

Caracterización de las rocas circundantes al intrusivo manto, resultantes del metamorfismo de contacto – hidrotermal, Calca – Cusco

Characterization of the rocks surrounding the mantle intrusive, resulting from contact metamorphism-hydrothermal, Calca – Cusco

Mauro Alberto Zegarra Carreón^{1,*} y María Milagros Riveros Guevara¹

¹Escuela Profesional de Ingeniería Geológica. Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco. Perú.

Resumen

La geología estructural y económica, con implicancias para la exploración de recursos minerales en zonas de intrusión magmática representado por rocas vulcanosedimentarias del Grupo Ollantaytambo y un metamorfismo de contacto, generado por una intrusión granítica sintectónica que corta a la anterior. En la zona faltaba precisar las asociaciones minerales, las variaciones texturales y las evidencias de la acción hidrotermal en las postrimerías del enfriamiento del intrusivo. La investigación fue desarrollada entre mayo a diciembre del 2023, cuyo objetivo fue determinar las características geológicas de las rocas circundantes al intrusivo Manto por efecto del metamorfismo de contacto-hidrotermal. Para ello, se realizaron trabajos de campo orientados al cartografiado geológico y la recolección de muestras representativas, seguidos de trabajos de gabinete que incluyeron la elaboración de mapas geológicos con el software ArcGIS y el análisis petrográfico en secciones delgadas bajo el microscopio petrográfico. Los resultados evidenciaron seis zonas diferenciadas por su textura, composición mineralógica y manifestaciones hidrotermales. La Zona 1 corresponde a un gneis. Las Zonas 2, 3 y 4 están conformadas por anfibolitas distinguidas por su esquistosidad y presencia de mineralización metálica. La Zona 5 corresponde a esquistos de biotita y la Zona 6 a pizarras piritosas. Con el estudio se determinó una zonación metamórfica de contacto en las anfibolitas con características diferenciadas por la disminución de temperatura desde el intrusivo hacia las rocas caja y evidencias metálicas como cobre, zinc y plomo en venas y venillas producto de los fluidos hidrotermales.

Palabras clave: Asociación, cartografía, mineralogía, tectónica, zona.

Abstract

The structural and economic geology, with implications for the exploration of mineral resources in zones of magmatic intrusion represented by volcano-sedimentary rocks of the Ollantaytambo Group and a contact metamorphism, generated by a syntectonic granitic intrusion that cuts the previous one. In the area, it was necessary to specify the mineral associations, the textural variations and the evidence of hydrothermal action in the aftermath of the cooling of the intrusive. The research was carried out between May and December 2023, whose objective was to determine the geological characteristics of the rocks surrounding the intrusive Mantle due to the effect of contact-hydrothermal metamorphism. To this end, field work was carried out aimed at geological mapping and the collection of representative samples, followed by cabinet work that included the elaboration of geological maps with ArcGIS software and petrographic analysis in thin sections under the petrographic microscope. The results showed six zones differentiated by their texture, mineralogical composition and hydrothermal manifestations. Zone 1 corresponds to a gneiss. Zones 2, 3 and 4 are made up of amphibolites distinguished by their schistosity and presence of metallic mineralization. Zone 5 corresponds to biotite schists and Zone 6 to pyrolytic slates. With the study, a metamorphic contact zonation was determined in the amphibolites with differentiated characteristics by the decrease in temperature from the intrusive to the box rocks and metallic evidence such as copper, zinc and lead in veins and veins as a result of hydrothermal fluids.

Keywords: Association, cartography, mineralogy, tectonics, zone.

Recibido: 13/04/2025

Aceptado: 06/05/2025

Publicado: 30/06/2025

***Autor para correspondencia:** mauro.zegarra@unsaac.edu.pe

Cómo citar: Zegarra Carreón, M. A., & Riveros Guevara, M. M. (2025). Caracterización de las rocas circundantes al intrusivo manto, resultantes del metamorfismo de contacto – hidrotermal, Calca – Cusco. *Revista De Investigaciones*, 14(2), 82-93. <https://doi.org/10.26788/ri.v14i2.6811>

Introducción

El estudio de los procesos y productos del metamorfismo es de relevancia fundamental en geología, y aquellos procesos asociados al emplazamiento de cuerpos intrusivos constituye una herramienta fundamental para reconstruir la evolución geológica de los Andes del sur peruano. La observación petrográfica de texturas, paragénesis y asociaciones mineralógicas en las rocas encajantes permite inferir las condiciones físico-químicas del evento térmico y la posterior circulación de fluidos hidrotermales, aspectos determinantes en la génesis de alteraciones y en la redistribución de elementos metálicos (Mégard, 1979; Dalmayrac et al. 1988, Carlier, et al. 1982). En este contexto, la caracterización detallada de aureolas de metamorfismo de contacto y de las manifestaciones hidrotermales asociadas es decisiva para comprender la interacción entre intrusión, gradientes térmicos y procesos metasomáticos a escala local (Martínez et al., 2017; Carlotto et al., 2009).

Desde un punto de vista conceptual, Mason (1991) y Bayly (1982), señalaron que los distintos tipos de metamorfismo y sus trayectorias P-T son controlados por la historia litológica y tectónica de cada área, lo que se refleja en asociaciones mineralógicas particulares. Gómez (2006) y Winkler (1976), definieron el metamorfismo de contacto como el resultado del aporte térmico de cuerpos ígneos y subrayan la formación de aureolas térmicas con texturas granoblásticas u hornfélasicas en los protolitos pelíticos y psamíticos. En concordancia, Turner & Verhoogen (1963), Best (1982) y Bucher & Frey (1994), enfatizaron que las asociaciones minerales actúan como indicadores de facies metamórficas y permiten reconstruir la trayectoria térmica de las rocas afectadas. Fettes & Desmons (2011), describieron la noción de grado metamórfico y sus manifestaciones texturales; Yardley et al. (1990) y Chirif (2010), mostraron la utilidad de la microscopía óptica en la identificación de texturas reactivas, porfioblasticas y en bandas, mientras que Pracejus (2015) y López et al. (2007), aportaron criterios para la interpretación de paragénesis y microestructuras que evidencian deformación sintectónica en intrusivos. Asimismo, Blenkinsop (2000) y Richards (2003), pusieron de manifiesto la relación entre dinámica tectónica,

