



Alteración hidrotermal y geoquímica de metales en el domo Rupasca, Puna salteña

Natalia SALADO PAZ¹, Mirta Fátima QUIROGA¹, Albano FLORIDIA², Janet SARAPURA³ y Pamela TORRES CORREJIDOR²

¹ IBIGEO -Instituto de Bio y GeoCiencias del NOA- CONICET, Universidad Nacional de Salta.

² Facultad de Ciencias Naturales, Universidad Nacional de Salta.

³ Facultad de Ciencias Naturales e IML, Universidad Nacional de Tucumán.

Email: nataliasaladopaz@yahoo.com.ar

Editor: Pablo Caffè

Recibido: 29 de octubre de 2019

Aceptado: 15 de mayo de 2020

RESUMEN

El domo Rupasca se localiza en la provincia de Salta, Argentina. El domo se compone de rocas andesíticas a dacíticas con alteración hidrotermal de los tipos argílica avanzada (cuarzo-dickita-alunita-caolinita), fílica (illita-esmectita), silícica y propilítica (clorita-calcita). Esta alteración hidrotermal también afecta a unidades geológicas aledañas a la mineralización. Los metales más abundantes, determinados por fluorescencia de rayos X, corresponden a Cu en la zona central de las estructuras silicificadas; con Sb, Pb y Zn en las zonas más alejadas. En el área de estudio, se han observado dos cuerpos silicificados de tipo *ledges* con sulfuros diseminados de cobre. Este yacimiento hidrotermal presenta características asociadas a un sistema epitermal de alta sulfuración.

Palabras clave: alta sulfuración, sílice oquerosa, diseminados de cobre, Puna

ABSTRACT

Hydrothermal and geochemical alteration of metals in the Rupasca dome, Puna salteña.

The Rupasca dome is located in the Salta province, Argentina. The dome is composed by andesites and dacites with a hydrothermal alteration of the advanced argillic (quartz-dickite-alunite-kaolinite), phyllic (illite-smectite), silicic and propylitic (chlorite-calcite) associations. The hydrothermal alteration affects to the geological units surrounding the mineralization. The more abundant metals, determined by FRX correspond to Cu in the central zone of the silicified structures, with Sb, Pb and Zn in the distal areas. We observed two silicified structures of the ledges type with disseminated sulfides of copper. The hydrothermal ore deposit has characteristics linked with a high sulfidation epithermal system.

Keywords: high sulfidation, vuggy silica, disseminated copper, Puna

INTRODUCCIÓN

Durante el Mioceno temprano, en la provincia geológica de Puna se inicia una disminución de la inclinación de la zona de subducción, que fue acompañada por una expansión del arco hacia el antepaís (Kay et al. 1998). Dicha expansión es-

tuvo controlada por corredores preferenciales (Salfity et al. 1984) que definieron cadenas volcánicas de rumbo NO-SE, oblicuas al rumbo andino, caracterizadas por la presencia de estratovolcanes, calderas, domos y otros cuerpos subvolcánicos (Riller et al. 2001, Richards y Villeneuve 2001, Matteini et al. 2002). A esta intensa actividad magmática se le vinculan

los mayores episodios metalogenéticos con mineralizaciones económicas (Caffe 1999, Coira 1999, Sillitoe 2008, Chernicoff et al. 2002).

Los cuerpos dómicos corresponden a los aparatos volcánicos mineralizados más estudiados en los Andes Centrales por ser importantes alojadores de depósitos hidrotermales con metales de importancia económica (Sillitoe y Bonham 1984, Sillitoe 2008).

En este sector de la Puna, existen depósitos hidrotermales de metales bases y preciosos asociados al vulcanismo mioceno dacítico a andesítico que han sido explotadas en la década de 1930 y actualmente son objetivos de exploración tales como las conocidas minas: La Poma, Quevar, Concordia, Incachule, Acazoque, Organullo, Saturno y El Oculto (Sillitoe 1975, Viera 1976, Brodtkord et al. 1978, Argañaraz y Sureda 1979, *Japan International Cooperation Agency* 1993, Zappettini 1999, Salado Paz et al. 2016 a y b, 2017 y 2018) (Fig. 1). Muchos de estos depósitos minerales son hospedados en cuerpos dómicos ubicados en las cercanías de San Antonio de los Cobres, provincia de Salta. A pesar de constituir prospectos interesantes, poco se conoce de los modelos de mineralización y su vinculación al vulcanismo de los domos Concordia (Mina Concordia), Organullo (Minas Julio Verne y La Torca), Punta del Viento (Mina El Oculto) y Rupasca (Minas Tifullo y Luciano). Particularmente, el Domo Rupasca, objeto de este estudio, es actualmente explorado por diversas empresas, las cuales han citado manifestaciones de Cu diseminado (Tristán 2014) informadas como Minas Tifullo y Luciano (Terra Andina 2013) (Fig. 1 y 2).

En este estudio se pretende caracterizar la geología del área del domo Rupasca, definir los tipos de alteración hidrotermal y la asociación metalífera con el fin de diagnosticar una geoquímica prospectiva para el área, como así también aportar al modelo metalogenético del depósito. Así mismo, procuramos que el estudio pueda ser utilizado como herramienta de prospección y exploración tanto en la zona de estudio como en áreas con similitudes geológicas.

GEOLOGÍA REGIONAL

El área de estudio se ubica en la provincia geológica de Puna (Turner 1972) y en las cercanías del lineamiento regional Calama-Olacapato-Toro (Salfity et al. 1975, Mon 1976). El basamento está representado por la Formación Puncoviscana (Turner 1960) de edad Neoproterozoico-Cámbrico temprano (Aceñolaza y Aceñolaza 2005) (Fig. 1), que en la región de San Antonio de los Cobres se compone de pelitas,

areniscas, grauvacas y metacuarcitas con metamorfismo de bajo a medio grado que dio lugar a filitas, pizarras, grauvacas, esquistos y hornfels (Omarini 1983). Estas sedimentitas están intensamente deformadas representadas con diferentes estilos de plegamientos dependiendo de la competencia de la roca, y han sido interpretadas como depósitos de ambiente marino profundo (Omarini 1983).

El Paleozoico inferior (Fig. 1) está representado por un importante registro magmático que se distribuye a lo largo de la Faja Mágica de la Puna Oriental (Méndez et al. 1973, Suzaño et al. 2017, entre otros) o Complejo Eruptivo Oire (Turner 1960, Blasco et al. 1996). En el área de las quebradas de Tajamar, Cajón y Organullo, afloran rocas plutónicas de composición granodiorítica y pórfidos riódacíticos (Méndez et al. 1973, Omarini et al. 1984, Alonso y Viramonte 1987), así como rocas volcánicas atribuidas a la Formación Agua de Castilla (Blasco et al. 1996).

La secuencia proterozoica-paleozoica, está cubierta parcialmente por sucesiones sedimentarias continentales correspondientes al Grupo Salta (Turner 1960) de edad cretácica-paleocena (Fig.1). El Grupo Salta está restringido en exclusividad a la Puna Septentrional y tiene como límite estratigráfico-tectónico el lineamiento Calama Olacapato-Toro (Alonso et al. 1984). Particularmente, el Subgrupo Pirgua (Cretácico) es la unidad mejor expuesta al norte en el área de Mina Concordia y en las quebradas de Piedra Caída-Cajón (Vilela 1969, López et al. 2016).

El registro sedimentario del Cenozoico (Fig. 1) está representado por el Grupo Pastos Grandes (Turner 1960), que en la zona de estudio cubre a los afloramientos del Grupo Salta (Subgrupo Pirgua) (Blasco et al. 1996). El Grupo Pastos Grandes (Turner 1960) está representado por sedimentitas continentales constituidas por la Formaciones Geste y Sijes. La Formación Geste está constituida por conglomerados, areniscas y escasas pelitas, con intercalaciones de evaporitas que varían de grano grueso en la base a grano muy fino (Turner 1960). La Formación Sijes presenta afloramientos de arcilitas y limolitas de colores grisáceos, amarillentos, blanquecinos y verdosos, con intercalaciones piroclásticas (Turner 1960). Esta misma unidad termina con una secuencia de conglomerados y tufitas grises a verdosas, de edad eoceno medio - plioceno tardío (Alonso y Viramonte 1987).

El Cenozoico también se encuentra representado por un amplio registro de rocas volcánicas miocenas-pliocenas (Fig. 1) de composición dacítica a andesítica, con alto contenido en potasio. En el pulso magmático del Mioceno medio (15-10 Ma) al superior (7-3 Ma) de la Puna Central, la actividad volcánica estuvo dominada por la generación de calderas de

colapso (Aguas Calientes, Negra Muerta), estratovolcanes (Quevar, Chimpa) y domos subvolcánicos (Concordia, Morro, Organullo, Rupasca, Punta del Viento) (Petrinovic et al. 1999, Petrinovic et al. 2010).

El Domo Rupasca, objeto de este estudio, es parte de un complejo de domos subvolcánicos (Fig. 1) junto con los domos El Morro y Organullo, cuyas edades oscilan entre los 11.4 ± 0.3 y 13.5 ± 0.2 Ma (Ar/Ar en biotita) (Japan International Cooperation Agency 1993, Petrinovic et al. 1999). Estos cuerpos corresponden a domos exógenos con coladas dómicas de composición andesítica a dacítica asignados a la Formación Rumibola por Blasco et al. (1996). Ligados a estos eventos se reconocieron episodios volcánicos (Ignimbritas Morro I y Morro II) de edades $11.8-12 \pm 0.4$ Ma y 6.2 ± 0.3 Ma respectivamente (Petrinovic et al. 1999).

En el área, los últimos registros de actividad volcánica corresponden a los centros basálticos monogénicos de los cerros Los Gemelos, Rumibola, Negro de Chorrillos y San Jerónimo de 0.2 ± 0.08 Ma y 0.78 ± 0.1 Ma, respectivamente (Aqater 1980), ignimbritas riolíticas de 1.15 a 0.5 ± 0.1 Ma en el paraje Tocomar (Coira y Paris 1981, Petrinovic y Colombo 2006) e ignimbritas y coladas basálticas del volcán compuesto Tuzgle de 0.65 ± 0.18 Ma a 0.1 ± 0.1 Ma (Schwab y Lippolt 1974, Coira y Kay 1993).

El Cuaternario (Fig. 1) está representado por acumulaciones detríticas modernas de variable espesor, que se encuentran amplia y profundamente distribuidas en toda el área de estudio. En general son depósitos inconsolidados de granulometría muy variable que cubren depresiones formando abanicos aluviales o constituyen depósitos fluviales en los diversos valles (Blasco et al. 1996).

METODOLOGIA

Se tomaron 60 puntos de muestreo (rocas frescas, alteradas y *ledges*) y de observación, para estudios texturales de minerales secundarios de alteración y de mena por medio de lupa binocular y microscopio de polarización.

A partir de la selección de las muestras más representativas de superficie se confeccionaron 50 láminas delgadas. Las secciones fueron realizadas en el Laboratorio de Petrología y Mineralogía de la Universidad Nacional de Salta. Los estudios petrográficos se realizaron con el microscopio de polarización marca *Olympus BX51*, Escuela de Geología, Facultad de Ciencias Naturales, Universidad Nacional de Salta.

