

MINERALOGÍA Y FISICOQUÍMICA DE LAS FUENTES TERMALES DEL DEPARTAMENTO DE NARIÑO

Lesmes, L.E.¹, Bobadilla, L.¹, Hernández, M.L.², Cañón, Y.¹, Mojica, J.¹, Garzón, G.¹

RESUMEN

Los volcanes del departamento de Nariño, son estratovolcanes activos localizados a 5 - 10 Km de las cabeceras municipales de poblaciones con 30000 a 350000 habitantes. Las aguas termales de estos volcanes son todas salobres, con temperaturas en sus manantiales entre 22 y 62°C.

Se identificaron dos clases de alteración de las rocas: alteración ácida en la parte alta de los volcanes estudiados y alteración intermedia a alcalina en la parte baja. Además, todas las aguas termales de los volcanes nariñenses se encuentran muy alejadas de establecer un equilibrio en la interfase roca-agua.

De las veintiuna fuentes termales que hay en el departamento de Nariño, tres son clasificadas como bicarbonatadas; cinco son cloruradas y las restantes fuentes termales presentan altos contenidos de sulfatos en sus aguas.

Palabras Claves: Fuentes termales, alteraciones hidrotermales, vulcanología.

ABSTRACT

The volcanoes at Nariño department are active stratovolcanoes located from 5 to 10 Km near towns with population between 30000 and 350000 inhabitants. Thermal springs of these volcanoes are brackish, with temperatures ranging from 22 to 62°C.

Two types of altered rocks were identified: acid alteration on the summit of studied volcanoes and intermediate to alkaline alteration on the low part. All thermal waters of these volcanoes are immature and have not established an equilibrium state in the water-rock interphase.

There are twenty-one thermal springs in the department of Nariño, three of which are classified as bicarbonates; five are chlorides and another have high contents of sulphates in its waters.

Key words: Thermal springs, hydrothermal alteration, volcanology.

¹ Instituto Colombiano de Geología y Minería - INGEOMINAS
Correo electrónico: ggarzon@ingomin.gov.co

² Departamento de Química, Universidad de Nariño

1. INTRODUCCIÓN

El conocimiento de la composición química, la mineralogía y los parámetros físicos de las fuentes termales en una región volcánica puede servir para comprender el grado de interacción entre el sistema hidrotermal y el sistema magmático; es decir, puede ayudar al diagnóstico sobre la etapa de actividad volcánica en que se encuentra dicha área. Igualmente, el conocimiento de los recursos geotérmicos puede servir para crear sistemas de calentamiento en un determinado distrito urbano, en una estación piscícola o en un invernadero; y, aquellos campos geotérmicos que presentan temperaturas superiores a los 180°C también pueden usarse para la generación de energía eléctrica a través de la producción de vapor de agua. El termalismo y la balneoterapia son disciplinas que utilizan los recursos hidrotermales para el tratamiento terapéutico de diversas enfermedades, pues la acción de algunas fuentes termales sirve para estimular las defensas del organismo, purificar la sangre eliminando toxinas, aumenta el poder analgésico en el cuerpo humano relajando y sedando los músculos, además de ser un reconstituyente y un tónico en general.

El Departamento de Nariño se caracteriza por poseer gran actividad volcánica desde la frontera colombo-ecuatoriana donde se construyen los edificios volcánicos del Chiles y Cumbal, continuando en sentido noreste con los volcanes Azufral, Galeras y Doña Juana (FIGURA 1); y campos geotérmicos de posible interés como fuentes de calor con perspectivas de aprovechamiento industrial en la frontera colombo-ecuatoriana, en la sabana de Túquerres y entre los volcanes Doña Juana y Animas (CEGOC, 1995).

2. METODOLOGÍA

En las fuentes termales de los volcanes Chiles, Cumbal, Azufral, Galeras y Doña Juana se realizaron mediciones *in situ* de la temperatura del manantial con un termómetro de mercurio; el potencial de Hidrógeno se determinó con un pH-metro portátil, marca *Hanna*; la conductividad eléctrica se midió con un conductímetro *Orión 120*; las dosis de radiación gamma (DRG) ambientales se midieron con un scintilómetro *Elliot 1597* provisto de un detector de fluoruro de sodio y, las coordenadas geográficas y la altitud de las fuentes termales se establecieron satelitálmente con un GPS, marca *Garmin 40*.

Las muestras de aguas termales fueron preservadas con el objetivo de retardar los cambios fisicoquímicos y

biológicos, los cuales continúan después de tomada la muestra (García, 1992). Las muestras de aguas se filtraron en la misma fuente termal a través de membranas “millipore” de 0.45 mm, succionando con una bomba manual de vacío. Las muestras de aguas fueron envasadas en frascos de polipropileno de 500 cm³; las muestras de aguas para análisis de cationes además de filtradas, fueron aciduladas con una solución de HNO₃ 1:1 hasta un pH < 2 con el fin de asegurar la presencia de los cationes en solución y de esta manera evitar su precipitación antes de los análisis. Para el análisis de la alcalinidad y la acidez de las aguas se procuró realizar las marchas volumétricas en campo, en un tiempo no superior a las 24 horas (Garzón et al., 1996).

