



## Contribución al Modelo Geotérmico del Volcán Azufral a partir de identificación de zonas de Alteración Hidrotermal

## Contribution to the Geothermal Model of Azufral Volcano from identification of zones hidrothermal alteration

DAVID CARVAJAL<sup>1</sup>

CLAUDIA ALFARO<sup>2</sup>

JUAN CARLOS MOLANO-MENDOZA<sup>3</sup>

DIANA ROMERO<sup>4</sup>

JAIME MOJICA<sup>5</sup>

<sup>1</sup>Departamento de Geociencias, Universidad Nacional de Colombia – Bogotá

E-mail: [dacarvajal@unal.edu.co](mailto:dacarvajal@unal.edu.co)

<sup>2</sup>INGEOMINAS Diag. 53 No. 34 - 53. Bogotá

E-mail: [calfaro@ingeominas.gov.co](mailto:calfaro@ingeominas.gov.co)

<sup>3</sup>Departamento de Geociencias, Universidad Nacional de Colombia – Bogotá

E-mail: [jcmolanom@unal.edu.co](mailto:jcmolanom@unal.edu.co)

<sup>4</sup>Departamento de Geociencias, Universidad Nacional de Colombia – Bogotá

E-mail: [dcromero@unal.edu.co](mailto:dcromero@unal.edu.co)

<sup>5</sup>INGEOMINAS Diag. 53 No. 34 - 53. Bogotá

E-mail: [jmojica@ingeominas.gov.co](mailto:jmojica@ingeominas.gov.co)

CARVAJAL, D., ALFARO, C., MOLANO-MENDOZA, J., ROMERO, D. & MOJICA, J. (2008): Contribución al Modelo Geotérmico del Volcán Azufral a partir de identificación de zonas de Alteración Hidrotermal.- GEOLOGÍA COLOMBIANA, 33, pp. 99-108, 9 Figs., Bogotá.

### RESUMEN

Dentro del proyecto de Investigación geológica, sísmica y geotérmica en el Altiplano Nariñense realizado conjuntamente por INGEOMINAS y la Universidad Nacional de Colombia, enmarcado en el Programa de exploración de aguas subterráneas de INGEOMINAS (PEXAS), se realizó la cartografía de alteración hidrotermal superficial a partir de muestreo y análisis de rocas frescas y alteradas.

El estudio, basado en alteración superficial, permitió establecer una zonación vertical identificando las zonas argílica avanzada, argílica, filica y propilítica. Al igual se reconocen rellenos de cuarzo y otras formas de sílice que rellenan fracturas abiertas con dirección NW – SE. La zonación vertical ha sido establecida anteriormente a partir de estudio de líticos recolectados en un depósito piroclástico en el área del Espino en el estudio de Reconocimiento de los recursos geotérmicos de la República de Colombia.

El modelo conceptual preliminar basado en la alteración hidrotermal superficial permite inferir un sistema geotérmico maduro de alta temperatura (> 250°C) con una fuente de calor magmática localizada principalmente hacia el este del volcán, el cual es consistente con el modelo geoquímico basado en la distribución y caracterización de manifestaciones superficiales (fuentes termales y fumarolas) del Volcán Azufral.

La caracterización mineralógica de la alteración hidrotermal se realizó mediante la aplicación de análisis petrográficos, difracción de Rayos-X y espectrometría de onda corta infrarroja (PIMA).

Palabras Clave: *alteración hidrotermal, volcán Azufral, caracterización mineralógica, modelo geotérmico.*

### ABSTRACT

Within the project of geologic, seismic and geothermal Investigation in the Altiplano Nariñense made jointly by INGEOMINAS and the National University of Colombia, framed in the Program of

underground water exploration of INGEOMINAS (PEXAS), the cartography of superficial hidrothermal alteration from sampling and analysis of fresh and altered rocks was made.

The study, based on superficial alteration, allowed to establish a vertical zonación identifying the zones advanced argillic, argillic, phyllic and propylitic. The equal one quartz fillings and other silica forms are recognized that fill up fractures opened with direction NW - SE.

The vertical distribution has been established previously from study of líticos collected in a flows deposit in the area of the Espino in the study of Recognition of the geothermal resources of the Republic of Colombia. The preliminary conceptual model based on the superficial hidrothermal alteration allows to mainly infer a mature geothermal system of high temperature (>250°C) with a magmatic located heat source towards the east of the volcano, which is consistent with the geochemistry model based on the distribution and characterization of superficial manifestations (hot springs and fumarolas) of Volcan Azufral.

Key words: *Hidrothermal alteration, Azufral volcano, mineralogy characterization, geothermal model.*

## INTRODUCCION

El volcán Azufral se encuentra en la región andina del departamento de Nariño entre los municipios de Túquerres, Mallama y Santacruz, a los 1° 05' de latitud norte y 77° 41' de longitud oeste, forma parte de la cadena de volcanes activos del suroccidente colombiano (Fig. 1) y es uno de los sistemas definidos como objetivo prioritario para la exploración geotérmica en el país (OLADE 1982).

Una de las evidencias de la existencia de un sistema geotérmico además de las manifestaciones superficiales de descarga de fluidos, es la formación de minerales secundarios producidos por la interacción roca – fluido hidrotermal. La formación de estos minerales también llamados de alteración hidrotermal dependen de variables como temperatura, proceso de ebullición, tipo de roca y composición de los fluidos geotérmicos. En consecuencia a partir de su identificaciones posible plantear hipótesis sobre las características fisicoquímicas (pH y temperatura) del fluido hidrotermal (BROWNE 1997).

El objetivo del presente trabajo es inferir la localización del sistema geotérmico del Volcán Azufral, en el edificio volcánico y, evaluar características y procesos del fluido desde el reservorio, a partir de la cartografía superficial de alteración hidrotermal y sus características mineralógicas.

## ANTECEDENTES

El Azufral ha sido objeto de estudio en cuanto a reconocimiento y caracterización de los diferentes depósitos asociados al volcán (BETANCUR & CORREA 1992 y FONTAINE 1994). De igual manera la cartografía detallada de vulcanitas ha sido definida para generar el “Mapa de amenaza volcánica del Volcán Azufral” (CALVACHE *et al.* 2000).

En relación con el sistema geotérmico del Volcán Azufral, OLADE (1982) a partir de estudios vulcanológicos, petrológicos, geoquímicos e hidrológicos; define los siguientes elementos de interés geotérmico: (1) Edad reciente y larga persistencia de la actividad volcánica en la

zona (al menos 400.000 años), (2) Evolución magmática completa, iniciando desde andesitas hasta riolitas (SiO<sub>2</sub> de 60 a 71,5%), (3) Presencia de cráteres de explosión freática, y (4) Zonación hidrotermal, identificada a partir de xenolitos recolectados en flujos piroclásticos. Entre los fragmentos líticos se encontraron asociaciones mineralógicas típicas de las zonas hidrotermales argílica, filílica y propilítica, con estratificación vertical, que permitió plantear un incremento de temperatura y pH con la profundidad. (OLADE 1982).