Se realizó la determinación de los minerales de alteración en 16 muestras de pastillas de roca, a través de estudios

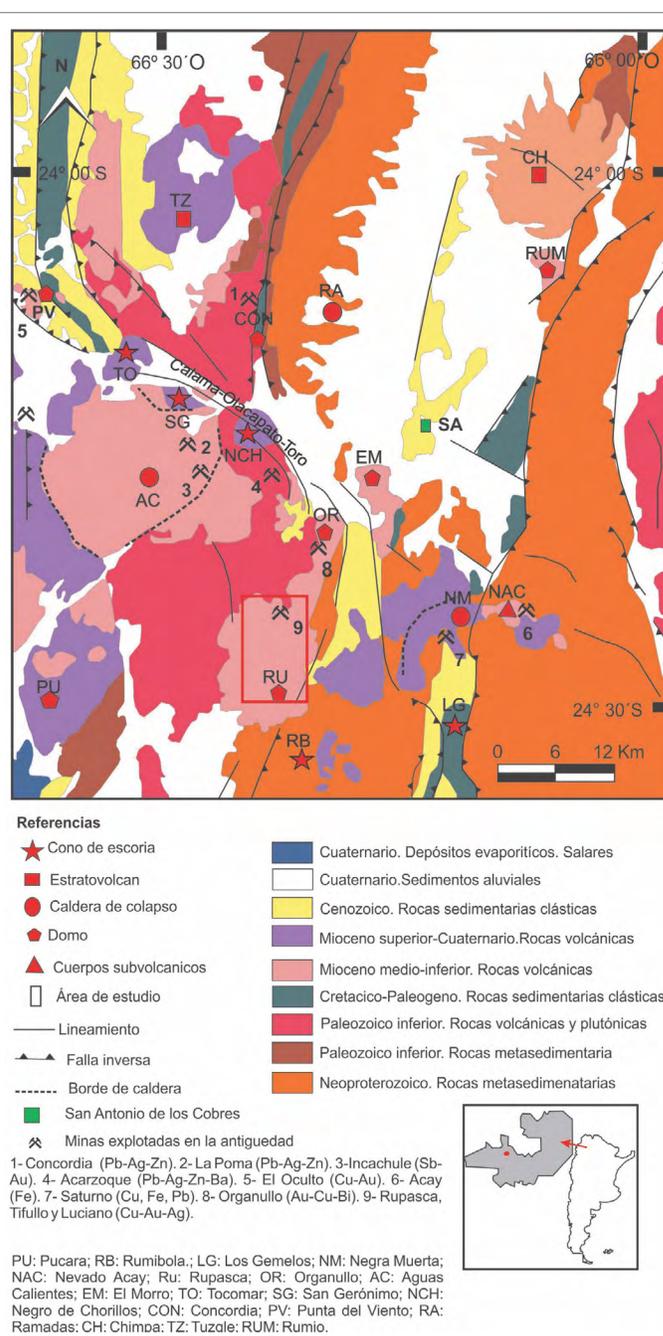


Figura 1. Mapa geológico regional (modificado de Blasco et al. 1996).

de espectrometría de reflectancia SWIR-VIR-NIS (*short-wave-length infrared, visible and near infrared*), con el espectrómetro portátil modelo *OreXpress*. Las lecturas fueron de espectro entre 350 y 2500 nm y resolución espectral de longitud de onda entre 3 y 8 nm. Las curvas de reflectancia fueron interpretadas con el software *Darwin SP v.1.3.5763 (Spectral evolution 2014)*, el cual identifica los minerales en una biblioteca espectral *Specmin (Spectral International Inc.)* mediante el método descrito en Pontual et al. (1997). El estudio mineralógico se realizó en Compañía Minera Don Nicolás.

Se realizó el análisis geoquímico cualitativo de 12 muestras de rocas alteradas del área de Rupasca, con el fin de determinar los elementos indicadores de la mineralización. El estudio se realizó utilizando un espectrómetro de fluorescencia de Rayos X manual, marca Niton cedido por la Compañía Minera Don Nicolás.

GEOLOGÍA LOCAL

Los afloramientos más antiguos de la región de estudio corresponden al Neoproterozoico y al Paleozoico inferior, representado por secuencias sedimentarias, volcánicas y volcano-sedimentarias.

El basamento neoproterozoico está representado por la Formación Puncoviscana (Turner 1960), compuesta principalmente por metaareniscas y subordinadamente metapelitas, que afloran en la intersección de las quebradas de Tuzgle y Organullo (Fig. 2).

Las secuencias sedimentarias paleozoicas fueron definidas como Formación Coquena (Blasco et al. 1996, Quiroga 2019), compuestas en su mayoría por metapelitas y en menor proporción metaareniscas y ortocuarcitas, que afloran en las quebradas de Tuzgle, Cajón y Organullo (Fig. 2). Las rocas volcánicas paleozoicas fueron descritas como Formación Agua de Castilla (Blasco et al. 1996) compuestas por tobas e ignimbritas soldadas intercaladas en la secuencia sedimentaria paleozoica. López et al. (2016) y Quiroga (2019) describieron, en las áreas de Cajón y Tuzgle, rocas volcánicas efusivas riolíticas asociadas mediante contactos gradacionales y netos a peperitas y hialoclastitas (Fig. 2).

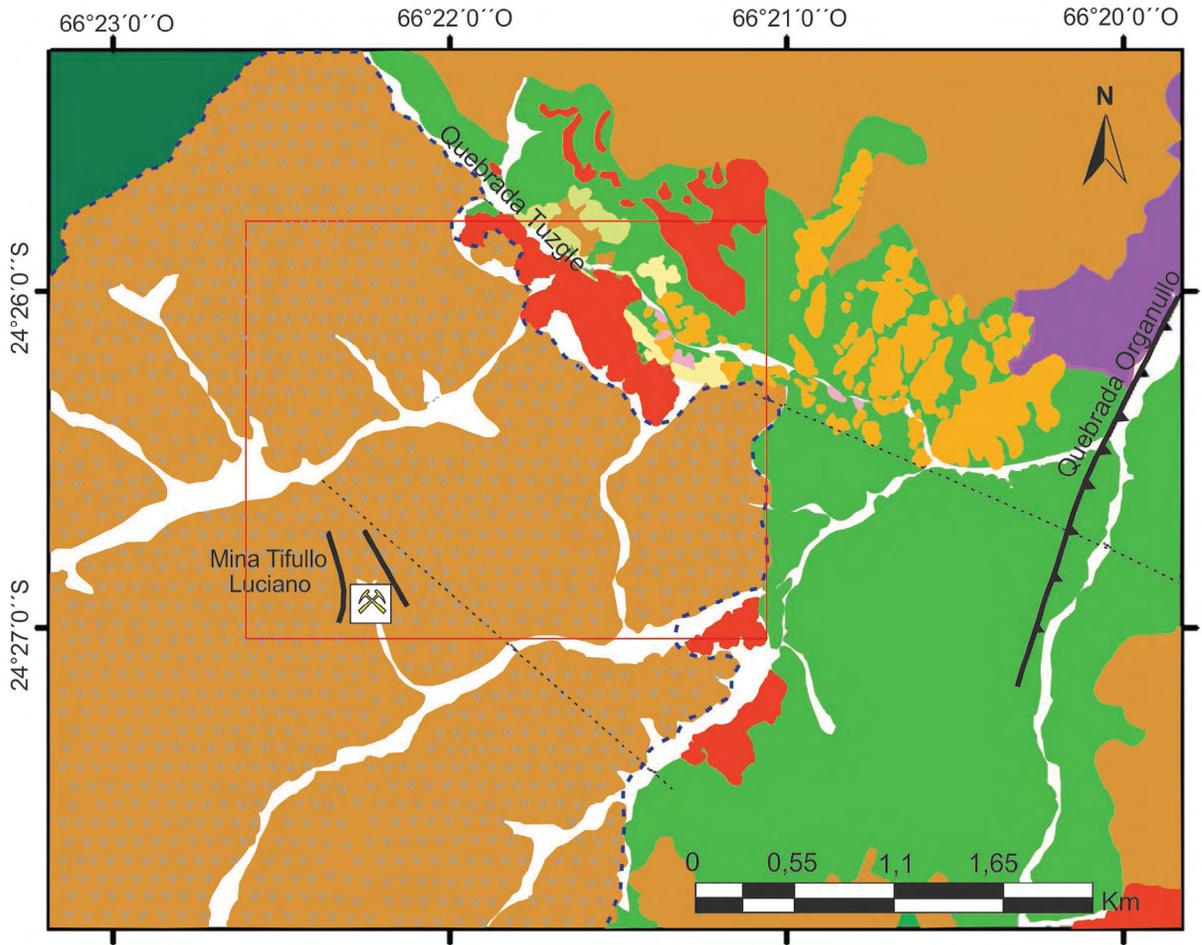
En el área de la quebrada de Tuzgle, cubriendo la secuencia sedimentaria y volcánica paleozoica y en contacto discordante, se observa un conglomerado polimíctico de aproximadamente 4 metros de espesor, clasto soportado y con matriz volcano-sedimentaria (Fig. 2). Los clastos son de cuarcita (5-30 cm, 20 %), metaareniscas (2-15 cm, 15 %), clastos de metapelitas (1-30 cm, 10 %) y clastos de riodacita (4-12 cm, 45 %). Este conglomerado no ha sido descrito previamente por lo que no posee nombre formacional.

El Mioceno Medio está representado por ignimbritas y lavas. Las ignimbritas corresponden a la Formación Ignimbrita Organullo (Petrinovic et al. 1999) que se presenta como pequeños afloramientos de color gris a verde azulado (Fig. 2). Esta ignimbrita tiene aproximadamente 25 m de espesor, aflora principalmente al oeste de la quebrada de Tuzgle y se apoya tanto sobre rocas volcánicas miocenas (lavas del domo Rupasca) como sobre sedimentitas ordovícicas. La Ignimbrita

Organullo está en la base laminada y en el techo es maciza y presenta fiamme con bajo contenido de cristales y fragmentos líticos. Los fiamme tienen tamaños menores a 8 cm, coloración blanquecina a gris clara, sin vesículas y son pobres en cristales. Los cristales son principalmente plagioclasa, biotita y cuarzo. Los fragmentos líticos corresponden a metapelitas ordovícicas y vulcanitas miocenas. Los líticos metapelíticos son de tamaños menores a 2 cm y de coloración ocre. Los líticos volcánicos tienen tamaños de hasta 12 cm, de color rojizo o grises, angulosos, con cristales de cuarzo y plagioclasa y matriz felsítica. La matriz de la Ignimbrita Organullo es vítrea, está alterada totalmente a illita, caolinita y en algunos sectores es reemplazada por clorita y calcita en forma de parches.

Las lavas del domo Rupasca forman parte de la Formación Rumibola (Blasco et al. 1996) y es la roca de caja de la mineralización de la zona de estudio. El domo Rupasca posee una forma sub-circular (elongado en sentido E-O), de aproximadamente 15 Km de diámetro en su sector más ancho (Fig. 1). Algunos autores lo representan como dos grandes cuerpos (Blasco et al. 1996), mientras que otros lo representan con una forma alargada continua desde el área del domo Organullo (Petrinovic et al. 1999). En este trabajo, el límite del domo Rupasca queda comprendido por su morfología subcircular (Fig. 1) y restringido al área de estudio e inmediaciones en el que se pudo observar similitudes texturales y composicionales (Fig. 1 y 2). Las lavas del domo Rupasca son rocas coherentes de color gris oscuro a rojizo, de composiciones andesíticas principalmente con variantes dacíticas menos abundantes, textura porfídica (Fig. 2 y 3a) y estructura maciza y bandeada por flujo magmático (Fig. 3b). La roca está compuesta por fenocristales de plagioclasa, biotita y hornblenda en una matriz de color gris oscuro (Fig. 3c). Esta unidad presenta coloraciones blanquecinas y amarillentas (Fig. 3d y 3e) por causa de alteraciones posteriores al emplazamiento que serán descritas en la próxima sección.

En el sector oeste de la quebrada de Tuzgle, los afloramientos de las lavas del domo Rupasca están brechados (Fig. 3f) y constituidos por clastos andesíticos cementados por ópalo hidrotermal. Estas brechas son monolitológicas, matriz soportadas, compuesta por clastos que poseen tamaños variables de 7 cm a 1.5 cm y formas angulosas. La matriz corresponde a pequeños fragmentos de andesita con tamaños entre 2 mm y 1.7 mm. También se observa en la zona de mineralización que las brechas están cementadas por cuarzo cristalino (Fig. 3g) y en sectores tienen alteración argílica con una matriz de caolinita (Fig. 3h).