En laboratorio, los cationes fueron analizados en un espectrofotómetro de absorción atómica *Perkin Elmer 3110* en una solución de fondo de HF, preparado con 80 mL de HF al 40% con 1 L de H₃BO₃ y 920 mL de agua desionizada. Los aniones fueron analizados por métodos volumétricos (Giggenbach y Goguel, 1989; Alfaro, 1999). A las muestras de las alteraciones hidrotermales asociadas a las fuentes termales se les realizaron análisis tanto mineralógicos, como de contenidos elementales; los análisis mineralógicos se realizaron por microscopía óptica de secciones delgadas pulidas y en un difractor de rayos X marca *Rigaku*, modelo *Rint 2200* mientras que los análisis elementales se realizaron en un equipo de fluorescencia de rayos X marca *Rigaku*, modelo *Rix 1000* y en un espectrofotómetro de absorción atómica *Shimadzu 660*.

La metodología de los muestreos, transporte y almacenamiento de las aguas termales, así como los análisis en laboratorio se realizaron de acuerdo con estándares internacionales (ASTM, 1998; APHA, 1991).

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Mediciones *in situ*

En la TABLA 1 se alistan las fuentes termales nariñenses con el volcán más cercano y se indica un código para cada fuente termal donde los dos primeros dígitos corresponden al volcán más cercano y los dos últimos dígitos del código corresponden al nombre de la fuente termal. Relacionar una fuente termal al volcán más cercano es sólo una consideración metodológica, pues como se verá más adelante solamente las fuentes termales clasificadas como ácidas sulfatadas reciben aporte de masa y de calor de las chimeneas volcánicas. Esta clase de intercambio de masa y de calor se produce a través

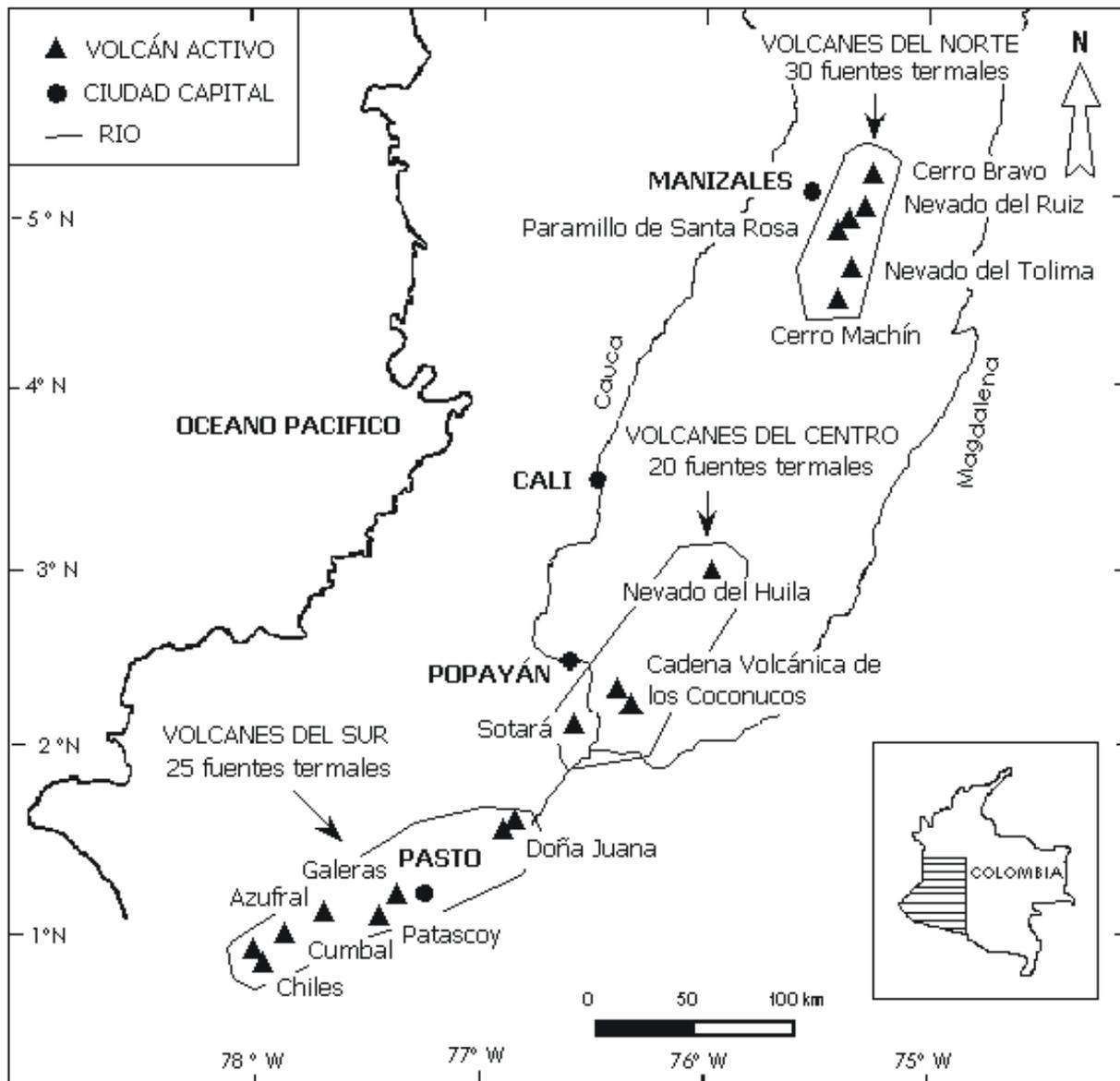


FIGURA 1. Volcanes Activos de Colombia.

de las fracturas que comunican la chimenea volcánica y las aguas subterráneas que alimentan el manantial de la fuente termal. En la misma tabla se indican las coordenadas geográficas, las altitudes sobre el nivel del mar de cada una de las fuentes termales y los resultados de las últimas mediciones de las temperaturas de los manantiales de las fuentes termales, así como los

potenciales de hidrógeno, las conductividades eléctricas y las dosis de radiación gamma (DRG).