intrusión sintectónica y la exsolución de fluidos hidrotermales que favorecen la mineralización porfírica. En relación con los procesos hidrotermales y la metalogénesis, Espinoza et al. (2020) y Dominguez (2023), describieron la zonación típica de alteraciones (potásica, serícita, propilítica) alrededor de intrusivos y su control sobre la concentración de Cu, Mo, Au y otros metales; de forma complementaria, Pérez y González (2009), documentaron la interacción entre fluidos magmáticos y meteóricos en la etapa tardía de mineralización, lo que condiciona la deposición en fracturas y venillas. Franchini et al. (2000) y Carlotto et al. (2009), integraron aspectos metasomáticos y estructurales en la génesis de aureolas zonadas, mostrando cómo la composición del protolito, la naturaleza de los fluidos y el régimen de presión-temperatura definen asociaciones mineralógicas diferenciadas.

En el ámbito regional y nacional, los antecedentes revelan la complejidad tectono-magmática y metamórfica del sur peruano. Aguirre (1991) y González & Cábana (2006), presentaron estudios comparativos de metamorfismo y protolitos; Marocco (1978) y Salas A. et al. (1999) ofrecieron análisis estructurales y fases tectónicas a escala regional; Cardona et al. (2004) y Mégard (1979), describieron grados metamórficos y episodios térmicos en dominios andinos; mientras que Carlier et al. (1982), propusieron la existencia de ciclos orogénicos (Precámbrico, Hercínico, Andino) vinculados a pulsos magmáticos que condicionaron el metamorfismo y la metalogénesis regional. En trabajos más recientes, Patiño Gutierrez et al. (2021) y Lucana Muñoz (2024), precisaron facies y grados metamórficos en dominios estructurales andinos, evidenciando transiciones desde esquistos verdes hasta anfibolitas y condiciones de migmatización en sectores de alto grado. A nivel local, los registros son escasos pero informativos para el estudio. Martínez Valladares et al. (2017) describieron controles tectonomagnéticos de sistemas porfíricos en el sur del Perú, poniendo de relieve la relación entre intrusivos y distribución de alteraciones; Barboza Vilchez (2018) documentó tipos de venillas y sucesión paragenética en pórfidos auríferos que ejemplifican la transición entre fases térmicas e hidrotermales; Coll & Ordóñez (2011) clasificaron yacimientos locales tipo pórfido Cu-Mo y señalaron alteraciones fílicas y potásicas

como favorables a la mineralización. Finalmente, Huaman Zuñiga & Caballero Cayllahua (2022) entregaron datos geotécnicos y geológicos locales que confirman la predominancia de rocas intrusivas y metamórficas en las áreas de cimentación, contexto que condiciona la respuesta térmica y la circulación de fluidos.

Pese a estos aportes, en la provincia de Calca y específicamente en los alrededores inmediatos del intrusivo Manto persiste la carencia de estudios petrográficos y texturales a escala local que relacionen explícitamente la mineralogía de las aureolas con la distancia al cuerpo intrusivo y con la ocurrencia de manifestaciones hidrotermales tardías. Los trabajos regionales han señalado la presencia de unidades correlacionables y procesos generales (Marocco, 1978; Salas et al., 1999 y Coba et al., 2021), el problema radica en la falta de resaltar las particularidades de las aureolas o zonas que provoca el segundo evento metamórfico provocado por el Intrusivo Manto de composición granítica sobre las series vulcano-sedimentarias del Grupo Ollantaytambo dentro del contexto del metamorfismo de contacto que termina con la acción del hidrotermalismo. Por ello, es necesario un muestreo controlado y un análisis petrográfico detallado que permita determinar las asociaciones minerales, las texturas reactivas y la presencia de venillas o vetillas con contenido metálico que puedan ser atribuidas a etapas hidrotermales posteriores al pico térmico (Barboza, 2018; Coll y Ordóñez, 2011 y Martínez et al., 2017). En este marco, el presente estudio tiene por objetivo determinar las características geológicas de las rocas circundantes al intrusivo Manto, definiendo las texturas y asociaciones minerales de las zonas del metamorfismo de contacto, así como sus manifestaciones hidrotermales.

Métodos

Lugar de estudio

La zona de estudio está localizada entre los distritos de Amparaes y Lares, circundante a la confluencia de los ríos de los mismos nombres. Dando lugar al nacimiento del río Yanatile, provincia de Calca y departamento de Cusco, en las siguientes coordenadas UTM 18 L N 8564500, E 817600.

“Manto” es el nombre que lleva el centro poblado cercano donde se realizará el presente estudio.

Descripción de métodos

El método de estudio es cualitativo-analítico e inductivo-deductivo.

Periodo de estudio y frecuencia de muestreo:

Según la distancia con respecto al intrusivo y tipo de alteración, se tomaron 16 muestras de roca considerando los siguientes pasos: 2 salidas de campo con una frecuencia de una por mes en tiempo de estiaje. En la primera salida de campo se recolecto 10 muestras de la margen derecha del río Lares, en la segunda salida de campo 3 muestras de la margen izquierda del río Amparaes y 3 muestras de la margen derecha del río Yanatile, comprendiendo un periodo 2 meses agosto y setiembre de 2023.

