

Caracterización de minerales de alteración en domos y depósitos piroclásticos del Área Geotérmica de Paipa, Colombia

Angela Valeria García^{1*}; John J. Sánchez²; Elizabeth Torio³; Germán E. Bonilla⁴; Andrés I. Rodríguez⁵

¹Observatorio de Amenazas y Recursos Naturales, Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales de El Salvador, San Salvador, El Salvador. (*) angela.garcia@marn.gob.sv

²Departamento de Geociencias y Medio Ambiente, Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia, Medellín, Colombia. jjsanchezag@unal.edu.co

³LaGeo S.A. de C.V., San Salvador, El Salvador. ehenriquez@lageo.com.sv

⁴INCLAY S.A.S., Bogotá, Colombia. gbonilla@inclaygeology.com

⁵MINERLAB LTDA, Bogotá, Colombia. arodriguez@minerlablimitada.com

Resumen

Las alteraciones hidrotermales son indicadores de la interacción de fluidos calientes con los componentes minerales de las rocas que son alterados, reequilibrados y transformados en nuevos conjuntos de minerales cuyas temperaturas de formación son conocidas; el estudio de los minerales de alteración permite identificar sistemas hidrotermales activos y fósiles siendo un insumo crucial en la caracterización de las áreas con potencial de aprovechamiento del calor almacenado en las rocas. En Colombia, el Área Geotérmica de Paipa (AGP), en el departamento de Boyacá, es concebida como una de las zonas más promisorias, y la presente investigación provee detalles sobre la mineralogía de alteraciones. Se presentan los resultados de la determinación de los minerales de alteración en tres sitios del AGP: cantera ALFAGRES, cantera CEMEX y domo sureste del Alto de los Godos, donde las rocas volcánicas están asociadas a la periferia de la capa sello del sistema geotérmico, constituida también por los niveles arcillosos de las formaciones sedimentarias Churuvíta y Une. Se analizaron 54 muestras por medio de difracción de rayos X (DRX) en polvo desorientado y orientado (al natural, saturado con etilenglicol y en muestra calcinada a 500°C). Aunque existen las siguientes fases minerales arcillosas comunes a los tres sitios: esmectita (montmorillonita), halloisita 7Å, caolinita e illita; también existen mineralizaciones secundarias: zeolitas (mordenita), dickita (ALFRAGRES) y clorita (Alto de los Godos). Otros minerales como cuarzo, feldspatos y halloisita 10Å están presentes en al menos dos de los sitios. Los minerales arcillosos del grupo de las zeolitas y caolín encontrados indican diferentes estados de avance de la alteración argílica y argílica intermedia; la presencia de interestratificados de illita-esmectita (I/S) se relaciona con un estado de alteración filica. Las alteraciones fueron causadas por hidrotermalismo que alcanzó temperaturas en el rango 100-200°C, y posteriormente fueron acentuadas y enmascaradas por procesos de meteorización.

Palabras clave: Sistema geotérmico; Capa sello; Difracción de rayos X; Minerales arcillosos; Alteración argílica; Hidrotermalismo.

Forma de citar: García, A.V.; Sánchez, J.J.; Torio, E.; Bonilla, G.E.; Rodríguez, A.I. (2022). Caracterización de minerales de alteración en domos y depósitos piroclásticos del Área Geotérmica de Paipa, Colombia. *Boletín de Geología*, 44(3), 219-233. <https://doi.org/10.18273/revbol.v44n3-2022010>

Characterization of the alteration minerals in domes and pyroclastic deposits of Paipa Geothermal Area, Colombia

Abstract

Hydrothermal alterations are indicators of the interaction of hot fluids with the mineral components of rocks that are: altered, reequilibrated, and transformed into new groups of minerals whose formation temperatures are known; the study of alteration minerals allows identification of active and fossil hydrothermal systems, being a crucial input for the characterization of areas with a potential for exploitation of the heat stored in rocks. In Colombia, the Paipa Geothermal Area (AGP), in the state of Boyacá, is conceived as one of the most promising zones, and this investigation provides details on the mineralogy of alterations. The results of the determination of alteration minerals are presented for three sites within the AGP: ALFAGRES quarry, CEMEX quarry and southeast dome of Alto de los Godos, where the volcanic rocks are associated with the periphery of the seal cap of the geothermal system, constituted also by the clayey levels of Churuvita and Une sedimentary formations. The analysis of 54 samples was conducted by X-Ray Diffraction (XRD) on randomly oriented clay-sized fractions by the smear method, and oriented powder by the glass slide, ethylene glycol solvation, and sample heated to 500°C. Although the following clay mineral phases are common to the three sites: smectite (montmorillonite), halloysite-7Å, kaolinite, and illite, there are also some secondary mineralizations: zeolites (mordenite) and dickite (ALFRAGRES), and chlorite (Alto de Los Godos). Other minerals such as quartz, feldspars, and halloysite-10Å are present in at least two of the sites. The clay minerals from the group of zeolites and kaolin found indicate different stages of advance of the argillic and intermediate argillic alterations; the presence of interstratified illite-smectite (I/S) is related to a state of phyllic alteration. The alterations were caused by hydrothermalism that reached temperatures in the 100-200°C range, being later accentuated and masked by weathering processes.

Keywords: Geothermal system; Seal cap; X-ray diffraction; Clay minerals; Argillic alteration; Hydrothermalism.

Introducción

En un sistema geotérmico, la distribución de los minerales de alteración es controlada por la naturaleza y la composición de las rocas, por el régimen térmico y por la química de los fluidos (Pirajno, 2009). Los minerales primarios en las rocas se comportan de forma inestable debido a que las condiciones cerca de la superficie terrestre difieren mucho de las condiciones en las cuales se formaron en profundidad. Adicionalmente, ocurren interacciones entre minerales y fluidos geotermales, que contribuyen a la inestabilidad y fuerzan reacciones hacia un nuevo estado de equilibrio, disolviendo minerales primarios y precipitando nuevas fases minerales (Browne, 1984). Así, la ocurrencia y composición de las facies de alteración proporcionan información valiosa sobre las condiciones fisicoquímicas de la actividad hidrotermal que afecta un volumen de roca, por lo que se convierten en una de las principales herramientas para la caracterización de sistemas hidrotermales activos y fósiles, particularmente para la caracterización de minerales arcillosos que son productos típicos de alteración hidrotermal y pueden ser considerados como marcadores de zonas de circulación en función de su reactividad en las condiciones fisicoquímicas de los fluidos hidrotermales (Fulignati, 2020).

El Área Geotérmica de Paipa (AGP) (Figura 1) está localizada en la cordillera Oriental, en el departamento de Boyacá, al sur del municipio que la denomina, y a 180 km de la ciudad de Bogotá; geográficamente, se delimita al sur por el anticlinal Tibasosa-Toledo, al norte por el río Chicamocha, al oriente por la elevación del Alto de los Godos y el Pantano de Vargas y al occidente por el Alto de El Durazno (Alfaro *et al.*, 2017; Rueda-Gutiérrez, 2020). El AGP se encuentra en el ambiente compresivo de la cordillera Oriental y está controlada estructuralmente por las fallas de Boyacá y Soápage, en un contexto principalmente sedimentario. Sin embargo, existen productos volcánicos asociados a un vulcanismo en el Pleistoceno, diferente al asociado a los sistemas geotérmicos al sur de las cordilleras Central y Occidental (Velandia, 2003; Cepeda y Pardo, 2004; Bernet *et al.*, 2016) (Figura 2).

Antecedentes

Los productos eruptivos en el AGP indican varias etapas explosivas con pequeños eventos de efusiones de domos (Cepeda y Pardo, 2004). Las unidades volcánicas están distribuidas en los sectores conocidos como Alto de los Godos, Alto de los Volcanes y Quebrada Honda. En el área se encuentran rocas félsicas (riolitas alcalinas y traquitas), cuerpos ígneos

con textura porfírica y geformas dómicas, depósitos piroclásticos y zonas de alteración hidrotermal (argílica y argílica avanzada) (Cepeda y Pardo, 2004; González

et al., 2008; Rodríguez y Alfaro, 2015; Suárez, 2016; Rueda-Gutiérrez, 2017, 2020).

