

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR  
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA  
ESCUELA DE POSGRADO

DIPLOMADO EN GEOTERMIA PARA AMÉRICA LATINA  
EDICIÓN 2018



TEMA: CARACTERIZACIÓN DE MINERALES DE  
ALTERACIÓN HIDROTERMAL EN EL SISTEMA  
GEOTÉRMICO DE PAIPA, BOYACÁ, COLOMBIA.

PRESENTAN:

Angela Valeria García Lara

ASESOR:

Elizabeth Torio Henríquez

SAN SALVADOR, DICIEMBRE, 2018

## Contenido

1. Resumen.....	6
2. Introducción.....	7
3. Planteamiento del problema.....	10
4. Justificación.....	11
5. Objetivos.....	12
5.1. Objetivo general.....	12
5.2. Objetivos específicos .....	12
6. Marco Geológico .....	13
6.1. Marco Tectónico Regional.....	13
6.1.1. Marco Estructural Local.....	14
6.1.1.1. Estratigrafía Regional .....	16
6.1.1.2. Estratigrafía Local. ....	18
6.1.1.3. Evolución Vulcanológica .....	19
6.1.1.4. Alteración Hidrotermal.....	24
6.1.1.5. Modelo Geotérmico.....	28
6.2. Marco Conceptual .....	30
7. Metodología .....	42
8. Presentación de resultados.....	46
8.1. Análisis petrográficos.....	48
8.2. Difracción de rayos X.....	62
9. Análisis de datos .....	72
10. Conclusiones y recomendaciones .....	75
11. Recomendaciones.....	76
12. Agradecimientos .....	76

## Lista de Figuras

<b>Figura 1.</b> Mapa Localización del área geotérmica de Paipa.....	8
<b>Figura 2.</b> Rasgos estructurales regionales (A) y locales del área geotérmica de Paipa (B). Fuente: Velandía (2003).....	14
<b>Figura 3.</b> Geología del área Geotérmica de Paipa. Fuentes: Cartografía 1:25.000, Velandia (2003); cartografía de vulcanitas, Cepeda & Pardo (2004); Cartografía de domos (Rueda-Gutiérrez, 2016). .....	20
<b>Figura 4.</b> Alteración de alta temperatura identificada en muestras de xenolitos hallados en el sector de Olitas: En matriz de ceniza (a) Epidota (E) sobre plagioclasa (Pl); alrededor de la epidota, sericita (Sc). b. Clorita (Cl), en venilla, cuarzo (Q). c. Clorita radial sobre matriz feldespática. d. Albita (Ab) en venilla. Nicoles cruzados.....	26
<b>Figura 5.</b> Modelo conceptual del área geotérmica de Paipa (SGC,2017).....	29
<b>Figura 6.</b> Diagrama esquemático de un Sistema geotérmico ideal por la Asociación Internacional de Geotermia (IGA).....	31
<b>Figura 7.</b> Geotermómetros minerales más frecuentes (UES, 2016). .....	34
<b>Figura 8.</b> Minerales de alteración hidrotermal. Tomado de Corbett & Leach, 1998.....	40
<b>Figura 9.</b> Metodología proyecto de investigación. ....	42
<b>Figura 10.</b> Mapa de Localización muestras analizadas. ....	46
<b>Figura 11.</b> Clasificación Minerales de alteración hidrotermal. Tomado de Corbett & Leach, 1998.....	47
<b>Figura 12.</b> Información general muestra VG-SD-009 .....	48
<b>Figura 13.</b> Difractograma VG-SD-009-Roca Total. ....	63
<b>Figura 14.</b> Difractograma VG-SD-009-Fracción Arcilla. ....	63
<b>Figura 15.</b> Difractograma VG_SD_008- Fractura rellena material arcilloso café-rojizo. ....	64
<b>Figura 16.</b> Difractograma VG_SD_008- Fractura rellena –fracción arcilla. ....	64
<b>Figura 17.</b> Difractograma VGD_008_ZA1.....	65
<b>Figura 18</b> Zonas de alteración muestra VG-SD-008.....	73

## Lista de Tablas

<b>Tabla 1.</b> Definiciones de interés prioritario en áreas estratégicas en Colombia (Bona, P& Covielo, M.,2016) .....	7
<b>Tabla 2</b> Resumen de las fallas geológicas cartografiadas por Velandia (2003). .....	15
<b>Tabla 3.</b> Resumen estratigrafía regional del área de Paipa (Velandia,2003).....	17
<b>Tabla 4.</b> Resumen estratigrafía local del área de Paipa (Velandia,2003).....	18
<b>Tabla 5.</b> Edades de los principales eventos volcánicos de Paipa (Rueda, 2016) .....	21
<b>Tabla 6.</b> Resumen de alteraciones hidrotermales reportadas en el área geotérmica de Paipa. ....	27
<b>Tabla 7.</b> Productos típicos de reemplazo por alteración.....	36
<b>Tabla 8.</b> Procesos de alteración. ....	37
<b>Tabla 9.</b> Clasificación tipos de alteración hidrotermal modificado de Meyer & Hemley (1967) .....	38
<b>Tabla 10.</b> Resumen de resultados petrografía y difracción de rayos X.....	61

## Lista de Fotografías

<b>Foto 1.</b> Panorámica del sector Alto de los Godos, área geotérmica de Paipa. ....	21
<b>Foto 2.</b> Panorámica del sector Alto de los Volcanes, área geotérmica de Paipa .....	22
<b>Foto 3.</b> Panorámica del sector Quebrada Honda, área geotérmica de Paipa. ....	22
<b>Foto 4.</b> Sector caolinitizado del cuerpo intrusivo El Durazno. ....	23
<b>Foto 5.</b> Sector el Durazno, cantera de explotación. (Rodriguez,2017) .....	24
<b>Foto 6.</b> Afloramiento de depósitos volcanoclásticos-Sector el Guarruz.....	25
<b>Foto 7.</b> Afloramientos de depósitos volcánicos en el sector Alto de los Godos, y zonas de alteración argílica .....	25
<b>Foto 8.</b> Detalle análisis sección delgadas.....	43
<b>Foto 9.</b> Preparación de muestras para análisis de difracción de rayos X. ....	44
<b>Foto 10.</b> Microfotografía de Cristal Matriz muestra VG-SD-008, izquierda XP, 4X y Derecha PP, 4X.Microfotografía de Cristal Matriz muestra VG-SD-008, izquierda XP, 4X y Derecha PP, 4X.M.....	49
<b>Foto 11.</b> Microfotografía de cristal de feldespato potásico (sanidina) microfracturado con inclusiones de cristales de cuarzo. Izquierda XP objetivo 4x, Derecha PP objetivo 4X ....	50
<b>Foto 12.</b> Microfotografía de microcristales de sanidina, presencia de óxidos de hierro, izquierda XP objetivo 4x, derecho PP objetivo 4x.....	51
<b>Foto 13.</b> Afloramiento domo volcánico sector Norte Alto de los Godos. Afloramiento domo volcánico sector Norte-Alto de los Godos .....	71
<b>Foto 14.</b> Afloramiento domo volcánico sector Sur Alto de los Godos. ....	71
<b>Foto 15.</b> Afloramiento domo volcánico- detalle textura porfiritica .....	71

## 1. Resumen.

El área geotérmica de Paipa se encuentra en la parte central de la Cordillera Oriental de Colombia, es considerado uno de las áreas geotérmicas de interés prioritario para el aprovechamiento del recurso geotérmico. En 2017 el Servicio Geológico Colombiano publica el modelo conceptual actualizado, el cual incluye la integración de métodos geofísicos de campos potenciales, datos geoquímicos de rocas y fluidos, alteración hidrotermal y resultados parciales del modelo resistivo basado en el estudio magnetoteléurico. A partir de este modelo se tiene una mejor concepción de la estructura del sistema y se han propuestos dos perforaciones de gradiente próximas a realizarse.

Los estudios de alteración hidrotermal en el área geotérmica de Paipa, están referidos fundamentalmente a la superficie, se ha reportado alteración argílica, argílica avanzada, potásica y propilítica. La identificación de la alteración de alta temperatura ha sido registrada de muestras de xenolitos en el Sector de Olitas, en cuanto a la alteración de más baja temperatura ha sido registrada en muestras de depósitos volcánicos, en el sector el Durazno se registra alteración hidrotermal de alta intensidad.

Los resultados de esta investigación aportan al conocimiento de la mineralogía de alteración hidrotermal en el sector de Alto de los Godos, cinco sectores de muestreo fueron analizados por medio de análisis petrográficos en sección delgadas y análisis de difracción de rayos X.

Los análisis petrográficos permiten clasificar las muestras con cierto grado de incertidumbre como: traquita, cuarzotraquita, traquita cuarzo alcalina todas con presencia de alteración argílica. La mineralogía de principal está representada por feldespato potásico (sanidina), plagioclasa, horblenda y cuarzo, como minerales accesorios se encuentra apatito y circón y como minerales de alteración principalmente arcillas y óxidos de hierro.

Los análisis de difracción de rayos X realizados en once muestras por el método de polvo orientado y desorientado permitieron identificar minerales tales como anortoclasa, sanidina, albita, ortoclasa, cuarzo y en fracción arcillosa se identificó halloysita, caolinita, ocasionalmente mormorillonita. La mayoría de minerales de alteración está compuesta por halloysita y cuarzo, con algunos minerales de albita y caolinita/caolinita-montmorillonita, los cuales pertenecen a la alteración argílica.

## 2. Introducción

Colombia tiene una posición geográfica y geológica favorable para el desarrollo de los recursos geotérmicos, dado que parte del territorio se encuentra localizado en el cinturón de fuego de pacífico, zona donde el gradiente de temperatura es anormalmente alto y se manifiesta con la actividad volcánica en las cordilleras occidental, central y presencia de actividad ígnea en algunas áreas de la cordillera oriental. Las áreas de interés prioritario en Colombia se referencian en la Tabla 1.

**Tabla 1.** Definiciones de interés prioritario en áreas estratégicas en Colombia (Bona, P& Coviello, M.,2016)

Área	Interés Prioritario
Volcanes Chiles-Cerro Negro de Mayasquer, Macizo Volcánico Nevado del Ruiz.	Alto
Paipa- Iza	Medio-Alto
Volcanes Cumbal y Galeras	Medio
Volcanes Sotará, Puracé, Doña Juana y Nevados del Huila.	Bajo

En la cordillera oriental una de las áreas de mayor interés es área geotérmica de Paipa, localizado en el departamento de Boyacá, a 180 km de la ciudad de Bogotá, aproximadamente dos horas y media por carretera pavimentada, es una zona conocida por la presencia de fuentes termales con aguas sulfatadas de elevada salinidad que son reconocidas por sus beneficios terapéuticos y son utilizadas de manera directa como aguas recreativas con una floreciente industria turística. El municipio de Paipa tiene fácil acceso, topografía suave, no se registra presencia de resguardos o comunidades indígenas, cuenta con una excelente infraestructura y conexión vial, al interior del municipio existen una serie de carreteras destapadas que hacen fácil el desplazamiento dentro de la región y adicionalmente cuenta con un aeropuerto para aviones de mediana capacidad. Las anteriores características de la región son favorables para el desarrollo de los recursos geotérmicos posicionándose como un lugar estratégico en Colombia en comparación con otras áreas de interés geotérmico alta.

Dentro del contexto geológico, el área de Paipa está dominado por rocas sedimentarias marinas del cretácico y rocas sedimentarias del cretácico superior al paleógeno, así como depósitos no consolidados del Neógeno a cuaternario, siendo importantes los depósitos volcánicos y volcanoclásticos y una brecha hidrotermal local que puede estar relacionada con una fuente de calor magmática para el sistema geotérmico.

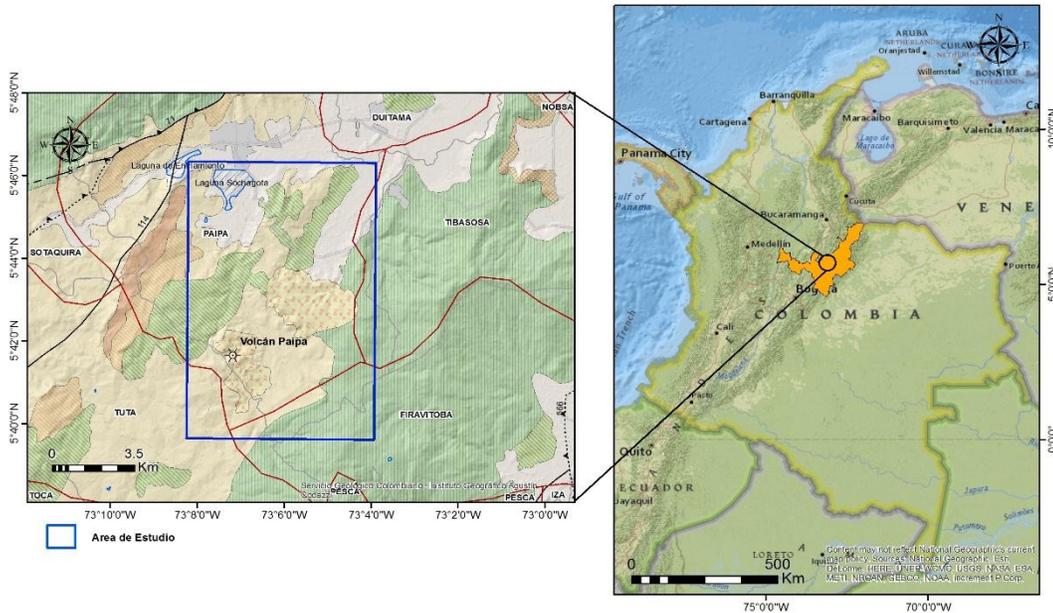


Figura 1. Mapa Localización del área geotérmica de Paipa.

Las características del sistema geotérmico de Paipa propuestas a partir de criterios geológicos, estructurales, vulcanológicos, geofísicos e isotópicos son compilados en el modelo conceptual del área geotérmica de Paipa. El sistema se encuentra dentro del bajo topográfico del río Chicamohca emplazado en el ambiente compresivo de la cordillera Oriental, entre las fallas Boyacá y Soapaga, en un terreno basculado de sur a norte hacia el río Chicamohca, en el área enmarcada por el oriente y el sur por el anticlinal Tibasosa–Toledo, por el occidente por la Falla Chivatá y por el norte por el río Chicamocha.

De acuerdo con este modelo el sistema ocurre en un terreno basculado de sur a norte donde encuentra su cota más baja en alrededores del Río Chicamocha. (1) El calor del sistema estaría asociado a tres posibles fuentes: el calor residual de los eventos magmáticos, que dieron lugar a las intrusiones ígneas cuya edad más reciente, es del orden de 1 m.a., calor radiogénico por concentración anómala de 238U, 232Th y 40K en las intrusiones ígneas y el calor asociado a un gradiente geotérmico normal.

El sistema tiene dos áreas de descarga principales; una de baja permeabilidad al norte de la falla Cerro Plateado, límite norte del reservorio sedimentario, en donde se encuentran el manantial de máxima temperatura de descarga (76°C) y un ventiladero de vapor y, una de mayor permeabilidad en el sector ITP-Lanceros a tres (3) km al norte de la anterior, en donde se concentra el mayor número de manantiales. Dos posibles reservorios son identificados, uno de alta temperatura (~230°C) estaría hospedado en la zona del basamento, en zonas de fallas y fracturas y otro un reservorio sedimentario formado por niveles de arenisca de la Formación Une de alta permeabilidad. Este reservorio, más superficial, tendría un volumen aproximado de 1.1 km<sup>3</sup>

El Servicio Geológico Colombiano de acuerdo a este modelo conceptual actualizado ha seleccionado sitios como blancos de perforación para gradiente térmico y conocimiento geológico, el interés particular son los perfiles detallados de temperatura las dos perforaciones se realizarán a una profundidad de 500 m.

Teniendo en cuenta la importancia del sistema geotérmico de Paipa, esta investigación busca aportar al conocimiento de la mineralogía de alteración hidrotermal en el sector Alto de los Godos donde se encuentra una serie de domos volcánicos reportados en (Alfaro et al., 2017), para cumplir el objetivo el estudio incluye la caracterización petrográfica y de difracción de rayos X de cinco puntos de muestreo en este sector.

### 3. Planteamiento del problema

Durante la fase de reconocimiento de un sistema geotérmico uno de los énfasis es el mapeo de las manifestaciones hidrotermales (fumarolas, zonas alteradas, lodo hirviente, suelo humeante), estas manifestaciones son las primeras evidencias de la presencia de un reservorio geotérmico. Por lo tanto, la alteración hidrotermal es parte integral de la investigación geotérmica. El estudio de alteración hidrotermal puede indicar cambios en el ambiente geológico producido por variaciones en permeabilidad, temperatura, infiltración de fluidos magmáticos o aguas superficiales.

Una de las características de la alteración hidrotermal es la distribución espacial de los minerales, tanto en la vertical como en la horizontal, determinada por las condiciones termodinámicas de estabilidad de minerales. La alteración superficial define el tamaño del campo y deduce la evolución térmica y ubicación de fallas geológicas importantes.

Estudios de alteración hidrotermal han sido realizados en el sistema geotérmico de Paipa en muestra de líticos accidentales y depósitos volcánicos (Alfaro, 2005) y recientemente en perforaciones someras en el sector el Durazno (Gonzalez, 2008), sin embargo, no existe una clara caracterización de los minerales secundarios y su origen. Adicionalmente el sistema geotérmico de Paipa no presenta una distribución áreal continua de las zonas de alteración, estas se encuentran sectorizadas expuestas en las zonas de exploración minera.

Con el presente estudio se detallará la descripción de los minerales de alteración de los domos volcánicos localizados en el sector Alto de los Godos, mediante la caracterización petrográfica y de difracción de rayos X.

## 4. Justificación

Un modelo conceptual del área geotérmica de Paipa, ha sido propuesto a partir de un modelo geológico 3D integrado a partir de investigaciones geofísicas de campos potenciales y la relación de observaciones y datos de estudios de geoquímica rocas y fluidos, alteración hidrotermal, sondeos eléctricos verticales, mediciones de temperatura superficial y resultados parciales modelo resistivo. (Alfaro et al., 2017)

Una de las características del área geotérmica de Paipa es el complejo de domos Alto de los Volcanes y Alto de los Godos localizados en la parte central del área, varios niveles de arcillolitas de la secuencia sedimentaria, así como depósitos volcánicos meteorizados cubren gran parte del área geotérmica, reduciendo la permeabilidad vertical y restringiendo la ocurrencia de manifestaciones termales entre los complejos de domos y las zonas de descarga. (Alfaro et al., 2017)

En esta área geotérmica las condiciones climáticas de precipitación y evaporación favorecen la formación de evaporitas como evidencia la presencia de eflorescencias de sales visibles en superficie (mirabilita y thenardita), las observaciones indirectas por métodos geofísicos eléctricos y electromagnéticos han permitido inferir zonas de circulación de agua salada. Su concentración es tan elevada que se ha permitido el beneficio de sulfato de sodio en la planta de sales de Paipa (SALPA). La extensión y profundidad de una fuerte anomalía negativa de resistividad eléctrica observada en modelos magnetotéluricos 2D y 3D, al noroccidente y occidente del sistema, permite suponer que la fuente salada está originada en la disolución de sales más solubles (sulfato de sodio) de evaporitas alojadas en niveles inferiores de la cuenca sedimentaria. (Alfaro et al., 2017)

La mezcla del fluido termal originado en el reservorio geotérmico y la fuente salada es de tal magnitud que enmascara su composición química e isotópica, e impide inferir las condiciones fisicoquímicas del reservorio a partir de la caracterización del agua descargada por los manantiales termales. (Alfaro et al., 2017) La temperatura del reservorio no puede ser estimada de manera confiable usando la técnica de geotermometría líquida y gaseosa, ya que los fluidos descargados por los manantiales no son representativos del fluido geotérmico debido los procesos de mezcla.

Los estudios de alteración hidrotermal en el área geotérmica de Paipa, están referidos fundamentalmente a la superficie, se ha reportado alteración argílica, argílica avanzada, potásica y propilítica. La identificación de la alteración de alta temperatura ha sido registrada de muestras de xenolitos en el Sector de Olitas, en cuanto a la alteración de más baja temperatura ha sido registrada en muestras de depósitos volcánicos, en el sector el Durazno se registra alteración hidrotermal de alta intensidad.

Con el objetivo de aportar al conocimiento de la mineralogía de alteración del área geotérmica de Paipa, esta investigación describe las características petrográficas y minerales de alteración de las rocas provenientes del complejo de domos Alto de los Volcanes.

## 5. Objetivos

### 5.1. Objetivo general

- Caracterizar minerales de alteración hidrotermal en los sectores Cruz de Murcia, Quebrada Honda, El Durazno del Sistema Geotérmico de Paipa

### 5.2. Objetivos específicos

- Realizar la descripción petrográfica de cinco secciones delgadas del sector Cruz de Murcia.
- Realizar análisis e interpretación de difractogramas de rayos X de los sectores Cruz de Murcia y el Durazno.

## 6. Marco Geológico

### 6.1. Marco Tectónico Regional

La configuración tectónica que se conoce actualmente en Colombia, es el producto de la interacción de las placas Nazca y Caribe, ambas con afinidad oceánica, subducen bajo la suramericana. La zona de interacción entre dichas placas, en la zona de deformación de los Andes de Colombia, se ha definido como el Bloque de los Andes del Norte (Trenkamp et al., 2002). En este contexto el relieve colombiano se caracteriza por presentar las tres cordilleras andinas: la Cordillera Oriental (CO<sub>r</sub>), que a su vez se divide a partir de la Sierra Nevada del Cocuy (Macizo de Santander) hacia el norte en la Serranía del Perijá y hacia el nororiente en los Andes de Mérida; separados por la cuenca del Catatumbo. La Cordillera Central (Cc) y la Cordillera Occidental (CO<sub>c</sub>) (Bayona et al., 2013).

Los modelos de evolución de la parte central de la (CO<sub>r</sub>), muestran una etapa de acumulación en ambiente distensivo (rifting) con dos depocentros separados por un alto intra-cuenca constituido por un basamento somero denominado Alto de Santander, cuya prolongación aflora hoy en el Macizo de Floresta (De Freitas et al., 1997). Esta etapa de rifting terminó en el Cretácico temprano para dar inicio a la fase de subsidencia termal (Acosta, 2002), durante la cual se dio el depósito de la espesa secuencia sedimentaria marina. A finales del Cretácico se presentó un cambio a ambiente y se depositaron sedimentos continentales en una cuenca de antepaís como resultado del levantamiento provocado por la acreción de la Cordillera Occidental (Cooper et al., 1995).

Durante el Mioceno tardío y el Plioceno se generó un cinturón de plegamiento y cabalgamiento en la Cordillera Oriental, seguido por el levantamiento regional de toda la cadena en el Plioceno-Pleistoceno (Dengo & Covey, 1993). Estos autores caracterizan el levantamiento con fallas de cabalgamiento y retrocabalgamiento con despegues en las unidades sedimentarias incompetentes del Cretácico y con fallas de basamento relacionadas con la inversión tectónica positiva a lo largo de antiguas fallas normales del Mesozoico como la Falla Boyacá.

La única manifestación de vulcanismo plioceno en (CO<sub>r</sub>), se presenta en el sector de Paipa-Iza, departamento de Boyacá, aunque se reconoce el carácter ácido de composición riolítica de dicho evento no se tiene claridad del ambiente geotectónico en el que se desarrolló. Esta es una región cuyo basamento lo componen rocas metamórficas y sedimentarias del Paleozoico, así como intrusivas y extrusivas del Jurásico que afloran en el Macizo de Floresta, hacia el NE de Paipa. En la zona afloran rocas sedimentarias jurásicas en estructuras regionales como el Anticlinal de Arcabuco, sobre el basamento ocurre la secuencia cretácica sedimentaria con diferencias en facies y espesores por el control tectónico de las fallas de Boyacá y Soapaga. Se presentan igualmente rocas del Paleógeno y depósitos inconsolidados del Neógeno y Cuaternario que cubren parte del área. (Velandia, 2003)

### 6.1.1. Marco Estructural Local

El modelo estructural para el área geotérmica de Paipa propuesto por (Velandia, 2003), presenta estructuras que podrían estar relacionadas con la reactivación de estructuras antiguas y generación de nuevas fallas relacionadas con el régimen compresivo durante la Orogenia Andina.