Descripción detallada de los materiales, insumos e instrumentos utilizados en la ejecución de la investigación:

Se estableció 6 zonas de estudio por sus diferencias mineralógicas y texturales. Las muestras recolectadas fueron preparadas y analizadas por: textura, composición mineralógica y clasificación del tipo de roca, en el laboratorio de Microscopía de la Escuela Profesional de Ingeniería Geológica – UNSAAC. Instrumentos utilizados:

- Imágenes satelitales
- 2 GPS Garmin Oregon 650
- Brújulas Brunton
- 3 lupas Iwamoto 20x
- 2 picotas ESTWING E3 22P Mango Corto y Mango largo
- Secciones delgadas
- Microscopio Petro-minerográfico Leica DM4

Las muestras fueron agrupadas según su textura y mineralogía para ser ubicadas en facies según diagramas ternarios ACF en las clasificaciones de (Turner & Verhoogen, 1963) y (Bucher & Frey, 1994). Actividades realizadas según los objetivos:

- Recopilación de información en campo usando imágenes satelitales, GPS y brújula

para determinar las subzonas o aureolas de metamorfismo.

- Descripción macroscópica de las muestras de mano con lupa, rayador y HCl.
- Descripción microscópica de secciones delgadas para determinar la composición mineralógica, microtexturas y deformación de las rocas con el microscopio petrográfico.
- Descripción de secciones delgadas y pulidas con el microscopio petro-minerográfico para determinar alteraciones y estructuras de relleno por la acción del metamorfismo de contacto-hidrotermal.
- Análisis de las asociaciones minerales en las rocas con el microscopio petro-minerográfico para determinar los protolitos y facies metamórficas según (Turner & Verhoogen, 1963), (Bucher & Frey, 1994) y (Spear, 1995).

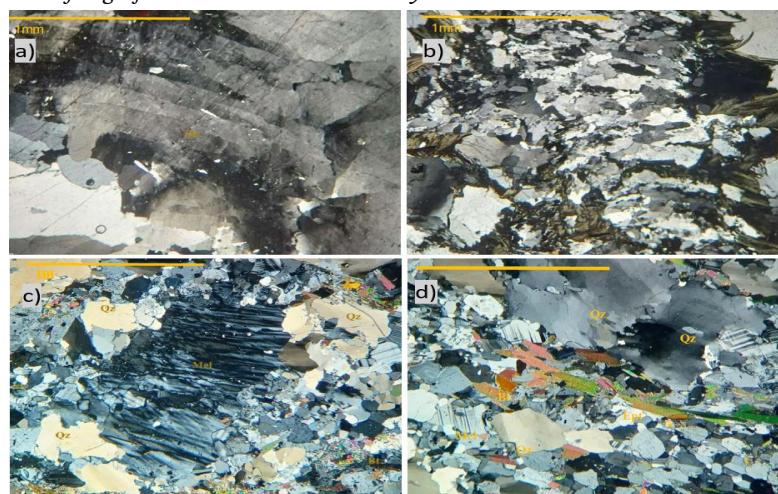
Variables Analizadas

- Delimitación del cuerpo intrusivo y roca encajonante con una posterior observación macroscópica de texturas y mineralogía.
- Observación y análisis microscópico de microestructuras de deformación y porcentaje mineralógico.

Resultados

Se determinaron 6 zonas desde el granito gneisificado (Intrusivo Manto) hasta las pizarras del Grupo San José.

Figura 1
Microfotografías de la muestra LAMA-61 y LAR-T-02 en NC.



Nota. Abreviaturas: NC = nícoles cruzados, NP = nícoles paralelos, Hn.= hornblenda, Qz = cuarzo, Cl = clorita, Bt = biotita, Mcl = microclina, Ep = epidota.

Zona 1: Intrusivo Manto

El intrusivo denominado ortogneis o granito de biotita sintectónico, se emplazó mientras sufría una deformación tectónica eoherciniana S1 formándose el ortogneis de dirección N50°. El cual, sigue subiendo y se produce un metamorfismo térmico con estaurolita – granate-biotita. Con lo cual, se concluye que el ortogneis y su roca caja (Grupo Ollantaytambo) pertenecen a la segunda fase eoherciniana. Las fases de deformación plástica del cuarzo son evidentes en el estudio microscópico, del presente estudio, desde la fase 1 (extinción ondulante) hasta la fase 4 (recristalización) (Gómez, 2006), (Figuras 1a y 1b).

El mineral que marca la esquistosidad es la biotita y en segundo lugar los cristales de cuarzo y epidota elongados perpendicularmente al esfuerzo mayor, como se muestra en la Figura 1d. En cambio, la microclina presenta extinción ondulante nublando su característica macla en enrejado y la plagioclasa sódica muestra una débil a moderada alteración a sericitia – arcilla, (Figura 1c).

Se muestra (a) cuarzo con deformación plástica en la fase 3 y con lamelas bien definidas. (b) cuarzo recristalizado por recuperación de su deformación plástica (Fase 4). (c) microclina con maclado en enrejado y cuarzo con recristalización correspondiente a la fase 4. (d) granos elongados de cuarzo y biotita marcando la esquistosidad en el ortogneis (Figura 1).

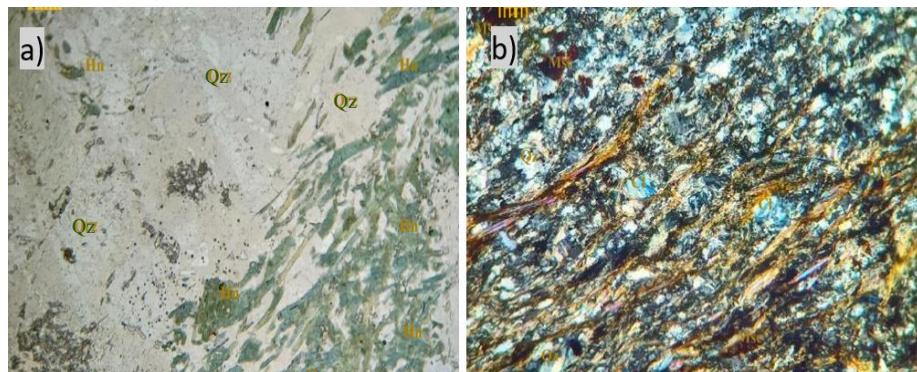
Zona 2: Contacto intrusivo-roca caja

En esta zona se puede apreciar el origen de las hornblendas verdes alineadas por la presión dirigida o tectónica ejercida por el intrusivo sobre los metabasaltos. Pero, es la temperatura de contacto la que provoca la formación de las hornblendas a

expensas de los minerales máficos preexistentes, (Figura 2^a). Se observa la transición de los basaltos a esquistos hornbléndicos verdes desde el intrusivo hacia la roca intruida metamorfizada a esquistos anfibólicos de grano medio, con pirita alterada de débil a moderadamente a hematita (Figura 2^b).

