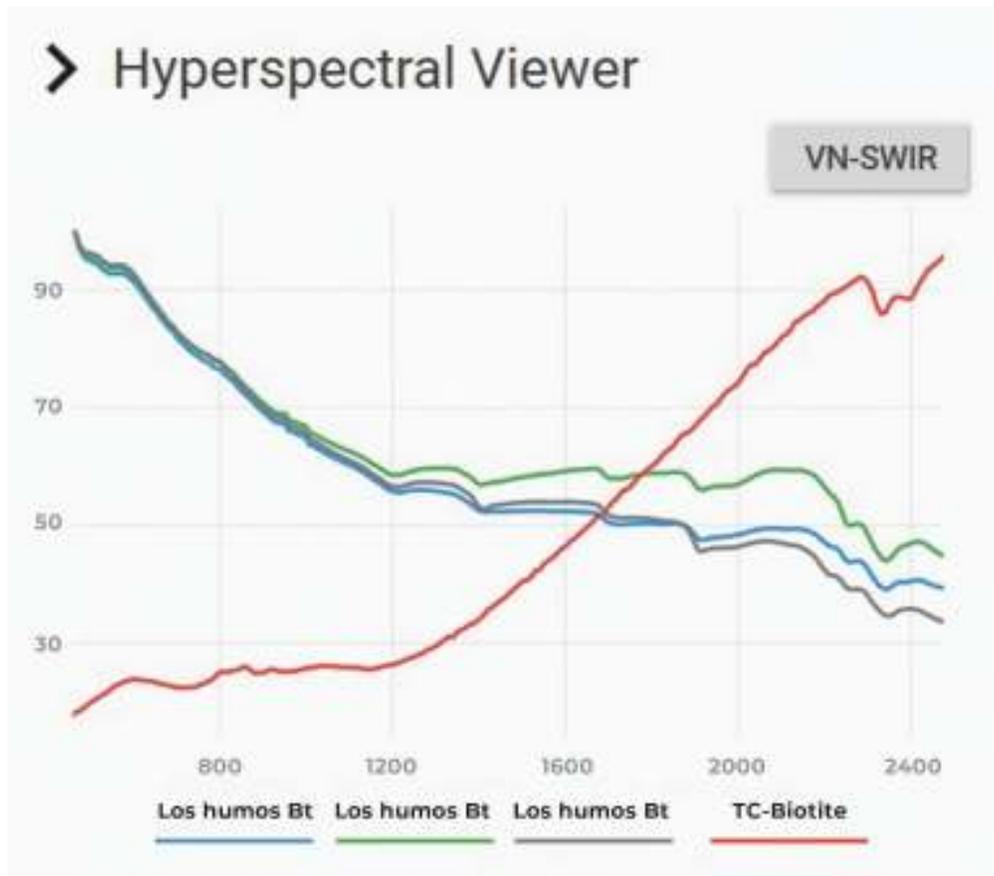


Figura C1. Mostrando espectro de mineralogías de biotita de las zonas de alteración del yacimiento Los Humos. Bt: Biotita, TC: TerraCore base de datos.