A partir de la caracterización fisicoquímica de las fuentes termales y fumarolas del Volcán Azufral y de su distribución espacial, ALFARO (2001) formuló un modelo geoquímico preliminar, en el cual se plantea la ocurrencia de un flujo ascendente hacia el occidente del cráter y un flujo lateral con dirección preferencial sureste del volcán. Del mismo modo se estima que la temperatura del reservorio oscila entre 180 y 250 °C, clasificando el sistema geotérmico del Azufral como un sistema de entalpía media a alta.

## MARCO GEOLÓGICO

En el área del volcán afloran gran variedad de rocas entre las cuales tenemos rocas metavolcánicas y metasedimentarias del Complejo Dagua, rocas basálticas características de la cordillera Occidental, intercaladas con sedimentos de afinidad oceánica de edad Cretácea, correspondientes al denominado Complejo Diabásico. Intuyendo las rocas de los complejos Dagua y Diabásico aparecen rocas plutónicas, de las cuales las más sobresalientes son las pertenecientes a las Granodioritas de Piedrancha. Cubriendo discordantemente las rocas anteriormente nombradas, se encuentran rocas efusivas, explosivas y extrusivas del Paleógeno y del Neógeno, respectivamente, las cuales rellenan valles y recubren paleotopografías (CALVACHE *et al.* 2000).

El complejo Dagua esta constituido por rocas metavolcánicas hacia la base y metasedimentarias hacia el techo, mininotas, metagrawacas, metacherts, metabasaltos y metadiabasas de origen oceánico, con metamorfismo regional incipiente. La edad de este ha sido estimada en-

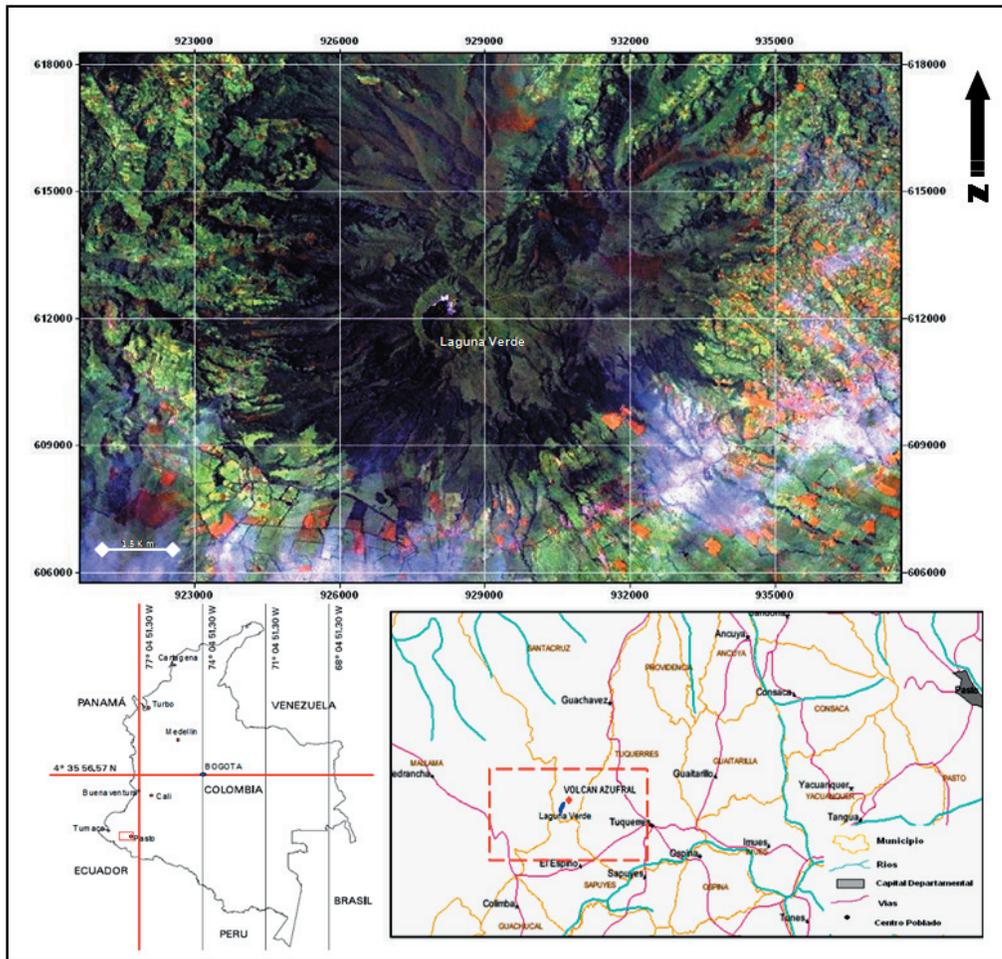


Fig. 1. Localización geográfica Volcán Azufral.

entre el Cretáceo inferior y el Cretáceo Superior (BARRERO 1979 en CALVACHE *et al.* 2000).

El complejo Diabásico está conformado por secuencias de rocas volcánico – sedimentarias de afinidad oceánica, con metamorfismo de bajo grado, constituida por metabasaltos, algunos amigdalares, metadiabasas, meta-piroclásticas y gabros, con intercalaciones de conglomerados polimícticos, grawacas, chert y localmente limolitas calcáreas. Su edad es considerada Cretáceo superior (ARANGO & PONCE 1980 y MURCIA & CEPEDA 1991, en CALVACHE *et al.* 2000).

Las rocas del neógeno, constituidas por andesitas, dacitas y riolitas, depositadas discordantemente sobre las unidades anteriores, corresponden a la unidad denominada por GROSSE (1935) (en CALVACHE *et al.* 2000), como Formación Nariño y el sector del volcán se corresponden a Lavas Andesíticas Antiguas del Volcán Azufral (GONZÁLEZ *et al.* 2002). En el sector norte del volcán se localizan depósitos lávicos considerados como Lavas Recientes del

volcán Azufral, la composición predominante es andesítica y gran parte de estas se hayan cubiertas por depósitos piroclásticos riolodacíticos, que representan la actividad más reciente del volcán. La edad para estas corresponde al principio del Pleistoceno Tardío, edad que marca el inicio de la actividad reciente del volcán (FONTAINE 1994).

Los eventos explosivos que caracterizan los últimos episodios del volcán Azufral se relacionan al emplazamiento de un complejo de domos de composición riolodacítica al interior del cráter, estos se distribuyen de occidente a oriente y se desarrollaron como consecuencia de la cristalización fraccionada de un magma más básico, probablemente andesítico. Así mismo asociado a estos sucesos se enmarcan la formación de los espesos y variados depósitos piroclásticos, que suavizan la geomorfología del edificio volcánico y alrededores.