El área geotérmica de Paipa, este ambiente compresivo está controlado por las fallas de Soapaga y Boyacá. Según la cartografía geológica del área realizada por (Velandia, 2003), a partir de imágenes de satélite y datos cinemáticos identifica en el área tres sistemas principales de fracturamiento que presentan dirección NNE, representado por las fallas el Bizcocho, El Batán, Rancho Grande, Buenavista, Agua tibia, y Lanceros, interpretando dos estilos estructurales, el primero afecta el basamento es decir “piel gruesa” que también corta la cobertera sedimentaria y el segundo “escamación delgada”, que se restringe solamente a la cobertera.

El segundo patrón de fracturamiento presenta dirección NW y entre las estructuras que sobresalen se encuentran las fallas Cerro Plateado y Paipa-Iza que se interpretan como estructuras de basamento relacionadas con una fase distensiva, reactivadas durante la Orogenia Andina, conservando su carácter normal y según Velandia (2003) facilitaron el paso de fluidos hidrotermales e incluso ascenso de magmas.

El tercer sistema presenta en dirección NE, ésta representado por las fallas el Hornito, Las Canocas y Santa Rita son interpretadas como estructuras de desgarre.

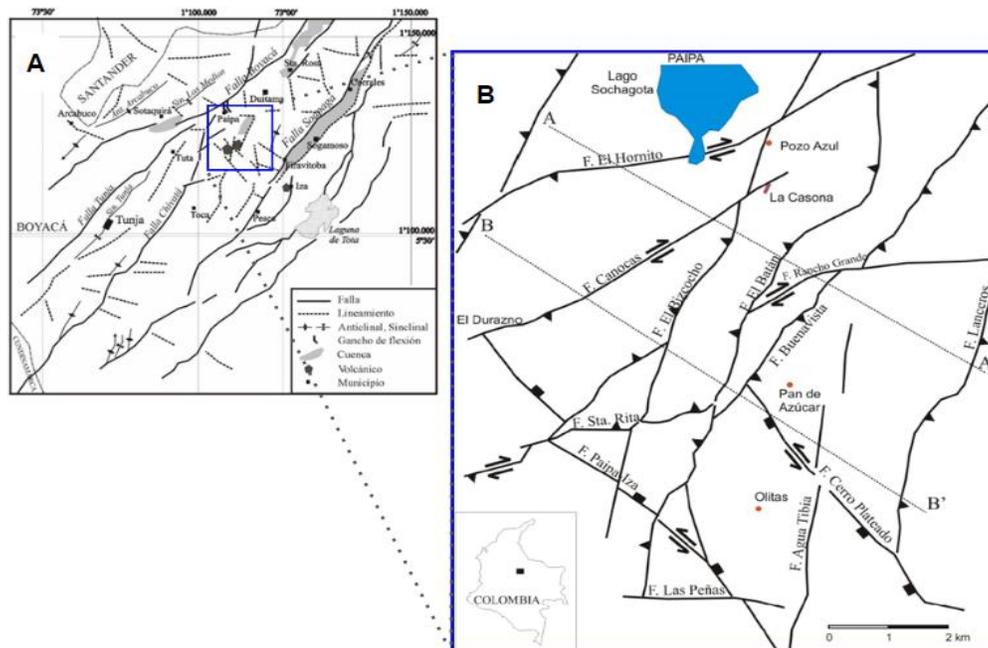


Figura 2. Rasgos estructurales regionales (A) y locales del área geotérmica de Paipa (B).

A continuación, se presenta un resumen de las principales fallas, su descripción e interpretación según Velandia (2003).

**Tabla 2** Resumen de las fallas geológicas cartografiadas por Velandia (2003).

Nombre Falla	Descripción	Interpretación
Falla el Bizcocho	Falla de cabalgamiento con dirección de rumbo NNE su vergencia es hacia el Este.	<p>Velandia (2003), interpreta las fallas anteriores con dos estilos estructurales. El estilo "Thick skin" lo asocia a las fallas inversas de Lanceros y Agua Tibia que en profundidad en el basamento paleozoico tendrían un comportamiento de fallas de retrocabalgamiento asociadas a la Falla Soapaga. La zona limitada entre estas dos fallas genera un bloque hundido en sentido longitudinal, con continuidad en el actual Pantano de Vargas y que al sur fue parcialmente llenada por depósitos volcánicos del Plio-Pleistoceno.</p> <p>Por otro lado, el estilo "Thin skin" está asociado con los cabalgamientos de las fallas El Bizcocho y El Batán, donde esta última representa el frente o falla más distal de un abanico imbricado de cabalgamientos, que tienen despegue en la base de la Fm. Plaeners, y se desprenden de la Falla de Boyacá.</p>
Falla el Batán	Falla de cabalgamiento de orientación NNE, casi paralela a la Falla el Bizcocho, su vergencia es hacia el Este. Hacia el norte el trazo de la falla se vuelve totalmente Norte-Sur. Según Velandia (2003), esta estructura es una de las que ha evidenciado desplazamientos neo tectónicos. Alfaro et al., (2005) reportaron que a lo largo de esta estructura y de la Falla El Bizcocho se encuentran las principales manifestaciones termales (manantiales y el ventilador de vapor de Quebrada Honda).	
Falla Buena Vista	Falla con una dirección de rumbo NE, se conecta a su parte sur con la Falla el Batán y al norte con la Falla Rancho Grande. Es una estructura de cabalgamiento con vergencia al NW, su despegue está descrito en el Grupo Churuvita; su trazo es desplazado aproximadamente 200 m, en forma dextral, por la Falla Rancho Grande.	
Falla Agua Tibia	Es una estructura de trazo rectilíneo, discontinuo e interrumpido localmente por fallas NW, su dirección de rumbo es casi N-S. Según la cartografía de Velandia (2003) la falla se encuentra cubierta el mayor parte de su trazo por los depósitos volcánicos existentes y se interpreta como una falla inversa inclinada al Oeste, a partir de la cual se producen cabalgamientos con vergencia al noroeste.	
Falla Lanceros	Falla con orientación de rumbo NE, de tipo inverso que regionalmente actúa como un retrocabalgamiento de la Falla de Soapaga, la cual se encuentra al oriente de la falla Lanceros.	

<p>Falla Cerro Plateado</p>	<p>Esta falla se distingue por tener una zona de cizalla, su dirección de rumbo es así el NW. Esta estructura controla el valle de la quebrada Honda Grande y se puede asumir su trazo hasta el cruce con las fallas longitudinales de Buenavista y El Batán</p>	<p>Estas dos fallas se interpretan como estructuras de basamento relacionadas con una fase tectónica anterior de tipo distensivo, las cuales fueron reactivadas localmente durante la Orogenia Andina, conservando su carácter de fracturas abiertas que facilitan el paso de fluidos hidrotermales, en especial la Falla Paipa-Iza.</p>
<p>Falla Paipa-Iza</p>	<p>Denominada también Falla Los Volcanes. Su dirección de rumbo es NW, regionalmente continua hasta el cuerpo volcánico de Iza. Esta falla se considera como una fractura de gran profundidad.</p>	<p>Regionalmente esta Falla tendría una continuidad por debajo de la secuencia sedimentaria con un estilo estructural “Thin Skin” hasta el trazo de la Falla Boyacá</p>
<p>Falla El Hornito</p>	<p>Es una estructura de rumbo, con movimiento lateral dextral, su orientación es NE.</p>	<p>Estas tres estructuras se interpretan como una serie de “fallas de desgarre” que afectan a fallas como El Bizcocho y El Batán, por lo que se puede asumir que son el sistema de fallas más recientes de la zona.</p>
<p>Falla Canocas</p>	<p>Falla paralela a la Falla Hornito, su movimiento es de rumbo dextral</p>	
<p>Falla Santa Rita</p>	<p>Falla de cabalgamiento con fuerte componente de movimiento lateral dextral, su orientación preferencial es ENE.</p>	

### 6.1.1.1. Estratigrafía Regional

Dentro del área de estudio se han descrito unidades metamórficas e ígneas Precámbricas (?) a pre- Devónicas (Sotelo, 1997; Velandia, 2003), rocas sedimentarias del Cretácico (Renzoni, 1981; Velandia, 2003) y depósitos volcánicos del Plio-Pleistoceno (Cepeda y Pardo, 2004), A continuación, se describen las principales unidades estratigráficas.

Tabla 3. Resumen estratigrafía regional del área de Paipa (Velandia,2003)

Unidad Estratigráfica	Descripción
<p><b>Rocas del basamento /Precámbrica (?)</b></p> <p>Las unidades más antiguas en cercanías de la zona de estudio corresponden a las unidades litológicas en el Macizo de Floresta (MF), 30 km al noreste del Municipio de Paipa, limitado estructuralmente por las fallas de Soapaga, al oriente, y la de Boyacá, al occidente. Sotelo (1997) definió cinco unidades dentro del MF.</p>	
<p>1. Migmatitas de Buntia</p>	<p>Esta unidad aflora en la Quebrada Buntía al noreste del Municipio de Busbanzá, al noreste de Paipa.</p> <p>El paleosoma corresponde posiblemente a rocas anfibólicas provenientes de rocas volcánicas (o gabroides) con interacciones de arenitas arcillosas magnésicas. Estas rocas fueron afectadas por metamorfismo regional de bajo a medio grado, formando las anfibolitas del Neis de Buntia y Filitas de Esquistos de Busbanzá.</p>
<p>2. Filitas Cordieríticas de Busbanzá</p>	<p>Conjunto de metamorfitas que afloran en una franja alargada de 15 km de largo por 3 km de ancho, en la parte sur oriental del MF.</p> <p><u>Superior:</u> Esquistos cordieríticos moscovíticos con algunos niveles de filitas cordieríticas y filitas cuarzomicaáceas con cordierita.</p> <p><u>Intermedia:</u> Metarenitas arcillosas intercaladas con metarenitas feldespáticas arcillosas de grano medio y niveles esporádicos de esquistos moscovíticos</p> <p><u>Base:</u> Secuencia se intercalan metarenitas con Cuarcita.</p>
<p>3. Filitas de Otengá</p>	<p>Secuencia de filitas con delgadas intercalaciones de cuarcitas y metaconglomerados. Litológicamente, Jiménez (2000) describe esta unidad constituida por esquistos moscovíticos cuarzosos de color gris, de grano fino a medio dispuestos en capas subtabulares de 10 a 40 cm de espesor, se caracteriza por presentar una alternancia de bandas de cuarzo y feldespato potásico, con bandas de micas, granate o sillimanita. Basados en los minerales encontrados en la unidad, los esquistos son micaáceos a veces con granate y sillimanita, esquistos moscovíticos con feldespato y esquistos moscovítico biotíticos</p>
<p>4. Batolito de Otengá</p>	<p>Cuerpo granítico de color rosado claro descrito por Sotelo (1997) en dos sectores. El primero en la margen oriental del MF, donde intruyó las Filitas de Otengá y el segundo al NW de Otengá. Así mismo, fue descrito con un alto grado de alteración en sectores de la carretera Floresta – Otengá (Poblados cercanos a Paipa en dirección noreste).</p>
<p>5. Cuarzomonzonta de Santa Rosita</p>	<p>Cuerpo como un granito feldespático de grano grueso, de color rosado que aflora en la zona norte del MF y en la parte sur del Macizo de Santander</p>

### 6.1.1.2. Estratigrafía Local.

*Tabla 4. Resumen estratigrafía local del área de Paipa (Velandia,2003)*

Unidad Estratigráfica		Descripción
<b>Secuencias sedimentarias cretácicas</b>		
Formación Tibasosa (K1t)		Esta secuencia suprayace discordantemente el basamento Paleozoico, y comprende cuatro Miembros principales: 1: Conglomerados con cuarzo arenitas conglomeraticas, y lodolitas. Miembro 2: Intercalaciones de shales negros y capas gruesas de caliza, algunas capas de arenitas. Miembro 3: Intercalaciones de capas de cuarzo arenitas y shales negros. Miembro 4: Intercalaciones calizas, arenitas y shales
Formación Une (K1u)		Cuarzo arenitas, de grano fino a grueso, intercalaciones de lodolitas.
Formación Churuvita (Kch)	Formación Chipaque (K2c)	Kch: Cuarzo arenitas, intercalaciones de shales negros, calizas y limolitas silíceas.
Formación Conejo (Kc)		K2c: Intercalaciones de lodolitas, arenitas, hacia la parte superior predominancia de calizas
		Kc: Intercalaciones de shales negros a grises, con cuarzo arenitas de grano fino.
Formación Los Pinos (K2lp)		Shales negros y grises con intercalaciones de areniscas cuarzosas y capas finas de limolitas silíceas
Formación Labor y Tierna (K2t)		Intercalaciones de Shales y cuarzo arenitas, con capas de limolitas silíceas
Formación Guaduas (K2E1g)		Intercalaciones de limolitas arenosas con lentes de arenitas arcillosas, bancos de arcillolitas y capas de carbón explotables. Hacia el tope se presentan bancos de arenitas con interposiciones lodo-arcillosas y estructuras físicas presentes; termina con bancos de arcillolitas, localmente interposiciones arenosas.
Formación Cacho (Pc)	Grupo Socha (E1E2s)	Pc: Intercalaciones de arenitas de grano fino a conglomeratico, con lodolitas y arcillolitas. E1E2s: Intercalaciones de arenitas, limolitas y arcillolitas. En la parte inferior predominan las arenitas, a diferencia de la parte superior donde las arcillolitas son más abundantes.
Formación Bogotá (P9b)	Formación Picacho (E2p)	P9b: Predominantemente Cuarzo arenitas, algunas líticas y capas de lodolitas. E2p: Intercalaciones de cuarzo arenitas y arenitas feldespáticas, presenta líneas de cuarzo tamaño guijos.
	Formación Concentración (E2E3c)	E2E3c: Intercalaciones de cuarzoarenitas a sublitoarenitas, con capas de arcillolitas abigarradas y capas delgadas a muy gruesas de hierro oolítico
Formación Tilatá (NgQt)		Predominancia de arenas con intercalaciones de limos y conglomerados, hacia la base conjunto de conglomerados aluviales, hacia el techo intercalaciones de ceniza.
Vulcanitas		Depósitos volcánicos piroclásticos y domos de composición traquítica con intercalaciones de depósitos sedimentarios.
Cuaternario		Depósitos aluviales, lacustres y fluvio-lacustres. Litológicamente corresponden a arenitas, limolitas, arcillolitas y conglomerados

### 6.1.1.3. Evolución Vulcanológica

El vulcanismo Plioceno en la Cordillera Oriental se manifiesta en sector Paipa-Iza, departamento de Boyacá, por la presencia de domos volcánicos y depósitos piroclásticos intercalados con depósitos fluviales, torrenciales y lacustres. De acuerdo con Cepeda & Pardo (2004), los depósitos piroclásticos corresponden a eventos de dos épocas eruptivas diferenciadas por el colapso del terreno y la formación de una caldera de 3 km de diámetro, con focos eruptivos localizados en el sector de Olitas. La edad radiométrica de las rocas consideradas como las más antiguas de la segunda época eruptiva, sería del orden de 2.5 Ma (OLADE, 1982) ó 2.1 -2.4 Ma (Cepeda y Pardo, 2004)

Los depósitos y rocas volcánicas del área fueron descritas por Cepeda y Pardo (2004) en catorce (14) “Unidades Eruptivas, teniendo en cuenta los afloramientos disponibles en aquel tiempo, éstas se agruparon en dos “Épocas Eruptivas”. La primera época eruptiva (PEE) consta de cuatro unidades eruptivas: La unidad 2 (I.2), la unidad 1 (I.1), la unidad 3 (I.3) y finalmente la 4 (I.4). En su mayoría se trata de ignimbritas no-soldadas que interpretaron como relacionados a colapsos de columnas eruptivas, excepto la unidad más superior, que postularon como resultado de rebosamiento (boiling over). Sin embargo, no reportaron depósitos de caída piroclástica que confirmen la generación de una columna eruptiva. (Suárez, 2016).

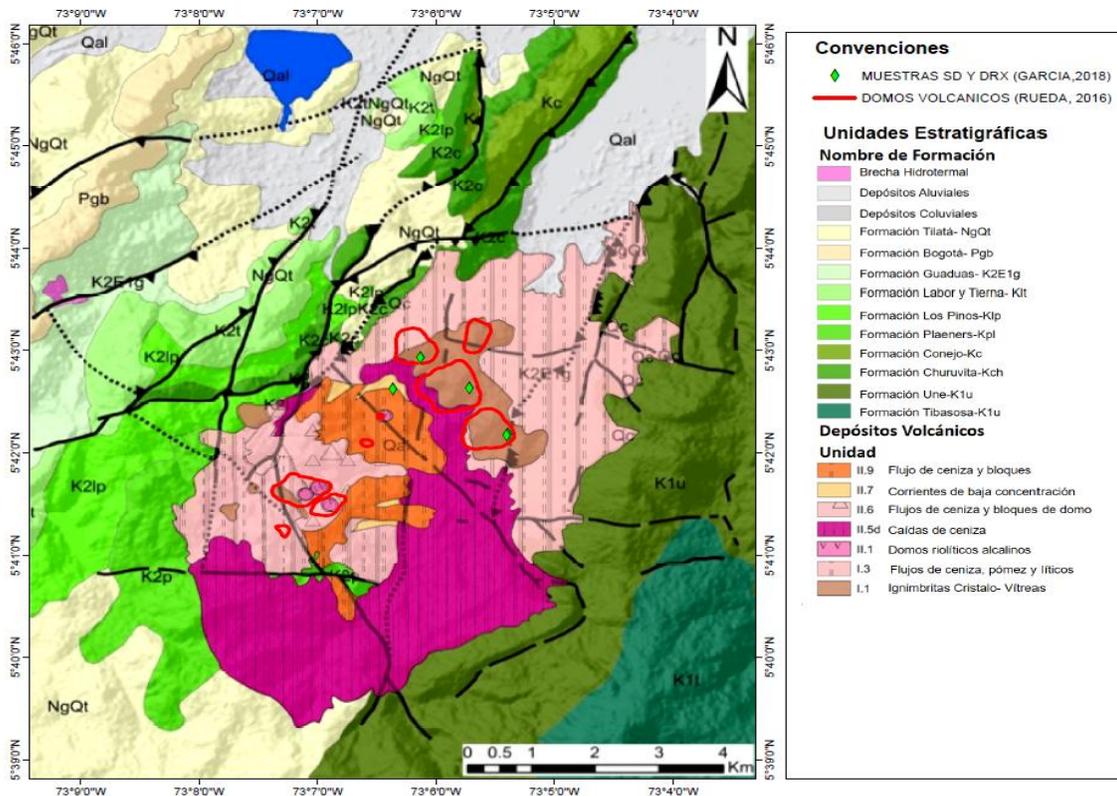
En la base de la PEE se encuentra un miembro epiclástico (I.4epi) que consiste en arenitas volcánicas y limolitas crenuladas, areniscas y conglomerados polimícticos, con intercalaciones de mantos de lignitos y, al tope, láminas de caídas de ceniza. La unidad I.1 corresponde a ignimbritas cristaló-vítreas originadas por colapso de columna eruptiva. Las unidades I.2 y I.3 corresponden depósitos de Corrientes de Densidad Piroclástica (CDPs) por colapso de columnas y se diferencian en que la segunda está enriquecida en fragmentos accidentales metamórficos y en “armored lapilli”

La segunda época eruptiva (SEE) agrupa unidades post-colapso caldérico. Según los autores, esta época comenzó con cuerpos efusivos (domos de lava) porfíricos, traquíticos y riolíticos, con afinidad alcalina y resultado de una actividad resurgente (unidades II.1), principalmente focalizada en el sector de Olitas. Desde la unidad II.1 a la unidad II.6, se trata de depósitos de flujos de bloques y ceniza (Block and ash flows) resultado del colapso de los domos, excepto la unidad II.4 que interpretaron como depósitos de CDPs por colapso de columnas con nube acompañante (“Nube Fénix”). (Suárez, 2016)

Los autores afirmaron que el foco principal (Volcán de Paipa) estaba ubicado en un área central entre el Alto de los Godos y el sector de Olitas, más exactamente la zona que está siendo cortada actualmente por la Quebrada Honda Grande. Esto considerando aspectos como que en el Alto Los Godos y en el sector de Olitas se reúnen los mayores espesores, los mayores tamaños, la mayor angularidad de los fragmentos, y se concentra la alteración hidrotermal. Mientras que desde el Alto Los Godos hacia el noreste y desde el Alto Los Volcanes, en el sector de Olitas, hacia el suroccidente, disminuye el espesor, el

tamaño de grano y aumentan la redondez y la proporción de matriz en los depósitos volcanoclásticos. Sin embargo, la hipótesis de caldera volcánica no quedó del todo sustentada por los datos reportados en esta investigación.

Según (Alfaro et al., 2017), la depresión con la cual se ha relacionado la posible caldera no necesariamente está relacionada con la formación de una estructura de este tipo; ésta probablemente corresponde a un bajo topográfico enmarcado por los domos del Sector del Alto los Volcanes, al occidente, y el Alto Los Godos, al oriente (Hernández & Osorio, 1990; Garzón, 2003; Valentino, 2008; Rueda, 2016). Estos últimos habían sido interpretados por Cepeda & Pardo (2004) como depósitos de ignimbritas. No se descarta un posible hundimiento provocado por las fallas normales de dirección NW, Paipa-Iza y Cerro Plateado.



**Figura 3.** Geología del área Geotérmica de Paipa. Fuentes: Cartografía 1:25.000, Velandia (2003); cartografía de vulcanitas, Cepeda & Pardo (2004); Cartografía de domos (Rueda-

En total se registran por lo menos diez cuerpos intrusivos con geoforma de domos en la zona, (complejo de domos) distribuidos en los sectores del Alto Los Volcanes, Alto Los Godos y Quebrada Honda. Los domos de los tres sectores comparten características como la presencia de grandes megacristales de feldespato potásico, finos cristales máficos (biotita, anfíbol). Comúnmente lucen muy meteorizados con una matriz blanca con presencia de huecos producto de la remoción de los cristales.

**Tabla 5.** Edades de los principales eventos volcánicos de Paipa (Rueda, 2016)

	Evento	Edad	Método	Referencia
Cuerpos intrusivos	Alto de los Volcanes	(1.0± 0.25 Ma, y 2.6±0.7 Ma) (1.76± 0.002 Ma)	Método de trazas de fisión en circones Método Ar-Ar	(GIANG-SGC, 2016)
	Alto de los Godos	2.71 ±0.0025, 2.80 ±0.031 y 2.6 ±0.0021	Método Ar-Ar	(Rueda, 2016),
	Quebrada Honda	1.81±0.024 Ma	Método Ar-Ar	Rueda, 2016),

La composición química de los mismos cuerpos intrusivos, así como la de roca expuesta en dos afloramientos, es ácida: traquitas – riolitas ricas en potasio. De acuerdo con la interpretación litogeoquímica, el ambiente tectónico de formación de estas rocas es de arco volcánico (Alfaro et al., 2017)

**Foto 1.** Panorámica del sector Alto de los Godos, área geotérmica de Paipa.



*Foto 2. Panorámica del sector Alto de los Volcanes, área geotérmica de Paipa*



*Foto 3. Panorámica del sector Quebrada Honda, área geotérmica de Paipa.*



El cuerpo intrusivo de El Durazno, cartografiado como brecha hidrotermal (Velandia, 2003), había sido reconocido como un cuerpo de vulcanitas y brechas tectónicas que aflora a través de la Formación Guaduas, esta intrusión se caracteriza por registrar intensa alteración hidrotermal (argílica y argílica avanzada) y contenido relativamente elevado de elementos radiactivos (hasta 370 ppm de  $^{238}\text{U}$ ), medido en núcleos de perforaciones de 50 y 100 m. El Durazno, es interpretado según (Alfaro et al., 2017), como un cuerpo ígneo, podría aportar una fuente de calor complementaria al sistema geotérmico de Paipa.

