



GEOQUÍMICA DE FUENTES MINERALES Y TERMALES DEL COMPLEJO VOLCÁNICO CERRO BRAVO – CERRO MACHÍN, COLOMBIA

Claudia Alfaro Valero y Alcides Aguirre Corrales.
calfaro@ingeminas.gov.co

RESUMEN

El Complejo Volcánico Cerro Bravo-Cerro Machín, localizado entre los departamentos de Caldas, Risaralda, Quindío y Tolima, tiene un área aproximada de 2.000 km² y, de norte a sur, está conformado por el volcán Cerro Bravo, los volcanes del Parque Nacional Natural Los Nevados (PNNN) y el volcán Cerro Machín.

En el área de este complejo volcánico, se localiza un gran número de manantiales, muchos de ellos identificados y caracterizados químicamente en el marco la Investigación Geotérmica del Macizo Volcánico del Ruiz (CHEC et al., 1983). Tomando como base dicha investigación y la información generada por INGEOMINAS, a través de la vigilancia geoquímica de la actividad de los volcanes de la zona y de un inventario de manantiales termales del municipio de Santa Rosa de Cabal, se llevó a cabo la reinterpretación de la geoquímica de manantiales para estimar las temperaturas de los reservorios geotérmicos del área e identificar procesos de ebullición, dilución y mezcla de los fluidos geotérmicos. Adicionalmente, y con base en la composición química y la temperatura, se plantearon recomendaciones sobre usos potenciales de las fuentes minerales y termales.

De acuerdo con su distribución espacial y su posible asociación a los volcanes, los cien (100) manantiales registrados, fueron divididos en nueve (9) grupos: 1) volcán Cerro Bravo, 2) Nevado del Ruiz, sector oriental, 3) Batolito de El Bosque, 4) Nevado del Ruiz, sector occidental, 5) Santo Domingo, 6) Santa Rosa de Cabal, 7) El Bosque (Santa Isabel -Cerro España), 8) Nevado del Tolima y 9) volcán Cerro Machín.

De los 74 manantiales termales registrados (con temperaturas de descarga superiores a 4°C por encima de la temperatura ambiente promedio), 27 son de agua caliente (temperatura mayor a 50°C). Las temperaturas de descarga más elevadas, cercanas al punto de ebullición del agua, se encuentran en manantiales de los grupos 4, 6 y 9. Adicionalmente se registran 26 manantiales de agua mineral de baja temperatura.

La geoquímica de los manantiales señala la probabilidad de existencia de sistemas de temperatura intermedia (entre 125 y 225°C), en el Batolito de El Bosque (grupo 3), en el área de Santo Domingo (grupo 5) y en el Nevado del Tolima (grupo 8) y de temperatura alta (>250°C), en el área del volcán Cerro Bravo, en la zona occidental del Nevado del Ruiz (grupo 4), en Santa

Rosa de Cabal (grupo 6) y en el volcán Cerro Machín (grupo 9).

En Santa Rosa de Cabal, se identifica un área de máximo interés como recurso energético y desde el punto de vista geoquímico, dado que los geotermómetros indican la mayor temperatura en el reservorio de toda el área de estudio y la composición de los manantiales permite identificar con mucha claridad procesos de ebullición y posterior dilución (manantiales de San Vicente) y dilución directa a partir del agua del reservorio (manantiales de Santa Rosa). De acuerdo con la Investigación Geotérmica del Macizo Volcánico del Ruiz, es difícil asociar los manantiales de Santa Rosa de Cabal con una fuente de calor cercana, dado que el volcán más cercano, Paramillo de Santa Rosa, es relativamente antiguo comparado con los otros volcanes de la zona. No obstante, la temperatura del reservorio inferida a partir de los manantiales de Santa Rosa, mayor a la inferida para la zona occidental del Nevado del Ruiz (Botero Londoño), permite plantear la posibilidad de que la fuente de calor de Santa Rosa sea independiente y quizás asociada al Paramillo de Santa Rosa (Alfaro & Jaramillo, 2002), aun cuando la cámara magmática en enfriamiento no haya promovido una actividad eruptiva reciente.

El potencial de aplicación del recurso geotérmico identificado en la zona de estudio es muy amplio y suficiente aún para los usos de máximo requerimiento energético (generación eléctrica). Sin embargo teniendo en cuenta la facilidad de implementación de los diferentes desarrollos geotérmicos posibles, los usos mineromedicinales son quizás los más viables. Estos elevarían la calidad de vida de las comunidades locales e impulsaría actividades paralelas como el turismo, con el consecuente impacto positivo en la economía local.

Palabras clave: geotermia, geoquímica, aguas termales, Nevado del Ruiz, Cerro Bravo, Cerro Machín, Colombia.

ABSTRACT

The Cerro Bravo - Cerro Machín Volcanic Complex, located amongst Caldas, Risaralda, Quindío and Tolima departments, has an average extension of 2000 km². From North to South, it consists of Cerro Bravo Volcano, the volcanoes from Los Nevados National Natural Park and Cerro Machín Volcano.

A great number of springs are located in this area. They were identified and chemically characterized in the frame of the frame of the geothermal research of the Ruiz Volcanic Complex (CHEC et al., 1983). From this research and compiling additional information generated by INGEOMINAS, through the geochemical surveillance of the volcanic activity and from an inventory of springs in Santa Rosa de Cabal municipality, a reinterpretation of the geochemistry of springs was carried out in order to estimate the temperatures of the geothermal reservoirs from the area and to identify boiling, mixing and dilution processes of the geothermal fluids. Additionally, based on the chemical composition and the temperature, recommendations for potential uses of the mineral and thermal springs were proposed.

One hundred (100) registered springs were grouped, according to their spatial distribution and possible association to the volcanoes of the area, in nine (9) groups: 1) Cerro Bravo volcano, 2) Nevado del Ruiz, Eastern sector, 3) El Bosque Batholit, 4) Nevado del Ruiz, Western sector, 5) Santo Domingo, 6) Santa Rosa de Cabal, 7) El Bosque (Santa Isabel - Cerro España), 8) Nevado del Tolima and 9) Cerro Machín volcano.

From the 74 registered hot springs (with discharge temperature higher than 4°C over the environment average temperature), 27 are hot springs (temperature over 50°C). The higher discharge temperatures, close to the boiling point, are located in the groups 4, 6 and 9. Additionally 26 low temperature mineral springs, are registered.

The geochemistry of the springs points out the probability of existence of intermediate temperature geothermal systems (between 125 and 225°C), at El Bosque Batholith (group 3), Santo Domingo (group 5) and Nevado del Tolima (group 8) and, of high temperature systems (>225°C) at Volcán Cerro Bravo (group 1), Nevado del Ruiz, Western sector (group 4), Santa Rosa de Cabal (group 6) and Cerro Machín volcano (group 9).

From the geochemical approach, the highest interest area, as energy resource, is identified in Santa Rosa de Cabal. The aqueous geothermometers indicate the highest reservoir temperature and the springs composition allows to identify clearly boiling followed by dilution (San Vicente springs) and direct dilution from the reservoir water (Santa Rosa springs). According to the cited geothermal research, it is difficult to relate the springs from Santa Rosa de Cabal with a close heat source, given that the closest volcano (Paramillo de Santa Rosa) is relatively ancient compared with the other volcanoes from the zone. However, the reservoir temperature inferred from the springs from Santa Rosa, which is higher than the one inferred at the Western sector at Nevado del Ruiz (Botero Londoño), allows to propose the possibility of an independent heat source probably related to Paramillo de Santa Rosa (Alfaro & Jaramillo, 2002), even though the cooling magmatic chamber body has not promoted a recent eruptive activity.

The potential application of the geothermal resources identified in the study zone is very wide and enough to the utilization of highest energetic demand (electricity generation). However taking into account the implementation easiness of the different possible geothermal developments, the utilization in thermalism is probably the most feasible. This utilization would improve the living quality of the local communities and would promote parallel activities such as tourism, with the subsequent positive impact on the local economy.

Keywords: geothermics, geochemistry, hot springs, Nevado del Ruiz, Cerro Bravo, Cerro Machín, Colombia.

1. INTRODUCCIÓN

Este artículo resume los resultados del producto del INGEOMINAS "Inventario de fuentes termales en el Parque Nacional Natural de los Nevados" (Alfaro et al., 2002), desarrollado en el marco del proyecto Exploración y evaluación de los recursos geotérmicos, el cual se basó en la compilación y la interpretación de información geológica y geoquímica de la zona.

1.1 Marco geológico

1.1.1 Estratigrafía

En términos globales, la estratigrafía de la zona de estudio está conformada por un basamento polimetamórfico de edad paleozoica, el cual infrayace depósitos de flujos de lava masivos de los edificios iniciales del sistema volcánico en la Cordillera Central de edad pliocena. Los depósitos más recientes son flujos piroclásticos, flujos de lava y flujos de lodo, producto de la actividad volcánica del Cuaternario.

La estratigrafía de la zona fue resumida por Geocónsul (1992) en nueve unidades estratigráficas: (1) Grupo Cajamarca, (2) Rocas intrusivas de edad cercana a 200-207 millones de años (Triásico tardío), (3) Formación Quebrada Grande, (4) Cuerpos intrusivos de edad y composición semejante al Stock de Manizales y el Batolito de El Bosque, (5) Rocas volcánicas andesíticas, (6) Rocas producto de los derrames lávicos cuaternarios de los aparatos volcánicos del Macizo del Ruiz, desde Cerro Bravo hasta el Cerro Machín, (7) Productos piroclásticos no erosionados, producidos en el Cuaternario por los aparatos volcánicos (8) Productos de erosión y (9) Casquete glaciar.

El Grupo Cajamarca representa las rocas metamórficas del basamento depositadas durante el Precámbrico tardío al Paleozoico temprano y metamorfozadas durante la orogenia del Paleozoico medio (Jaramillo, 1980, en Calvache & Monsalve, 1982).

Las rocas intrusivas de edad cercana a 200-207 millones de años (Triásico tardío), afloran al norte del macizo y agrupa varias unidades ígneas conocidas como, Intrusivo Néisico de Padua, Intrusivo Néisico del Noroeste de Manizales, la Anfibolita de Padua, y Batolito de Sonsón.

La Formación Quebradagrande es una unidad de origen sedimentario. A nivel regional, esta formación aflora sólo entre las trazas de las fallas de Romeral y Aranzazu - Manizales, en una franja de dirección casi N-S. Esta formación está compuesta por un miembro sedimentario y otro volcánico. El sedimentario está constituido por rocas pelíticas de ambiente marino de aguas profundas y areniscas, megabrechas y conglomerados depositados en un ambiente marino de aguas más someras y turbulentas. El miembro volcánico está constituido por derrames de lavas basálticas, intercalaciones de tobas y algunos diques basálticos.

Los cuerpos intrusivos similares en edad y composición al Stock de Manizales y al Batolito de El Bosque. El primer cuerpo aflora en el sector septentrional del macizo, al oriente y suroeste del volcán Cerro Bravo. Este cuerpo fue datado por el método K/Ar y se obtuvo una edad de 57,5 +/- 1,7 millones de años. El Batolito El Bosque es un cuerpo que aflora en el sector oriental del Macizo del Ruiz, es de composición granodiorítica con variaciones a cuarzdiorita, con una edad radiométrica calculada en 49,1 +/- 1,7 Ma. (Eoceno temprano). Debido a la similitud en composición, es probable que ambos intrusivos pertenezcan a un solo cuerpo.

Las rocas volcánicas andesíticas afloran en los sectores céntricos del macizo volcánico del Ruiz y están constituidas por rocas de tipo ignimbrítico, esencialmente andesíticas con pequeñas variaciones a andesitas basálticas. Son producto de vulcanismo andino, previo a la actividad actual, y constituyen el basamento volcánico sobre el cual se edificó parcialmente el Macizo del Ruiz. Estas rocas suprayacen rocas de la Formación Quebradagrande y las rocas intrusivas.

Las rocas producto de los derrames lávicos cuaternarios de los aparatos volcánicos del Macizo del Ruiz, desde Cerro Bravo hasta el Cerro Machín son rocas predominantemente andesíticas, con variaciones desde riocacitas y dacitas (volcanes Cerro Bravo, Nevado del Ruiz, domos, páramo de Santa Rosa y Machín) hasta andesitas basálticas de los nevados del Quindío y Tolima; producto de la actividad durante el Pleistoceno y el Holoceno. Las rocas presentan formas tanto de coladas como dómicas. Estas rocas descansan sobre las rocas volcánicas andesíticas de la unidad anterior.

Los productos piroclásticos no erosionados, producidos en el Cuaternario por los aparatos volcánicos, los cuales afloran en los alrededores de Cerro Bravo y en la periferia

del volcán Cerro Machín y del Nevado del Tolima. En el sector de Cerro Bravo corresponde a depósitos plinianos de caída, flujo y surge, compuesto por arenas, cenizas, pumitas, bloques y bombas de composición dacítica. En el caso del Nevado del Tolima, esta unidad está constituida por depósitos plinianos de pumitas de caída, intercalados con tobos de surge y rellenan los cauces del río Combeima, Toche Coello y Bermellón (piroclastos del volcán Cerro Machín). Todos estos depósitos son de edad holocénica y producto de las escasas fases explosivas del macizo.

Los productos de erosión del área incluyen morrenas frontales y laterales, depósitos piroclásticos retrabajados, algunos depósitos lacustres (Machín y laguna del Otún), depósitos de lahares y de flujos de lodo y depósitos aluviales indiferenciados. El casquete glaciar cubre permanentemente a los nevados del Ruiz, Santa Isabel y Tolima, desde los 4.600 m hacia arriba.

Según Monsalve et al. (1998), la geología del Pozo Nereidas 1, único pozo geotérmico perforado en Colombia hasta 1.469 m de profundidad sobre el flanco occidental del Nevado del Ruiz, a 3.450 msnm, permitió definir la secuencia volcánica que incluye rocas piroclásticas, piroxenos andesíticos, anfíboles andesíticos y dacitas, que suprayacen rocas metamórficas del Complejo Cajamarca afectadas por un evento termal "Terciario". Los minerales secundarios, encontrados a lo largo de la columna, permitieron establecer 4 zonas de alteración hidrotermal producidas por la interacción fluido (débilmente ácido a alcalino) – roca: zona argílica entre la superficie y 396 m, argílica-sericítica entre 396 y 640 m, sericítica entre 640 y 1067 m y propílica o termometamórfica entre 1.067 y el fondo del pozo. En la última zona se identificaron minerales muy importantes desde el punto de vista geotérmico, como epidota, la cual

sugiere una temperatura superior a 250°C, adularia, calcita y sílica.

1.1.2 Tectónica

Estructuralmente, el Macizo del Ruiz está enmarcado por los sistemas de fallas Romeral, Palestina y Mulato, con dirección NNE-SSW (Geocónsul, 1992). La Falla Romeral, que divide la corteza oceánica hacia el occidente y la corteza continental hacia el oriente, representa una antigua zona de subducción (Barrero et al., 1969, en Calvache & Monsalve, 1982). Los esfuerzos de compresión en esta zona dan como resultado el levantamiento de la Cordillera Central y la formación de nuevos sistemas de fallas como Mulato, Palestina, Marulanda Salamina y Salento.

Según *CHEC* et al. (1983) la Falla Palestina ha servido de camino para la emisión de las lavas de gran parte del Complejo Volcánico Cerro Bravo – Cerro Machín, al menos las más antiguas.

Localmente, se encuentran varias fallas asociadas a los sistemas Romeral y Palestina, como son las fallas normales de Río Claro, Quebrada Negra y Río Molinos, las cuales tienen una dirección aproximada N20-40° W, y fallas subparalelas a la Palestina; como la del Termal con dirección aproximada N 0-10° E (Calvache & Monsalve, 1982). Estas fallas representan esfuerzos de distensión evidenciados por la presencia de diques dacíticos relacionados con ellas. Las manifestaciones actuales de estas fallas están representadas por la ocurrencia de sismos volcano tectónicos, lo que a su vez ha permitido la formación de campos fumarólicos (Nereidas y La Olleta) y la ocurrencia de fuentes termales.

Generalizando, transversalmente a los principales sistemas de fallas NNE-SSW (Romeral, Mulato y Palestina) se presenta un

patrón de estructuras con dirección NW-SE hasta E-W, al cual corresponden fallas como Neira y Salento, que delimitan el macizo volcánico, y otras fallas como Marulanda - Salamina, Villamaría Termal del Ruiz, Río Claro, Campoalegrito, San Eugenio, Pereira, San Ramón y La Cristalina, las cuales son posteriores en el tiempo a las de patrón NNE-SSW (Geocónsul, 1992). Inicialmente, la mayoría de los aparatos volcánicos estaban alineados por la Falla Palestina y, con el tiempo, las fallas con dirección NW-SE hasta E-W, las cuales tienen movimiento en el rumbo, han desplazado al eje volcánico original y ésta es la razón por la cual se ha perdido la alineación de los volcanes (CHEC et al., 1983).

Adicionalmente, se presentan otros dos patrones estructurales con menor expresión que los anteriores. Uno de ellos agrupa fallas y fracturas como las fallas Termales y Laguna Baja, las cuales son de carácter normal y tienen una dirección NE-SW. Estas fallas conforman una tectónica de bloques al interceptarse con las fallas de patrón NW-SE (Geocónsul, 1992).

Por último, hay un patrón N-S con poca expresión. Se destaca la Falla Río Toche - Río Coello, al occidente del volcán Cerro Machín, y una fractura al sur del Nevado del Tolima (cauce del río Combeima) (Geocónsul, 1992).

1.2 Marco geoquímico

Las primeras caracterizaciones químicas de los manantiales de la zona de estudio, referenciadas por la literatura, son las realizadas por la Contraloría General de la República (1937) (en Forero, 1958), las incluidas en los trabajos de Wallace Fetzer en el Hotel Termales y Villamaría (Fetzer, 1941a en Forero 1958) y en Santa Rosa de Cabal (Fetzer, 1941b) y la de la Alcaldía de Ibagué en

los termales de El Rancho (en Forero, 1958). Los estudios de exploración geotérmica se iniciaron con la etapa de reconocimiento, a finales de los 60's en el área del Complejo volcánico Cerro Bravo - Cerro Machín (CHEC y ENEL, 1968). En este trabajo se realizaron análisis químicos e isotópicos de algunos pocos manantiales, en las áreas de El Espíritu Santo, Departamento de Antioquia y norte de Caldas, Santa Rosa de Cabal en Risaralda, y Botero Londoño y Termales del Ruiz, en Caldas. A partir de este trabajo plantea un origen meteórico para las aguas termales y dos sistemas de circulación (somero y profundo). En Botero Londoño se postuló una circulación más profunda responsable de la temperatura y el cambio isotópico en oxígeno-18. Con base en esta investigación, Arango et al. (1970) presentaron la primera publicación sobre el llamado proyecto geotérmico del Ruiz.

El estudio de prefactibilidad (CHEC et al., 1983), que es la investigación más extensa de manantiales termales en el área de interés, incluye 165 sitios de muestreo: manantiales termales, manantiales fríos, aguas superficiales (ríos, lagos y quebradas). La caracterización química incluyó los análisis de: Ca, Mg, Na, K, HCO_3 , SO_4 , Cl, SiO_2 , Fe total, B, NH_4 , Li y las determinaciones de pH y temperatura. Adicionalmente realizaron el análisis de gases no condensables: CO_2 , H_2 , CH_4 , H_2S , O_2+Ar y N_2 , en alrededor de 26 manantiales y oxígeno-18 y tritio en 46 muestras de agua.

Esta investigación (CHEC et al., 1983) estableció que en la zona norte del Complejo Volcánico (Cerro Bravo - Cerro España), el área limitada por Termales de San Vicente, la Laguna del Otún, el Cerro España, el Nevado del Ruiz (Botero Londoño), es la de mayor interés geotérmico, con manifestaciones de gases (Laguna del Otún y Las Nereidas) y manantiales con temperatura de emergencia de 93°C y temperaturas

geoquímicas mayores que 200°C. Las Nereidas y la Laguna del Otún fueron definidas como las áreas de máxima probabilidad de éxito para la exploración geotérmica, entre otras cosas, teniendo en cuenta la elevada relación H_2/CH_4 de sus gases calientes y que de acuerdo con la geofísica, allí se encuentran los espesores mayores en la cobertura volcánica, que aumentan la probabilidad de hallazgo de reservorios profundos en la serie lávica. En el área de San Vicente – Botero Londoño, se estableció homogeneidad en su composición química típica de aguas de origen profundo y alta temperatura, a partir de lo cual postularon un único acuífero que por su gran extensión areal sería muy importante como objetivo geotérmico. Sin embargo, la misma investigación plantea la emergencia de los manantiales a lo largo de fallas que cortan el basamento epimetamórfico de baja permeabilidad, lo cual hace poco probable la existencia de un reservorio de suficiente extensión lateral horizontal.

