

# Modelo genético del prospecto Cerro Colorado Chico: Un aporte a la exploración en la costa norte del Perú

## Genetic model of Cerro Colorado Chico prospect: A contribution to exploration on the north coast of Peru

Orlando Bazán Santa Cruz<sup>1</sup>, Jesús Alberto Torres Guerra<sup>2</sup>

Recibido: 07/01/2022 – Aprobado: 05/04/2022 – Publicado: 30/06/2022

### RESUMEN

El prospecto Cerro Colorado Chico está ubicado al sur de la región Ancash, se caracteriza por la presencia de cuerpos silíceos brechados (cuarzo POD) con halos restringidos de alteración argílica avanzada sílice-pirofilita-alunita y una extensa alteración sílice-sericita-pirita, brechas y cuerpos de hematita, horizontes hematitizados que afectan a rocas volcánico-sedimentarias del Grupo Casma, y vetas distales de cuarzo. Para esta investigación se ha realizado cartografía geológica a escala 1:5000, análisis de imágenes ASTER, análisis ICP-AES de 208 muestras de roca, estudios petrográficos, minerográficos y análisis mineralógicos por DRX de 14 muestras y análisis de inclusiones fluidas de 4 muestras. Las rocas alteradas muestran un enriquecimiento en Au, As, Sr, Ba, V, Fe, Ni y disminución de Cu, Pb, Zn, Al, Ti, Sc, Co y Mn. Los estudios petrográficos evidencian hasta tres generaciones de cuarzo y abundante hematita en ocasiones reemplazando moldes de magnetita y en otras siendo reemplazada por limonitas y diseminaciones de rutilo, pirita y calcopirita. Las inclusiones fluidas muestran temperaturas mesotermales entre 605° y 560° C con salinidades de 47.66% a 44.82% NaCl eq. y epitermales entre 329° y 138 °C con salinidades de 0.7% a 9.73 % NaCl-eq con complejos procesos de evolución como enfriamiento, dilución, mezcla y ebullición. Se propone que Cerro Colorado Chico corresponde a un lithocap relacionado a un sistema magmático-hidrotermal tipo IOCG, lo que permite establecer nuevas perspectivas de exploración en la costa norte del Perú por depósitos tipo IOCG preservados en profundidad.

**Palabras claves:** Brecha; Cerro Colorado Chico; cuarzo POD; depósito IOCG; lithocap; silíceo.

### ABSTRACT

Cerro Colorado Chico prospect is located to the south of the Ancash region, it is characterized by the presence of brecciated siliceous bodies (POD quartz) with restricted halos of advanced argillic alteration silica-pyrophyllite-alunite and an extensive alteration silic-sericite-pyrite, breccias and bodies of hematite, hematitized horizons affecting volcanic-sedimentary rocks of the Casma Group, and distal quartz veins. For this research have been geological mapping at 1:5000 scale, ASTER image analysis, ICP-AES analysis of 208 rock samples, petrographic, minerographic and XRD mineralogical analysis of 14 samples and fluid inclusion analysis of 4 samples. The altered rocks show an enrichment in Au, As, Sr, Ba, V, Fe, Ni and depletion of Cu, Pb, Zn, Al, Ti, Sc, Co and Mn. Petrographic studies show up to three generations of quartz and abundant hematite, sometimes replacing magnetite molds and sometimes being replaced by limonites and disseminations of rutile, pyrite and chalcopyrite. The fluid inclusions show mesothermal temperatures between 605° and 560° with 47.66% to 44.82% NaCl eq. and epithermal temperatures between 329 ° and 138 ° C with of 0.7% to 9.73% NaCl-eq. with complex evolution processes such as cooling, dilution, mixing and boiling. We proposed that Cerro Colorado Chico corresponds to a lithocap related to a magmatic-hydrothermal system of the IOCG type, which allows establishing new exploration perspectives on the north coast of Peru for IOCG-type deposits preserved in depth.

**Keywords:** Breccia; Cerro Colorado Chico; IOCG deposit; lithocap; quartz POD; siliceous.

1 Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica, Unidad de Posgrado. Lima, Perú.

Estudiante de maestría en Geología, mención en Recursos Mineros. E-mail: [orlando.bazan@unmsm.edu.pe](mailto:orlando.bazan@unmsm.edu.pe) - ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7764-9460>

2 Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica, Unidad de Posgrado. Lima, Perú.

Docente. E-mail: [albertorresg@hotmail.com](mailto:albertorresg@hotmail.com) - ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8186-5249>

## I. INTRODUCCIÓN

El conocimiento de los depósitos IOCG, desde su definición como un estilo de mineralización (Hitzman et al., 1992), presenta una serie de controversias respecto a su génesis, denominación, ambiente tectónico, asociación con rocas ígneas, características distintivas para su exploración, y su relación con otros depósitos como los IOA (Iron Oxide – Apatite) y los Skarns.

Sillitoe (2003), registró y limitó el cinturón de depósitos IOCG en los Andes Centrales a lo largo de la zona costera de Chile y el Sur del Perú entre Lima y Arequipa, trabajos posteriores (Acosta et al., 2020) han delimitado dos franjas metalogénicas de IOCG, una de edad Jurásica entre Ica y Tacna, y la segunda de edad Cretácico Inferior que se prolonga hacia el Norte hasta La Libertad.

En Cerro Colorado Chico, se han reportado ocurrencias de Fe-Cu-Au asociadas a geoformas positivas con coloraciones rojizas dentro de rocas volcano-sedimentarias del Grupo Casma intruídas por el batolito de la Costa, sin embargo, se desconoce su modelo genético, aunque (J. A. Torres Guerra & Cerrón Sarcco, 2021) y (A. Torres Guerra et al., 2020), sugieren la idea de estar frente a un IOCG.

Esta investigación pretende explicar el modelo genético de las ocurrencias en Cerro Colorado Chico a fin de generar mayores expectativas de exploración en la costa norte del Perú, despertar el interés de las empresas *major* y ampliar el conocimiento de la génesis de depósitos IOCG.

## II. MÉTODOS

### 2.1 Área de estudio y data

El área de estudio se ubica al sur de la región Ancash, provincia y distrito de Huarney, a 50 km al SE de la ciudad de Huarney y 30 km al NO de la ciudad de Barranca (Figura 1)

Para esta investigación se usan datos del proyecto “Estudio del magmatismo Mesozoico y sus implicancias en la determinación de un modelo de exploración geológico estructural relacionado con la ocurrencia de yacimientos tipo IOCG en la Cordillera de la costa y llanuras pre-andinas de los Andes Peruanos” del convenio marco que la Universidad Nacional Mayor de San Marcos (UNMSM) tiene con el Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico (INGEMMET) desde el 2018, además de información recopilada por los autores de los trabajos de exploración geológica realizados por EREP S.A.C. en los años 2010



Figura 1. Mapa de ubicación del prospecto Cerro Colorado Chico.

– 2011. Se consideran resultados de trabajos de campo, cartografía geológica, análisis de imágenes ASTER, resultados geoquímicos de muestras de roca, estudios petrominerafícos, difracción de rayos X e inclusiones fluidas.

## 2.2 Métodos

Se ha realizado una cartografía geológica a escala 1:5000 describiendo la litología, alteración, mineralización y estructuras. Se procesó las imágenes ASTER con el software Envi 5.3 aplicando combinaciones de bandas, álgebra y ratios de bandas. Los resultados geoquímicos del análisis ICP-AES de 208 muestras de roca se han analizado utilizando ioGAS™. Para la caracterización petrominerafíca se ha considerado seis estudios de petrografía y minerografía con apoyo del laboratorio de Petromineralogía de INGEMMET, así como, estudios petrográficos, mineragrafícos y análisis mineralógicos por DRX de catorce muestras elaborado por el Laboratorio de Caracterización Mineralógica de BISA para la empresa EREP S.A.C. El estudio de inclusiones fluidas se realizó con apoyo del laboratorio de Petromineralogía del INGEMMET.

## III. RESULTADOS

### 3.1 Características geológicas de Cerro Colorado Chico

A nivel regional en el área de estudio se presentan secuencias de rocas volcánicas lávicas bimodales, andesitas y dacitas, intercaladas con secuencias volcanoclásticas, identificadas como Grupo Casma (Cobbing, 1973), (Myers, 1972) y cuerpos intrusivos del Batolito de la Costa (Cobbing, 1973), (Pitcher, 1978).