Referencias

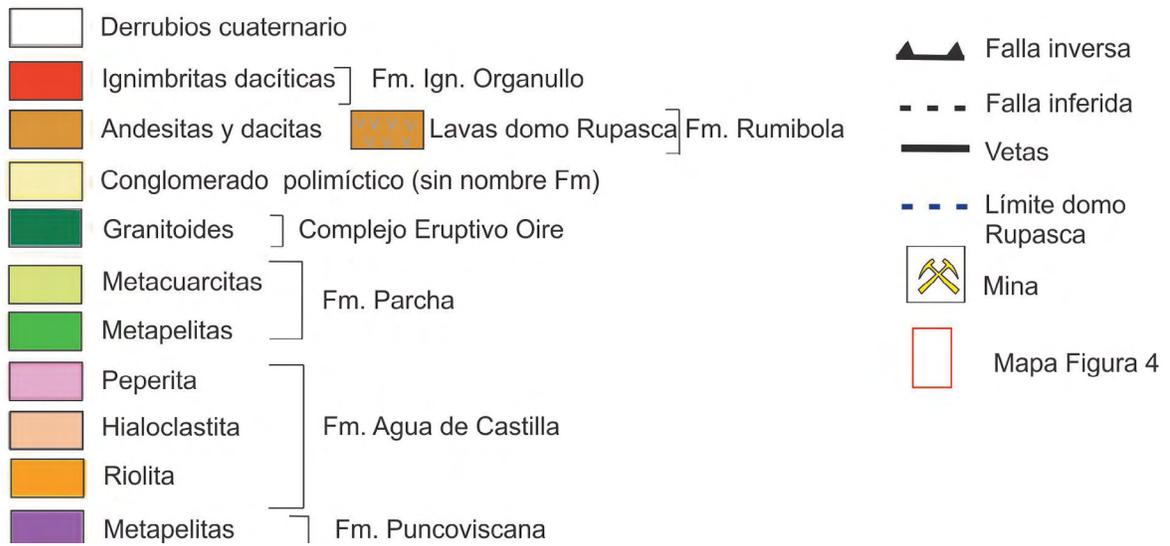


Figura 2. Mapa geológico de la zona de estudio



Figura 3. Afloramientos. a) Andesitas del domo Rupasca. b) Andesita con textura bandeada por flujo. c) Detalle de las andesitas con textura porfídica. d) Andesitas del domo Rupasca con colores ocre y amarillos por alteración hidrotermal. e) Andesitas del domo Rupasca de color blanco por alteración hidrotermal. f) Brecha hidrotermal conformada por clastos de andesitas cementados por ópalo. g) Brecha hidrotermal conformada por clastos andesíticos cementados por cuarzo cristalino. h) Brecha hidrotermal con matriz arcillosa tipo caolinita.

ALTERACIONES HIDROTERMALES

Se identificó alteración hidrotermal del tipo propilítica, filica, argílica avanzada y silíceo (Fig. 4), las cuales afectan a unidades geológicas paleozoicas y miocenas: Coquena, Agua de Castilla, Ignimbrita Organullo y las lavas del domo Rupasca. También se identificó en menor abundancia alteración argílica supérgena. A continuación se describe cada una de las alteraciones:

Alteración propilítica

Afecta a las rocas de la Ignimbrita Organullo y las lavas del domo Rupasca. Las rocas de la Ignimbrita Organullo que presentan alteración se encuentran en el sector oeste y centro de la quebrada de Tuzgle. A escala de afloramiento se observa una roca de color amarillento a verde claro. A escala microscópica se observan cristales de plagioclasa, biotita y hornblenda alterados. Los fenocristales de plagioclasa presentan alteración parcial a calcita y clorita (Fig. 5a). En algunos casos se observa clorita alrededor de los cristales de plagioclasa (Fig. 5a). Otros cristales se encuentran totalmente reemplazados por calcita quedando solo relictos de los mismos. Los cristales de biotita y hornblenda están parcial a totalmente reemplazados por clorita (Fig. 5b). La matriz de la roca en general está alterada a calcita, clorita y caolinita en parches de tamaños y formas irregulares.

La alteración de la Ignimbrita Organullo es de intensidad moderada, con estilo selectivo, con predominancia de calcita, clorita y caolinita. El reemplazo selectivo se observa en cris-

tales de plagioclasa por calcita y en menor proporción clorita y caolinita, y en cristales de biotita y hornblenda por clorita.

Las lavas del domo Rupasca con alteración propilítica se encuentran en las zonas periféricas del halo de alteración argílica, según se muestra en la figura 4. A escala microscópica se observan fenocristales de plagioclasa, biotita y hornblenda alterados parcialmente. Algunas plagioclasas presentan alteración parcial a calcita, caolinita e illita, afectando en forma diferencial las diferentes zonaciones del cristal. En algunos bordes de cristales de plagioclasa se observa clorita. La biotita se encuentra alterada parcial a totalmente por clorita, illita y óxidos de hierro. La hornblenda se encuentra parcial a totalmente reemplazada por minerales del grupo del epidoto (epidoto, zoicita) (Fig. 5c). La hornblenda también presenta alteración a óxidos de hierro en sus bordes. La pasta volcánica se encuentra en la mayoría de las muestras reemplazada por calcita y/o clorita formando parches anhedral y caolinita.

La alteración del domo Rupasca es de intensidad leve a moderada, con estilo selectivo, con predominancia de clorita, calcita, epidoto e illita. El reemplazo selectivo se observa en cristales de plagioclasa por calcita, clorita y caolinita, los de biotita por clorita e illita y en los cristales de hornblenda por epidoto.

Alteración filica

Afecta a las rocas sedimentarias (Formación Coquena) y volcánicas (Formación Agua de Castilla) del Paleozoico inferior, el conglomerado polimíctico de la quebrada de Tuzgle y a las lavas del domo Rupasca del Mioceno (Fig. 4).

Las rocas del Paleozoico inferior afectadas por la alteración hidrotermal, corresponden a sedimentitas y brechas au-

toclásticas (peperitas y hialoclastitas). Estas rocas afloran en el centro de la quebrada de Tuzgle, con colores blanquecino, amarillo y/o marrón (Fig. 4). También se encuentran afectadas por esta alteración el conglomerado polimíctico descrito previamente y que aflora en la quebrada de Tuzgle (Fig. 2).

Microscópicamente las sedimentitas ordovícicas corresponden a metapelitas alteradas con cristales de cuarzo, illita y caolinita. La illita se dispone en estructura foliada (Fig. 5d).

Las brechas autoclásticas presentan alteración en los clastos y en la matriz. Los clastos corresponden a riolitas con fenocristales de biotita y plagioclasa alterados a illita y una pasta microcristalina de cuarzo e illita (Fig. 5e). La matriz de las brechas posee illita, cuarzo y caolinita y en menor medida óxidos de hierro (Fig. 5f).

La alteración de las rocas paleozoicas es moderada a fuerte, penetrativa, con minerales como illita, caolinita, cuarzo secundario y óxidos de hierro.

El conglomerado polimíctico presenta alteración en los fragmentos líticos de metapelitas y en la matriz (Fig. 4). Microscópicamente las metapelitas y la matriz están reemplazados por illita y óxidos de hierro (Fig. 5g).

La alteración del conglomerado es moderada a fuerte, penetrativa con illita y cuarzo como minerales neoformados.

Las rocas volcánicas miocenas pertenecientes a las lavas del domo Rupasca, presentan afloramientos en la zona occidental y central de la quebrada de Tuzgle (Fig. 4). Microscópicamente los fenocristales y la pasta volcánica se encuentran alterados a illita, cuarzo y caolinita. La biotita se encuentra parcial a totalmente reemplazada por illita y óxidos de hierro (Fig. 5h). La plagioclasa se encuentra parcial a totalmente alterada a illita y caolinita (Fig. 5i). La hornblenda presenta secciones basales reemplazadas por óxidos de hierro.

La alteración de estas lavas es de intensidad moderada a fuerte de tipo penetrativa, con illita, cuarzo secundario y óxidos de hierro.

Mediante el estudio de muestras por espectrometría de reflectancia, se determinó la presencia de illita y esmectita en muestras del basamento ordovícico alterado (sedimentitas y brechas autoclásticas). Según este estudio, las illitas corresponden a composiciones tipo fengíticas y paragoníticas, con algunas illitas puras ricas en potasio. También se ha observado illitas con amonio en muestras afectadas por esta alteración. Las illitas determinadas mediante este análisis presentan una alta cristalinidad con amonio puro (Fig. 4).

Alteración argílica avanzada

Afecta a las lavas del domo Rupasca, principalmente en las zonas cercanas a la Mina Tifullo (Fig. 4). A escala de

afloramiento las rocas se muestran de colores blanquecinos, amarillentos o pardos, por lo general con una delgada capa superficial de oxidación de color ocre, de aspecto terroso. En algunos sectores se observan venillas de alunita y jarosita de pocos milímetros de espesor. Microscópicamente se observa una roca con intensa alteración, donde la textura, estructura y mineralogía original han sido, en la mayoría de los casos, intensamente modificadas dificultando su reconocimiento. En algunos casos es posible distinguir una textura porfídica seriada. También se observa sílice oquerosa por lixiviación total de cristales en esta roca. Los minerales primarios que se pudieron reconocer son plagioclasa y biotita. Los fenocristales de plagioclasa se encuentran parcial a totalmente reemplazados por caolinita y alunita (Fig. 5j). Los fenocristales de biotita se encuentran parcial a totalmente alterados a illita y óxidos de hierro. La pasta volcánica se encuentra totalmente reemplazada por caolinita de forma granular, alunita, cuarzo, jarosita y óxidos de hierro. La alunita es de grano fino de formas subhedrales, hábito tabular, con tamaños menores a 0.2 mm y por sectores reemplaza selectivamente a fenocristales de feldespatos (Fig. 5j). El cuarzo secundario es de grano fino, subhedral, con tamaños menores a 0,1 mm, con contactos de tipo sutura. Los cristales de jarosita son de formas anhedrales, de tamaños menores a 0.1 mm. Los óxidos de hierro forman parches de tamaños y formas irregulares (Fig. 5k).

La alteración argílica avanzada de las lavas del domo Rupasca es de intensidad fuerte, de estilo penetrativo, sin reemplazo selectivo de los minerales, con alunita, caolinita, cuarzo secundario, jarosita y óxidos de hierro.

Mediante el análisis espectral, se determinó que esta alteración está compuesta por alunita rica en potasio y dickita como minerales más abundantes, junto con caolinita, jarosita, goethita y hematita en menor abundancia (Fig. 4).

Alteración silícica

Afecta a las lavas del domo Rupasca pasando lateralmente a alteración argílica (Fig. 4). A escala de afloramiento se observa una roca de color ocre, de aspecto terroso con oquedades de hasta 1 cm de formas irregulares. Microscópicamente se observa una roca de textura porfídica seriada, totalmente reemplazada por cuarzo secundario, y en menor abundancia alunita de grano fino (Fig. 5l). También se observan parches de óxidos de hierro de formas anhedrales y de diversos tamaños. La roca presenta oquedades anhedrales y otras pseudomórficas. La pasta volcánica se encuentra totalmente reemplazada por cuarzo secundario con tamaños menores a 0,3 mm, con formas subhedrales y con contactos de tipo sutura (Fig. 5l). Este tipo de alteración de las lavas del

domo Rupasca es de intensidad fuerte, de estilo penetrativo, sin reemplazo selectivo de los minerales originales, con abundancia de cuarzo secundario, alunita y óxidos de hierro.

Alteración supérgena

A escala de afloramiento, se observan algunos sectores donde las lavas del domo Rupasca muestran colores verdes de aspecto terroso. Corresponden a pátinas de cobre las cuales están asociadas a costras de ópalo, caolinita y alunita de grano muy fino (Fig. 4).