Figura 2

Microfotografías de las muestras LAMA-51 en NP y LAMA-03 en NC. (a) muestra la formación de la hornblenda verde en el contacto ortogneis-metabasalto. (b) se observa esquisto de hornblenda de grano medio con alteración débil de pirita a hematita.



Nota. Abreviaturas: NC = nícoles cruzados, NP = nícoles paralelos, Hn = hornblenda, Qz = cuarzo, Cl = clorita.

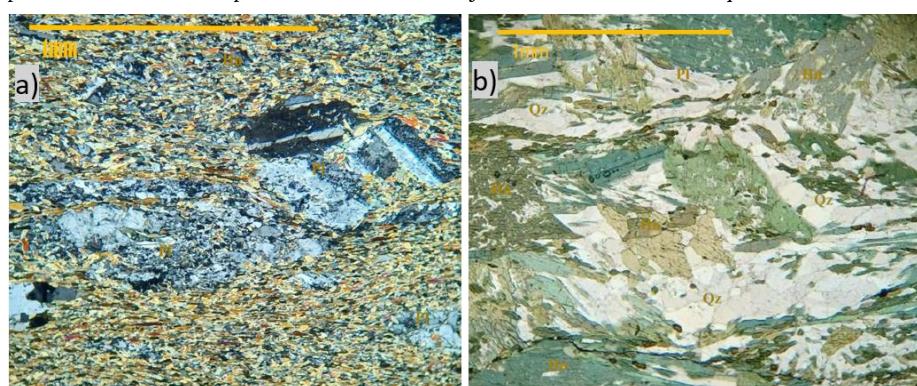
Zona 3: Esquisto moteado de hornblenda con venillas hidrotermales

En esta zona la textura representativa es la moteada, donde las ortoanfibolitas están constituidas con finos planos de esquistosidad, resaltando la estructura moteada con apariencia de criptodomos o facies “striped amphibolite”, constituida por

tablas truncadas y elevadas de plagioclasa en una matriz de grano fino y cuando las glándulas u ojos son de hornblenda la matriz es de grano medio a grueso, (Figuras 3a y 3b). Esta estructura es muy conocida por su posición intermedia entre el intrusivo y el protolito pelítico o arcilloso acusado a la generación de hornfelses con cordierita en el metamorfismo de contacto (Figura 3).

Figura 3

Microfotografías de las muestras AMP-01 en NC y AMP-02 en NP. (a) tablas de plagioclasa truncadas formando esquistos moteados en una matriz fina de Hn-Qz-Ep. (b) truncamiento de prismas de hornblenda provocando elevación en forma de nódulos en los esquistos moteados.



Nota. Abreviaturas: NC = nícoles cruzados, NP = nícoles paralelos, Hn = hornblenda, Qz = cuarzo, Pl = plagioclasa, Cl = clorita, Ep = epidota.

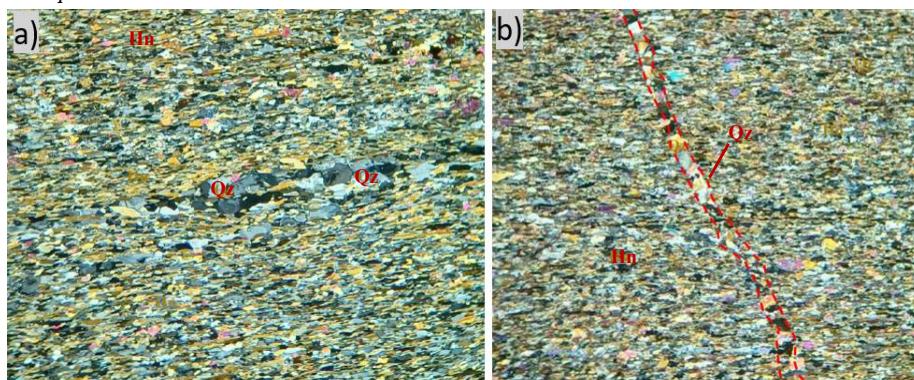
Zona 4: Esquisto de hornblenda de grano fino con venillas hidrotermales

Es la zona más distal del intrusivo constituida de esquistos de hornblenda o anfibolitas

característicamente de grano fino y con esquistosidad de "Slaty cleavage grosera", (Figura 4a) y dan el inicio a la aparición de venillas esporádicas por acción hidrotermal (Figura 4b).

Figura 4

Microfotografías de las muestras AMP-CD en NC. (a) esquisto de hornblenda de grano fino con sus planos de esquistosidad de Qz-Pl y Hn. (b) venilla de cuarzo transversal a los planos de esquistosidad.



Nota. Abreviaturas: NC = nícoles cruzados, NP = nícoles paralelos, Hn = hornblenda, Qz = cuarzo.

Se cuantificaron los minerales principales de la zona 4 por contener mayor número de venillas hidrotermales con diseminación de minerales metálicos. Para cuantificar los minerales se dividió

una sección delgada en 6 partes (C1, C2, C3, C4, C5 y C6) y se obtuvieron los promedios decimales de cada uno (Tabla 1).

Tabla 1

Valores estadísticos representativos de la zona 4.