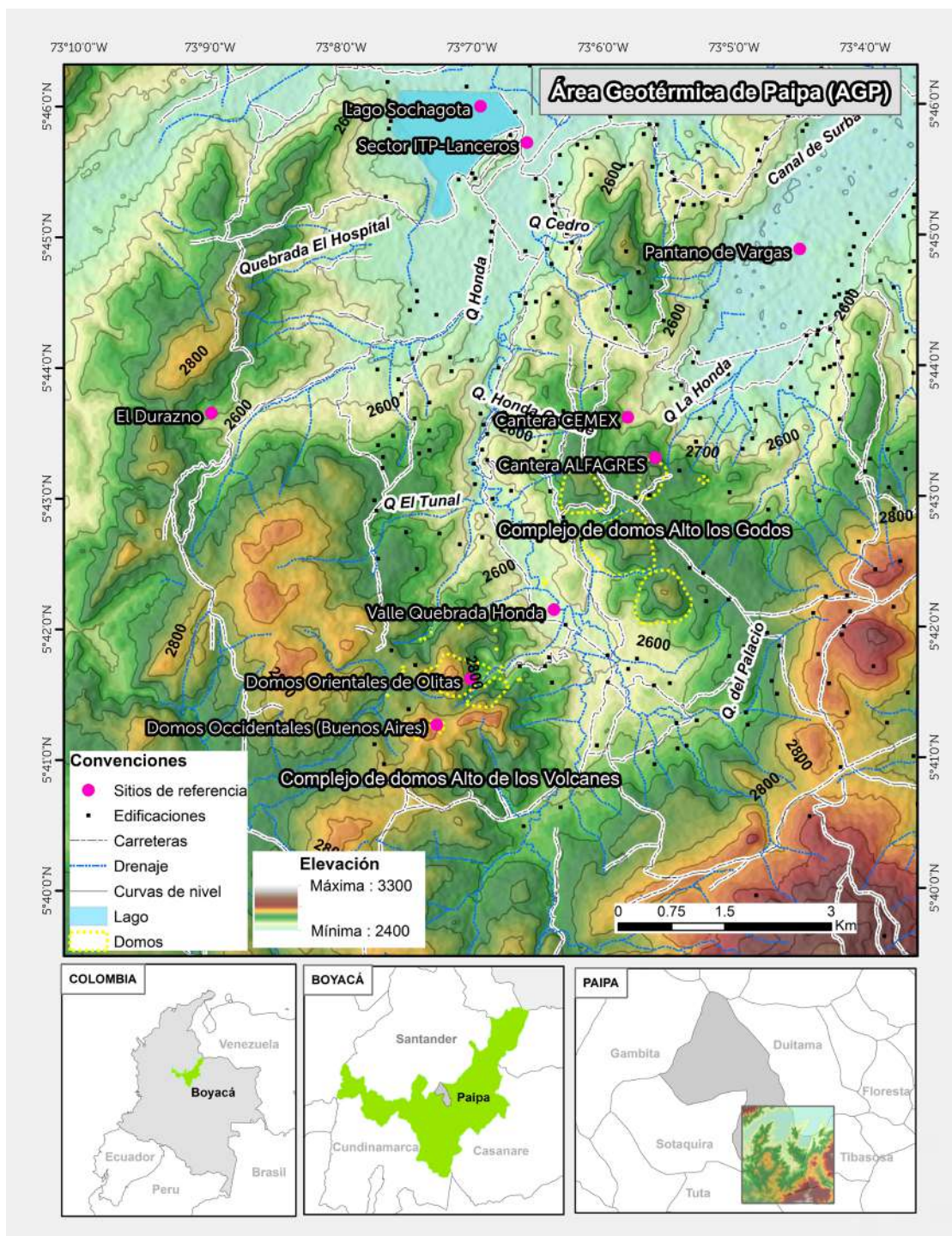


Figura 1. Mapa de localización del Área Geotérmica de Paipa. Elaborado a partir de los datos de las planchas Escala 1:25.000 números 171IIVC, 171IVD y 191-II-B (Instituto Geográfico Agustín Codazzi - IGAC) y datos claves publicados por Velandia (2003), Alfaro et al. (2017) y Rueda-Gutiérrez (2020). La cabecera municipal de Paipa está fuera de la imagen, justo al norte del lago Sochagota.

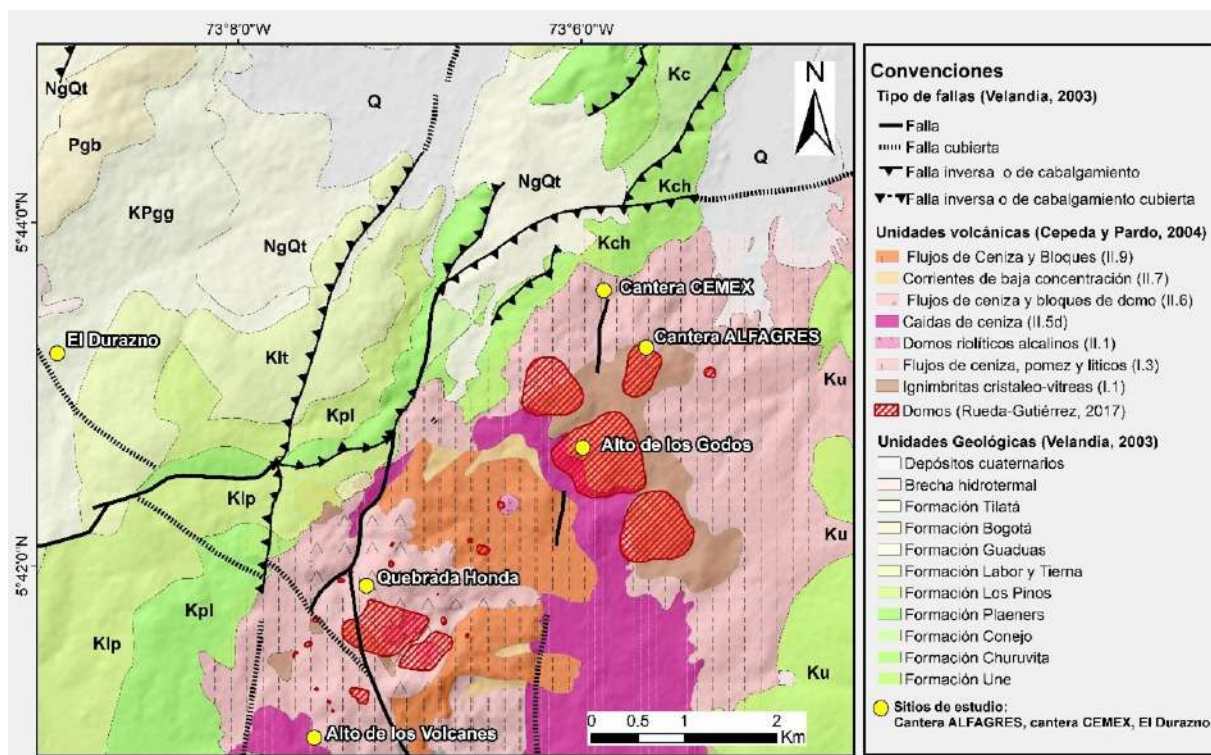


Figura 2. Mapa geológico del AGP. Modificado de Velandia (2003), Cepeda y Pardo (2004), Rueda-Gutiérrez (2017) y Gómez y Montes (2020).

La ocurrencia de fases efusivas de actividad volcánica en el AGP se delimita en superficie por estructuras dómicas aisladas que podrían estar conectadas en profundidad. En el sector Alto de los Volcanes se encuentran domos compuestos por rocas de textura porfírica cubiertos por depósitos piroclásticos (Rueda-Gutiérrez, 2020); asociación litológica definida por Cepeda y Pardo (2004) como el Centro Eruptivo de Olitas. Los domos orientales de Olitas resaltan con una morfología elevada respecto al valle de Quebrada Honda al NE, y la roca porfírica se encuentra meteorizada. No obstante, es posible identificar fenocristales de feldespato dentro de una masa fundamental gris. Los depósitos piroclásticos exhiben una erosión disectada diferente a la encontrada en los afloramientos de roca “dura” de los cuerpos dómicos (Rueda-Gutiérrez, 2020).

Existen sectores en donde la distinción entre materiales provenientes de domos y depósitos piroclásticos es más compleja, debido a la avanzada meteorización de las rocas. Tal es el caso de los domos occidentales (Buenos Aires), identificados principalmente por su geomorfología; las rocas volcánicas que los constituyen tienen un bajo peso específico, con cavidades generadas por remoción de cristales y

cambios de coloración de los cristales existentes, muy parecidas a la litología de los depósitos piroclásticos. En la zona topográficamente más baja del área, en el sector Quebrada Honda, se encuentra un pequeño cuerpo volcánico de forma cóncava que resalta por su geoforma, y cuyas rocas, también de textura porfírica y con cavidades por remoción de cristales, en muestra de mano, presentan alteración en la masa fundamental y exhiben color blanco; los fenocristales de feldespatos son cúbicos y rectangulares (hasta 2 cm) con abundantes cristales menores de 0,5 mm (Rueda-Gutiérrez, 2020).