A nivel local en torno al prospecto Cerro Colorado Chico se ha identificado tres unidades principales (Figura 2): (1) Andesita inferior, constituida por rocas lávicas andesíticas silicificadas con niveles volcanoclásticos, lateralmente se interdigita con lavas riolíticas a dacitas hacia la base. (2) Secuencia volcanoclástica, constituida por rocas volcanoclásticas que gradan de textura fina (tobáceos) a gruesa, compuesta por clastos líticos centimétricos y cristales rotos, con intercalaciones de andesita-dacita silicificadas, niveles de brecha volcánica, horizontes sedimentarios de limolitas y areniscas finas, y (3) Andesita superior, constituía por intercalación de lavas andesíticas, dacíticas y riolíticas.

En el área predomina una extensa silicificación con sericita y pirita diseminada (3 - 5%, Figura 3E), zonas con fuerte hematización, y débil a moderada cloritización que se extiende distalmente (Figura 3F).

Alineado a estructuras regionales se presentan cuerpos de sílice (cuarzo POD) brechado en la parte central (Figura 3A) que grada a masivo (Figuras 3B y 3C) y granular lateralmente, con un halo de alteración argílica avanzada de textura *patchy* con sílice-pirofilita-alunita (Figura 3D). La característica principal de estos cuerpos síliceos es que presentan múltiples eventos de silicificación, en los núcleos brechados se observa fragmentos de sílice blanquecina cementados por sílice rosácea, esta última debido a su contenido de hematita en su red cristalina. Además, se observa brechas con clastos subagulosos silicificados y cementados por hematita.

Las principales evidencias de mineralización en el prospecto Cerro Colorado Chico son los cuerpos síliceos (cuarzo POD), brechas y cuerpos de hematita (Figura 3G), y vetas de cuarzo con hematita (Figura 3H) que afloran

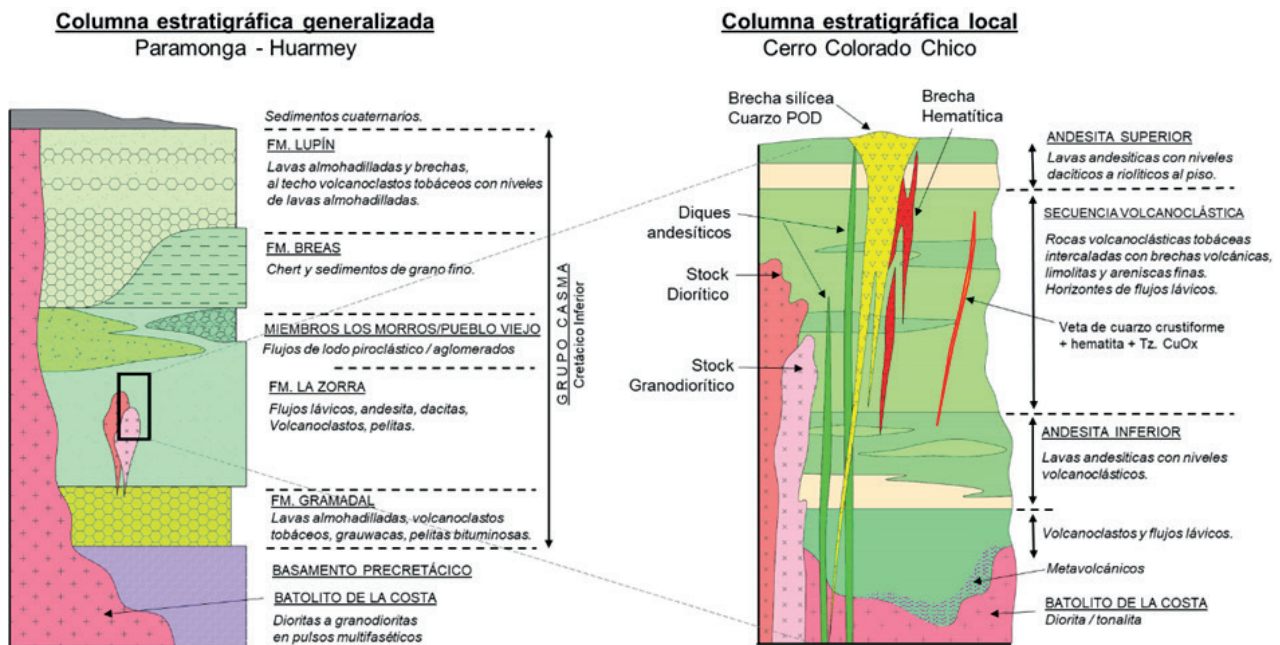
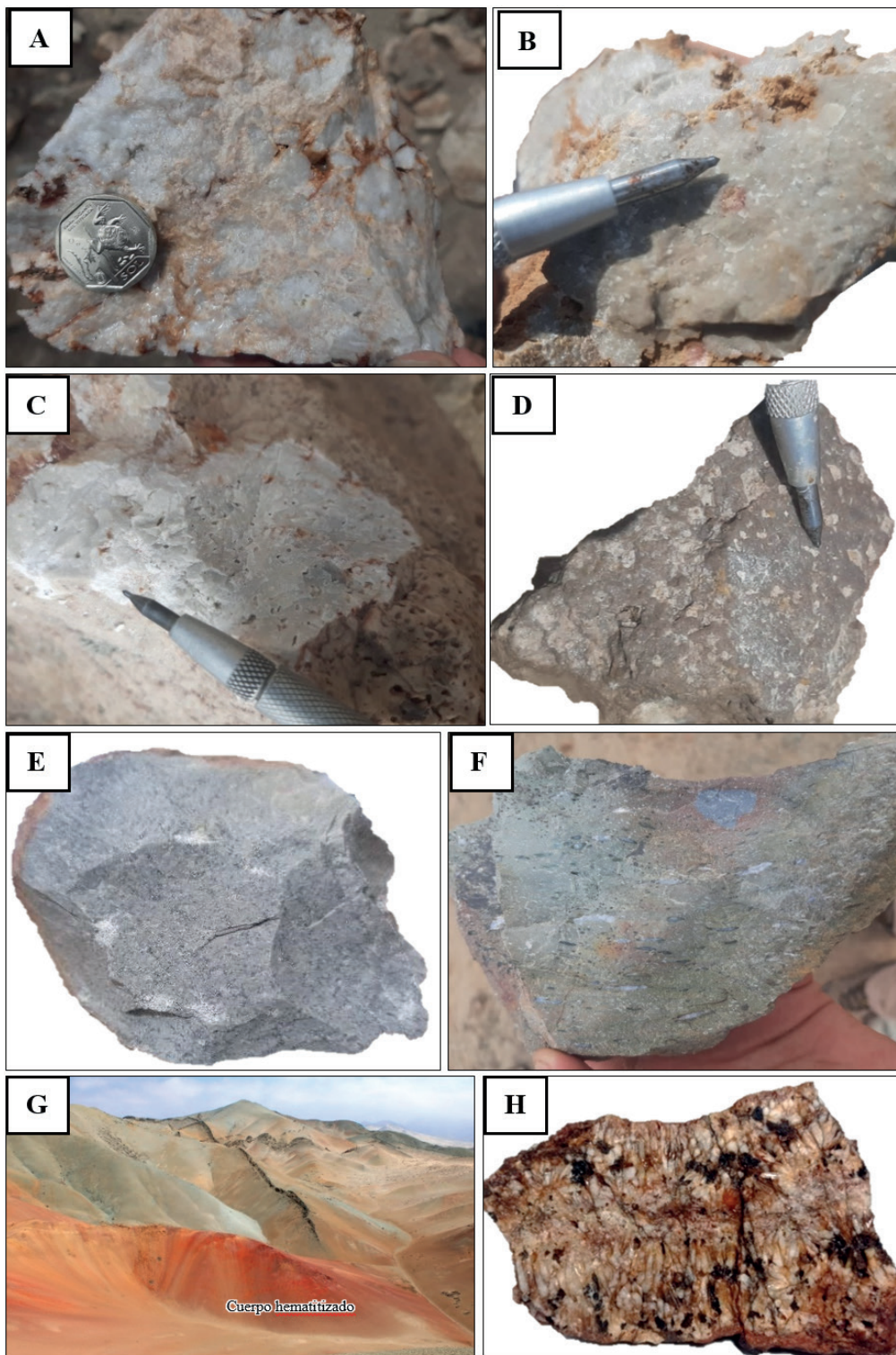


Figura 2. Columna estratigráfica generalizada del sector entre Paramonga y Huarmey (a la izquierda) y columna estratigráfica local en el prospecto Cerro Colorado Chico (derecha).