*Foto 4. Sector caolinitizado del cuerpo intrusivo El Durazno.*



#### 6.1.1.4. Alteración Hidrotermal

Según Gonzalez (2008), en el área geotérmica de Paipa se registra alteración hidrotermal de alta intensidad en el cuerpo intrusivo de El Durazno, para el resto del área se observa meteorización y algunas manifestaciones de alteración principalmente argílica (Valentino, 2008; Mojica & Valetino, 2009). Otros tipos de alteración de baja intensidad y alta temperatura (propilítica y potásica) han sido observados en xenolitos (Alfaro, 2005a; Valentino, 2008).

*Foto 5. Sector el Durazno, cantera de explotación. (Rodriguez, 2017)*



Según los estudios de caracterización mineralógica por petrografía y difracción de rayos X realizados por (Mojica & Valentino, 2009) en depósitos volcánicos del área geotérmica de Paipa, se estableció que toda el área ha sufrido un proceso de oxidación y meteorización que se superponen a las alteraciones hidrotermales que son, en general, de baja intensidad, como lo evidencia en la presencia de caolinita en forma de patina blanca en la superficie de los depósitos piroclásticos y de hematita y limolita que generan superficies amarillas y rojizas en dichos depósitos.

La alteración argílica de baja intensidad ha sido observada en líticos de Olitas y el Cerro El Mirador- El Molino (Sector Alto de los Volcanes) y al norte de Alto de los Godos, en Pantano de Vargas y al sureste de la zona de los depósitos volcánicos (vereda Pastoreo), se registra pirita diseminada, en ocasiones abundante y a veces oxidada a hematita y goethita. La presencia de dickita en algunas de las zonas en donde se presenta alteración argílica revela una temperatura ( $>200^{\circ}\text{C}$ ) para dicha alteración.

En el sector Alto de los Godos (Peña, 2016), reporta la evidencia de alteración argílica avanzada principalmente por la presencia de cristobalita-tridimita polimorfos de  $\text{SiO}_2$  de alta temperatura y la formación de arcillas interestratificadas de halloysita- caolinita.

## SECTOR ALTO DE LOS GODOS

Suarez (2016), describe dos unidades en este afloramiento la Unidad Quebrada Honda (Uqh) y la Unidad Cruz de Murcia (Ucm), son depósitos macizos, mal seleccionados, constituidos por matriz de ceniza, fragmentos de pómez, líticos accidentales (metamórficos y sedimentarios), en una matriz vítreo-cristalina, con fenocristales de sanidina, biotita y anfíboles. Estas unidades están cortadas por inyecciones hidrotermales, con fragmentos de pómez adyacentes, orientados en la dirección de la inyección y forman lentes subhorizontales dentro del depósito primario. Estas inyecciones comparten la característica de estar cortando el depósito según una orientación preferencial NE-SW y mostrar estrías de falla con sentido hacia el este.

**Foto 6.** Afloramiento de depósitos volcanoclásticos-Sector el Guarruz

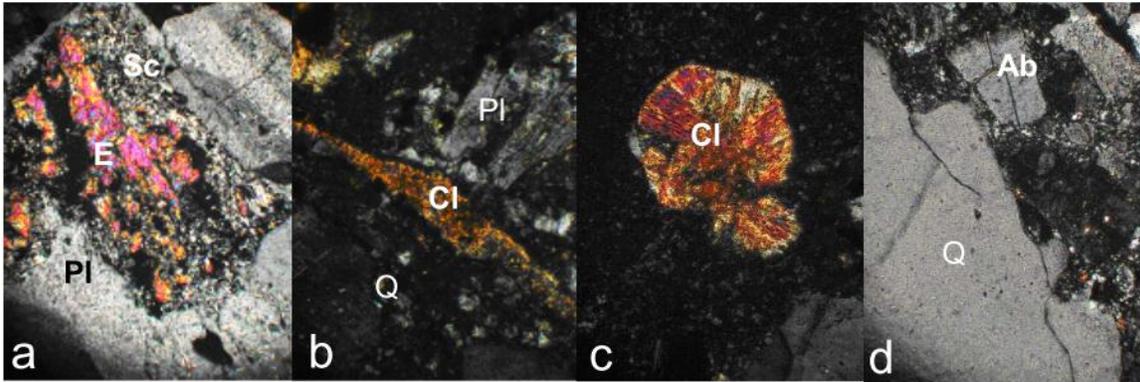


A menos de un kilómetro de los depósitos volcanoclásticos hacia el SE y a mayor elevación topográfica, se encuentra otra cantera de explotación, según Suarez (2016) describe en este sector tres cuerpos caracterizados por ser macizos, densos (no vesiculados), apenas de su alto grado de alteración por meteorización resultan coherentes. Así mismo presentan fenocristales de feldespato potásico, textura porfírica en una matriz vítreo-cristalina en donde se encuentran cristales de biotita, cuarzo, sanidina y plagioclasa.

**Foto 7.** Afloramientos de depósitos volcánicos en el sector Alto de los Godos, y zonas de alteración argílica



Por último, la alteración de alta temperatura (y baja intensidad) ha sido registrada en muestras de xenolitos hallados en el sector de Olitas. En la matriz de ceniza de una de las muestras con líticos sedimentarios e ígneos sin alterar, se observó el reemplazo de plagioclasa por epidota y la precipitación de clorita y albita en venillas, lo cual indica la interacción de fluidos de por menos 220°C. En una muestra de otro xenolito probablemente más profundo, de origen metamórfico (esquistos), se identificaron biotita, adularia, y cuarzo en vena, a partir de lo que se presume una temperatura aun mayo del orden de 320°C.



**Figura 4.** Alteración de alta temperatura identificada en muestras de xenolitos hallados en el sector de Olitas: En matriz de ceniza (a) Epidota (E) sobre plagioclasa (Pl); alrededor de la epidota, sericita (Sc). b. Clorita (Cl), en venilla, cuarzo (Q). c. Clorita radial sobre matriz feldespática. d. Albita (Ab) en venilla. Nícoles cruzados.

Con respecto a la alteración propilítica de baja intensidad también fue reportada por Mojica & Valentino (2009), afectando líticos de rocas volcánicas del Sector Olitas, y líticos de esquistos sericíticos y cordieríticos del basamento cristalino englobados en los depósitos volcánicos, al norte del sector Alto de los Godos. En otros líticos volcánicos en el sector del cerro Mirador- El Molino, Alto de los Godos y en una roca traquítica del domo Quebrada Honda, se reporta este tipo de alteración, sin embargo, no se presentan minerales o asociaciones de minerales que respalden esta interpretación.

En conclusión, aunque la información de la alteración hidrotermal está referida principalmente a la superficie, es posible plantear que El Durazno posiblemente existió una descarga de fluidos de PH ácido y temperatura moderada, que sería relacionada con una fumarola hidrotermal o magmática o con un material sulfato ácido. Otras descargas de pH ácido y temperatura relativamente alta aproximadamente 200°C habrían ocurrido desde focos de fluidos no identificados ni activos en la actualidad, como sugiere la presencia de dickita diseminada por el área. En profundidad como se evidencio en xenolitos se registró una interacción entre fluidos de pH neutro y alta temperatura: >220°C o incluso >320°C, como indican la presencia de epidota y biotita secundarias.

**Tabla 6.** Resumen de alteraciones hidrotermales reportadas en el área geotérmica de Paipa.

Localización/unidad		Tipo de Muestra Tipo de roca	Descripción	Minerales Secundarios	Ensamble Mineralógico	Temperatura °C	Alteración Hidrotermal	Referencia
Sector Olitas	(Unidades I.3 Y I.4 PEE)	Superficial /Líticos sedimentarios no alterados (arenitas) y riolíticos	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Reemplazo de plagioclasa por epidota.</li> <li>• Precipitación de clorita y albita en venillas.</li> <li>• Feldespato potásico parcialmente caolinitizado en la matriz riolítica</li> <li>• Cristales de hornblenda alterados a clorita.</li> </ul>	Caolinita Clorita	Epidota, Clorita, Albita	220°C	Propilítica	(Alfaro,2005)
	(Unidad Esquistos y Filitas de Busbanzá)	Superficial/Esquistos Micáceos	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ricos en moscovita, cuarzo y biotita</li> <li>• Albita en vena</li> <li>• Venillas rellenas de limonita</li> <li>• Incluye biotita, moscovita, albita, cuarzo, adularia, illita, esmectita, clorita.</li> </ul>	Sericita Feldespato potásico	Albita Feldespato potásico	170°C		(Alfaro,2005)
	Xenolito	Superficial /Xenolito Metamórficos	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Incluye clorita, cuarzo, illita, moscovita, albita, adularia, epidota y biotita.</li> <li>• Depósitos de biotita secundaria, adularia y cuarzo en vena.</li> </ul>	Epidota, biotita, adularia, albita	Biotita- Feldespato potásico (adularia)	320°C	Potásica	(Alfaro,2005)
	Líticos	Líticos Superficiales	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Registra pirita diseminada, abundante y a veces oxidada hematita.</li> <li>• Presencia de Dickita.</li> </ul>	Hematita, Goethita	Dickita	>200°C	Argílica	(Mojica & Valentino, 2009).
Sector Guarruz	Depósitos Piroclásticos	Superficial /Depósitos Piroclásticos	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Sericitización parcial de la matriz vítrea.</li> <li>• Presencia de arcilla (Caolinita)</li> <li>• Líticos de pómez</li> </ul>	<i>Líticos accesorios de pómez (ópalo, tridimita, calcedonia, adularia y Cuarzo)</i>	Ópalo, tridimita, adularia	Ópalo :110°C Tridimita:100 y 200°C Adularia:>180°C	Argílica	(Alfaro,2005)
Sector Aguatibia	Depósitos de Caolinita	Depósitos de Caolinita	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Caolinita desordenada, Halloysita deshidratada, cristobalita, cuarzo, feldespatos, illita- esmectita, dickita.</li> </ul>	Halloysita, caolinita, illita- esmectita	Caolinita- Esmectita	120°		(Garzón,2003)
DRZ	El Durazno	Núcleos de perforación	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Abundancia de sanidina y cuarzo</li> <li>• Registra silicificación</li> </ul>	Alunita, moscovita, caolinita, barita	Alunita- Caolinita Caolinita- Sanidina	>200°C	Argílica Avanzada Argílica	González et al. (2008)

### 6.1.1.5. Modelo Geotérmico

El modelo conceptual actualizado del área geotérmica de Paipa es propuesto por el Servicio Geológico Colombiano en el año 2017, es el resultado de más de diez años de investigaciones, este modelo integra información geofísica de datos potenciales, análisis geoquímicos de rocas y fluidos, alteración hidrotermal, sondeos eléctricos verticales, mediciones de temperatura superficial y resultados parciales del modelos resistivo basado en el estudio magnetotélúrico, todo integrado en un modelo geológico 3D, a continuación se presentan los elementos principales del sistema geotérmico de Paipa según lo sugiere este modelo actualizado.

- **Fuente de calor.**

Intrusiones de rocas ígneas son observadas directamente en el subsuelo a partir de los mapas de anomalías gravimétrica y magnética.

- **Reservorio.**

El reservorio de agua caliente estaría localizado en la Formación Une, entre los intrusivos, al sur de la Falla Cerro Plateado.

- **Fluido Geotérmico.**

La temperatura del reservorio no puede ser estimada de manera confiable a partir de geotermómetros alcalinos ni de gases, ya que los fluidos descargados por los manantiales no son representativos del fluido geotérmico debido los procesos de mezcla. Con base en la estimación del geotermómetro de cuarzo, la temperatura sería hasta de 120°C; sin embargo, teniendo en cuenta la contribución dominante de la fuente salina no termal, esta temperatura probablemente es inferior a la del reservorio. El modelo de mezcla simple entalpía – sílice indica una temperatura de reservorio máxima del orden de 230°C.

- **Zona de Recarga.**

Este modelo define un sistema geotérmico en terreno basculado (y circulación de fluidos) en dirección norte, con recarga al oriente y sur (en el Anticlinal Tibasosa-Toledo), principalmente a través de la formación Une.

La infiltración profunda ocurriría a través de fallas normales (Paipa-Iza, Las Peñas) y cruces entre fallas (Paipa-Iza y Agua Tibia).

- **Zona de Descarga**

La primera zona de descarga del sistema geotérmico ocurre aproximadamente a 1 km al norte del trazo de la falla Cerro Plateado, en el sector de La Playa y está conformada por el “steam vent”, de muy baja presión y dos manantiales de bajo caudal, uno de ellos con la temperatura máxima del sistema geotérmico, a partir de lo que infieren condiciones de permeabilidad restringida.

El calentamiento del agua ocurriría por interacción del agua infiltrada con intrusiones ígneas, a partir de calor residual del evento magmático o calor radiogénico, cuya edad más reciente es del orden de 1 millón de años ( $1.0 \pm 0.25$  y  $1.0 \pm 0.35$  Ma)

El fluido termal en dirección NW alcanzaría el límite de la formación Une, que según el modelo geológico, se proyectaría aproximadamente debajo del trazo superficial de la Falla El Bizcocho y, continuaría desde allí su recorrido a través de los niveles permeables de la formación Une en dirección NE. Alrededor del cruce entre las fallas de escamación delgada El Hornito – El Bizcocho, el fluido encuentra condiciones para iniciar el flujo ascendente hasta la superficie en donde se registra la zona de descarga principal (sector ITP-Lanceros).

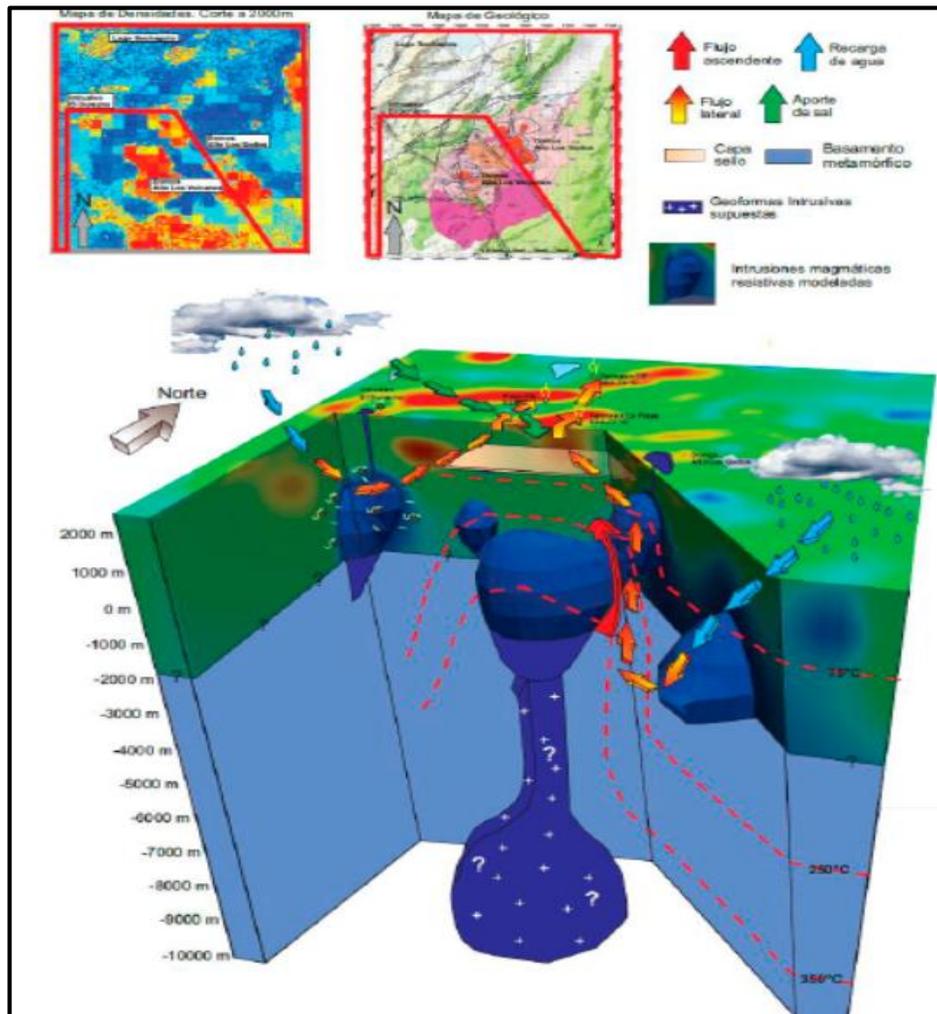


Figura 5. Modelo conceptual del área geotérmica de Paipa (SGC,2017)

## 6.2. Marco Conceptual

### 6.2.1. Sistema Geotérmico

La presencia de volcanes, aguas termales y otros fenómenos son expresiones superficiales del calor contenido en el interior de la Tierra, la energía contenida en ella es inmensa pero solo una fracción puede ser utilizada por el hombre. La energía geotérmica es una energía renovable que se obtiene mediante el aprovechamiento de este calor natural del interior de la tierra que se transmite a través de los cuerpos de roca caliente o reservorios por conducción y convección, donde tiene lugar procesos de interacción de fluidos y rocas, dando lugar a los sistemas geotérmicos.

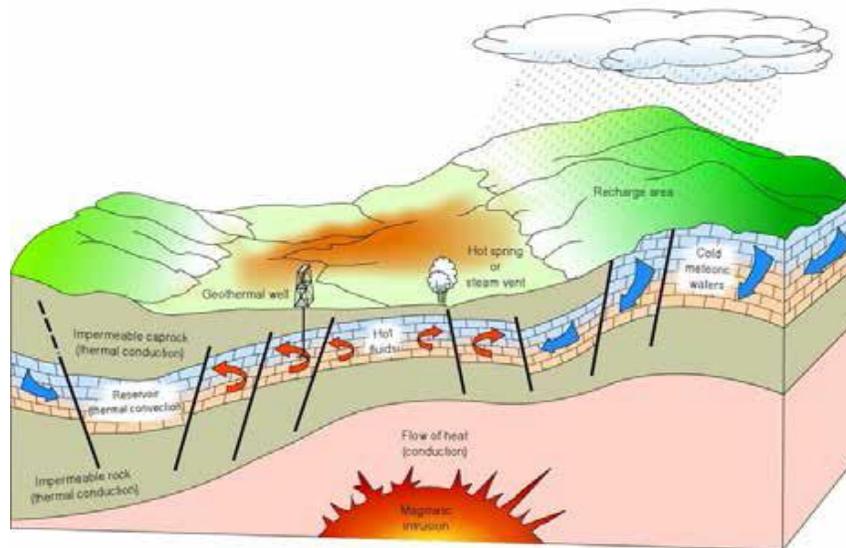
El sistema geotérmico se puede describir esquemáticamente como agua convectiva en la corteza superior de la tierra, que transfiere calor de una fuente de calor a un disipador de calor. Los principales elementos de un sistema geotérmico son: Una fuente de calor, reservorio y fluido, el portador que transfiere el calor. (Essam, 2016).

La fuente de calor puede ser una intrusión magmática de muy alta temperatura (>600°C), que ha alcanzado profundidades relativamente poco profundas (5-10 km) o zonas de baja temperatura (por ejemplo, zonas volcánicas). (Essam, 2016). Los sistemas geotérmicos de alta temperatura no asociados a una Fuente volcánica son menos comunes, estos sistemas ocurren en áreas tectónicamente activas, pero no volcánicamente activas.

El reservorio es un volumen de rocas permeables calientes a través de las cuales los fluidos circulantes extraen calor. A menudo está cubierto por una capa de rocas impermeables y conectado a un área de recarga superficial a través de la cual las aguas meteóricas pueden reemplazar, o reemplazar parcialmente, los fluidos que salen del reservorio a través de manantiales o extraídos por perforación. (Essam, 2016).

El fluido geotérmico es agua meteórica en fase líquida o vapor, dependiendo de su temperatura y presión. Esta agua a menudo lleva consigo productos químicos y gases como el CO<sub>2</sub> y el H<sub>2</sub>S. La figura 5. Es una representación simplificada de un sistema geotérmico ideal. (Essam, 2016).

Una comprensión profunda de la geología área del proyecto y como esta se ajusta a el entorno geológico y tectónico regional circundante es crucial para comprender un sistema geotérmico determinado. Los estudios geológicos iniciales se centran en comprender la geología general del área del proyecto e identificar las áreas más prometedoras para una exploración más detallada. Posteriormente los esfuerzos se centran en las áreas priorizadas con el objetivo de comprender los patrones de permeabilidad que llevan los fluidos desde su fuente profunda a las partes menos someras del sistema, donde pueden explotarse económicamente para la producción de la energía geotérmica. (IGA, 2013).



**Figura 6.** Diagrama esquemático de un Sistema geotérmico ideal por la Asociación Internacional de Geotermia (IGA).

Los datos geológicos para el área del proyecto deben presentarse en forma de mapas geológicos, mapas estructurales, columnas estratigráficas, y secciones transversales de las áreas del proyecto. Alternativamente se puede desarrollar un modelo geológico tridimensional utilizando un software especializado para su modelado y visualización. Son embargo los datos que se recopilan deben incluir la litología, la estratigrafía, la mineralización hidrotermal, estructuras geológica, tectónica, orientación de movimiento de las fallas. (IGA, 2013).

Un buen resultado del análisis geológico es una imagen clara de la geología regional y local, la estratigrafía y la estructura tectónica del área, es así como las incertidumbres y brechas de datos pueden abordarse en etapas posteriores. Esta información debe indicar que unidades o estructuras pueden albergar un reservorio geotérmico, y constituye la base para los siguientes modelos conceptuales y numéricos. (IGA, 2013).

Un sistema geotérmico en general causa una falta de homogeneidad en las propiedades físicas de la geología del subsuelo (por ejemplo, las propiedades físicas de las rocas) debido a los cambios en la temperatura. Estas propiedades físicas ser reconocidas por anomalías variables de observaciones geofísicas desde la superficie. Estas propiedades físicas incluyen la conductividad eléctrica (método eléctrico /electromagnético (EM)), densidad de la roca (método de gravedad), susceptibilidad magnética (método magnético), elasticidad de la roca (método sísmico) y finalmente la temperatura (estudio termal). (Essam, 2016).

Las propiedades físicas mencionadas anteriormente pueden detectarse mediante un estudio geofísico superficial. Los mismos parámetros también pueden medirse utilizando “registro geofísico de pozos” que proporcionan datos más precisos pero costosos.

Los buenos resultados de los estudios geofísicos incluyen, pero no están limitados a; una indicación de la distribución de la temperatura tanto horizontal como verticalmente, un mejor conocimiento de la estructura geológica y la estratigrafía, y las indicaciones de las rutas de migración y los límites del yacimiento. (IGA, 2013).

Por otro lado, la exploración geoquímica ayuda a recopilar información sobre la composición de los fluidos en el subsuelo, los cuales se definen como una solución acuosa caliente que contiene solutos que comúnmente precipitan a medida que se modifican sus propiedades en el espacio y en el tiempo. Esta información puede usarse indirectamente para conocer la temperatura, el origen y la dirección de flujo, lo que ayuda a ubicar el reservorio geotérmico subsuperficial. (Essam, 2016).

La interpretación de los datos geoquímicos puede ser muy útil durante la fase de exploración para desarrollar una comprensión de las temperaturas y la extensión del reservorio geotérmico y para determinar si el recurso está lo suficientemente caliente como para ser utilizado para la generación eléctrica geotérmica. Los estudios geoquímicos también aportan a la evaluación de posibles problemas operacionales que se presentan en el desarrollo como la corrosión y la concentración de gases no condensables. (IGA, 2013).

Los estudios regionales de CO<sub>2</sub> son un avance reciente en la evaluación geoquímica durante la etapa de exploración regional, es una técnica que complementa la geotermometría, debido que los elevados valores de CO<sub>2</sub> en la superficie pueden indicar la presencia de fallas permeables o la extensión activa de un sistema geotérmico.

Las inferencias que permiten obtener los análisis geoquímicos de fluidos y gases pueden incluir parámetros tales como:

- Temperatura estimada del recurso en profundidad.
- La génesis (origen) del recurso.
- Ubicación de diferentes acuíferos o reservorios en dos y tres dimensiones.
- Mezcla entre acuíferos
- Fuentes de recarga al sistema geotérmico
- Caminos de migración de descarga del sistema geotérmico.
- Potencial de corrosión de los fluidos geotérmicos.

Un buen resultado de los estudios de geoquímica incluye una indicación de la distribución de la temperatura dentro del sistema geotérmico, un rango de temperatura máximo para el recurso y un modelo de mezcla de fluidos.