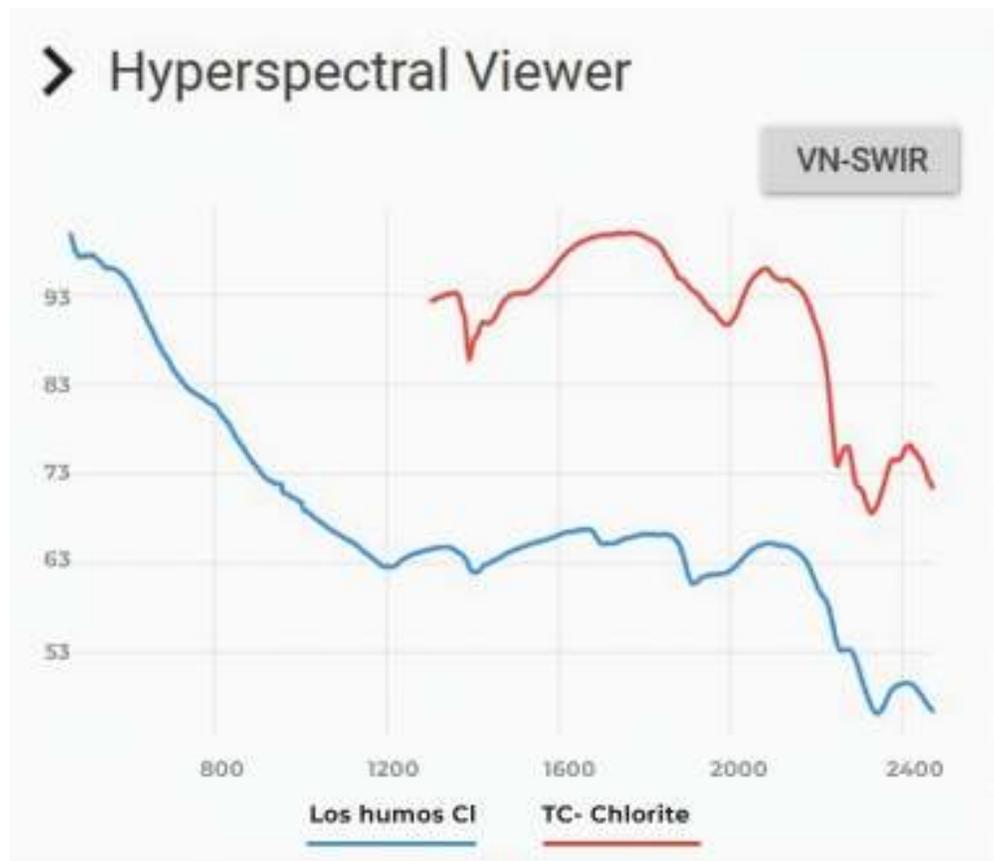


Figura C2. Mostrando espectro de mineralogías de biotita de las zonas de alteración del yacimiento Los Humos. Cl: Clorita, TC: TerraCore base de datos.