Componentes	Unidad	C1	C2	C3	C4	C5	C6	Promedio Decimal	Promedio Total
Plagioclasa	%	19	12	38	23	28	35	25,83	26
Hornblenda	%	44	38	23	35	30	38	34,67	35
Epidota	%	11	8	20	12	15	8	12,33	12
Cuarzo	%	10	35	15	25	20	15	20,00	20
Otros	%	16	7	4	5	7	4	7,17	7
	%	100	100	100	100	100	100	100,00	100

Otros: Feldespato potásico, Biotita, Circón, Opacos

Los valores obtenidos de los minerales principales de la zona 4 fueron: Hornblenda = 34,67 %, Plagioclasa = 25,83 %, Cuarzo = 20 % Epidota = 12,33 % y Otros = 7,17 %, siendo la Hornblenda y la Plagioclasa los minerales con mayor porcentaje y casi con la misma proporción, denotándose por consiguiente que el protolito, al ser una roca volcánica, originará una roca resultante metamórfica denominada ortoanfibolita.

Por otro lado, los minerales en menor proporción son Otros como Feldespato potásico, Biotita,

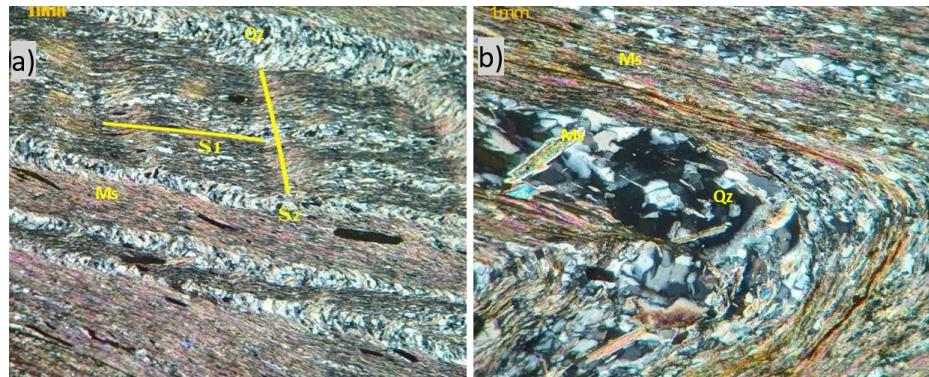
Circón y Opacos (Pirita, calcopirita, bornita y especularita).

Zona 5: Esquisto de biotita-muscovita

Es la zona más distal al intrusivo representada por esquistos de grano fino con Qz-Bi-Mc-Pl, donde se puede apreciar el tipo de foliación de crenulación originado por la intersección de las esquistosidades S1 y S2, (Figura 5a,) y en algunos casos la recristalización de planos donde hay el dominio del cuarzo, (Figura 5b).

Figura 4

Microfotografías de las muestras LAR-T-03 en NC. (a) planos alternados de Ms-Bio-Qz-Cl, donde la esquistosidad crenulada es el producto de la intersección de las esquistosidades S1 con S2. (b) esquistosidad de crenulación con recristalización del cuarzo en una fase intermedia.



Nota. Abreviaturas: NC = nícoles cruzados, NP = nícoles paralelos, Ms = muscovita, Qz = cuarzo.

Zona 6: Pizarra piritosa

Zona de pizarras y filitas del Grupo San José con presencia de pirita y en menor grado de antracita, caracterizada por finos planos de esquistosidad (slaty cleavage). Cuando las rocas de esta zona están expuestas a la meteorización, la pirita se altera a óxidos de Fe (Hematita + agua => Limonita + arcilla) y exudaciones de azufre (Figura 6).

Figura 6

Microfotografía de la muestra LAMA 01 en NC, pizarra con finos planos de esquistosidad y presencia de Qz-Pl-Cl y Py.



Nota. Abreviaturas: NC = nícoles cruzados, NP = nícoles paralelos, Py = piri

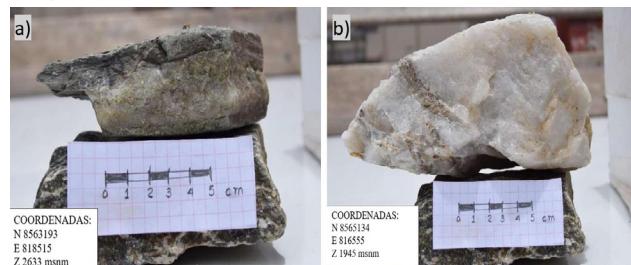
Vetas y venillas con minerales metálicos

A temperaturas inferiores a 400°C hasta ambientales, se producen soluciones acuosas ascendentes, calientes y gases que depositan minerales en las fracturas formando vetas, venas

y venillas. Es cuando cristalizan sulfuros como pirita, especularita, calcopirita y bornita. En la zona de estudio se encontraron muchas venas y venillas de cuarzo con algunos sulfuros, (Figuras 7a y 7b).

Figura 7

Fotografías de las muestras LAMA 06 y LAMA 07.(a) esquisto de hornblenda acicular y clorita con vena de cuarzo y epidota. (b) veta de cuarzo con óxidos de hierro en manchas por oxidación de la especularita.



Discusión

El granito sintectónico gneisificado o deformado fue indicado por los dos primeros autores que alcanzaron en particular la zona de estudio bajo cartas geológicas del INGEMMET (Tabla 2). Pero la diferencia que señala (Coba et al., 2021) pone de manifiesto que el metamorfismo de contacto del granito es con las rocas vulcanosedimentarias del Grupo Ollantaytambo. En tanto, el presente trabajo al SE es localizado y diferencia cualitativamente cinco zonas con los efectos del metasomatismo de contacto del intrusivo con las rocas volcánicas (metabasaltos), en función de la disminución de la temperatura y la distancia. Poniendo en evidencia el metasomatismo de contacto y la acción de los

fluidos hidrotermales expresados en venillas y vetas de cuarzo con diseminaciones de minerales metálicos tales como la especularita, pirita, calcopirita y bornita (Tabla 2), donde se observa la naturaleza y alcance que tienen los estudios previos con respecto al presente. Con estos

resultados, se despierta el interés exploratorio en dirección SE y NW, dado que la presencia de especularita se interpreta como un indicador de ambiente distal, lo que permite considerar la posibilidad de descartar la proximidad inmediata a un yacimiento mineral (Tabla 2).