Finalmente, en el sector Alto de los Godos, donde se concentra la mayor parte de los datos de esta investigación, se han identificado cinco grandes elevaciones (estructuras dómicas) entre 2570 y 2770 m s.n.m. (domo NW, domo Central, domo SE, domo SW y criptodomo Matarredonda) (Rueda-Gutiérrez, 2020). En cuanto a los depósitos piroclásticos, existen secuencias expuestas en los sectores conocidos como cantera ALFAGRES (referenciada también como “criptodomo Matarredonda”) y cantera CEMEX, sector último en el cual Suárez (2016) realizó la estratigrafía de ocho unidades volcanoclásticas.

Respecto a las alteraciones hidrotermales en el AGP y la caracterización de minerales arcillosos, se han identificado minerales de los grupos esmectita, illita, caolinita y halloisitas deshidratadas en los sectores de las quebradas Calderón, Aguatibia y al sur del Alto de los Godos; mineralogías que señalan alteración incipiente de cenizas volcánicas (Garzón, 2003). Cepeda y Pardo (2004) reportaron la presencia de caolinita por acción hidrotermal en la quebrada Olitas y depósitos de corrientes de densidad piroclástica en el sector Guarruz; Alfaro (2005) estudió la mineralogía de las alteraciones hidrotermales en los sectores de Olitas y Guarruz, y estableció dos tipos de alteración: argílica, en depósitos superficiales con caolinita, y propilítica, en líticos accidentales dentro de depósitos; González *et al.* (2008) definieron un sistema epitermal de baja sulfuración en el sector de El Durazno, que afecta a las rocas de la formación Guaduas, adicionalmente, identificaron áreas con fracturas, zonaciones con silicificación, alunitización y caolinización y una alteración argílica avanzada; Rodríguez y Alfaro (2015) caracterizaron la mineralogía de las rocas recuperadas en seis perforaciones en el área de El Durazno, con profundidades entre 50 y 100 metros, e identificaron alteración argílica y argílica avanzada; Peña (2016), en los depósitos de ALFAGRES, registró la presencia de cristobalita y tridimita (polimorfos de SiO₂ de alta temperatura) y la formación de arcillas interestratificadas halloisita-caolinita relacionadas con una alteración argílica avanzada.

Este trabajo tiene como objetivo proveer un esquema de referencia sobre la presencia y significado de minerales arcillosos de alteración hidrotermal y su paragénesis. Así como reportar datos de la composición química en rocas y depósitos volcánicos en el sector Alto de los Godos en el AGP.

Metodología

Datos y métodos

Durante las fases de campo y laboratorio se aplicaron los siguientes procedimientos: a) identificación y selección de afloramientos, b) toma de muestras, c) elaboración de secciones delgadas, d) análisis petrográficos, e) preparación y procesamiento de muestras para análisis de difracción de rayos X (DRX) con técnicas de polvo desorientado y orientado e) integración de resultados.

- a) Inicialmente, se realizó una compilación de afloramientos de unidades volcánicas y domos en sitios con posibilidades de acceso e ingreso

a partir de publicaciones previas, imágenes de Google Earth y recorridos preliminares en campo. Las mejores condiciones para recolectar muestras se encontraron en sitios como zonas accesibles desprovistas de vegetación, canteras de explotación y cortes en taludes de carretera. En esta etapa se determinó que las mejores posibilidades estaban en el sector del Alto de los Godos (domo NW, domo Central, domo SE) y al norte de esta área, en las canteras CEMEX (Rincón de Vargas), cantera ALFAGRES (Venta del Llano) y El Durazno; por esta razón, se gestionaron allí los permisos de acceso, y, en dos campañas subsecuentes, se recolectaron muestras de domos y depósitos piroclásticos.

- b) Los criterios de recolección y selección de las muestras en esta investigación fueron los siguientes: rocas en zonas con variaciones de coloración superficial, usualmente atribuibles a procesos de meteorización o alteración; zonas de fracturas rellenas y fracturas con halos de alteración; afloramientos de rocas con variaciones en resistencia, y materiales de depósitos volcánoclasticos. En total, se recolectaron y analizaron 54 muestras para análisis DRX y 9 muestras para elaboración de secciones delgadas para análisis petrográficos.
- c) Teniendo en cuenta la fragilidad y friabilidad de las muestras, se aplicaron diferentes procedimientos para su elaboración. En primer lugar, cada muestra se redujo a espesores de 1 a 3 cm con una cortadora de disco diamantado. A las rocas friables se les aplicó resina epóxica y después se llevaron a una cámara de impregnación al vacío. En algunas de las muestras se utilizó resina azul para facilitar la detección e interpretación de la porosidad en la inspección visual.
- d) En total, se analizaron nueve secciones delgadas, con un microscopio marca Opticks, ocular con retícula de 0-100 y divisiones marcadas de 10 unidades y un objetivo de estándar de 10X. El porcentaje de minerales se estimó con la técnica de conteo de puntos (Chayes, 1954; Stoltman, 1989), que incluyó entre 368 y 467 puntos por sección. El análisis petrográfico permitió identificar los minerales principales (esenciales) y accesorios, así como sus formas, tamaños y porcentajes en volumen. Igualmente, se identificaron las texturas características de alteraciones. Las rocas se clasificaron de acuerdo con Le Maitre *et al.* (2002).

- e) Las fases minerales de tamaño arcilla ($< 4 \mu\text{m}$), comunes en litologías volcánicas (domos y depósitos piroclásticos), y que son originadas por meteorización química o por procesos de alteración ocasionados por la circulación de fluidos geotermales, pueden ser difíciles de identificar a nivel petrográfico por su tamaño. En este estudio se analizaron los siguientes tipos de muestras:
- Muestras de rocas porfíricas provenientes de domos. De estas se analizaron las partículas en fracción arcilla ($< 4 \mu\text{m}$).
 - Muestras de depósitos piroclásticos, en donde también se analizó la fracción fina.
 - Muestras específicas de material en fracturas y halos de alteración alrededor de fracturas encontradas en los domos.

En total, se analizaron 54 muestras en el Laboratorio de Caracterización Litogeoquímica de la Facultad de Ciencias de la Universidad Nacional de Colombia, sede Bogotá, con un equipo marca Bruker D2 Phaser, que permitió identificar el sistema cristalino de las muestras, la estructura interna del cristal y los minerales arcillosos. Estos análisis se desarrollaron con las técnicas de polvo desorientado y orientado (natural, etilenglicol y muestra calcinada a 500°C) propuestas por [Thorez \(1976\)](#) y [Moore y Reynolds \(1997\)](#).

- **Técnicas de difracción de rayos X**
- Polvo desorientado: las muestras se pulverizaron en un mortero de ágata para evitar impurezas. De este polvo se tomaron 2 g en una fracción $< 70 \mu\text{m}$ y se colocaron en un portamuestras, que fue analizado con un ángulo de barrido entre $2,5^\circ$ y 70° , rango adecuado para identificar la mayoría de los planos cristalográficos presentes en casi todos los minerales conocidos.
- Técnica de polvo orientado: esta técnica se aplicó para el análisis de minerales de arcilla. Primero, se suspendió una fracción $< 3\text{g}$ de la muestra pulverizada en 50 ml de agua destilada y se agitó durante 20 minutos hasta alcanzar una completa dispersión de las partículas. Se dejó reposar durante un lapso entre 5 y 10 minutos, luego de lo cual se tomó 1 cm^3 de la superficie y se colocó sobre una lámina de vidrio, para generar una gota estable por los efectos de la tensión superficial. Luego de 6 horas, el efecto de gravedad en la suspensión produjo una película de minerales arcillosos preferencialmente orientados sobre sus planos basales, que fueron medidos con ángulo de adquisición entre $2,5^\circ$ y 40° . La misma preparación fue saturada con etilenglicol en un ambiente de vacío a 0,3 atm que estimuló las condiciones de

humedad y el hinchamiento de las estructuras cristalinas de minerales expansivos como las esmectitas. Por último, la muestra se llevó a una mufla a 500°C durante tres horas, donde se deshidrató por pérdida de moléculas de OH^- . En este último proceso fue posible identificar, por el colapso de su estructura, las arcillas hidratadas o las que permitieron el ingreso de etilenglicol.