En la zona sur (Tolima - Machín), dicha investigación (CHEC et al., 1983) selecciona al Cerro Machín como de notable interés geotérmico, entre otras condiciones, por su elevada relación H_2/CH_4 típica de gases calientes, de las temperaturas de emergencia de los manantiales (hasta 94°C) y las temperaturas geoquímicas estimadas para el reservorio (alrededor de 180°C).

En 1992, la firma Geocónsul realizó una revisión de la información compilada en el proyecto de prefactibilidad (CHEC et al., 1983), con el fin de realizar la primera perforación exploratoria. Este trabajo recomienda como zonas de interés para dirigir las etapas siguientes en la exploración: Las Nereidas – Botero Londoño, Volcán Cerro Machín y por último la Laguna del Otún y continuar con algunos trabajos complementarios en Cerro Bravo, la zona de la falla Villamaría - Termales y Santa Rosa – San Vicente.

A partir de los datos del estudio de prefactibilidad, se han hecho investigaciones adicionales (Sturchio et al., 1988, Giggenbach et. al., 1990, Larios, D., 1992) sobre los sistemas hidrotermal y volcánico - magmático, motivados por la reactivación del volcán Nevado del Ruiz.

También a partir de dicha reactivación, el INGEOMINAS inició el programa de vigilancia de la actividad de volcanes del Complejo Volcánico Cerro Bravo – Cerro Machín, el cual ha incluido la caracterización química de gases y aguas termales. Este programa aportó información sobre la composición de nuevos manantiales, presumiblemente asociados a los volcanes Nevado del Ruiz, Tolima y Machín (GilCruz et al., 1998; INGEOMINAS 1994; INGEOMINAS 1995; INGEOMINAS 1996; INGEOMINAS, 1997), los cuales fueron incluidos en el presente trabajo.

1.3. Objetivos

- Contribuir con el conocimiento de las condiciones fisicoquímicas de reservorios y la identificación procesos que registran los fluidos hidrotermales en su trayectoria a la superficie, en sistemas geotérmicos localizados en el Complejo Volcánico Cerro Bravo – Cerro Machín, a partir de la reinterpretación de la información geoquímica disponible.
- Promover la utilización del recurso geotérmico en favor del desarrollo social y económico de la región, a partir del análisis de usos potenciales basado en la composición química y la temperatura de los manantiales.

2. METODOLOGÍA

El procedimiento seguido para elaborar el presente inventario fue el siguiente:

- **Compilación de información.** Investigación de prefactibilidad geotérmica del Complejo volcánico del Ruiz (*CHEC et al., 1983*) y Programa de vigilancia de la actividad volcánica de volcanes del PNNN, de la Unidad Operativa de Manizales (*INGEOMINAS, 1994, 1995, 1996, 1997*).
- **Conformación de grupos de manantiales.** Los manantiales fueron repartidos en nueve (9) grupos, en función de su distribución espacial.
- **Clasificación de los manantiales en función de su temperatura** (manantiales con temperatura inferior a 40°C, entre 40 y 60°C y mayor que 60°C) y de la composición relativa de aniones dominantes, Cl, SO₄, HCO₃, expresada en mg/l (*Giggenbach, 1991*) y cationes mayores, Na+K, Ca, Mg, expresada en meq/l.
- **Cálculo de la composición relativa Na-K-Mg,** para (1) establecer la madurez (equilibrio fisicoquímico entre el fluido geotérmico y las rocas que lo hospedan), (2) visualizar procesos de dilución y (3) estimar la temperatura del reservorio (*Giggenbach, 1988*).
- **Cálculo de la composición relativa de las especies conservativas -no formadoras de roca-, Cl-B-Li,** para postular el origen de la fuente que alimenta los manantiales termales (*Giggenbach, 1991*).
- **Cálculo de la composición relativa Cl-B-HCO₃,** para visualizar la incursión de aguas bicarbonatadas características de aguas someras o zonas periféricas del sistema geotérmico (*Koga, 2000*).
- **Estimación de parámetros térmicos.** Con base en la clasificación por aniones dominantes y la aplicación de los criterios de clasificación de manantiales someros y profundos, propuestos para el Mapa Geotérmico de Colombia (*Alfaro, 2000*), se calcularon los geotermómetros alcalinos (Na/K, K/Mg), a aguas consideradas profundas (pH superior a 5,5, concentración de cloruros relativa a aniones dominantes superior a 20% y concentración de litio mayor que 1mg/l o de boro mayor que 5 mg/l), el geotermómetro de cuarzo con máxima pérdida de vapor, a manantiales con temperatura cercana al punto de ebullición del agua, en superficie, y el geotermómetro de cuarzo sin pérdida de vapor y calcedonia, se aplicaron a todos los manantiales, excepto a los fríos (con temperatura en superficie inferior a la temperatura promedio ambiental, asumida en 15°C, más 4°C).
- **Modelo de mezcla.** Se aplicaron los modelos de mezcla Entalpía - Sílice y Entalpía -Cloruros, para visualizar y verificar posibles procesos que el fluido geotérmico puede sufrir en su ascenso a la superficie, como mezcla o dilución, ebullición y enfriamiento conductivo y para estimar temperatura del reservorio (y en el caso del primer modelo, su concentración de sílice) (*Nicholson, 1993, y Arnorsson, 2000*).
- **Recomendación de usos potenciales directos** (aprovechamiento de la energía térmica) e indirectos (aprovechamiento en generación eléctrica), a partir del Diagrama Lindal (*Gudmundsson et al, 1985, en Lund, 1999*), a partir de la temperatura estimada en el reservorio geotérmico.

- Recomendación de posibles aplicaciones de las aguas termales en termalismo, según utilizaron criterios de clasificación de acuerdo con los parámetros disponibles, específicos para fines terapéuticos: temperatura en superficie, anión dominante, concentración de cationes específicos y mineralización global y como agua de mesa, definidos por Armijo & San Martín (1994).

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Geoquímica de los manantiales del Complejo volcánico Cerro Bravo – Cerro Machín.

La Tabla 1 presenta la composición química de los manantiales agrupados como se muestra en la Figura 1.

El Grupo 1, ubicado al norte de área de estudio, está conformado por 12 manantiales, de aguas neutras bicarbonatadas, probablemente asociados al volcán Cerro Bravo. La temperatura máxima se registra en los termales de San Luis, en los que adicionalmente se encuentra la mayor salinidad reflejada en una conductividad eléctrica de 2200 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Aunque se trata de aguas bicarbonatadas como muestra la Figura 1, la contribución de fluido geotérmico en estos manantiales se refleja en concentraciones relativamente altas de cloruros (213 mg/l), litio (1,1 mg/l) y boro (3,6 mg/l).

Como se espera, a partir del carácter bicarbonatado de estos manantiales, la entrada de aguas subterráneas frías se hace evidente en el mayor contenido relativo de magnesio. La composición de estos manantiales, presentada en la (Figura 2), describe una tendencia lineal que señala una temperatura Na/K alrededor de 190°C, en el reservorio.

La composición relativa de especies conservativas para los manantiales del Grupo 1 (Figura 3), señala: (1) la contribución de agua de un reservorio de composición típica de sistemas geotérmicos asociados a sistemas volcánico-magmáticos, caracterizada según Giggenbach & Goguel (1989), por el enriquecimiento en cloro y boro por absorción de vapores magmáticos de alta temperatura ricos en estas especies, antes o durante la disolución de las rocas por parte de las aguas de circulación profunda, (2) la naturaleza riolítica del sistema volcánico - magmático, a partir del apilamiento de los puntos sobre la línea de disolución de este tipo de rocas, y (3) una fuente común, dada la semejanza en la relación Cl/B. Se salen de este comportamiento, los manantiales de menor temperatura (6, 7 y 10).

Dado el carácter bicarbonatado de estos manantiales, su alta dilución con aguas someras frías y su baja temperatura en superficie, la temperatura estimada solamente a partir de los geotermómetros de sílice (Tabla 2) señalan hasta 156°C como temperatura mínima probable en el reservorio. No obstante, aplicando el modelo Entalpía-Sílice (Figura 4), a partir de los manantiales con mayor concentración de SiO_2 (San Luis) y la dilución a partir de agua separada por ebullición del fluido geotérmico, la temperatura probable del reservorio, según la entalpía inferida de 850 kJ/kg, sería de unos 200°C y la concentración en sílice del reservorio, de alrededor de 280 mg/l. No se descarta, sin embargo, la posibilidad de que haya enfriamiento conductivo.

El Grupo 2, localizado al norte y oriente del Nevado del Ruiz, está conformado por 15 manantiales cuya composición es principalmente sulfatada, como se observa en la Figura 1. La principal característica de este grupo es la acidez de sus manantiales que alcanza valores de pH tan bajos como 1,3, en el manantial de Aguas Calientes (punto 4). Los balances iónicos calculados para los manantiales de

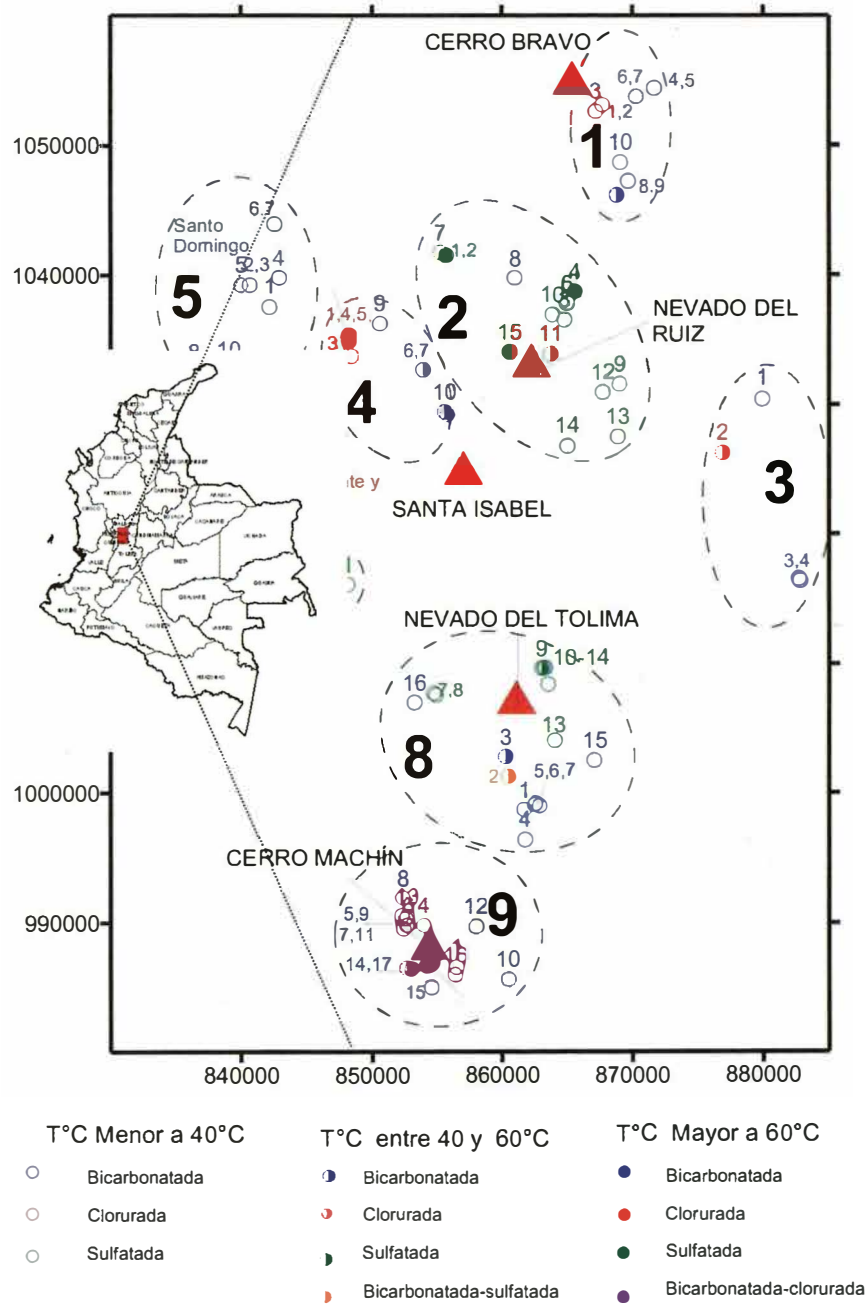


Figura 1. Localización y clasificación de manantiales del Complejo Volcánico Cerro Bravo- Cerro Machín. Se indican los 9 grupos conformados, de acuerdo con su distribución espacial.

Tabla 1. Composición química de manantiales del Complejo Cerro Bravo – Machín.

Punto	Manantial/ Localidad	Latitud	Longitud	Fecha Recolección	T (°C)	pH	Conductividad (mS/cm) a 25°C	Na mg/l	K mg/l	Ca mg/l	Mg mg/l	Li mg/l	B mg/l	Fe mg/l	NH4 mg/l	Cl mg/l	SO ₄ mg/l	HCO ₃ mg/l	SiO ₂ mg/l	Balance Iónico	Fuente información
GRUPO 1																					
1	Aguacatal I	1053100	867700	May-82	37	6,16	1.500	170	19	88	22	1,04	2,27	2,0	0,25	142	36	573	84	0,7	CHEC, 1983
2	Aguacatal II	1053100	867700	May-82	37	6,10	1.500	166	19	90	22	1,04	2,05	2,0	0,25	142	36	573	90	0,3	CHEC, 1983
3	El Aserradero	1052600	867200	May-82	20	7,77	1.300	223	21	72	20	0,83	1,95	N.A	0,09	103	29	671	102	3,8	CHEC, 1983
4	El Jordán I	1054400	871700	May-82	25	6,09	2.000	170	14	92	132	0,59	1,73	15,1	0,25	131	389	732	102	0,7	CHEC, 1983
5	El Jordán II	1054400	871700	May-82	19	5,82	820	51	7	34	47	0,18	0,52	3,5	0,10	35	125	287	90	-1,0	CHEC, 1983
6	El Retiro	1053750	870300	Jun-82	14	5,35	250	9	2	16	7	0,02	0,00	N.A	0,02	1	4	110	84	-2,0	CHEC, 1983
7	Río Aguacatal	1053750	870300	Jun-82	14	7,27	130	4	2	4	1,4	0,00	0,03	N.A	0,03	2	3	27	31	-1,0	CHEC, 1983
8	La Calera I	1047300	869700	Jun-82	26	6,62	1.300	184	16	74	18	0,55	1,73	0,5	0,45	85	96	567	102	0,04	CHEC, 1983
9	La Calera II	1047300	869700	Jun-82	28	6,67	1.100	152	14	64	16	0,49	1,62	0,5	0,07	71	86	500	102	-1,9	CHEC, 1983
10	Ventiladeros (La Calera)	1048750	869100	Jun-82	11	7,61	47	3	2	3	0,6	0,00	0,00	N.A	0,06	0	3	20	27	-3,4	CHEC, 1983
11	Termal S. Luis I	1046200	868800	Jun-82	42	6,09	2.200	368	25	96	20	1,18	3,57	1,5	0,14	209	163	793	138	2,4	CHEC, 1983
12	Termal S. Luis II	1046200	868800	Jun-82	45	6,23	2.200	391	25	114	20	1,11	3,57	1,3	0,14	213	168	854	138	3,6	CHEC, 1983
GRUPO 2																					
1	Hotel Termales El Ruiz 1	1041500	855700	May-82	63	1,65	22.000	506	144	300	240	0,69	6,38	201	3,06	1064	8640	0	252	-49,2	CHEC, 1983
2	Hotel Termales El Ruiz 2	1041500	855700	May-82	61	1,58	21.000	483	140	280	240	0,69	6,38	201	3,06	1064	8160	0	228	-48,5	CHEC, 1983
3	La Hedionda	1036500	864800	May-82	14	2,84	2.900	99	16	138	91	0,11	1,30	50	0,49	191	1200	0	102	-16,3	CHEC, 1983
4	Aguas Calientes	1038700	865600	May-82	60	1,32	29.000	299	234	240	168	0,31	7,89	201	0,45	1347	9600	0	168	-62,1	CHEC, 1983
5	Fuente Fria Aguas Calientes I	1037800	865000	May-82	11	4,42	370	10	3	24	16	0,00	0,00	0	0,03	0	149	0	78	-2,0	CHEC, 1983
6	Fuente Fria Aguas Calientes II	1037800	865000	May-82	13	5,67	480	12	3	32	29	0,00	0,00	N.A	0,02	1	178	85	72	-5,8	CHEC, 1983
7	Termales El Ruiz	1041750	855250	Jun-82	36	1,90	13.000	299	78	166	132	0,39	3,68	0	1,58	567	4560	0	162	-52,8	CHEC, 1983
8	Hacienda Nieto	1039750	861050	Jun-82	13	5,62	140	6	3	7	3	0,00	0,00	N.A	0,03	1	8	43	59	1,2	CHEC, 1983
9	Agua Blanca	1031600	869050	Jun-82	35	2,82	3.600	131	21	400	110	0,15	1,73	2	0,20	241	1834	0	138	-11,6	CHEC, 1983
10	Arenales	1036900	863875	Jun-82	9	5,77	140	8	3	16	6	0,00	0,00	1	0,01	1	72	17	66	-0,2	CHEC, 1983
11	El Calvario *	1033866	863734	Mar-97	57	2,77		197	40	221	100	0,1				10	1577		324	-6,9	Ingeominas, 1997
12	El Coquito *	1031001	867742	Sep-96	33	2,99		72	14	488	66	<0,01				121	1676		103	-7,0	Ingeominas, 1996
13	El Oso *	1027570	868870	May-94	22	6,11		122	21	192	100	0,06				22	720	584	111	-3,1	Ingeominas, 1994
14	Corralitos *	1026858	865035	Oct-94	29	3,90		118	17	518	120	0,07				187	1782		62	-1,3	Ingeominas, 1994
15	Guali *	1034019	860610	May-95	62	2,73	3.300	39	18	316	52	<0,01		1		58,6	962		201	-1,4	Ingeominas, 1995
GRUPO 3																					
1	Murilloa	1030500	879950	Jun-82	14	5,42	120	12,7	9	6	2	0,00	0,05	N.A.	0,03	14	6	29	38	12,1	CHEC, 1983
2	Granates	1026325	876925	Jun-82	55	6,81	3.800	483,0	13	86	0,9	2,50	3,35	N.A.	0,25	744	67	153	72	2,3	CHEC, 1983
3	La Yuca	1016560	882720	Jul-82	37	9,24	190	48,3	0,8	0,6	0,1	0,15	0,00	0	0,03	8	0	98	51	8,8	CHEC, 1983
4	La Yuca	1016400	882820	Jul-82	40	9,32	210	55,2	0,6	0,5	0,04	0,16	0,00	0	0,03	12	0	98	51	12,0	CHEC, 1983

GEOQUÍMICA DE FUENTES MINERALES Y TERMALES DEL
COMPLEJO VOLCÁNICO CERRO BRAVO-CERRO MACHÍN, COLOMBIA

Continuación Tabla 1. Composición química de manantiales del Complejo Cerro Bravo – Machín.