MINERALIZACIÓN

Asociada a la alteración hidrotermal, en la zona de la Mina Tífulo y Luciano (Fig. 2), se observan a escala de afloramiento dos estructuras tipo *ledge* de espesores de entre 70 cm a 1.5 m y de 150 a 177 m de longitud. Estos cuerpos poseen rumbo N60°O a N30°O e inclinación de 65° hacia el SO (Fig. 6a).

Las estructuras corresponden a fracturas silicificadas, caracterizadas por texturas de lixiviación ácida (Fig. 6b) y recristalización de cuarzo masivo (Fig. 6c) que gradúa hacia los laterales a texturas compuestas por óxidos de hierro bandeadas (Fig. 6d). Esta silicificación gradúa transicionalmente a la alteración argílica avanzada. Asociada a la textura oquerosa se observan finos sulfuros diseminados, pirita y calcopirita principalmente.

GEOQUÍMICA DE METALES

A partir de los datos adquiridos mediante fluorescencia de rayos X, se determinó la presencia de elementos traza, mayoritarios y minoritarios en muestras pertenecientes al domo Rupasca y muestras del basamento ordovícico indiferenciado (Cuadro 1). Las muestras seleccionadas para este análisis corresponden a muestras con alteración filíca y argílica avanzada. Para interpretar los datos se realizaron diagramas geoquímicos binarios y ternarios de metales y de algunos elementos mayoritarios.

Los metales presentes corresponden a Mo, W, Cu, Sn, Pb, Ag, Zn, Sb y As. En líneas generales, la concentración de estos elementos varía según la muestra y su proximidad a la zona mineralizada principal (Fig. 4). Se observa que las concentraciones de Mo para las rocas con alteración filíca y argílica, al igual que la concentración de Cu, son homogéneas con excepción a una muestra que se aleja del resto (Fig. 7a). No se observa distribución lineal en el gráfico para estos elementos (Fig. 7a). Con respecto al Sn-Co y Sb-As se observa que las muestras con alteración argílica y filíca poseen concentraciones homogéneas con excepción a una muestra de alteración argílica (P 57 d) que presenta incrementos variables en todos los casos (Fig. 7b y c).

Con respecto a los metales bases, las concentraciones también son homogéneas para Pb-Zn, Pb-Cu y Ag-Hg con ex-

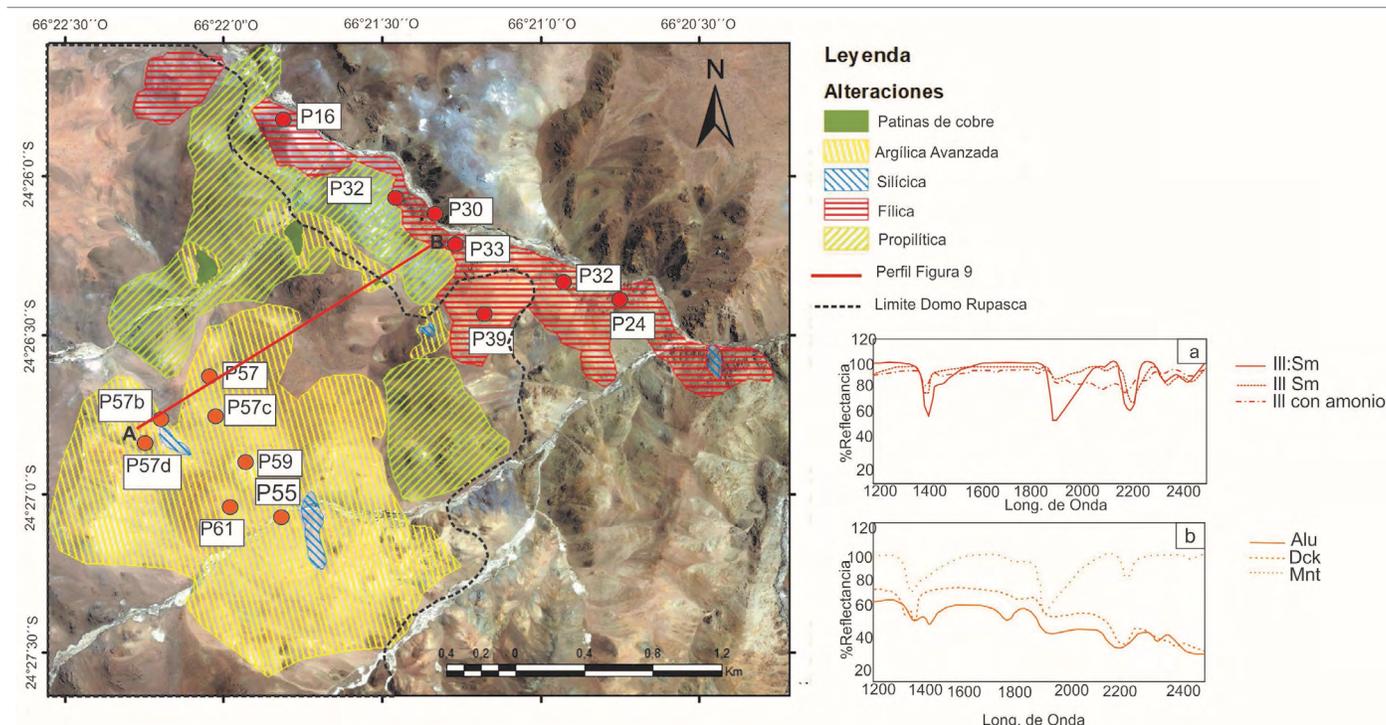


Figura 4. Mapa de distribución de las alteraciones hidrotermales y sus respectivos espectros de SWIR-VIR-NIS para las alteraciones filíca y argílica avanzada.

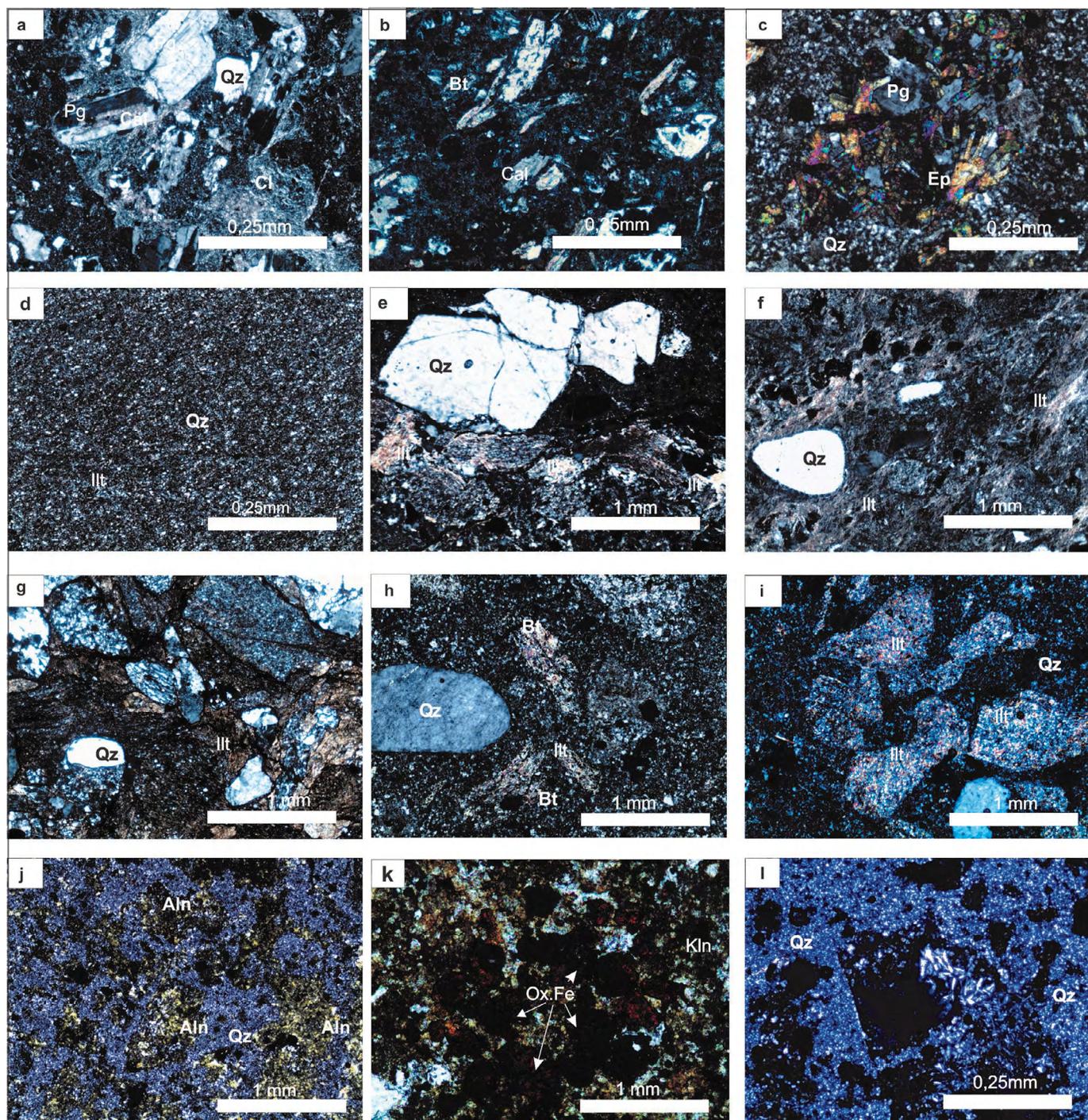


Figura 5. Microfotografías petrográficas de: a) Alteración propilítica en Ignimbrita Organullo a nicoles cruzados, a 4X. b) Alteración propilítica en andesitas del domo Rupasca a nicoles cruzados, a 4X. c) Alteración filica de clastos de riolita en peperita a nicoles cruzados, a 4X. d) Alteración filica en metapelítica a nicoles cruzados, a 4X. e) Lítico volcánico de brecha autoclástica con alteración filica a nicoles cruzados, a 2X. f) Matriz de brecha autoclástica ordovícica con alteración filica, a nicoles cruzados, a 2X. g) Conglomerado polimítico con alteración filica, a nicoles cruzados, a 2X. h-i) Andesita del domo Rupasca con alteración filica, a nicoles cruzados, a 2X. j) Andesitas del domo Rupasca con alteración argílica avanzada, a nicoles cruzados, a 2X. k) Andesitas del domo Rupasca con alteración argílica avanzada, óxidos de hierro, a nicoles cruzados, a 4X. l) Andesitas del domo Rupasca con alteración silícica, a nicoles cruzados, a 2X. Ref: Qz: cuarzo; Bt: biotita; Illt: illita; Pg: plagioclasas; Ep: epidoto; Cal: calcita; Cl: clorita; Aln: alunita; Ox.Fe: óxidos de hierro.

cepción a una muestra correspondiente a la alteración filica (P 24) que presenta incrementos en Pb, Cu y Hg. Se destaca que esta muestra (P 24) aflora en la quebrada Tuzgle (Fig. 7d-f).