Las temperaturas medidas en los manantiales de las fuentes termales de Nariño fluctúan entre 22°C y 62°C. La relación de las temperaturas de las aguas termales por volcán, se establece de la siguiente manera:

- Volcán Chiles: CHAH (46°C) > CHBC (42°C)
- Volcán Cumbal: CUCU (33°C) > CUHU (32°C) > CUZA (31°C) > CUES (27°C)
- Volcán Azufral: AZLV (58°C) > AZQB (43°C) > AZMA (33°C) > AZSR (28°C) >> AZCA (23°C)
- Volcán Galeras: GARI (45°C) > GACE (38°C) > GAPA (31°C) > GAAA (30°C) >> GALI (22°C) = GAFB (22°C)
- Volcán Doña Juana: DJTA (62°C) > DJES (57°C) > DJSA (29°C) > DJAT (26°C)

TABLA 1. Coordenadas geográficas y mediciones *in situ* de las fuentes termales nariñenses.

| VOLCÁN/FUENTE TERMAL CÓDIGO | LAT. N | LONG. W | ALTITUD [msnm] | T [°C] | pH | COND. ELECT. [mS/cm] | DRG [μR/h] |
|--|---------------|----------------|---------------------------|-------------------|-----------|---------------------------------|-----------------------|
| Chiles / Aguas Hediondas CHAH | 00° 48.80' | 77° 54.55' | 3790 | 46 | 4.9 | 1.80 | 1.0 |
| Chiles / Baños Chiles CHBC | 00° 48.77' | 77° 52.03' | 3230 | 42 | 5.3 | 1.50 | 1.0 |
| Cumbal / El Salado CUES | 00° 53.85' | 77° 48.82' | 3240 | 27 | 5.9 | 2.58 | 1.6 |
| Cumbal / Cuetial CUCU | 00° 54.10' | 77° 49.30' | 3200 | 33 | 5.9 | 2.30 | 1.0 |
| Cumbal / El Zapatero CUZA | 00° 54.20' | 77° 49.14' | 3210 | 31 | 6.0 | 2.32 | 1.0 |
| Cumbal / Hueco Grande CUHU | 00° 55.37' | 77° 53.58' | 3300 | 32 | 6.5 | 1.80 | 1.0 |
| Azufral / San Ramón AZSR | 00° 59.25' | 77° 42.03' | 3100 | 28 | 6.8 | 2.29 | 1.2 |
| Azufral / La Cabaña AZCA | 01° 00.03' | 77° 40.50' | 3030 | 23 | 8.0 | 0.20 | 1.7 |
| Azufral / Quebrada Blanca AZQB | 01° 04.33' | 77° 44.80' | 3200 | 43 | 6.3 | 2.40 | 1.5 |
| Azufral / Laguna Verde AZLV | 01° 05.48' | 77° 43.64' | 3820 | 58 | 2.6 | 2.19 | 1.5 |
| Azufral / El Salado de Malaver AZMA | 01° 02.45' | 77° 38.57' | 2740 | 33 | 6.7 | 8.18 | 1.8 |
| Galeras / Pandiaco GAPA | 01° 13.71' | 77° 17.16' | 2520 | 31 | 6.5 | 1.88 | 1.4 |
| Galeras / Río Pasto GARI | 01° 13.78' | 77° 17.30' | 2150 | 45 | 6.0 | 2.74 | 1.4 |
| Galeras / Cehani GACE | 01° 13.73' | 77° 17.24' | 2510 | 38 | 6.6 | 2.23 | 1.4 |
| Galeras / Aguas Agrías GAAA | 01° 15.44' | 77° 19.88' | 2650 | 30 | 1.6 | 5.09 | 2.2 |
| Galeras / Licamancha GALI | 01° 12.62' | 77° 23.98' | 2750 | 22 | 5.3 | 2.15 | 1.0 |
| Galeras / Fuente Blanca GAFB | 01° 12.50' | 77° 24.00' | 2650 | 22 | 6.5 | 2.35 | 1.9 |
| Doña Juana / El Salado DJES | 01° 34.15' | 76° 55.65' | 2530 | 57 | 6.6 | 5.29 | 1.5 |
| Doña Juana / Tajumbina DJTA | 01° 34.68' | 76° 56.25' | 2500 | 62 | 6.6 | 2.05 | 1.7 |
| Doña Juana / Aguas Tibias DJAT | 01° 28.02' | 76° 59.48' | 2450 | 26 | 7.3 | 0.68 | 1.0 |
| Doña Juana / El Saladito DJSA | 01° 28.45' | 77° 00.68' | 2230 | 29 | 6.4 | 4.85 | 1.2 |

3.2. Alteraciones hidrotermales

En el Departamento de Nariño se encuentran fuentes termales ácidas como Aguas Agrías Alta en el volcán Galerías con un pH de 1.6; neutras como la de San Ramón en el volcán Azufral y Aguas Tibias en el volcán Doña Juana; y, moderadamente alcalinas como la fuente termal La Cabaña cerca del volcán Azufral.