Los datos geológicos, geofísicos y geoquímicos deben recopilarse e integrarse con los datos disponibles de estudios previos, esta información juega un papel importante en la definición de los objetivos del programa de exploración geotérmica y podría llevar a la reducción de costos durante el programa de exploración geotérmica.

## 6.2.2. Mineralogía de alteración hidrotermal

Durante la fase de reconocimiento de un sistema geotérmico, uno de los énfasis es el mapeo de manifestaciones hidrotermales (fumarolas, zona alteradas, lodo hirviente, suelo humeante). Las manifestaciones superficiales son la primera evidencia de un sistema geotérmico, por lo tanto, la alteración hidrotermal es parte integral de la investigación geotérmica. (Henríquez, 2018).

La alteración hidrotermal significa un cambio en la mineralogía de la roca como resultado de la interacción de la roca con fluidos calientes, llamados “fluidos hidrotermales”. Los fluidos transportan metales en solución, ya sea de la fuente ígnea cercana o de la lixiviación de algunas rocas cercanas. Los minerales primarios son reemplazados por minerales secundarios debido a un cambio en las condiciones prevalecientes, estos cambios pueden estar relacionados con la temperatura, presión, condiciones químicas o cualquier combinación de estas.

Los minerales de alteración se forman en distintos rangos de temperatura y los más frecuentes se esquematizan en la Figura 6, Identificar estos minerales en superficie o en recortes de pozo es una buena aproximación para conocer las condiciones de temperatura a la que se formaron. Por esto, se los denomina geotermómetros mineralógicos.

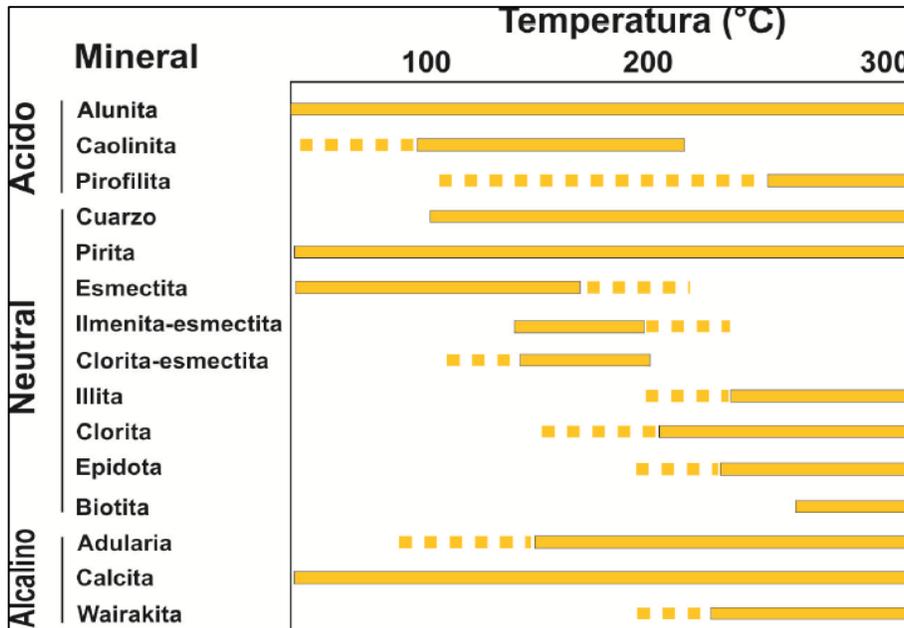


Figura 7. Geotermómetros minerales más frecuentes (UES, 2016).

La susceptibilidad a la alteración es variable en los minerales primarios de las rocas. El más reactivo es el vidrio volcánico, frecuentemente alterado primero a ópalo, esmectita, calcita o zeolita y luego a minerales de arcilla.

En términos generales se puede establecer un orden relativo de susceptibilidad a la alteración de los minerales, a saber.

Olivino > magnetita > hiperstena > hornblenda > biotita = plagioclasa

El cuarzo es resistente a la alteración hidrotermal y no es afectado hasta temperaturas de 300°C, pero hay evidencias de recristalización del cuarzo a mayores temperaturas. Es relativamente frecuente que en rocas alteradas intensamente cuya textura original ha sido completamente obliterada, se preserven cristales de cuarzo primarios.

La característica esencial de la alteración hidrotermal es la conversión de un conjunto mineral inicial en una nueva asociación de minerales más estable bajo las condiciones hidrotermales de temperatura, presión y sobre todo de composición de fluidos. La textura original de la roca puede ser modificada ligeramente o completamente obliterada por la alteración hidrotermal.

La alteración hidrotermal es un tipo de metamorfismo que involucra la recristalización de la roca a nuevos minerales más estables bajo las condiciones hidrotermales. La

característica distintiva de la alteración hidrotermal es la importancia del fluido hidrotermal en transferir constituyentes y calor. En efecto, la alteración hidrotermal involucra la circulación de volúmenes relativamente grandes de fluidos calientes atravesando las rocas permeables debido a la presencia de fisuras o poros interconectados. El fluido tiende a estar considerablemente fuera de equilibrio termodinámico con las rocas adyacentes y esto genera las modificaciones en la composición mineralógica original de las rocas, puesto que componentes en solución y de los minerales sólidos se intercambian para lograr un equilibrio termodinámico.

### Factores que controlan a la alteración hidrotermal de las rocas

**a) Temperatura** y la diferencia de temperatura ( $\Delta t^\circ$ ) entre la roca y el fluido que la invade: mientras más caliente el fluido mayor será el efecto sobre la mineralogía original.

**b) Composición del fluido;** sobre todo el pH del fluido hidrotermal: mientras más bajo el pH (fluido más ácido) mayor será el efecto sobre los minerales originales.

**c) Permeabilidad de la roca:** Una roca compacta y sin permeabilidad no podrá ser invadida por fluidos hidrotermales para causar efectos de alteración. Sin embargo, los fluidos pueden producir fracturamiento hidráulico de las rocas o disolución de minerales generando permeabilidad secundaria en ellas.

**d) Duración de la interacción agua/roca** y variaciones de la razón agua/roca. Mientras mayor volumen de aguas calientes circulen por las rocas y por mayor tiempo, las modificaciones mineralógicas serán más completas.

**e) Composición de la roca;** la proporción de minerales: es relevante para grados menos intensos de alteración, dado que los distintos minerales tienen distinta susceptibilidad a ser alterados, pero en alteraciones intensas la mineralogía resultante es esencialmente independiente del tipo de roca original.

**f) Presión:** este es un efecto indirecto, pero controla procesos secundarios como la profundidad de ebullición de fluidos, fracturamiento hidráulico (generación de brechas hidrotermales) y erupción o explosiones hidrotermales.

Los dos factores iniciales **temperatura** y **composición del fluido hidrotermal** son los más importantes para la mineralogía hidrotermal resultante de un proceso de alteración. Esto es relevante porque las asociaciones de minerales hidrotermales nos dan indicios de las condiciones en que se formaron depósitos minerales de origen hidrotermal.

La intensidad de la alteración corresponde a un término objetivo que se refiere a la extensión en que una roca ha sido alterada, mientras que el grado de alteración es un término subjetivo que requiere una interpretación basada en la mineralogía de alteración. Sin embargo, se han propuesto los términos *pervasividad* para indicar la intensidad de la alteración y *extensividad* para indicar la distribución espacial de la alteración hidrotermal. Estos últimos términos fueron propuestos para cuantificar porcentualmente la intensidad y extensión de alteración hidrotermal. Sin embargo, en la práctica nunca se generalizó su uso

en tal sentido, pero el término pervasivo se utiliza corrientemente para referirse a que tan penetrativa es la alteración de las rocas.

Una **alteración pervasiva** se refiere a aquella en que una roca está completamente alterada en todo su volumen, en contraposición a alteraciones poco pervasivas donde la alteración se limita a las vecindades de las fracturas por donde circuló el fluido, pero las partes masivas de las rocas están inalteradas.

### Productos típicos de reemplazo por alteración

Aunque como se indicó anteriormente dependiendo de la intensidad de la alteración la mineralogía final hidrotermal puede no ser influenciada por la composición mineralógica inicial de la roca. La composición de algunos minerales proporciona los componentes para ciertos minerales hidrotermales, como se muestra en la Tabla 6.

*Tabla 7. Productos típicos de reemplazo por alteración.*

Mineral Original	Productos de reemplazo hidrotermal
Vidrio Volcánico	Zeolitas (Ej. mordenita, laumontita), cristobalita, cuarzo, calcita, arcillas (Ej. montmorillonita)
Magnetita/ilmenita/titanomagnetita	Pirita, leucoxeno, esfena, pirrotina, hematita
Piroxena/anfíbol/olivino/calcita/biotita	Clorita, illita, cuarzo, pirita, anhidrita
Plagioclasa cálcica, biotita	Calcita, albita, adularia, wairakita, cuarzo, anhidrita
Plagioclasa cálcica	Calcita, albita, adularia, wairakita, cuarzo, anhidrita, clorita, illita, caolín, montmorillonita, epidota

### Procesos debidos a la alteración hidrotermal

**Deposición directa:** muchos minerales se depositan directamente a partir de soluciones hidrotermales. Para poder hacerlo es obvio que la roca debe tener pasajes para que el fluido pueda moverse dentro de ellas. Ej. diaclasas, fallas, fracturas hidráulicas, discordancias, zonas brechosas, huecos, poros y fisuras.

El cuarzo, calcita y anhidrita forman fácilmente venillas y relleno de huecos en las rocas, pero también se ha observado localmente clorita, illita, adularia, pirita, pirrotina, hematita, wairakita, fluorita, laumontita, mordenita, prehnita y epidota que deben haberse depositado directamente de un fluido hidrotermal.

**Reemplazo:** Muchos minerales de las rocas son inestables en un ambiente hidrotermal y estos tienden a ser reemplazados por nuevos minerales que son estables o al menos metaestables en las nuevas condiciones. La velocidad del reemplazo es muy variable y depende de la permeabilidad de la roca.

**Lixiviación:** Algunos de los componentes químicos de las rocas son extraídos por los fluidos hidrotermales al atravesarlas, particularmente cationes metálicos, de modo que la roca es deprimida en dichos componentes o lixiviada. En ciertas condiciones, como por ejemplo donde se condensa vapor acidificado por oxidación de H<sub>2</sub>S, la solución ácida resultante (por la presencia de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) ataca las rocas disolviendo minerales primarios, pero sin reemplazar los huecos resultantes que se producen. Esto puede en casos extremos resultar en una masa porosa de cuarzo residual.

La alteración hidrotermal y mineralización concomitante son el resultado de un proceso irreversible de **intercambio químico** entre una solución acuosa y rocas adyacentes. Ciertos componentes son extraídos selectivamente de las rocas de caja y son agregados al fluido y otros componentes (incluyendo metales de mena) son selectivamente incorporados por las rocas (o forman una cubierta sobre ellas) y son removidos del fluido hidrotermal. El resultado de este proceso depende de las condiciones físicas en la interfase fluido-roca y en las cantidades relativas de fluido y roca involucradas en el proceso de intercambio químico (razón agua/roca). Solo la roca alterada es el resultado visible del proceso, porque el fluido es removido del sistema, a excepción de posibles inclusiones fluidas en los minerales precipitados.

Algunos tipos de alteración involucran solo una transferencia en un sentido del fluido a la roca o viceversa:

*Tabla 8. Procesos de alteración.*

Proceso	Ganancia o pérdida
Hidratación/deshidratación	H <sub>2</sub> O
Carbonatación/descarbonatación	CO <sub>2</sub>
Oxidación / reducción	O <sub>2</sub>
Sulfuración / reducción	S <sub>2</sub>

Estos procesos están controlados por: presión, fugacidad, concentración, actividad o potencial químico de los componentes involucrados. La precipitación o disolución de un mineral también es un proceso en un sentido y el parámetro controlador es la solubilidad.

Las reacciones de intercambio iónico son importantes en los procesos de alteración. Ej. El intercambio de Mg<sup>2+</sup> por Ca<sup>2+</sup> (intercambio catiónico); Las reacciones de intercambio iónico también se conocen como cambio de base y corresponden a una reacción por la

cual cationes adsorbidos en la superficie de un sólido, tal como un mineral de arcilla o zeolita son reemplazados por cationes en la solución circundante. El intercambio de cationes  $Ca^{2+}$  y  $Na^{+}$  de plagioclasas por  $K^{+}$  para originar feldespato potásico corresponde a este tipo de reacción y caracteriza a la alteración potásica. El intercambio de cationes metálicos de los minerales de una roca por  $H^{+}$  corresponde a un caso especial, conocido como hidrólisis y es muy importante en la mayoría de los tipos de alteración hidrotermal.

La alteración hidrotermal produce cambios en las propiedades de las rocas alterando su densidad (aumento o disminución), porosidad, permeabilidad (aumento o disminución), susceptibilidad magnética (usualmente disminuye, pero puede aumentar cuando se deposita magnetita hidrotermal) y resistividad (usualmente decrece porque los sulfuros metálicos permiten el paso de corrientes eléctricas, pero masas silíceas producto de alteración pueden ser más resistivas). Simultáneamente con esos cambios físicos pueden ocurrir eventos relacionados o sin relación como fallamiento y formación de diaclasas/fracturas que afectan el proceso de alteración.

El reemplazo, lixiviación y depositación de minerales también causa cambios químicos cuya extensión y naturaleza varía mucho, pero los cuales son obviamente función de la mineralogía.

### Clasificación de Alteración Hidrotermal

La alteración hidrotermal produce un amplio rango de mineralogía, abundancia mineral y texturas en distintas rocas y se han propuesto clasificaciones con base a grupos de minerales.

Se requiere una observación detallada de los minerales y sus texturas para identificar la asociación de minerales correcta. Por otra parte, existe una variedad de términos para designar tipos de alteración basados en este criterio que han usado diferentes autores, por ejemplo: alteración argílica intermedia y avanzada, propilítica, biotita-ortoclasa. La clasificación más utilizada es la propuesta por Meyer & Hemley (1967) quienes clasificaron la alteración hidrotermal en los tipos: propilítica, argílica intermedia, argílica avanzada, sericítica y potásica.

**Tabla 9.** Clasificación tipos de alteración hidrotermal modificado de Meyer & Hemley (1967)

Tipo de Alteración	Características	Ensamble Mineralógico
--------------------	-----------------	-----------------------

<b>Potásica</b>	Alto K <sup>+</sup> /H <sup>+</sup> , alta temperatura. Reemplazo de plagioclasa por feldespato K (Rocas félsicas) Biotización de minerales máficos (rocas máficas)	Cuarzo- Feldespato potásico, biotita, +/- sericita, +/- clorita
<b>Propilítica</b>	Alto K <sup>+</sup> /H <sup>+</sup> , baja temperatura. Falta de lixiviación apreciable o adición de álcali y elementos alcalinos de la tierra. Reemplazo de plagioclasa y minerales máficos por epidota, clorita y carbonatos.	Clorita-epidota +/- calcita (ankerita)
<b>Filítica (Sericítica)</b>	Intermedio a alto K <sup>+</sup> /H <sup>+</sup> , alta temperatura. Plagioclasa, feldespato K, y minerales máficos convertidos en sericita (phengite) y cuarzo. Venas de sericita, cuarzo, pirita muy común.	Cuarzo, minerales de arcilla (caolinita, montmorillonita) sericita +/- clorita +/-biotita
<b>Argílica Intermedia</b>	Bajo K <sup>+</sup> /H <sup>+</sup> , baja temperatura. Inalterado feldespato K (metaestable) Significativa alteración de plagioclasa y minerales máficos a minerales arcillosos (caolinita, montmorillonita). Apreciable lixiviación de Ca, Na y Mg.	Cuarzo, minerales de arcilla (caolinita, montmorillonita) sericita +/-clorita +/- biotita
<b>Argílica Avanzada</b>	Bajo K <sup>+</sup> /H <sup>+</sup> , intermedio a alta temperatura. Alteración completa de feldespato y minerales máficos a minerales arcillosos y minerales ricos en Al (Pirofillita, y andalucita). Fuerte lixiviación de álcali o elementos alcalinos de la tierra.	Cuarzo, Caolinita, sericita, +/-Al rico en minerales silicato.

Corbett y Leach (1998) publicaron un diagrama de clasificación de tipo de alteración hidrotermal en que se incluyen los principales tipos de alteración ordenados en función del pH del fluido y de la temperatura. **Figura 7.**

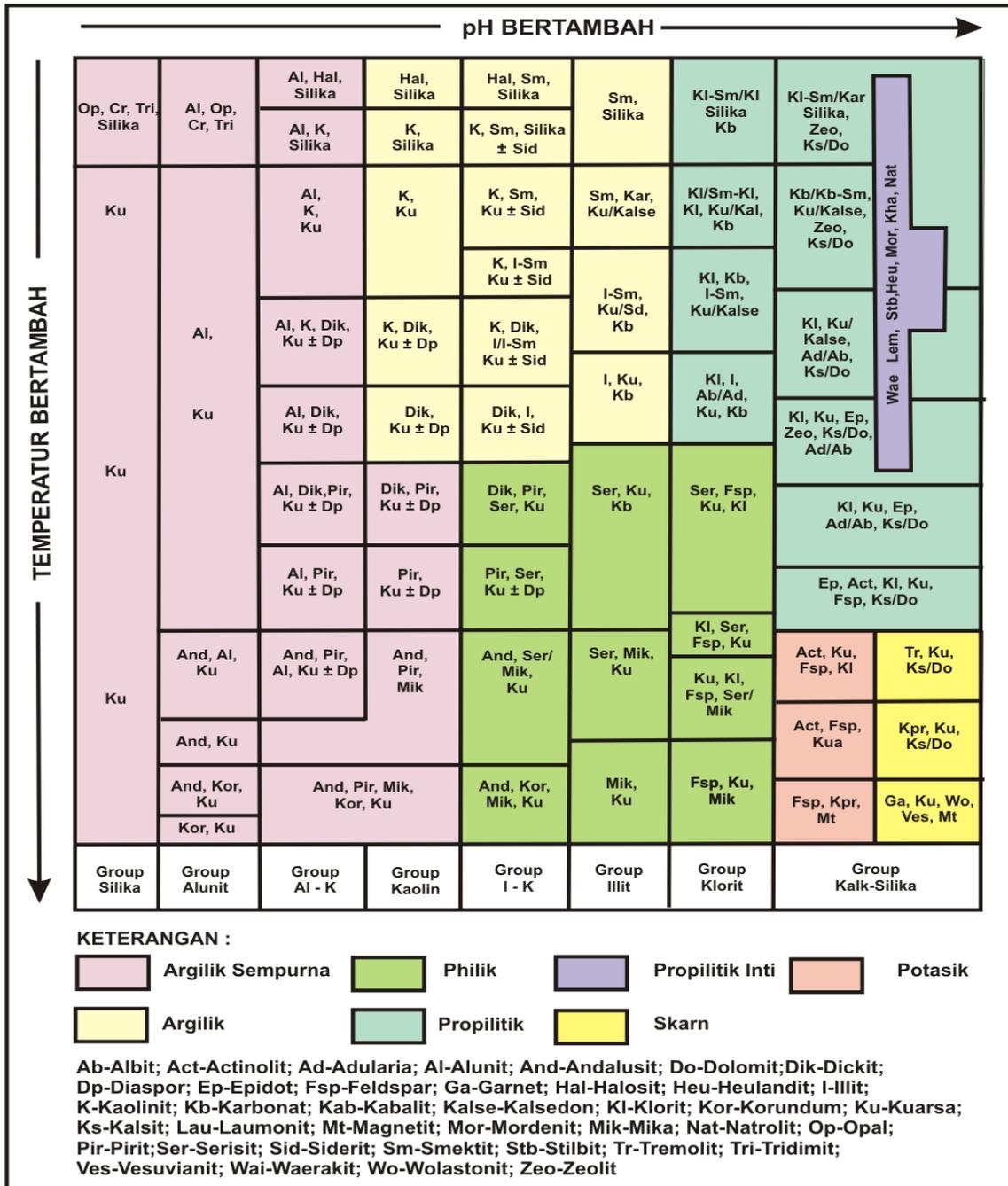


Figura 8. Minerales de alteración hidrotermal. Tomado de Corbett & Leach, 1998

### Fuentes de fluidos hidrotermales.

Hay tres posibles fuentes principales de fluidos hidrotermales, aunque podría ser una combinación de cualquier o los tres.

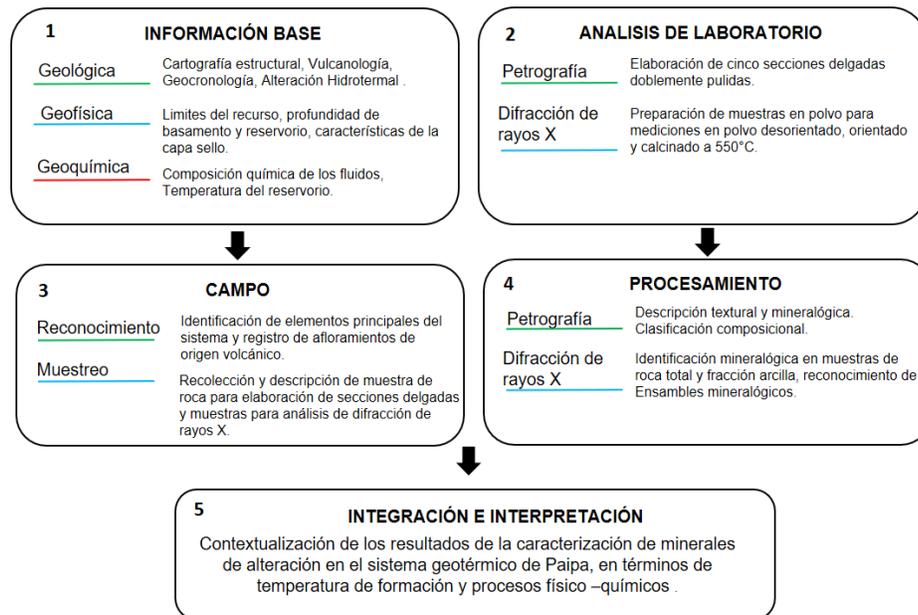
- El agua subterránea cercana a la superficie (llamada agua “meteórica”) es la principal fuente de fluidos hidrotermales. La evidencia de algunos depósitos de mineral sugiere que las aguas meteóricas se pueden mezclar con las aguas juveniles o metamórficas durante las etapas finales de la mineralización.
- Otra fuente pueden ser las propias rocas magmáticas, que extraen agua (llamada agua “juvenil”) durante las etapas finales de enfriamiento.
- En los terrenos metamórficos, una fuente potencial de fluidos son las reacciones de deshidratación, que tienen lugar durante el evento metamórfico. Con el aumento de la temperatura del metamorfismo, los minerales hidratados tempranos a baja temperatura se recristalizan en nuevos minerales anhidros a temperaturas más altas. El exceso de agua circula a través de las rocas circundantes y puede recoger y transportar metales a sitios donde pueden ser precipitados.

Se considera que los fluidos hidrotermales en entornos plutónicos circulan a largo de una trayectoria convectiva a gran escala. Eso es el análogo a una olla de agua hirviendo; el agua más caliente se eleva más rápido directamente sobre la fuente de calor, y en la superficie cambia la dirección del flujo a horizontal, y finalmente hacia abajo a lo largo de los lados de la olla. (Lagat, 2010)

De manera similar, los fluidos hidrotermales circulan hacia arriba y hacia afuera desde una intrusión ígnea en profundidad. Las rocas huésped porosas y permeables (aquellas que contiene espacios porosos interconectados) permiten que esto suceda más fácilmente, por ejemplo, arenisca de grano grueso. (Lagat, 2010). Los fluidos hidrotermales también circulan a lo largo de fallas y fracturas. Una formación, que tiene un sistema de fractura bien desarrollado puede servir como una excelente roca huésped. Las venas se forman donde los fluidos fluyen a través de las fracturas y precipitan la mineralización a lo largo de las paredes rellenándolas. La forma de mineralización y alteración asociada a las fallas es altamente variable y puede incluir redes veteadas masivas a finas, y ocasionalmente texturas vuggy en algunos casos brechas.

## 7. Metodología

Para el desarrollo de esta investigación se definió una metodología de cuatro fases: Definición de información de base, análisis de laboratorio, procesamiento, integración e interpretación.