La tectónica en el área del volcán y alrededores es complicada, Según CEPEDA (1984) (en BETANCUR & CORREA 1992) el volcán Azufral construyó su edificio en la inter-

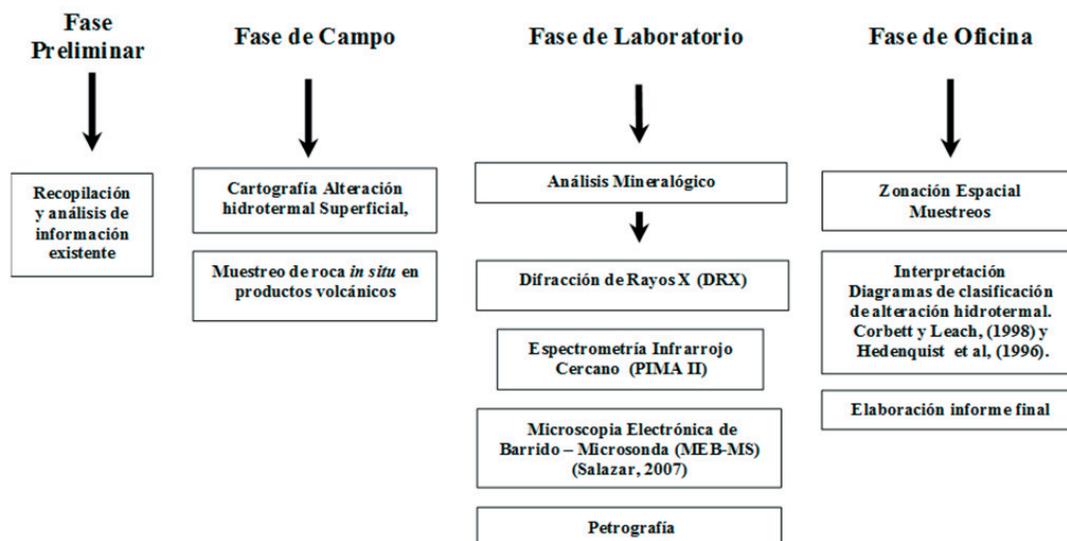


Fig. 2. Esquema general de la metodología de trabajo. El muestreo incluyó la recolección de 230 muestras de roca *in situ*. Se analizaron 70 muestras por difracción de rayos X aplicando las técnicas de polvos desorientados (mineralogía total) y polvos orientados (mineralogía de arcillas y tamaño inferior a 2mm). Las técnicas de infrarrojo y de microscopía electrónica fueron utilizadas como técnicas complementarias para lo cual se analizó un total de 10 muestras por cada una. Por petrografía se analizaron veintiocho (28) secciones delgadas de muestras recolectadas, preparadas y estudiadas por CALVACHE *et al.* (2000).

sección de la Falla Cauca – Patía (hoy Cali – Patía, según PARIS & ROMERO 1994) con la falla transversal inferida El Diviso – Túquerres. En el estilo estructural de la región predominan fallas de alto ángulo de dirección N-NE, presentando una deformación notoria sobre la Cordillera Occidental, producida por imbricación de cuñas o escamas de fragmentos corticales durante un proceso continuo de acreción y subducción de un plateau oceánico, (GONZÁLEZ *et al.* 2002). Además de los rasgos estructurales anteriormente mencionados existen lineamientos transversales con dirección NW – SE, que cortan localmente a las estructuras mayores longitudinales NE – SW, estos se pueden interpretar como fallas antiguas de basamento, perpendiculares a las fallas principales asociados a la fase de interacción de las placas de Nazca y de Suramérica, que a su vez pueden tener relación con el vulcanismo presente en la zona (RODRÍGUEZ 2005).

## METODOLOGIA

La metodología aplicada para el desarrollo del trabajo es presentada en la figura 2.

Los equipos utilizados para la aplicación de las técnicas de caracterización mineralógica, indicadas en la figura 2 incluyen Difractómetro de Rayos X RIGAKU Rint 2200, Espectrómetro Infrarrojo Cercano PIMA II (por sus siglas en inglés), Microscopio Electrónico de Barrido Philips FEI Quanta 200 – Microsonda EDAX Incorporated y Microscopio Petrográfico Olympus BH-2.

## RESULTADOS

### Mineralogía de Alteración Hidrotermal

A partir de distribución espacial se agruparon las muestras en 5 zonas como se ilustra en la figura 3.

Las muestras analizadas en general presentan una composición que varía entre andesitas y dacitas y pertenecen a los cuerpos de lava del edificio volcánico.

En la **Zona Laguna Verde**, caracterizada a partir del análisis de ocho (8) muestras por las técnicas de DRX y PIMA permiten reconocer mineralizaciones de alunita, cuarzo y cristobalita (Fig. 4). La identidad de la alunita es confirmada por su cristalización típica observada por microscopía electrónica y por análisis con microsonda electrónica.

Las zonas identificadas como **Cabecera del Río Azufreal** y **Sur de Potrerillos**, registran dos patrones mineralógicos. El primero, es semejante al presentado para la zona de Laguna Verde, es decir la presencia de alunita, caolinita y cuarzo, con una mayor proporción de caolinita y esmectita. El segundo, está constituido por cuarzo y los minerales arcillosos caolinita, esmectita, dickita (en algunas muestras), en ausencia de alunita. Estas asociaciones minerales son presentadas en la figura 5.