En la TABLA 2 se indican los resultados de los análisis mineralógicos y elementales de las muestras de rocas volcánicas de composición dacítica y andesítica alteradas y no alteradas, tomadas en los volcanes del Departamento de Nariño.

TABLA 2. Composición mineralógica y elemental de alteraciones hidrotermales en las fuentes termales nariñenses.

| FUENTE | TIPO DE ALTERACIÓN | MINERAL DE ALTERACIÓN | SiO ₂ [%] | Al ₂ O ₃ [%] | Na ₂ O [%] | K ₂ O [%] | CaO [%] | MgO [%] | P ₂ O ₅ [%] | TiO ₂ [%] | MnO [%] | Fe ₂ O ₃ [%] | SO ₃ [%] | BaO [%] |
|--|-----------------------|---|----------------------|------------------------------------|-----------------------|----------------------|---------|---------|-----------------------------------|----------------------|---------|------------------------------------|---------------------|---------|
| CHAH | Acida | Cristobalita Tridimita Azufre | 67.00 | 14.00 | 3.00 | 2.90 | 4.90 | 1.90 | 0.14 | 0.55 | 0.12 | 5.40 | 0.29 | ND |
| CHBC | Intermedia - Alcalina | Calcita Yeso Epsomita | 67.00 | 14.00 | 3.00 | 2.90 | 4.60 | 1.60 | 0.16 | 0.66 | 0.07 | 5.80 | 0.25 | ND |
| Fumarola El Verde/ Cráter Plazuelas/ V. Cumbal | Acida | Cristobalita Tridimita Azufre Hematita Pirita | 63.00 | 0.51 | ND | 0.06 | 0.03 | ND | ND | ND | ND | 0.10 | 36.0 | ND |
| Fumarola Desfondada/ Cráter Plazuelas/ V. Cumbal | Acida | Cristobalita Tridimita Azufre Hematita | 56.00 | 1.20 | 0.07 | 0.07 | 0.07 | 0.03 | ND | 0.50 | ND | 0.24 | 42.0 | ND |
| Fumarola El Rastrojo/ Cráter Mundo Nuevo/ V. Cumbal | Acida | (Si-Amorfa) Cristobalita | 92.00 | 1.40 | 0.32 | 0.16 | 0.28 | 0.07 | 0.04 | 0.72 | 0.22 | 2.20 | 0.91 | ND |
| AZSR | | Albita | 60.00 | | 2.40 | 1.30 | 5.90 | 0.57 | 0.14 | 0.63 | 0.08 | 6.10 | 0.63 | ND |
| Domo V. Azufral | Acida | Cristobalita Tridimita Azufre Alumita Pirita | 68.00 | 15.00 | 3.40 | 2.50 | 4.20 | 1.10 | 0.13 | ND | 0.08 | 4.50 | 0.25 | 0.18 |
| DJTA | Intermedia - Alcalina | Calcita Oxidos de Hierro | 65.00 | 15.00 | 3.50 | 2.90 | 5.00 | 1.70 | 0.22 | 0.59 | 0.07 | 4.90 | 0.06 | 0.15 |
| DJSA | Intermedia - Alcalina | Calcita Aragonito | 56.00 | 6.90 | 2.70 | 1.50 | 5.50 | 3.30 | 0.38 | 0.33 | 1.10 | 17.00 | 0.45 | 0.11 |
| Cráter V. Dofia Juana | Acida | (Si-Amorfa) Cristobalita Azufre | 64.00 | 16.00 | 3.90 | 2.70 | 5.40 | 1.30 | 0.21 | 0.67 | 0.06 | 5.00 | 0.06 | 0.10 |

N D - No Detectado

Las rocas alteradas se han diferenciado y clasificado en dos tipos:

1. Sulfato-ácidas (alteración ácida).
2. Adularia-sericita (alteración intermedia a alcalina).

Las rocas del sector del volcán Chiles de composición dacítica presentan alteración hidrotermal ácida por acción del vapor de agua y de gases ácidos; en las rocas alteradas se presenta concentración de silicio y azufre con pérdida de sodio, fósforo y cromo y, por esta razón cristalizan especialmente cristobalita y azufre nativo. En el sector de la fuente termal de Aguas Hediondas no se presenta formación de alunita, mientras que en el sector de la fuente termal de Baños Chiles hay precipitación de sílice amorfa a partir de iones de sílice transportados y, pequeñas cantidades de calcita, indicativos de alteración intermedia a alcalina.