Tabla 2

Comparación de resultados de los diferentes estudios en la zona.

Autor	Marocco (1978)	Salas & Chavez (1999)	Coba et al. (2021)	Zegarra (2024)
Escala	1/500,000	1/100,000	1/50,000	1/30,000
Metamorfismo de contacto	Granito con rocas pelíticas	Granito con rocas pelíticas	Granito con rocas vulcanoc-sedimentarias	Granito con rocas volcánicas (basalto)
Unidad litológica	Grupo San José	Grupo San José	Grupo Ollantaytambo	Grupo Ollantaytambo

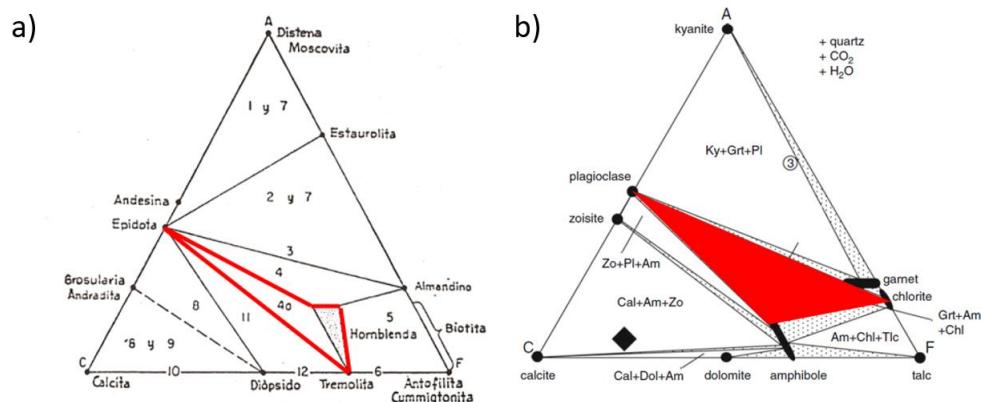
Las asociaciones mineralógicas de Turner & Verhoogen (1963) y de Bucher & Frey (1994), son utilizadas como diagnóstico para determinar que el tipo de facies metamórfica es de la anfibolita. Sin embargo, Spear (1993), al aplicar fases en equilibrio y presión – temperatura, determina que el tipo de facies es intermedia entre la anfibolita y granulita, la cual corresponde al presente estudio por tratarse de rocas basálticas piroxénicas (protolito) que retrogradan hacia la facies anfibolita, porque la temperatura del intrusivo corresponde al de un granito.

Las diferencias texturales Barker (2013), como el tamaño de grano y la temperatura decrecen desde la zona 2 a la zona 5 y contrariamente la acción hidrotermal observada en las venas y venillas se incrementan.

Según las divisiones del área de estudio en zonas se tiene como resultado que desde la zona 2 a la zona 5 sus asociaciones mineralógicas pertenecen a la facies de la anfibolita, porque el emplazamiento del intrusivo es sobre rocas volcánicas básicas y solo se diferencian en su textura y disminución de tamaño de grano al ser más distal. Estas asociaciones en el diagrama ternario ACF según Turner & Verhoogen (1963), corresponden a la 4a, (Figura 8a). Sin embargo, según Bucher & Frey (1994), la asociación mineralógica es Pl-Cl-Anf (Hn) de la facies Anfibolita, sin discrepar mucho con los anteriores autores porque todos los minerales en ambos sistemas están mencionados en las asociaciones descritas en este trabajo, sin dejar de mencionar que la zoisita es una variedad de la epidota, (Figura 8b) (Tabla 3).

Figura 8

(a) diagrama ternario ACF para la facies de las anfibolitas almandínicas. (b) diagrama ACF que exhibe la asociación mineral Pl-Cl-Anf(Hn)



Nota. Modificado de (Turner & Verhoogen, 1963) y (Bucher & Frey, 1994).

Tabla 3

Facies metamórficas y ensambles de diagnóstico

Protolito	Metapelitas	Metabasaltos (Básico)
Facies		
Anfibolita	Estaurolita + Clorita + Granate + Muscovita.	Plagioclasa + Hornblenda + Epidota.
	Estaurolita + Biotita + Aluminosilicatos + Muscovita.	Plagioclasa + Hornblenda + Granate.
	Estaurolita + Biotita + Granate + Muscovita. Cordierita + Biotita + Granate + Muscovita.	Plagioclasa + Hornblenda + Clinopiroxeno ± Biotita.
	Biotita + Aluminosilicatos + Feldespato Potásico + Granate.	
Granulita	Ortopiroxeno + Cuarzo.	Plagioclasa + Clinopiroxeno + Granate.
	Ortopiroxeno + Cordierita + Biotita + Cuarzo.	Plagioclasa + Clinopiroxeno +
	Ortopiroxeno + Aluminosilicatos + Cuarzo ± Safirina + Espinela.	Ortopiroxeno ± Hornblenda ± Biotita.

Nota. Tomado de (Bucher & Frey, 1994)

Ahora bien, en las asociaciones minerales Turner & Verhoogen (1963), y ensambles de diagnóstico (Bucher & Frey, 1994) concuerdan en las facies y grado de metamorfismo tanto si el protolito es básico del Grupo Ollantaytambo. Mientras que, las filitas y pizarras de grano fino a muy fino con pirita pertenecen al Grupo San José.