hacia el SE de Cerro Colorado Chico, las brechas de hematita se caracterizan por ser clasto-soportadas, monomíticas con clastos silicificados subangulosos y cementados por hematita,

las vetas presentan textura crustiforme con cristales de cuarzo bien desarrollados hasta centimétricos, sus espesores varían hasta 3 m de ancho con múltiples generaciones de



**Figura 3.** A. Brecha silícea, clastos de sílice blanquecina cementados por sílice rosácea por el contenido de hematita en su red cristalina. B. Silíce masiva con pátinas de óxidos de Fe, se observa cristales de cuarzo rojizo por su contenido de hematita. C. Cuarzo masivo vesicular, con pátinas de OxFe. D. Alteración penetrante con ensamble sílice - pirofilita con textura *patchy*. E. Dacita con silicificación moderada y piritita diseminada (3%). F. Roca volcanoclástica amigdalóide, con fuerte silicificación, débil cloritización. G. Cuerpo hematizado cortando a la secuencia volcanoclásticas y diques andesíticos (Foto: Eber Carbajal). H. Veta cuarzo – hematita con textura crustiforme.

cuarzo y óxidos de hierro, en algunos casos con presencia de carbonatos y sulfuros secundarios de Cu (malaquita y covelita) que se extienden hacia la roca caja.

Estructuralmente en el prospecto Cerro Colorado Chico se ha identificado dos sets de estructuras principales,

tanto a nivel superficial con la cartografía geológica (Figura 4) cómo a nivel de lineamientos geofísicos en profundidad. Un set NO – SE de primer orden que coincide con la alineación de la secuencia volcano-sedimentaria heredando estructuras sin-volcánicas durante la depositación del Gpo. Casma, que a su vez controla el emplazamiento de cuerpos

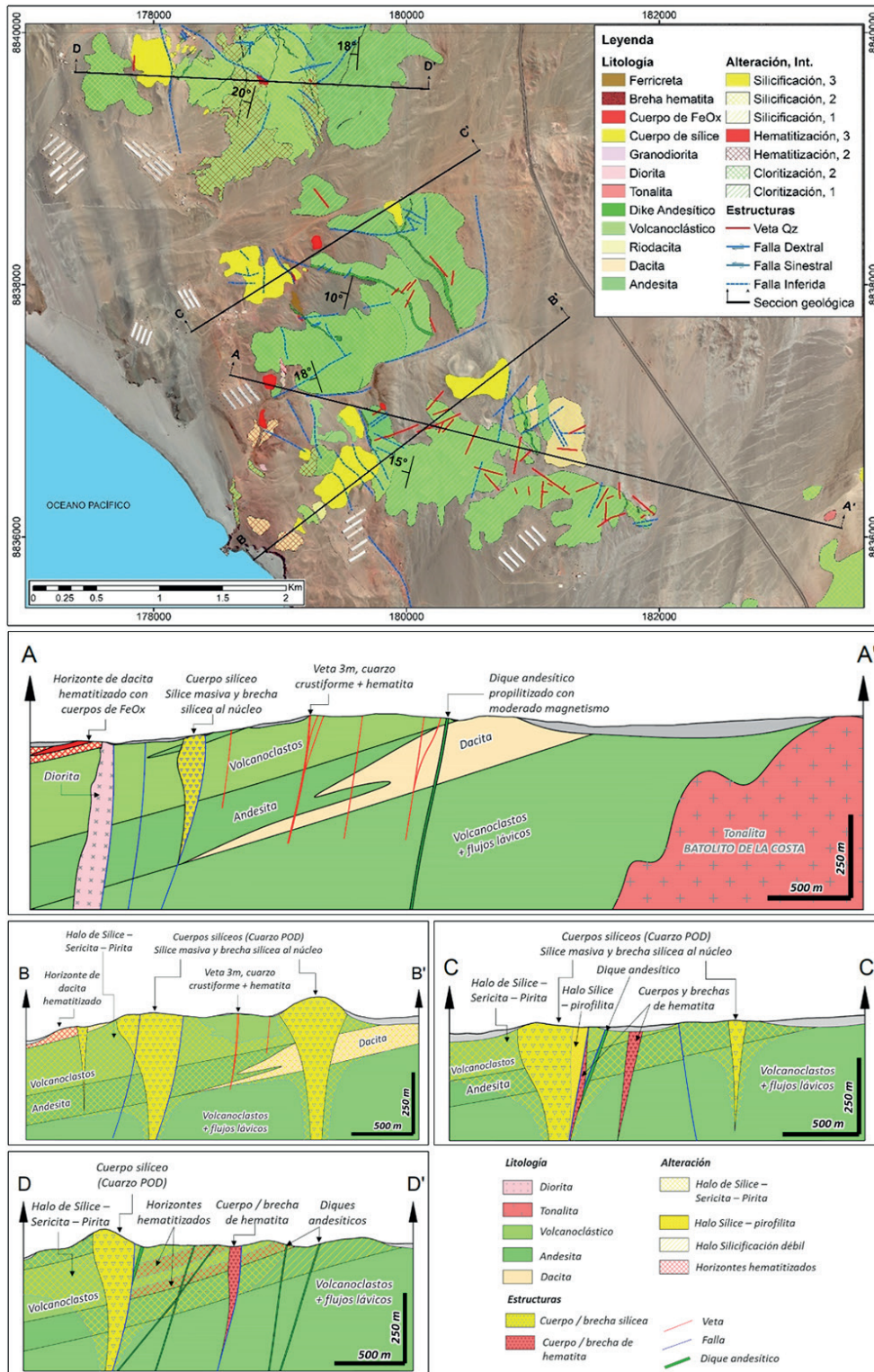


Figura 4. Secciones geológicas. Arriba: mapa geológico de referencia con las líneas de sección. Abajo: secciones interpretadas: AA', BB', CC' y DD'

silíceos (cuarzo POD), así como un set NE – SO de segundo orden que corta al primer set y controla el emplazamiento de estructuras vetiformes y cuerpos silíceos y localmente un tercer set E-O de tercer orden. También se observa cuatro sets principales de diques andesíticos, con orientaciones NO, NE, N-S y E-O que a su vez se encuentran cortados por fallas transcurrentes posteriores.

### 3.2 Signaturas de teledetección en Cerro Colorado Chico

Con el procesamiento de imágenes ASTER se ha identificado y cartografiado las alteraciones predominantes en el prospecto Cerro Colorado Chico (Figura 5). La combinación RGB de las bandas 4-6-1 y 1-3-5 muestran fuerte presencia de alteración en las áreas de Cerro Colorado Chico, Pampa Colorada, Pampa Bermejo y Pampa Canoas, resaltando la alteración sericita – arcillas y zonas con fuerte oxidación. Los ratios de bandas de (Ninomiya, 2004) muestran la presencia de alteración argílica avanzada y alteración argílico – sericita rodeada con óxidos e hidróxidos de hierro, como halo distal se presenta alteración propilítica, la amplia distribución de estas alteraciones en la zona de estudio sugiere fuerte actividad hidrotermal. Del mismo modo, usando álgebra de bandas (Ninomiya, 2004)

se ha identificado minerales de alteración argílica avanzada como pirofilita-alunita, minerales de alteración argílica-sericita como motmorillonita-illita-moscovita, y minerales de alteración propilítica como calcita. Adicionalmente, se usó la técnica SAM (Spectral Angle Mapper) para mapeo de minerales de alteración, con el cual se identificó presencia de alunita, pirofilita, moscovita, dentro de las zonas con alteración argílica avanzada y argílica-sericita, en los alrededores presencia de dikita, caolinita, illita y motmorillonita, y más distalmente epidota, clorita y calcita.