En los cráteres Plazuelas y Mundo Nuevo del volcán Cumbal se presenta alteración hidrotermal ácida debida a la acción del vapor de agua y de los gases fuertemente ácidos de origen magmático. Los resultados de los análisis elementales de las rocas alteradas en la fumarola El Verde del cráter Plazuelas, muestran alto contenido de silicio y azufre. Se observa precipitación de azufre nativo alrededor de las fumarolas, seguido de silicificación con formación de cristobalita y tridimita o alternando con zonas de cristobalita particulada menores a 1 mm en una matriz de azufre. En las zonas de influencia del volcán Cumbal no hay formación de alunita. En el sector del río Blanco y más propiamente en las zonas de influencia de las fuentes termales del Salado, Cuetial y el Zapatero no se observan evidencias de alteración hidrotermal, solamente se presenta precipitación de óxidos de hierro amorfos debidos a la oxidación de los iones de hierro disueltos en estas aguas termales.

En la laguna Verde y en especial en el domo activo del volcán Azufral la alteración hidrotermal ácida es característica, presentando altos contenidos de silicio, azufre y aluminio por precipitación de cristobalita, tridimita, azufre nativo y alunita. La formación de alunita y Na-alunita es mucho mayor en el volcán Azufral, en comparación con la encontrada en el volcán Chiles. La formación de piritita diseminada y rellenando fracturas en la roca alterada es común, especialmente en el sector del domo activo del volcán Azufral.

Alteración ácida de rocas dacíticas de una chimenea volcánica con formación de azufre y cristobalita, indican

que existió actividad fumarólica reciente en el cráter del volcán Doña Juana.

En una primera interpretación para cada volcán es aplicable la clasificación general de alteraciones hidrotermales de acuerdo con los procesos de separación del vapor de agua y de los gases ácidos desde las aguas termales de pH neutro a básico, mediante la ebullición del agua en zonas de fractura.

3.3. Clasificación de las aguas termales

De acuerdo con la composición catiónica o aniónica de las aguas, es posible establecer:

1. El estado de interacción roca-agua (Giggenbach, 1988).
2. Su nivel de mezclado con otros reservorios (López, 1994).
3. La influencia magmática o meteórica (Giggenbach, 1988; Menyailov, 1975; Sturchio *et al.*, 1988).

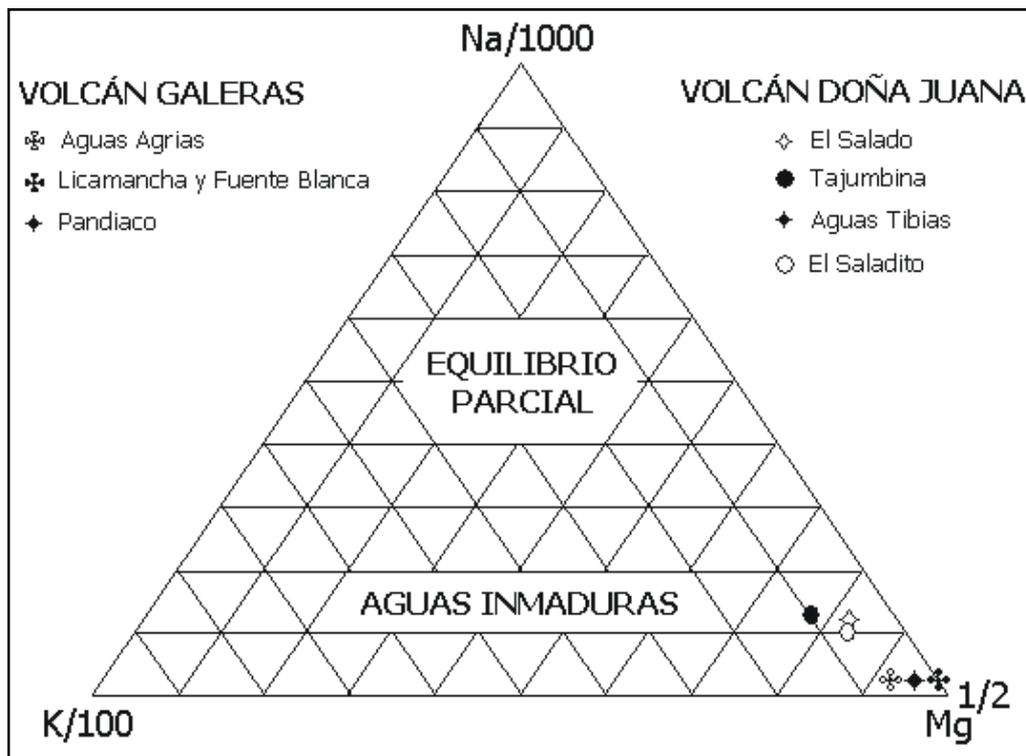
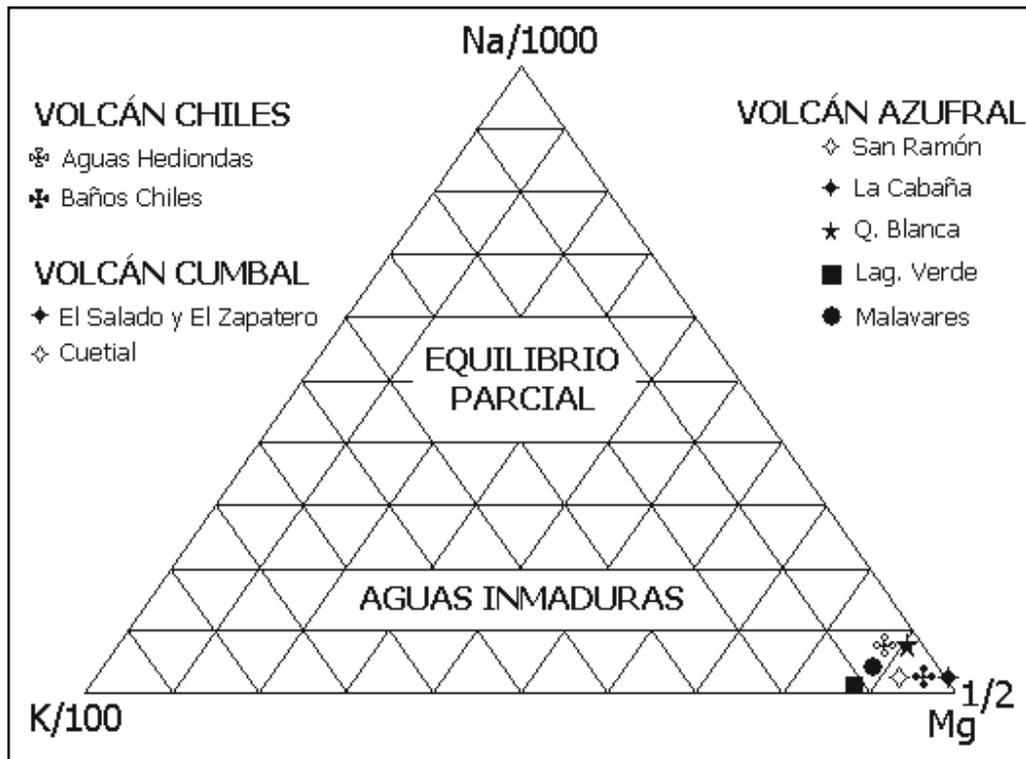
Con el propósito de evaluar el grado de interacción roca-agua de las fuentes termales de los volcanes de Nariño, se construyeron los diagramas terciarios del tipo Na - K - Mg que se muestran en las FIGURAS 2a y 2b.