- f) A cada difractograma se le aplicaron las correcciones rutinarias, como la disminución del ruido de fondo y una calibración de las posiciones de los picos, utilizando difractogramas estándares como el del cuarzo. Después, se usó el programa DIFFRAC.EVA[®] para analizar, primero, las muestras de polvo desorientado, donde se identificaron y cuantificaron las especies minerales más representativas. Después, se revisaron las muestras de lámina orientada y se reconocieron las especies de minerales de arcilla.

En total, se analizaron 216 difractogramas, 4 por muestra (polvo desorientado, natural, etilenglicol y calcinada a 500°C), que fueron integrados para identificar las diferencias en la estructura del mineral generadas en cada proceso. Por último, se usó el programa Fityk ([Wojdyr, 2010](#)) para la deconvolución de las señales, paso en el cual se precisó la identificación de los minerales en fracción arcillosa.

Los datos de composición mineral de los materiales provenientes de los domos y depósitos, determinados con DRX, petrografía y química mineral usando microsonda electrónica, fueron integrados con datos de estudios previos en el área en un mapa de distribución de los minerales arcillosos en el AGP, e incorporados en la clasificación de minerales de alteración hidrotermal propuesta por [Alfaro \(2005\)](#).

Resultados

Se identificaron minerales arcillosos relacionados con alteración hidrotermal en el sector Alto de los Godos-domo SE y en las canteras de ALFAGRES y CEMEX. En varios puntos, estas ocurrencias señalan diferentes intensidades de alteración argílica por la presencia de minerales arcillosos tipo esmectita, correspondientes a la asociación mineral del grupo de las zeolitas, y argílica intermedia por minerales del grupo de caolín. De otra parte, la presencia de capas de illita y esmectita (I/E) puede relacionarse con una facie inicial de alteración filica. En la [Figura 3](#) se muestran los sectores muestreados y se representan con círculos de colores de diferentes tamaños los minerales arcillosos identificados en cada uno de los puntos de muestreo.

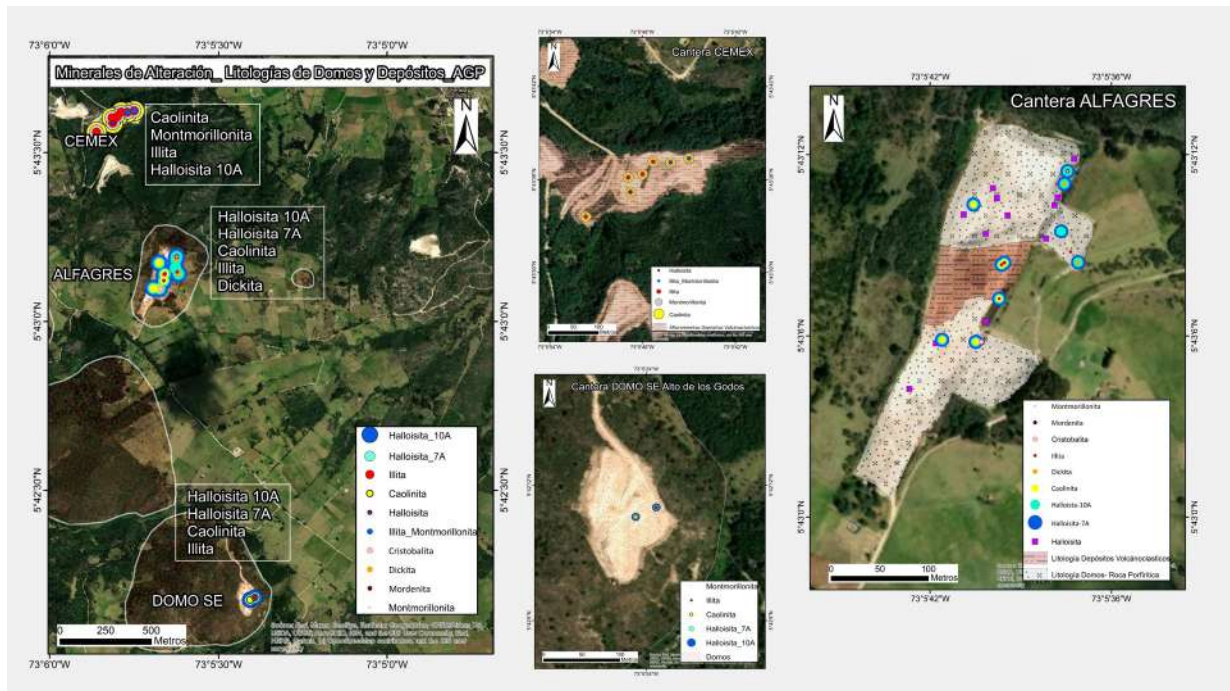


Figura 3. Mapa de ubicación de sitios con minerales de alteración identificados en tres sectores del Área Geotérmica de Paipa, en litologías de domos y depósitos volcanoclasticos: cantera CEMEX, cantera ALFAGRES y cantera domo SE, Alto de los Godos.

Sector cantera de ALFAGRES

Esta área se encuentra al noroeste del domo SE del Alto de los Godos, y corresponde a una litología de rocas porfíricas clasificadas en petrografía de lámina delgada como traquitas, cubiertas de forma parcial por depósitos piroclásticos; estos materiales exhiben

superficies rojizas de alteración/meteorización y zonas de brechas y fracturas (Figura 4). Las condiciones de acceso y buena exposición de las rocas, permitieron la recolección del mayor número de muestras en comparación con los demás sitios.



Figura 4. Fotografía del frente norte de la cantera ALFAGRES; se indica la ubicación de muestras en litologías de domos y depósitos piroclásticos. Los contactos litológicos y la delimitación de los domos y depósitos son tomados de Suárez (2016).

El análisis petrográfico reveló que las muestras tienen texturas porfíricas con fenocristales de diámetros entre 4 y 6 mm, principalmente de plagioclasas y sanidina en masa fundamental de microcristales de sanidina, plagioclasas, cuarzo y minerales arcillosos. La fase arcillosa analizada por DRX contiene las fases cristalinas esmectitas (montmorillonita), halloisita 10Å, halloisita 7Å, zeolitas (mordenita), caolinita y ocasionalmente illita y dickita, estos minerales arcillosos presentan picos agudos y simétricos en los difractogramas, lo cual se relaciona con una

alta cristalinidad típica de procesos de alteración hidrotermal.

En las Figuras 5 y 6 se presentan los resultados de difracción de rayos X (DRX) con la técnica de polvo desorientado y lamina orientada y la Figura 7 contiene la distribución de porcentaje de las principales fases minerales encontradas en el sector de ALFAGRES, esta misma metodología se realizó para las muestras de la cantera de CEMEX y Alto de los Godos.

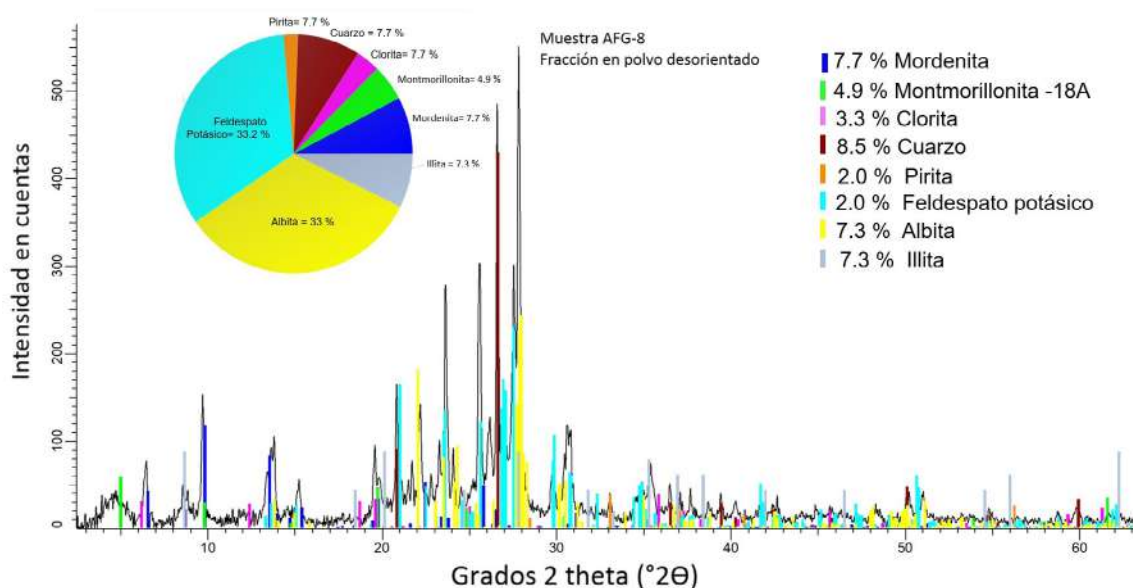


Figura 5. Difractograma para la muestra de polvo desorientado AFG-8, cantera ALFAGRES.