### 3.3 Caracterización geoquímica de alteraciones en Cerro Colorado Chico

Geoquímicamente las rocas ígneas alteradas se distinguen de las rocas frescas por su bajo contenido de aluminio ( $Al < 6 \%$ ), en Cerro Colorado Chico se observa que la mayoría de rocas frescas se plotean debajo cerca de la línea Plagioclasa-Feldespato Potásico en la gráfica de  $Na/Al$  Vs  $K/Al$  de Davies & Whitehead (2006) esto sugiere que las rocas pueden estar débilmente alteradas (Figura 6), mientras que un gran número de rocas alteradas se plotean en el campo de la moscovita, otro grupo de rocas alteradas se plotean en el campo de las arcillas, en este último se estarían ploteando tanto minerales de alteración

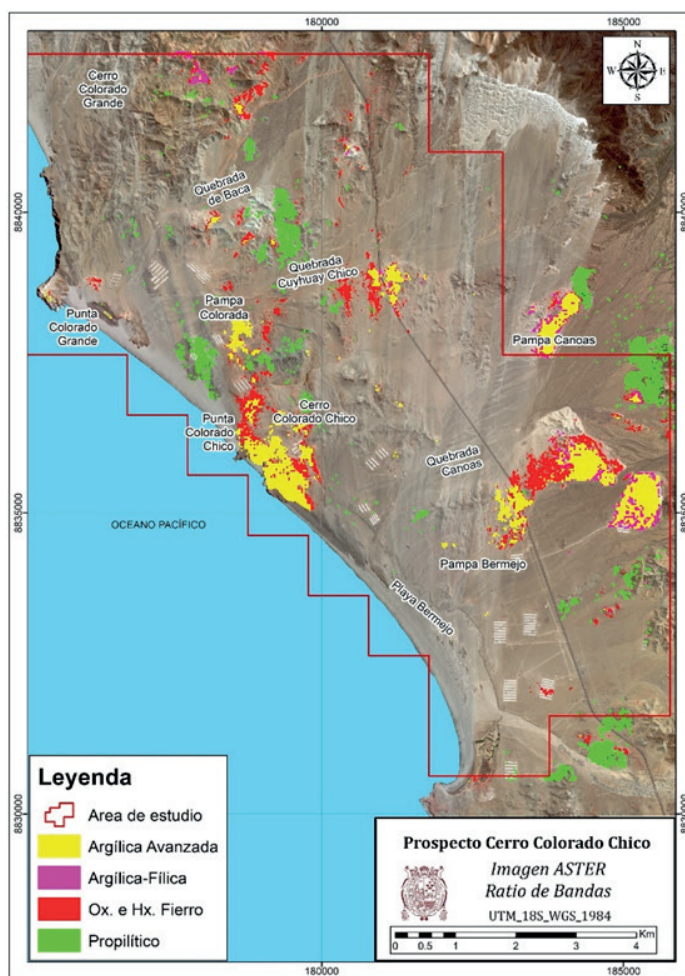


Figura 5. Plano de alteraciones usando ratio de bandas ASTER de acuerdo con (Ninomiya, 2004)

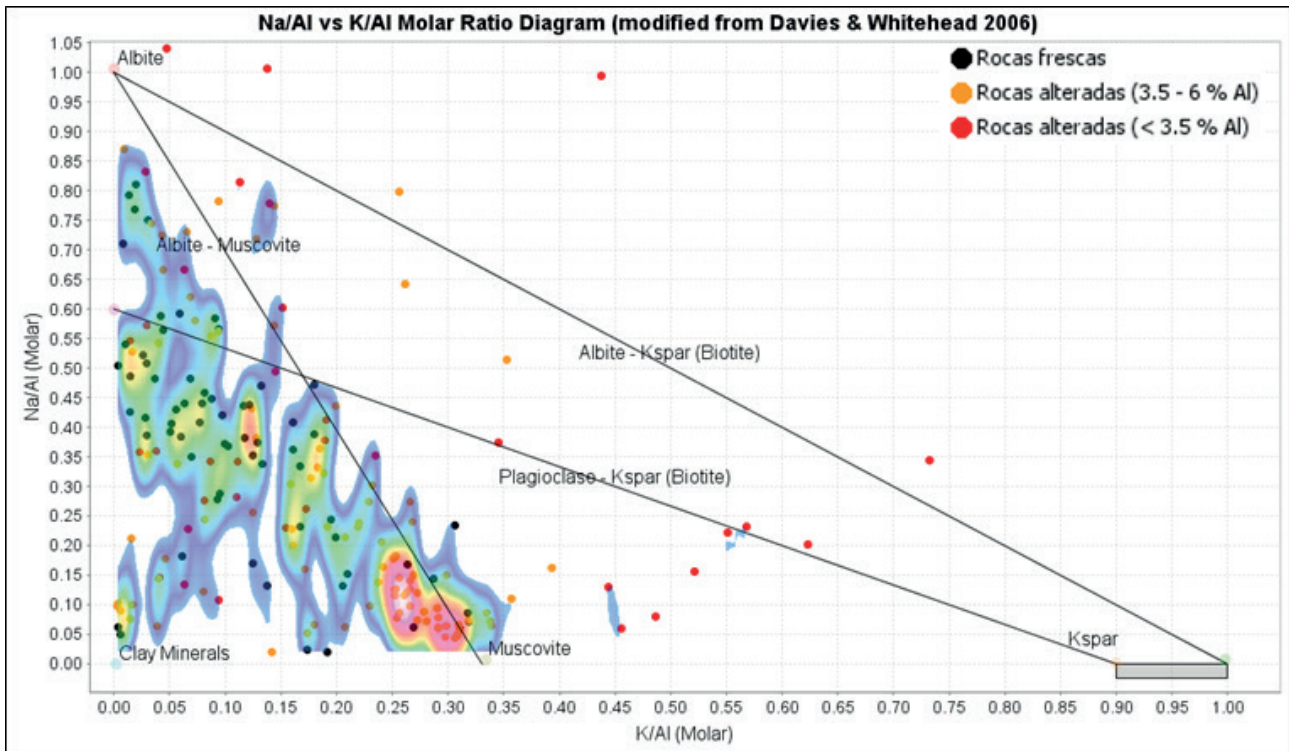


Figura 6. Diagrama de discriminación de alteraciones en función de la ratio molar Na/Al Vs K/Al (Davies & Whitehead, 2006)

argílica (caolinita) como minerales de alteración clorítica y epidota dado que estos minerales no tienen Na ni K en su composición se plotean en el origen del diagrama, entre el punto de las arcillas y la moscovita se plotean las muestras con alteración argílica intermedio como illita, otro grupo de muestras alteradas se plotean en el campo de Albite, esto puede representar alteración calcosódica, y otro grupo de muestras que no aparecen en este diagrama por su alta relación Na/Al puede corresponder a muestras con silicificación penetrante.

La clasificación geoquímica de las alteraciones se corrobora con las alteraciones identificadas a partir de imágenes ASTER (Figura 5), con las firmas espectrales de las muestras tomadas en campo (Figura 7) y los difractogramas de rayos X (Figura 8).

El análisis de las variaciones de los elementos traza en rocas alteradas del prospecto Cerro Colorado Chico permite sugerir que están asociadas a un sistema magmático hidrotermal relacionado a una intrusión en profundidad o lateral, se aprecia enriquecimiento de Au, As y Mo, depleción de Cu, Pb y Zn, depleción de Al, Ti, Sc, enriquecimiento de Sr en alteración argílica y silicificación, enriquecimiento de Ba en alteración illita y moscovita (sericita), enriquecimiento de V en alteración de oxidación (hematización) y empobrecimiento en siderófilos en las demás alteraciones.

### 3.4 Caracterización mineralógica del prospecto Cerro Colorado Chico

A nivel microscópico el mineral más abundante en Cerro Colorado Chico es cuarzo hidrotermal hasta 3 generaciones (Cuarzo I, II y III), el cuarzo I se encuentra de formas

subangulares y angulosas con tamaños menores a 0.4 mm, reemplazando la roca, acompañado de sericita y arcillas (Figura 9A). El cuarzo II se presenta como cristales subhedrales y anhedaes de hábitos prismáticos y agregados granulares, con tamaños de 0.1 a 3 mm, se encuentra rellenando cavidades y fracturas (Figura 9B). El cuarzo III se presenta como agregados microcristalinos con arcillas y óxidos de hierro rellenando cavidades y fracturas. También abunda la sericita que se muestra como cristales anhedaes de hábitos tabulares, agrupados en agregados fibrosos, escamosos y microcristalinos, se encuentra diseminada y rellenando cavidades acompañada de arcillas y limonitas y en ocasiones de alunita. Otro mineral ubicuo es la hematita, y se observan como cristales anhedaes agrupados en agregados terrosos y pulverulentos, en ocasiones se observa como alteración de posible magnetita (Figura 9C), tomando sus formas externas, y en algunos casos como agregados coliformes reemplazados por limonitas/goethita. Algunos moldes o pseudomorfos de hematita presentan diminutos granos de pirita en su interior. También se observa rutilo (Figura 9D) que se encuentra como cristales anhedaes de formas irregulares y alargadas, con tamaños menores a 0.08 mm, se muestra rellenando cavidades y como diseminaciones. En ocasiones se observan sulfuros pirita (Figura 9E), calcopirita (Figura 9F) y trazas de pirrotita que ocurren como cristales subhedrales y anhedaes con hábitos cúbicos.