Con el fin de observar la relación entre los elementos Pb-Ag-Zn, Pb-Zn-Cu y Sb-As-Cu, se realizaron gráficos triangulares de elementos. Para el diagrama de Ag-Pb-Zn se obser-

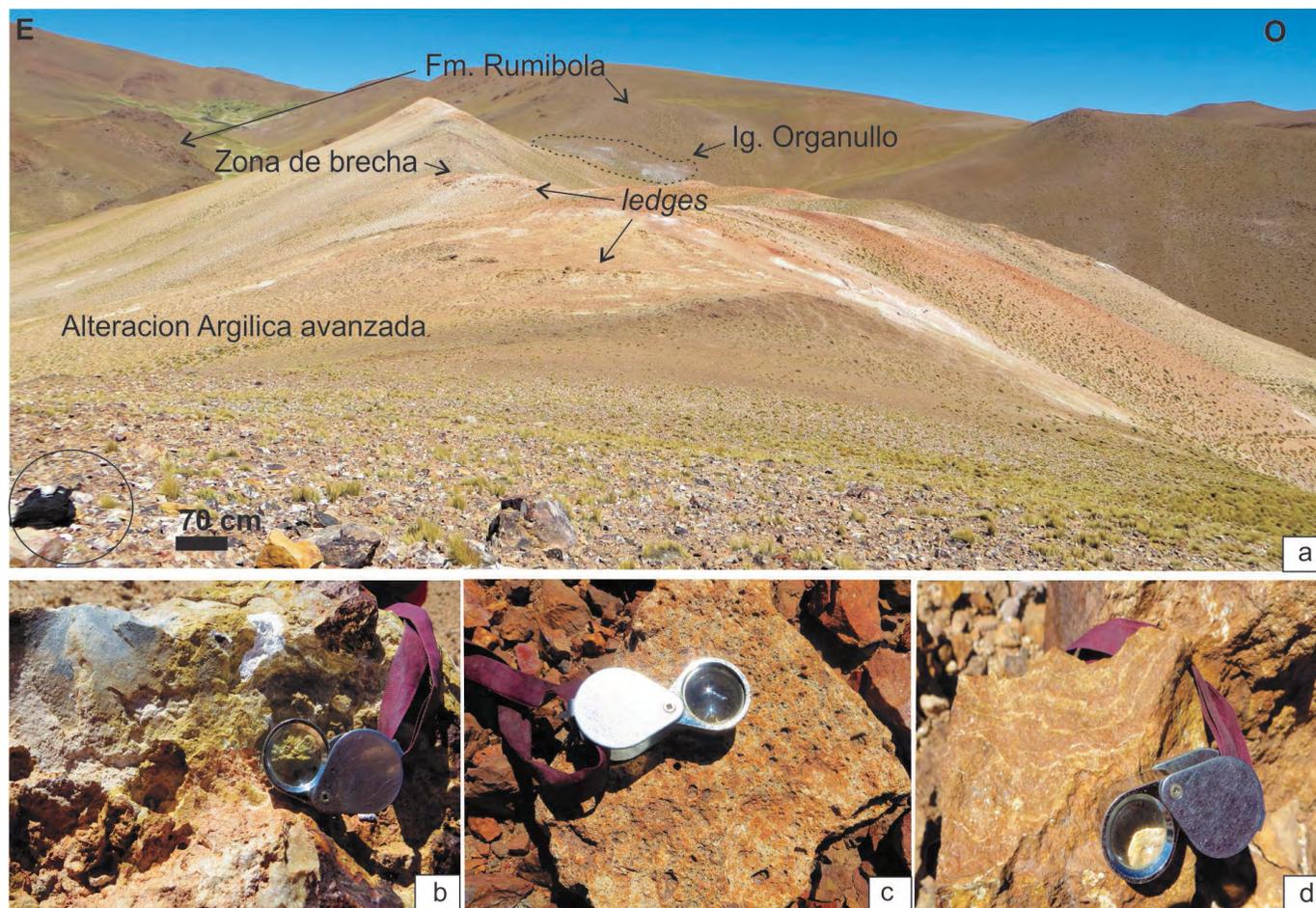


Figura 6. Afloramientos de los *ledges* en el área de estudio. b) Detalle de los *ledges* con textura masiva. c) Textura de sílice oquerosa. d) Presencia de óxidos de hierro bandeados en los *ledges*.

va que las concentraciones de los elementos son similares con excepción de la muestra Pto59 con alteración argílica que posee más Ag en relación con las concentraciones de Zn y Pb (Fig. 8a). Se observa que para el caso del diagrama Pb-Cu-Zn, la concentración de los elementos tanto para la alteración filica y argílica es similar, homogénea, con la salvedad de dos muestras con alteración filica (P39 y P24) que son más enriquecidas en plomo (Fig. 8b). Para el diagrama de As-Sb-Cu se observa una amplia dispersión de las muestras con valores que varían tanto para las muestras de alteración filica como para las de alteración argílica (Fig. 8c).

DISCUSION

En este trabajo se ha determinado que rocas sedimentarias y volcánicas tanto ordovícicas (Formaciones Coquena y Agua de Castilla), post-ordovícicas? (conglomerado polimíctico) y miocenas (lavas del domo Rupasca e Ignimbrita Organullo) son afectadas por fluidos hidrotermales. En este

sentido, estas unidades geológicas presentan alteraciones del tipo argílica avanzada, filica, silícica y en menor medida propilítica. Sin embargo, la alteración vinculada a la presencia de sulfuros se aloja en la roca andesítica del domo Rupasca.

En el área de estudio, se observa una zonación conformada por un núcleo de silicificación rodeado de alteración argílica avanzada, un halo de alteración filica sectorizado en la quebrada de Tuzgle y un halo externo propilítico (Figs. 4 y 9).

La asociación mineral para la alteración argílica avanzada está compuesta por dickita, alunita y caolinita. Esta asociación indicaría temperaturas aproximadas a 200 °C (Inoue 1995) debido a que la presencia de caolinita designa temperaturas entre 100 a 200 °C, la dickita denota temperaturas entre 200 a >300 °C (Inoue 1995) y la alunita posee un rango extenso de formación con temperaturas entre 50 a 250 °C (Utada 1980).

Para la alteración filica, la asociación observada en este trabajo está compuesta por illita-esmectita que indicaría temperaturas aproximadas entre 120 a 200 °C (Pollastro 1993, Inoue 1995). También se observaron cristales de illita, que se asignan a temperaturas de formación entre 200 °C a >300

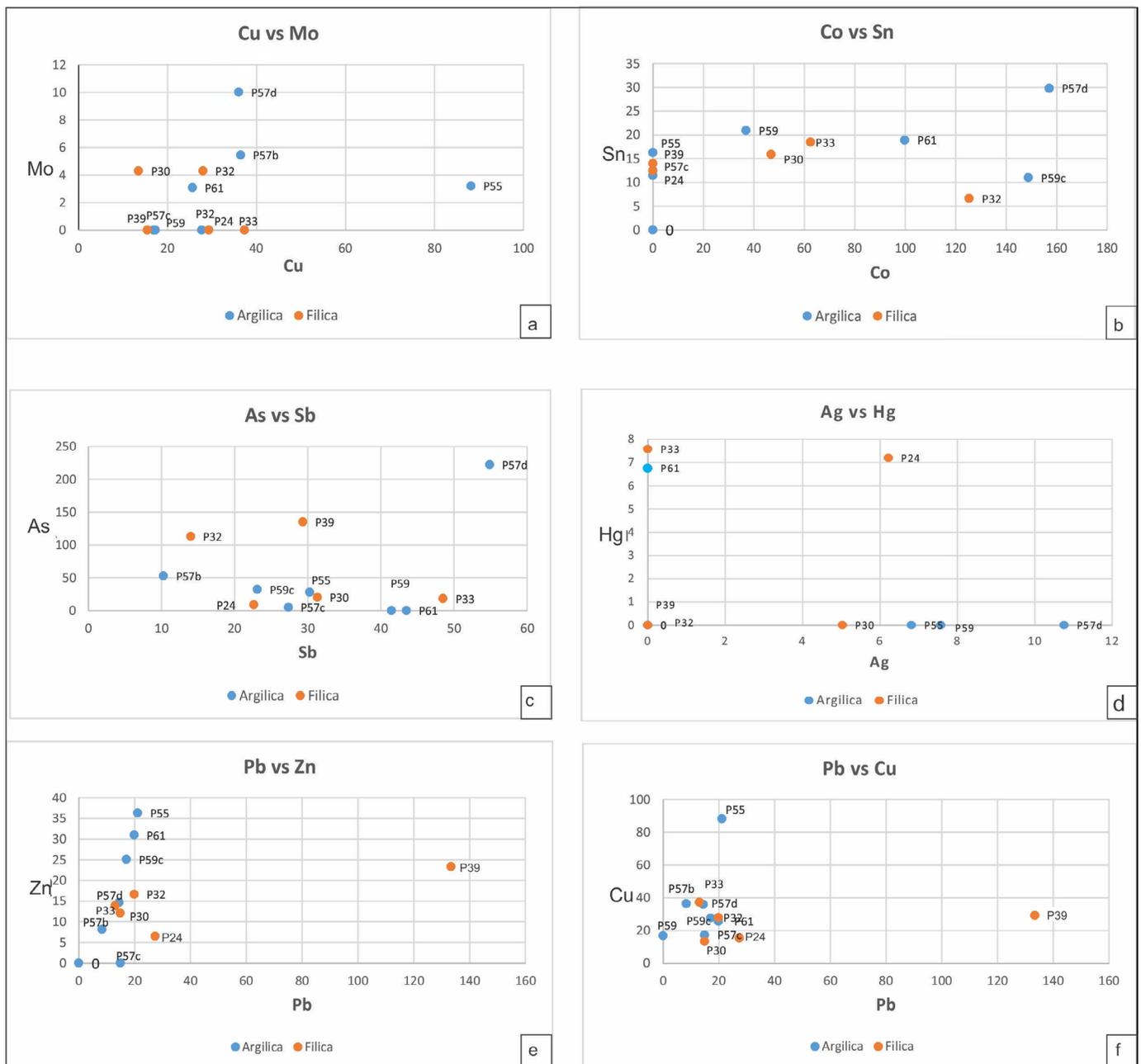


Figura 7. Diagramas binarios de metales bases y preciosos. a) Cu vs Mo. b) Co vs Sn. c) As vs Sb. d) Ag vs Hg. e) Pb vs Zn. f) Pb vs Cu.

°C (Inoue 1995). En este sentido, el rango de temperatura de la alteración filica quedaría definido según la abundancia de estos componentes (illita-esmectita vs illita), lo que no ha sido posible determinar en este estudio.

Del mismo modo para las zonas de alteración propilítica, se determinó calcita, epidoto y clorita, que indicarían temperaturas aproximadas de 220 °C (Inoue 1995).

Los minerales determinados por el método de espectrometría de reflectancia VIS-NIR-SWIR corresponden a asociaciones típicas de alteración argílica avanzada (dickita, alunita rica en potasio y caolinita) y filica (illita fengítica, paragonita,

esmectita, cuarzo) (Pirajno 1992, Simmons y Browne 1998, Hedenquist et al. 2000) (Figs. 4 y 9).