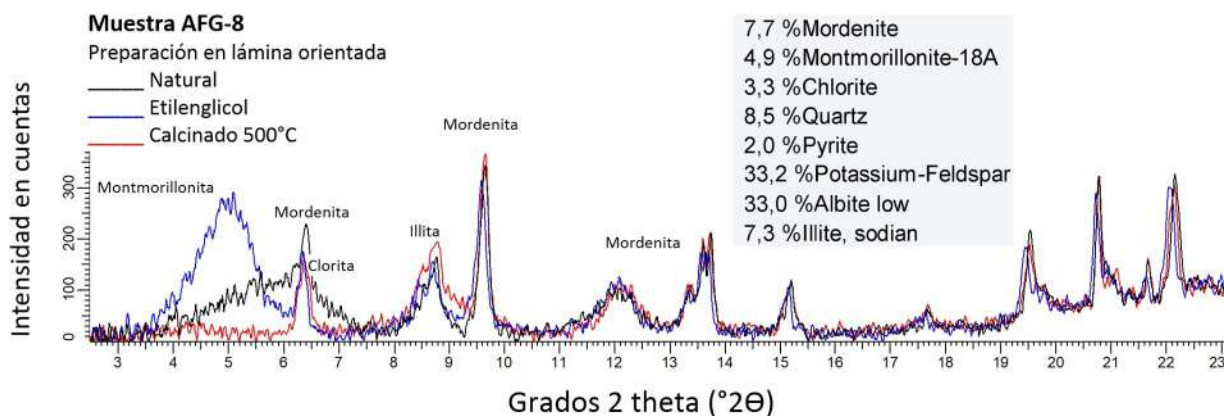


Figura 6. Difractograma en lámina orientada de la muestra AFG-8, cantera ALFAGRES. La línea negra corresponde a la muestra natural (N); la línea azul, a etilenglicol (EG), y la línea roja, a calcinado (C-500°C).

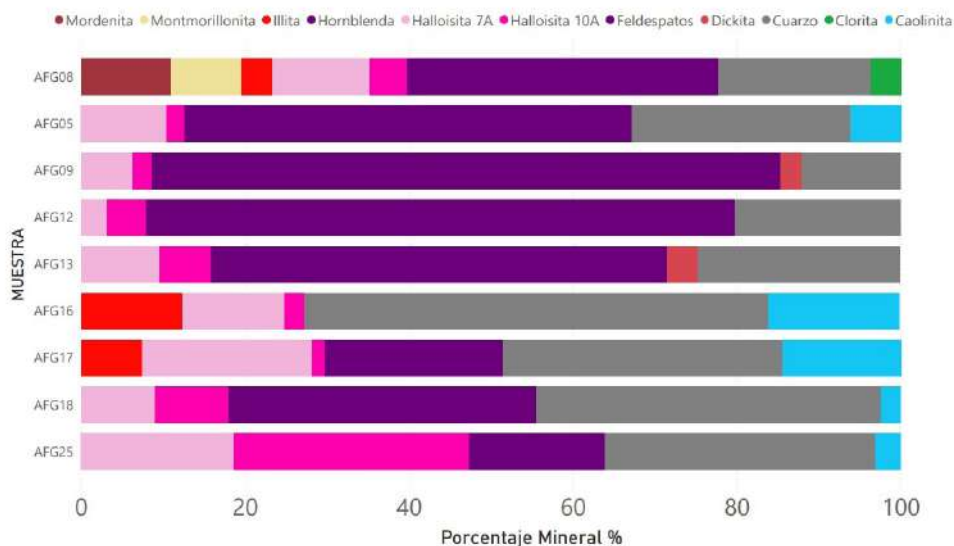


Figura 7. Porcentajes de las principales fases cristalinas en el sector cantera ALFAGRES.

Sector cantera de CEMEX

Esta cantera se encuentra 500 metros al noroeste de la cantera ALFAGRES y está compuesta principalmente por material de depósitos volcanoclásticos. Las muestras fueron tomadas en el frente de explotación El Guarruz, en las unidades Cruz de Murcia y Quebrada Honda, definidas por Suárez (2016) como depósitos

de corrientes de densidad piroclástica concentradas ricas en pómez (ignimbritas). Las fases minerales encontradas en este sector corresponden a feldespatos, cuarzo y minerales arcillosos como caolinita, illita, montmorillonita y, ocasionalmente, presencia de halloisita 7Å (Figura 8).

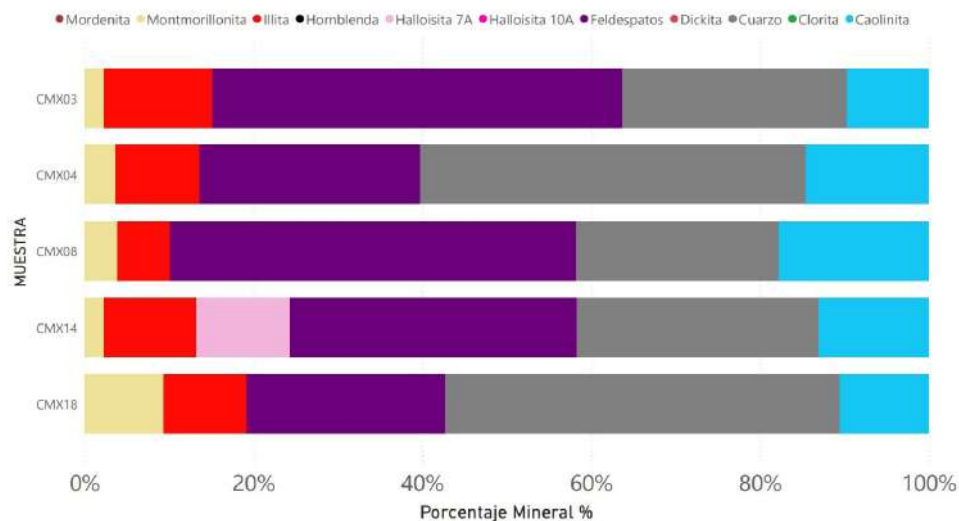


Figura 8. Porcentajes de las principales fases cristalinas en el sector cantera CEMEX.

Sector domo SE Alto de los Godos

Las muestras en ese sector fueron tomadas de zonas de fractura y halos de alteración en el domo, el cual está constituido por rocas porfíricas clasificadas en el rango de las traquitas a traquitas cuarzo feldespáticas alcalinas. Las fases cristalinas de los minerales esenciales de la roca corresponden a feldespatos y cuarzo, y los minerales arcillosos corresponden a halloisitas 7Å y halloisita 10Å, illita; en algunas muestras hay presencia de caolinita, dickita, montmorillonita y clorita (Figura 9).

Trabajos anteriores de caracterización de las litologías volcánicas y las alteraciones hidrotermales en las áreas del Alto de los Godos y las canteras CEMEX y ALFAGRES (Cepeda y Pardo, 2004; Alfaro, 2005; Suárez, 2016; Rueda-Gutiérrez, 2017) hacen mención de procesos de alteración de tipo argílico, en depósitos piroclásticos, inferidos por la presencia de caolinita, además de una alteración propilítica en el rango de temperatura entre 220°C-320°C reportada por Alfaro (2005) y deducida a partir de minerales como la epidota, adularia, clorita e illita, encontrados en xenolitos. Los minerales de alteración identificados en el presente trabajo en superficie en cada uno de los sectores se muestran en la Figura 10. Con la información obtenida en esta investigación es posible complementar los hallazgos previos y validar que los depósitos

piroclásticos del sector CEMEX se encuentran alterados hidrotermalmente; específicamente, presentan alteración de tipo argílica con base en la presencia de minerales tales como esmectita, illita, caolinita y cuarzo, llegando a tener temperaturas de formación para el grupo esmectita-illita en el rango de 100-200°C tomando como referencia las temperaturas de minerales arcillosos en función de las facies de alteración (Fulignati, 2020). De otra parte, para el sector ALFAGRES, la presencia de halloisita 7Å y halloisita 10Å puede estar relacionada con alteración del vidrio volcánico, feldespatos y filosilicatos que se disuelven a condiciones de baja temperatura menores 200°C en soluciones hidrotermales moderadamente ácidas, condiciones similares que en las litologías del sector domo SE del Alto de los Godos.