*Figura 9. Metodología proyecto de investigación.*

### 7.1. Definición de información base.

Se realizó una revisión bibliográfica de los estudios hechos en el sistema geotérmico de Paipa. A continuación, se referencian los trabajos más relevantes utilizados como insumo base durante esta investigación.

- Cartografía geológica y estructural sector sur de municipio de Paipa, (Velandia, 2003)
- Vulcanismo de Paipa, (Cepeda y Pardo, 2004)
- Alteración hidrotermal en el Sistema geotérmico de Paipa, (Alfaro, 2005)
- Modelo conceptual preliminar del sistema geotérmico de Paipa, (Alfaro et al., 2005)
- Geoquímica y potencial minero asociado a cuerpos volcánicos en la región de Paipa, departamento de Boyacá, Colombia. (Garzón, 2003)
- Caracterización de las alteraciones hidrotermales en el flanco Noroccidental del Volcán Nevado del Ruiz, Colombia.
- Mecanismos de transporte y acumulación durante las erupciones piroclásticas más explosivas al sur de Paipa, en la Cordillera Oriental de Colombia. (Suárez, 2016)
- Evaluación petrológica de las rocas de Paipa, Boyacá, (Peña, 2016)

- Exploración de recursos energéticos exploración de uranio en Paipa, Iza, Pesca, Chivatá (Boyacá) (Gonzalez, 2008)
- Actualización del modelo conceptual del área geotérmica de Paipa, (Alfaro et al., 2017)

## 7.2. Trabajo de Campo.

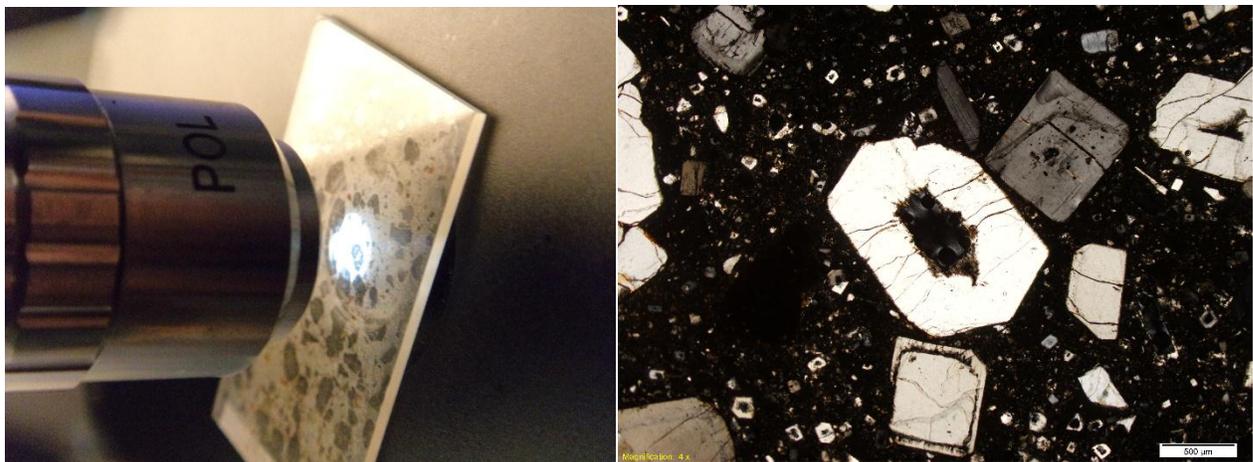
El trabajo de la fase de campo se realizó en dos etapas, la primera consistió en el reconocimiento del área e identificación de los principales elementos del sistema geotérmico de Paipa, posteriormente se referenciaron los afloramientos disponibles de productos volcánicos y se realizó el muestreo de roca para elaboración de secciones delgadas y análisis de difracción de rayos X.

## 7.3. Análisis de Laboratorio

### 7.3.1. Análisis microscopio petrográfico.

Los análisis petrográficos se realizaron para cinco secciones delgadas correspondientes a muestras de roca obtenidas de los domos volcánicos cartografiados por (Rueda,2016).

Las secciones delgadas son analizadas utilizando un microscopio petrográfico, identificando el tipo de roca y minerales de alteración para estudiar la evolución mineralógica de la alteración mineral.



*Foto 8. Detalle análisis sección delgadas.*

### 7.3.2. Análisis de difracción de rayos X

La difracción de rayos X de polvo es una técnica instrumental que permite la identificación de minerales o fases cristalinas típicas. Pueden identificarse minerales formadores de rocas y particularmente minerales de arcillas formadas a partir de proceso evolutivos de la corteza terrestre como meteorización o alteración hidrotermal. Estos minerales suelen ser temoindicadores y son de gran utilidad para estudiar los sistemas geotérmicos.

Los difractogramas de rayos X presentan una serie de reflexiones las cuales muestran las propiedades estructurales de los minerales. La identificación se realiza mediante la comparación con los valores estandarizados para cada mineral, teniendo en cuenta la posición, forma e intensidad de los picos obtenidos.

Estas muestras fueron elaboradas en el Laboratorio de caracterización litogeoquímica, de la Facultad de Ciencias de la Universidad Nacional de Colombia sede Bogotá con un difractómetro D2 PHASER BRUKER y analizados en el software DIFFRAC.EVA en el laboratorio de difracción de LaGeo S.A. de C.V que adicionalmente a la identificación de minerales permite realizar una estimación cualitativa de la abundancia relativa de cada fase mineral con base en la intensidad de los picos.

Para esta investigación se analizaron once (11) difractogramas, por el método de polvo desorientado, polvo orientado, y calcinado a 550° C. A continuación, se describe brevemente la metodología utilizada en los análisis de difracción



*.Foto 9. Preparación de muestras para análisis de difracción de rayos X.*

Existen dos métodos de análisis (i) Método de Polvo desorientado, que sirve para hacer una cuantificación de las fases minerales en general. (ii) Método de agregados orientados, que sirve para hacer una buena caracterización de las fases minerales de la arcilla.

(i) Método de Polvo: La muestra que se quiere analizar se tritura y se homogeniza en un mortero ágata hasta conseguir una fracción de tamaño partícula inferior a 20 micras.

(ii) Método de agregados orientados

El reconocimiento mediante difracción de rayos-X de los minerales de la fracción fina, concretamente los minerales de la arcilla, precisa de una preparación específica que consiste en disponer los cristales orientados sobre un soporte (método de los agregados orientados).

Para preparar los agregados orientados de la fracción fina, la muestra total se trata mediante dispersión y homogeneización con agua destilada durante 24 horas. A continuación, se separa la fracción fina por decantación y se procede a la centrifugación.

De la parte de la muestra centrifugada se recupera la fracción más fina que es la que utilizamos para preparar los agregados orientados.

En este método al contrario que en el otro, los cristales están orientados, la orientación se realiza preparando una suspensión de la muestra en polvo y después depositando unas gotas sobre un soporte. Esto permite caracterizar mucho mejor las arcillas porque difractan por los espaciados basales.

Por último, se utiliza tratamiento de calcinación a las muestras de agregado orientado a temperatura de 550°C, es una buena herramienta para la identificación minerales arcillosos, puesto que evidencia cambios en el espaciamiento o pérdida de la estructura cristalina.

### 7.3.3. Procesamiento.

Esta fase consiste en el análisis de difractogramas en el software EVA, en primer lugar, se toma la muestra de roca total, se realiza la corrección de background y se suaviza la curva, posterior se procede a la identificación de los picos principales utilizando la base de referencia del programa, una vez identificados los datos se realiza la cuantificación y posterior normalización para tener los porcentajes de minerales contenidos en la muestra.

Con el fin de identificar los minerales arcillosos se utilizan los difractogramas obtenidos con la técnica de polvo orientado, aquí se valida los cambios que tuvo el mineral con etilenglicol y cuando es calentado a 550°C.

### 7.3.4. Integración e interpretación.

La información obtenida por medio de petrografía es tomada como insumo para los análisis de difracción de rayos x, con este proceso se pueden validar o descartar la mineralogía que se identificó con incertidumbre.

Los minerales de alteración identificados se utilizan como base para la definición de los ensambles mineralógicos, y a partir de esta información es posible conocer la temperatura estimada de estabilización.

## 8. Presentación de resultados

Se realizó el análisis petrográfico de cinco secciones delgadas, y once muestras para difracción de rayos x, correspondientes a muestras de roca de los domos volcánicos reportados por Rueda (2016) en el área geotérmica de Paipa

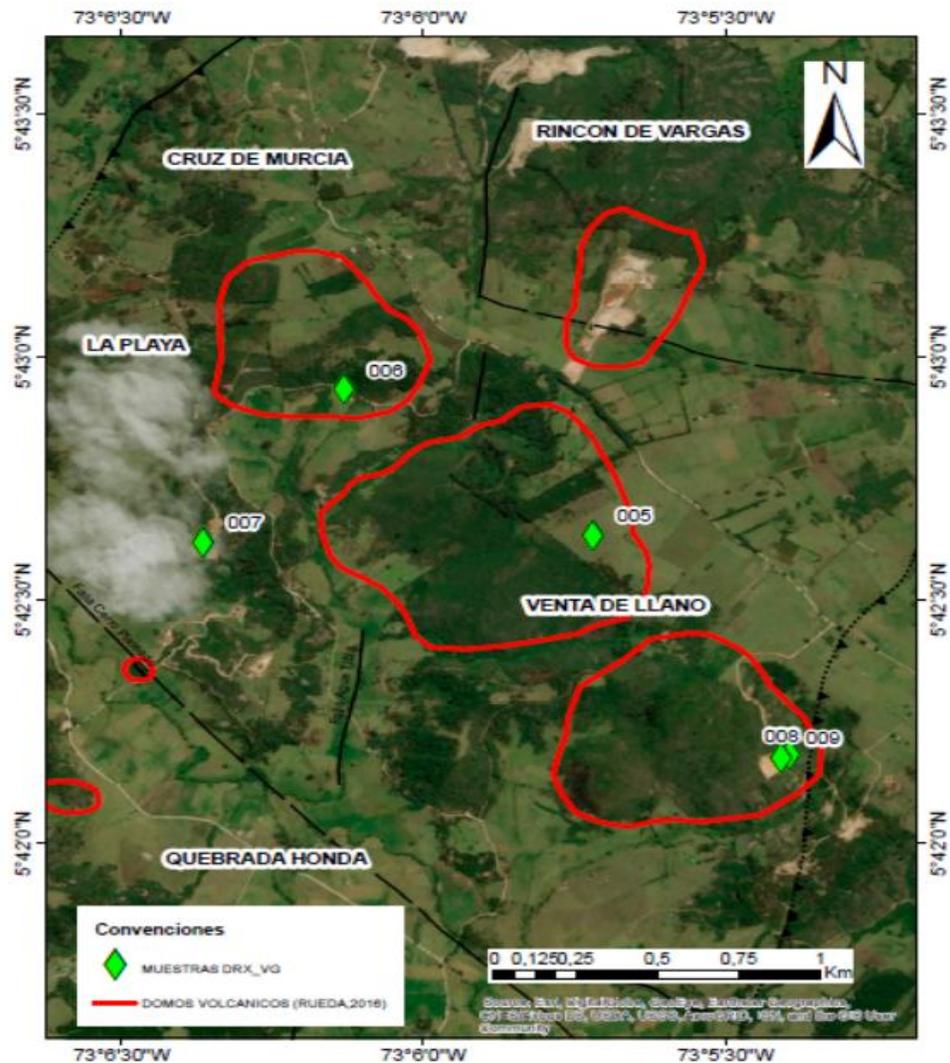


Figura 10. Mapa de Localización muestras analizadas.

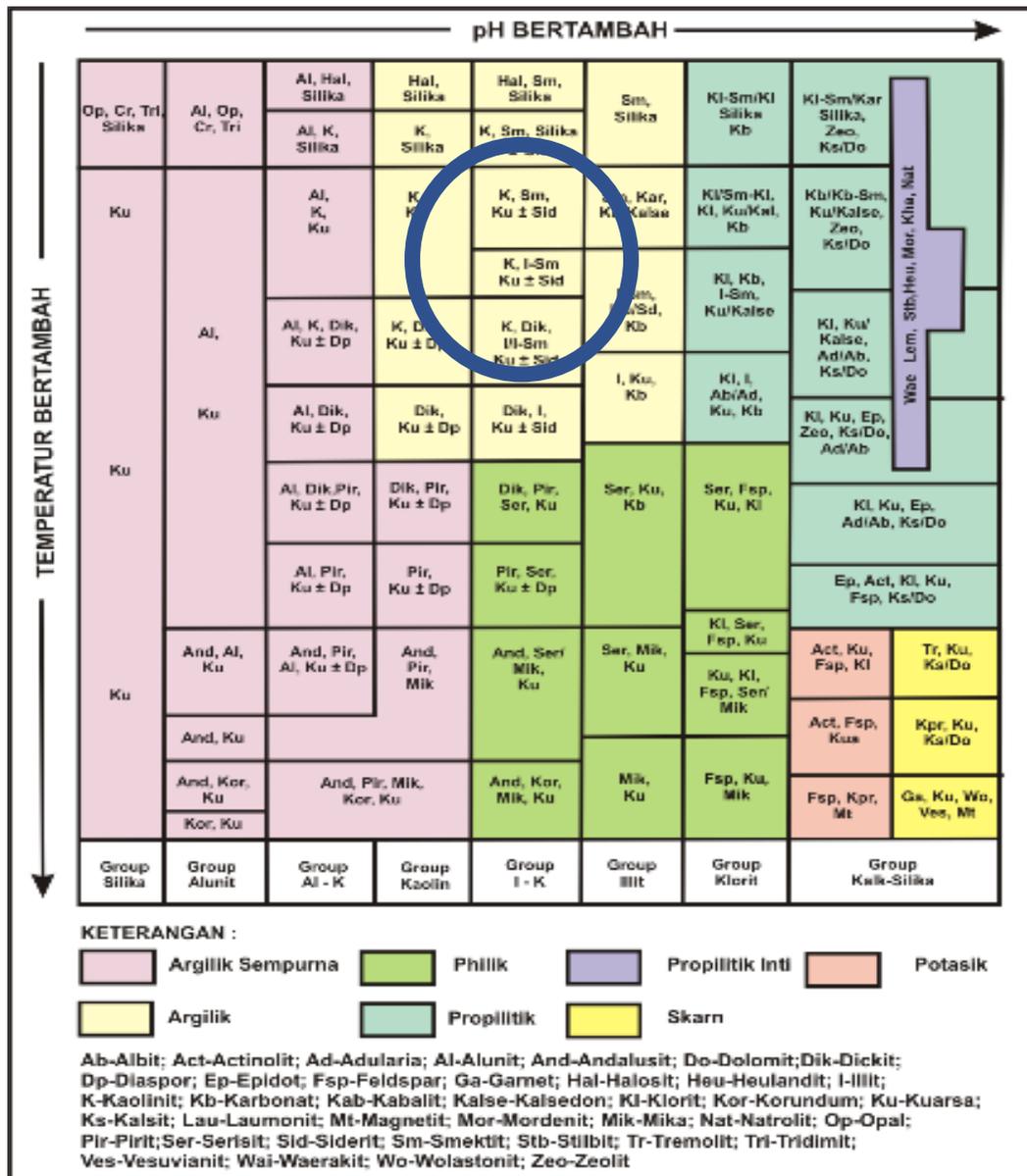


Figura 11. Clasificación Mineral de alteración hidrotermal. Tomado de Corbett & Leach, 1998

En la Figura 10, se puede asumir que el pH es 4-6, formando ya la halloysita y caolinita, algunos mezclados con montmorillonita. Esta zona se conoce como alteración argílica, la cual se detalla como argílica intermedia. Asimismo, la presencia de feldespato alcalino (K) (sanidina y anortoclasa) tienen influencia en la formación de halloysita y caolinita.

## 8.1. Análisis petrográficos.

La mineralogía de las rocas volcánicas del área según los análisis petrográficos está representada por fenocristales de sanidina, glomerocristales de feldespato, plagioclasa, anfíboles tipo horblenda, cuarzo y como minerales de alteración arcillas y óxidos de hierro. Estas rocas se clasificaron con cierta incertidumbre por el grado de alteración hidrotermal entre traquitas y traquitas cuarzo feldespática alcalinas.

### Referencia: VG-SD-009

- **Información General**

**Origen de Coordenadas:** WGS-84

**Departamento:** Boyacá

**Coordenadas:** Latitud:5.702898

Longitud: -73.090084

**Localidad:** Municipio de Paipa

**Plancha:** 171-IV-D

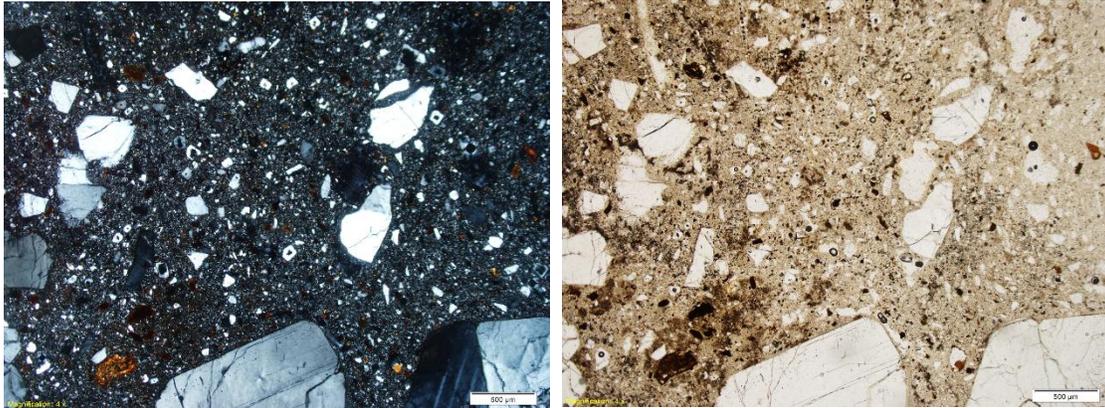


*Figura 12. Información general muestra VG-SD-009*

- **Descripción Macroscópica**

Roca volcánica con variaciones en el color debido a la diferencia en la intensidad de la agilización y a la presencia de óxidos de hierro. Fenocristales de sanidina y plagioclasas son encontrados en medio de una matriz afectada por la agilización. Los puntos de color rojizo en la muestra se relacionan a cristales de magnetita los cuales han sido reemplazados por hematita en el proceso de alteración hidrotermal.

- Descripción Microscópica



**Foto 10.** Microfotografía de Cristal Matriz muestra VG-SD-008, izquierda XP, 4X y Derecha PP, 4X. Microfotografía de Cristal Matriz muestra VG-SD-008, izquierda XP, 4X y Derecha PP, 4X.M

Textura General: Porfírica.

Grado de Cristalinidad: Textura Hipocristalina

Granularidad: Criptocristalina, presencia de microlitos.

Otras texturas o texturas especiales: texturas de tipo fragmentario.

Descripción de la matriz: La matriz es dominada en esta muestra por el vidrio volcánico el cual es a su vez transformado a arcillas en el proceso de agilización.

### DESCRIPCIÓN MICROSCÓPICA DE MINERALES:

**Feldespatos Potásico (Sanidina):** Es el fenocristal que predomina en la muestra, caracterizado por la ocurrencia de maclado simple con la presencia de microfracturamientos rellenos parcialmente por la presencia de vidrio volcánico. Al interior de algunos cristales se encuentran inclusiones de cuarzos y plagioclasas. Ocasionalmente algunos de los cristales se reconocen como astillas, producto posiblemente de los eventos de tipo explosivo que dieron origen a este tipo de roca. Se presentan en tamaños desde 5.6 mm hasta 0.12 mm.

**Plagioclasa:** Reconocida por el maclado de tipo polisintético y por los bajos colores de interferencia de primer orden. Su presencia es subordinada en relación a la abundancia de cristales de sanidina. Algunas fracturas en este mineral se presentan rellenas por vidrio volcánico producto de los eventos de fusión parcial. Se presentan en tamaños desde 4.4 mm hasta 0.04 mm

**Cuarzo:** Presente por la forma fragmentaria de los fenocristales, los cuales se caracterizan por el color de birrefringencia en tonos bajos de primer orden y por la

presencia de microfracturamientos. Se presentan en tamaños desde 0.4 mm hasta 0.008 mm

**Anfíbol (Hornblenda):** Ocurren como fenocristales con un moderado a fuerte pleocroísmo posiblemente. Presenta algunas inclusiones de opacos posiblemente óxidos de hierro diseminados. Se presentan en tamaños desde 4.4 mm hasta 0.04 mm

**Óxidos de hierro:** Se presenta en medio de las zonas con otros óxidos como hematita y magnetita en donde tiene un color rojizo anaranjado y sigue el contorno de minerales máficos como hornblenda.

**Matriz:** Es conformada principalmente por vidrio volcánico y algunos microcristales en una proporción de 70 % a 30 %. Sobre la parte de vidrio son localizadas algunas arcillas, las cuales tienen un color pardo.

**Arcillas:** Se presentan diseminadas en medio de la muestra particularmente en la zona de la matriz donde adquieren un color café claro.

**Circón:** Caracterizado por la forma poligonal de los cristales, con frecuencia encontrado como prismas bien desarrollados en cristales de tamaño menor a 20 um. Excepcionalmente se encuentran algunos cristales los que se tienen una forma parcialmente redondeada, posiblemente cristales heredados.

**Apatito:** Presente en bajas cantidades, encontrado a manera de inclusión en los cristales de plagioclasas, donde tiene una forma de barril con bajos colores de interferencia.

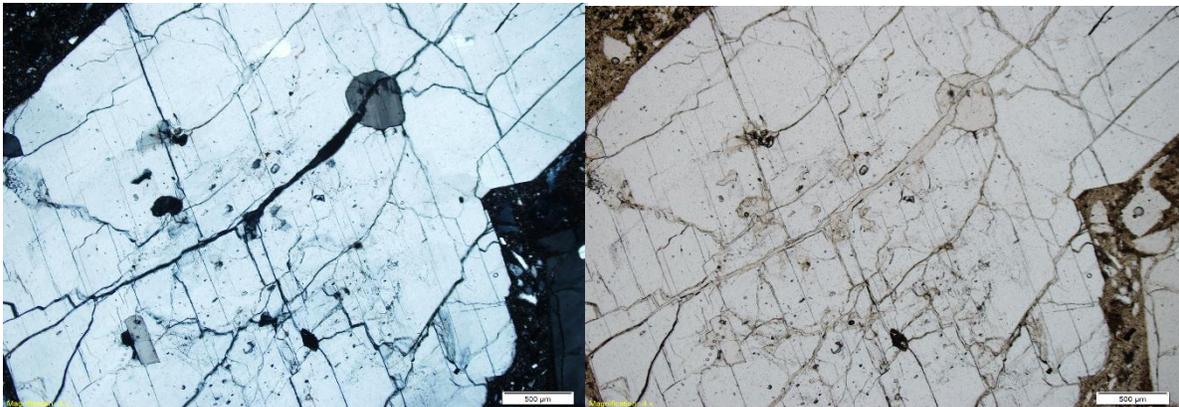


Foto 11. Microfotografía de cristal de feldespato potásico (sanidina) microfracturado con inclusiones de cristales de cuarzo. Izquierda XP objetivo 4x, Derecha PP objetivo 4X

**COMPOSICIÓN MINERALÓGICA- VG-SD-009 (% Vol.)**

<b>Feldespato Alcalinos (A)</b>	15.4%
<b>Plagioclasa (P)</b>	79.9%
<b>Cuarzo (Q)</b>	4.7%

CLASIFICACIÓN DE LA ROCA (Basada en Streckeisen, 1978): Cuarzotraquita con alteración argílica (**Clasificación con incertidumbre por el grado de alteración hidrotermal**).

