

Evolución de fluidos epitermales relacionados a un sistema IOCG en Cerro Colorado Chico

Epithermal fluids evolution related to an IOCG system in Cerro Colorado Chico

Orlando Bazán Santa Cruz^{1,a}, Jesús Alberto Torres Guerra^{1,b}

Recibido: 02/12/2022 - Aprobado: 22/02/2023 – Publicado: 30/03/2023

RESUMEN

Cerro Colorado Chico se ubica en la región Ancash, costa norte del Perú, conformado por cuerpos silíceos brechados con halos restringidos de alteración argílica avanzada sílice-pirofillita-alunita y extensa alteración sílice-sericita-pirita, brechas y cuerpos de hematita, horizontes hematizados que afectan a rocas volcano-sedimentarias del Grupo Casma. Se ha realizado un estudio de microtermometría de inclusiones fluidas en 4 muestras con un total de 55 inclusiones fluidas primarias y secundarias en cuarzo. Se distinguen dos estadios, el primero a temperaturas mesotermales entre 605° y 560°C con salinidades de 47.66% a 44.82% NaCl-eq., y el segundo a temperaturas 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 de fluidos. Este estudio permite explicar los procesos que tienen lugar en el ambiente epitermal de los sistemas magmático-hidrotermal tipo IOCG a partir de fluidos derivados de fundidos silicatados ricos en sílice que se particionan a partir de magmas poco diferenciados, al descomprimirse se separan en una fase líquida densa salina y una fase vapor de baja densidad que asciende a los niveles superiores y es responsable de la formación de los cuerpos silíceos brechados y el ensamble de alteración argílica avanzada.

Palabras claves: Cerro Colorado Chico, cuarzo POD, fluidos epitermales, inclusiones fluidas, microtermometría.

ABSTRACT

Cerro Colorado Chico located in Ancash region, northern coast of Peru. Brecciated siliceous bodies occur with restricted halos of advanced argillic alteration silica-pyrophyllite-alunite and extensive silica-sericite-pyrite alteration, breccias and hematite bodies, hematitized horizons into volcano-sedimentary rocks of the Casma Group. A microthermometry study of fluid inclusions has been carried out in 4 samples with a total of 55 primary and secondary fluid inclusions in quartz. Two stages are distinguished, the first at mesothermal temperatures between 605° and 560° C with salinities of 47.66% to 44.82% NaCl eq., and the second at epithermal temperatures between 329° and 138° C with salinities of 0.7% to 9.73% NaCl eq., with complex fluids evolution processes as cooling, dilution, mixing and boiling. This study permit to explain the processes that take place in the epithermal environment of IOCG-type magmatic-hydrothermal systems from fluids derived of silica-rich silicate melts that partition from poorly differentiated magmas, when decompressed separate into a dense saline liquid phase and a low-density vapor phase that rises to the upper levels and is responsible for the formation of the brecciated siliceous bodies and the advanced argillic alteration.

Keywords: Cerro Colorado Chico, epithermal fluids, fluid inclusions, microthermometry, quartz POD.

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

a Candidato a magíster en Geología, mención en Recursos Mineros

Autor para correspondencia: orlando.bazan@unmsm.edu.pe - ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7764-9460>

b Docente. E-mail: albertorresg@hotmail.com - ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8186-5249>

I. INTRODUCCIÓN

El conocimiento de los depósitos IOCG presenta una serie de controversias respecto a su génesis y su relación con otros depósitos, así como se conoce poco sobre sus manifestaciones y procesos de evolución de los fluidos hidrotermales en el ambiente epitermal.

En algunos depósitos chilenos como en la zona de Copiapó, El Laco y Productora ha sido reportada una alteración argílica avanzada asociada a sistemas IOCG (Sillitoe y Burrows, 2002; Kreiner, 2011; Kreiner y Barton, 2017), caracterizada por un ensamble cuarzo-pirofilita-hematita, y que se diferencia de la alteración argílica avanzada relacionada a depósitos tipo pórfido por su bajo contenido de azufre, y por lo tanto carecen de abundante pirita y otros sulfuros, alunita hipógena, y rocas lixiviadas de Al (cuarzo “vuggy” residual) así como de mineralización rica en Au-Cu-Ag ± As (Kreiner y Barton, 2017).

Bazán y Torres (2022) describen en Cerro Colorado Chico una 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, que formaría parte de un sistema magmático-hidrotermal tipo IOCG.

Esta investigación pretende explicar los diferentes procesos que tienen lugar en el ambiente epitermal de los sistemas magmático-hidrotermal tipo IOCG incluyendo la evolución de los fluidos hidrotermales basados en estudios de microtermometría de inclusiones fluidas y sus manifestaciones de alteración y mineralización que se reconocen en campo basada en las observaciones y análisis de muestras del prospecto Cerro Colorado Chico en Ancash.

II. METODOLOGÍA

2.1. Área de estudio

El área de estudio se ubica en la Franja Costanera del Norte del Perú, 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, Km 237 de la Panamericana Norte (Figura 1).

2.2. Métodos

Para esta investigación se consideran resultados de cartografía geológica, estudios petrominerales e inclusiones fluidas.



Figura 1. Ubicación del prospecto Cerro Colorado Chico.

El estudio de inclusiones fluidas se realizó en el laboratorio de Petromineralogía del INGEMMET, se usó un microscopio electrónico para identificar las inclusiones fluidas en cuatro muestras, en las cuales se reconocieron familias de inclusiones fluidas primarias bifásicas (IF-BIF), de formas irregulares y tabulares, de tipo L con grado de relleno (FILL) hasta de 0.30 y con tamaños hasta de 18 μm , y familias de inclusiones fluidas primarias trifásicas (IF-TRIF), de formas irregulares, de tipo L ricas en líquido con grado de relleno (FILL) hasta de 0.45 y con tamaños hasta de 10 μm . A partir de las cuales se realizó el análisis microtermométrico para determinar las temperaturas de homogeneización y salinidad de los fluidos.