Finalmente, se presenta una propuesta integrada de la mineralogía de alteración hidrotermal del AGP (Figura 11) que incluye asociaciones mineralógicas de una alteración propilítica (Alfaro, 2005) y minerales de alteración argílica y argílica intermedia identificados en este estudio. La asociación de epidota, clorita, albita es indicadora de interacción de la roca con un fluido de alta temperatura (superior a 250°C) y pH neutro, y la asociación de biotita y feldespato potásico (adularia) es generada por fluidos de pH neutro a más de 320°C.

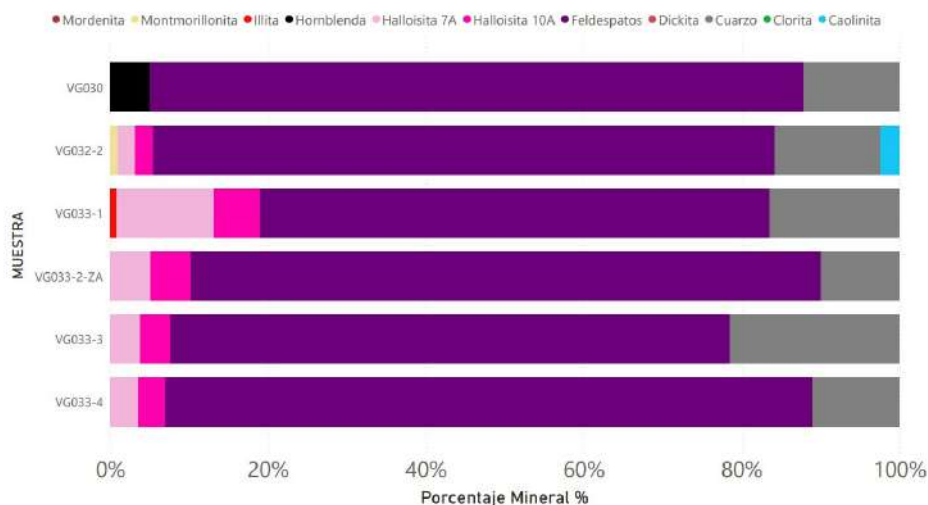


Figura 9. Porcentajes de las principales fases cristalinas en el sector domo SE-Alto de los Godos.

La mineralogía de alteración tipo argílica, que había sido inferida por la presencia de caolinita en superficie, ahora incluye nuevos minerales tales como halloisita (hidratada y deshidratada) y dickita de pH ácido; además, la presencia de minerales interstratificados esmectita-montmorillonita en dos de los sectores

estudiados (ALFAGRES y CEMEX) puede ser indicativo de incipientes procesos de alteración filica formados en condiciones de pH neutro al igual que la illita. La modernita identificada en algunas de las muestras se válida para condiciones de pH alcalino junto con la adularia reportada en estudios anteriores.

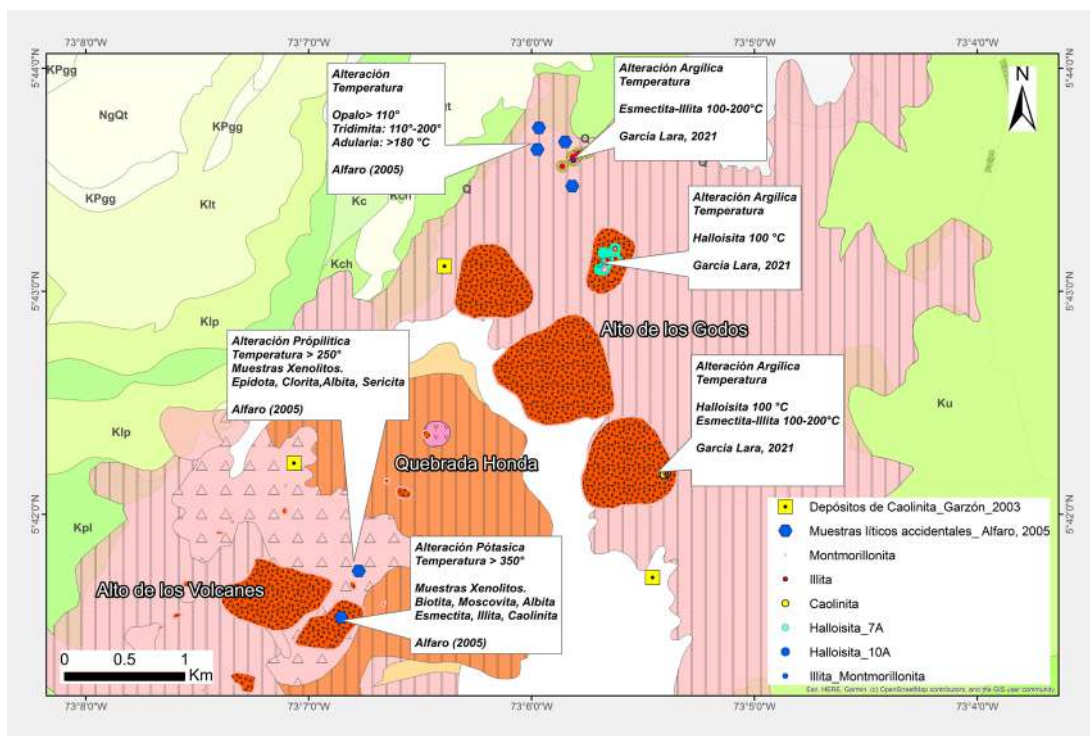


Figura 10. Mapa complementario de puntos de minerales de alteración en los sectores Alto de los Godos, Quebrada Honda y Alto de los Volcanes, en relación con las litologías cartografiadas en estudios previos. Ver Figura 2 para referencias.

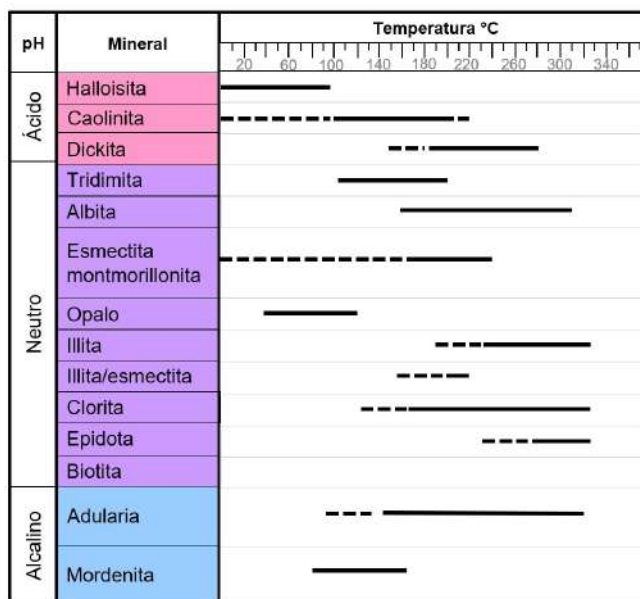


Figura 11. Condiciones de temperatura y pH consistentes con los minerales de alteración hidrotermal en el Área Geotérmica de Paipa, incluyendo la propuesta de Alfaro (2005) y lo reportado en este trabajo.

Discusión

Las evidencias puntuales de alteración hidrotermal en el AGP se encuentran en rocas porfíricas y depósitos piroclásticos expuestos en frentes de explotación minera o en cortes de caminos y vías internas. En este trabajo se presenta una caracterización de los minerales arcillosos presentes en el sector Alto de los Godos que pueden ser generados por procesos endógenos y exógenos, lo cual produce cambios en los minerales esenciales, transformación del vidrio volcánico a minerales arcillosos y estabilización de nuevas asociaciones minerales. Los sectores muestreados se distinguen por la presencia y predominancia de minerales arcillosos tales como caolinita, esmectitas, montmorillonita, illita, que permiten discutir la génesis de los productos de alteración del material volcánico.

Por ejemplo, en el sector de la cantera de CEMEX, en donde la litología corresponde a depósitos de corrientes de densidad piroclástica (Suárez, 2016), se encuentra una mayor abundancia de capas de illita y esmectita, típicas de un ambiente hidrotermal en donde la illitización de la esmectita ocurre en el rango de temperatura de 150-220°C (Harvey y Browne, 1991).