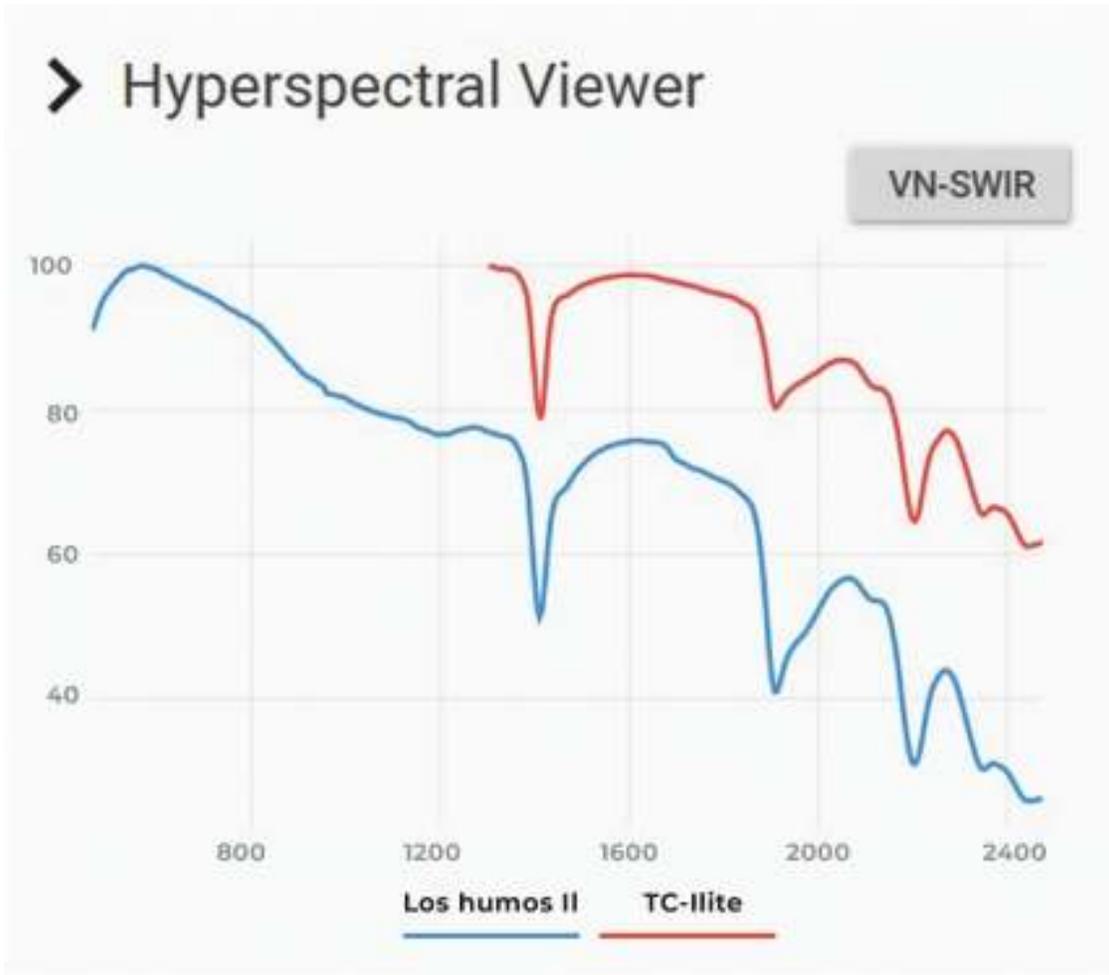


Figura C3. Mostrando espectro de mineralogías de biotita de las zonas de alteración del yacimiento Los Humos. II: Ilita, TC: TerraCore base de datos.

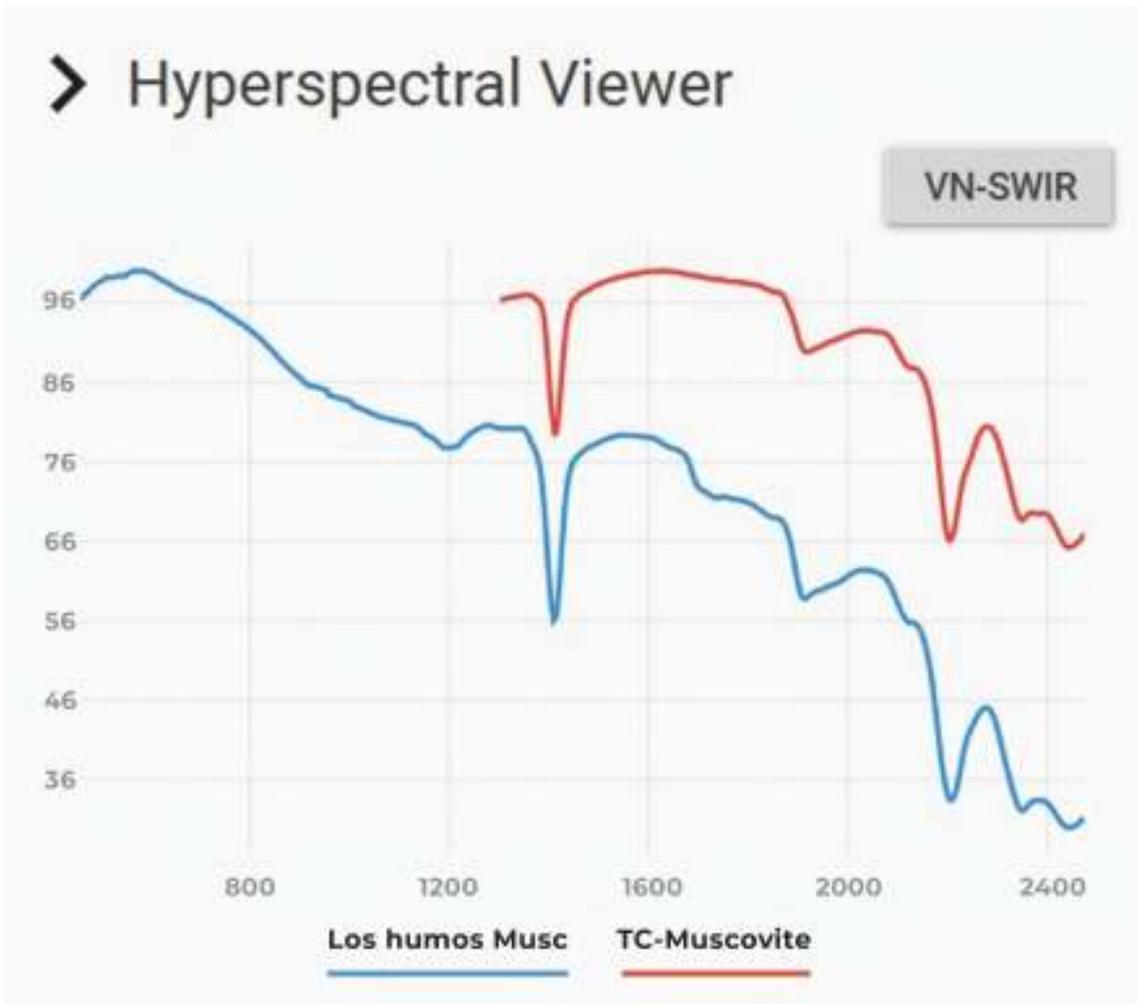


Figura C4. Mostrando espectro de mineralogías de biotita de las zonas de alteración del yacimiento Los Humos. Musc: muscovita, TC: TerraCore base de datos.