Punto	Manantial/ Localidad	Latitud	Longitud	Fecha Recolección	T (°C)	pH	Conductividad (mS/cm) a 25°C	Na mg/l	K mg/l	Ca mg/l	Mg mg/l	Li mg/l	B mg/l	Fe mg/l	NH ₄ mg/l	Cl mg/l	SO ₄ mg/l	HCO ₃ mg/l	SiO ₂ mg/l	Balance iónico	Fuente información
GRUPO 4																					
1	Hacienda Termales Botero Londoño I	1035400	848200	May-82	92	7,04	3.400	529	74	40	5	3,47	17,30	0,00	4,68	815	53	244	174	-0,04	CHEC, 1983
2	El Bosque	1033800	848400	May-82	34	6,16	2.800	345	39	44	5	2,01	9,95	0,10	3,06	496	72	226	84	-0,28	CHEC, 1983
3	La Piscina (B. Londoño)	1034700	847800	May-82	57	6,27	2.700	414	55	42	13	2,29	12,97	0,89	3,06	638	27	268	168	0,38	CHEC, 1983
4	El Billar	1034900	848200	May-82	92	7,42	3.600	529	70	32	4	3,26	17,30	0,00	4,50	815	40	207	234	0,42	CHEC, 1983
5	Hacienda Termales Botero Londoño II	1035400	848200	May-82	93	7,22	3.800	552	74	44	5	3,47	18,38	0,00	5,76	851	43	256	180	0,42	CHEC, 1983
6	Las Nereidas II	1032700	853900	May-82	46	5,81	810	87	14	92	32	0,05	0,16	0,00	0,99	5	202	476	168	-2,82	CHEC, 1983
7	Las Nereidas II	1032700	853900	May-82	28	6,21	540	35	7	50	17	0,02	0,06	0,00	0,25	1	86	177	102	8,08	CHEC, 1983
8	El Recodo	1029300	855800	Jun-82	54	6,42	1.300	161	43	42	34	0,20	0,82	N.A.	0,31	9	336	323	192	1,77	CHEC, 1983
9	La Poa	1036275	850575	Jun-82	12	6,42	60	6	3	5	2	0,00	0,00	N.A.	0,02	1	6	38	66	1,17	CHEC, 1983
10	Chorro Negro*	1029512	855590	Jun-95	51	6,31		146	43	42	35	0,12					302	381	189	-0,53	Ingeominas, 1995
GRUPO 5																					
1	La Telaraña	1037600	842200	May-82	17	6,43	83	3	2	7	3	0,00	0,00	N.A.	0,02	0,3	5,8	42	32	-4,3	CHEC, 1983
2	Santo Domingo I	1039300	840700	May-82	29	6,66	11.000	2001	86	220	101	5,90	34,60	1	32,40	1914	1,2	3355	25	1,0	CHEC, 1983
3	Santo Domingo II	1039300	840700	May-82	32	6,42	3.400	575	28	102	46	1,53	7,46	N.A.	8,64	425	3,4	1342	54	2,1	CHEC, 1983
4	Papayal	1039800	842900	May-82	17	6,74	110	6	3	8	4	0,00	0,00	5	0,02	0,7	8,2	53	59	-1,2	CHEC, 1983
5	Santo Domingo III	1039300	840000	May-82	25	5,88	2.400	368	17	60	29	0,97	5,30	N.A.	5,76	319	5,8	793	96	1,5,	CHEC, 1983
6	El Pino	1044000	842550	May-82	17	5,43	99	5	1	5	3	0,00	0,00	10	0,02	0,6	4,0	40	45	-0,4	CHEC, 1983
7	Pozo del Perro	1044000	842550	Jun-82	19	6,20	260	14	4	11	6	0,00	0,10	N.A.	0,02	5,7	7,7	48	66	23,0	CHEC, 1983
8	Fonda Santa Rita	1032650	836400	Jun-82	18	6,88	140	9	25	9	4	0,00	0,05	N.A.	0,03	2,5	4,8	67	84	17,4	CHEC, 1983
9	Cristalina Alta	1031975	840350	Jun-82	15	6,24	170	9	3	17	13	0,00	0,00	N.A.	0,06	0,5	3,7	140	57	0,7	CHEC, 1983
10	Cristalina Baja	1032800	839075	Jun-82	21	5,98	1.100	184	14	114	58	0,67	3,14	N.A.	1,80	152	5,8	854	108	1,5	CHEC, 1983
GRUPO 6																					
1	Termales Santa Rosa	1026800	836800	May-82	52	7,43	2.100	230	37	70	42	1,87	8,65	0,0	5,76	319	12	573	228	-0,5	CHEC, 1983
2	La Piscina	1027300	836900	May-82	63	6,34	2.300	276	43	78	59	1,94	9,62	0,0	5,94	355	26	671	240	2,0	CHEC, 1983
3	El Cortijo I	1027100	837300	May-82	65	6,25	2.200	276	51	62	43	2,36	10,81	0,3	9,00	425	9	525	270	0,1	CHEC, 1983
4	El Cortijo II	1027100	837300	May-82	65	6,48	2.300	276	47	64	44	2,22	10,81	0,8,	8,46	390	9	586	246	0,2	CHEC, 1983
5	Santa Helena	1027500	836200	May-82	19	6,05	2.700	345	20	182	40	0,90	5,19	0,5	4,68	319	0	1159	72	0,5	CHEC, 1983
6	San Vicente I	1027400	838700	May-82	84	6,50	3.200	437	55	38	10	4,16	17,30	0,5	10,80	674	34	244	150	1,3	CHEC, 1983
7	San Vicente II	1027400	838700	May-82	90	6,46	4.100	483	62	40	9	4,58	18,38	0,8	12,06	744	41	256	162	1,2	CHEC, 1983
8	San Vicente III	1027750	838500	Jun-82	20	6,00	170	23	6	6	2	0,28	0,58	3,5	0,22	19	1	73	78	2,1	CHEC, 1983
9	San Vicente IV	1028100	838500	Jun-82	66	6,48	2.500	368	47	50	36	3,33	12,97	N.A.	7,92	496	28	500	252	1,7	CHEC, 1983

Continuación Tabla 1. Composición química de manantiales del Complejo Cerro Bravo – Machín.

Punto	Manantial/ Localidad	Latitud	Longitud	Fecha Recolección	T (°C)	pH	Conductividad (mS/cm) a 25°C	Na mg/l	K mg/l	Ca mg/l	Mg mg/l	Li mg/l	B mg/l	Fe mg/l	NH4 mg/l	Cl mg/l	SO4 mg/l	HCO3 mg/l	SiO2 mg/l	Balance iónico	Fuente información
10	San Vicente V	1027200	839200	Jun-82	43	6,12	870	127	15	14	4	1,32	4,65	N.A.	3,42	184	26	49	72	5,6	CHEC, 1983
11	San Vicente VI	1027500	838600	Jun-82	91	6,87	3.600	552	74	46	10	5,62	22,70	N.A.	13,14	886	30	275	168	0,7	CHEC, 1983
12	Peñaranda Río San Eugenio	1025000	837100	Jun-82	16	6,34	260	28	2	12	5	0,69	0,40	N.A.	0,22	28	3	85	34	2,0	CHEC, 1983
13	El Cortijo III	1027100	837400	Jun-82	19	6,43	100	4	2	5	2	0,02	0,06	8,9	0,18	2	1	57	45	4,6	CHEC, 1983
14	Quebrada La Piscina	1027500	836800	Jun-82	16	6,98	100	7	3	7	3	0,03	0,08	N.A.	0,03	3	5	49	59	-1,2	CHEC, 1983
15	Termales S. Rosal	1026750	837000	Jun-82	50	7,30	2.000	253	37	76	29	1,94	8,9	N.A.	1,26	344	5	555	198z	-1,2	CHEC, 1983
GRUPO 7																					
1	El Bosque del Otún	1016150z	848100	30103	22	4,01	1.100	22,77	5	168	16	0,00	0,03	0,40	0,06	1,21	528	0,00	49,8	-0,9	CHEC, 1983
GRUPO 8																					
1		998725	861724	Jul-82	21	7,45	460	25	7	32	28	0,02	0,50	N.A.	0,05	16	91	177	72	-0,9	CHEC, 1983
2	El Rancho	1002800	860300	Jul-82	53	6,71	3.200	253	43	168	276	0,55	4,00	N.A.	1,01	206	768	1281	204	0,6	CHEC, 1983
3		1001300	860520	Jul-82	45	6,30	3.000	173	39	150	252	0,36	3,57	2,0	1,01	177	864	915	192	-1,4	CHEC, 1983
4		946450	861790	Jul-82	19	7,47	560	25	7	32	26	0,02	0,31	0,0	0,04	15	96	177	102	-2,5	CHEC, 1983
5	La Florida (El Turpial)	999000	862875	Jul-82	28	6,21	2.400	108	19	128	144	0,19	1,51	3,0	0,32	85	374	854	138	-1,2	CHEC, 1983
6	La Florida (El Turpial)	999200	862600	Jul-82	37	6,25	2.400	166	32	164	216	0,30	1,95	2,0	0,29	142	398	1281	144	1,3	CHEC, 1983
7	La Florida (El Turpial)	999100	862550	Jul-82	20	8,57	710	46	8	44	48	0,06	0,54	N.A.	0,03	27	120	311	78	-0,004	CHEC, 1983
8	Romerales	1007650	854900	Ago-82	16	5,24	710	28	6	80	29	0,02	0,00	4,0	0,05	2	259	146	120	0,7	CHEC, 1983
9	Romerales	1007800	854725	Ago-82	18	5,36	750	30	7	86	31	0,02	0,00	6,1	0,04	1	269	177	126	0,9	CHEC, 1983
10	Zona del Termal El Cebollar	1009725	863025	Ago-82	45	5,83	1.400	115	19	80	83	0,13	0,00	21,8	0,20	0,6	624	323	144	-2,3	CHEC, 1983
11	Zona del Termal El Cebollar	1009750	863175	Ago-82	39	5,90	1.400	106	14	84	78	0,15	0,00	17,0	0,22	1,1	624	329	120	-5,3	CHEC, 1983
12	Zona del Termal El Cebollar	1009775	863300	Ago-82	28	5,97	1.200	87	15	92	72	0,13	0,00	12,8	0,10	1,4	528	232	72	1,9	CHEC, 1983
13	Zona del Termal El Cebollar	1008500	863525	Ago-82	39	5,54	1.200	67	7	92	70	0,15	0,00	21,8	0,06	1,4	427	256	138	5,3	CHEC, 1983
14	Zona del Termal El Cebollar	1004100	864050	Ago-82	32	5,77	1.000	85	8	72	59	0,11	0,00	11,7	0,52	1,9	350	293	120	3,4	CHEC, 1983
15		1002550	867125	Ago-82	10	5,69	100	4	1	6	2	0,00	0,00	0,0	0,06	0,7	5	32	39	0,8	CHEC, 1983
16	Aquilino	1007081	853217	Abr-98	24	6,19	1.400	60	10	110	64	0,10				4,8	63	1188	139	-21,1	GilCruz, et al., 1998

GEOQUÍMICA DE FUENTES MINERALES Y TERMALES DEL
COMPLEJO VOLCÁNICO CERRO BRAVO-CERRO MACHÍN, COLOMBIA

Continuación Tabla 1. Composición química de manantiales del Complejo Cerro Bravo – Machín.

Punto	Manantial/ Localidad	Latitud	Longitud	Fecha Recolección	T (°C)	pH	Conductividad (mS/cm) a 25°C	Na mg/l	K mg/l	Ca mg/l	Mg mg/l	Li mg/l	B mg/l	Fe mg/l	NH ₄ mg/l	Cl mg/l	SO ₄ mg/l	HCO ₃ mg/l	SiO ₂ mg/l	Balance iónico	Fuente información
GRUPO 9																					
1		986550	856500	Jul-82	15	7,65	210	5	2	18	10	0,01	0,00	0,0	0,05	0	35	79	39	-1,4	CHEC, 1983
2	La Piscina- Machín	986650	854150	Jul-82	94	8,01	2.000	460	39	19	22	2,71	15,14	0,0	1,67	298	182	793	204	-2,0	CHEC, 1983
3	La Piscina- Machín *	986850	854675	Jul-82	74	6,99	1.100	322	28	20	13	2,22	15,14	0,0	2,70	184	173	549	276	-1,5	CHEC, 1983
4	San Juan - Río San Juan - Machín	989800	853950	Jul-82	36	6,23	2.600	322	21	142	102	1,11	9,19	1,0	0,18	496	91	1098	126	-5,7	CHEC, 1983
5	Río Tochea	990325	852575	Jul-82	40	6,45	2.400	69	55	560	17	0,60	3,89	7,8	5,94	113	1,9	2013	150	-2,4	CHEC, 1983
6	Río Toche	989825	852750	Jul-82	36	6,22	2.800	90	11	540	64	0,76	6,05	24,0	5,58	131	0	2013	162	1,8	CHEC, 1983
7	Río Toche	989800	852625	Jul-82	25	6,39	650	19	0	82	18	0,11	0,71	1,0	0,43	20	2,0	342	55	2,3	CHEC, 1983
8	Río Toche	991925	852350	Jul-82	24	6,02	1.500	48	6	200	53	0,12	0,80	15,1	0,52	22	0	976	108	2,4	CHEC, 1983
9	Río Toche	990550	852275	Jul-82	34	6,46	2.500	81	7	0,46	62	0,56	4,76	2,5	3,42	103	0	1891	138	-57,2	CHEC, 1983
10		985650	860500	Jul-82	18	5,32	210	6	3	34	10	0,01	0,24	6,1	0,11	2	13,9	146	46	7,4	CHEC, 1983
11	Río Toche	989550	852400	Jul-82	20	6,63	1.200	76	12	150	49	0,16	1,73	10,1	0,50	57	0	793	51	3,8	CHEC, 1983
12	Río Toche	189750	858000	Jul-82	37	6,38	2.300	69	9	400	53	0,59	5,41	11,7	3,96	103	0	1830	144	7,2	CHEC, 1983
13	Río Toche	990500	852675	Jul-82	38	6,53	2.500	69	9	480	61	0,61	5,95	11,7	4,50	131	0	1952	144	-3,7	CHEC, 1983
14	Puente Tierra Alta	986400	853050	Jul-82	57	7,24	1.400	322	34	70	37	2,22	15,14	0,0	1,10	277	144	793	318	-4,4	CHEC, 1983
15	California, Toche Bajo	984975	854550	Jul-82	23	6,22	740	60	11	98	30	0,46	1,51	1,2	1,80	71	0	488	102	2,3	CHEC, 1983
16		985950	856400	Jul-82	17	6,70	150	7	3	17	7	0,01	0,26	0,4	0,06	0	34	67	46	1,5	CHEC, 1983
17	Puente Tierra	986453	852661	Abr-95	56	7,21	2.200	370	27	72	32	3,8				182	121	921	291	1,7	CHEC, 1983

* Localización tomada de Garzón, G., 2001

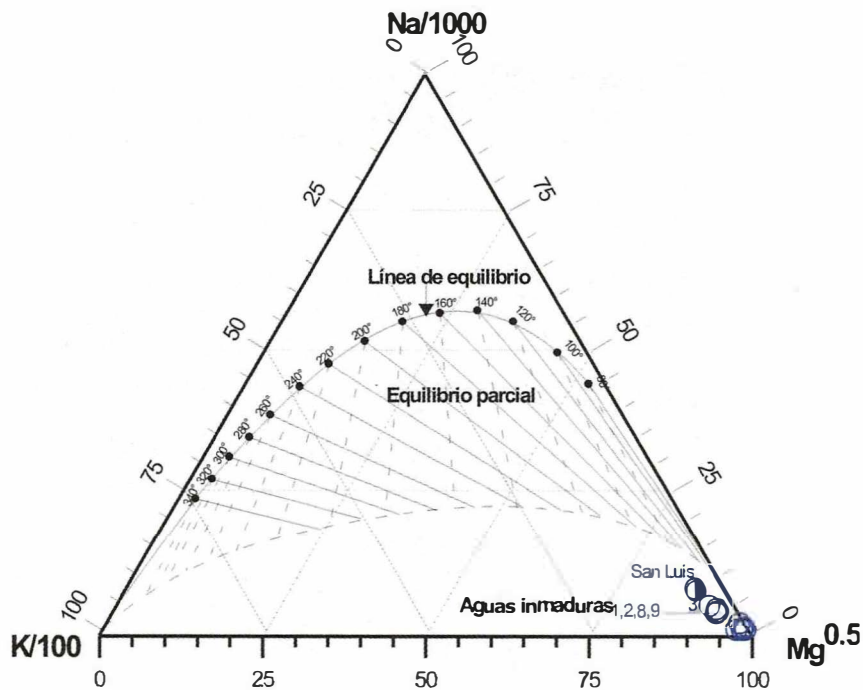


Figura 2. Composición relativa Na-K-Ca (Giggenbach, 1988), para manantiales del Grupo 1. La alta proporción de magnesio refleja la importancia de la contribución de agua somera fría. Los manantiales menos afectados por el proceso de dilución, inferido de la tendencia lineal, son los de mayor temperatura en superficie (San Luis).

Figura 3. Composición relativa Cl-Li-B (Giggenbach, 1991), para manantiales del Grupo 1. Estos manantiales exhiben la composición típica de sistemas geotérmicos asociados a sistemas volcánico magmáticos. Obsérvese el apilamiento de los puntos hacia la línea que representa composición riolítica, coincidente con la naturaleza del Volcán Cerro Bravo con el cual seguramente están asociados estos manantiales.

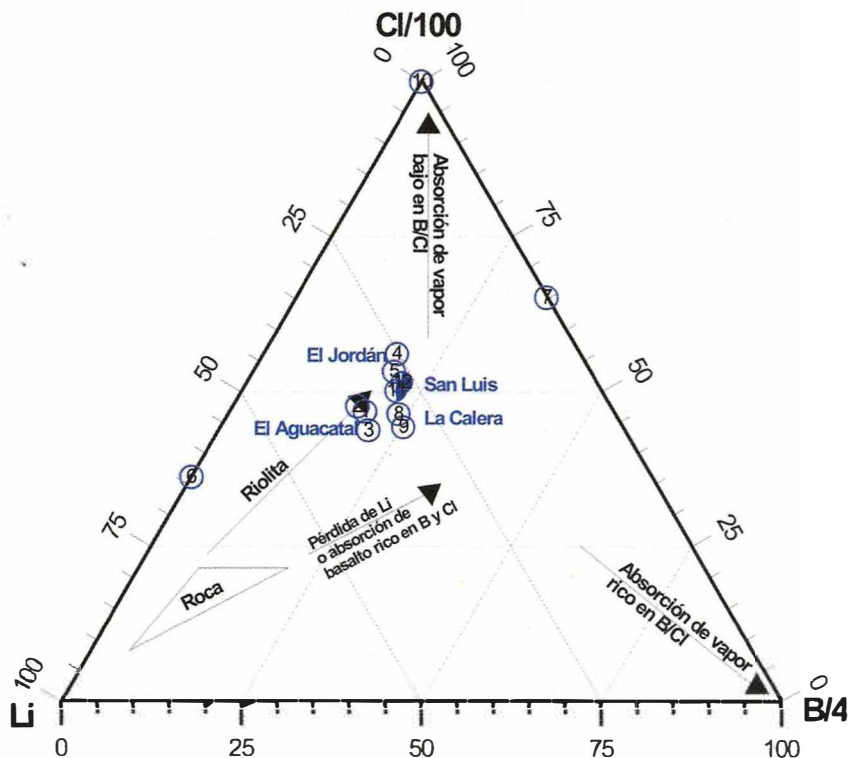


Tabla 2 Temperaturas estimadas para los reservorios de sistemas hidrotermales del Complejo Volcánico Cerro Bravo - Cerro Machín.

Punto	Manantial/ Localidad	QTZ (Sin pérdida vapor) (1)	Calcedonia (2)	Na/K (3)	K/Mg (4)	Q T Z (Máxima pérdida vapor) (5)
TEMPERATURA (°C)						
GRUPO 1						
1	Aguacatal I	128	100			
2	Aguacatal II	132	104			
3	El Aserradero	138	112			
4	El Jordán I	138	112			
8	La Calera I	138	112			
9	La Calera II	138	112			
11	Termal S. Luis I	156	132			
12	Termal S. Luis II	156	132			
GRUPO 3						
2	Granates	120	91	145	70	
3	La Yuca	103	73			
4	La Yuca	103	73			
GRUPO 4						
1	Hacienda Termales Botero Londoño I	171	148	261		
2	El Bosque	128	100	242	72	161
3	La Piscina (B. Londoño)	169	146	256	71	
4	El Billar	191	172	256	81	
5	Hacienda Termales Botero Londoño II	173	151	257	80	177
6	Las Nereidas I	169	146			163
7	Las Nereidas II	138	112			
8	El Recodo	177	156			
10	Chorro Negro *	176	154			
GRUPO 5						
2	Santo Domingo I	73	41	173	64	
3	Santo Domingo II	106	76	180	56	
5	Santo Domingo III	135	108	177	54	
10	Cristalina Baja	142	115			

Continuación Tabla 2 Temperaturas estimadas para los reservorios de sistemas hidrotermales del Complejo Volcánico Cerro Bravo - Cerro Machín.

Punto	Manantial/ Localidad	QTZ (Sin pérdida vapor) (1)	Calcedonia (2)	Na/K (3)	K/Mg (4)	Q T Z (Máxima pérdida vapor) (5)
GRUPO 6						
1	Termales Santa Rosa	189	170	273	60	
2	La Piscina	193	174	270	60	
3	El Cortijo I	202	184	286	63	
4	El Cortijo II	195	176	278	62	
6	San Vicente I	161	138	251	73	153
7	San Vicente II	166	143	254	75	157
9	San Vicente IV	196	178	252	63	
10	San Vicente V	120	91	248	63	
11	San Vicente VI	169	146	257	76	159
15	Termales S. Rosa II	179	158	266	62	
GRUPO 8						
1		120	91			
2	El Rancho	181	161			
3		177	156			
5	La Florida (El Turpial)	156	132			
6	La Florida (El Turpial)	159	135			
7	La Florida (El Turpial)	124	96			
10	Zona del Termal El Cebollar	159	135			
11	Zona del Termal El Cebollar	148	122			
12	Zona del Termal El Cebollar	120	91			
13	Zona del Termal El Cebollar	156	132			
14	Zona del Termal El Cebollar	148	122			
16	Aquilino	157	132			

Continuación Tabla 2 Temperaturas estimadas para los reservorios de sistemas hidrotermales del Complejo Volcánico Cerro Bravo - Cerro Machín.