III. RESULTADOS

3.1. Geología del prospecto Cerro Colorado Chico.

El prospecto cerro Colorado Chico se caracteriza por la presencia de cuerpos de sílice (cuarzo POD) brechado en la parte central (Figura 2A) que grada a masivo y granular lateralmente, con un halo restringido de alteración argílica avanzada de textura *patchy* con sílice-pirofilita-alunita (Figura 2B) y una extensa silicificación con sericita y pirita

diseminada (Figura 2C), zonas con fuerte hematización (Figura 2D) y débil a moderada cloritización que se extiende distalmente. La característica principal de estos cuerpos silíceos 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. (Bazán y Torres, 2022).

Las rocas hospedantes consisten en una secuencia de rocas volcánicas lávicas bimodales, andesitas y dacitas, intercaladas con secuencias volcanoclásticas del Grupo Casma, donde se distinguen tres unidades principales: (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

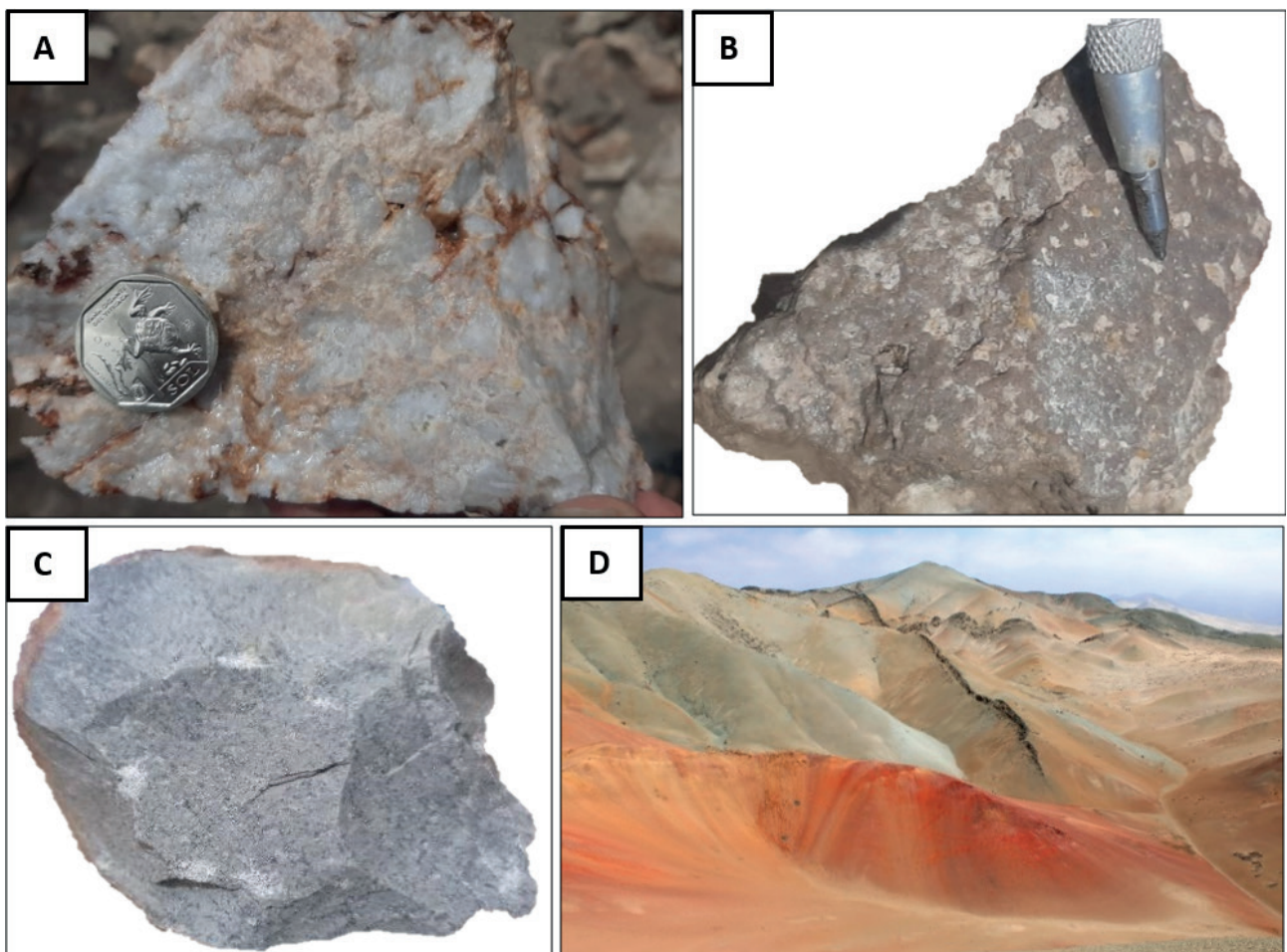


Figura 2. A. Brecha silícea, clastos de sílice blanquecina cementados por sílice rosácea por el contenido de hematita en su red cristalina. B. Alteración argílica avanzada, ensamble sílice - pirofilita con textura *patchy*. C. Roca dacítica con silicificación moderada y pirita diseminada (3%). D. Cuerpo hematizado cortando a la secuencia volcanoclásticas y diques andesíticos (Foto: Eber Carbajal).

superior, constituía por intercalación de lavas andesíticas, dacíticas y riolíticas. (Bazán y Torres, 2022).

Las principales evidencias de mineralización en el prospecto Cerro Colorado Chico son los cuerpos silíceos (cuarzo POD), brechas y cuerpos de hematita (Figura 3), y vetas de cuarzo con hematita que afloran hacia el SE de Cerro Colorado Chico, las brechas de hematita se caracterizan por ser clasto-soportadas, monomicticas 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 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. (Bazán y Torres, 2022).