En las muestras de los depósitos piroclásticos del frente Guarruz se identificaron feldespatos (albita, anortoclasa y en menor proporción sanidina), cuarzo, caolinita, illita, montmorillonita-14Å y ocasionalmente halloisita 7Å. En el ensayo en lámina orientada se constató la presencia de arcilla esmectita (montmorillonita), que se expande al impregnarse con etilenglicol. La agudeza e intensidad de las señales del difractograma evidencian un alto grado de cristalinidad. Las muestras obtenidas se pueden correlacionar con las unidades Cruz de Murcia (Ucm) y Quebrada Honda (Uqc) descritas por Suárez (2016). Según el autor, estas unidades están fuertemente argilizadas y están cortadas por “inyecciones hidrotermales”, las cuales presentan halos de alteración color naranja y rojo; estas unidades son interpretadas como depósitos de corrientes de densidad piroclástica concentradas, ricas en pómez, cuyo origen fue un centro volcánico en el que ocurrió rebosamiento. Según Suárez (2016), la alteración de las rocas es producto de procesos de meteorización a los que han estado expuestos los fragmentos vítreos y cristalinos (solo feldespatos potásicos), que se han transformado en minerales del grupo de la arcilla como la caolinita. No obstante, la caracterización de los minerales de arcilla del sector de CEMEX-frente Guarruz señala también una alteración hidrotermal. La asociación mineralógica en estas muestras corresponde

a albita (A), cuarzo (Q), caolinita (K), Illita 2M1 (I) y esmectita (Sm). Teniendo en cuenta la clasificación de la mineralogía de alteraciones en sistemas hidrotermales propuesta por Corbett y Leach (1998), esta asociación mineralógica puede clasificarse dentro del grupo de illita-caolinita (I-K), y está relacionada con fluidos con un pH en el rango 4-6; en este grupo, los minerales de illita coexisten con minerales del grupo caolín de pH 4-5, dependiendo de la temperatura y salinidad del fluido.

Por otro lado, la presencia de illita 2M1 en mayor porcentaje que la esmectita (montmorillonita) en las muestras (Figura 8) puede relacionarse con una transformación del politipo de illita 1Md (rico en esmectita I/S) en el politipo 2M1, rico en illita (Dong y Peacor, 1996). El aumento en la dominancia de la illita 2M1 influye directamente en el espaciamiento de los cristales y, por lo tanto, en el índice de cristalinidad. Por esta razón, el contenido de esmectita dentro de las intercalaciones de illita-esmectita disminuye progresivamente al aumentar la temperatura en el rango de 100-200°C (Harvey y Browne, 1991). Adicionalmente, los depósitos piroclásticos de la cantera CEMEX-frente el Guarruz se encuentran cortados por fracturas que están rellenas de material arcilloso, con halos de alteración de colores grises, cuyas características indican una relación con procesos de alteración hidrotermal por circulación de fluidos, que se correlacionan con la presencia de minerales arcillosos del grupo de la esmectita, illita y caolinita, característicos de facies de alteración argílica intermedia y filica.

Depósitos piroclásticos sector ALFAGRES

Los depósitos piroclásticos del sector ALFAGRES se caracterizan por tener una alteración superficial que se evidencia en coloraciones blancas-grises a amarillas-rojizas en algunas zonas de fracturas. Según el análisis de DRX en agregado desorientado, las principales fases cristalinas corresponden a cristales de feldespato (albita, sanidina, anortoclasa), cuarzo y, en menor porcentaje, halloisita, en todas las muestras. En el tratamiento de lámina orientada se logró confirmar la presencia de halloisita 7Å, halloisita 10Å y caolinita, con excepción de la muestra AFG-8 que fue tomada en la zona donde las rocas presentan alternancia entre color blanco y amarillento que atraviesa de forma vertical los depósitos analizados; en este punto se identificaron otros minerales tales como mordenita, illita 2M1, montmorillonita y clorita.

Rocas porfíricas provenientes del sector ALFAGRES

En la parte central de la cantera ALFAGRES se identifica un paleocanal, el cual fue rellenado por material piroclástico; este rasgo contrasta con el resto de los depósitos que se encuentran altamente alterados en la superficie, y que exhiben colores naranjas, rojizos y amarillos. Los difractogramas resultantes para esta área se caracterizan por la presencia de cuarzo, caolinita, halloisita 7Å, halloisita 10Å e illita 2M1. La halloisita 10Å es hidratada y se considera un estado metaestable de la fase mineral. De otra parte, la halloisita 7Å es deshidratada y, de acuerdo con Joussein *et al.* (2005), la deshidratación puede producirse parcial o totalmente durante el transporte y depositación del mineral. Se ha demostrado que la deshidratación de la halloisita ocurre en el rango 70-100°C, y que el colapso de la estructura se presenta aproximadamente a 400°C (Brigatti *et al.*, 2006; Cheng *et al.*, 2010; Carrillo *et al.*, 2014). Mediante el tratamiento de calcinación a 500°C en lámina orientada se identifica el colapso de la estructura en los tipos de halloisita, lo cual indica que la presencia de esta arcilla en los depósitos piroclásticos está relacionada con un origen hidrotermal de baja temperatura (Harvey y Browne, 1991).

Rocas porfíricas domo SE-Alto de los Godos

Una característica especial de las rocas de este domo es que presentan vetillas pequeñas que intersecan las rocas formando un patrón en malla (*stockwork*). En algunos sectores estas vetillas están rellenas de materiales arcillosos color café-rojizo, acompañadas de halos de alteración de color gris y rosado-rojizo. El halo de alteración de color gris está constituido por feldspatos, cuarzo, caolinita y halloisita 10Å, mientras que el halo de color rosado rojizo está constituido por feldspatos, cuarzo, caolinita, montmorillonita, halloisita 10Å y halloisita 7Å.

De acuerdo con los resultados descritos, se puede deducir que los depósitos de la cantera CEMEX tienen un mayor grado de alteración hidrotermal, indicado

por la presencia significativa de minerales de esmectita e illita que pueden haberse formado en temperaturas entre los 100-200°C en condiciones de pH neutro. Esto puede estar relacionado con la edad de los materiales, ya que, en las dataciones (huellas de fisión) realizadas por Bernet *et al.* (2016), se asignan dos edades probables: una de 3,8 Ma y otra de 9,9 Ma, por lo cual son más antiguos y, por lo tanto, presentan un mayor tiempo de exposición a los procesos de alteración y meteorización en comparación con las rocas de los sectores ALFAGRES y Alto de los Godos, que según las dataciones Ar-Ar de Rueda-Gutiérrez (2017) tienen edades de 2,6 Ma y 2,8 Ma, respectivamente.

Las facies de minerales arcillosos producto de procesos de alteración hidrotermal en el sector Alto de los Godos del AGP pueden relacionarse con minerales arcillosos en ambientes hidrotermales propuestos por Fulignati (2020) (Tabla 1). Minerales del grupo de la caolinita (caolinita, halloisita, dickita y nacrita) son marcadores en las facies de alteración argílica intermedia y también pueden ocurrir en facies argílicas avanzadas; su presencia en la paragénesis de alteración hidrotermal indica relativamente baja temperatura (T <150-200°C). Por otro lado, la illita en ambiente hidrotermal se forma a temperaturas superiores a 200-200°C y hasta 350°C, como una alteración de feldespato potásico y plagioclasa.

Los minerales arcillosos de capas mixtas son productos intermedios de reacciones que involucran elementos puros arcillosos, generalmente de dos componentes, entre la gran variedad de capas mixtas que se han identificado en medio natural (capas mixtas clorita/esmectita y biotita/vermiculita). Las capas mixtas de illita/esmectita están relacionadas con el aumento de la temperatura de formación en un ambiente hidrotermal. La illitización de esmectita a través de I/S de capa mixta ocurre en el rango de temperatura de 150-200°C; este interestratificado I/S es característico de facies de alteración filica (Fulignati, 2020).

Tabla 1. Minerales arcillosos típicos en ambientes hidrotermales en función a las facies de alteración, asociación de minerales, pH y temperatura indicativa de formación (Fulignati, 2020).