En todas las fuentes termales estudiadas en los volcanes del departamento de Nariño, se observa la existencia de aguas que no han establecido un completo estado de equilibrio con la roca que soporta al acuífero, y se encuentran muy lejos de establecerlo.

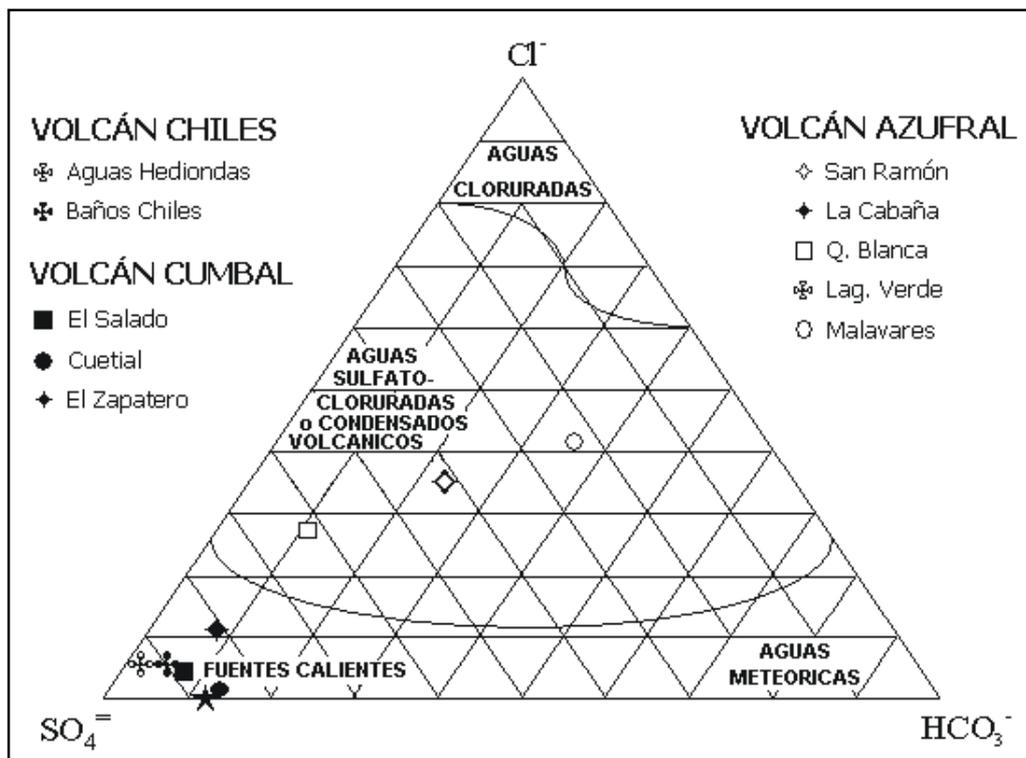
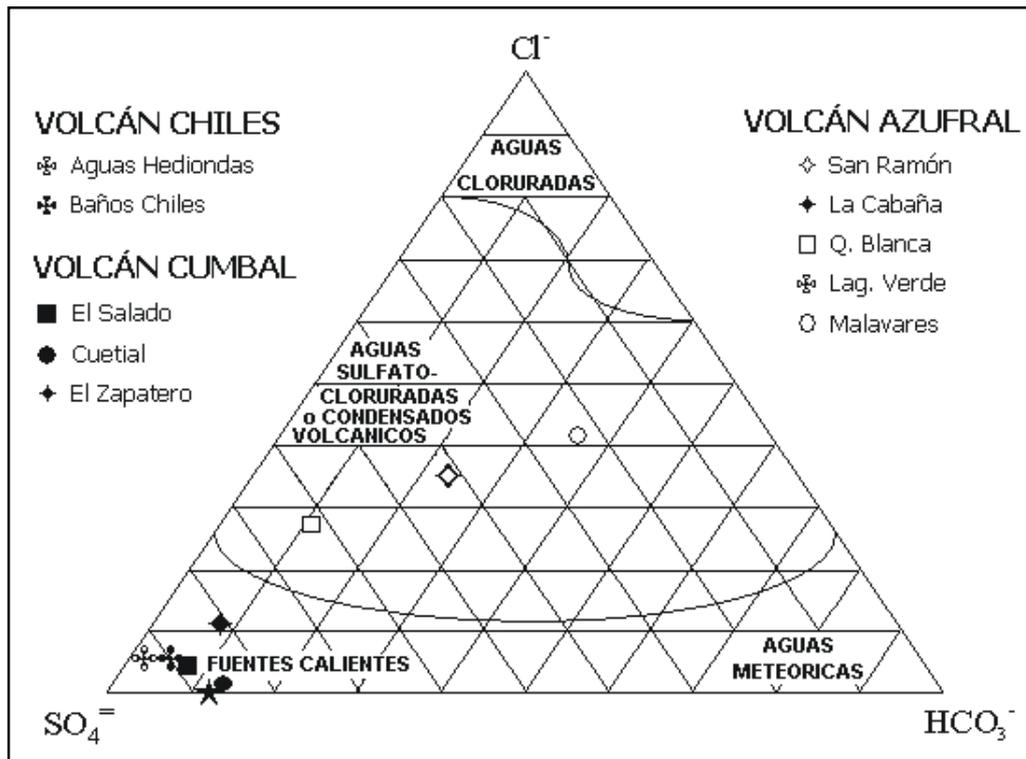
Las FIGURAS 3a y 3b se construyeron con el fin de clasificar las aguas de los volcanes de Nariño de acuerdo con su relativo contenido aniónico.