3.2. Inclusiones fluidas

Se analizaron 4 muestras (Figura 4), en cada una se seleccionaron 3 campos con un total de 55 inclusiones

fluidas en cuarzo, el resumen de los datos obtenidos se muestra en la tabla 1, donde también se especifica las fases de inclusiones, tipo, tamaño, grado de relleno, temperatura de fusión, salinidad y temperatura de homogeneización.

Las muestras corresponden a estructuras silíceas, cuarzo oqueroso, brechas silíceas y brecha de hematita, con múltiples fases de cuarzo hidrotermal, con óxidos de hierro, arcillas y ocasionales sulfuros, como se explica en la tabla 2

3.3. Temperatura de homogeneización y salinidad de los fluidos

Muestra 1: presenta dos poblaciones de inclusiones fluidas, la primera con temperatura de homogeneización que varían entre 560° y 605°C y la segunda entre 164° y 286°C; estas poblaciones poseen salinidades entre 45% a 48% y 2.5% a 5.0% NaCl eq., respectivamente. Lo cual indica un origen magmático-hidrotermal seguido de procesos de enfriamiento y dilución del fluido gatillado por una mezcla con fluidos externos. En cada población se puede observar

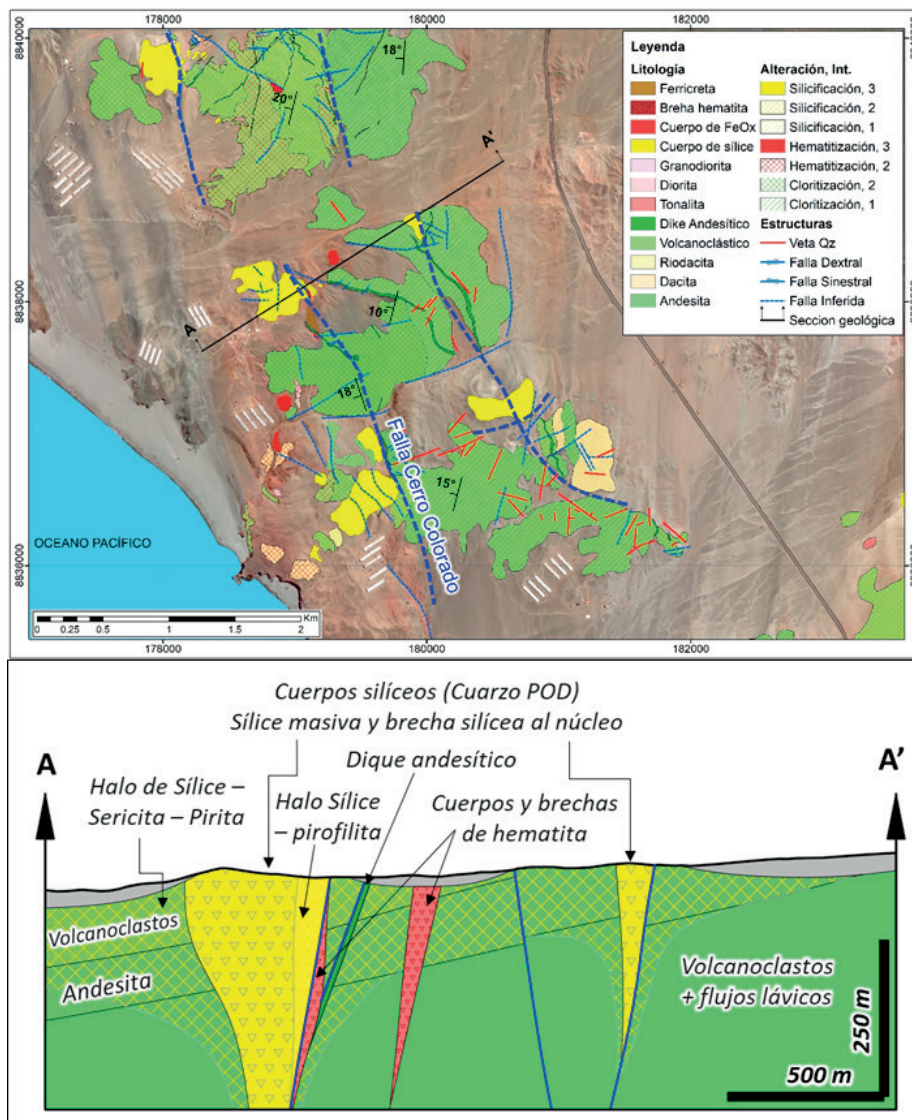


Figura 3. Arriba: mapa geológico. Abajo: sección interpretada en la línea AA'.