En la zona denominada **Río Azufreal**, se presentan

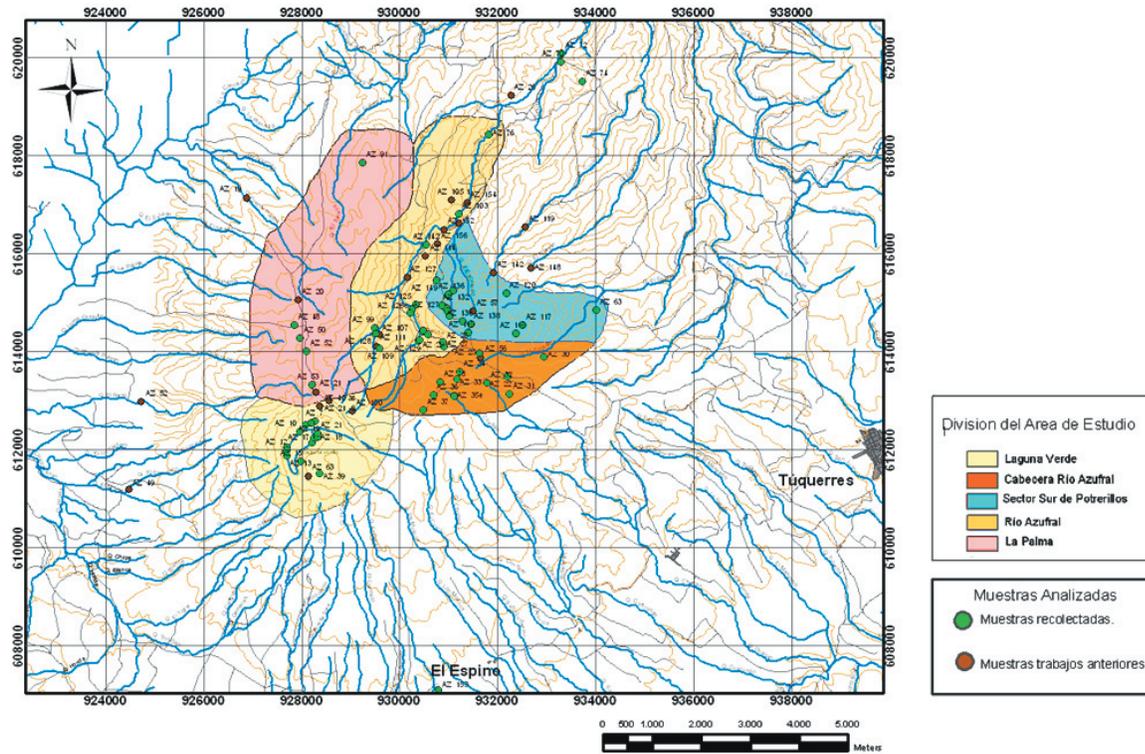


Fig. 3. Mapa localización muestras y distribución espacial del área de estudio. Las muestras son distribuidas en zonas separadas con el criterio de localización geográfica.

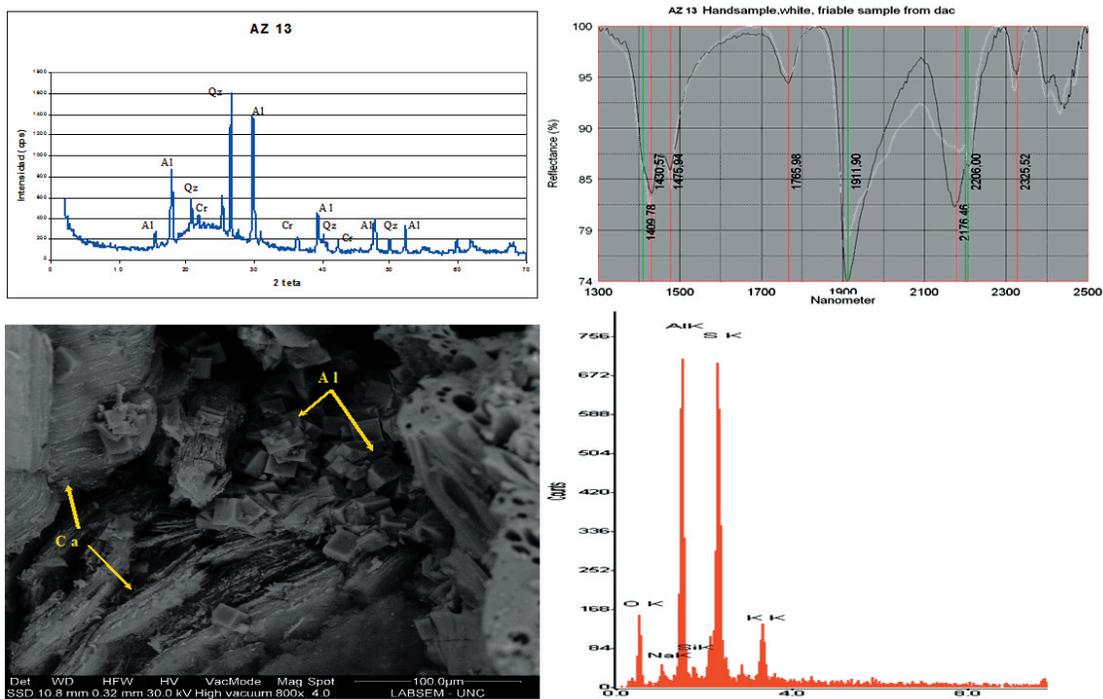


Fig. 4. Minerales identificados en la zona Laguna Verde. Los minerales más característicos de la zona son Alunita (Al), Cuarzo (Qz), Cristobalita (Cr) y Caolinita (Ca). En a se presenta el difractograma correspondiente a la muestra identificada como AZ-13. b. Corresponde al espectrograma IR de la misma muestra AZ 13, en donde son señaladas las deflexiones características de Esmectita (—) y Alunita (—). En c se muestran los cristales de alunita observados por MEB e identificados además por su composición espectrométrica indicada en d, correspondientes a la muestra AZ 8b (SALAZAR 2007).

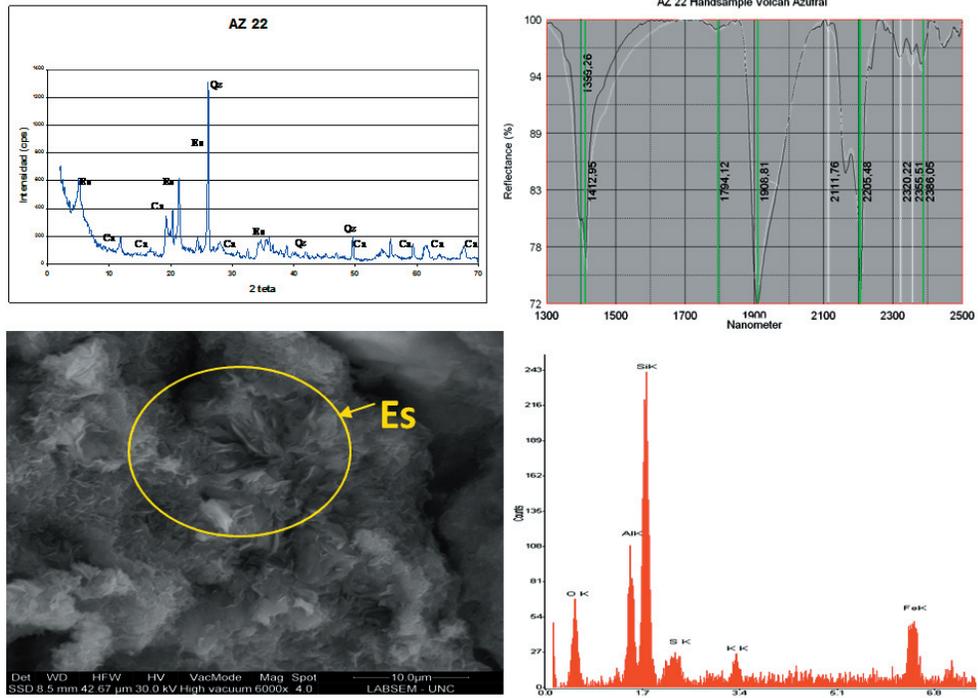


Fig. 5: Minerales identificados en las zonas Cabecera Río Azufural y Sur de Potrerillos. a. El difractograma ilustra la ausencia de alunita y la presencia de caolinita y esmectita, este último en mayor proporción para la muestra seleccionada (AZ-22). Los minerales son confirmados por las técnicas IR b. Esméctica (—) y Caolinita (—) y MEB. En d. se ilustra la composición típica de la esmectita indicada en c. (SALAZAR 2007).