### Referencia: VG-SD-008

- **Información General**

**Origen de Coordenadas:** WGS-84

**Departamento:** Boyacá

**Coordenadas:** Latitud: 5.70309

Longitud: -73.08916

**Localidad:** Municipio de Paipa

**Plancha:** 171-IV-D

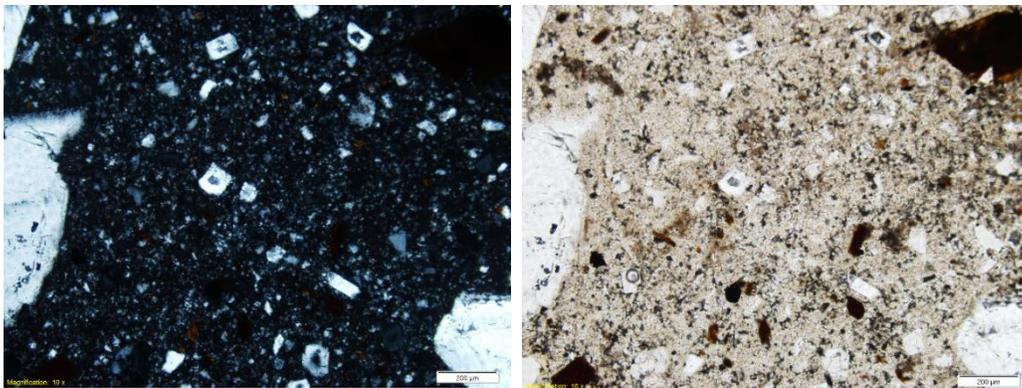


*Figura 12. Información general muestra VG-SD-008*

- **Descripción Macroscópica**

Roca volcánica de color café claro con la presencia de fenocristales de plagioclasas y sanidina en medio de una matriz moderadamente argilizada. Algunas zonas de color rojizo a anaranjado corresponden a la presencia de óxidos de hierro amorfos y esporádicamente a la ocurrencia de hematita. Zonas con porosidad se relacionan a fragmentos faltantes de fenocristales, debido a la naturaleza friable de la matriz alterada.

- **Descripción Microscópica**



*Foto 12. Microfotografía de microcristales de sanidina, presencia de óxidos de hierro, izquierda XP objetivo 4x, derecho PP objetivo 4x..*

**Textura general:** Porfirítica,

**Otras texturas o Texturas especiales:** Texturas fragmentarias por la presencia de cristales de plagioclasas y sanidinas rotos, posiblemente por procesos de tipo eruptivo.

**Descripción de la matriz:** La matriz se encuentra en gran parte conformada por vidrio volcánico y microcristales de sanidina, plagioclasa y en menor proporción cuarzo. Presenta procesos de alteración hidrotermal relacionados con agilización.

### **DESCRIPCIÓN MICROSCÓPICA DE MINERALES**

**Feldespatos Potásico (Sanidina):** Presente con una forma poligonal, diseminada en medio de la matriz, la que se reconoce por la ocurrencia de maclado simple y bajos colores de interferencia. Generalmente forma agregados en compañía de cristales de plagioclasa. Ocasionalmente se reconocen zonas de exsolución peritítica y zonación. Algunas fracturas dentro de los cristales presentan rellenos de vidrio volcánico. Con frecuencia son reconocidas inclusiones fluidas, posiblemente asociadas al proceso de fusión parcial.

**Plagioclasa:** Identificada por la presencia de maclado polisintético y subordinada a la presencia de feldespatos potásico. Generalmente forma agregados en compañía de la sanidina de la que se diferencia principalmente por el tipo de maclado. Al igual que la sanidina muestra algunas fracturas parcialmente rellenas por vidrio volcánico.

**Cuarzo:** Se trata de fragmentos de cristales los cuales se reconocen principalmente como microcristales con formas anhedrales a subredondeadas posiblemente por los eventos relacionados con fusión parcial.

**Anfíbol (Hornblenda):** Se reconocen principalmente por una forma anhedral fragmentaria, posiblemente por los eventos eruptivos. Posee un pleocroísmo fuerte verde a café oscuro, patrones de clivaje a 60 o 120 grados y colores de interferencia parcialmente enmascarados por el fuerte pleocroísmo. Algunos cristales son encontrados a manera de inclusión en medio de fenocristales de plagioclasas y sanidinas.

**Óxidos de hierro:** Identificados en sectores particularmente en la zona de la matriz, donde tienen un color rojizo anaranjado. También asociados a la alteración de cristales de máficos como hornblenda.

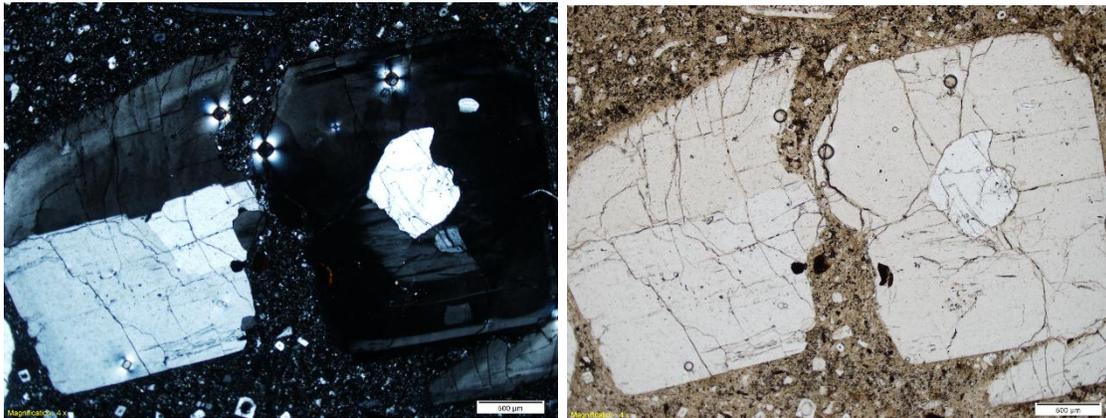
**Hematita:** Identificada en algunos planos cristalográficos en medio de la magnetita en donde se caracteriza por presentar una moderada a alta reflectividad y abundantes reflejos internos de color rojizo.

**Magnetita:** Se reconocen por el color gris pardo y características isotrópicas en nicoles cruzados. Generalmente se presenta alterada a hematita en especial hacia los bordes de los cristales y en algunas microfracturas.

**Matriz:** Es conformada en gran parte por microcristales de la misma de composición de los fenocristales anteriormente descritos y por vidrio volcánico parcialmente transformado a arcillas. La proporción entre microcristales y vidrio es de 35 % a 65 % respectivamente.

**Arcillas:** Asociada a la alteración de la matriz de la roca, donde tiene una forma de pequeñas hojuelas con baja birrefringencia y dan el color ligeramente pardo a algunas zonas en la matriz.

**Circón:** Observado a manera de inclusión en medio de los cristales de plagioclasas y sanidina, en donde tiene una forma de cristales bien desarrollados, con relieve alto y altos colores de interferencia de segundo orden.



**Foto 13.** Cristal de sanidina con maclado simple y zonación; Izquierda XP objetivo 10x, Derecha PP objetivo 10X.

**COMPOSICIÓN MINERALÓGICA- VG-SD-008 (% Vol.)**

<b>Feldespatos Alcalinos (A)</b>	91.03%
<b>Plagioclasa (P)</b>	5.51%
<b>Cuarzo (Q)</b>	3.44 %

**CLASIFICACIÓN DE LA ROCA (Basada en Streckeisen, 1978):** Traquita Alcalina con alteración argílica (Clasificación con incertidumbre por el grado de alteración hidrotermal).

## Referencia: VG-SD-007

**Origen de Coordenadas:** WGS-84

**Departamento:** Boyacá

**Coordenadas:** Latitud: 5.71036

Longitud: -73.10611

**Localidad:** Municipio de Paipa

**Plancha:** 171-IV-D

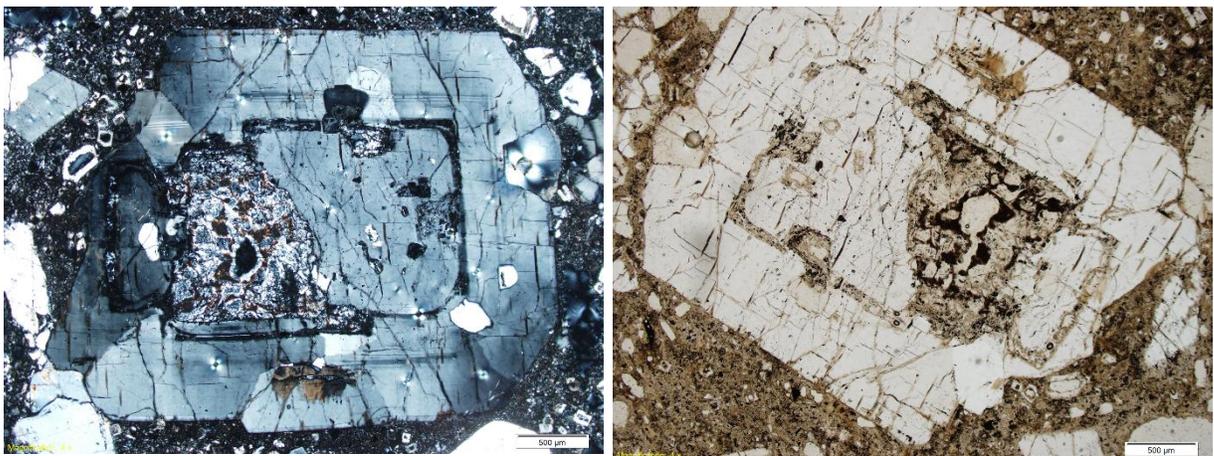


**Figura 13.** Información general muestra VG-SD-007

- **Descripción Macroscópica**

Roca volcánica de color gris claro con presencia de fenocristales de sanidinas y plagioclasas en medio de una matriz con un leve proceso de agilización. Se reconocen además la presencia de óxidos de titanio y sulfuros los que se presentan diseminados y relacionados al proceso de alteración hidrotermal del tipo agilización. Los óxidos de hierro amorfos predominan en franjas hacia la parte inferior de la muestra. La porosidad móldica se relaciona a la ausencia de algunos fenocristales de sanidina y ocurrencia de microfracturamientos.

- **Descripción Microscópica**



**Foto 14.** Microfotografía XPL de cristal de sanidina con zonamiento y alteración parcial en el núcleo, con inclusión de cristales de diferente composición. XPL Izquierda 10x, y Derecha PPL 10x.

**Textura general:** Porfirítica.

**Otras texturas o Texturas especiales:** Texturas de asimilación parcial de algunos fenocristales especialmente de plagioclasas y sanidinas. Máficos totalmente reemplazados por óxidos de hierro amorfos y óxidos de titanio como brookita.

**Descripción de la matriz:** Reemplazamiento parcial de la matriz vítrea por arcillas

### DESCRIPCIÓN MICROSCÓPICA DE MINERALES:

**Feldespatos Potásico (Sanidina):** Se presenta a manera de feno y microcristal, donde se caracteriza por los bajos colores de interferencia, maclado simple y ausencia de maclado polisintético. Muestra evidencias de procesos de fusión parcial, reconocida por la formación e introducción de vidrio volcánico.

**Plagioclasa:** Diferenciada por el maclado de tipo polisintético y la ocurrencia de zonación en los fenocristales. Con frecuencia en este tipo de cristales se reconocen inclusiones de cuarzo e inclusive otros cristales de plagioclasas. Al igual que con la sanidina, se reconocen fracturas las cuales son rellenas con vidrio volcánico. Ocasionalmente en algunas de estas fracturas se presenta la formación de arcillas producto de los eventos de argilización

**Cuarzo:** Presente como fragmento parcialmente asimilado por el proceso de alteración hidrotermal, en donde se reconoce por el bajo color de interferencia y la abundancia de bahías en los bordes de los cristales.

**Óxidos de hierro:** Presentes en algunas zonas de alteración de los cristales de máficos donde se acompañan por la brookita y se caracterizan por su color rojizo intenso.

**Brookita:** Identificada por la forma alargada de los cristales, normalmente localizados en zonas de alteración total de los cristales de máficos ricos en titanio, posiblemente hornblendas. El color gris claro de los cristales y la abundancia de reflejos internos de color amarillo en luz reflejada, son sus características ópticas distintivas.

**Pirita:** Se identifica por el color amarillo de los cristales en luz reflejada, normalmente encontrada a manera de inclusión en cristales de plagioclasa.

**Matriz:** Se encuentra en gran parte conformada por vidrio volcánico en un 70 % y 30 % de microcristales de plagioclasa, sanidina y cuarzos. Es alterada parcialmente por las arcillas, las que se muestran con bajos colores de interferencia.

**Arcillas:** Son reconocidas particularmente en algunas zonas en la matriz y en zonas de microfracturamientos donde tienen un hábito fibroso, posiblemente relacionado a la presencia de mayor cristalización en dichas arcillas.

**Circón:** Es encontrado a manera de inclusión en medio de los cristales de plagioclasas, donde tiene una forma de prismática con doble terminación.

**Apatito:** Presente en bajo porcentaje y a manera de inclusión en los fenocristales de plagioclasas y sanidinas, en donde se reconoce por los bajos colores de interferencia y forma de barril.

**COMPOSICIÓN MINERALÓGICA- VG-SD-00 7(% Vol.)**

<b>Feldespatos Alcalinos (A)</b>	75.74%
<b>Plagioclasa (P)</b>	21.6%
<b>Cuarzo (Q)</b>	2.61 %

**CLASIFICACIÓN DE LA ROCA (Basada en Streckeisen, 1978):** Traquita con alteración argílica (Clasificación con incertidumbre por el grado de alteración hidrotermal).

**Referencia: VG-SD-005**

**Origen de Coordenadas:** WGS-84

**Departamento:** Boyacá

**Coordenadas:** Latitud: 5.71059

Longitud: -73.09533

**Localidad:** Municipio de Paipa

**Plancha:** 171-IV-D

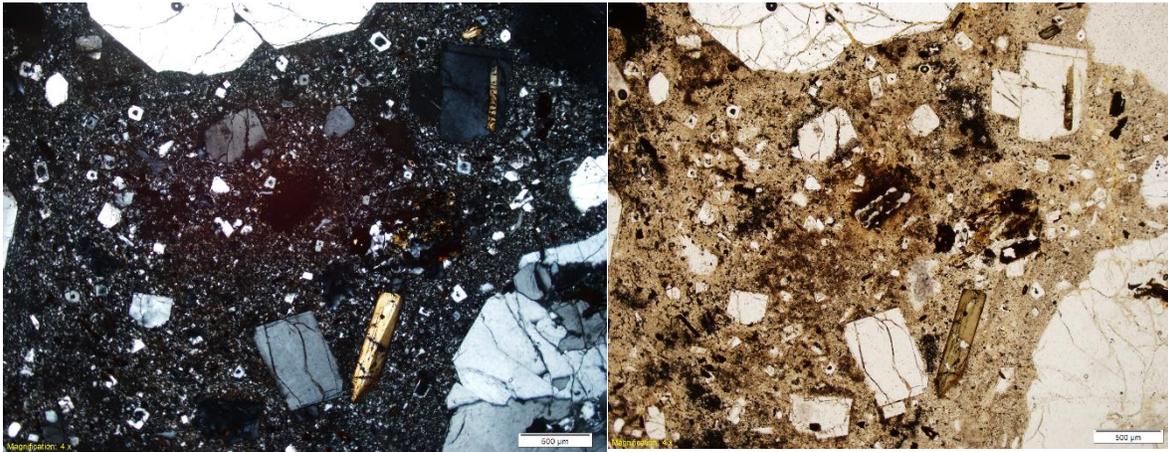


*Figura 15. Información general muestra VG-SD-005*

- **Descripción Macroscópica**

Roca volcánica de color café claro debido a la presencia de fenocristales de sanidina y plagioclasas en medio de una matriz argilizada. En la muestra se reconocen a las hornblendas con un color oscuro y a los anfíboles alterados con un halo anaranjado debido a la presencia de óxidos de hierro amorfos. Cristales de magnetita se reemplazan por hematita en los puntos de color rojizo distribuidos por toda la muestra. La porosidad se relaciona a moldes de fenocristales destruidos por el proceso de alteración hidrotermal.

- **Descripción Microscópica**



**Foto 15.** Microfotografía matriz de micro cristales de sanidina disueltos en el núcleo, cristales de anfíboles (hornblenda), óxidos de hierro alterando la matriz. Izquierda XPL objetivo 10 x y Derecha PPL objetivo 10 X.

**Textura general:** Porfirítica,

**Otras texturas o Texturas especiales:** Texturas fragmentarias por la naturaleza efusiva de la roca y también de reemplazamiento selectivo en la matriz donde se transforma parcialmente a arcillas.

**Descripción de la matriz:** La matriz es en gran parte integrada por vidrio volcánico, el cual se transforma en arcillas y también por microcristales parcialmente destruidos por eventos de fusión parcial.

### **DESCRIPCIÓN MICROSCÓPICA DE MINERALES:**

**Feldespato Potásico (Sanidina):** Presente sobre toda la muestra, donde los fenocristales tienen una forma poligonal con la ocurrencia frecuente de exsoluciones de tipo peritítico. Con frecuencia se observan algunas microfracturas las cuales se encuentran parcialmente rellenas por vidrio volcánico debido a los eventos de fusión parcial. Algunas esferulitas integradas en su mayoría por vidrio volcánico se reconocen en medio de las fracturas. Inclusiones de circones son observadas con frecuencia.

**Plagioclasa:** Subordinada a la presencia de sanidina, de la cual se diferencia por el maclado de tipo polisintético y ocasionalmente por la ocurrencia en algunos cristales con zonación.

**Cuarzo:** Observado solo en la matriz de la roca en donde tiene una forma anhedral parcialmente asimilada por el proceso de fusión parcial.

**Anfíbol (Hornblenda):** Gran parte de los fenocristales se encuentran con una forma poligonal romboédrica, en donde presentan un fuerte pleocroísmo verde claro a café

oscuro y moderados colores de interferencia enmascarados por el fuerte pleocroísmo. Generalmente presentan unos bordes con óxidos amorfos, posiblemente debido a los procesos de ascenso a superficie.

**Óxidos de hierro:** Se presentan afectando a algunos cristales de máficos como hornblendas, en donde tienen un color anaranjado.

**Hematita:** Relacionada con la alteración de la magnetita en donde tiene un color gris claro intenso y moderada anisotropía en luz reflejada.

**Magnetita:** Reconocida por el color gris a café claro de los cristales, en luz reflejada. En los bordes y algunas fracturas la magnetita es reemplazada por hematita.

**Matriz:** Se presenta conformada en gran parte por vidrio volcánico en un 60 % y un 40 % correspondiente a microcristales sanidina y plagioclasas. Por sectores el vidrio llega a ocupar casi el 90 % de espacio en la matriz.

**Vidrio Volcánico:** Se identifica por el color café anaranjado del vidrio, comúnmente con un comportamiento de tipo isotrópico en nicols cruzados. Microfracturamientos son comúnmente rellenos por este tipo de vidrio.

**Arcillas:** Encontrada principalmente afectando a la matriz y otorgando a la muestra del color café claro distintivo de la alteración argílica.

**Circón:** Se presenta a manera de inclusión en los cristales de plagioclasas, en donde tiene una forma prismática, bien definida con colores de interferencia altos de segundo orden.

**Apatito:** Reconocido por la forma en barriles de los cristales, los cuales presentan una extinción recta con birrefringencia baja de primer orden.

#### COMPOSICIÓN MINERALÓGICA- VG-SD-004 (% Vol.)

<b>Feldespatos Alcalinos (A)</b>	86.04 %
<b>Plagioclasa (P)</b>	6.97%
<b>Cuarzo (Q)</b>	6.97 %

**CLASIFICACIÓN DE LA ROCA (Basada en Streckeisen, 1978):** Traquita cuarzo alcalina con alteración argílica (Clasificación con incertidumbre por el grado de alteración hidrotermal)

**Referencia: VG-SD-006**

**Origen de Coordenadas:** WGS-84

**Departamento:** Boyacá

**Coordenadas:** Latitud: 5.715539

Longitud: -73.102204

**Localidad:** Municipio de Paipa

**Plancha:** 171-IV-D



*Figura 16. Información general muestra VG-SD-006*

- **Descripción Macroscópica**

Roca volcánica de color café claro reconocida por los fenocristales de sanidina y plagioclasas, las cuales presentan zonación reconocida por la coloración ligeramente más oscura. La matriz es encontrada afectada por argilización a partir de la alteración del vidrio volcánico. Gran parte de los óxidos primarios se encuentran alterados a hematita identificada por la coloración ligeramente más rojiza y a óxidos de hierro amorfos. La porosidad se asocia principalmente a la presencia de microfracturamientos en fenocristales y en el contacto entre estos y la matriz.

- **Descripción Microscópica**

**Textura general:** Porfirítica.

**Otras texturas o Texturas especiales:** Texturas de fusión parcial de los cristales de plagioclasa y sanidina con la formación de vidrio volcánico. Reemplazamiento selectivo en gran parte de los máficos y óxidos primarios como magnetitas las que se transforman a óxidos amorfos y hematita.

**Descripción de la matriz:** La matriz se presenta en gran parte conformada por vidrio volcánico y en menor proporción por microcristales. Particularmente el vidrio volcánico muestra efectos de reemplazamiento a arcillas lo que define la alteración argílica.

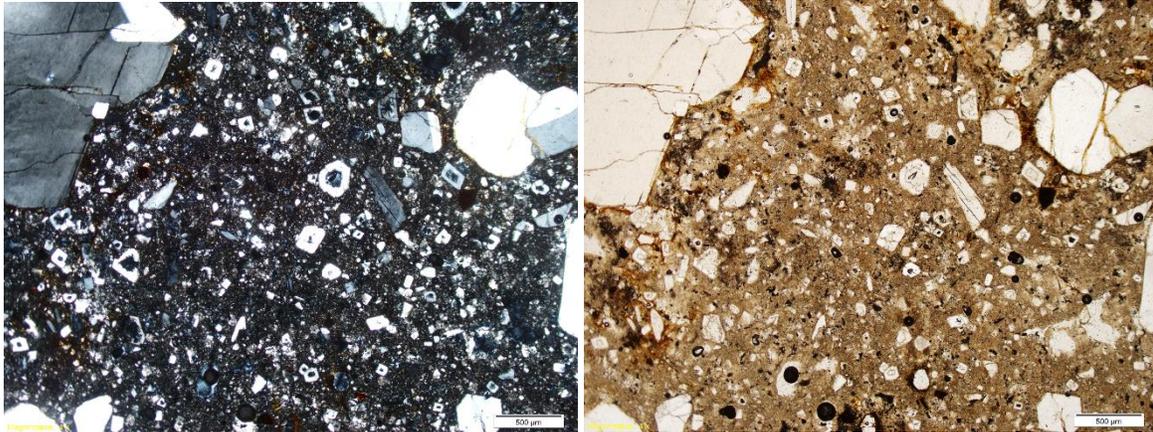


Foto 16. Microfotografía matriz de micro cristales de sanidina.

### DESCRIPCIÓN MICROSCÓPICA DE MINERALES:

**Plagioclasa:** Presenta indicios de estar parcialmente fundida particularmente en algunas microfracturas en donde se reconoce vidrio volcánico. Un rasgo característico en estas muestras es la presencia de inclusiones de plagioclasa dentro de fenocristales de la misma composición pero con mayor tamaño. Ópticamente identificada por la presencia del típico maclado polisintético y los bajos colores de interferencia. Presenta generalmente inclusiones de circón.

**Feldespatos Potásico (Sanidina):** Diferenciada por la presencia de maclado de tipo simple y los bajos colores de interferencia de los fenocristales. Al igual que la plagioclasa presenta zonación pero su forma llega a ser poligonal mejor definida. En los cristales más grandes es posible observar las clásicas segregaciones de tipo peritico características de este tipo de feldespatos. Solo en pocos cristales se observan indicios de fusión parcial

**Cuarzo:** En esta muestra el cuarzo se presenta con una forma poligonal, la cual es comúnmente destruida por fracturamientos y por la formación de bahías producto del proceso de fusión parcial. Particularmente abundante a manera de microcristal en donde tiene una forma mejor definida que los fragmentos como fenocristales. Algunas fracturas dentro de este cristal son rellenas por óxidos de hierro.

**Anfíbol (Hornblenda):** Observada con un fuerte pleocroísmo de café claro a oscuro, lo que puede estar relacionado a la presencia de titanio. Muestra patrones de exfoliación a 60 y 120 grados característicos de este tipo de minerales. Con frecuencia presenta halos de óxidos de hierro los que se acomodan en el borde del cristal y en algunas microfracturas.