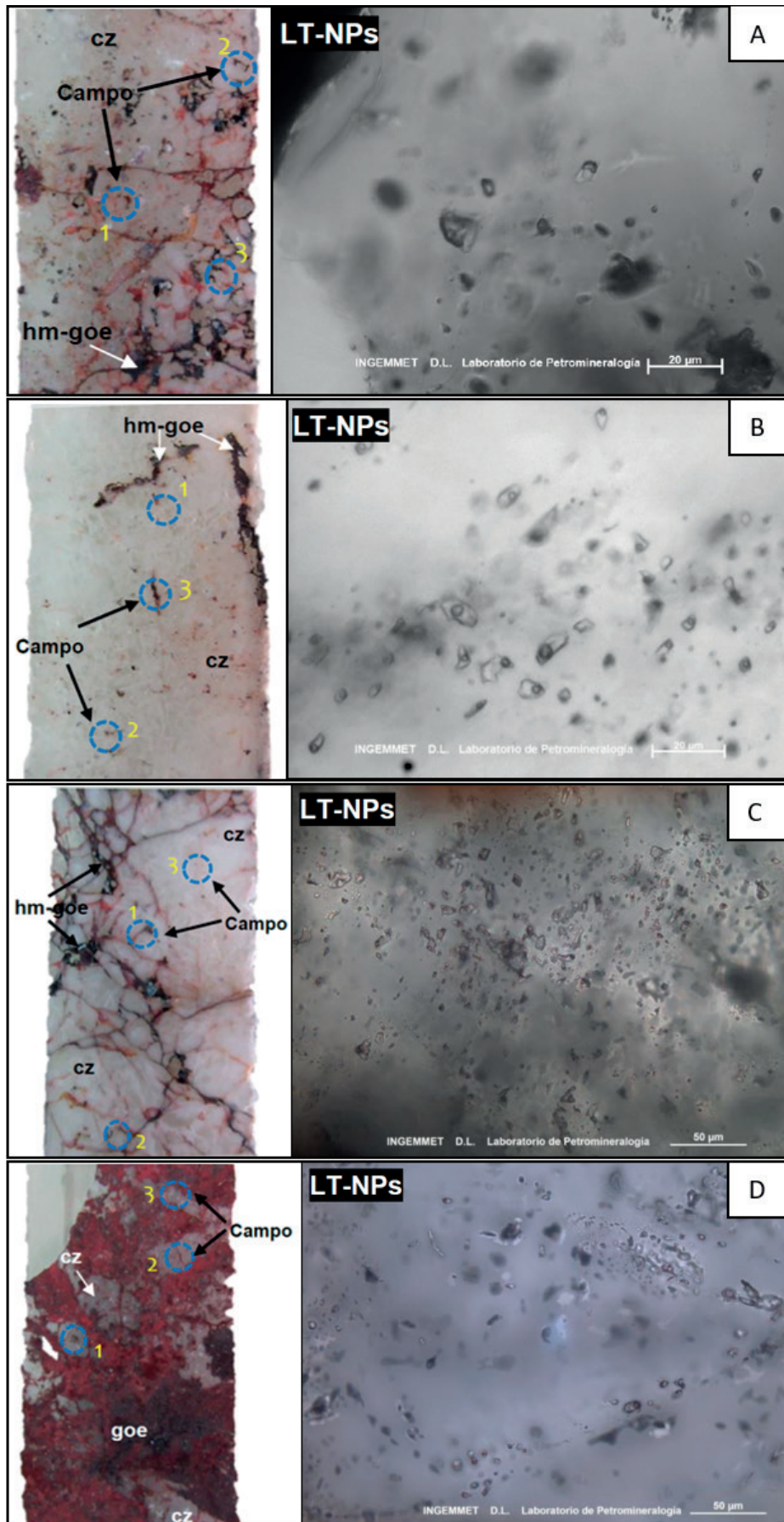


Figura 4. Secciones delgadas mostrando los campos de análisis y micrografía de inclusiones fluidas para la muestra 1 (A), muestra 2 (B), Muestra 3 (C) y muestra 4 (D).

Tabla 1. Resumen de los datos de inclusiones fluidas obtenidas del prospecto Cerro Colorado Chico.

Muestra	Campo	Inclusiones	FASES	MIN	TIPO	$\Phi\mu$	FILL	-Tf (°C)	NaCl (wt%)	Th (°C)
Muestra 1	1	5	TRIF-P	cz	Sw-R, Sw-IR	8-10	4-5	0	44.82 - 47.66	560 - 605
	2	2	BIF-P	cz	IR, Lw-IR	4-7	7.5-8.5	2-2.2	3.39 - 3.71	190 - 194
	3	8	BIF-P	cz	Lw-IR, Lw-R	8 - 12	7.5 - 9.5	1.5 - 3	2.57 - 4.96	164 - 286
Muestra 2	1	5	BIF-P	cz	Lw-IR	4 - 9	6.5 - 9.5	1.2 - 6.4	2.07 - 9.73	185 - 282
	2	4	BIF-P	cz	Lw-IR	7 - 10	5.3 - 9	1.8 - 6	3.06 - 9.21	207 - 295
	3	3	BIF-P	cz	Lw-IR	4 - 6	5.5 - 9	1.5 - 5.6	2.57 - 8.68	142 - 270
Muestra 3	1	2	BIF-P	cz	Lw-IR	7 - 10	9	4 - 4.2	6.45 - 6.74	168 - 190
	2	6	BIF-P	cz	Lw-IR	6 - 14	7.5 - 9.5	2.4 - 3.8	4.03 - 6.16	167 - 243
	3	3	BIF-P	cz	Lw-IR	6 - 8	7.5 - 8.5	2.8 - 3.5	4.65 - 5.71	165 - 280
Muestra 4	1	7	BIF-P	cz	Lw-IR, Lw-R	5 - 14	7.5 - 9.5	1.7 - 5.6	2.9 - 8.68	164 - 203
	2	7	BIF-P	cz	Lw-IR	6 - 18	6.5 - 9	0.4 - 5.8	0.7 - 8.95	173 - 329
	3	3	BIF-P	cz	Lw-IR, Lw-R	6 - 8	7.5 - 9	3.1 - 5.4	5.11 - 8.41	138 - 215

TRIF-P: Inclusiones primarias trifásicas, BIF-P: inclusiones primarias bifásicas, cz: cuarzo, Sw-R: inclusiones regulares ricas en sales, Sw-IR: inclusiones irregulares ricas en sales, Lw-R: inclusiones regulares ricas en líquido, Lw-IR: inclusiones irregulares ricas en líquido. $\Phi\mu$: tamaño, FILL: grado de relleno, Tf: temperaturas de fusión del hielo, NaCl: Salinidad (NaCl eq.), Th: temperatura de homogeneización.

Tabla 2. Descripción de las muestras tomadas para el estudio de inclusiones fluidas.