### 3.5 Microtermometría de inclusiones fluidas y análisis de fluidos hidrotermales del prospecto Cerro Colorado Chico

En el prospecto Cerro Colorado Chico se puede distinguir la existencia de dos estadios de fluidos hidrotermales (Figura 10), el primero a temperaturas mesotermales

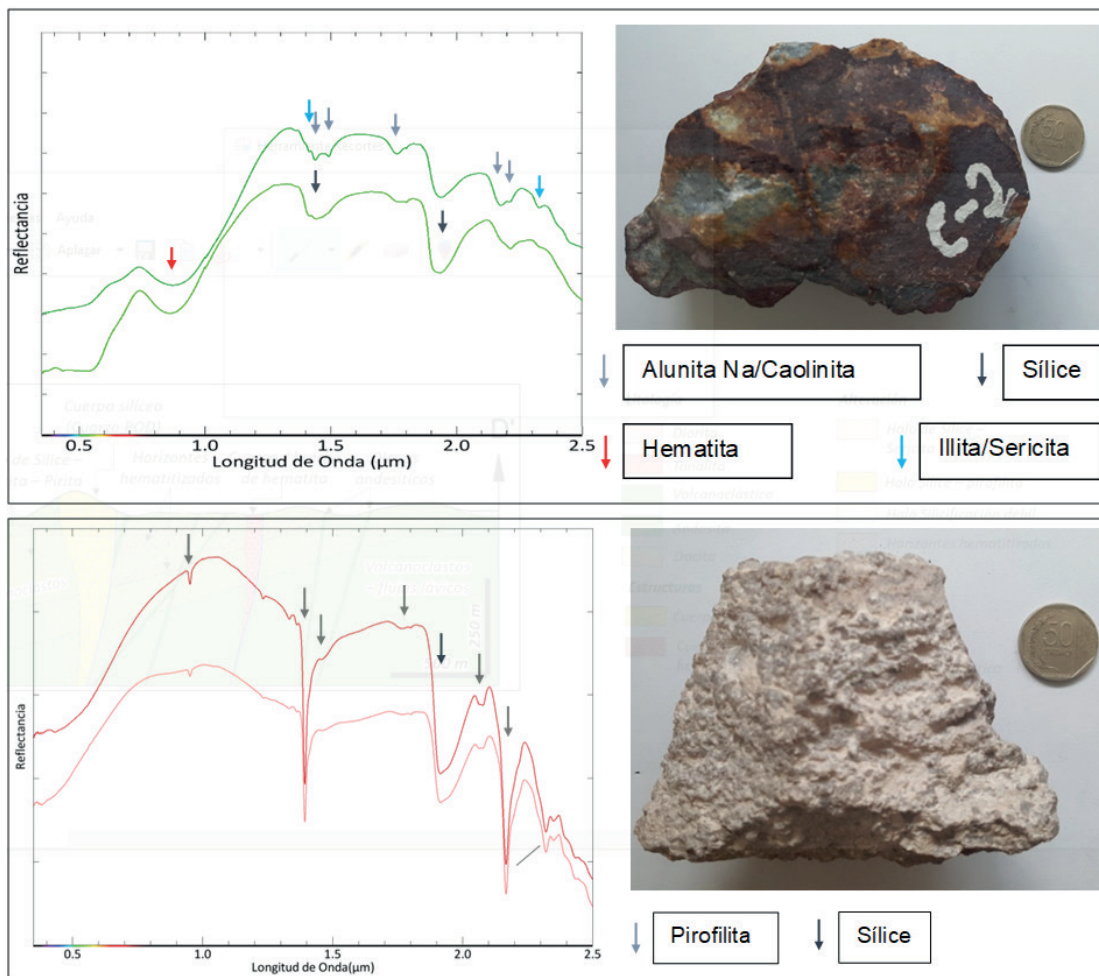


Figura 7. Firmas espectrales. Arriba: Roca con silicificación pervasiva y FeOx, el espectro muestra Alunita Na/Caolinita, Sílice, Hematita, Illita/sericita. Abajo: Alteración pervasiva con textura *patchy* con ensamble de sílice-pirofilita.

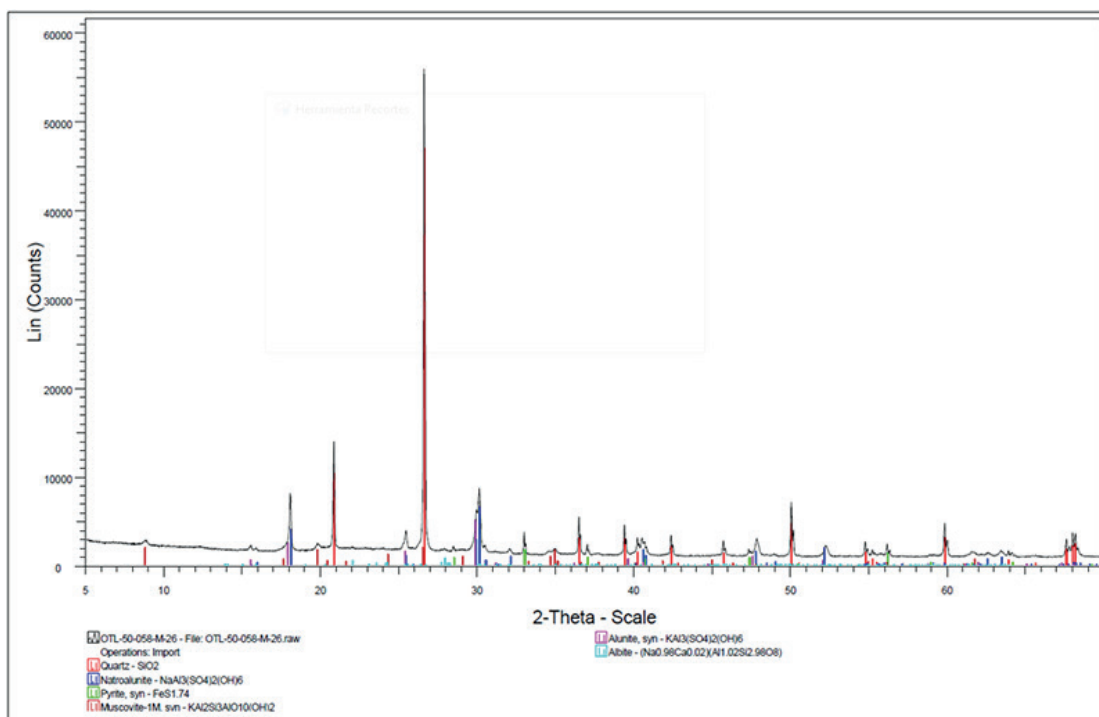
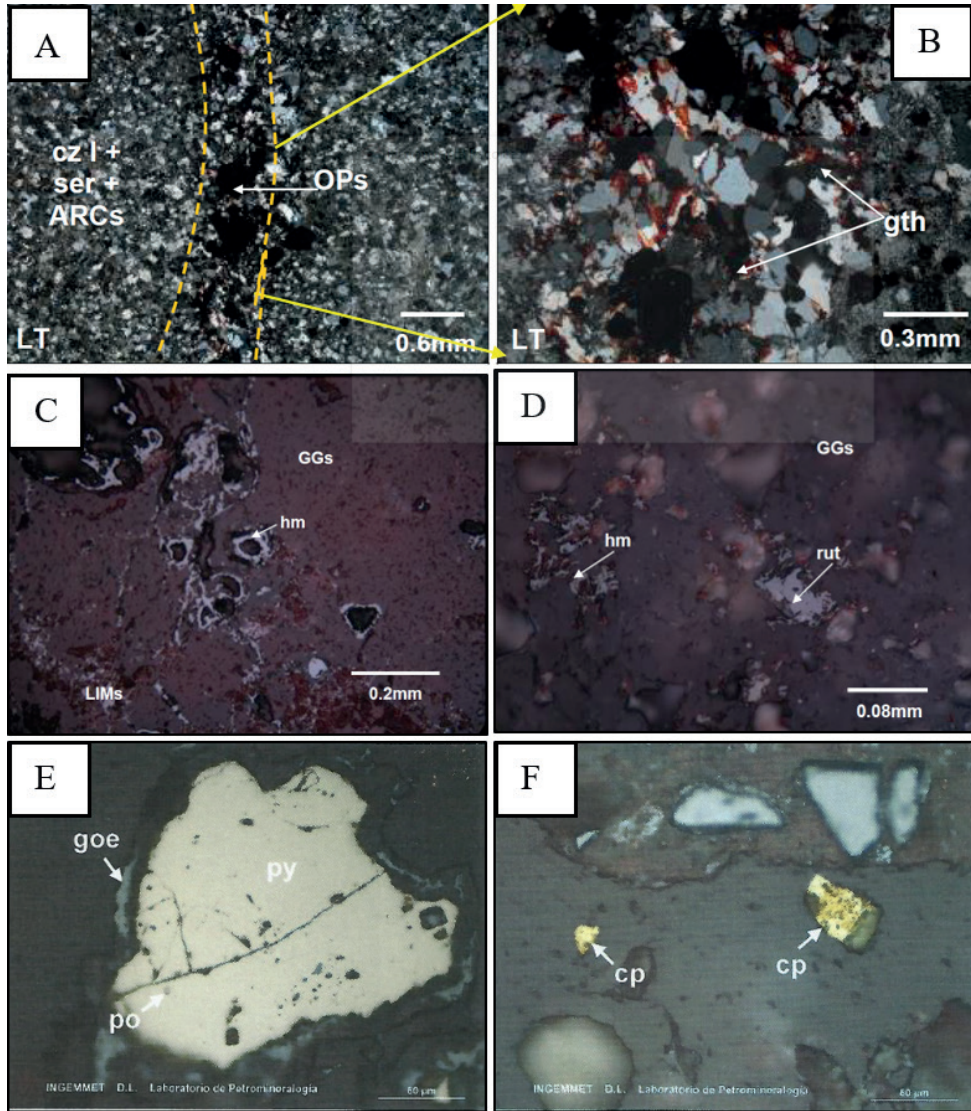