GRUPO 9						
2	La Piscina-Machín	181	161	220	64	
3	La Piscina-Machín	203	186	222	63	
4	San Juan - Rio San Juan - Machín	151	126	201	49	
5	Río Toche	161	138			
6	Río Toche	166	143	249	45	
7	Río Toche	107	77			
8	Río Toche	142	115			
9	Río Toche	156	132	217	40	
11	Río Toche	103	73			
12	Río Toche	159	135	153 (6)	44	
13	Río Toche	159	135	191 (6)	43	
14	Puente Tierra Alta	214	199	237	60	
15	California, Toche Bajo	138	112			
17	Puente Tierra	207	191	208	58	

(1) QTZ Sin pérdida de vapor= Geotermómetro de cuarzo de Fournier = $(1309/(5.19 - \text{LOG}(\text{SiO}_2))) - 273$

(2) Calcedonia = Geotermómetro correspondiente = $(1032/(4.69 - \text{LOG}(\text{SiO}_2))) - 273$

(3) Na/K = Geotermómetro Na/K de Giggenbach = $(1390/(\text{LOG}(\text{Na/K}) + 1.75)) - 273$

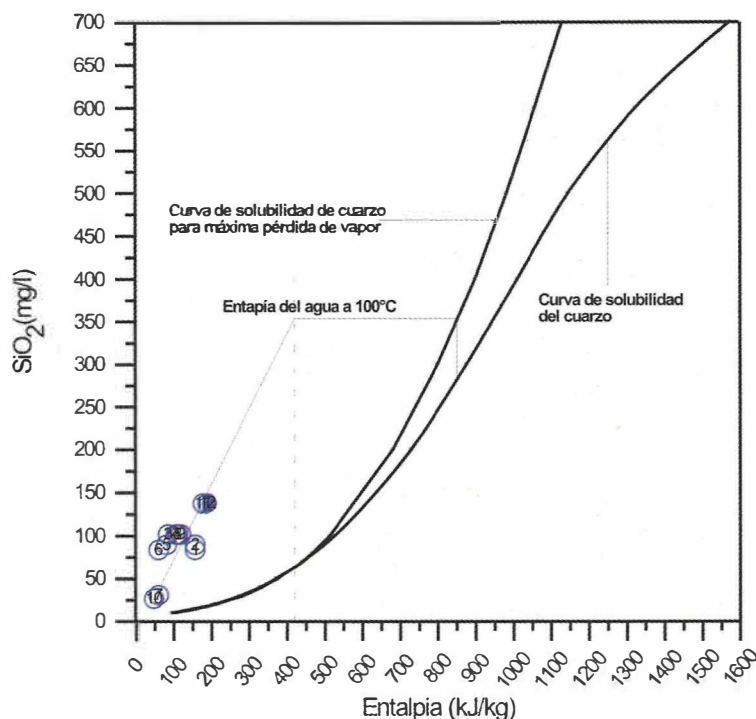


Figura 4. Modelo Entalpía – Sílice (Nicholson, 1993; Arnorsson, 2000), para manantiales del Grupo 1. Asumiendo pérdida de vapor antes de la evidente dilución, a partir de los manantiales de San Luis (de mayor temperatura y concentración en sílice), se estima que el reservorio tendría una temperatura de unos 200°C (850 kJ/kg) y una concentración de sílice de 280 mg/l.

este grupo (hasta de -68%) indican que los analitos medidos no representan a la mayoría de las especies mayores disueltas.

Como se ha dicho, la composición relativa de aniones está dominada por los iones sulfato. La alta acidez (pHs inferiores a 2) y las concentraciones altas de sulfatos y cloruros, de los manantiales de Hotel Termales del Ruiz (puntos 1, 2 y 7) y Aguas Calientes (4), son compatibles con un aporte significativo de un fluido de origen volcánico - magmático. De otra parte, en manantiales como El Calvario (11) y El Oso, con temperaturas en superficie relativamente altas (57 y 22°C, respectivamente), muy probablemente son vapor- calentados, como indica su moderada acidez (pHs 2,77 y 6,11), su concentración alta en sulfatos y muy baja en cloruros.

Las características enunciadas permiten establecer que los fluidos descargados por los

manantiales del Grupo 2 son inmaduros; es decir, no reflejan equilibrio con las rocas del reservorio geotérmico. Su composición está alterada por la disolución a alta temperatura y pH ácido, de las rocas que los hospedan, con el consecuente incremento en la concentración de la mayoría de las especies disueltas, como se determina a partir de su alta conductividad (hasta 29.000 μ S/cm). Los manantiales vapor - calentados señalan la ocurrencia del proceso de ebullición probablemente asociado al flujo ascendente (upflow) del fluido geotérmico.

El Grupo 3, ubicado en la margen derecha de la zona de estudio, está conformado por cuatro manantiales, tres de ellos de composición bicarbonatada y uno clorurada, como se observa en la Figura 1. El manantial clorurado neutro, Hacienda Granates, descarga aguas maduras, es decir, que recibe una contribución significativa de agua del reservorio

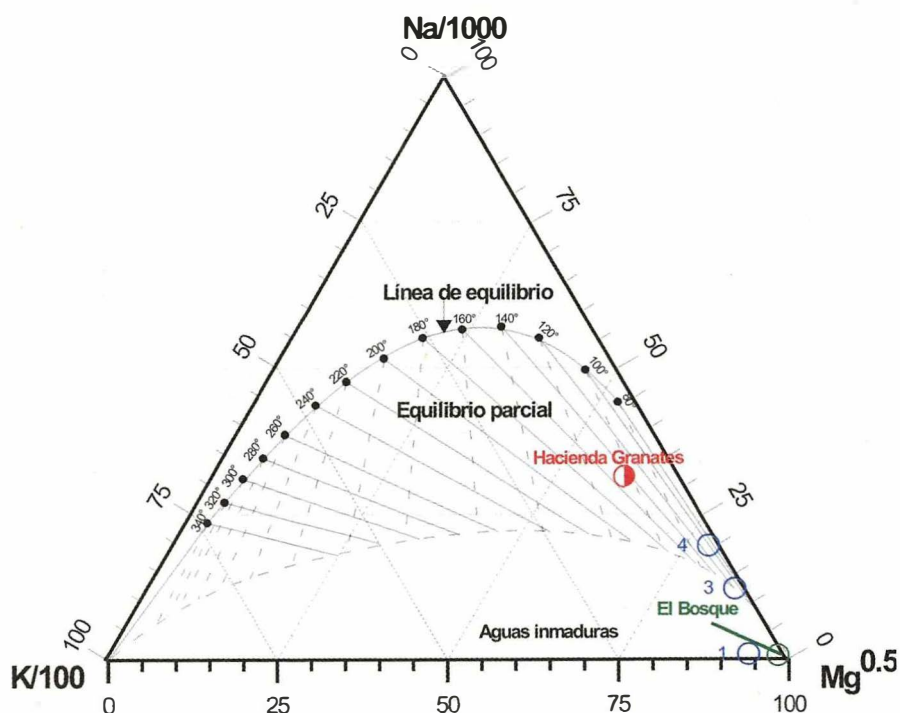
geotérmico en equilibrio fisicoquímico, con los minerales de sus rocas. Las concentraciones relativamente altas de litio (2,5 mg/l) y boro (3,4 mg/l) son consistentes con el origen geotérmico de esta agua. La composición de los otros manantiales de este grupo está dominada por la contribución de una fuente de agua bicarbonatada.

La composición relativa Na-K-Mg, de la Figura 5, permite establecer que los manantiales de Hacienda Granates (3) y de La Yuca (3 y 4), se hallan parcialmente en equilibrio con agua de reservorio geotérmico. La Hacienda Granates está sobre la línea de 140°C, del geotermómetro, mientras que los manantiales de La Yuca, alrededor de 100°C. Dado que estos manantiales no están relacionados por una tendencia lineal, se puede plantear que provienen de fuentes diferentes, como se concluye de la gran dispersión en composición relativa Cl-Li-B (Figura 6).

La temperatura probable estimada a partir de los geotermómetros acuosos para este grupo (Tabla 2), indican una temperatura máxima de 145°C (Na/K). La temperatura mínima probable, estimada a partir del geotermómetro de cuarzo, señala 103°C para los manantiales de La Yuca y 120°C para la Hacienda Granates. El modelo Entalpía - Sílice (Figura 7) señala la posibilidad de un enfriamiento conductivo sin precipitación de sílice en la Hacienda Granates (alta concentración de sílice a una temperatura de descarga relativamente baja). Para los manantiales de La Yuca, a partir de este modelo, se estima una temperatura máxima alrededor de 125°C (correspondiente a la entalpía de 525 kJ/kg) y una concentración de sílice del orden de 90 mg/l para el reservorio.

El Grupo 4, localizado al occidente del Nevado del Ruiz, está conformado por 10 manantiales, 5 de los cuales son clorurados neutros de alta temperatura (hasta 93°C) y con altas

Figura 5. Composición relativa Na-K-Mg (Giggenbach, 1988), para manantiales del Grupo 3. Los manantiales Hacienda Granates y La Yuca (3 y 4) se encuentran parcialmente en equilibrio y señalan temperaturas del orden de 140 y 100°C, respectivamente. Se incluye el manantial de El Bosque, del Grupo 7, cuya proporción de magnesio indica la contribución dominante de aguas someras.



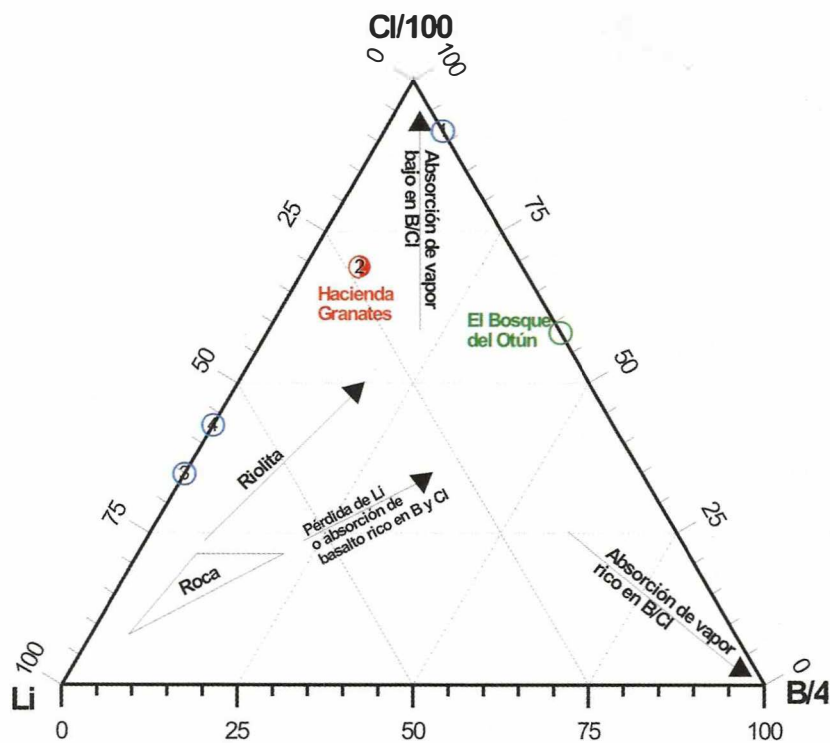


Figura 6 Composición relativa Cl-Li-B (Giggenbach, 1991), para manantiales del Grupo 3. La dispersión de los manantiales de este grupo revela su diferencia de origen. Si bien las concentraciones de boro en los manantiales de La Yuca no son detectables, dada su dilución, este proceso no justifica sus diferencias en composición con el de la Hacienda Granates, como se vio en la figura anterior. El manantial de Hacienda Granates no exhibe la composición relativa típica de los originados en sistemas hidrotermales asociados a sistemas volcánico magmáticos, como el observado en los manantiales del Grupo 1.

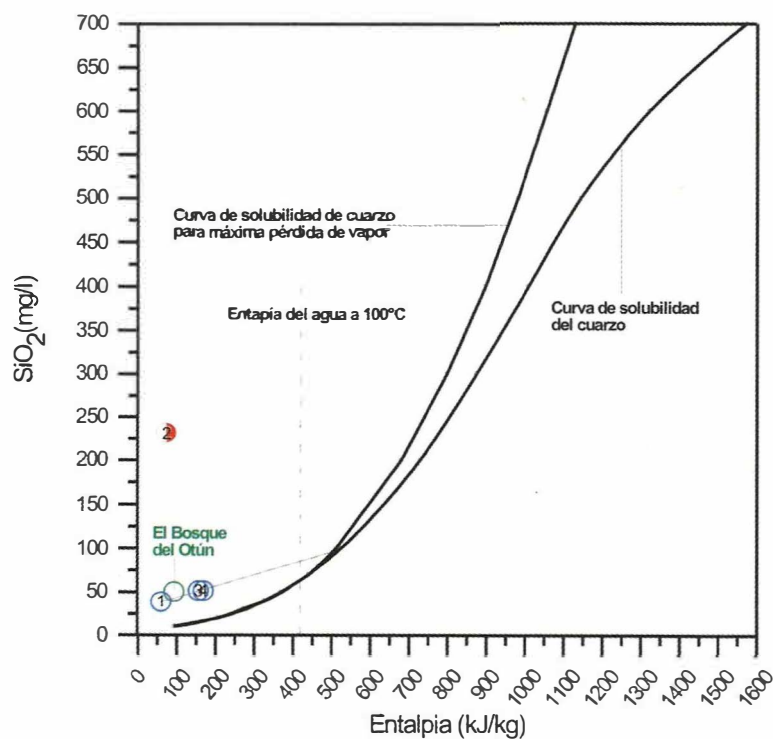


Figura 7. Modelo Entalpía - Sílice (Nicholson, 1993; Arnorsson, 2000), para manantiales del Grupo 3. El alto contenido de sílice del manantial Hacienda Granates, frente a su temperatura superficial, probablemente está relacionado con un proceso de enfriamiento conductivo. La temperatura inferida para los manantiales La Yuca (3 y 4), está alrededor de 125°C.

concentraciones de litio y boro, lo que refleja el contacto del fluido geotérmico con la superficie. Éstos corresponden a una de las áreas seleccionadas por la Investigación geotérmica (CHEC et al., 1983) como una de las prioritarias para la exploración (Botero Londoño). Los manantiales restantes bicarbonatados y sulfatados no reciben contribución significativa de agua clorurada geotérmica.

La composición relativa Na-K-Mg (Figura 8) señala una alta concentración relativa de magnesio, aun para manantiales clorurados, a partir de lo cual se infiere la mezcla del agua geotérmica, con agua subterránea fría. La dilución es de una magnitud tal que aleja a los manantiales de la línea de equilibrio y los ubica como aguas inmaduras. Estos manantiales describen una clara tendencia de mezcla en la que los manantiales más representativos del miembro extremo caliente (fluido geotérmico) son los de la Hacienda Botero Londoño (1, 5 y 6), la cual señala sobre la línea de equilibrio una temperatura de unos 255°C en el reservorio. Los manantiales clorurados neutros de Botero Londoño tienen una relación Cl/B muy cercana que sugiere un origen común, diferente de la de los manantiales calentados por vapor de Nereidas y Recodo.

Con base en el geotermómetro Na/K, en los manantiales de mayor temperatura superficial, las temperaturas estimadas en el reservorio son hasta de 260°C, como se indica en la Tabla 2. La dilución que el fluido geotérmico sufre con agua somera de menor temperatura se evidencia en la diferencia de dicha temperatura, con la calculada a partir de los geotermómetros restantes. El geotermómetro de cuarzo señala una temperatura mínima probable de hasta 177°C. El modelo Entalpía - Sílice (Figura 9), aplicado con base en el manantial de mayor concentración de sílice (El Billar), asumiendo ebullición, señala la misma temperatura del geotermómetro de cuarzo (177°C) correspondiente a una entalpía de 750 kJ/kg y una concentración probable de

sílice en el reservorio de 210 mg/l. El resultado cambia considerablemente si se asume que el manantial de El Billar sufre enfriamiento conductivo y se extrapola la entalpía para los manantiales 1 y 5 de Botero Londoño, si se despreja la ebullición superficial. La temperatura resultante es cercana a 220°C (950 kJ/kg) y una concentración de sílice en el reservorio de 360 mg/l.

El Grupo 5 está constituido por 10 manantiales bicarbonatados neutros (Figura 1), en su mayoría de temperatura baja, ubicados al sur de Manizales, alrededor del área conocida como Santo Domingo, margen izquierda de la zona de estudio. Las altas concentraciones de cloruro, litio y boro, y baja en sulfatos hacen presumir la contribución de fluido geotérmico. El manantial Santo Domingo I registra la mayor concentración de sales, superada solamente por los manantiales ácidos sulfatados que evidencian contribución volcánico - magmática, del Grupo 2. Sin embargo, su baja temperatura permite plantear la posibilidad de contribución de otra fuente salina, como depósitos hidrotermales originados en episodios de actividad hidrotermal anteriores. Los manantiales restantes son fríos y de agua dulce.

La composición relativa Na-K-Mg, ilustrada en la Figura 10, indica una línea de mezcla en la cual el manantial Cristalina Baja (punto 10), con el mayor contenido relativo de magnesio, es el más representativo del miembro extremo de la mezcla de menor temperatura y Santo Domingo I, del miembro extremo de mezcla de mayor temperatura (menos alejado de la línea de equilibrio). La tendencia lineal extrapolada sobre la línea de equilibrio señala una temperatura Na/K del orden de 160°C. La relación Cl/B es muy semejante para los 4 manantiales de mayor temperatura de este grupo, lo que señala un origen también semejante.

Figura 8. Composición relativa Na-K-Mg (Giggenbach, 1988), para manantiales del Grupo 4. La contribución de agua subterránea fría se infiere a partir de la alta concentración relativa de magnesio. Los manantiales de Botero Londoño, que son los más calientes en superficie, son los manantiales más representativos del agua geotérmica involucrada en el proceso de mezcla. La temperatura del reservorio estimada a partir de la extrapolación de la línea de mezcla sobre la de equilibrio, es del orden de 255°C.

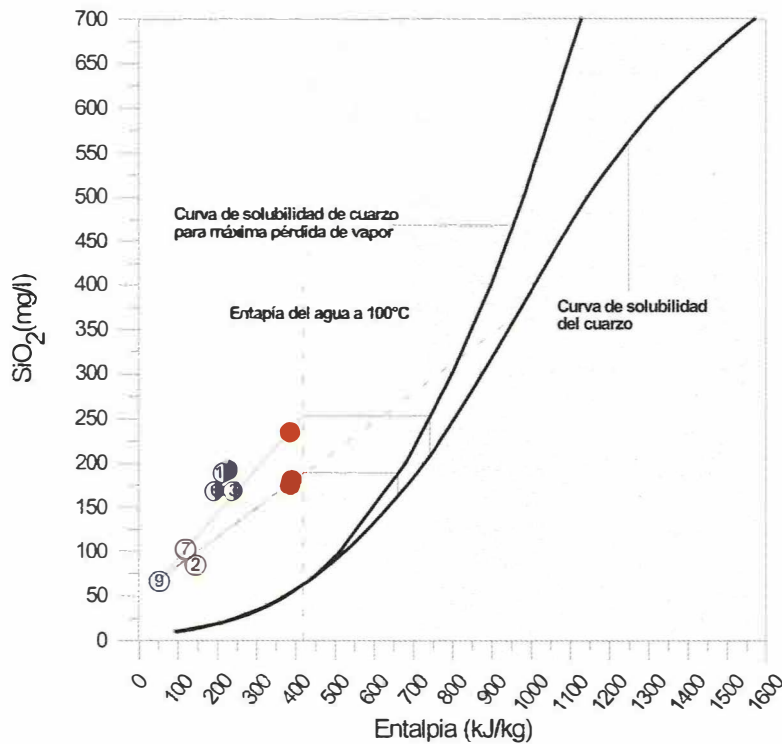
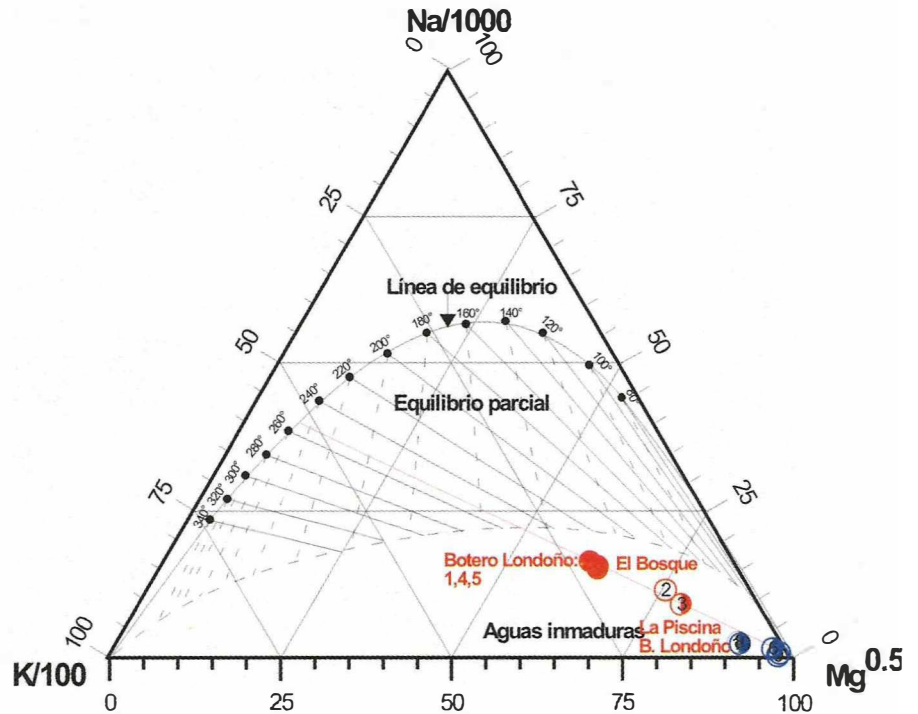


Figura 9. Modelo Entalpía - Sílice (Nicholson, 1993; Arnorsson, 2000) para manantiales del Grupo 4. A partir del manantial con mayor concentración de sílice (4), asumiendo la existencia del proceso de ebullición, evidente en superficie, se infiere una temperatura de 177°C (750 kJ/kg) la cual es relativamente baja (cercana a la estimada por el geotermómetro de cuarzo). En el caso de asumir que el proceso de ebullición cercano a la superficie no es significativo y que manantiales 1 y 5 son el resultado de una dilución simple, la temperatura interpolada es del orden de 220°C (equivalente a una entalpía de unos 950 kJ/kg), la cual es más cercana a la estimada a partir del geotermómetro Na/K (260°C). La concentración de sílice estaría alrededor de 360 mg/l.