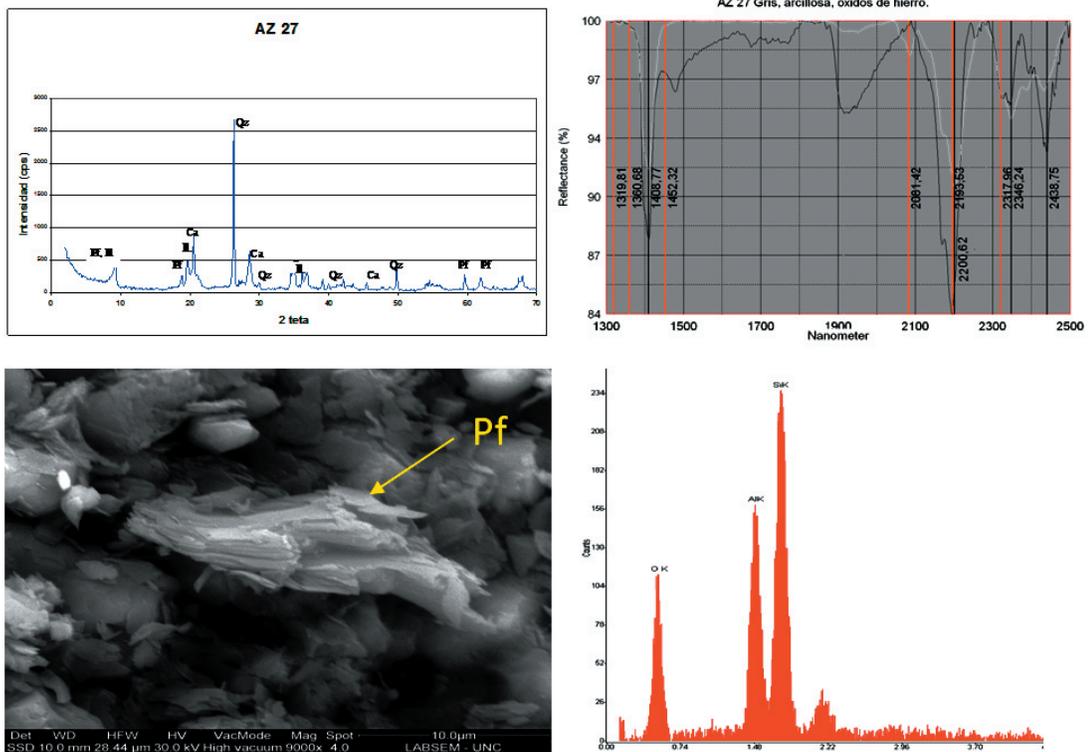


Fig. 6. Minerales identificados en la zona Río Azufural. En a, difractograma que ilustra la presencia de Cuarzo (Qz), Pirofilita (Pf), Illita (Il) y Caolinita (Ca), para la muestra AZ-27. La presencia de illita y pirofilita es confirmada por espectrometría IR (b); deflexiones características de Pirofilita (—) y Moscovita En c, imagen de microscopía electrónica de barrido muestra AZ-27, ilustrando la morfología de la pirofilita y en d, su correspondiente espectro de rayos X (SALAZAR 2007).

cuatro (4) asociaciones mineralógicas diferentes. La primera identificada en una muestra, registra la presencia de alunita, cuarzo y caolinita, observada primero en la zona de Laguna verde. En la segunda, también identificada en una sola muestra, se evidenció la presencia de los minerales mencionados en la anterior excepto alunita, como el segundo patrón de las zonas Cabecera Río Azufral y Sur Potrerillos. La tercera, observada en cinco (5) muestras, está caracterizada por la presencia de illita, pirofilita, cuarzo y pirita (Fig. 6); en algunos casos se observan caolinita y clorita. La cuarta y más importante para evaluación geotérmica, es la asociación observada petrográficamente en siete (7) muestras, conformada por epidota, clorita y calcita (Fig. 7), asimismo se observa analcima y sericita en algunas muestras.

Otro tipo de mineralización es reconocido en las diversas zonas descritas anteriormente, sin embargo en el sector de potrerillos su exposición es mas representativa, en esta el cuarzo y otros minerales de sílice son los principales constituyentes y se encuentran asociados a relenos de fracturas.

Finalmente en la **Zona de La Palma**, no se identificó en superficie el proceso de alteración hidrotermal; las muestras están constituidas por minerales primarios.

## DISCUSIÓN

Las asociaciones identificadas y descritas anteriormente, fueron clasificadas de acuerdo con CORBETT & LEACH (1998) y HEDENQUIST *et al.* (1996), como se indicó en la metodología. Esta clasificación resumida en la Tabla 1, incluye los principales tipos clásicos de alteración ordenados en función del pH la temperatura del fluido geotérmico.

El sistema manifiesta una zonación de las alteraciones hidrotermales con gradación vertical en temperatura y profundidad y una inclinación hacia el nororiente: la alteración argílica avanzada caracterizada aquí por la asociación de alunita, cuarzo, caolinita, esmectita, y cristobalita, se evidencia en los cuerpos rocosos localizados en las mayores altitudes (zona de Laguna Verde). Las condiciones fisicoquímicas que se infieren para el fluido, a partir de esta paragénesis son temperatura de 100 a 150°C y pH fuertemente ácido.