Figura 8. Difractograma de rayos X con los respectivos minerales de alteración identificados.





**Figura 9.** A: Granos subredondeados e irregulares de cuarzo I (cz I) acompañados de sericita (ser) y arcillas (ARCs). B: Detalle de fractura rellena de goethita (gth), cuarzo II (cz II) y minerales opacos (OPs). C: Pseudoformas octaédricas de posible magnetita reemplazada por hematita (hm) y limonitas (LIMs) D: Presencia de hematita (hm) y rutilo (rut) relleno de cavidades, acompañado de limonitas (LIMs) tiñendo toda la muestra. E: pirita y trazas de pirrotita anhedral, con halos de goethita. F: pirita y calcopirita diseminada.

entre 605° a 560° C con salinidades de 47.66% a 44.82% NaCl eq., que corresponde a fluidos salinos mesotermales, derivados de exsolución magmática durante la partición de dos fases fluidas inmiscibles, una fase densa salina reflejada en inclusiones primarias trifásicas ricas en líquido (Figura 11A) y una fase vapor de baja densidad. El segundo a temperaturas epitermales entre 329° y 138° C con salinidades de 0.7% a 9.73% NaCl eq., caracterizado por inclusiones primarias y secundarias bifásicas ricas en líquido (Figura 11B), dentro del cual se observa complejos procesos de evolución de fluidos que incluyen enfriamiento, dilución, mezcla y ebullición de fluidos, destacan dos procesos de mezcla isotérmica con fluidos salinos, el primero entre 295° y 280° C y el segundo a 186° y 165° C (Figura 10), pulsos de incremento en la salinidad de los fluidos, estos procesos complejos se han identificado tanto

en los estudios petrográficos como en los afloramientos de campo donde se ha podido describir hasta tres etapas hidrotermales.

#### IV. DISCUSIÓN

Cerro Colorado Chico se caracteriza por la ocurrencia de cuerpos de sílice multifacético con brechas silíceas, sílice masiva, granular, oquerosa/vesicular, con presencia de hematita en su red cristalina (sílice rosácea) denominados como “*Quartz Pod*” por (Lobo-Guerrero, 2004) quien lo relacionó a manifestaciones distales de depósitos IOCG, se ha observado cuerpos similares en Tres Cruces – Acari y otros más han sido registrados por varios autores a lo largo de la costa peruana, como Biminchumo Sagástegui (2013) en Ancash, el cuerpo Caseli; (Martínez Valladares et al., 2014)

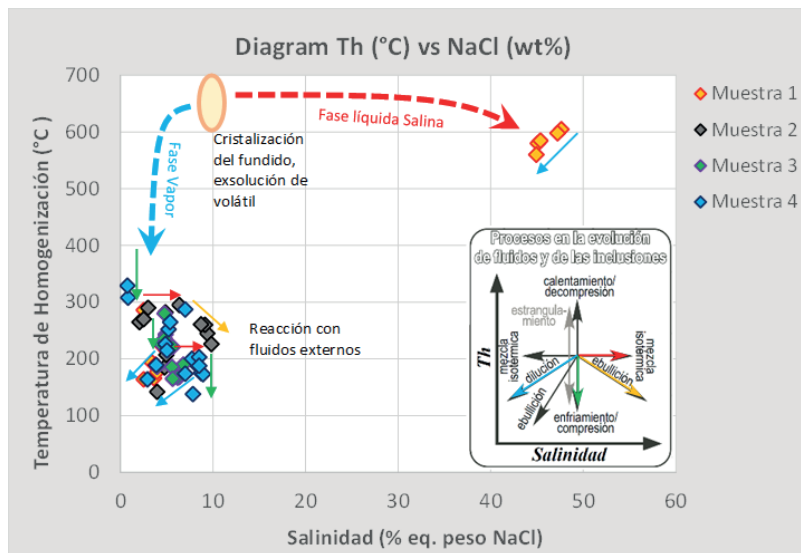


Figura 10. Diagrama de Salinidad (% eq. Peso NaCl) vs T° Homogeneización mostrando los procesos de evolución de los fluidos hidrotermales.

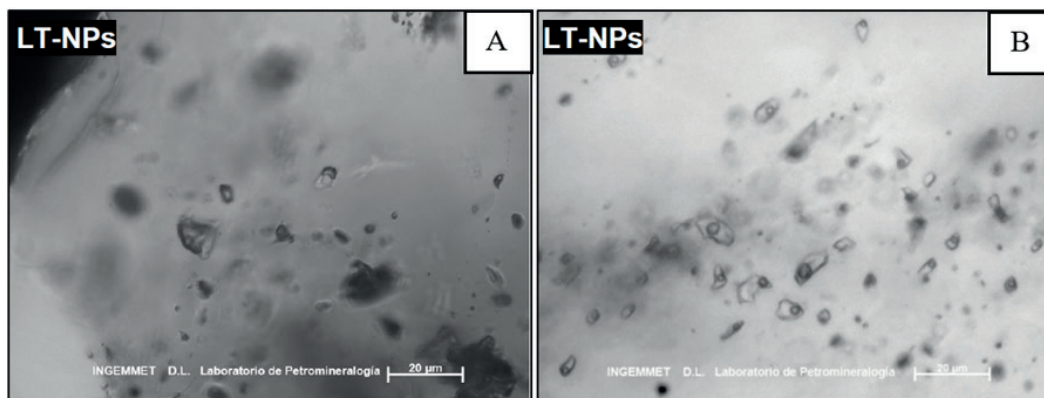


Figura 11. A: Familias de inclusiones primarias trifásicas irregulares ricas en líquido. B: Familia de inclusiones primarias bifásicas irregulares y tabulares ricas en líquido, e inclusiones secundarias bifásicas irregulares ricas en líquido.

en Acarí - Arequipa, en las montañas Romerillo, asociado espacialmente a los depósitos IOCG Pampa del Pongo y Hierro Acarí; Vivar Reyes (2019) reporta ocurrencias de cuarzo POD en la costa norte del Perú entre los paralelos 9° y 12°; la ocurrencia de brechas y cuerpos de hematita, y horizontes volcanoclásticos con fuerte hematización, y ocurrencia de vetas de cuarzo-hematita con textura crustiforme, con pátinas de óxidos de cobre cortando rocas volcanosedimentarias del Cretáceo (Grupo Casma). La presencia de un extenso halo de alteración sílice-sericita-pirita y un halo restringido al borde de los cuerpos silíceos de sílice-pirofilita-alunita que sugiere condiciones de fluidos ácidos, rocas alteradas con disminución de Cu, Pb, Zn, Al, Ti, Sc, Co y Mn y enriquecimiento en Au, As, Sr, Ba, V, Fe, Ni. Las inclusiones fluidas muestran temperaturas epitermales entre 329° y 138° C con salinidades de 0.7% a 9.73% NaCl-eq. dentro del cual se observa complejos procesos de evolución de fluidos que incluyen enfriamiento, dilución, mezcla y ebullición de fluidos, sin embargo, en una muestra se registró temperaturas de 605° a 560° C con salinidades de 47.66% a 44.82% NaCl eq., lo que parece

indicar que estos cuerpos silíceos se forman desde etapas tardimagmáticas.