De todas las fuentes termales estudiadas, sólo se destacó el pozo de Pandiaco del volcán Galeras como la que presenta una gran influencia de aguas lluvias; las demás fuentes del volcán Galeras son aguas ácidas sulfatadas (Garzón *et al.*, 1996; Fischer, 1994). Todas las aguas de las fuentes termales de los volcanes Chiles y Cumbal son altamente sulfatadas. Los volcanes Azufral y Doña Juana tienen fuentes termales con aguas sulfatadas y sulfato-cloruradas.

En estudios realizados en aguas ácidas sulfatadas en el Nevado del Ruiz (Giggenbach *et al.*, 1990) se interpretaron las altas relaciones de S/Cl como la directa absorción de gases magmáticos en aguas subterráneas.



FIGURAS 2a y 2b. Diagrama Na-K-Mg en muestras de aguas termales nariñenses.



FIGURAS 3a y 3b. Diagrama Cl-SO₄-HCO₃ en muestras de aguas termales nariñenses.

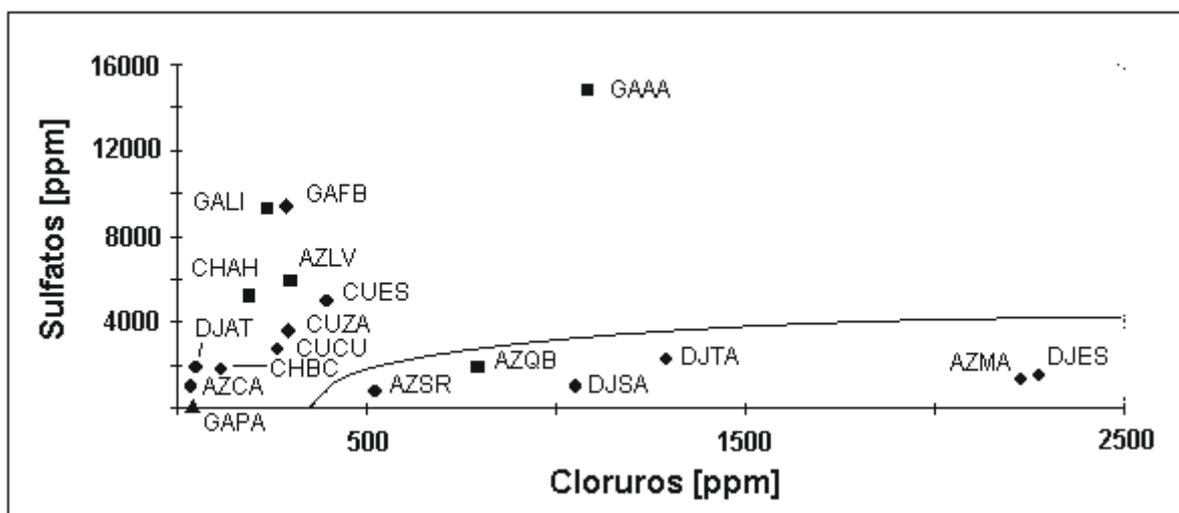


FIGURA 4. Diagrama de Sulfatos contra Cloruros para las fuentes termales nariñenses.