**Óxidos de hierro:** Reconocidos en algunas fracturas en medio de la matriz de la muestra y particularmente provenientes de la descomposición de óxidos primarios como magnetita. También encontrados en el reemplazamiento de minerales máficos, de los que

con frecuencia se observa solamente el armazón. En estos sectores los óxidos tienen un mejor pulido, sugiriendo la ocurrencia de variedades cristalinas como goethita o hematita.

**Hematita:** Se presenta reemplazando a los cristales de magnetitas de las que se diferencia por la presencia de un moderado pleocroísmo, débil anisotropía y abundantes reflejos internos de color rojo.

**Magnetita:** Reemplazada parcialmente por la hematita posiblemente por los procesos de alteración hidrotermal. Dicho proceso se realiza siguiendo algunos planos cristalográficos octaédricos en la magnetita. El color gris ligeramente pardo y comportamiento isotrópico en luz reflejada son sus características ópticas distintivas.

**Matriz:** Integrada por microcristales en un 40 % y un 60 % por vidrio volcánico el que se encuentra parcialmente reemplazado por arcillas y óxidos de hierro amorfos.

**Zeolitas:** Se caracterizan por la presencia de formas poligonales similares a hexágonos con bajos colores de interferencia de primer orden. Crecen al interior de cristales de plagioclasas o sanidinas en donde se acompañan por arcillas y vidrio volcánico.

**Arcillas:** Identificada en la matriz y particularmente reemplazando al vidrio volcánico. Ópticamente se reconoce por la aparición de colores de interferencia bajos de primer orden en medio del vidrio isotrópico.

**Circón:** Se presenta a manera de inclusión dentro de los fenocristales de plagioclasas en donde tiene una forma prismática con doble terminación, características de las variedades volcánicas relativamente jóvenes.

**Apatito:** Al igual que los circones, los apatitos son encontrados a manera de inclusión en las plagioclasas. Se diferencian particularmente por la forma de los cristales a manera de pequeños barriles, con bajos colores de interferencia de primer orden.

#### COMPOSICIÓN MINERALÓGICA- VG-SD-006 (% Vol.)

<b>Feldespatos Alcalinos (A)</b>	81.2 %
<b>Plagioclasa (P)</b>	9.92%
<b>Cuarzo (Q)</b>	8.86 %

**CLASIFICACIÓN DE LA ROCA (Basada en Streckeisen, 1978):** Cuarzotraquita con alteración argílica (Clasificación con incertidumbre por el grado de alteración hidrotermal).

Se presenta los resultados de análisis petrográfico y por medio de difracción de rayos X en la Tabla 10.

*Tabla 10. Resumen de resultados petrografía y difracción de rayos X*

Muestra	Petrografía	DRX
---------	-------------	-----

<b>VG_SD_009</b>	<b>Minerales Primarios:</b> Plagioclasa, cuarzo, Sanidina, Hornblenda, Magnetita.	<b>Roca Total:</b> Cuarzo 44%, Sanidina 17%, Halloysita 3%, Caolinita-Mormorillonita 36%
	<b>Minerales Secundarios:</b> Arcillas (30%), Óxidos de hierro (7%), sílice de baja	
	<b>Clasificación por Streckeisen:</b> <b>Traquita-Traquita Cuarcifera</b> <b>Q</b> (4.7%), <b>A</b> (79.9%), <b>P</b> (15.4%)	
<b>VG_SD_008</b>	<b>Minerales Primarios:</b> Plagioclasa, cuarzo, Sanidina, Hornblenda, Magnetita.	<b>Roca Total:</b> Cuarzo 27%, Sanidina 23%, Halloysita 35%, Caolinita Montomorillonita: 15%
	<b>Minerales Secundarios:</b> Arcillas, Óxidos de hierro, cristobalita	
	Clasificación <b>Clasificación por Streckeisen:</b> <b>Traquita Alcalina- Feldespato</b> <b>Q</b> (3.44 %), <b>A</b> (91,03%), <b>P</b> (5.5%)	
<b>VG_SD_007</b>	<b>Minerales Primarios:</b> Plagioclasa, Cuarzo, Sanidina	<b>Roca Total:</b> Anortoclasa:22%, Cuarzo 36%, Sanidina 17%, Albita 14%, Microlina 10%, Caolinita 1%
	<b>Minerales Secundarios:</b> Arcillas, óxidos de hierro, sílice de baja temperatura y probable albita	
	<b>Clasificación por Streckeisen:</b> <b>Traquita</b> <b>Q</b> (2.61 %), <b>A</b> (75,74%), <b>P</b> (21.6%)	
<b>VG_SD_005</b>	<b>Minerales Primarios:</b> Plagioclasa, Cuarzo, Sanidina Hornblenda, Magnetita, Vidrio Volcánico	<b>Roca Total:</b> Anortoclasa: 15% Cuarzo:37% Sanidina:5% Halloysita:3% Albita:40%
	<b>Minerales Secundarios:</b> Arcillas Óxidos de hierro Albitización	
	Clasificación <b>Clasificación por Streckeisen:</b> <b>Traquita Cz,fsp,alc</b> <b>Q</b> (6.97 %), <b>A</b> (86,04%), <b>P</b> (6.7%)	
<b>VG_SD_006</b>	<b>Minerales Primarios:</b> Plagioclasa, Cuarzo, Sanidina Hornblenda, Biotita, Magnetita	<b>Roca Total:</b> Sanidina, Cuarzo, Albita, Ortoclasa. Fracción Arcilla: No hay presencia de minerales de arcilla.
	<b>Minerales Secundarios:</b> Minerales de Arcilla, Óxidos de hierro, Albita	
	<b>Clasificación por Streckeisen:</b> <b>Traquita Cuarcifera</b> <b>Q</b> (8.86 %), <b>A</b> (81,12%), <b>P</b> (9.92%)	

## 8.2. Difracción de rayos X

- VG-SD-009

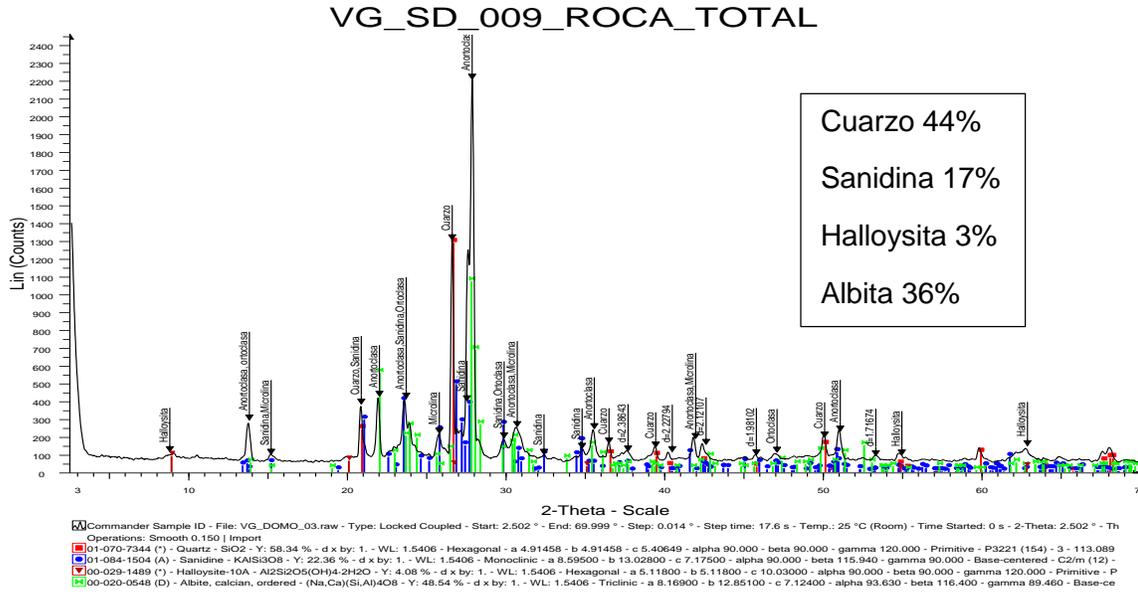


Figura 13. Difractograma VG-SD-009-Roca Total.

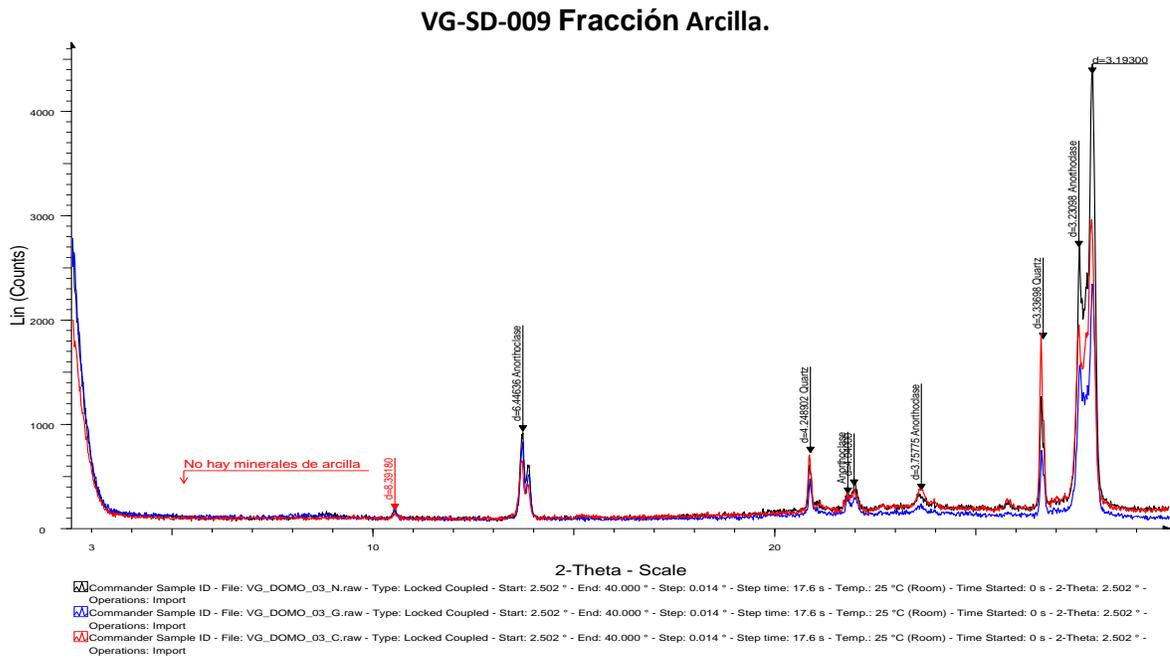


Figura 14. Difractograma VG-SD-009-Fracción Arcilla.

- VG-SD-008**

### VG\_SD\_008\_ROCA TOTAL

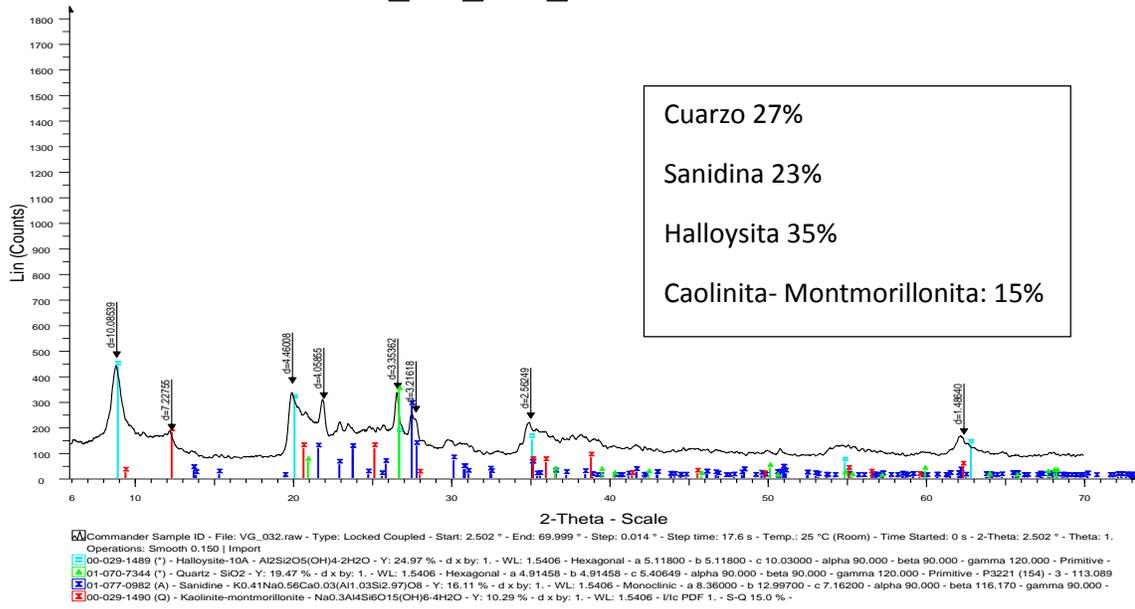


Figura 15. Difractograma VG\_SD\_008- Fractura rellena material arcilloso café-rojizo.

### VG\_SD\_008\_FRACCIÓN ARCILLAS

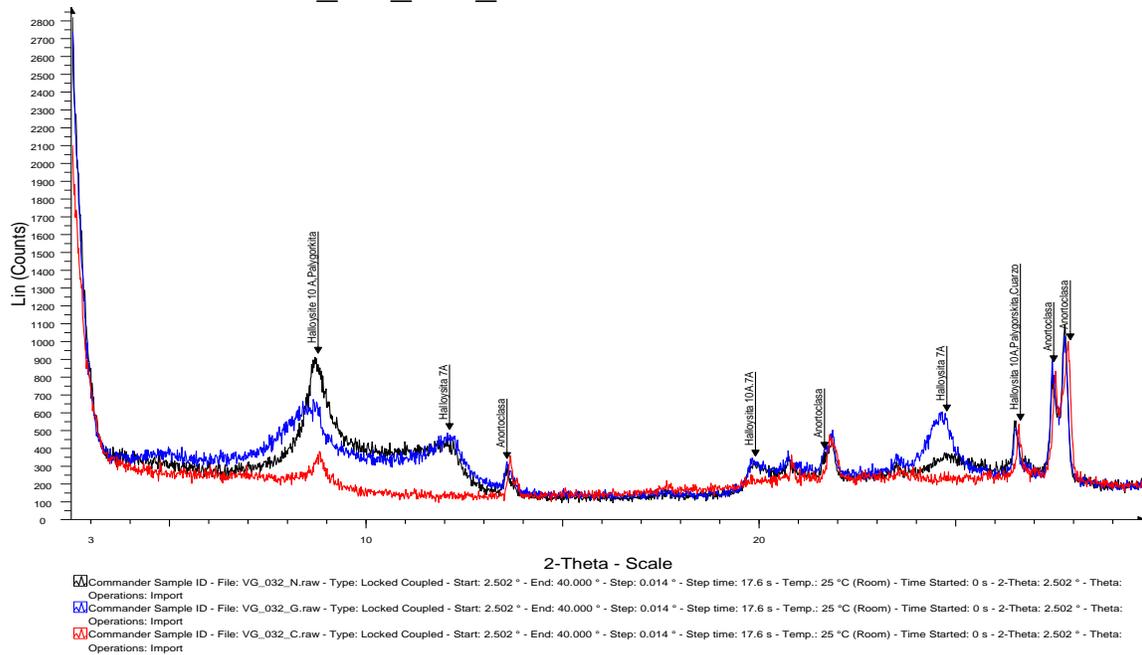


Figura 16. Difractograma VG\_SD\_008- Fractura rellena –fracción arcilla.

### VGD\_008\_ZA1

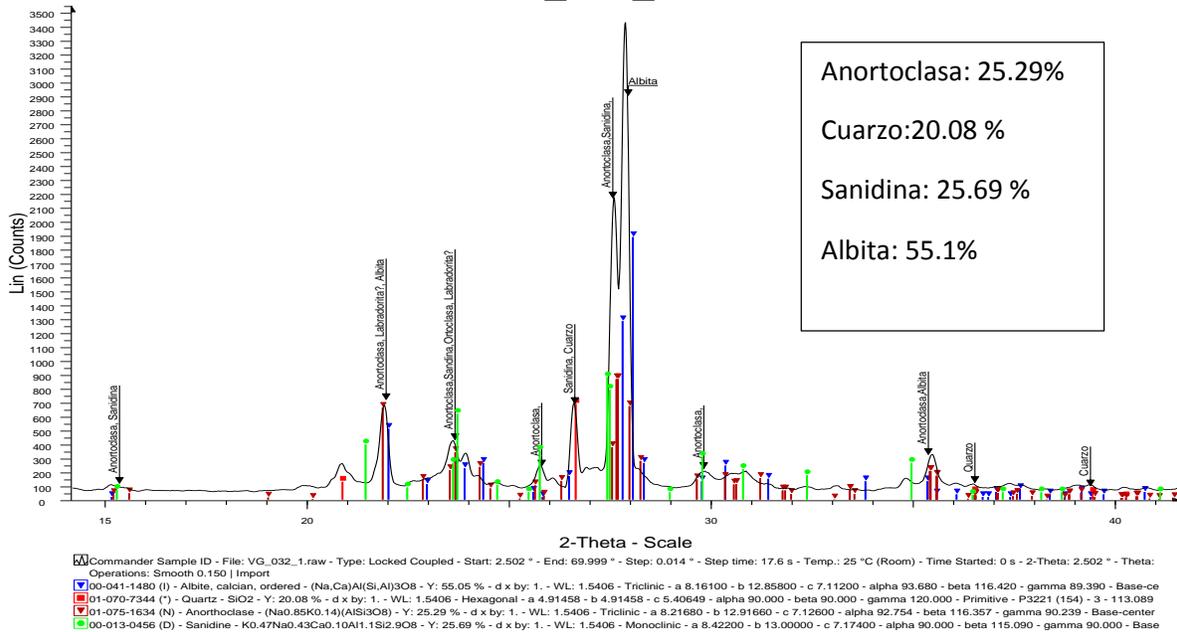


Figura 17. Difractograma VGD\_008\_ZA1.

### VGD\_008\_ZA1\_FA

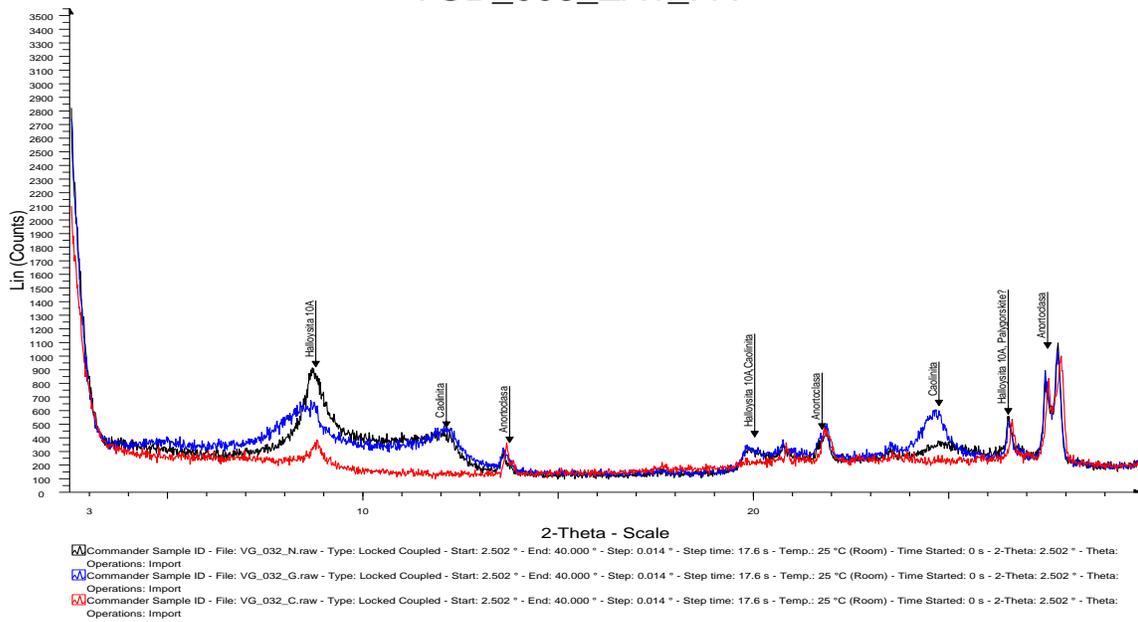


Figura 17. Difractograma VGD\_008\_ZA1\_Fracción Arcillosa.

### VGD\_008\_ZA2\_ROCA TOTAL

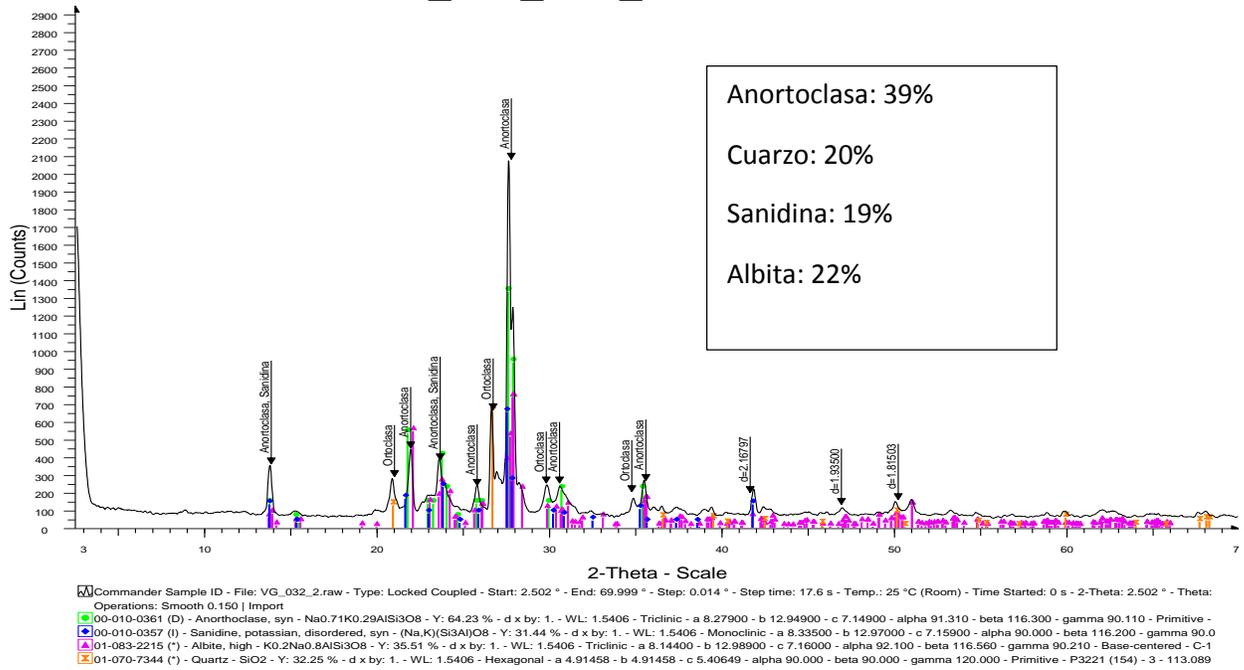


Figura 18. Difractograma VGD\_008\_ZA2\_Roca Total.

- VG-SD-007**

### VG\_SD\_007\_ROCA TOTAL

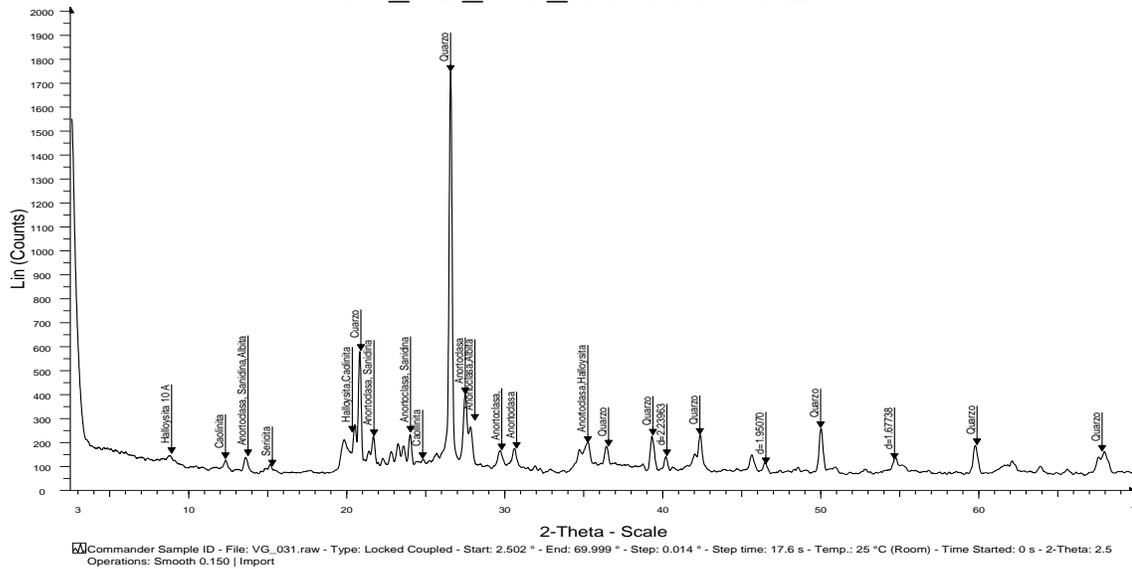


Figura 19. Difractograma VGD\_007\_Roca Total.