En base a estas evidencias se propone que Cerro Colorado Chico corresponde a un lithocap con extensa alteración sílice – sericita – pirita, hematización, cuerpos silíceos (cuarzo POD) controlados estructuralmente, con halos de alteración argílica avanzada sílice-pirofilita-alunita, y vetas distales de cuarzo - hematita (ver Figura 12). Este lithocap formaría parte de un sistema magmático - hidrotermal tipo IOCG más grande asociado al emplazamiento de los plutones dioríticos/tonalíticos del Batolito de la Costa, que en profundidad pueden estar desarrollando brechas y mantos de magnetita, hematita y calcopirita, en un nivel de alteración sericítico y potásico.

La alteración argílica avanzada asociada a IOCGs ha sido reportada en algunos depósitos chilenos como en la zona de Copiapó, El Laco y Productora (Kreiner, 2011), (Kreiner & Barton, 2017) caracterizada por un ensamble cuarzo-pirofilita-hematita (Kreiner & Barton, 2017).

Nuestro modelo para Cerro Colorado Chico (Figura 12) sugiere la partición de dos fundidos inmiscibles uno rico en sílice y otro rico en hierro a partir de magmas intermedios poco diferenciados (dioritas/tonalitas), tal como lo explican Hou et al. (2018) y Tornos et al. (2016). La cristalización del fundido rico en hierro formaría depósitos de magnetita y apatito en profundidad y los fluidos que se exsuelven migran a través de estructuras hasta los niveles superiores donde se mezclan con fluidos externos que se infiltran lixivianando componentes de la roca encajonante en especial de los niveles evaporíticos, los cuales contribuyen y enriquecen a los fluidos derivados del magma, la mezcla de estos fluidos generan condiciones para formar brechas de magnetita, hematita y calcopirita, y mantos en los niveles favorables. Hacia los niveles más superiores donde predominan los fluidos superficiales diluidos forma brechas y cuerpos de hematita y horizontes hematitizados. Los fluidos silicatados que se exsuelven de los fundidos ricos en sílice se canalizan a través de las fallas para formar cuerpos silíceos (cuarzo POD) relativamente estériles.

La precipitación de óxidos de hierro como magnetita y hematita a partir de complejos clorurados de Fe generan HCl acidificando los fluidos que ascienden a los niveles superiores donde se condensan y generan una alteración ácida al reaccionar con la roca encajonante, formando un

lithocap con sílice-sericita-pirita, sílice-pirofilita-alunita restringida como halo de los cuerpos silíceos, y niveles hematitizados en horizontes favorables. Se postula el origen de un ensamble argílico avanzado con bajo contenido de azufre a partir de HCl generado por la precipitación de óxidos de hierro de complejos de cloruro de hierro de un fluido de alta salinidad por reacciones como  $3\text{FeCl}_2 + 4\text{H}_2\text{O} = \text{Fe}_3\text{O}_4 + 6\text{HCl} + \text{H}_2$  (Kreiner & Barton, 2017).

El modelo propuesto para Cerro Colorado Chico, permite sugerir un modelo generalizado de sistemas magmático – hidrotermales relacionado con mineralización de óxidos de hierro, cobre y oro (IOCG) para los depósitos de este tipo en Perú (Figura 13) en el que se establece una relación genética entre los depósitos tipo IOA – IOCG – Quartz POD, en el que se explica la evolución de los fluidos a partir de la separación de dos fundidos inmiscibles, uno rico en sílice y otro rico en hierro provenientes de un magma de composición intermedia poco diferenciado.

### V. CONCLUSIÓN

Se define el modelo genético del prospecto Cerro Colorado Chico, Ancash, como un lithocap con fuerte alteración sílice – sericita – pirita, hematitización penetrante,

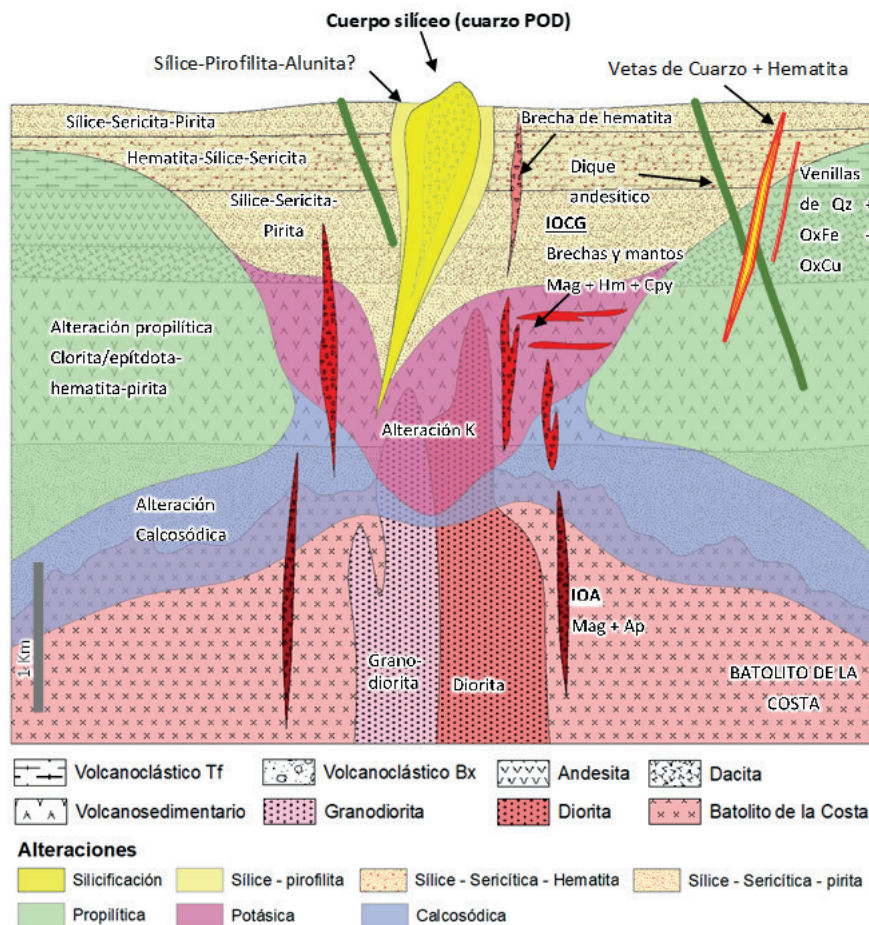
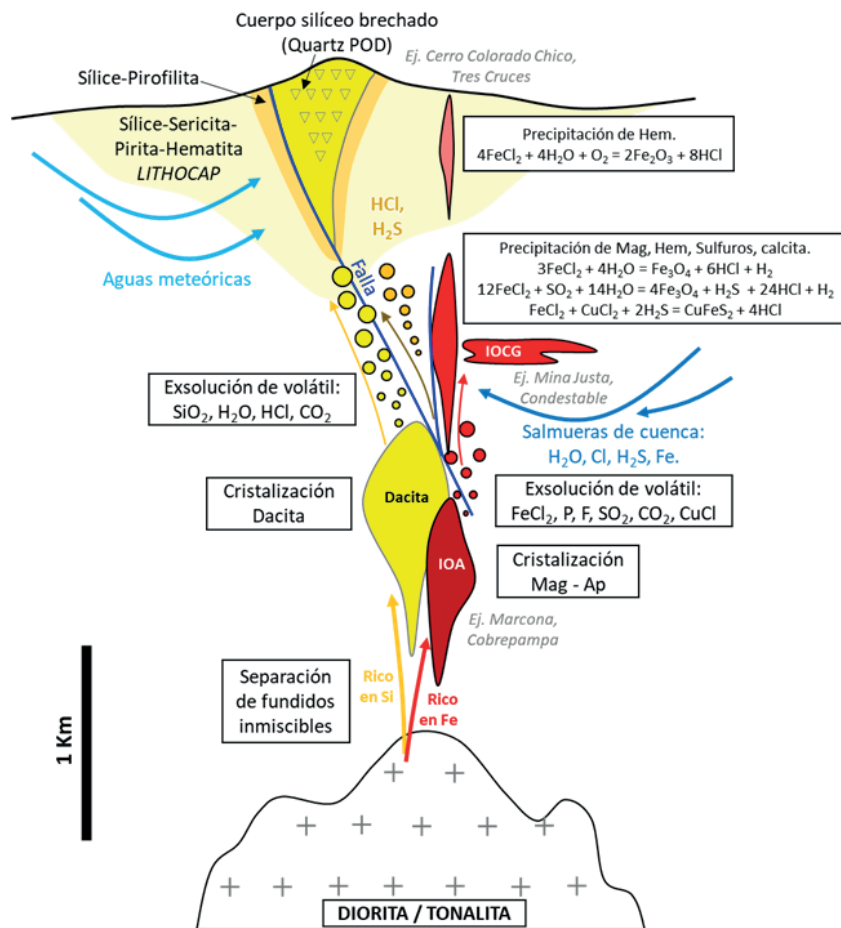


Figura 12. Modelo hipotético del depósito Cerro Colorado Chico. Elaboración propia.