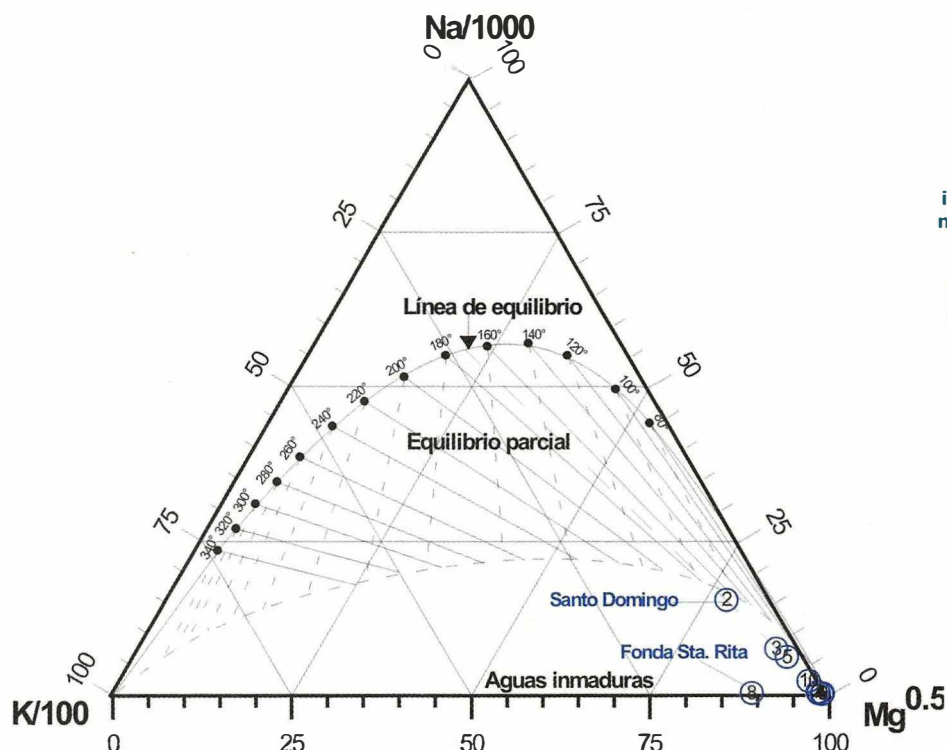


Figura 10. Composición relativa Na-K-Mg (Giggenbach, 1988), para manantiales del Grupo 5. El manantial tibio de Santo Domingo I (29°C) es el más representativo del agua caliente que interviene en el proceso de mezcla definido por la línea trazada. La temperatura Na/K del reservorio sería del orden de 160°C, según se extrapola sobre la línea de equilibrio.

La temperatura máxima estimada para el reservorio que alimenta los manantiales del Grupo 5 estaría alrededor de 180°C, según el geotermómetro Na/K, mientras que la mínima probable, calculada con el geotermómetro de cuarzo, sería del orden de 130-140°C, como se indica en la Tabla 2. No fue factible aplicar para estos manantiales el modelo Entalpía-Sílice, ya que al parecer sufren un enfriamiento conductivo muy significativo, además de una gran dilución.

El Grupo 6, conformado por 15 manantiales, está ubicado en el Municipio de Santa Rosa de Cabal, al sur del grupo anterior, como se indica en la Figura 1. La mayoría de estos manantiales son de alta temperatura. Su concentración de cloruros, litio, boro y sulfato son compatibles con fluido geotérmico profundo (Tabla 1). La temperatura máxima en superficie es de 91°C y corresponde a manantiales de San Vicente.

Como se señala en la Figura 1, la composición relativa de aniones dominantes permite clasificar la mayoría de los manantiales del grupo como bicarbonatados, aunque los más calientes son clorurados. Según se ilustra en la Figura 11, en donde se representa la composición relativa Na-K-Mg, estos manantiales están relacionados por una línea de mezcla entre agua geotérmica, caracterizada por aguas maduras originadas en el reservorio: San Vicente I, II, V y VI y otra somera, de aguas subterráneas frías: El Cortijo III (punto 13) y Quebrada La Piscina (punto 14). La dilución que sufren las aguas maduras o de reservorio es considerable como la elevada composición relativa de magnesio.

La tendencia lineal que define el proceso de mezcla, extrapolada sobre la línea de equilibrio, indica una temperatura Na/K del orden de 250°C. El miembro extremo de mezcla más representativo del fluido geotérmico es el ma-

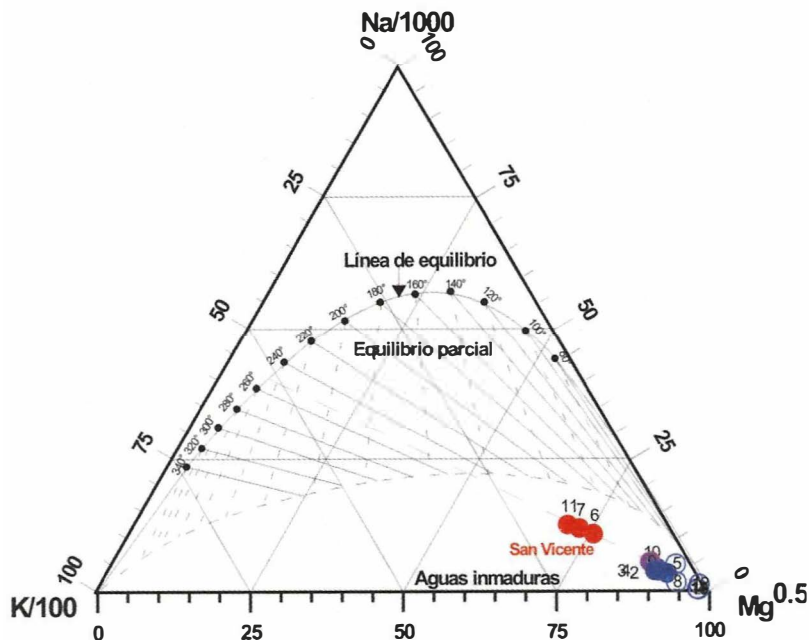


Figura 11. Composición relativa Na-K-Mg (Giggenbach, 1988), para manantiales del Grupo 6. Se define una tendencia de mezcla, en la cual los manantiales calientes de San Vicente, son los más representativos de la fuente caliente. La temperatura Na/K extrapolada sobre la línea de equilibrio, es del orden de 250°C.

nantial San Vicente VI (punto 11), mientras que el miembro extremo de baja temperatura y alta concentración en magnesio (y en bicarbonato), se identifica en los manantiales Santa Helena (punto 5), San Vicente III (punto 8), Peñaranda Río San Eugenio (punto 12), El Cortijo III (punto 13) y Quebrada La Piscina (punto 14). En su mayoría estos manantiales registran una relación Cl/B semejante, la cual permite asociarlos a un origen común.

La mezcla se confirma con base en la composición relativa Cl-B-HCO₃, presentada en la Figura 12. Como se espera, los manantiales más fríos y de mayor concentración en magnesio son los de mayor contenido relativo en bicarbonato. Las aguas de los manantiales clorurados de alta temperatura superficial, de San Vicente, nuevamente se identifican a través de este diagrama como las más representativas del fluido profundo.

Las temperaturas geoquímicas presentadas en la Tabla 2 señalan las temperaturas máxi-

mas de toda el área de estudio, alrededor de 280°C para el geotermómetro de Na/K. El efecto del proceso de dilución con agua fría, ya mencionado, se refleja también en las bajas temperaturas calculadas con el geotermómetro K/Mg (entre 60 y 76°C) y en el de cuarzo. Este último registra valores menores al de Na/K, pero alcanza temperaturas hasta de 200°C. Los manantiales de este grupo definen dos tendencias lineales en el modelo de mezcla Entalpía - Sílice presentado en la Figura 13. La primera, entre el agua subterránea de baja temperatura y las aguas bicarbonatadas calientes, principalmente de Santa Rosa y El Cortijo, cuyo contenido de sílice es el más alto del grupo y la segunda, entre el agua subterránea de baja temperatura y las aguas cloruradas calientes (San Vicente), de menor contenido en sílice que las bicarbonatadas. De estas tendencias, se podrían plantear tres condiciones diferentes de temperatura y concentración de sílice, en el reservorio: (1) A partir de las aguas bicarbonatadas, cuya concentración elevada de sílice podría sugerir

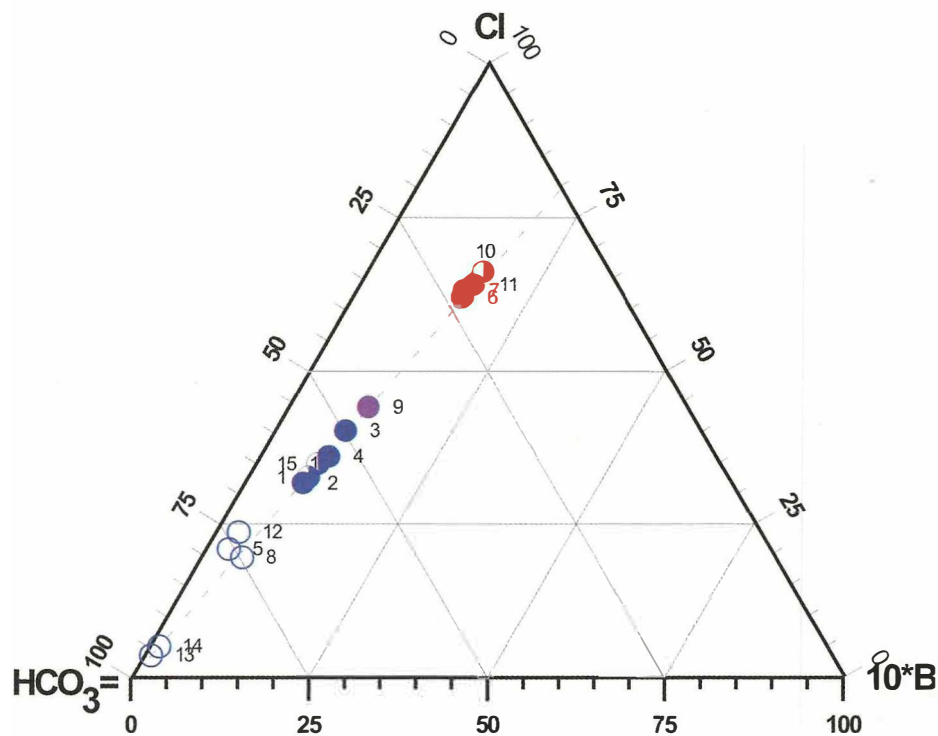
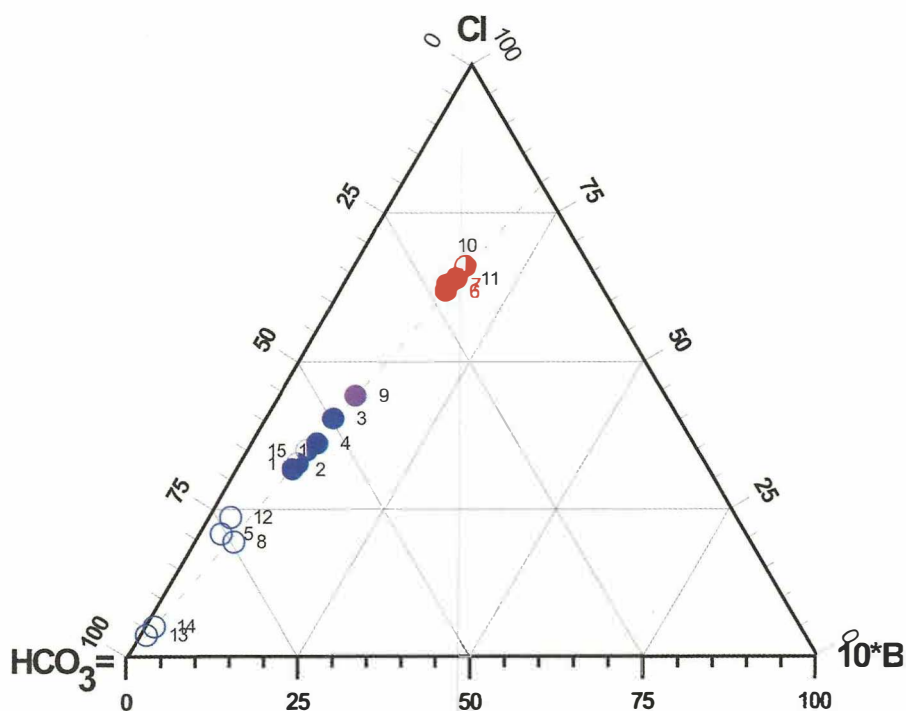


Figura 12. Composición relativa Cl-HCO₃-B (Koga, 2000), para manantiales del Grupo 6. El avance del proceso de dilución se visualiza con el incremento de la concentración relativa de bicarbonato, de manera análoga al incremento de magnesio de la figura anterior.

Figura 13. Modelo Entalpía - Sílice (Nicholson, 1993; Arnorsson, 2000), para manantiales del Grupo 6. Los manantiales de San Vicente y Santa Rosa parecen seguir procesos diferentes. Si se asume la formación de los manantiales clorurados de San Vicente a partir de la dilución de fluido profundo, se interpola una temperatura de 263°C (1.250 kJ/kg). Si por el contrario, se asume la ocurrencia del proceso de ebullición a 100°C, se interpola una temperatura relativamente baja, de 155°C (650 kJ/kg) para las aguas de San Vicente y de 220°C (950 kJ/kg) para las de Santa Rosa.



enfriamiento conductivo sin precipitación, la temperatura del reservorio se estima en unos 220°C (entalpía de 950 kJ/kg) y su concentración en sílice, en unos 350 mg/l, si se asume que se originan por la dilución de agua separada por ebullición a 100°C, (2) A partir de las aguas cloruradas, si se asume dilución de agua separada sin ebullición la temperatura del reservorio sería de 263°C (1250 kJ/kg) y la concentración de sílice, de 550 mg/l, y (3) A partir de las aguas cloruradas formadas separadas por ebullición a 100°C, la temperatura estaría alrededor de 155°C (650 kJ/kg) y su concentración de sílice, alrededor de 150 mg/l. Para las aguas cloruradas, como en el Grupo 4, la estimación si se asume la ocurrencia del proceso de ebullición, resulta en temperaturas muy bajas.

Para evaluar cuál de los procesos planteados podría explicar mejor la composición de los

manantiales del Grupo 6, se aplicó el modelo Entalpía - Cloruros, presentada en la Figura 14. En éste también se identifican dos tendencias muy claras, para los manantiales bicarbonatados (de Santa Rosa, principalmente) y para los clorurados (San Vicente). A partir de este modelo, las dos tendencias se explican a partir de procesos diferentes observados en caracterizaciones recientes de los manantiales de la zona (Alfaro, & Jaramillo, 2001). Dichos procesos corresponden a: (1) la ebullición del fluido geotérmico (inferida a partir de los manantiales San Vicente I (punto 6), San Vicente II (punto 7) y San Vicente VI (punto 11)) y posterior dilución con agua subterránea de baja temperatura (San Vicente V (punto 10) y manantiales bicarbonatados fríos), y (2) la dilución directamente a partir del fluido geotérmico (inferida a partir del manantial Termales de Santa Rosa I (punto 1). En los manantiales Santa Rosa II

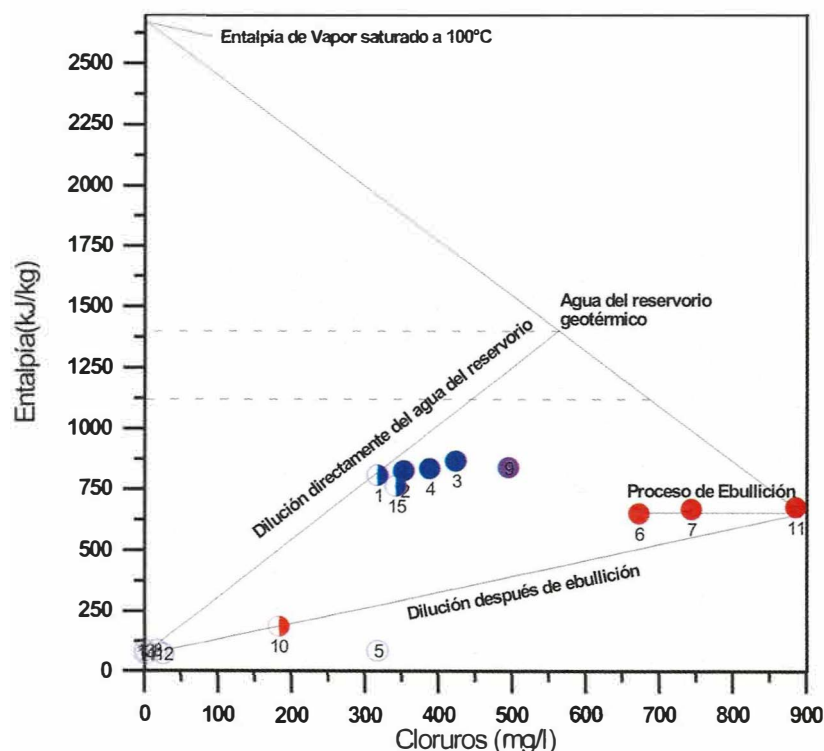


Figura 14. Modelo Entalpía - Cloruros (Nicholson, 93; Arnorsson, 2000), para manantiales del Grupo 6. Como en el modelo entalpía - sílice se identifican procesos diferentes para los dos grupos de manantiales. Los manantiales de San Vicente, al parecer, son el resultado de un proceso de ebullición por el cual incrementa su concentración de cloruros, mientras que los de Santa Rosa, con una entalpía mayor, al parecer provienen de la dilución directa desde el fluido de reservorio.

(punto 15), La Piscina (punto 2), El Cortijo I y II (puntos 3 y 4) y San Vicente IV (punto 9) se infiere la combinación de ebullición y mezcla. La entalpía estimada en el reservorio, a partir de la gráfica Entalpía - Cloruros con referencia en el manantial Termales Santa Rosa I (punto 1), es de 1.400 kJ/kg, equivalente a 310°C.

En resumen, el modelo Entalpía - Cloruros permite establecer que los manantiales de Santa Rosa no sufren enfriamiento conductivo y que son la resultante de un proceso de dilución a partir del agua de reservorio con agua somera que disminuye su concentración en cloruros y en sílice y la incrementa en bicarbonato (así como magnesio y calcio).

Por su parte, los manantiales de San Vicente reflejan un proceso de ebullición a entalpía constante de un fluido con temperatura inferior a la del reservorio, en el que su concentración de cloruros se incrementa. La concentración de sílice de estos manantiales es menor que la de los de Santa Rosa porque el agua de partida para el proceso de ebullición tiene un contenido menor de sílice.

El Grupo 7 incluye solamente al manantial del Bosque del Otún, el cual es tibio (22°C), sulfatado, ligeramente ácido y normalmente relacionado con el volcán Santa Isabel. Su rasgo principal es un caudal muy abundante, estimado en 1.000 l/s (CHEC, et al., 1983). Sin embargo teniendo en cuenta las características citadas, su contenido en especies conservativas (Cl: 1,21 mg/l, B: 0,03 mg/l y Li: 0 mg/l), y su composición relativa Na-K-Mg (representado en la Figura 5 junto con los manantiales del Grupo 3), el agua de este manantial es vapor calentada, no representativo de un reservorio geotérmico (aunque probablemente está asociado a su proceso de ebullición en el ascenso a la superficie) ni revela la contribución de un sistema volcánico magmático. Su origen superficial también se refleja en su composición relativa de cationes

mayores, la cual es dominada por el ión calcio (Tabla 1).