Si bien las alteraciones argílicas avanzadas pueden tener diferentes orígenes (Hedenquist et al. 2000), el desarrollo de sílice oquerosa y la presencia de sulfuros de hierro (como piritita y calcopiritita), sugieren una alteración argílica avanzada vinculada a volátiles magmáticos (Figs. 9 y 10). Esta alteración sería generada por la presencia de gases magmáticos hipogénicos tales como HCl, SO₂ y HF relacionados al magmatismo del domo Rupasca. La disociación de las especies ácidas dominantes HCl y H₂SO₄ ocurre aproximadamente

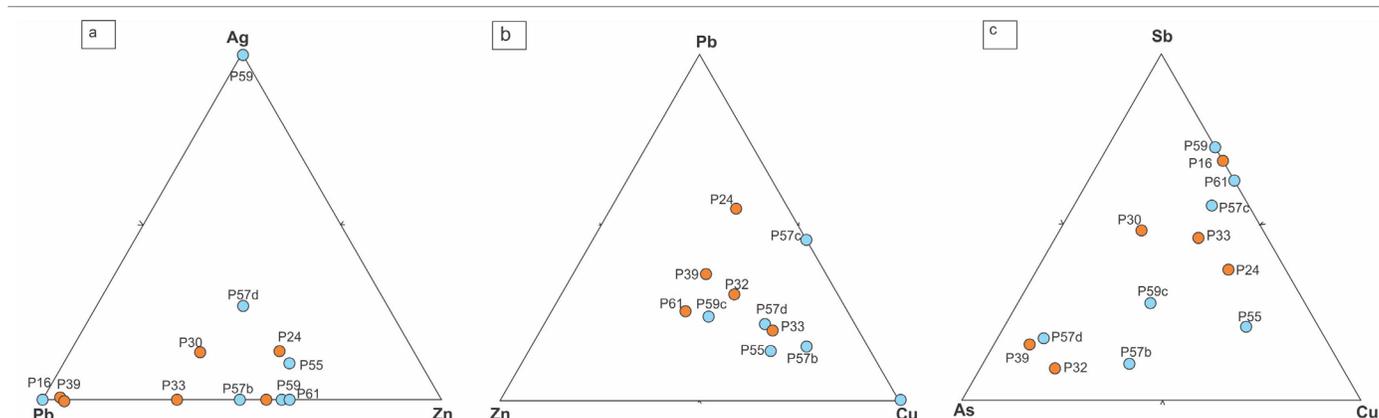


Figura 8. Diagramas ternarios de concentraciones de metales. a) Pb-Ag-Zn. b) Pb-Zn-Cu. c) Sb-As-Cu.

entre 300° a 350°C posterior a la absorción del vapor magmático por el agua subterránea (Hedenquist et al. 2000) como ilustra la figura 10. Este proceso resulta en el desarrollo hipogénico de aguas clorhídricas - sulfúricas con pH aproximadamente igual a 1, suficientemente ácido para lixiviar muchos componentes incluyendo el Al de la roca. Esta lixiviación deja sílice residual con recristalización de cuarzo y textura oquerosa (Figs. 5l y 6c), y también forma la alteración argílica avanzada típica de los litocaps de los depósitos de alta sulfuración tales como alunita-dickita-pirofilita (Hedenquist et al. 2000). Posiblemente, los sectores con alteración argílica (con cuarzo opalino junto con alunita de grano fino) que se encuentran en posiciones distales con respecto al halo principal, junto con las costras de cobre secundario, se hayan producido en condiciones supérgenas (Fig. 10). Estas zonas son subhorizontales controladas por el paleonivel freático (Fig. 10) (Hedenquist et al. 2000, Sillitoe 2015). Las zonas más alejadas afectadas por alteración filica se determinó illita-esmectita e illita con amonio. El amonio es un indicador de la presencia de metales preciosos y es una herramienta de prospección usada como elemento trazador de Ag (Ridgway et al. 1990).

Las observaciones de este trabajo permitieron determinar en la zona de alteración argílica avanzada, *ledge* de sílice oquerosa (Figs. 6 y 9) con mineralización diseminada y cuerpos de brechas hidrotermales (Fig. 6a y 9). Las estructuras tipo *ledge*, corresponden a una primera etapa de alteración hidrotermal de los depósitos de alta sulfuración (Corbett y Leach 1997). La mineralización escasa, con sulfuros diseminados presentes en tamaños menores a 2 mm, compuesta por pirita y calcopirita, podría corresponder al inicio de la segunda etapa de estos sistemas. La presencia de cuerpos de brechas hidrotermales indicaría fracturas que permitieron la circulación del fluido hidrotermal (Fig. 9). No

se observaron sulfuros asociados a estas brechas por lo que se aconseja a futuro estudiar en detalle estas estructuras.

Los metales más abundantes, determinados por fluorescencia de rayos X, corresponden a Cu en la zona central, con Sb, Pb, Zn en las zonas más alejadas de las estructuras silicificadas. La presencia de estos metales se corresponde con minerales como pirita y calcopirita encontrados en el área de estudio. No se han observado otros sulfuros a escala superficial, no obstante la presencia de las anomalías metalíferas (Sb, As y Pb) halladas indicarían la probable existencia de otros sulfuros como luzonita, galena, esfalerita.

Con respecto a los metales preciosos, solo se determinó Ag en algunas muestras (P57d, P59, P55, P30 y P24), sin embargo los contenidos son bajos, hasta 11 ppm. El Au podría encontrarse en cantidades menores, en valores de ppb, y no fueron determinados por la técnica aplicada ya que se encuentra con valores debajo del límite de detección en ppm (Cuadro 1).

Los elementos trazas tales como Sn y Mo aparecen en muy bajas concentraciones (menor a 20 ppm), al igual que Hg; sin embargo su presencia, por corresponder a elementos trazadores de mineralización en metales preciosos, es muy auspiciosa para la prospección. La determinación de Hg en muestras alejadas a la zona silicificada, podría indicar un paleonivel freático y corresponder con zonas distales a la fuente alimentadora de fluidos hidrotermales según Hedenquist et al. (2000).

Por otro lado, en el análisis de la concentración de los diferentes elementos en las alteraciones filica y argílica, se puede observar, en general, que los elementos presentan concentraciones homogéneas. Esto nos permite interpretar que forman parte de un mismo evento de precipitación de fluidos hidrotermales, asociado al sistema de generación de *ledges* de sílice oquerosa.

Cuadro 1. Resultados de los análisis de fluorescencia de rayos X sobre pastillas de roca.

| MUESTRA | Unidad | Alteración | Mo | Mo Error | Pb | Pb Error | As | As Error | Hg | Hg Error | Zn | Zn Error |
|---------|---------------------|-------------------|-------|----------|-------|----------|-------|----------|------|----------|-------|----------|
| P61 | Andesita | Argílica Avanzada | 3.08 | 1.74 | 19.83 | 3.36 | <LOD | 3.89 | 6.75 | 4.3 | 31 | 5.11 |
| P59 | Andesita | Argílica Avanzada | <LOD | 2.77 | <LOD | 3.64 | <LOD | 3.01 | <LOD | 5.93 | <LOD | 5.93 |
| P59C | Andesita | Argílica Avanzada | <LOD | 3.15 | 17.04 | 3.57 | 32.38 | 3.68 | <LOD | 6.98 | 25.08 | 5.48 |
| P57b | Andesita | Silice oquerosa | 5,.5 | 1.93 | 8.35 | 2.83 | 52.94 | 3.61 | <LOD | 6.38 | 8.15 | 4.31 |
| P57c | Andesita | Argílica Avanzada | <LOD | 2.77 | 14.9 | 3.15 | 4.98 | 2.54 | <LOD | 6.24 | <LOD | 6.09 |
| P57d | Andesita | Argílica Avanzada | 10,02 | 2.02 | 14.43 | 3.17 | 222,4 | 6.49 | <LOD | 6.28 | 14.64 | 4.63 |
| P55 | Andesita | Argílica Avanzada | 3.2 | 1.04 | 21.13 | 3.66 | 28,04 | 3.58 | <LOD | 7.1 | 36.28 | 5.87 |
| P39 | Riolita | Filica | <LOD | 2.79 | 133,4 | 6.25 | 135,3 | 6.44 | <LOD | 5.96 | 6.48 | 3.97 |
| P33 | Metapelita | Filica | <LOD | 3 | 27.35 | 3.7 | 18.53 | 3.26 | 7.58 | 4.33 | 13.86 | 4.52 |
| P32 | Brecha autoclástica | Filica | 4.3 | 2 | 13.02 | 3.17 | 112,8 | 5.01 | <LOD | 6.86 | 16.65 | 4.89 |
| P30 | Riolita | Filica | 4.3 | 1.35 | 19.84 | 3.31 | 20.37 | 3.05 | <LOD | 6.16 | 12.13 | 4.29 |
| P24 | Brecha autoclástica | Filica | <LOD | 3.03 | 14.85 | 3.2 | 9.07 | 2.72 | 7.2 | 4.43 | 23.3 | 4.97 |

Cuadro 1. Cont.

| MUESTRA | Unidad | Alteración | Cu | Cu Error | Co | Co Error | Sb | Sb Error | Sn | Sn Error | Ag | Ag Error |
|---------|---------------------|-------------------|-------|----------|--------|----------|-------|----------|-------|----------|-------|----------|
| P61 | Andesita | Argílica Avanzada | 25.62 | 8.45 | 99.79 | 41.9 | 43.5 | 6.6 | 18.87 | 4.16 | <LOD | 5.39 |
| P59 | Andesita | Argílica Avanzada | 16.86 | 7.96 | 36.87 | 21.35 | 41.46 | 6.36 | 20.93 | 4.05 | 7.57 | 3.53 |
| P59C | Andesita | Argílica Avanzada | 27.68 | 9.45 | 148.76 | 94.59 | 23.1 | 6.41 | 11.02 | 4.07 | <LOD | 5.31 |
| P57b | Andesita | Silice oquerosa | 36.43 | 8.67 | <LOD | 73.13 | 10.26 | 5.97 | <LOD | 5.69 | <LOD | 4.94 |
| P57c | Andesita | Argílica Avanzada | 17.28 | 7.98 | <LOD | 42.49 | 27.35 | 5.83 | 11.47 | 3.69 | <LOD | 4.73 |
| P57d | Andesita | Argílica Avanzada | 36 | 8.84 | 157.03 | 58.93 | 54.88 | 6.61 | 29.78 | 4.22 | 10.76 | 3.66 |
| P55 | Andesita | Argílica Avanzada | 88.2 | 11.03 | <LOD | 131.72 | 30.28 | 6.94 | 16.27 | 4.44 | 6.81 | 3.9 |
| P39 | Riolita | Filica | 15.45 | 7.46 | <LOD | 29.2 | 29.34 | 5.58 | 13.97 | 3.54 | <LOD | 4.6 |
| P33 | Metapelita | Filica | 37.29 | 8.65 | 62.47 | 35.77 | 48.5 | 6.17 | 18.51 | 3.87 | <LOD | 4.99 |
| P32 | Brecha autoclástica | Filica | 27.97 | 9.02 | 125.3 | 76.62 | 14 | 6.39 | 6.64 | 4.07 | <LOD | 5.25 |
| P30 | Riolita | Filica | 13.49 | 7.78 | 46.83 | 26.19 | 31.33 | 6.03 | 15.89 | 3.85 | 5.03 | 3.35 |
| P24 | Brecha autoclástica | Filica | 29.28 | 8.77 | <LOD | 83.14 | 22.63 | 6.36 | 12.49 | 4.07 | 6.22 | 3.6 |

Para la zona de estudio, se observan tres eventos: i) el primero asociado a la generación de las fracturas y brechas; ii) el segundo a la formación de las alteraciones hidrotermales con las estructuras tipo *ledge* con escasa mineralización y iii) el tercero involucra un evento supergénico distal, que deja impresiones de costras superficiales de Cu en las rocas alteradas, pero con mineralogías típicas menos complejas (Fig. 10).

El modelo de mineralización del depósito del domo Rupasca presenta características similares a los de un sistema epitermal de alta sulfuración de ambientes poco profundos (Sillitoe 1999, Hedenquist et al. 2000) por las siguientes características: mineralogía de las alteraciones hidrotermales observadas, sulfuros como pirita y calcopirita y metales asociados como Cu, As, Sb (Sillitoe 1999).