**Figura 13.** Modelo idealizado para sistemas magmático-hidrotermales relacionados a mineralización IOCG en Perú.  
Elaboración propia.

cuerpos o pipes silíceos (cuarzo POD) controlados estructuralmente con halos de alteración argílica avanzada sílice-pirofilita-alunita, brechas y cuerpos de hematita, y vetas distales de cuarzo – hematita – óxidos de cobre, probablemente relacionado a un depósito tipo IOCG en profundidad, este modelo permitirá de manera significativa establecer nuevas perspectivas de exploración en la costa norte del Perú por depósitos tipo IOCG preservados en profundidad siguiendo las consideraciones litológicas, estructurales, geomofológicas, alteraciones-mineralización y geoquímicas inferidas a partir de las características presentadas en Cerro Colorado Chico.

## VI. AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a los integrantes del SEG Student Chapter UNI – 2019 por su aporte en la recolección de información de campo, a Miller Fernández por su colaboración en el procesamiento de imágenes satelitales, y a Fernando Tornos por sus comentarios enriquecedores.

## VII. REFERENCIAS

Acosta, J., Rivera, R., Valencia, M., Chirif, H., Huanacuni, D., Rodríguez, I., Villarreal, E., Paico, D., & Santisteban, A. (2020). Memoria mapa metalogénico del Perú. *INGEMMET*, 1–13. <https://portal.ingemmet.gob.pe/documents/73138/1231307/Memoria-del-Mapa-Metalogenetico-2020.pdf>

Biminchumo Sagástegui, E. M. G. (2013). *Análisis geológico del cuerpo de cuarzo Pod Caseli del IOCG DIVIMIN, usando como herramientas magnetometría, espectrometría y polarización inducida Ancash, Lima-Perú* [Universidad Nacional de Ingeniería]. <https://cybertesis.uni.edu.pe/handle/uni/10973>

Cobbing, E. J. (1973). *Geología de los cuadrángulos de Barranca, Ambar, Oyón, Huacho, Huaral y Canta (hojas 22-h, 22-i, 22-j, 23-h, 23-i, 23-j) - [Boletín A 26]*. INGEMMET Serie A: Carta Geológica Nacional. <https://repositorio.ingemmet.gob.pe/handle/20.500.12544/144>

Davies, J. F., & Whitehead, R. E. (2006). Alkali-Alumina and MgO-Alumina Molar Ratios of Altered and Unaltered Rhyolites. *Exploration and Mining Geology*, 15(1–2), 75–88. <https://doi.org/10.2113/GSEMG.15.1-2.75>

- Hitzman, M. W., Oreskes, N., & Einaudi, M. T. (1992). Geological characteristics and tectonic setting of proterozoic iron oxide (Cu-U-Au-REE) deposits. *Precambrian Research*, 58(1-4), 241-287. [https://doi.org/10.1016/0301-9268\(92\)90121-4](https://doi.org/10.1016/0301-9268(92)90121-4)
- Hou, T., Charlier, B., Holtz, F., Veksler, I., Zhang, Z., Thomas, R., & Namur, O. (2018). Immiscible hydrous Fe-Ca-P melt and the origin of iron oxide-apatite ore deposits. *Nature Communications* 2018 9:1, 9(1), 1-8. <https://doi.org/10.1038/s41467-018-03761-4>
- Kreiner, D. C. (2011). *Epithermal Style Iron Oxide(-Cu-Au) (=IOCG) Vein Systems and Related Alteration* [University of Arizona]. <https://repository.arizona.edu/handle/10150/203504>
- Kreiner, D. C., & Barton, M. D. (2017). Sulfur-poor intense acid hydrothermal alteration: A distinctive hydrothermal environment. *Ore Geology Reviews*, 88, 174-187. <https://doi.org/10.1016/J.OREGEOREV.2017.04.018>
- Lobo-Guerrero, A. (2004). *Quartz pods: an exploration guide to iron-oxide- copper-gold mineralization?* <https://es.scribd.com/doc/290601439/Quartz-pods-an-exploration-guide-to-iron-oxide-copper-gold-mineralization-Cuerpos-de-cuarzo-Quartz-pods-Guia-de-exploracion-para-mineralizacion>
- Martínez Valladares, W., Cerrón Zeballos, F., López M., W., Rodríguez B., L., Vera A., M., & Arcos Alarcón, F. (2014). *Quartz pods; una guía de exploración en yacimientos tipo IOCG; el caso de las montañas Romerillo - Acari / Arequipa Perú*. Congreso Peruano de Geología, 17. <https://repositorio.ingemmet.gob.pe/handle/20.500.12544/2734>
- Myers, J. S. (1972). *Geología de los cuadrángulos de Huarmey y Huayllapampa 21-g, 21-h - [Boletín A 33]*. INGEMMET, Carta Geológica Nacional. Serie A. <https://repositorio.ingemmet.gob.pe/handle/20.500.12544/152>
- Ninomiya, Y. (2004). Lithologic mapping with multispectral ASTER TIR and SWIR data. <https://doi.org/10.1117/12.511902>, 5234, 180-190. <https://doi.org/10.1117/12.511902>
- Pitcher, W. S. (1978). The anatomy of a batholith. *Journal of the Geological Society*, 135(2), 157-182. <https://doi.org/10.1144/GSJGS.135.2.0157>
- Reyes Vivar, P. J. (2019). Sobre el potencial de mineralización de Cu, Au tipo IOCG en la costa norte del Perú paralelo 9°-12°. *Proexplo*, 1-5. <https://app.ingemmet.gob.pe/biblioteca/pdf/Lib-122-115.pdf>
- Sillitoe, R. H. (2003). Iron oxide-copper-gold deposits: an Andean view. *Mineralium Deposita* 2003 38:7, 38(7), 787-812. <https://doi.org/10.1007/S00126-003-0379-7>
- Tornos, F., Velasco, F., & Hanchar, J. M. (2016). Iron-rich melts, magmatic magnetite, and superheated hydrothermal systems: The El Laco deposit, Chile. *Geology*, 44(6), 427-430. <https://doi.org/10.1130/G37705.1>
- Torres Guerra, A., Cerrón Sarcco, J., & López Varillas, D. (2020). Localización y evidencias geológicas enfocados en la determinación del yacimiento tipo IOCG Cerro Colorado Chico, Ancash-Perú. *Revista Del Instituto de Investigación de La Facultad de Minas, Metalurgia y Ciencias Geográficas*, 23(45), 63-73. <https://doi.org/10.15381/iigeo.v23i45.18049>
- Torres Guerra, J. A., & Cerrón Sarcco, J. F. (2021). Vetas epitermales y su relación con un posible depósito tipo IOCG en Cerro Colorado Chico, Ancash-Perú. *Revista Del Instituto de Investigación de La Facultad de Minas, Metalurgia y Ciencias Geográficas*, 24(47), 155-162. <https://doi.org/10.15381/iigeo.v24i47.20660>

### Contribución de autoría:

Conceptualización: O.B. y A.T., Curación de datos: A.T. y O.B., Análisis formal: O.B., Investigación: O.B. y A.T., Metodología: O.B., Administración del proyecto: A.T. y O.B., Supervisión: A.T., Visualización: O.B., Redacción - borrador original: O.B., Redacción - revisión y edición: A.T. Siendo, O.B.: Orlando Bazán Santa Cruz y A.T.: Jesús Alberto Torres Guerra