## VG\_SECCIÓN DELGADA\_007\_ROCA TOTAL

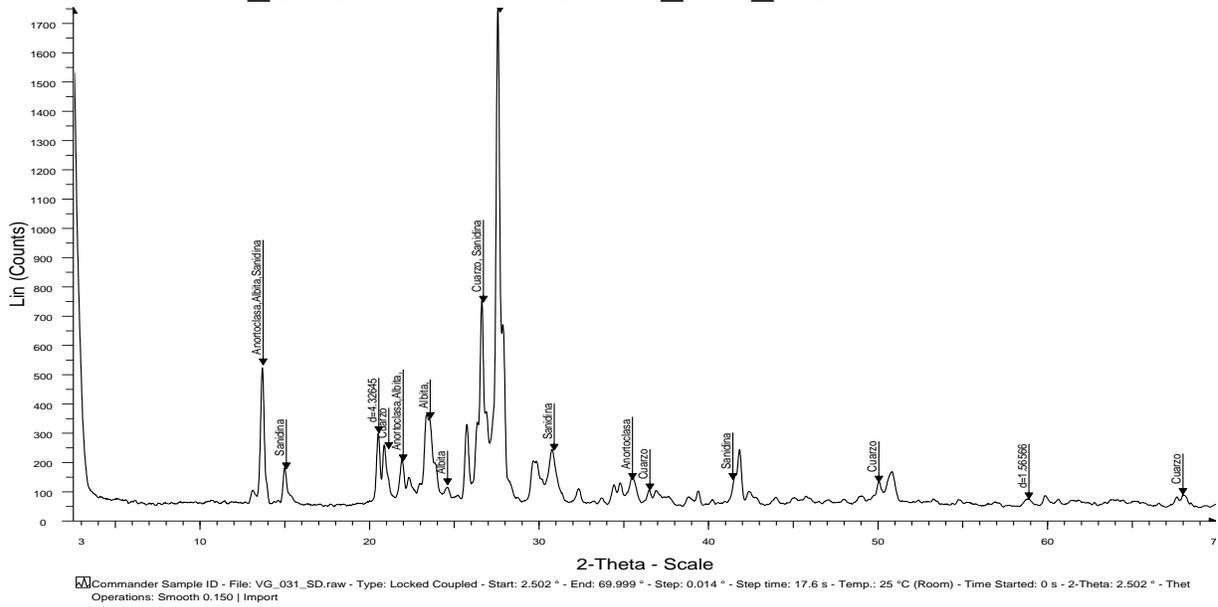


Figura 22. Difractograma VG\_SECCIÓN DELGADA\_007\_Roca Total.

- VG-SD-005**

## VG\_SD-005\_ROCA TOTAL

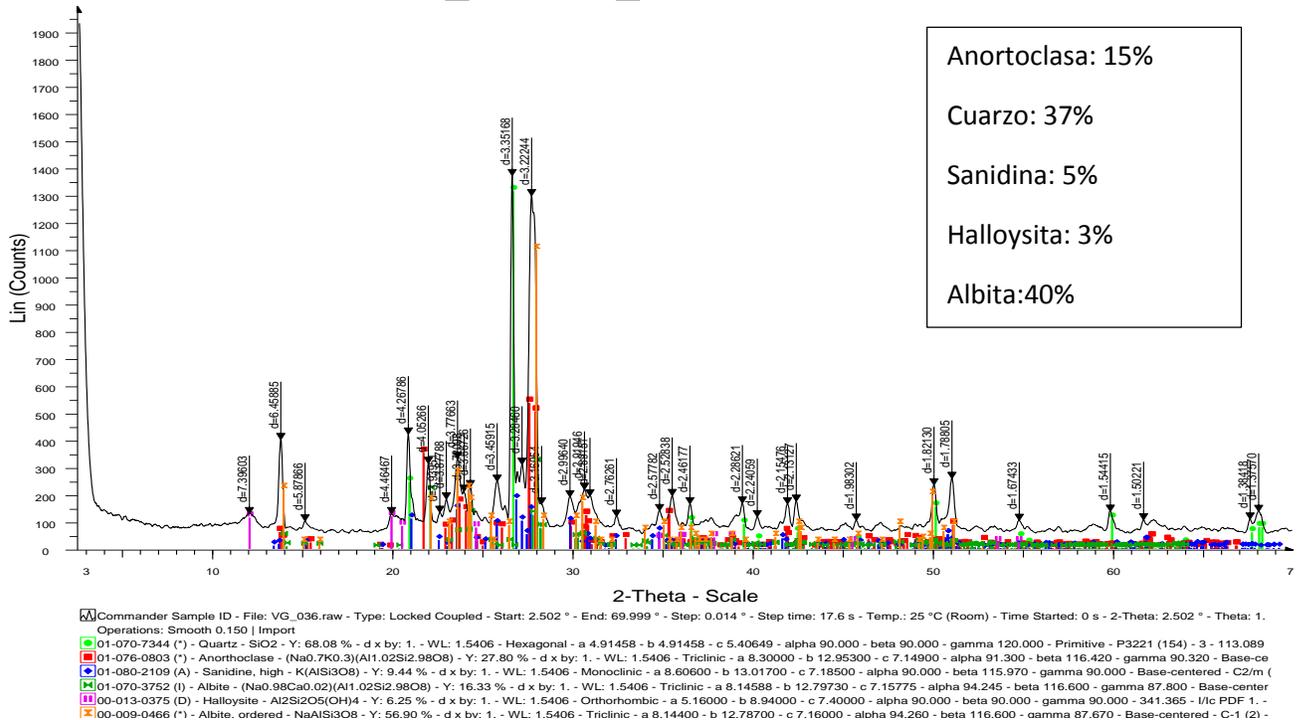


Figura 23. Difractograma VGD\_005\_ZA2\_Roca Total.

### VG\_SD\_005 Muestra Total

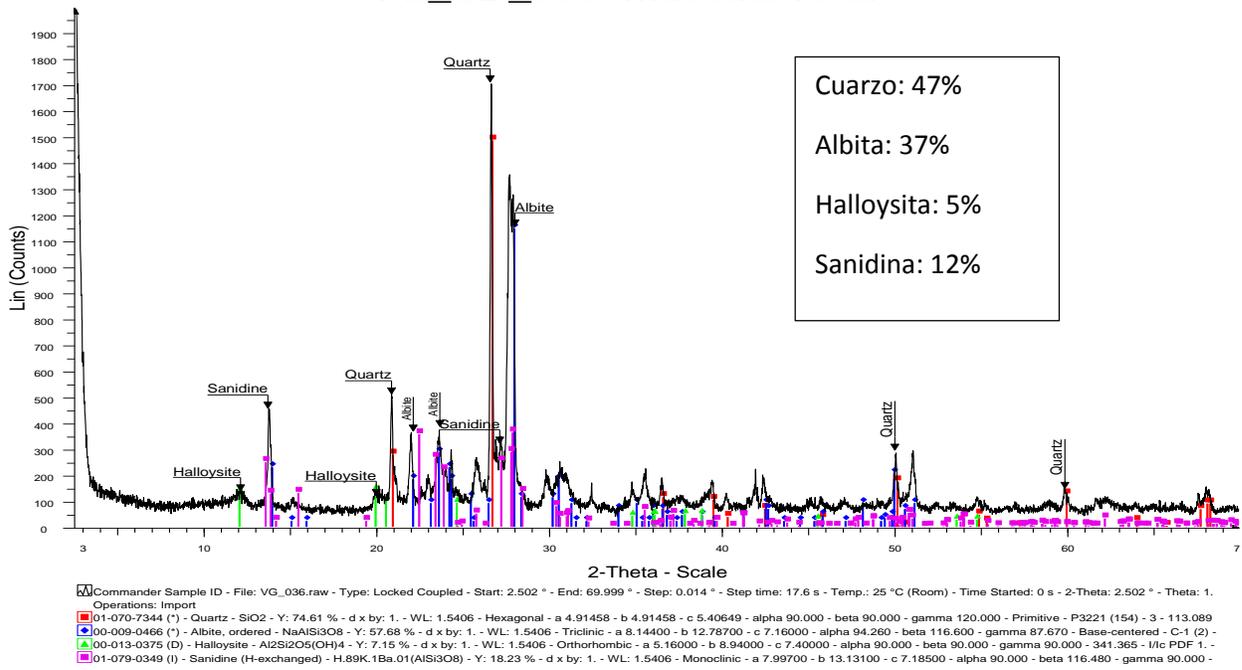


Figura 23. Difractograma VGD\_008\_ZA2\_Roca Total.

### VG\_SD\_005\_FRACCIÓN ARCILLA

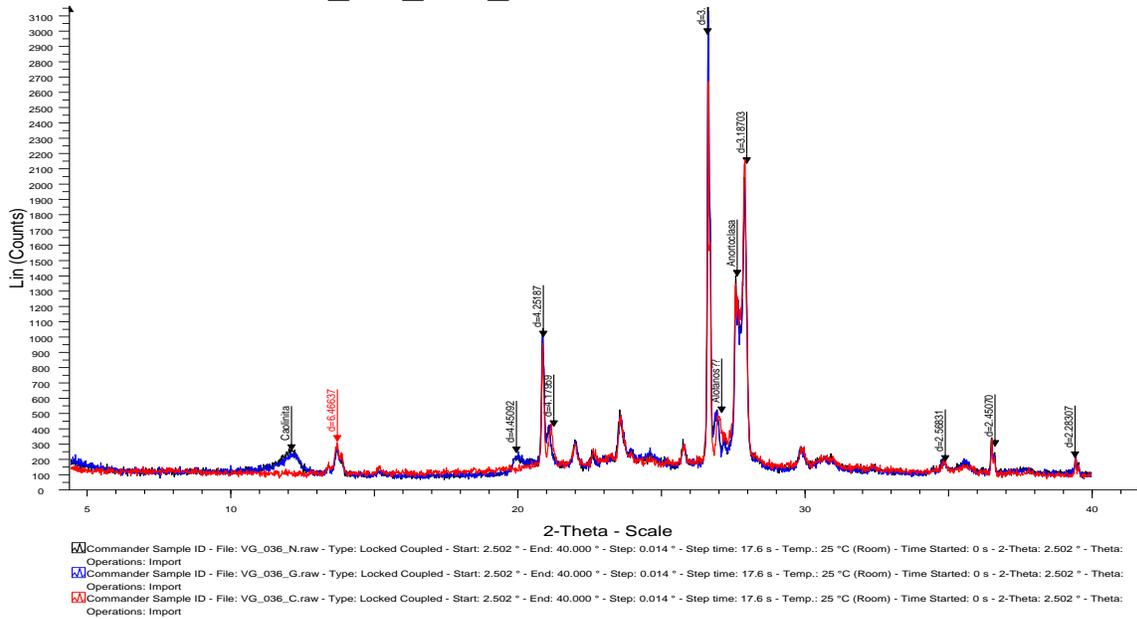


Figura 24. Difractograma VGD\_005\_Fracción Arcilla.

• **VG-SD-006**

**VG\_SD\_006 MUESTRA TOTAL**

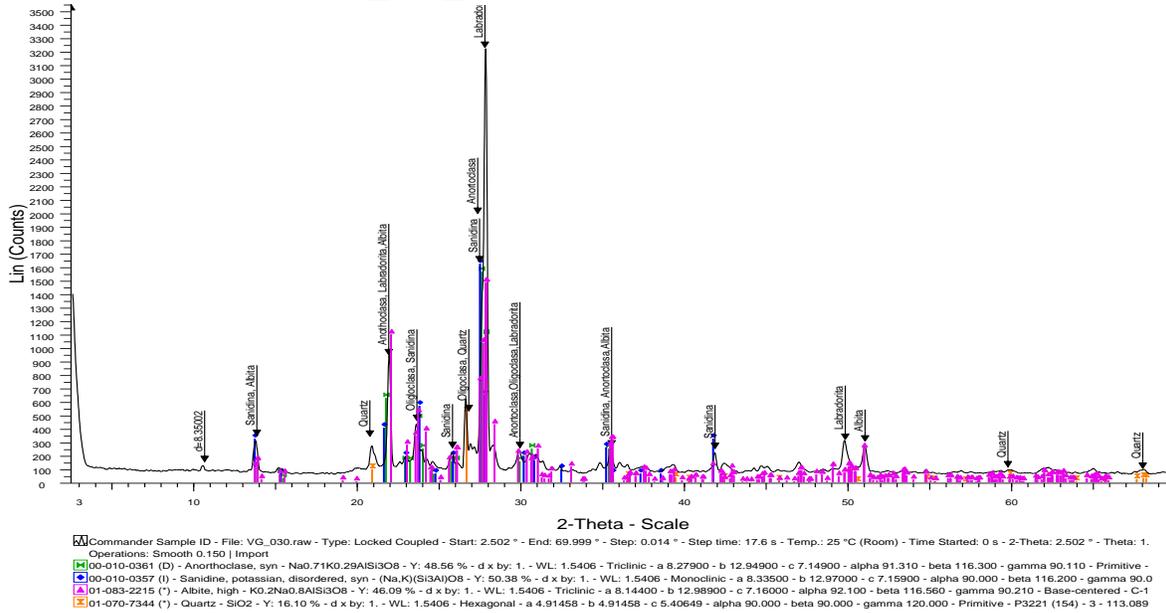


Figura 25. Difractograma VG\_SD\_006- Roca Total.

**VG\_SD\_006\_FRACCIÓN ARCILLAS**

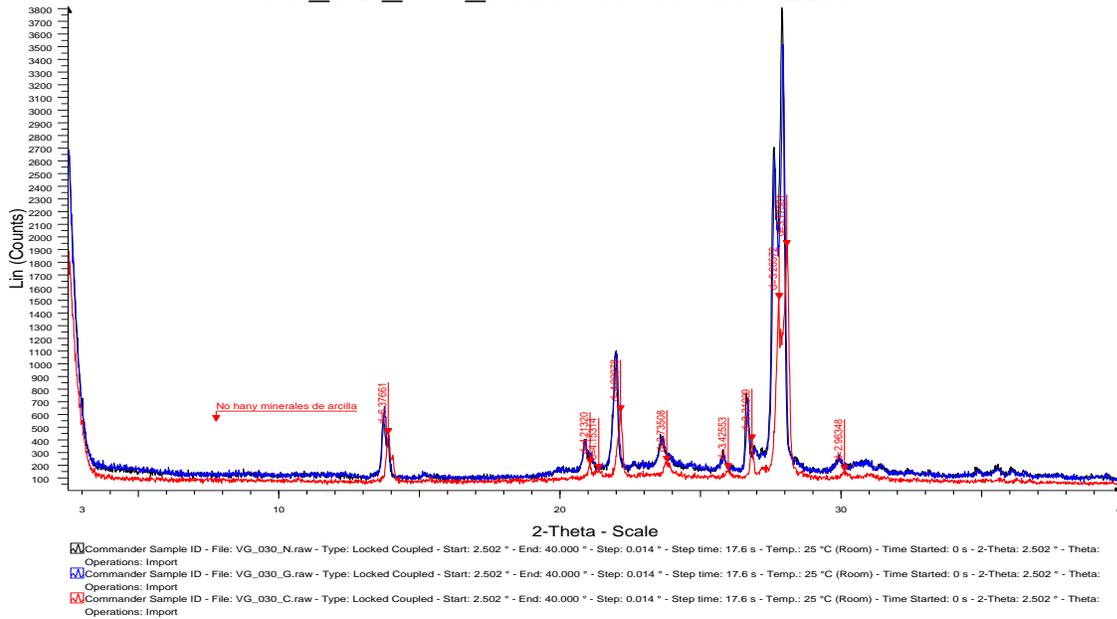


Figura 26. Difractograma VG\_SD\_006\_Fracción Arcillas.

La mayoría de minerales de alteración está compuesta por halloysita y cuarzo, con algunos minerales de albita y caolinita/caolinita-montmorillonita, los cuales pertenecen a la alteración argílica.



**Foto 13.** Afloramiento domo volcánico sector Norte Alto de los Godos. Afloramiento domo volcánico sector Norte-Alto de los Godos



**Foto 14.** Afloramiento domo volcánico sector Sur Alto de los Godos.



**Foto 15.** Afloramiento domo volcánico- detalle textura porfírica

## 9. Análisis de datos

Los resultados de los análisis petrográficos permiten clasificar las muestras correspondientes a los domos volcánicos del sector Alto de Los Godos de Paipa como traquitas y traquitas cuarzo feldespática alcalinas, clasificadas con cierta incertidumbre por el grado de alteración de la roca.

### VG-SD-007

- **Petrografía**

La composición mineralógica principal de la roca es feldespato potásico sanidina, plagioclasa, cuarzo, óxidos de hierro, brookita, minerales arcillosos, como inclusiones se encuentra circón y apatito. La matriz se observa silicificada, algunos minerales de sanidina presentan en sus núcleos minerales de arcilla, las plagioclasas se encuentran alteradas.

- **Difracción de rayos X**

Los minerales identificados en la muestra de roca total son: Anortoclasa, albita, sanidina, sericita, caolinita, cuarzo y halloysita.

En fracción arcillosa se confirmó la presencia de Halloysita, y se identificó adicionalmente caolinita, y sericita.

### VG-SD-006

- **Petrografía**

La composición mineralógica principal de la roca es feldespato potásico (sanidina), plagioclasa, cuarzo, horblenda, biotita, magnetita, como minerales accesorios apatito y circón. Se presentan como minerales de alteración arcillas, óxidos de hierro, hematita y zeolitas.

- **Difracción de rayos X**

En análisis de roca total se identificó minerales de Anortoclasa, Oligoclasa, Albita, Sanidina y Cuarzo.

En fracción arcilla no se encuentran minerales de arcilla.

**VG-SD-008**

- **Petrografía**

La composición mineralógica identificada en esta muestra por petrografía es feldespato potásico, cuarzo, hornblenda, magnetita, como minerales accesorios circón, y como minerales de alteración se encuentran arcillas y óxidos de hierro. Esta muestra es clasificada como traquita alcalina.

- **Difracción de rayos X**

Para esta muestra se tomaron tres muestras, A. Zona de fractura, rellenos de material arcilloso. B) Zona de alteración color gris claro. C) Zona de alteración color blanco rosa.



*Figura 18 Zonas de alteración muestra VG-SD-008*

**VG-SD-008- Zona A.**

- **Difracción de rayos X**

En la zona de fractura, el análisis de roca total realizado en material arcilloso, permitió identificar halloysita, cuarzo, caolinita-montmorillonita, sanidina.

En cuanto a los resultados en fracción arcilla se identifica halloysita 10<sup>a</sup> y halloysita 7A, Palygotskita.

**Interpretación de minerales.**

Palygotskita: Aparece como un mineral secundario producto de alteración de silicatos de magnesio. Es descrita como característica en arcilla asociada a un movimiento de falla.

**VG-SD-008- Zona B.**

Los resultados del análisis de roca en el material de la zona de alteración B, permitieron identificar como minerales principales: Albita, Cuarzo, Anortoclasa, Sanidina.

En fracción arcilla se confirmó la presencia de Halloysita, caolinita y palygorskita.

### **VG-SD-008- Zona C.**

Los resultados en roca total de la zona de alteración C, permite identificar anortoclasa, sanidina, albita y cuarzo.

### **VG-SD-009**

- **Petrografía**

Los análisis petrográficos permiten identificar la composición principal para esta muestra es feldespato potásico (sanidina), plagioclasa, cuarzo, hornblenda, magnetita, como minerales secundarios apatito y circón. Los minerales de alteración son arcillas, óxidos de hierro, hematita y rutilo. Esta roca es clasificada como cuarzotraquita con alteración argílica.

- **Difracción de rayos X**

Se identificó en la muestra de roca total, cuarzo, sanidina, halloysita 10 A y Albita. En fracción arcilla no se encontraron picos de minerales arcillosos.

El ensamble mineralógico de alteración hidrotermal está compuesta por halloysita, caolinita, caolinita-montmorillonita, cuarzo, albita, lo cual pertenece a la alteración argílica. Generalmente se encuentra este tipo de alteración de pH 4-6 y una temperatura mineralógica de mayor de 50°C.

## 10. Conclusiones y recomendaciones

Las rocas se clasifican como traquitas, cuarzotraquita y traquitas cuarzo alcalina principalmente, su caracterización mineralógica se hace con cierto grado de incertidumbre por la presencia de alteración hidrotermal.

La presencia de sanidina y horblenda permite definir la roca de composición acida.

La mineralogía de las rocas analizadas petrográficamente está representada por feldespato potásico (sanidina), plagioclasa, horblenda y cuarzo, como minerales accesorios se encuentra apatito y circón y como minerales de alteración principalmente arcillas y óxidos de hierro.

La mayoría de minerales de alteración está compuesta por halloysita y cuarzo, con algunos minerales de albita y caolinita/caolinita-montmorillonita, los cuales pertenecen a la alteración argílica.

Se puede asumir que el pH es 4-6 según la tabla de clasificación de Corbett & Leach, 1998, formando halloysita y caolinita algunos mezclados con montmorillonita. Esta zona se conoce como alteración argílica, la cual se detalla como argílica intermedia. Asimismo, la presencia de feldespato alcalino (K) (sanidina y anortoclasa) tienen influencia en la formación de halloysita y caolinita.

## 11. Recomendaciones

- Realizar análisis de difracción de rayos X en los puntos referenciados de mayor temperatura según el mapa de temperatura superficial y en los dos sitios seleccionados para la perforación, con el fin de conocer las características mineralógicas en la zona de mayor temperatura del sistema.

## 12. Agradecimientos

Agradezco a LaGeo-Grupo CE, Universidad de las Naciones Unidas, Fondo Nórdico, Agencia de Desarrollo Internacional de Islandia, a la Universidad del Salvador y demás entidades involucradas que hicieron posible el desarrollo del Diplomado en Geotermia para América Latina 2018. Gracias por su convicción de que sólo a través de una industria colaborativa y de apoyo solidario se puede posicionar la geotermia y brindar sostenibilidad para nuestra región y nuestro planeta.

Agradezco a mi tutora Elizabeth Torio Henríquez, gracias por apoyarme en todo el proceso del diplomado y por brindarme sus conocimientos a el aporte de este proyecto de investigación que se consolida en la parte inicial de una investigación más avanzada para el área geotérmica de Paipa.

### 13. Referencias

- Alfaro. (2005). Alteración hidrotermal del sistema geotérmico de Paipa.
- Alfaro. (2005). Modelo conceptual preliminar del sistema geotérmico de Paipa.
- Alfaro et al. (2017). Actualización del modelo conceptual del área geotérmico de Paipa.
- Cepeda y Pardo. (2004) Vulcanismo de Paipa.
- Garzón. (2003). Geoquímica y potencial minero asociado a cuerpos volcánicos de Paipa.
- González. (2008) Exploración de recursos energéticos exploración de uranio en Paipa, iza, pesca, chivatá (Boyacá)
- Peña. (2016) Evaluación petrológica de las rocas de Paipa, Boyacá.
- Suárez. (2016). Mecanismos de transporte y acumulación durante las erupciones piroclásticas más explosivas, registradas al sur de Paipa.
- Velandia, (2003) Cartografía geológica y estructural sector sur del Paipa.