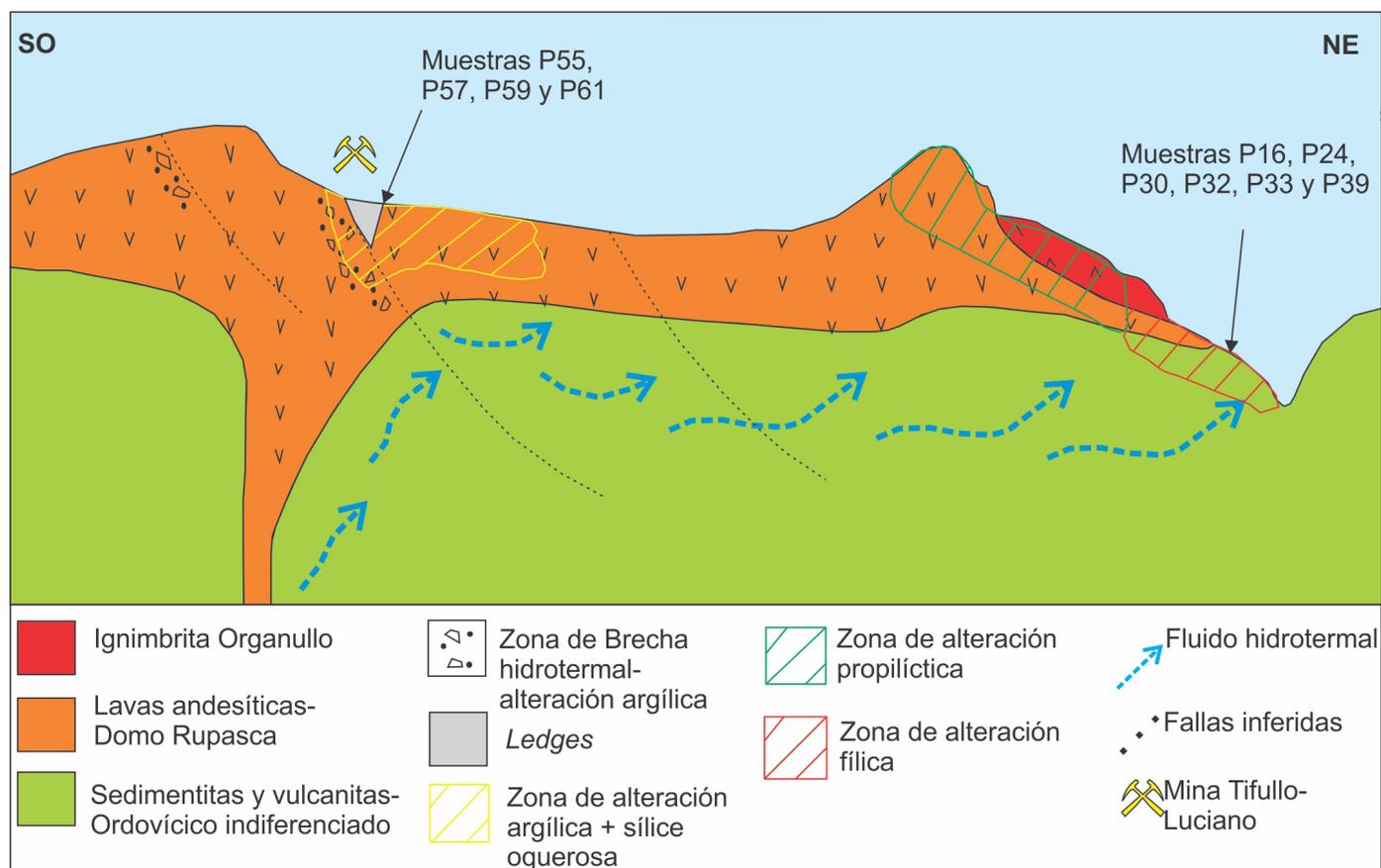


Figura 9. Modelo de circulación de fluidos, distribución de las alteraciones hidrotermales y generación de las vetas.

En síntesis, esta contribución define en el domo Rupasca la presencia de elementos indicadores de metales preciosos asociados a una zonación de la alteración hidrotermal que puede tener importancia económica en profundidad, dada la vinculación de estos sistemas epitermales con sistema de pórfidos. Además, este estudio permitió dar a conocer zonas de *ledges* asociadas a un sistema epitermal de alta sulfuración que no había definido en la zona, cuya importancia económica realza el potencial exploratorio y minero del área.

CONCLUSIÓN

En el área de estudio, la alteración hidrotermal afecta a distintas unidades geológicas, sedimentarias y volcánicas, de edades ordovícicas, post-ordovícicas? y miocenas. Las unidades ordovícicas corresponden a las Formaciones Agua de Castilla y Coquena. La unidad de presunta edad post-ordovícica, por su relación discordante con las unidades ordovícicas infrayacentes, al conglomerado polimíctico. Las unidades miocenas corresponden a la Ignimbrita Organullo y las lavas andesíticas del domo Rupasca.

La alteración hidrotermal está compuesta por una zonación dada por las alteraciones: sílica (incorporación de sílice), argílica avanzada (cuarzo + alunita; accesorios: caolinita, jarosita, dickita), filica (illita (paragonita y fengita) + cuarzo, +/- clorita, +/- calcita; accesorios: óxidos de hierro) y propilítica (epidoto + clorita + illita).

La alteración argílica avanzada con desarrollo de sílice oquerosa y la presencia de sulfuros de hierro (como pirita y calcopirita) sugiere ser el resultado de volátiles magmáticos (HCl, SO₂ y HF) relacionados al magmatismo del domo Rupasca.

La geoquímica de fluorescencia de rayos X permitió determinar la presencia de metales bases y preciosos tales como: W, Cu, Sn, Pb, Ag, Zn, Sb y As en rocas con alteración hidrotermal del tipo filica y argílica avanzada. La alteración argílica avanzada se encuentra asociada a estructuras silicificadas tipo *ledge* con escasos sulfuros de cobre diseminados. La roca de caja de estas estructuras corresponde a las lavas andesíticas del domo Rupasca.

En la zona estudiada se reconocen tres eventos principales: i) generación de las fracturas y brechas; ii) formación de las alteraciones hidrotermales con las estructuras tipo ledge

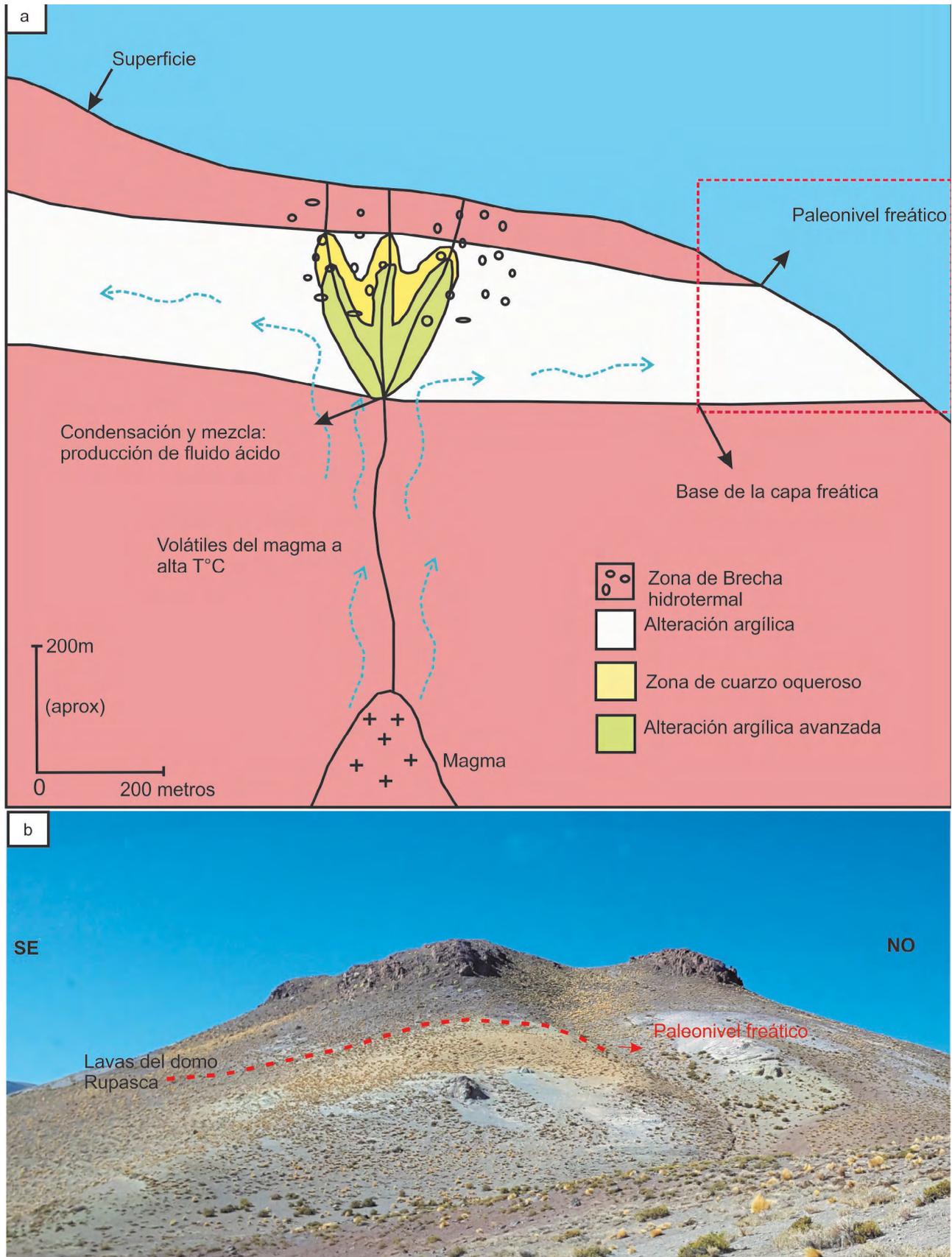


Figura 10. a) Modelo de generación de la alteración ácida. Recuadro rojo es la ubicación de B en el modelo. b) Ubicación del paleonivel freático de la alteración ácida en el afloramiento del domo Rupasca.

con escasa mineralización y iii) evento supergénico distal, que deja impresiones de costras superficiales de Cu en las rocas alteradas.

Este yacimiento hidrotermal presenta características asociadas a un sistema epitermal de alta sulfuración.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo fue financiado con fondos de CONICET PICT 2016-1274, PICT 2014-3436, y CIUNSA B2612. Los autores agradecen al laboratorio de Minería Don Nicolás, especialmente al Geol. Silvio Franco por los análisis de espectrometría SWIR-NIS-VIR. Los autores agradecen al Técnico CONICET Víctor Liendro por la realización de las secciones delgadas.

Los autores agradecen a los revisores Dr. Sebastián Jovic y otro anónimo por la lectura y sus valiosas sugerencias que han permitido mejorar el manuscrito. Así mismo agradecemos al editor Dr. Pablo Caffé por el aporte al conocimiento del área y sugerencias realizadas sobre el manuscrito.