Muestra	Estructura	Mineral principal	Minerales secundarios	Minerales accesorios	Descripción
Muestra 1	Cuarzo oqueroso	Cuarzo II	Óxidos de hierro, micas y arcillas	Pirita	Inclusiones bifásicas menores a 12 μm . Inclusiones trifásicas menores a 10 μm
Muestra 2	Brecha silícea	Cuarzo II y III	Óxidos de hierro, micas, arcillas y carbonatos	Pirita	Inclusiones bifásicas menores a 10 μm
Muestra 3	Brecha silícea	Cuarzo II y III	Óxidos de hierro, micas, arcillas, sericita	Pirita	Inclusiones bifásicas menores a 14 μm . Inclusiones trifásicas menores a 10 μm
Muestra 4	Brecha de hematita	Cuarzo y hematita	Óxidos de hierro y micas	Pirita y calcopirita	Inclusiones bifásicas menores a 18 μm

diferentes procesos en la evolución de los fluidos, así, en el campo 1 donde se ha encontrado familias de inclusiones fluidas primarias Trifásicas, ricas en líquido se observa un proceso de dilución (Figura 5A-a) de 47.66% a 44.82% NaCl eq a medida que el fluido se enfría de 605° a 560°C, mientras que en los campos 2 y 3 donde se ha encontrado familia de inclusiones fluidas primarias bifásicas, ricas en líquido, se observa un proceso de ebullición (Figura 5A-b) a medida que el fluido se enfría de 286° a 215°C lo cual provoca un aumento en la salinidad de 2.57% a 4.95% de NaCl eq., y un proceso de dilución (de 4.95% a 2.57% NaCl eq) cuando el fluido de enfría de 194° a 164°C (Figura 5A - c). Estas características evidencian la existencia de 2 pulsos hidrotermales; el primero caracterizado por fluidos salinos de alta temperatura, probablemente derivados de un magma en profundidad, que al descomprimirse se particiona en dos fases, una fase vapor de baja densidad y salinidad y una fase líquida salina. Y un segundo pulso hidrotermal caracterizado por fluidos de baja temperatura que sufren ebullición y probable mezcla con fluidos salinos externos, luego enfriamiento y dilución.

Muestra 2: presenta tres poblaciones de inclusiones, la primera con temperatura de homogeneización que varían entre 265 y 295 °C, la segunda entre 226 y 261 °C y la tercera entre 142 y 207 °C; con salinidades entre 2.0 y 10.0 % de NaCl eq. y se puede distinguir al menos tres procesos de evolución de los fluidos, primero ocurre una mezcla de

fluidos con fluidos externos salinos, a temperaturas de 265 a 295 °C provocando un incremento en la salinidad de 2.07 a 6.45 % NaCl eq., seguido de un proceso de ebullición a medida que enfría el fluido de 261 a 226 °C que incrementa la salinidad de 8.68 a 9.73 % NaCl eq. y luego un proceso de dilución y enfriamiento de 207 a 142 °C con salinidades de 4.96 a 4.03 % NaCl eq. Figura 5B.

Muestra 3: presenta dos poblaciones de inclusiones, la primera con temperatura de homogeneización que varían entre 186 y 280 °C y la segunda entre 165 y 221 °C; con salinidades entre 4.0 y 7.0 % NaCl eq., dentro de las cuales se puede distinguir una serie de procesos de evolución de los fluidos, partiendo con un proceso de enfriamiento desde los 280°C hasta los 243°C con salinidades alrededor de 4.65 % NaCl eq., seguido de un proceso de dilución y enfriamiento del fluido hasta los 186 °C, con salinidades entre 4.8 a 4.03 % NaCl eq., a los 221 °C se produce una mezcla con fluidos salinos externos que provoca un incremento en la salinidad hasta 5.71 % NaCl eq., luego se observa una relativa dilución hasta 186 °C con 5.56 % NaCl eq., seguido de un proceso corto de ebullición que incrementa la salinidad hasta 5.71 % NaCl eq. a 165°C donde se observa un fuerte proceso de mezcla isotérmica con salinidades entre 5.71 y 6.45, probablemente debido a la inyección fluidos externo aún más salinos que se diluían de 6.74 a 6.45 % NaCl eq. a medida que se enfriaban de 190 a 168 °C. Figura 5C.