El Grupo 8 está conformado por 16 manantiales, tibios en su mayoría, ubicados alrededor del volcán Nevado del Tolima (Figura 1), clasificados como bicarbonatados y sulfatados, probablemente vapor - calentados. En general, considerando su contenido en cloruro, litio, boro y sulfato, indicado en la Tabla 1, estos manantiales no reciben contribución significativa de aguas de reservorio geotérmico.

El origen superficial y la consecuente inmadurez de los manantiales de este grupo también se ve reflejado en un contenido relativo de magnesio (Na/1.000-K/100-Mg^{0,5}) superior a 96%. Aunque se trata de aguas inmaduras, se aplicaron los geotermómetros basados en la concentración de sílice, para estimar su temperatura mínima probable en el subsuelo, teniendo en cuenta su pH neutro. Como se indican en la Tabla 2, esta temperatura alcanzaría los 180°C, para los manantiales de El Rancho. A partir del modelo Entalpía - Sílice, presentado en la Figura 15, se estima para el reservorio una temperatura alrededor de 210°C (900 kJ/kg) y su concentración de sílice, en 310 mg/l, si se asume que las aguas de El Rancho (puntos 2 y 3) se generan por dilución de agua separada después de ebullición a 100°C.

Como observaron Gil Cruz et al., 1998, los manantiales sulfatados mezclados con bicarbonatados, según señala su pH neutro, indican una probable zona de ebullición del fluido geotérmico hacia el norte del Nevado del Tolima. El agua geotérmica clorurada en este sistema no alcanzaría la superficie, excepto por moderadas contribuciones mencionadas, en los manantiales de El Rancho (concentración de cloruros cercana a 10%).

Finalmente, **el Grupo 9**, ubicado al sur de la zona de estudio, consta de 17 manantia-

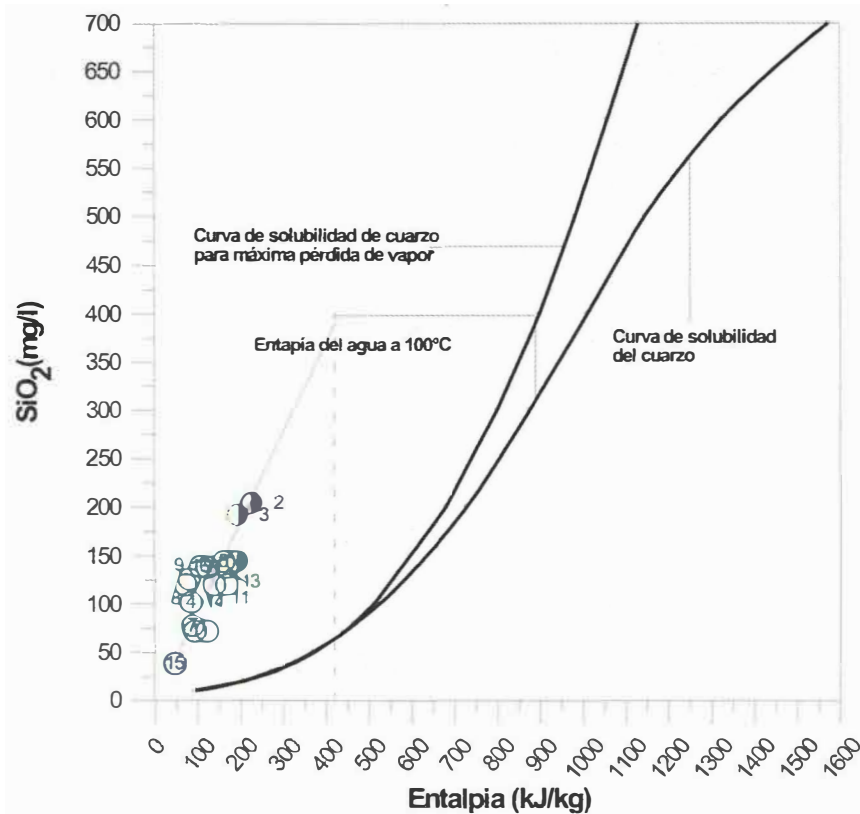


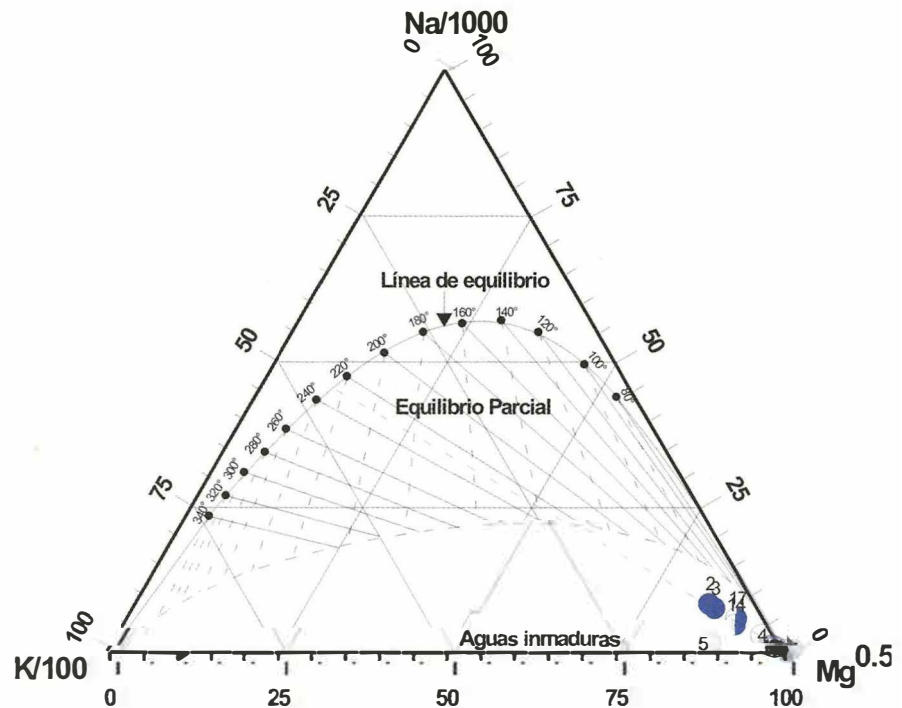
Figura 15. Modelo Entalpía - Sílice (Nicholson, 93; Arnorsson, 2000), para manantiales del Grupo 8. Aunque no se registran aguas cloruradas, los manantiales de este grupo exhiben concentraciones relativamente altas de sílice. Asumiendo que estos manantiales se generan por dilución de agua separada por ebullición a 100°C, el reservorio geotérmico tendría una temperatura de unos 230°C.

les bicarbonatados (Figura 1), ubicados sobre el río Toche en cercanías de la caldera del volcán Cerro Machín. Las temperaturas más altas (94 y 74°C) se registran en La Piscina (manantiales 2 y 3). A partir de la composición química, presentada en la Tabla 1, los manantiales calientes y tibios de este grupo, con concentraciones relativamente altas de cloruros, litio y boro, reflejan la contribución significativa de aguas cloruradas de reservorio geotérmico, aun cuando son dominadas por el ión bicarbonato. En general, en sistemas hidrotermales asociados a estrato - volcanes, las aguas bicarbonatadas se forman en la región marginal superficial del sistema, en donde el gas carbónico es absorbido en aguas subterráneas frías (Simmons, 1997). En este caso, las aguas bicarbonatadas alcanzan hasta 94°C, lo cual permite plantear que el agua de los manantiales de este grupo

es una mezcla de fluido de dos acuíferos, uno profundo y caliente de agua clorurada originada en el reservorio geotérmico y uno menos profundo formado por agua subterránea calentada por vapor condensado y gases, separados por ebullición del fluido geotérmico, que lo enriquecen en bicarbonato y, en menor proporción, en sulfato. Esta posibilidad es consistente con las concentraciones de bicarbonato y de sulfato de los manantiales más calientes. Esta mezcla, a poca distancia del Cerro Machín, hace suponer un sistema hidrotermal de dimensiones pequeñas, como había sido planteado a partir de criterios geovolcanológicos y tectónicos (CHEC et al., 1983).

La composición relativa Na-K-Mg, presentada en la Figura 16, señala la inmadurez de los manantiales del Grupo 9, derivada de la mezcla con aguas menos profundas. Dicha

Figura 16. Composición relativa Na-K-Mg (Giggenbach, 1988), para manantiales del Grupo 9. Aunque la alta composición relativa de magnesio señala la mezcla con aguas someras frías, se identifica claramente una tendencia de mezcla, en la que los manantiales de La Piscina (2 y 3) serían los afectados en menor proporción. La temperatura indicada por la extrapolación de dicha tendencia sobre la línea de equilibrio es de unos 230°C.



mezcla se ilustra muy bien en la tendencia lineal que describen los puntos, cuya extrapolación sobre la línea de equilibrio indica una temperatura del reservorio de unos 230°C. Los manantiales más calientes (2 y 3) se identifican como los menos alejados de la línea de equilibrio y, en consecuencia, como los más representativos del fluido geotérmico.

La composición relativa de especies conservativas (Cl-B-Li), presentada en la Figura 17, muestra diferencias significativas en la relación Cl/B entre las aguas de los manantiales del río Toche (5, 6, 7, 8, 9, 11, 12, 13), el San Juan (4) y los más calientes cercanos al volcán Cerro Machín (2, 3 y 14). Esta diferencia plantea la posibilidad de que la mezcla identificada por la relación Na-K-Mg, esté conformada, además del fluido geotérmico y del agua somera fría, por otra fuente. Las aguas más calientes muestran una mayor concentración relativa de boro, la cual podría

explicarse por la absorción de vapores magnésicos más ricos en la relación B/Cl, en el sistema hidrotermal, o por una absorción más reciente, comparada con la de los sistemas a que pertenecen los grupos anteriores de manantiales termales, si se tiene en cuenta la mayor volatilidad del boro respecto del cloruro, que hace que en las etapas más tempranas y calientes, de evolución del sistema geotérmico, el boro (y otros componentes de alta volatilidad como As, Sb y Hg), salgan del sistema, con la consecuente disminución de su concentración en el fluido geotérmico remanente (Giggenbach & Goguel, 1989).

La temperatura estimada para el reservorio alcanza 220-240°C con el geotermómetro Na/K, como se indica en la Tabla 2. En los manantiales más calientes, el geotermómetro de sílice, aunque altamente afectado por el proceso de dilución, alcanza temperaturas superiores a 200°C. El modelo Entalpía - Sí-

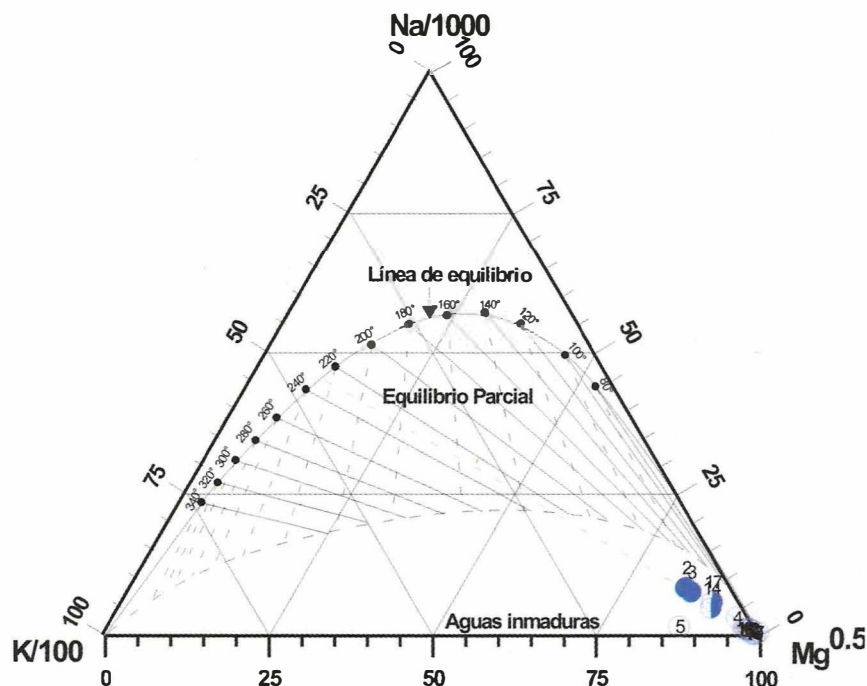


Figura 17. Composición relativa Cl-Li-B (Giggenbach, 1991) para manantiales del Grupo 9. Las diferencias evidentes en la relación Cl/B sugieren diferencias en el origen de las fuentes que alimentan estos manantiales. Es decir, que la mezcla observada a partir de la composición relativa Na-K-Mg no es solamente una dilución y que otra fuente podría estar involucrada. Los manantiales más calientes registran la mayor composición relativa en boro, lo cual estaría asociado con una absorción de gases magmáticos más reciente que en los grupos restantes.

lice presentado en la Figura 18 sugiere que los manantiales con mayor concentración de sílice (y más calientes) se han formado por dilución del fluido geotérmico después de un proceso de ebullición o que han sufrido enfriamiento por conducción sin precipitación de sílice. La primera opción hace posible estimar a partir de los manantiales de Puente Tierra, una temperatura del reservorio alrededor de 245°C (1.060 kJ/kg) y la concentración de sílice en 450 mg/l.

La aplicación del modelo Entalpía - Cloruros, presentado en la Figura 19, pone una vez más en evidencia las diferencias en la composición de los manantiales de los ríos Toche - San Juan y las más cercanas al Cerro Machín. Las primeras se alinean en una tendencia independiente a las más calientes del Cerro Machín y al parecer reciben la contribución de una fuente clorurada de menor temperatura, de la que el manantial del río San Juan (punto 4) es el más representativo, con 496 mg de

cloruro. Probablemente, dicha fuente es rica en otras especies iónicas (bicarbonato, calcio y magnesio) que incrementan su salinidad por encima de la de los manantiales más calientes, como ilustra la Figura 20. Volviendo al modelo Entalpía - Cloruros, si los manantiales 3 y 17 se forman directamente por dilución del agua de reservorio, como se indica en el diagrama por la línea recta de pendiente positiva, su temperatura estaría alrededor de 267°C (1.170 kJ/kg).

3.2 Usos potenciales

3.2.1 Usos como recurso energético

Considerando únicamente el criterio de temperatura estimada a partir de la composición de los manantiales evaluados y a partir del diagrama Lindal, presentado en la Figura 21, los reservorios que alimentan los manantiales de los grupos 1, 4, 5, 6 y 9, probablemente tienen potencial de utilización en generación

Figura 18. Modelo Entalpía – Sílice (Nicholson, 1993; Arnorsson, 2000) para manantiales del Grupo 9. Asumiendo el origen de estos manantiales a partir de la dilución de agua separada después de un proceso de ebullición a 100°C, la temperatura máxima probable inferida con base en los manantiales de Puente Tierra (11 y 14) que, aunque contienen la mayor concentración de sílice, no son los más calientes en superficie, sería de unos 245 °C (1.060 kJ/kg).

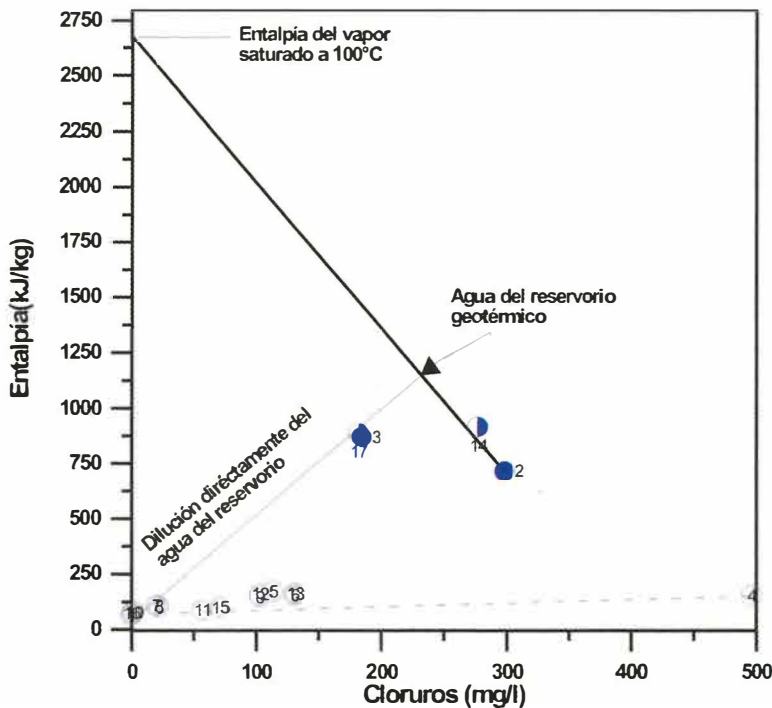
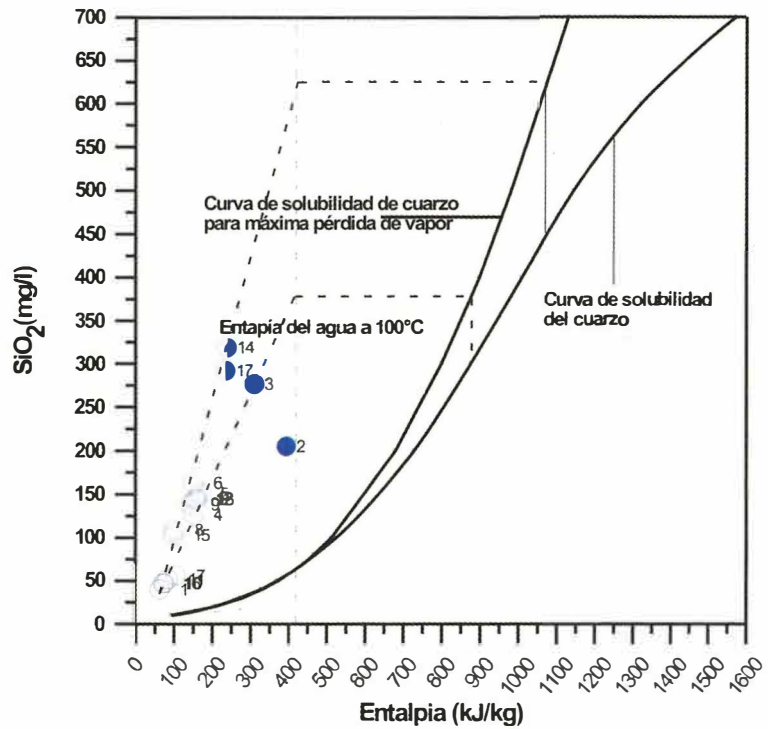


Figura 19. Modelo Entalpía – Cloruros (Nicholson, 93; Arnorsson, 2000), para manantiales del Grupo 9. Los manantiales con temperatura inferior a 40°C (a lo largo de los ríos Toche y San Juan) podrían estar relacionados en un proceso de mezcla independiente de los más calientes cercanos al Cerro Machín. El manantial más concentrado de la mezcla propuesta sería el manantial del río San Juan (4), cuya concentración en cloruros y temperatura, sugiere la contribución de una fuente salina de baja temperatura. Es probable que los manantiales más calientes se originen por ebullición (14 y 2) y por dilución del agua del reservorio (3 y 17), que estaría a unos 267°C (1.170 kJ/kg).