Conclusiones

En la caracterización microscópica de la zona 1 el ortogneis evidencia los 4 estadios de deformación plástica, en la zona 2 el contacto entre el ortogneis y la ortoanfibolita determina el origen de la hornblenda a partir del intrusivo. La zona 3 se caracteriza por las ortoanfibolitas moteadas producto del truncamiento de las tablas de plagioclasa o de la hornblenda. En la zona 4 la asociación mineralógica de las ortoanfibolitas es de Hn–Ms–Cl–Qz–Pl de textura nematogranoblástica y grano medio a fino. En la zona 5 las ortoanfibolitas tienen la asociación mineralógica de Qz–Bio–Hn–Ms–Pl–Hm con textura lepidonematoblástica y de grano fino. Finalmente, en la zona 6 desaparece las anfibolitas y aparecen las pizarras y filitas del grupo San José. Estas zonas de metamorfismo de contacto tienen en común pertenecer a la facie de la anfibolita de asociación básica y texturalmente están diferenciadas por el tipo de textura y granos cada vez decrecientes al distanciarse del intrusivo por la disminución térmica. En la fase final del metamorfismo térmico prevalece la acción hidrotermal (300°C) donde los flujos hidrotermales son transportadores de iones

metálicos de Cu, Zn, Pb, etc., que se depositan en fisuras, alterando a la roca caja en el estadio propílítico de paragénesis Qz–Esp–Cp–Bn.

Contribuciones de los autores

Conceptualización, Zegarra C., M.A. (80%), Riveros G., M.M. (20%); Curación de datos, Zegarra C., M.A. (70%), Riveros G., M.M. (30%); Análisis formal, Zegarra C., M.A. (70%), Riveros G., M.M. (30%); Adquisición de fondos, Zegarra C., M.A. (90%), Riveros G., M.M. (10%); Participación en la investigación, Zegarra C., M.A. (80%), Riveros G., M.M. (20%); Metodología, Zegarra C., M.A. (60%), Riveros G., M.M. (40%); Administración del proyecto, Zegarra C., M.A. (60%), Riveros G., M.M. (40%); Recursos, Zegarra C., M.A. (80%), Riveros G., M.M. (20%); Software, Zegarra C., M.A. (60%), Riveros G., M.M. (40%); Supervisión, Zegarra C., M.A. (80%), Riveros G., M.M. (20%); Validación, Zegarra C., M.A. (70%), Riveros G., M.M. (30%); Visualización, Zegarra C., M.A. (50%), Riveros G., M.M. (50%); Redacción – borrador original, Zegarra C., M.A. (70%), Riveros G., M.M. (30%); Redacción – revisión y edición, Zegarra C., M.A. (60%), Riveros G., M.M. (40%).

Agradecimientos

Expreso mis agradecimientos a los ingenieros geólogos Abner Farfán Medina y Piero Morales Aragón, por sus contribuciones a las interpretaciones bajo el microscopio polarizante de las secciones delgadas de muestras de roca de la

zona de estudio previa selección y sistematización de las muestras extraídas de campo; y a la Escuela Profesional de Ingeniería Geológica de la Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco por permitirme las instalaciones de Petro-mineralogía para el estudio y análisis de las muestras de mano y secciones delgadas.

Referencias

- Aguirre Le Bert, L. (1991). *Interpretación de facies y gradientes en el metamorfismo diastatérico del grupo volcánico Casma, cretácico, Perú.* <https://repositorio.sernageomin.cl/handle/0104/22831>
- Barboza Vilchez, I. (2018). Análisis textural-mineralógico de las venillas en el pórfito de AU “El Alizar”, Sánchez Carrión-La Libertad. En *Universidad Nacional de Ingeniería.* <https://repositorio.uni.edu.pe/handle/20.500.14076/16375>
- Barker, A. J. (2013). Introduction to Metamorphic Textures and Microstructures. *Introduction to Metamorphic Textures and Microstructures*, 1–290. <https://doi.org/10.4324/9781315831626>
- Bayly, B. (1982). *Introducción a la Petrología.* 440. <https://www.casadellibro.com/libro-introduccion-a-la-petrologia/9788428300186/376749>
- Best, M. G. (1982). *Igneous and metamorphic petrology.* Blackwell Science. https://archive.org/details/igneousmetamorph00best?utm_
- Bruce William David Yardley, William Scott MacKenzie, & Christopher Guilford. (1990). *Atlas de Rocas Metamórficas y Sus Texturas: Vol. I* (1a ed.). MASSON, S.A.
- Bucher, K., & Frey, M. (1994). Petrogenesis of Metamorphic Rocks. En *Petrogenesis of Metamorphic Rocks.* Springer Berlin Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-03000-4>
- Cardona Molina, A., Cordani, U. G., Galdos Huaco, J., Onoe, A. T., & Sánchez Fernández, A. W. (2004). Petrología y geocronología K-Ar del complejo Marañón (Región Huánuco-Tingo María), Cordillera Oriental de los Andes Peruanos: consideraciones tectónicas preliminares. *Repositorio Institucional INGEMMET.* <https://repositorio.ingemmet.gob.pe/handle/20.500.12544/3629>
- Carlier, G., Grandin, G., Laubacher, G., Marocco, R., & Mégard, F. (1982). Present knowledge of the magmatic evolution of the Eastern Cordillera of Peru. *Earth Science Reviews*, 18, 253–283. <https://cris.pucp.edu.pe/es/publications/present-knowledge-of-the-magmatic-evolution-of-the-eastern-cordil>
- Carlotto Víctor, Quispe Cangana, J. L., Acosta Pereira, H., Rodríguez Mejía, R., Romero Fernández, D., Cerpa Cornejo, L. M., Mamani Huisa, M. I., Díaz Martínez, E., Navarro Colque, P. A., Jaimes Salcedo, F., Velarde Loayza, K. T., Lu León, S., & Cueva Tintaya, E. (2009). Dominios geotectónicos y metalogénesis del Perú. *Boletín de la Sociedad Geológica del Perú.* <https://repositorioslatinoamericanos.uchile.cl/handle/2250/4908509>
- Chirif Rivera, L. H. (2010). Microscopía óptica de minerales-[Boletín J 1]. *Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico-INGEMMET.* <https://repositorio.ingemmet.gob.pe/handle/20.500.12544/379>
- Coba Palomino, L. A., Hurtado Enríquez, C. A., & Ishpilco Chuquimango, S. (2021). Geología del cuadrángulo de Quebrada Honda (hojas 26r1, 26r2, 26r3, 26r4)–[Boletín L 24]. *Repositorio Institucional INGEMMET.* <https://repositorio.ingemmet.gob.pe/handle/20.500.12544/3151>
- Coll Cárdenas Elorrieta, H., & Ordóñez Salazar, V. (2011). *Prospección y exploración del yacimiento polimetálico Aurora, Parobamba, Cusco.* Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco.
- Dalmayrac, B., Laubacher, G., & Marocco, R. (1988). Caracteres generales de la evolución geológica de los Andes Peruanos-[Boletín D 12]. *Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico-INGEMMET.*