En la FIGURA 4 se muestra una relación SO_4/Cl para las fuentes termales de los volcanes activos de Nariño. Las aguas que contienen mayores cantidades de gases magmáticos son Aguas Agrias, Licamancha y Fuente Blanca del volcán Galeras, así como Laguna Verde del volcán Azufral; mientras que presentan mayores contenidos de cloruros, y por tanto pueden ser más profundas las fuentes termales de Malaveres, San Ramón y Quebrada Blanca del volcán Azufral, así como El Salado, El Saladito y Tajumbina del volcán Doña Juana.

Los volcanes Azufral y Doña Juana tienen fuentes termales con aguas sulfatadas y sulfato-cloruradas.

Las aguas que tienen mayor influencia de gases magmáticos son Aguas Agrias, Licamancha y Fuente Blanca del volcán Galeras, así como Laguna Verde del volcán Azufral; mientras que las fuentes termales de Malaveres, San Ramón y Quebrada Blanca del volcán Azufral, y El Salado, El Saladito y Tajumbina del volcán Doña Juana presentan mayores contenidos de cloruros, y por tanto son más profundas.

4. CONCLUSIONES

En las fuentes termales de Aguas Hediondas y Baños Chiles del volcán Chiles existen indicativos mineralógicos de alteración intermedia a alcalina. En los volcanes Cumbal y Azufral la alteración ácida se presenta justamente en los alrededores de los cráteres activos; mientras que la alteración intermedia-alcalina se presenta en la parte baja de estos edificios volcánicos.

Las aguas estudiadas en los depósitos termales no han establecido un estado de equilibrio con la roca que los soporta, indicando la naturaleza «inmadura» del sistema hidrotermal.

De todas las fuentes termales estudiadas, se destaca el pozo de Pandiaco del volcán Galeras como la fuente que presenta una gran influencia de aguas meteóricas; las demás fuentes del volcán Galeras son aguas ácidas sulfatadas. Todas las aguas de las fuentes termales de los volcanes Chiles y Cumbal son altamente sulfatadas.

REFERENCIAS

- Alfaro, C.M. (1999). Cartilla de muestreo y análisis de gases volcánicos por vía húmeda. INGEOMINAS. Santafé de Bogotá D.C., 71 p.
- APHA. (1991). Supplement to the 17th edition of Standard methods for the examination of water and waste water. American Public Health Association, American Water Works Association, Water Pollution Control Federation, Washington, USA. 150 p.
- ASTM. (1998). Annual Book of ASTM Standards. Sections 11.01, 11.02, Water. American Society for Testing Materials, Philadelphia, USA.
- Compilación de Estudios Geológicos Oficiales en Colombia. (1995). INGEOMINAS. Tomo XXI, Edinson Lozano-Editor. Santafé de Bogotá D.C., 455p.

Fischer, T.P. (1994). The Geochemistry of fumarole gases at Galeras volcano, Colombia. Master's Thesis, Arizona State University, Tempe, USA. 103 p.

García, F. (1992). Cartilla preliminar para muestreo de aguas termales en zonas de influencia volcánica. INGEOMINAS. Santafé de Bogotá D.C., 32 p.

Garzón, G., García, F., y Chica, A.C. (1996). Clasificación de las Aguas Termales del Volcán Galeras. INGEOMINAS. San Juan de Pasto, 61 p.

Giggenbach, W.F. (1988). Geothermal solute equilibria. Derivation of Na-K-Mg-Ca geothermometers. *Geochim. Cosmochim. Acta*, Vol. 52, pp. 2749-2765.

Giggenbach, W.F. and Goguel, R.L. (1989). Collection and analyses of geothermal and volcanic water and gas discharges. Dep. Sci. Ind. Report CD-2401, Pentone, New Zealand, Chem. Div. DSIR Rep., pp. 1-53.

Giggenbach, W.F., García, P.N., Londoño, C.A., Rodríguez, V.L., Rojas, G.N. and Calvache, M.L. (1990). The chemistry of fumarolic vapor and thermal-spring discharges from the Nevado del Ruiz volcanic-magmatic-hydrothermal system, Colombia. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, Vol. 42, pp. 13-39.

López, D.L. (1994). Hidrogeoquímica de sistemas hidrotermales. Curso impartido en el Instituto Costarricense de Electricidad, San José, Costa Rica, 296 p.

Menyáilov, I.A. (1975). Prediction of eruptions using changes in composition of volcanic gases. *Bull. Volcanol.*, Vol. 39, pp. 112-125.

Sturchio, N.S., Williams, S.N., García, P.N., and Londoño, C.A. (1988). The hydrothermal system of Nevado del Ruiz volcano, Colombia. *Bull. Volcanol.*, Vol. 50, pp. 399-412.

Trabajo recibido: noviembre 4 de 2003

Trabajo aceptado: marzo 9 de 2004