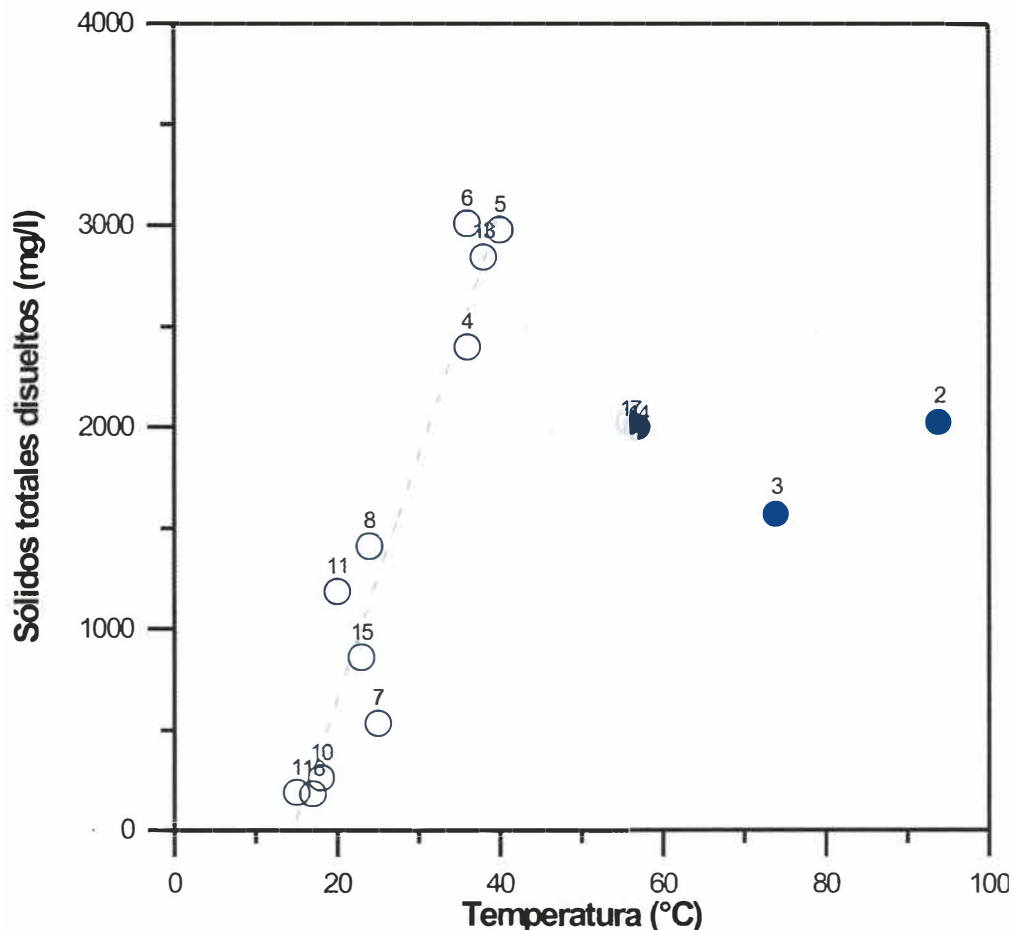


Figura 20. Variación de la concentración de sólidos totales en función de la temperatura para manantiales del Grupo 9. Como se observa en la figura anterior a partir de la concentración de cloruros, los manantiales con temperatura inferior a 40°C al parecer reciben la contribución de una fuente salina de menor temperatura la cual es rica, además, en bicarbonato, calcio y magnesio.

eléctrica, por métodos convencionales (vapor de agua como motor de turbinas), dado que exceden los 180°C. Adicionalmente, los recursos de los grupos citados y de los Grupos 3 y 8 podrían ser utilizados en cualquiera de los usos de menor requerimiento energético indicados en el diagrama Lindal, tales como la generación eléctrica por ciclo binario (isopentano u otro hidrocarburo liviano gasificado como motor de turbinas), procesos de evaporación, secado industrial (cementos, produc-

tos agrícolas, carne de pescado), sistemas de calefacción, refrigeración, aire acondicionado, usos agrícolas, acuicultura y balneología.

3.2.2 Usos en termalismo

Los usos en termalismo o como aguas mine-romedicinales incluyen la balneología médica y el aprovechamiento como agua natural embotellada. Teniendo en cuenta que este es uno de los usos de más fácil implementación

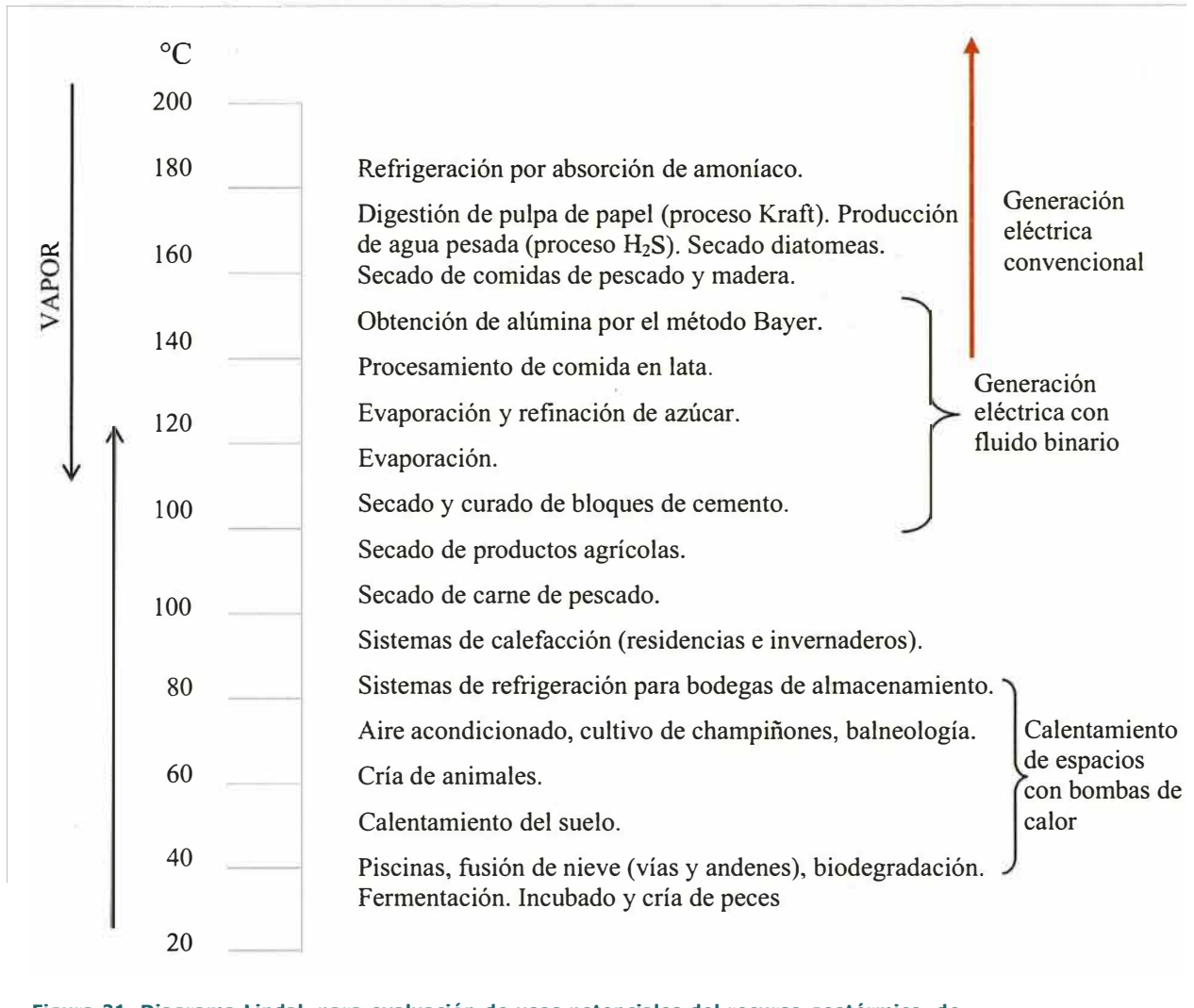


Figura 21. Diagrama Lindal, para evaluación de usos potenciales del recurso geotérmico, de acuerdo con la temperatura del reservorio. (Gudmundsson et al., 1985, en Lund et al., 1999 y <http://geoheat.oit.edu/bulletin/bull18-3/art48.htm>). En la generación eléctrica se utilizan sistemas hasta de 325°C.

y que en la práctica es el único aprovechamiento que se ha dado en Colombia al recurso geotérmico (manantiales), los manantiales del Complejo Volcánico Cerro Bravo – Cerro Machín se clasificaron individualmente, con los resultados presentados en la Tabla 3, de acuerdo con criterios de clasificación para estos usos, propuestos por Armijo & San Martín (1994), resumidos en la Tabla 4.

3.2.2.1 Usos tópicos

Las propiedades como (1) estimulante, mejorador de la circulación de órganos internos, activadores de cambios metabólicos y vasoconstrictores, (2) sedante, y (3) para combatir contracciones e hipertonia muscular, derivadas de la temperatura, se indican para cada manantial, en la Tabla 3. Sin embargo, un buen número de manantiales registran

temperaturas hipertermales para el cuerpo humano (más de 50°C) y su aplicación en termalismo depende de la temperatura de utilización después de su enfriamiento.

Aguas cloruradas (> 20% en meq/l, de aniones totales)

Alrededor de 35 manantiales distribuidos en los Grupos 1 (San Luis, Aguacatal), 3 (Hacienda Granates), 4 (área de Botero Londoño), 5 (Santo Domingo), 6 (Santa Rosa) y 9 (Machín) se clasifican como aguas cloruradas para uso tópico (más de 20% de cloruro en meq/l). A este tipo de aguas se asocian, entre otras propiedades, las de servir como coadyuvantes en tratamientos de enfermedades reumáticas y envejecimiento articular (Tabla 4).

Los manantiales clorurados de Santo Domingo, Santa Rosa y Machín extienden su potencial de utilización a tratamientos en neuralgias, dermatopatías y ginecopatías, dado su carácter bicarbonatado. De igual manera, los manantiales de Hacienda Granates, Botero Londoño, Santo Domingo, Santa Rosa, San Vicente y Machín, por ser además silíceos, flexibilizan y elastizan la piel y alivian la esclerodermia o endurecimiento de la piel.

Aguas bicarbonatadas (más de 50% en meq/l, de aniones totales)

El tipo bicarbonatado es el que se registra con mayor frecuencia en todos los grupos de la zona de estudio. Las aguas termales de este tipo, como se expresó anteriormente, son utilizadas para tratamiento de reumatismos, neuralgias, dermatopatías y ginecopatías.

Las aguas termales de La Calera (Grupo 1), La Yuca (Grupo 3), Las Nereidas (Grupo 4), El Rancho y La Florida (Grupo 8), Machín y

Río Toche (Grupo 9) por su carácter silíceo, podrían ser utilizadas en tratamientos para flexibilizar la piel. Adicionalmente, los manantiales de El Rancho podrían servir en el tratamiento de psoriasis por su contenido de sulfatos.

Aguas sulfatadas (más de 50% en meq/l, de aniones totales)

A este tipo de agua corresponden Hotel Termales, Aguas Calientes, Quebrada Corralitos, El Oso, El Coquito y Gualí (Grupo 2), El Recodo y Chorro Negro (Grupo 4) y los manantiales de El Cebollar (Grupo 8). La principal aplicación tópica reconocida para este tipo de aguas es el tratamiento de algunos problemas de la piel como la psoriasis. También, por el carácter silíceo de todos estos manantiales, podrían ser utilizados para otros problemas de piel como la esclerodermia.

Aunque el pH natural de la piel está entre 5,5 y 6,5, es posible que los manantiales de Hotel Termales y Aguas Calientes, con pHs extremos alrededor de 1,6 y 1,3, tengan propiedades en el tratamiento de algunas dermatopatías tales como la dermatitis atópica, como se ha demostrado en manantiales sulfatados de acidez muy elevada ¹.

Adicionalmente, el contenido de sulfuros, superior a 1 mg/l en Hotel Termales y Aguas Calientes ², del Grupo 2, les confiere las propiedades indicadas en la Tabla 4, que extienden su potencial de utilización a tratamiento de enfermedades respiratorias, entre otras.

3.2.2.2 Agua natural embotellada

Para evaluar el potencial como agua natural embotellada, se consideraron solamente los manantiales con temperatura igual o inferior a 20°C.

¹ Disponible en <http://www.soc.nii.ac.jp/jarm/english/abstract/vol34/340040EA.html>. Julio de 2003

² Ingeominas. Tablas de variación de la composición de manantiales termales del Nevado del Ruiz. Proyecto de vigilancia de la actividad volcánica.

**Tabla 3 Clasificación de los manantiales del complejo Cerro Bravo
- Cerro Machín, para usos tópicos como aguas mineromedicinales.**

Manantial		Criterio de clasificación/Temperatura			Usos tópicos			
GRUPO 1								
Punto	Manantial/Localidad	T (°C)	Clasificación por temperatura	Acción terapéutica debida a la temperatura	>20% meq/l Cl	>50% meq/l SO ₄	>50% meq/l HCO ₃	> 50 mg/l H ₂ SiO ₃ mg/l
1	Aguacatal I	37	Mesotermal	Sedante	Clorurada		Bicarbonatada	Silícea
2	Aguacatal II	37	Mesotermal	Sedante	Clorurada		Bicarbonatada	Silícea
4	El Jordán I	25	Hipotermal	Vasoconstrictora			Bicarbonatada	Silícea
8	La Calera I	26	Hipotermal	Vasoconstrictora			Bicarbonatada	Silícea
9	La Calera II	28	Hipotermal	Vasoconstrictora			Bicarbonatada	Silícea
11	Termal S. Luis I	42	Mesotermal	Tratamiento contracciones e hipertonia muscular	Clorurada		Bicarbonatada	Silícea
12	Termal S. Luis II	45	Mesotermal	Tratamiento contracciones e hipertonia muscular	Clorurada		Bicarbonatada	Silícea
GRUPO 2								
1	Hotel Termales El Ruiz 1	63	Hipertermal			Sulfatada		Silícea
2	Hotel Termales El Ruiz 2	61	Hipertermal			Sulfatada		Silícea
4	Aguas Calientes	60	Hipertermal			Sulfatada		Silícea
7	Termales El Ruiz	36	Mesotermal	Sedante		Sulfatada		Silícea
9	Agua Blanca	35	Mesotermal	Sedante		Sulfatada		Silícea
11	El Calvario	57	Hipertermal			Sulfatada		Silícea
12	El Coquito	33	Mesotermal	Estimulante, mejora circulación, activación de cambios metabólicos, vasoconstrictores		Sulfatada		Silícea
13	El Oso	22	Hipotermal	Vasoconstrictora		Sulfatada		Silícea
14	Corralitos	29	Hipotermal	Vasoconstrictora		Sulfatada		Silícea
15	Guali	62	Hipertermal			Sulfatada		Silícea
GRUPO 3								
2	Granates	55	Hipertermal		Clorurada			Silícea
3	La Yuca	37	Mesotermal	Sedante			Bicarbonatada	Silícea
4	La Yuca	40	Mesotermal	Tratamiento contracciones e hipertonia muscular			Bicarbonatada	Silícea
GRUPO 4								
1	Hacienda Termales Botero Londoño II	92	Hipertermal		Clorurada			Silícea
4	El Billar	92	Hipertermal		Clorurada			Silícea
5	Hacienda Termales Botero Londoño II	93	Hipertermal		Clorurada			Silícea
6	Las Nereidas I	46	Mesotermal				Bicarbonatada	Silícea
7	Las Nereidas II	28	Hipotermal	Vasoconstrictora			Bicarbonatada	Silícea
8	El Recodo	54	Hipertermal			Sulfatada		Silícea
10	Chorro Negro	51	Hipertermal			Sulfatada		Silícea

Continuación Tabla 3 Clasificación de los manantiales del complejo Cerro Bravo – Cerro Machín, para usos tópicos como aguas mineromedicinales.

Manantial		Criterio de clasificación/Temperatura			Usos tópicos			
GRUPO 5								
Punto	Manantial/Localidad	T (°C)	Clasificación por temperatura	Acción terapéutica debida a la temperatura	>20% meq/l Cl	>50% meq/l SO ₄	>50% meq/l HCO ₃	> 50 mg/l H ₂ SiO ₃ mg/l
2	Santo Domingo I	29	Hipothermal	Vasoconstrictora	Clorurada		Bicarbonatada	
3	Santo Domingo II	32	Mesothermal	Estimulante, mejora circulación, activación de cambios metabólicos, vasoconstrictores	Clorurada		Bicarbonatada	Silíceas
5	Santo Domingo III	25	Hipothermal	Vasoconstrictora	Clorurada		Bicarbonatada	Silíceas
10	Cristalina Baja	21	Hipothermal	Vasoconstrictora	Clorurada		Bicarbonatada	Silíceas
Manantial		Temperatura			Usos tópicos			
GRUPO 6								
Punto	Manantial/Localidad	T (°C)	Clasificación por temperatura	Acción terapéutica debida a la temperatura	>20% meq/l Cl	>50% meq/l SO ₄	>50% meq/l HCO ₃	> 50 mg/l H ₂ SiO ₃ mg/l
1	Termales Santa Rosa	52	Hiperthermal		Clorurada		Bicarbonatada	Silíceas
2	La Piscina	63	Hiperthermal		Clorurada		Bicarbonatada	Silíceas
3	El Cortijo I	65	Hiperthermal		Clorurada			Silíceas
4	El Cortijo II	65	Hiperthermal		Clorurada			Silíceas
6	San Vicente I	84	Hiperthermal		Clorurada			Silíceas
7	San Vicente II	90	Hiperthermal		Clorurada			Silíceas
9	San Vicente IV	66	Hiperthermal		Clorurada			Silíceas
10	San Vicente V	43	Mesothermal	Tratamiento contracciones e hipertonia muscular	Clorurada			Silíceas
11	San Vicente VI	91	Hiperthermal		Clorurada			Silíceas
15	Termales S. Rosa II	50	Mesothermal		Clorurada			Silíceas
GRUPO 7								
1	El Bosque del Otún	22	Hipothermal	Vasoconstrictora		Sulfatada		Silíceas
GRUPO 8								
1		21	Hipothermal	Vasoconstrictora			Bicarbonatada	Silíceas
2	El Rancho	53	Hiperthermal					Silíceas
3		45	Mesothermal	Tratamiento contracciones e hipertonia muscular				Silíceas
5	La Florida (El Turpial)	28	Hipothermal	Vasoconstrictora			Bicarbonatada	Silíceas
6	La Florida (El Turpial)	37	Mesothermal	Sedante			Bicarbonatada	Silíceas
10	Zona del Termal El Cebollar	45	Mesothermal			Sulfatada		Silíceas
11	Zona del Termal El Cebollar	39	Mesothermal	Tratamiento contracciones e hipertonia muscular		Sulfatada		Silíceas
12	Zona del Termal El Cebollar	28	Hipothermal	Vasoconstrictora		Sulfatada		Silíceas
13	Zona del Termal El Cebollar	39	Mesothermal	Tratamiento contracciones e hipertonia muscular		Sulfatada		Silíceas

Continuación Tabla 3 Clasificación de los manantiales del complejo Cerro Bravo – Cerro Machín, para usos tópicos como aguas mineromedicinales.