REFERENCIAS

- Argañaraz, R. y Sureda, R. 1979. El yacimiento plumbífero «La Esperanza», departamento La Poma, provincia de Salta, República Argentina. *Asociación Argentina de Mineralogía, Petrología y Sedimentología*, Revista 10 (3-4): 1-11.
- Aceñolaza, F. y Aceñolaza, G. 2005. La Formación Puncoviscana y unidades estratigráficas vinculadas en el Neoproterozoico-Cámbrico temprano del Noroeste Argentino. *Latin American Journal of Sedimentology and basin analysis* 12 (2): 65-87.
- Alonso, R.N. y Viramonte, J.G. 1987. Geología y Metalogenia de la Puna. *Estudios Geológico*, 43 (5-6): 393-407.
- Alonso, R.N., Gutiérrez, R. y Viramonte, J.G. 1984. Megacuerpos salinos cenozoicos en la Puna Argentina. 9° Congreso Geológico Argentino, Actas 1: 25-42, San Carlos de Bariloche.
- Aquater, G. 1980. Exploración geotérmica en el área del Cerro Tuzgle, Provincia de Jujuy, República Argentina. Estudio de prefactibilidad. Secretaría de Minería de la provincia de Jujuy (inédito), 123 p., San Salvador de Jujuy.
- Blasco, G., Zappettini, E.O. y Hongn, F.D. 1996. Hoja Geológica 2566-II, San Antonio de los Cobres, 1:250.000. Secretaría de Minería de la Nación, Boletín 217, Buenos Aires.
- Brodtkorb, M. K. De, Ametrano, S. y Otermann, J. 1978. Contribución al conocimiento mineralógico del yacimiento El Queva, provincia de Salta. *Asociación de Mineralogía, Petrología y Sedimentología*, Revista 9: 75-88.
- Caffé, P. 1999. Complejos volcánicos dómicos del Terciario superior en Puna Norte: sus implicancias magmatotectónicas y metalogenéticas. Tesis doctoral, Universidad Nacional de Córdoba (inédita), 421 p., Córdoba.
- Chernicoff, C., Richards, J. y Zappettini, E. 2002. Crustal lineament control on magmatism and mineralization in northwestern Argentina: geological, geophysical, and remote sensing evidence. *Ore Geology Reviews* 21 (3): 127-155.
- Coira, B. 1999. Potencialidad minera de sistemas megacaldéricos miocenos en Puna norte. En: Zappettini, E. (ed.), *Recursos Minerales de la República Argentina*, Instituto de Geología y Recursos Minerales SEGEMAR, Anales 35: 1557-1567, Buenos Aires.
- Coira, B. y Kay, S. 1993. Implications of Quaternary volcanism at Cerro Tuzgle for crustal and mantle evolution of the Puna Plateau, Central Andes, Argentina. *Contributions to Mineralogy and Petrology* 113: 40-58.
- Coira, B. y Paris, G. 1981. Estratigrafía volcánica del área del cerro Tuzgle, Provincias de Jujuy y Salta. 8° Congreso Geológico Argentino, Actas 3: 659-671, San Luis.
- Corbett, G. y Leach, T. 1997. Southwest Pacific rim gold-copper systems: structure, alteration and mineralization. Short course manual. Special Publications of the Society of Economic Geologists, 317 p, Sydney.
- Hedenquist, J.W., Arribas, A., y Gonzalez-Urien, E. 2000. Exploration for epithermal gold deposits: *Reviews in Economic Geology* 13: 245-277.
- Inoue, A. 1995. Formation of clay minerals in hydrothermal environments. En: Velde, B. (ed.), *Origin and Mineralogy of Clays*. Springer, 268-330, Berlin.
- Japan International Cooperation Agency 1993. Informe sobre la exploración de minerales del área oeste de la República Argentina, fase 1. Secretaría de Minería de la Nación, SEGEMAR, 167 p., Buenos Aires.
- Kay, S.M., Maksae, V., Moscoso, R., Mpodozis, C., Nasi, C. y Gordillo, C.E. 1998. Tertiary Andean magmatism in Chile and Argentina between 28° south and 33° south: correlation of magmatic chemistry with a changing Benioff zone. *Journal of South American Earth Sciences* 1 (1): 21-38.
- López, J.F., Quiroga, M.F., Suzaño, N., Becchio, R., Ortiz, O. y Arnasio, M. 2016. Magmatismo silíceo y niveles de emplazamiento durante el Paleozoico inferior en el área de Tajamar-quebradas de Agua de Castilla y Cajón, Salta. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 73(3): 348-368.
- Matteini, M., Mazzuoli, R., Omarini, R., Cas, R. y Maas, R. 2002. The geochemical variations of the upper Cenozoic volcanism along the Calama-Olacapato-El Toro transversal fault system in central Andes (24° south): petrogenetic and geodynamic implications. *Tectonophysics* 345 (1): 211-227.
- Mendez, V., Navarini, A., Piazza, D. y Viera, O. 1973. Faja Eruptiva de la Puna Oriental. In 5° Congreso Geológico Argentino, Actas 4: 89-100, Villa Carlos Paz.
- Mon, R. 1976. La tectónica del borde oriental de los Andes, En la provincia de Salta, Tucumán y Catamarca, República Argentina. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 31 (2): 65-72.
- Omarini, R.H. 1983. Caracterización litológica, diferenciación y génesis

- de la Formación Puncoviscana entre el Valle de Lerma y la Faja Erup-tiva de la Puna. Tesis Doctoral, Universidad Nacional de Salta (inédita), 220 p., Salta.
- Omarini, R.H., Viramonte, J.G., Cordani, U., Salfity, J.A. y Kawashita, K. 1984. Estudio geocronológico Rb/Sr de la Faja de la Puna en el sector de San Antonio de los Cobres. Provincia de Salta, Argentina. 9° Congreso Geológico Argentino, Actas 3: 146-158, San Carlos de Bariloche.
- Petrinovic, I.A. y Colombo Piñol, F. 2006. Pheatomagmatic and phreatic eruptions in locally extensive setting of Southern central Andes: The Tocomar Volcanic Centre (24°10' south - 66°34'), Argentina. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 158 (1): 1-5.
- Petrinovic, I.A., Mitjavila, J., Viramonte, J.G., Martí, J., Becchio, R., Arnosio, M. y Colombo, F. 1999. Descripción geoquímica y geocronológica de secuencias volcánicas neógenas de Trasarco, en el extremo oriental de la Cadena Volcánica Transversal del Quevar (Noroeste de Argentina). En: Colombo, F., Queralt, I. y Petrinovic, I.A. (eds.). *Geología de los Andes Centrales Meridionales: El Noroeste Argentino*, Acta Geológica Hispánica 34: 255-272.
- Petrinovic, I.A., Martí, J., Aguirre Diaz, G.J., Guzmán, S., Geyer, A. y Salado Paz, N. 2010. The Cerro Aguas Calientes caldera, NW Argentina: an example of a tectonically controlled, polygenetic collapse caldera, and its regional significance. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 194 (1): 15-26.
- Pirajno, F. 1992. *Hydrothermal Mineral Deposits, Principles and fundamental concepts for the Exploration Geologist*, Springer Verlag.
- Pollastro, R. 1993. Considerations and applications of the illite/smectite geothermometer in hydrocarbon-bearing rocks of miocene to mississippian age. *Clay and Clay Minerals* 41 (2): 119-133.
- Pontual, S., Merry, N. y Gamson, P. 1997. *Spectral interpretation field manual. Spectral Analysis Guide for Mineral Exploration*. Ausspec International Publications, 55 p., Sydney.
- Quiroga, M. 2019. Volcanismo submarino sedsedimentario y estilo de emplazamientos de cuerpos silíceos subvolcánicos, durante el Paleozoico Inferior en el ámbito de la Puna. Tesis Doctoral, Universidad Nacional de Salta (inédita), 168 p., Salta.
- Richards, J.P. y Villeneuve, M. 2001. The Llullaillaco volcano, northwest Argentina: construction by Pleistocene volcanism and destruction by sector collapse. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 105 (1): 77-105.
- Ridgway, J., Appleton, J. D. y Levinson, A. 1990. Ammonium geochemistry in mineral exploration – a comparison of results from the American cordilleras and the southwest Pacific. *Applied Geochemistry* 5: 475-489.
- Riller, U., Petrinovic, I., Ramelow, J., Greskowiak, J., Strecker, M. y Oncken, O. 2001. Late Cenozoic tectonism, caldera and plateau formation in the central Andes. *Earth and Planetary Science Letters* 188 (3): 299-311.
- Salado Paz, N., Petrinovic, I., Avila, J. y Brod, A. 2016a. Geología, mineralogía y estructura de la Mina Acazoque (Pb-Ag-Zn), Puna Salteña. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 73: 173-182.
- Salado Paz, N., Avila, J.C., Silva Da Souza, V. y Wemmer, K. 2016b. Mineralogía de alteración hidrotermal y mineralización del área de mina La Poma (Pb-Ag-Zn), Puna Central, provincia de Salta. *Serie de Correlación Geológica* 32 (2): 7 - 24.
- Salado Paz, N., Petrinovic, I., Do campo, M. Brod, A., Nieto, F., Da Silva Souza, V., Wemmer, K., Payrola Bosio, P., Ventura Santos, R. 2017. Mineralogy, structural control and age of the Incachule Sb epithermal veins, the cerro Aguas Calientes collapse caldera, Central Puna. *Journal of South American Earth Sciences* 82: 239 - 260.
- Salado Paz, N., Torres Corredor, P. y Da Silva Souza, V. 2018. Estudio textural, mineralógico y metales asociados de la veta Julio Verne, depósito de Organullo, Puna Salteña. *Acta Geológica Lilloana* 30 (1): 31-45.
- Salfity, J.A., Omarini, R., Baldis, B. y Gutiérrez, W.J. 1975. Consideraciones sobre la evolución geológica del Precámbrico y Paleozoico del norte argentino. 2° Congreso Ibero-Americano de Geología Económica, Actas 4: 341-361, Buenos Aires.
- Salfity, J.A., Gorustovich, S.A., Moya, M.C. y Amengual, R. 1984. Marco tectónico de la sedimentación y efusividad Cenozoicas de la Puna Argentina. 9° Congreso Geológico Argentino, Actas 1: 539-554, San Carlos de Bariloche.
- Schwab, K. y Lippolt, H. 1974. K-Ar mineral ages and late Cenozoic history of the Salar Cauchari area (Argentine Puna). *Symposium on Andean and Antarctic Volcanology*, Actas: 693-714, Santiago.
- Sillitoe, R., 1975. Lead-Silver, manganese and Native Sulfur mineralization within a Stratovolcano, El Queva, Northwest Argentina. *Economic Geology* 70: 1119-1201.
- Sillitoe, R.H. 1999. Styles of high sulfidation gold, silver and copper mineralisation in porphyry and epithermal environments, PACRIM'99, 29-44, Bali.
- Sillitoe, R.H. 2008. Major Gold deposits and belts of the North and South America Cordillera: Distribution, tectonomagmatic setting, and Metallogenic considerations. *Economic Geology* 103: 663-687.
- Sillitoe, R.H. 2015. Epithermal paleosurfaces. *Mineralium Deposita* 50: 767-793.
- Sillitoe, R. y Bonham, H.F. Jr. 1984. Volcanic Landforms and Ore deposits. *Economic Geology* 79: 1286-1298.
- Simmons, S.F. y Browne, P.R.L. 1998. Illite, illite-smectite and smectite occurrences in the Broadlands-Ohaaki geothermal system and their implications for clay mineral geothermometry. *Water rock interaction* 9: 691-694.
- Suzaño, N., Becchio, R., Sola, A., Ortiz, A., Nieves, A., Quiroga, M. y Fuentes, G. 2017. The role of magma mixing in the evolution of the Early Paleozoic calc-alkaline granitoid suites. Eastern magmatic belt, Puna, NW Argentina. *Journal of South American Earth Sciences* 76: 25-46.

- Terra Andina 2013. Informe de Impacto ambiental, Mina Tifullo, Expediente 21577, 32 p., Salta.
- Tristan, A. 2014. Tifullo - Dpto. La Poma - Lugar Organullo. Boletín oficial de la provincia de Salta n° 19333.
- Turner, J.C. 1960. Estratigrafía de la Sierra de Santa Victoria y adyacencias. Boletín de la Academia Nacional de Ciencias 41(2): 163-196, Córdoba.
- Turner, J.C.M. 1972. Puna. En: Leanza, A.F. (ed.), 1° Simposio de Geología Regional, 91-116, Córdoba.
- Utada M. 1980. Hydrothermal alteration related to igneous acidity in Cretaceous and Neogene formations of Japan. Mining Geology Japan, Special Issue 8: 67-83.
- Viera, O., 1976. Informe final área de reserva N° 28. Polvorilla. Dirección General de fabricaciones Militares, carpeta 284. SEGEMAR, Buenos Aires.
- Vilela, C.R. 1969. Descripción geológica de la hoja 6c, San Antonio de los Cobres: provincias de Salta y Jujuy. Escala 1:200.000. Carta Geológico-Económica de la República Argentina. Servicio Nacional Minero Geológico. Boletín 110, 70 p., Buenos Aires.
- Zappettini, E.O. 1999. Mineralizaciones polimetálicas de los distritos El Quevar, La Poma-Incachule y Concordia, Salta. Recursos Minerales de la República Argentina. En: Zappettini, E.O. (Ed), Instituto de Geología y Recursos Minerales, SEGEMAR, Anales 35: 1603-1611, Buenos Aires.