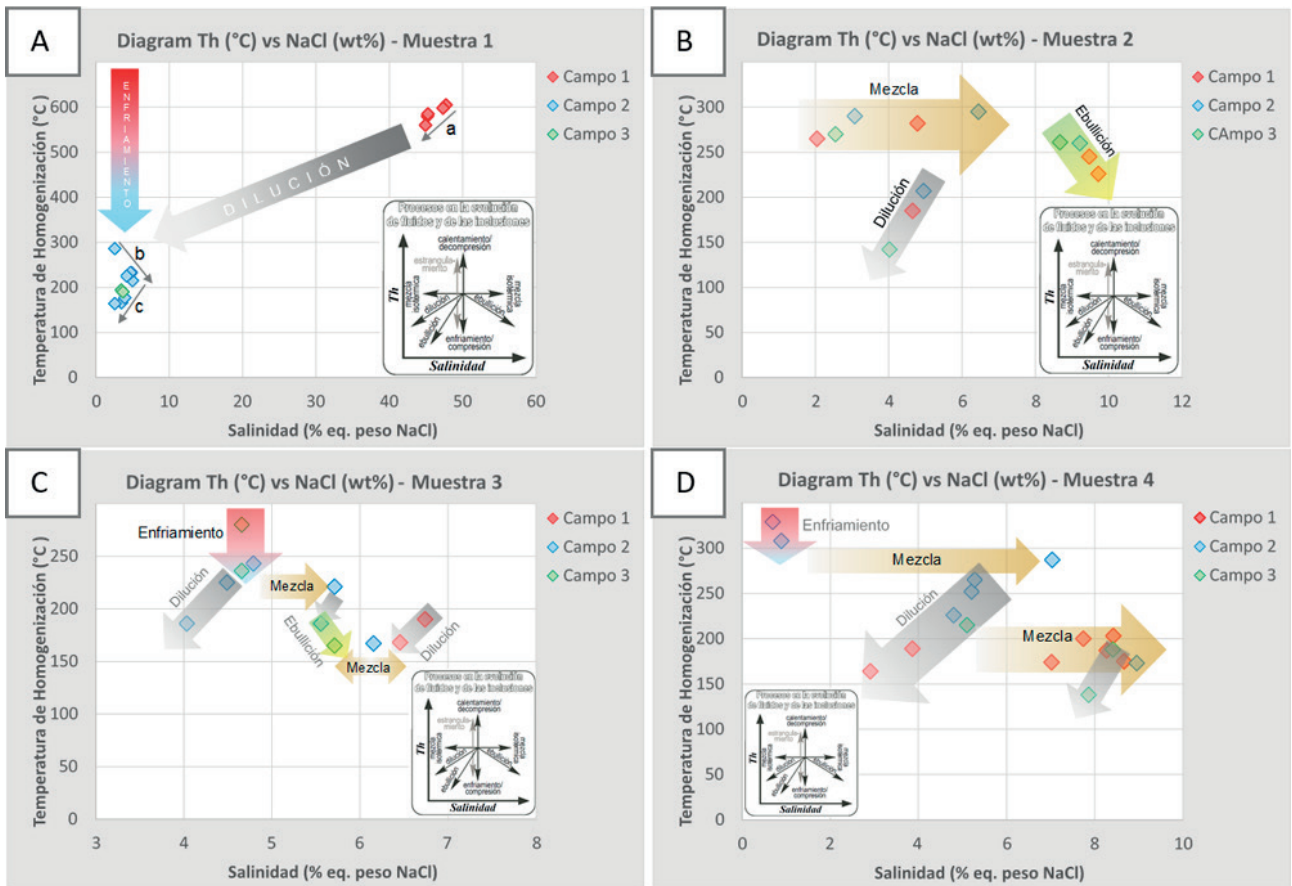


Figura 5. Diagramas de Salinidad (% NaCl Eq.) vs T° Homogeneización de inclusiones fluidas en la muestra 1 (A), muestra 2 (B), Muestra 3 (C) y muestra 4 (D) para los 3 campos estudiados en cada muestra.

Muestra 4: presenta tres poblaciones de inclusiones, la primera con temperaturas que varían entre 308 y 329 °C, la segunda entre 164 y 287 °C y la tercera entre 138 y 203 °C; con salinidades de 0.7 a 0.88 % NaCl eq., 2.9 a 7.02 % NaCl eq. y 7.0 a 8.85 % eq. peso NaCl, respectivamente. En las cuales se puede distinguir al menos tres procesos en la evolución de fluidos, iniciando con un fluido diluido que se enfría de 329 a 308 °C con salinidades entre 0.7 a 0.88% NaCl eq., luego una mezcla isotérmica con fluidos salinos alcanzando una salinidad de 7.02% NaCl eq. a 287°C, seguido de un proceso de dilución constante a medida que se enfría el fluido desde 287 °C a 164 °C donde alcanza una salinidad de 2.9% NaCl eq. a 287°C, luego un segundo proceso de mezcla que se producen entre 203 y 175 °C que provoca un incremento de la salinidad hasta 8.95% NaCl eq., seguido de dilución hasta los 138 °C alcanzado una salinidad de 7.86% NaCl eq. Figura 5D.

3.4. Evolución de fluidos hidrotermales del prospecto Cerro Colorado Chico.

El estudio de inclusiones fluidas en el prospecto Cerro Colorado Chico permiten distinguir dos estadios de fluidos hidrotermales (Figura 6), el primero a temperaturas 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 4A) y una fase vapor de baja densidad reflejada en inclusiones primarias bifásicas. 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 4B), 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 6), pulsos de incremento en la salinidad de los fluidos.

IV. DISCUSIÓN

En base a las evidencias de campo y al estudio de inclusiones fluidas se propone que el prospecto Cerro Colorado Chico corresponde a manifestaciones epitermales de un sistema magmático-hidrotermal relacionado a un depósito tipo IOCG en profundidad asociado al emplazamiento de los plutones dioríticos/tonalíticos del Batolito de la Costa dentro de secuencias volcanosedimentarias del grupo Casma.

La ocurrencia de cuerpos de sílice multifásico con brechas silíceas, sílice masiva, granular, oquerosa/vesicular,

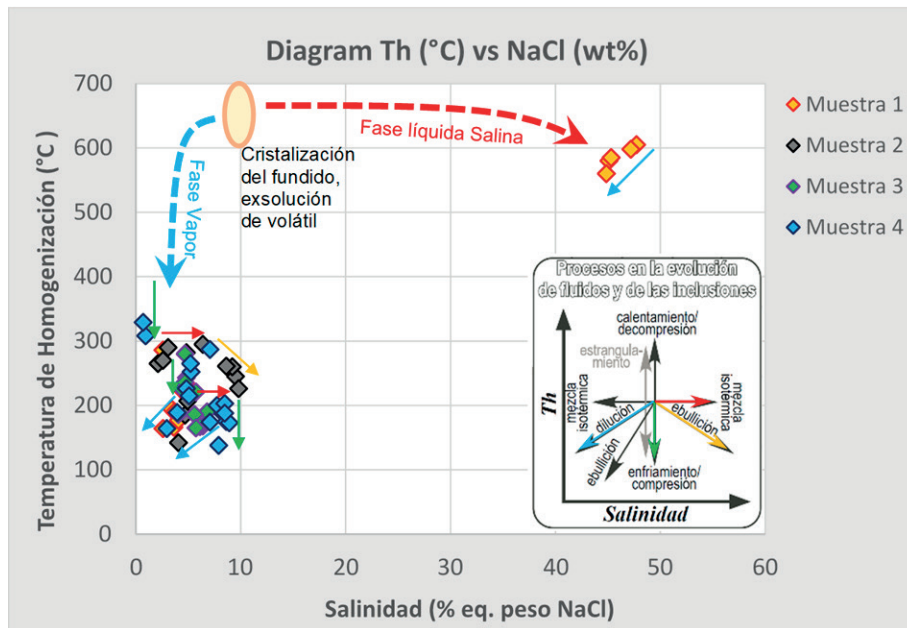


Figura 6. Evolución de fluidos a partir del estudio de inclusiones fluidas en el prospecto Cerro Colorado Chico. Bazán y Torres (2022).