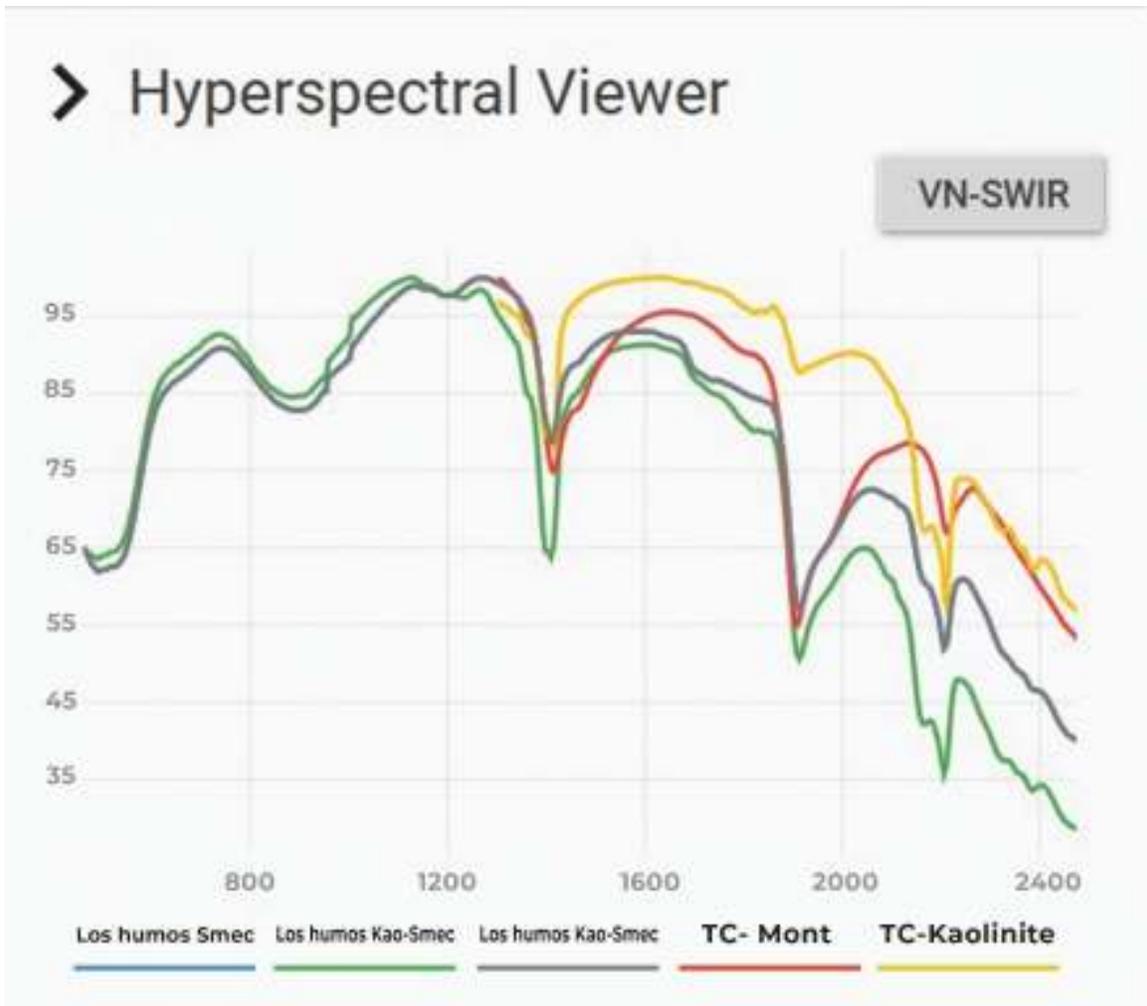


Figura C5. Mostrando espectro de mineralogías de biotita de las zonas de alteración del yacimiento Los Humos. Smec: esmectitas, Mont: montmorillonita, Kao: caolinita, TC: TerraCore base de datos.