Manantial		Criterio de clasificación/Temperatura			Usos tópicos			
Punto	Manantial/Localidad	T (°C)	Clasificación por temperatura	Acción terapéutica debida a la temperatura	>20% meq/l Cl	>50% meq/l SO ₄	>50% meq/l HCO ₃	> 50 mg/l H ₂ SiO ₃ mg/l
14	Zona del Termal El Cebollar	32	Mesotermal	Estimulante, mejora circulación, activación de cambios metabólicos, vasoconstrictores		Sulfatada		Silícea
16	Aquilino	24	Hipotermal	Vasoconstrictora			Bicarbonatada	Silícea
GRUPO 9								
2	La Piscina- Machin	94	Hipertermal		Clorurada		Bicarbonatada	Silícea
3	La Piscina-Machín	74	Hipertermal		Clorurada		Bicarbonatada	Silícea
4	San Juan - Rio San Juan - Machín	36	Mesotermal	Sedante	Clorurada		Bicarbonatada	Silícea
5	Río Toche	40	Mesotermal	Tratamiento contracciones e hipertonia muscular			Bicarbonatada	Silícea
6	Río Toche	36	Mesotermal	Sedante			Bicarbonatada	Silícea
7	Río Toche	25	Hipotermal	Vasoconstrictora			Bicarbonatada	Silícea
8	Río Toche	24	Hipotermal	Vasoconstrictora			Bicarbonatada	Silícea
9	Río Toche	34	Mesotermal	Estimulante, mejora circulación, activación de cambios metabólicos, vasoconstrictores			Bicarbonatada	Silícea
12	Río Toche	37	Mesotermal	Sedante			Bicarbonatada	Silícea
13	Río Toche	38	Mesotermal	Tratamiento contracciones e hipertonia muscular			Bicarbonatada	Silícea
14	Puente Tierra Alta	57	Hipertermal		Clorurada		Bicarbonatada	Silícea
15	California, Toche Bajo	23	Hipotermal	Vasoconstrictora	Clorurada		Bicarbonatada	Silícea
17	Puente Tierra	56	Hipertermal		Clorurada		Bicarbonatada	Silícea
		54						

**Tabla 4 Acción terapéutica de aguas mineromedicinales,
de acuerdo con Armijo & San Martín, 1994**

Tipo	Criterio de clasificación	Acción terapéutica	Técnicas de administración
Cloruradas	Mayor de 20% de aniones totales en eq/l Más de 607 mg/l	Estimulantes de la cicatrización y reparación de afecciones óseas y ganglionares, favorables en el tratamiento de afecciones respiratorias y cutáneas. Coadyuvante o apoyo a tratamientos en: reumatismos crónicos, espondilartritis reumática, artrosis vertebrales, neuralgias ciáticas, envejecimiento articular, secuelas de traumatismos, recuperación de fatiga muscular, hipotrofia estatura-ponderal de los niños, retardo en la aparición de la pubertad, adenitis, osteomielitis y osteoartritis psoriasis, acné, úlceras varicosas, secuelas de quemaduras, afecciones ginecológicas, afecciones del aparato circulatorio (pacientes sin hipertensión), trastornos funcionales ligados a distonias vegetativas, enfermedades psicósomáticas y estado de stress psíquico.	Balneación a temperatura variable, una vez al día, durante 3 a 4 semanas. Duración de cada sesión: de 5 a 7 minutos para niños y aumento gradual hasta 13 minutos. En adultos, de 10 a 15 minutos con aumento gradual hasta 20 ó 30 minutos. Otras técnicas de administración son aplicaciones locales, utilización de duchas y chorros, pulverizaciones, inhalaciones y aerosoles, lavados e irrigaciones.
Cloruradas	> 200 mg/l	Estimulan la secreción y la motilidad gástrica e intestinal, lo cual facilita la salida de la bilis al intestino y reduce la flora entérica y una vez absorbidas activan el metabolismo general	Ingestión
Sulfatadas	> 200 mg/l de sulfatos. Anión dominante sulfato, sódicas y magnésicas	Purgantes, laxante, acción colagoga (favorables en colecistopatías y colediscinesias), agentes hepatoprotectores (mejora la actividad de la célula hepática y estimula la actividad enzimática).	Ingestión, de 5 a 15 g como purgantes osmóticos salinos, 3 g como purgante y hasta 1 g como laxante.
Sulfatadas	> 200 mg/l de sulfatos. Anión dominante sulfato, Cálcicas	Acción sobre el equilibrio neurovegetativo (simpático), acción diurética (prevención de formaciones calculosas), procesos hepatobiliares (en tratamiento de migraña, colitis)	Ingestión
Sulfatadas	Con salinidad superior a 1g/l, el anión predominante es el sulfato	Enfermedades de la piel (psoriasis)	Tópico, Baños
Sulfuradas	Más de 1 mg de sulfuro	Desensibilizante, mejora respuestas anafilácticas y alérgicas (facilitan recuperación de rinitis, faringitis, sinusitis, laringitis, bronquitis, asma. Potencia la actividad de la insulina, acción eutrófica en el aparato respiratorio (mucosa), acción mucolítica mejoradora de la circulación local, antiinflamatoria, eutrófica y cicatrizantes. Tratamiento de psoriasis, afecciones reumatológicas	Absorbido por todas las vías. Puede atravesar la piel y las mucosas. Inhalaciones para problemas respiratorios (nebulizadores y aerosoles)

**Continuación Tabla 4 Acción terapéutica de aguas mineromedicinales,
de acuerdo con Armijo & San Martín, 1994**

Tipo	Criterio de clasificación	Acción terapéutica	Técnicas de administración
Sulfuradas		Antitóxicas. Acción antiácida y antipéptica en el aparato digestivo, estimulante del peristaltismo.	Ingestión (dosis pequeñas)
Sulfuradas		Afecciones odonto-estomatológicas, tratamiento de manifestaciones edematosas. Procesos ginecológicos: mejora la vascularización y el trofismo tisular	Aplicaciones tópicas/irrigaciones, pulverizaciones
Tipo	Criterio de clasificación	Acción terapéutica	Técnicas de administración
Bicarbonatadas	> 600 mg de bicarbonato	Generalmente utilizadas como agua de mesa. Neutralizantes de la acidez gástrica. Favorece la acción de los fermentos pancreáticos y el poder saponificante de la bilis. Tratamientos de gastritis primitivas, estados dispépticos, hernia hiatal.	Ingestión
Bicarbonatadas	Con salinidad superior a 1g/l, el anión predominante es el bicarbonato	Las aguas calientes de este tipo son utilizadas para reumatismos, neuralgias, dermatopatías, ginecopatías	Baños, duchas
Oligometálicas o indeterminadas	Salinidad inferior a 1g/l y temperatura por encima de 20°C = Acratotermas	Procesos álgicos y contracturantes de aparato locomotor, articulares o musculares, de origen reumático, traumático, distrófico, algias pelvianas, enterocolitis espasmódicas y álgicas, dermatosis crónicas pruriginiosas, gota articular.	Baños, duchas, chorros
Sódicas	> 200 mg/l de sodio	Poder hidratante, acción reguladora de los procesos de permeabilidad celular. Con el Ca, actual sobre el potencial de membrana, procesos enzimáticos (ya que actúa en equilibrio iónico). Mantiene la excitación neuromuscular	Ingestión
Cálcicas	> 150 mg/l de calcio	Funciones en los líquidos extracelulares, esencial para la actividad normal del sistema nervioso, corazón, musculatura vascular, coagulación de la sangre, equilibrio electrolítico, osificación.	Ingestión
Magnésicas	> 50 mg/l de magnesio	Indispensable para mantener la integridad neuromuscular. Depresor del sistema nervioso, activador de varios sistemas enzimáticos	Ingestión
Potásicas		Mantenimiento del equilibrio iónico. Indispensable como catión intracelular. Contribuye a mantener el potencial negativo de la célula, el tono muscular y las actividades del sistema nervioso vegetativo.	Ingestión
Ferrosas	> 1 mg/l de hierro II	Estimulantes de la hematopoyesis y de las oxidaciones tisulares	
Silíceas	>50 mg/l de H ₂ SiO ₃	Flexibiliza, elastiza la piel, alivia la esclerodermia (endurecimiento de la piel)	Tópico, baños

Continuación Tabla 4 Acción terapéutica de aguas mineromedicinales,
de acuerdo con Armijo & San Martín, 1994

Tipo	Criterio de clasificación	Acción terapéutica	Técnicas de administración
Silíceas		Combatir algunas enfermedades gástricas como úlceras, gastritis, caries	Ingestión
Radioactivas		Sedantes, analgésicas, reguladoras de equilibrio neurovegetativo	Tópico, baños
Débilmente mineralizadas	Hasta 1000 mg/l de residuo seco	Diuréticas (en tratamiento de litiasis, infecciones urinarias y ciertas nefropatías), facilitan la eliminación de orina, catabolitos, arenillas y pequeños litos	Ingestión
Temperatura	Acción biológica de aguas termales		
30-34	Estimulantes. Mejoradores de la circulación de órganos internos. Activadores de cambios metabólicos. Vasoconstrictores		
35-37	Sedantes		
37 - 50 (1)	Revulsivos y resolutivos: Combatir contracciones e hipertonia muscular		
(1) Por encima de 50°C, se registran quemaduras de la piel	50° se registran quemaduras en la piel		
Rango (°C)	Tipo de manantial		
Hasta 20	Frías		
20-30	Hipotermiales		
30-50	Mesotermiales		
>50	Hipertermiales		

Entre los 32 manantiales distribuidos en todos los grupos, solamente tres pueden considerarse minerales, con contenido superior a 1 g/l. Estos, con composición y propiedades diferentes, relacionadas con el sistema digestivo y el metabolismo, son: El Aserradero (Grupo 1), Santa Helena (Grupo 6) y el manantial No. 11 en el río Toche (Grupo 9).

El Aserradero es un manantial bicarbonatado sódico. Este tipo de agua se utiliza como neutralizante de la acidez gástrica y en otras funciones del sistema digestivo indicadas en la Tabla 4. Por su contenido en sodio, tiene propiedades hidratantes y acción reguladora de los procesos de permeabilidad celular.

El manantial Santa Helena, de mineralización fuerte por su contenido de sólidos disueltos superior a 1.500 mg/l, se clasifica como clorurado, bicarbonatado, sódico y cálcico. Además de las propiedades gástricas e hidratantes que le confieren su contenido de bicarbonato y sodio, por su carácter clorurado, el agua de este manantial podría ser utilizado como estimulante de la secreción y motilidad gástrica e intestinal, para facilitar la salida de la bilis al intestino y reducir la flora entérica y, una vez absorbidas, activar el metabolismo general. Adicionalmente, debido a su composición cálcica, el agua de este manantial podría aprovecharse para mantener la excitación neuromuscular, para favorecer la osificación y en procesos enzimáticos, junto con el sodio (Tabla 4).

El manantial 11 en el río Toche es bicarbonatado cálcico, magnésico. Además de las propiedades derivadas de la naturaleza bicarbonatada y cálcica de este manantial, su contenido de magnesio le atribuye beneficios en el mantenimiento de la integridad neuromuscular y en la activación de varios sistemas enzimáticos.

Los 29 manantiales restantes, que corresponden a El Jordán II, El Retiro, Río Aguacatal y

Ventiladeros (La Calera), del Grupo 1; las dos fuentes frías del área de Aguas Calientes, La Hacienda Nieto y Arenales, del Grupo 2; Murillo del Grupo 3; La Poa del Grupo 4; La Telaraña, Papayal, El Pino, Pozo del Perro, Fonda Santa Rita y Cristalina Alta, del Grupo 5; San Vicente III, Peñaranda Río San Eugenio, El Cortijo III y la Quebrada La Piscina, del Grupo 6; manantial 4, 7 (La Florida), Romerales 8 y 9 y 15, del Grupo 8, y los manantiales 1, 10, 15 y 16, del Grupo 9, son de mineralización débil y muy débil, y, como tales, podrían ser utilizadas como diuréticas (en tratamiento de litiasis, infecciones urinarias y ciertas nefropatías). Éstas facilitan la eliminación de orina, catabolitos, arenillas y pequeños litos.

Los tres manantiales minerales y algunos de los de mineralización débil son, además, silíceos, de donde se deriva la posibilidad adicional de utilizarlos para combatir algunas enfermedades como úlceras, gastritis y caries.

4 CONCLUSIONES

4.1 Los sistemas hidrotermales asociados al Complejo Volcánico Cerro Bravo – Cerro Machín, se evidencian en la superficie a través de la ocurrencia de por lo menos 74 manantiales de agua termal, 27 de los cuales son de agua caliente (con temperatura superior a 50°C). Las temperaturas de descarga más elevadas (ebullición) se encuentran en manantiales de los Grupos 4 (Nevado del Ruiz, sector occidental), 6 (Santa Rosa de Cabal) y 9 (Volcán Cerro Machín).

4.2 La interacción entre los sistemas volcánico-magmático e hidrotermal asociados al Nevado del Ruiz se refleja en la composición sulfatada - clorurada ácida de los manantiales Hotel Termales y Aguas Calientes (Grupo 2), que alcanzan pHs extremos de 1,6 y 1,3, respectivamente.

4.3 En los volcanes Nevado del Ruiz y Nevado del Tolima se pueden postular zonas de ebullición del fluido geotérmico, a partir de los manantiales termales sulfatados ácidos. En el Nevado del Ruiz la zona de ebullición esta señalada en superficie por los manantiales del Grupo 2, que son los más cercanos al cráter volcánico (y por una fumarola hidrotermal - Las Nereidas - entre el límite de los Grupos 1 y 2), mientras que el agua geotérmica (clorurada neutra), como propuso Gigggenbach, 1990, fluye en dirección occidental. En el Nevado del Tolima, la zona de ebullición está localizada al nororiente del volcán y el agua geotérmica parece fluir en dirección sur, como sugiere el incremento en la concentración relativa de cloruros.

4.4 Los manantiales termales del Complejo Volcánico Cerro Bravo – Cerro Machín están asociados a sistemas hidrotermales de temperatura intermedia (entre 125 y 225°C) y alta (>225°C). Los sistemas de temperatura intermedia se identifican en los Grupos 3 (al oriente del Nevado del Ruiz), 5 (área de Santo Domingo) y 8 (Área del Nevado del Tolima). Los sistemas de temperatura alta están indicados por los Grupos 1 (Área del Volcán Cerro Bravo), 4 (Zona occidental del Nevado del Ruiz), 6 (Zona de Santa Rosa de Cabal) y 9 (Área del Volcán Cerro Machín), de los cuales el de Santa Rosa de Cabal parece ser el de mayor temperatura (hasta 310°C).

4.5 El sistema geotérmico del área de Santa Rosa de Cabal podría ser un sistema independiente del Nevado del Ruiz, como sugieren las temperaturas geoquímicas estimadas. En este sistema, que sería de mayor temperatura, la diferencia en composición de las dos áreas termales (Santa Rosa y San Vicente), se explica por dilución del agua de reservorio geotérmico con alto contenido en sílice y enriquecimiento en bicarbonato a medida que la dilución ocurre, en el área de Santa Rosa, y por ebullición isoentálpica, no necesariamente a partir del agua del reservorio, con el con-

secuente incremento en la concentración de cloruros, en el área de San Vicente la fuente de calor de este sistema podría estar asociada a cuerpos magmáticos del Paramillo de Santa Rosa, aunque no a su último evento eruptivo, cuya ocurrencia ha sido estimada como muy antigua (CHEC et al., 1983).

4.6 El desarrollo social y económico, y en consecuencia la calidad de vida de las comunidades locales y del país, podrían reforzarse en el aprovechamiento de los recursos geotérmicos que ocurren en la zona del Complejo Volcánico Cerro Bravo – Cerro Machín, el cual es muy amplio y suficiente aún para los usos de máximo requerimiento energético (generación eléctrica). Considerando la facilidad de implementación de los diferentes desarrollos geotérmicos posibles, las aplicaciones de uso directo como sistemas de calefacción (residencial y en invernaderos), cría de animales, calentamiento del suelo agrícola, cría de peces y los usos mineromedicinales, son las más viables.

4.7 Los usos de los manantiales en balnearios, implementados desde hace varias décadas en algunos manantiales de la zona, principalmente para fines recreativos, tienen múltiples posibilidades específicas derivadas de la diferencia en temperatura y composición de estos manantiales. Aquí se plantean usos posibles de acuerdo con clasificaciones médicas.

5. RECOMENDACIONES

5.1 Actualizar la caracterización química de los manantiales y evaluar su estabilidad en el tiempo.

5.2 Dar continuidad a los programas de exploración hasta las fases de perforación, para establecer la existencia de reservorios, sus

dimensiones, características de recarga, temperatura y composición.

5.3 Ampliar la caracterización de los manantiales con potencial para usos mineromedicinales, a especies químicas y microorganismos contaminantes e integrar la investigación médica para hacer posible la implementación de balnearios especializados y la optimización de los ya existentes.

BIBLIOGRAFÍA

- Alfaro, C. 2000. Mapa Geotérmico Versión 1.0. Escala a:1'500.000. INGEOMINAS. Memoria Explicativa. 41 p. Bogotá. No publicado.
- Alfaro, C, Jaramillo, L.F. 2002. Inventario y geoquímica de las fuentes termales de Santa Rosa de Cabal (Risaralda). INGEOMINAS. Informe Técnico, 26 p. Bogotá
- Alfaro, C.; Aguirre, A., Jaramillo, L.F. 2002. Inventario de fuentes termales en el Parque Nacional Natural de los Nevados. INGEOMINAS. Informe Técnico, 101 p. Bogotá
- Arnorsson, S. 2000. Mixing Process in Upflow Zones and Mixing Models. En: Arnorsson, S. (ed.). Isotopic and chemical techniques in geothermal exploration, development and use. IAEA. 200-211. Viena
- Arango, E.; Buitrago, J.; Cataldi, R.; Ferrara, G.C.; Panichi, C. and Villegas, V. 1970. Preliminary Study on the Ruiz Geothermal Project (Colombia). Geothermics. Spe. Iss. 2. pp 43-44.
- Armijo, M.; San Martín J. 1994. Curas balnearias y climáticas. Talasoterapia y Helioterapia. Editorial Complutense. 688 p. España.
- Calvache, M. y Monsalve, M.L. 1982. Geología, Petrografía y Análisis de Xenolitos en el Área A (Zona de Manizales) del Proyecto Geotérmico en la Región del Macizo Volcánico del Ruiz. Universidad Nacional de Colombia. Departamento de Geociencias. Tesis de Grado. Central Hidroeléctrica de Caldas (CHEC). Sección Geotermia, 118 p. Manizales.
- Central Hidroeléctrica de Caldas (CHEC) y Ente Nazionale per L'energia Elettrica (ENEL). 1968. Proyecto de Investigación Geotérmica en la Región del Macizo Volcánico del Ruiz. Translation. 41 p. Manizales
- Central Hidroeléctrica de Caldas (CHEC). 1979. Investigación geotérmica en la región del Macizo Volcánico del Ruiz (Colombia), Fase I, Programa de Trabajo. 47 p. Colombia.
- Central Hidroeléctrica de Caldas (CHEC); Instituto Colombiano de Energía Eléctrica (ICEL); Consultoría Técnica Colombiana LTDA. (CONTECOL) y Geotérmica Italiana. 1983. Investigación Geotérmica. Macizo volcánico del Ruiz. Fase II, Etapa A. Vol. I, II, III y IV. Bogotá.
- Fetzer, W.G. 1941. Fuentes Minerales y Yacimientos de Carbonato de Calcio de Santa Rosa de Cabal (Río San Ramón). Servicio Geológico Nacional, Compilación de los Estudios Geológicos de Colombia, Tomo VI, págs. 433-454. Bogotá.
- Forero, H. 1958. Fuentes Termales de Colombia. Investigación de Geología Económica. Servicio Geológico Nacional. 274 p. Bogotá.
- Garzón, G. 2001. Catálogo de fuentes termales del Parque Nacional Natural de los Nevados. INGEOMINAS. Informe Técnico. 105 p. Manizales
- Geocónsul, S.A. de C.V. 1992. Evaluación Geotérmica del Macizo Volcánico del Ruiz. Informe Final. Preparado para Constructora y

- Perforadora Latina, S.A. de C.V. 57p. Morelia (Mexico)
- Giggenbach, W. F. 1988. Geothermal solute equilibria. Derivation of Na-K-Mg-Ca geothermometers. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 52: 2749-2765. U.S.A.
- Giggenbach, W. F. & Goguel, R. L. 1989. Collection and analysis of geothermal and volcanic water and gas discharges. Report No. CD 2401. Fourth Edition. Department of Scientific and Industrial Research. 81 p. Petone, New Zealand.
- Giggenbach, W. F.; García, N.; Londoño, A., Rodríguez, L.V., Rojas S, N.; Calvache, M. L. 1990. The Chemistry of fumarolic vapor and thermal-springs discharges from the Nevado del Ruiz volcanic-magmatic-hydrothermal system, Colombia. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*. 42: 13-39. Netherlands.
- Giggenbach, W. F. 1991. Chemical Techniques in geothermal exploration. En: D'Amore, F. *Application of Geochemistry in Geothermal Reservoir Development*. 119-142. Rome.
- GilCruz, F., Ramirez, J y Alfaro, C. 1998. Evaluación sísmológica, glaciológica y geoquímica del Volcán Nevado del Tolima. Información de Abril de 1998. INGEOMINAS. Informe Técnico, 61 p. Bogotá
- INGEOMINAS. 1994. Informe de Vigilancia de la Actividad Volcánica del Complejo volcánico Cerro Bravo – Machín.
- INGEOMINAS, 1995. Boletín Semestral Actividad de los volcanes colombianos. Vol. 1. No. 1. 89 p. Bogotá
- INGEOMINAS, 1996 y 1997. Tablas de datos de monitoreo de manantiales termales. Proyecto de Vigilancia de volcanes del Complejo Volcánico Cerro Bravo – Machín. Unidad Operativa Manizales. Grupo de Geoquímica. Manizales.
- Jaramillo, L.F. 2001. Informe de Inventario de Fuentes Termales en la Zona de Santa Rosa de Cabal (Departamento de Risaralda), Sector Occidental del Parque Nacional Natural Los Nevados. INGEOMINAS, Informe inédito, 13 p. Bogotá.
- Koga, A. 2000. Hydrothermal geochemistry. Handout from the First Group Training Course on Geothermal Energy and Environmental Sciences. Kyushu University. 26 p. Japan.
- Larios, D. A. 1992. The hidrothermal system of Nevado del Ruiz Volcano, Colombia. Tesis Doctoral. Louisiana State University. 296 p. Louisiana.
- Lund, J. W. 1999. En Popovski, K.; Luna, J.W.; Gibson, D.J.; Boyd, T.L. (Ed). *Direct Utilization of Geothermal Energy*. Geo-Heat Center. Oregon Institute of Technology. 5-18. Klamath Falls.
- Monsalve, M.L.; Rodríguez, G.I.; Méndez, R.A. and Bernal, N.F. 1998. Geology of the well Nereidas 1, Nevado del Ruiz Volcano, Colombia. *Geothermal Resources Council Transactions*. Vol 22, p 263 – 267
- Nicholson, K. 1993. *Geothermal Fluids. Chemistry and Exploration Techniques*. Springer Verlag. 263. Germany.
- Simmons, S. 1997. Overview of the chemistry of geothermal fluids. *Geochemistry Lecture Handout*. Geothermal Institute. The University of Auckland. 12 pp
- Sturchio, N.C. ; Williams, S.N., García, P., N.; Londoño, C., A. 1988. The hydrothermal system of Nevado del Ruiz Volcano, Colombia. *Bull. Volcanol.*, 50: 399-412.