Minerales Arcillosos	Asociación de minerales	Facies de alteración hidrotermal	pH	Temperatura °C
Grupo de caolinita	Esmectitas	Argílica intermedia	5,5-8	< 160
Mezcla de capas I/S	Mezcla de capas I/S ± illita	Filica	5,5-7	150-220
Illita	Clorita, adularia, albita, epidota, cuarzo ± biotita ± granate ± anfíbol	Propilítico	5,5-7	230-350

Conclusiones

Los minerales arcillosos estudiados a nivel petrográfico, en la masa fundamental microcristalina, presentan colores de interferencia intermedios de segundo orden, por su tamaño y grado de cristalización. Su caracterización se refinó con el análisis de difracción de rayos X (DRX); mediante la preparación de lámina orientada se identificaron minerales del grupo de la esmectita, illita, caolinita, illita, halloisita hidratada y deshidratada. La formación de este tipo de minerales se relaciona con procesos de alteración hidrotermal, dada la buena cristalinidad de los minerales arcillosos identificada en la agudeza y simetría de las señales en los difractogramas.

Al integrar las observaciones en campo y los análisis petrográficos y de difracción de rayos X (DRX), se identificó la existencia de asociaciones mineralógicas de los grupos de las caolinitas y zeolitas, típicas de una alteración argílica y argílica intermedia con fluidos en condiciones de pH ácido en el rango de 4,5 a 7.

La presencia de halloisita hidratada y deshidratada indica intemperismo supergénico. Sin embargo, su presencia en zonas específicas de alteración como fracturas y halos de alteración puede relacionarse con condiciones hidrotermales de muy baja temperatura menores a 100°C.

Los depósitos piroclásticos del sector de la cantera CEMEX-frente Guarruz exhiben una alteración hidrotermal de tipo argílica y filica, caracterizada por una mayor proporción de minerales del grupo de la esmectita. La asociación mineralógica para este sector es albita, cuarzo, caolinita, illita 2M1 y esmectita, asociación típica de fluidos con pH en el rango 4-6.

Los depósitos piroclásticos del sector de la cantera ALFAGRES poseen una alteración superficial de colores blancos-grises a amarillos-rojizos, caracterizada por la presencia de minerales tales como esmectita, illita y caolinita, asociados con temperaturas de formación de esmectita-illita en el rango de 100-200°C.

Agradecimientos

Los autores agradecen a la Gobernación de Boyacá, al Ministerio de Ciencia, Tecnología e Innovación (Minciencias) y a la Universidad Nacional de Colombia, por el apoyo financiero, administrativo y logístico recibido para la realización de la investigación. Las secciones delgadas elaboradas y

los análisis petrográficos fueron comisionados a la empresa MINERLAB LTDA.

Referencias

- Alfaro, C. (2005). Alteración hidrotermal en el sistema geotérmico de Paipa. Servicio Geológico Colombiano, Bogotá.
- Alfaro, C.; Matiz, J.; Rueda-Gutiérrez, J.; Rodríguez, G.; González, C.; Beltrán, M.; Rodríguez, G.; Malo, J. (2017). Actualización del modelo conceptual del Área Geotérmica de Paipa. Bogotá. Servicio Geológico Colombiano.
- Bernet, M.; Urueña, C.; Amaya, S.; Peña, M.L. (2016). New thermo and geochronological constraints on the Pliocene-Pleistocene eruption history of the Paipa-Iza volcanic complex, Eastern Cordillera, Colombia. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 327, 299-309. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2016.08.013>
- Brigatti, M.F.; Galan, E.; Theng, B.K.G. (2006). Structures and Mineralogy of Clay Minerals. *Developments in Clay Science*, 1, 19-86. [https://doi.org/10.1016/S1572-4352\(05\)01002-0](https://doi.org/10.1016/S1572-4352(05)01002-0)
- Browne, P. (1984). Lectures on geothermal geology and petrology. Project Report, UNU Geothermal Training Programme, Reykjavik, Iceland.
- Carrillo, A.M.; Urruchurto, C.M.; Carriazo, J.G.; Moreno, S.; Molina, R.A. (2014). Caracterización estructural y textural de una halloisita colombiana. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, 13(2), 563-571.
- Cepeda, H.; Pardo, N. (2004). Vulcanismo de Paipa. Servicio Geológico Colombiano, Bogotá.
- Chayes, F. (1954). The theory of thin-section analysis. *The Journal of Geology*, 62(1). <https://doi.org/10.1086/626135>
- Cheng, H.; Yang, J.; Liu, Q.; Zhang, J.; Frost, R. (2010). A spectroscopic comparison of selected Chinese kaolinite, coal bearing kaolinite and halloisite-A mid-infrared and near-infrared study. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 77(4), 856-861. <https://doi.org/10.1016/j.saa.2010.08.018>

- Corbett, G.; Leach, T. (1998). Controls on Hydrothermal Alteration and Mineralization. In: *Southwest Pacific Rim gold-copper systems: Structure, alteration, and mineralization* (pp. 69-82). Volume 6, Society of Economic Geologists. <https://doi.org/10.5382/SP.06>
- Dong, H.; Peacor, D. (1996). TEM observations of coherent stacking relations in smectite, I/S and illite of shales: Evidence for McEwan crystallites and dominance of $2M_1$ polytypism. *Clays and Clay Minerals*, 44(1), 257-275. <https://doi.org/10.1346/CCMN.1996.0440211>
- Fulignati, P. (2020). Clay minerals in hydrothermal systems. *Minerals*, 10(10), 919. <https://doi.org/10.3390/min10100919>
- Garzón, T. (2003). Geoquímica y potencial minero asociado a cuerpos volcánicos en la región de Paipa, departamento de Boyacá, Colombia. Tesis de maestría, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia.
- Gómez, J.; Montes, N. (2020). Mapa Geológico de Colombia 2020. Escala 1:1.000.000. Servicio Geológico Colombiano.
- González, L.; Vásquez, L.; Muñoz, R.; Gómez, H.; Parrado, G.; Vargas, S. (2008). Exploración de recursos energéticos, exploración de uranio en Paipa, Iza, Pesca, Chivatá (Boyacá). Servicio Geológico Colombiano, Bogotá.
- Harvey, C.; Browne, P. (1991). Mixed-layer clay geothermometry in the Wairakei geothermal field, New Zealand. *Clays and Clay Minerals*, 39(6), 614-621. <https://doi.org/10.1346/CCMN.1991.0390607>
- Joussein, E.; Petit, S.; Churchman, J.; Theng, J.; Righi, D.; Delvaux, B. (2005). Halloysite clay minerals - a review. *Clay Minerals*, 40(4), 383-426. <https://doi.org/10.1180/0009855054040180>
- Le Maitre, R.; Streckeisen, A.; Zanettin, B.; Le Bas, M.; Bonin, B.; Bateman, P. (2002). *Igneous Rocks: A Classification and Glossary of Terms: Recommendations of the International Union of Geological Sciences Subcommission on the Systematics of Igneous Rocks*. 2nd ed. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511535581>
- Moore, D.; Reynolds, R. (1997). *X-Ray diffraction and the identification and analysis of clay minerals*. Oxford University Press.
- Peña, Y. (2016). Evaluación petrológica de las rocas de Paipa, Boyacá. Tesis, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia.
- Pirajno, F. (2009). *Hydrothermal processes and mineral systems*. Springer.
- Rodríguez, G.; Alfaro, C. (2015). Caracterización de núcleos de perforación en las zonas de El Durazno, Paipa y criptodomo de Iza. Servicio Geológico Colombiano. Bogotá.
- Rueda-Gutiérrez, J.B. (2017). Cartografía de los cuerpos dómicos del Área Geotérmica de Paipa. Bogotá. Servicio Geológico Colombiano.
- Rueda-Gutiérrez, J.B. (2020). Nuevas evidencias del magmatismo asociado con el sistema geotérmico de Paipa, Boyacá, Colombia. *Boletín de Geología*, 42(3), 51-79. <https://doi.org/10.18273/revbol.v42n3-2020002>
- Stoltman, J. (1989). A quantitative approach to the petrographic analysis of ceramic thin sections. *American Antiquity*, 54(1), 147-160. <https://doi.org/10.2307/281336>
- Suárez, J. (2016). Mecanismos de transporte y acumulación durante las erupciones piroclásticas más explosivas, registradas al sur de Paipa, en la Cordillera Oriental de Colombia. Tesis, Universidad de los Andes, Bogotá, Colombia.
- Thorez, J. (1976). *Practical identification of clay minerals: A handbook for teachers and students in clay mineralogy*. Lelotte.
- Velandia, F. (2003). Cartografía geológica y estructural sector sur del municipio de Paipa. INGEOMINAS, Bogotá.
- Wojdyr, M. (2010). Fityk: A general-purpose peak fitting program. *Journal of Applied Crystallography*, 43, 1126-1128. <https://doi.org/10.1107/S0021889810030499>

Fecha de recibido: 07 de marzo de 2022

Fecha de aprobado: 23 de agosto de 2022