La alteración argílica fue identificada por medio de la asociación mineralógica caolinita, cuarzo, esmectita y dickita en menor proporción. Esta asociación sugiere interacción de las rocas con un fluido cuya temperatura oscila entre los 100 y 200 °C y el pH de ácido a ligeramente. Las

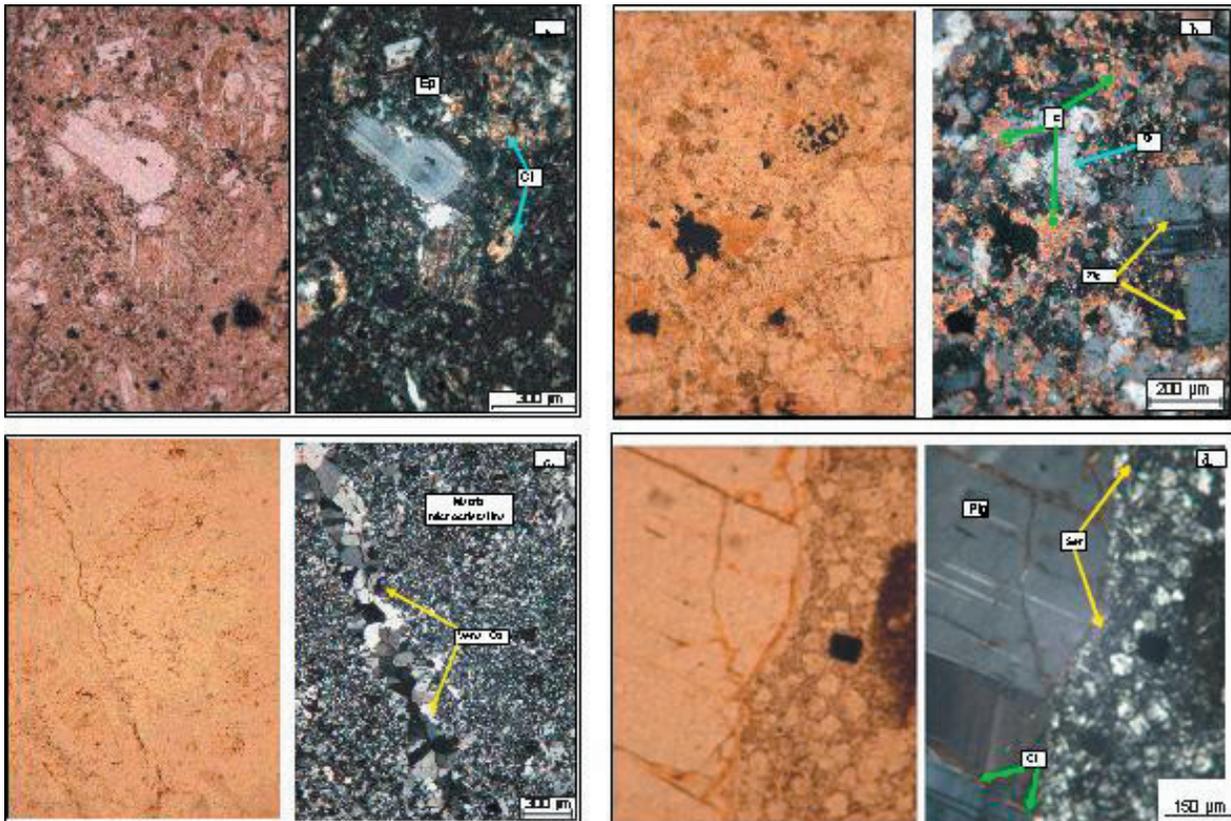


Fig. 7. Petrografía de muestras de la zona de Río Azufral. Se identifican los minerales secundarios epidota (Ep), clorita (Cl), calcita (C) cuarzo (Qz) y sericita (Ser). Muestras de CALVACHE *et al.* (2000). Muestras a. AZ 105-1, b. AZ 127, c. AZ 114, d. AZ 156.

**Tabla 1. Síntesis de las evidencias de alteración hidrotermal superficial en las diferentes zonas del volcán Azufreal.**

Zona	Muestra	Cota masam	Temperatura °C	pH	Minerales Característicos	Método Analítico			
<b>ALTERACION ARGILICA AVANZADA</b>	Laguna Verde	AZ7	3816	<100	Fuertement ácido	Cuarzo, tridimita, alunita	DRX		
		AZ8a	3803						
		AZ8b	3808						
		AZ9a	3829						
		AZ13	3808						
		AZ17	3808						
		AZ19	3800						
	Cabecera Río Azufreal	AZ25	3733	120	Ácido	Caolinita, natroalunita	DRX		
		AZ33	3830	100-140		Alunita, cuarzo, esméctica			
		AZ34	3780	Fuertement ácido		Alunita, cuarzo			
		AZ36	3808			Dickita, caolinita, alunita			
	Potrerillos Sur	AZ78	3713	100-140	Fuertement ácido	Alunita, cuarzo	PIMA		
		AZ112	3638	100-120		Caolinita, cuarzo, natroalunita			
		AZ114	3640	<100		Alunita			
		AZ132	3621	100-120		Cristobalita, cuarzo, mirafilita			
Río Azufreal	AZ128	3470	100-200	Ácido	Natroalunita, cuarzo, esméctica, caolinita, dickita	DRX			
<b>ALTERACION ARGILICA</b>	Río Azufreal	AZ125	3577	100-150	Débilmente ácido	Esméctica	DRX		
		AZ126c	3355			Cuarzo, caolinita, esméctica			
	Cabecera Río Azufreal	AZ22	3744	<100	Fuertement ácido	Cuarzo, cristobalita, esméctica, caolinita	DRX - PIMA		
		AZ32	3781			Cristobalita, tridimita, esméctica	DRX		
		AZ35a	3794			100-200	Acido	Dickita, caolinita, esméctica	DRX - PIMA
		AZ35c	3794				Dickita, caolinita	DRX	
		AZ35d	3794				Caolinita, cuarzo		
	Potrerillos Sur	AZ35e	3794	<100	Fuertement ácido	Cristobalita, tridimita, cuarzo, caolinita	DRX		
		AZ115	3772	100-140		Acido		Esméctica, caolinita, cuarzo	
		AZ131	3541	140				Esméctica	
Potrerillos Sur	AZ136	3757	100-140	Débilmente ácido	Cuarzo, esméctica	DRX			
	AZ138	3779	100-140		Acido		Dickita, esméctica		
<b>ALTERACION FILICA</b>	Río Azufreal	AZ27	3628	220-250	Débilmente ácido	Pirofilita, illita	DRX - PIMA		
		AZ28	3607	230->		Neutro	Clorita, illita, cuarzo	DRX	
		AZ29	3437	220		Débilmente ácido	illita	DRX - PIMA	
		AZ105	3441	220->		ácido	Clorita, illita, cuarzo	DRX	
		AZ106	3458	220->		ácido	Pirofilita, illita, cuarzo		
<b>ALTERACION PROPILITICA</b>	Río Azufreal	AZ19		>250	Neutro	Calcita	PETROGRAFIA		
		AZ212				Clorita			
		AZ26				Clorita, analcima			
		AZ1051				Clorita, epidota			
		AZ127				Clorita, calcita			
		AZ132				Clorita, epidota			
		AZ156				Clorita			

sílice	Potrerillos Sur	AZ113	3641	variable	variable	Cuarzo	DRX
		AZ134a	3660	variable	variable	Cuarzo	DRX

temperaturas menores se evidencian al norte del edificio volcánico, en el sector de Potrerillos y las mayores, hacia el sur, en la cabecera del Río Azufreal.