con presencia de hematita en su red cristalina (sílice rosácea) y patinas de óxidos de hierro en las fracturas, con complejos procesos de evolución de fluidos que incluyen enfriamiento, dilución, mezcla y ebullición de fluidos, sugieren una fuerte actividad hidrotermal relacionados a sistemas magmático-hidrotermales, aunque son relativamente estériles. A este tipo de estructuras en el Arco Lufiliano Lobo-Guerrero (2004) lo denominó “Quartz Pod” (cuarzo POD) y los relacionó a manifestaciones distales de depósitos IOCG, y han sido registradas por varios autores a lo largo de la costa peruana, como Biminchumo (2013) en Ancash, el cuerpo Caseli; Martínez et al (2014) en Acarí - Arequipa, en las montañas Romerillo, asociado espacialmente a los depósitos IOCG Pampa del Pongo y Hierro Acarí; Reyes (2019) reporta ocurrencias de cuarzo POD en la costa norte del Perú entre los paralelos 9° y 12°.

La asociación espacial y genética de estas estructuras síliceas con halos de alteración argílica avanzada sílice-pirofilita-alunita, con una extensa alteración sílice – sericita – pirita, hematización, cloritización y vetas distales de cuarzo – hematita, es concordante con el desarrollo de un “lithocap” relacionado a un sistema magmático - hidrotermal tipo IOCG como sugieren Bazán y Torres (2022); similar a la alteración argílica avanzada asociada a IOCGs reportada en algunos depósitos chilenos como en Copiapó, El Laco y Productora (Kreiner 2011, Kreiner & Barton 2017), caracterizada por un ensamble cuarzo-pirofilita-hematita (Kreiner & Barton 2017)

El modelo genético propuesto para Cerro Colorado Chico (Bazán y Torres, 2022) sugiere la partición de dos fundidos inmiscibles uno rico en sílice y uno rico en hierro a partir de magmas intermedios poco diferenciados (dioritas/tonalitas), tal como lo explican Hou et al. 2018, Tornos, Velasco y Hanchar, 2016 y Lledo et al., 2020. La

cristalización del fundido rico en hierro formaría depósitos de magnetita y apatito (IOA) 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 a través de las rocas volcano-sedimentarias del Grupo Casma, se calientan en profundidad y lixivian componentes de la roca encajonante en especial de los niveles evaporíticos (ricos en sales), los cuales contribuyen y enriquecen a los fluidos derivados del magma, la mezcla de estos fluidos generan condiciones explosivas que forman brechas y cuerpos hematizados. Los fluidos silicatados que se exsuelven de los fundidos ricos en sílice se canalizan a través de las fallas para formar cuerpos y brechas síliceas relativamente estériles en los niveles superiores, a condiciones epitermales, tal como se muestra en el estudio de inclusiones fluidas; estas brechas síliceas tienen la particularidad de estar conformadas por clastos de sílice cementados por sílice, en Cerro Colorado Chico se observa que la sílice que cementa las brechas tiene tonalidades rosáceas por el contenido de hematita en su red cristalina lo que indica que dichos fluidos están asociados a fluidos ricos en hierro en profundidad.

Con las observaciones realizadas en Cerro Colorado Chico, Bazán y Torres (2022) sugieren un modelo generalizado de sistemas magmático – hidrotermales relacionado con mineralización tipo IOCG en Perú (Figura 7) en el que se establece una relación genética entre los depósitos tipo IOA – IOCG – Cuarzo POD, que 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, así como la evolución de los fluidos en el ambiente epitermal con complejos procesos de enfriamiento, dilución, mezcla y ebullición.