- <https://repositorioslatinoamericanos.uchile.cl/handle/2250/4906075>
- Dominguez, E. et al. (2023). *Los Maitenes. El Salvaje. Un sistema hidrotermal de tipo porfirítico.* Congreso Geológico Argentino. https://naturalis.fcnym.unlp.edu.ar/repositorio/_documentos/tesis/tesis_1485
- Efrén Pérez Segura, & Eduardo González Partida. (s/f). *Mineralogía de skarn y fluidos asociados a los yacimientos de Cu-Zn-Ni-Co de La Esperanza, Sonora, México.* 2009. Recuperado el 30 de septiembre de 2025, de https://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S1026-87742010000100001&script=sci_arttext
- Espinoza Sánchez, A., Ramos Rosique, A., & Geóloga, I. (2020). *Apuntes de Yacimientos Magmático-Hidrotermales para el curso de Metalogenia de la Facultad de Ingeniería PRESEN TA UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO FACULTAD DE INGENIERÍA.*
- Fettes, D., & Desmons, J. (2011). *Metamorphic Rocks: A Classification and Glossary of Terms Paperback*. <https://www.buscalibre.com.co/libro-metamorphic-rocks-a-classification-and-glossary-of-terms-paperback/9780521336185/p/>
- Franchini, M. B., Meinert, L. D., & Montenegro, T. F. (2000). Skarns Related to Porphyry-Style Mineralization at Caicayén Hill, Neuquén, Argentina: Composition and Evolution of Hydrothermal Fluids. *Economic Geology*, 95(6), 1197–1213. <https://doi.org/10.2113/GSECONGEO.95.6.1197>
- Gómez Jiménez Javier. (2006). *METAMORFISMO*. <https://geofield.blogspot.com/2019/06/metamorfismo-apuntes-de-la-asignatura.html>
- González, P. D., & Cábana, M. C. (2006). *Mineralogía y trayectoria textural de anfibolitas de la Sierra de Bachicha, Sistema de Tandilia (Buenos Aires).* <https://naturalis.fcnym.unlp.edu.ar/handle/628872547/42007>
- Huaman Zuñiga, N., & Caballero Cayllahua, L. P. (2022). *Estudio geológico y geotécnico para la construcción de la presa Marhuay del distrito de Coya, provincia de Calca, Cusco.* <https://repositorio.unsaac.edu.pe/handle/20.500.12918/7001>
- Lucana Muñoz, N. (2024). *Evolución de las condiciones de P-T del metamorfismo en las rocas del complejo metamórfico del Marañón entre las localidades de San Pablo de Pillao, Panao y Chaglla–Huánuco.* <https://repositorio.unsaac.edu.pe/handle/20.500.12918/9322>
- Marocco, R. (1978). Estudio geológico de la Cordillera de Vilcabamba-[Boletín D 4]. Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico–INGEMMET. <https://repositorio.ingemmet.gob.pe/handle/20.500.12544/321>
- Martínez Valladares, W., Marchena Campos, A. A., Otero Aguilar, J. F., Cervantes Gárate, J., & León Lecaros, W. R. (2017). Geología y controles tectonomagnéticos de los sistemas porfiríticos en el arco magmático occidental sur del Perú. *Repositorio Institucional INGEMMET.* <https://repositorio.ingemmet.gob.pe/handle/20.500.12544/3533>
- Mason, R. (1991). Petrology of the metamorphic rocks. *Petrology of the metamorphic rocks.* <https://doi.org/10.1007/978-94-010-9603-4>
- Mégard, F. (1979). Estudio geológico de los Andes del Perú Central-[Boletín D 8]. Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico–INGEMMET. <https://repositorio.ingemmet.gob.pe/handle/20.500.12544/323>
- Patiño Gutierrez, C., Jaimes Salcedo, F., & Cueva Tintaya, E. (2021). Petrografía y litogeocímica de rocas metamórficas del dominio Olmos – Loja en la frontera Perú-Ecuador. *Repositorio Institucional INGEMMET.* <https://repositorio.ingemmet.gob.pe/handle/20.500.12544/4324>
- Salas A., G., Chávez V., A., Cuadros P., J., & Arequipa, U. N. de S. A. de. (1999). Geología de los cuadrángulos de Quebrada Honda y Parobamba. Hojas 26-r y 26-s – [Boletín A

128]. Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico–INGEMMET. <https://repositorio.ingemmet.gob.pe/handle/20.500.12544/88>

Spear Frank S. (1993). Metamorphic Phase Equilibria and Pressure-Temperature-Time Paths . *Mineralogical Magazine*, 60(403), 992–993. <https://doi.org/10.1180/MINMAG.1996.060.403.17>

Turner, F. J. 8175, & Verhoogen, J. 1912-1993 8177. (1963). *Petrología ígnea y metamórfica*.

Barcelona : Omega,. <https://catalogue.nla.gov.au/catalog/1862678>

Winkler, H. G. F. (1976). Petrogenesis of Metamorphic Rocks. En *Petrogenesis of Metamorphic Rocks*. Springer Berlin Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-22283-6>



This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution 4.0 (CC BY) International License <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>