La alteración típica de la zona de filica, caracterizada por los minerales illita, cuarzo, pirofilita y ocasionalmente esméctica y clorita, esta localizada en el Río Azufreal. Las condiciones inferidas son, para temperatura entre 200 y 250 °C y para pH neutralidad o ligera acidez.

La alteración propilítica se encuentra en las rocas del norte del edificio volcánico y se determinó a partir de la asociación clorita- epidota, que indican un fluido con temperatura mayor a 250 °C y un pH neutro a alcalino; adicionalmente, dentro de este tipo de alteración se estable una subdivisión de tipo subpropilítica definida a partir de la presencia de minerales formados a menor temperatura (150- 200 °C) como calcita y analcima.

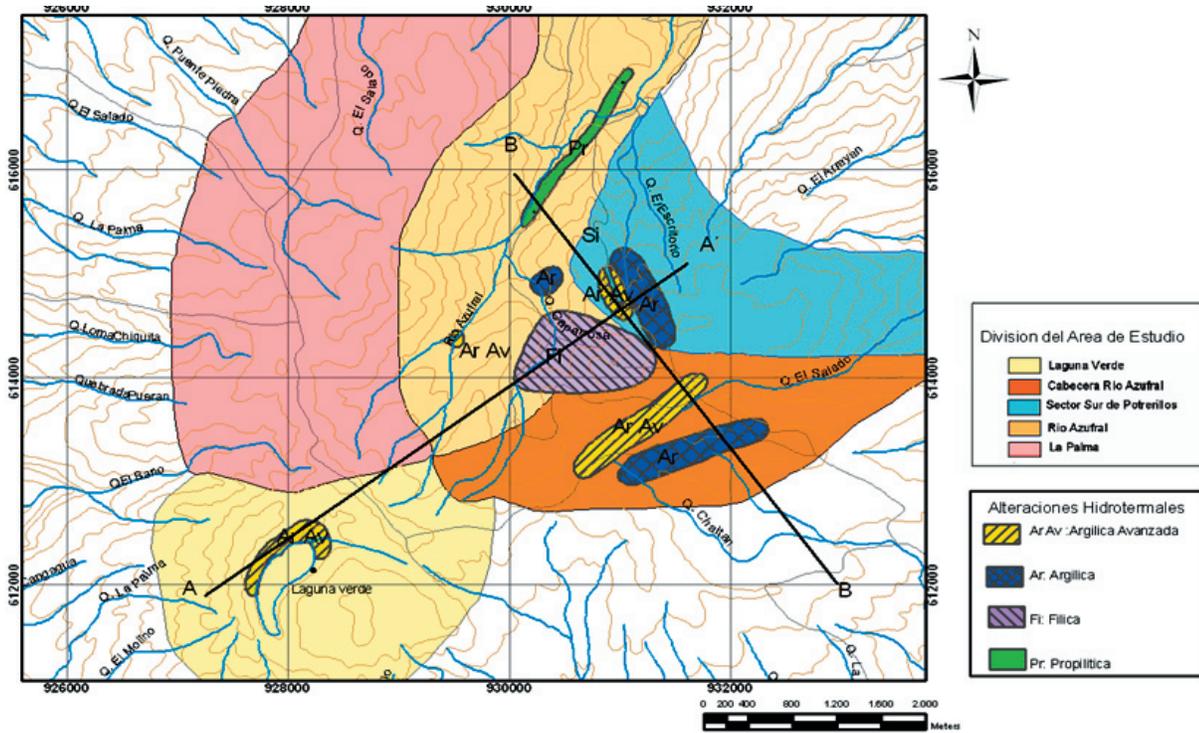
Los depósitos de cuarzo y otros minerales de sílice, rellenan fracturas paralelas con una orientación NW- SE, que sugiere ambiente distensivo local opuesto al ambiente tectónico regional dominante NE-SW, que es compresivo. Los minerales de relleno sugieren rangos variables de

temperatura y pH.

La determinación de las características de los tipos de alteración hidrotermal y su relación con los fluidos que interactuaron con las rocas del volcán sugieren la transformación de fluidos desde el reservorio, con pH neutro a alcalino, asociado a la alteración Propilítica, hasta fluido separado por ebullición, fuertemente ácido, que originó la alteración argílica avanzada.

**CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

De acuerdo con la alteración hidrotermal superficial identificada y su distribución espacial (Fig. 8), se propone un sistema geotérmico localizado hacia el sector este del volcán (Fig. 9). Un flujo ascendente que corta la superficie hacia el noreste del cráter, en donde se registra un proceso de ebullición, evidente en por la existencia de la alteración argílica avanzada, formada por fluidos calentados por vapor (“steam-heated”), que se desarrollan en un ambiente superficial caracterizado por la oxidación de H2S. El proceso identificado es coincidente con el definido a partir de la caracterización geoquímica de las fuentes termales (ALFARO 2000). Las asociaciones minerales res-



**Fig. 8: Distribución espacial alteración hidrotermal reconocida en el Volcán Azufral.**

tantes relacionadas con zonas de alteración argílica, filica y propilítica, localizadas de mayor a menor elevación, ponen en evidencia la zonación vertical característica de sistemas geotérmicos maduros desarrollados en estratovolcanes andesíticos (HENLEY & ELLIS 1983 en HENLEY *et al.* 1984). Esta zonación es consistente con la propuesta a partir de líticos de un depósito piroclástico (El Espino) (OLADE 1982).

Se recomienda complementar el estudio de alteración hidrotermal con la reconstrucción y caracterización mineralógica sobre muestras de líticos. Adicionalmente se propone realizar un estudio de inclusiones fluidas para estimar la temperatura y salinidad de los fluidos del reservorio, completar esta fase de la investigación geotérmica, con estudios geofísicos (sondeos eléctricos, gravimetría, magnetometría y magnetotelúrica) con el fin de integrarlos a los trabajos existentes de geología y geoquímica, para la formulación del modelo conceptual integrado.

**AGRADECIMIENTOS**

A Sergio Gaviria y Rafael Duarte, por la orientación y colaboración en la interpretación de la difracción de RX, a Francisco Velandia de INGEOMINAS Bogota, a Martha Calvache por sus aclaraciones y proporcionar información geológica del volcán, al equipo de INGEOMINAS Cali, en especial a Jorge Iván Londoño y Verónica Ruiz, a Ricardo Villota, Don Carlos y Don Ángel por su colaboración y apoyo en la fase de campo, a

SOCIEDAD KEDAHDA SA por facilitar el análisis de las muestras con el equipo PIMA II, a INGEOMINAS y el Departamento de Geociencias de la Universidad Nacional de Colombia sede Bogota, por su apoyo en el desarrollo del proyecto.

**REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

ALFARO, C. 2001. Geoquímica del Volcán Azufral. Informe Preliminar Segunda Versión. INGEOMINAS Bogota 24 pp.

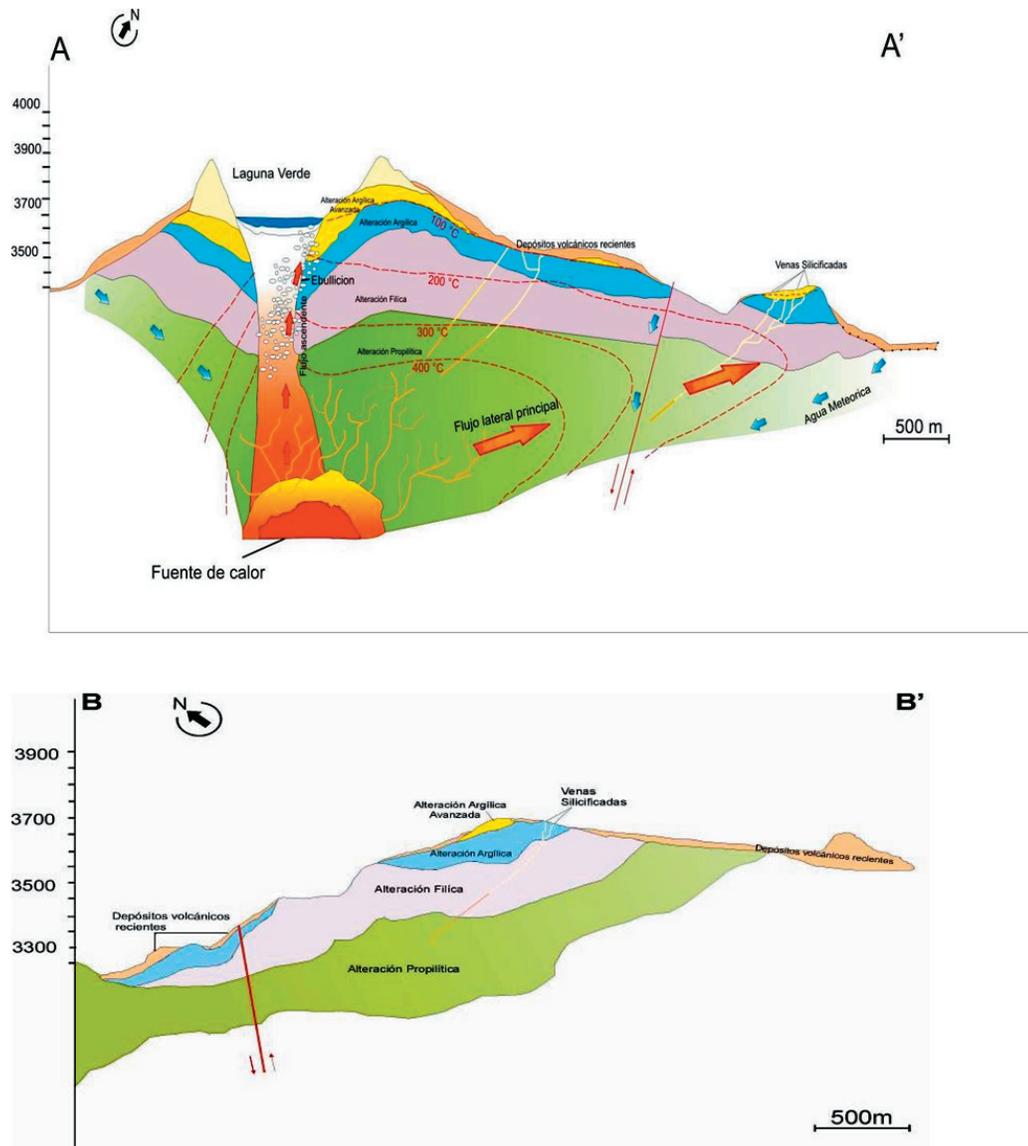
BETANCUR T. & CORREA A. M. 1992 Estudio geológico de los depósitos piroclásticos proximales del volcán Azufral, Colombia. Tesis pregrado Facultad de Ciencias, Universidad Nacional. 171pp. Medellín.

CALVACHE, M., MONSALVE, M. & TORRE, P. 2000. Informe preliminar Proyecto: Evaluación de Amenazas y Riesgos Volcánicos Volcán Azufral. INGEOMINAS, informe interno (inédito), 31 pp. Pasto.

CORBETT, G.J. & LEACH, T.M. 1998. Southwest Pacific Rim Gold-Copper Systems : Structure, Alteration, and Mineralization. Society of Economic Geologist, Special Publication Number 6, 237 pp.

BROWNE, P. R. L., 1997. Hydrothermal alteration. Handout Geothermal Institute from The University of Auckland. 70 pp.

FONTAINE, E. 1994. Evolution volcanologique et géochimique du volcán Azufral, Colombie, Amérique du Sud. Tesis master, Université de Montreal. 215p.



**Fig. 9: Modelo sistema geotérmico del Volcán Azufraal. De acuerdo a la distribución de alteración hidrotermal en superficie se propone: Un sistema geotérmico localizado en sector noroeste del edificio volcánico. Zonación de alteraciones hidrotermales con gradación vertical en temperatura y profundidad. Flujo ascendente (upflow) evidente en el sector este de Laguna Verde. Flujo lateral principal (outflow) dirigido hacia el noreste del volcan. Recarga del sistema asociado posiblemente a fallas distensivas inferidas e infiltración en depósitos piroclásticos.**

GONZALEZ, H; ZAPATA, G. & MONTOYA, D. 2002. Geología y geomorfología de la plancha 428 Túquerres, departamento de Nariño. INGEOMINAS. 157 pp.

HEDENQUIST, J, IZAWA, E., ARRIBAS, A & WHITE, N. 1996. Epithermal gold deposits. Publicación especial Geology Resource N° 1. Tokio, Japón

HENLEY, R., TRUESDELL, A. & BARTO, P. 1984. Fluid mineral equilibria in hydrothermal systems. Reviews in Economic Geology Vol. 1. Society of Economic Geologists. USA. 267 pp.

OLADE. 1982. Estudio de reconocimiento de los recursos geotérmicos de la República de Colombia, informe final. En: INGEOMINAS, 1985. Compilación de los Estudios Geológicos Oficiales en Colombia. (CEGOC) XXI, 455 pp.

PARIS, G. & ROMERO, J. 1994. Fallas activas de Colombia. Boletín Geológico. Vol 34 (No. 2-3). Bogotá 3-25 pp

SALAZAR, E. 2007. Microscopia Electrónica y análisis difractométrico en muestras del Volcán Azufraal. (En proceso).

*Manuscrito recibido Noviembre 2008; aceptado Diciembre 2008.*