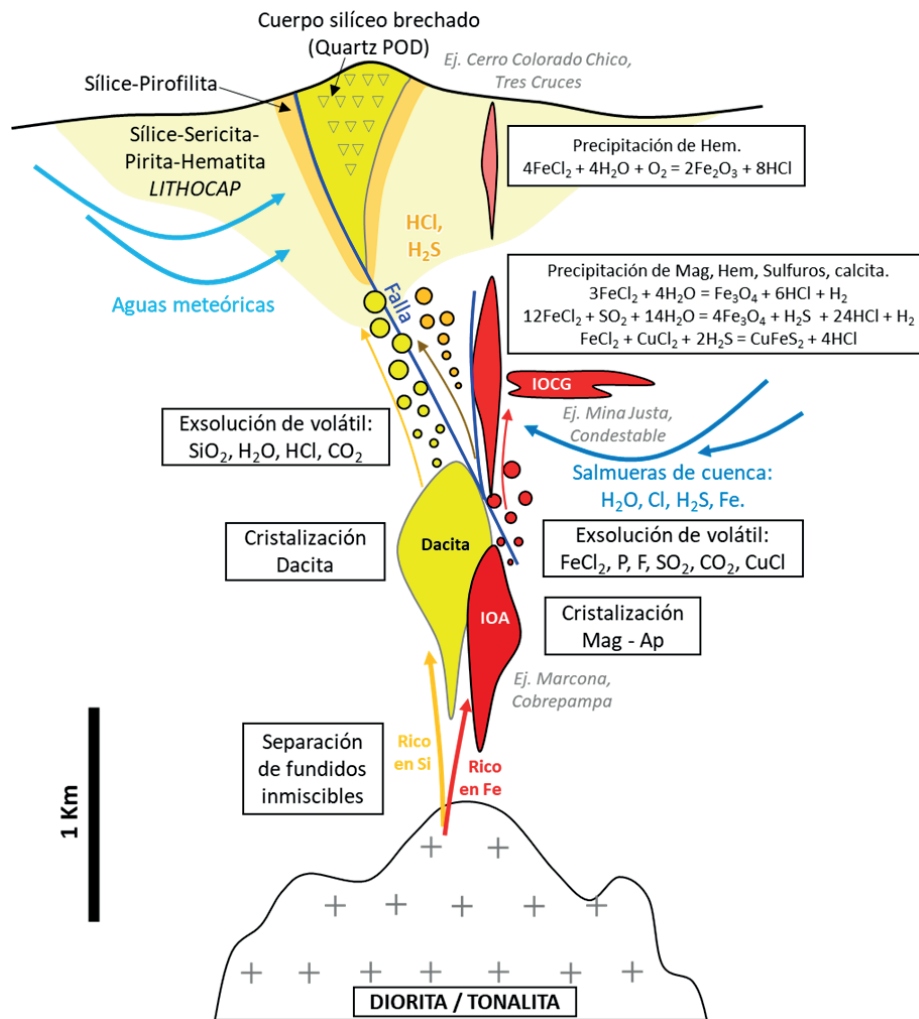


Figura 7. Modelo generalizado para sistemas magmático-hidrotermales relacionados a mineralización IOCG en Perú. Bazán y Torres (2022).

V. CONCLUSIÓN

El estudio de microtermometría de inclusiones fluidas en Cerro Colorado Chico permite explicar los diferentes procesos que tienen lugar en el ambiente epitermal de los sistemas magmático-hidrotermal tipo IOCG. Se distinguen dos estadios de fluidos hidrotermales, el primero a temperaturas mesotermiales entre 605° a 560° C con salinidades de 47.66% a 44.82% NaCl eq., derivados por exsolución magmática de fundidos silicatados ricos en sílice que se particiona a partir de magmas intermedios poco diferenciados, que al descomprimirse se separa en dos fases, una fase densa salina y una fase vapor de baja densidad; y el segundo a temperaturas epitermales entre 329° y 138° C con salinidades de 0.7% a 9.73% NaCl eq., en el cual se observa complejos procesos de evolución que incluyen enfriamiento, dilución, mezcla y ebullición de fluidos, con dos procesos de mezcla isotérmica con fluidos externos ricos en sales, entre 295° y 280° C y entre 186° y 165° C, estos procesos se reflejan en campo en la ocurrencia de brechas silíceas multifacéticas con clastos silíceos cementados por sílice.

VI. AGRADECIMIENTO

Los autores agradecen a los revisores por sus comentarios y sugerencias.

VII. REFERENCIAS

- Bazán, O., & Torres, J. A. (2022). Modelo genético del prospecto Cerro Colorado Chico: Un aporte a la exploración en la costa norte del Perú. *Revista Del Instituto De investigación De La Facultad De Minas, Metalurgia Y Ciencias geográficas*, 25(49), 31–43. <https://doi.org/10.15381/iigeo.v25i49.21977>
- Biminchumo, E. M. G. (2013). Análisis geológico del cuerpo de cuarzo pod Caseli del IOCG Divimín, usando como herramientas: magnetometría, espectrometría y polarización inducida. Ancash, Lima – Perú. Tesis de grado, UNI, 139 p. <http://cybertesis.uni.edu.pe/handle/uni/10973>
- Hou, T., Charlier, B., Holtz, F., Veksler, I., Zhang, Z. C., Thomas, R., Namur, O. (2018). Immiscible hydrous Fe–Ca–P melt and

the origin of iron oxide-apatite ore deposits. *Nat Commun* 9:1415. <https://doi.org/10.1038/s41467-018-03761-4>

Kreiner, D.C., y Barton, M.D. (2017). Sulfur-poor intense acid hydrothermal alteration: A distinctive hydrothermal environment. *Ore Geology Reviews*, v. 88, p. 174–187. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2017.04.018>

Kreiner, D.C. (2011). Epithermal style iron oxide (-Cu-Au) (=IOCG) vein systems and related alteration. Tesis doctoral, Universidad de Arizona. 659 p. <https://repository.arizona.edu/handle/10150/203504>

Lledo, H. L., Naslund, H. R. & Jenkins, D. M. (2020). Experiments on phosphate–silicate liquid immiscibility with potential links to iron oxide apatite and nelsonite deposits. *Contrib. Mineral. Petrol.* 175, 111. <https://doi.org/10.1007/s00410-020-01751-8>

Lobo-Guerrero, A. (2004). Quartz pods: an exploration guide to iron-oxide–copper–gold mineralization?. SEG 2004 Predictive Mineral Discovery Under Cover Economic Geology Research Institute. 4p

Martínez, W., Cerrón, F., López, W., Rodríguez, L., Vera, M., y Arcos, F. (2014). Quartz pods; una guía de exploración en yacimientos tipo IOCG; el caso de las montañas Romerillo – Acari / Arequipa Perú. XVII Congreso Peruano de Geología. 3 p. <https://hdl.handle.net/20.500.12544/2734>

Reyes, J.P. (2019). Sobre el potencial de mineralización de Cu, Au tipo IOCG en la costa norte del Perú paralelo 9°-12°. Proexploración 2019, Lima, 5p. <https://app.ingemmet.gob.pe/biblioteca/pdf/Lib-122-115.pdf>

Sillitoe, R.H., y Burrows, D.R. (2002). New field evidence bearing on the origin of the El Laco magnetite deposit, northern Chile. *Economic Geology*, Vol. 97, pp. 1101–1109

Tornos, F., Velasco, F., Hanchar, J. M. (2016). Iron-rich melts, magmatic magnetite, and superheated hydrothermal systems: the El Laco deposit, Chile. *Geology* 44:427–430. <https://doi.org/10.1130/G37705.1>

Contribución de autoría

Describimos las contribuciones al documento utilizando la taxonomía CRediT: Conceptualización: O.B. y A.T., Curación de datos: 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.