



INVENTARIO DE FUENTES TERMALES DEL DEPARTAMENTO DE CUNDINAMARCA

Por

Claudia Alfaro V.

- Geoquímica y Microbiología –

Alcides Aguirre C. y Nelson F. Bernal C.

- Geología –

Dra. Gulden Gokcen y Nelson F. Bernal C.

- Usos Agrícolas y Acuicultura -

Claudia Alfaro V.

- Usos Mineromedicinales -

Bogotá, agosto de 2003

República de Colombia
MINISTERIO DE MINAS Y ENERGÍA
INSTITUTO DE INVESTIGACIÓN E INFORMACIÓN GEOCIÉNTIFICA, MINERO-AMBIENTAL Y NUCLEAR

**REPÚBLICA DE COLOMBIA
MINISTERIO DE MINAS Y ENERGÍA
INSTITUTO DE INVESTIGACIÓN E INFORMACIÓN GEOCIENTÍFICA,
MINERO-AMBIENTAL Y NUCLEAR
INGEOMINAS**

**INVENTARIO DE FUENTES TERMALES DEL DEPARTAMENTO
DE CUNDINAMARCA**

Por

Claudia Alfaro V.

- Geoquímica y Microbiología –

Alcides Aguirre C. y Nelson F. Bernal C.

- Geología –

Dra. Gulden Gokcen y Nelson F. Bernal C.

- Usos Agrícolas y Acuicultura -

Claudia Alfaro V.

- Usos Mineromedicinales -

Bogotá, agosto de 2003

CONTENIDO

RESUMEN	1
ABSTRACT	2
1. INTRODUCCIÓN	3
1.1. LOCALIZACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO	4
1.2. MARCO GEOQUÍMICO	4
1.3. MARCO MICROBIOLÓGICO	5
1.4. POTENCIAL DE APROVECHAMIENTO	7
1.4.1. Acuicultura	7
1.4.2. Usos agrícolas	14
1.4.3. Usos Mineromedicinales	21
1.5. OBJETIVOS	23
2. METODOLOGÍA	24
2.1. GEOLOGÍA	24
2.2. GEOQUÍMICA	24
2.2.1. Muestreo y análisis	24
2.2.2. Evaluación geoquímica	26
2.2.3. Parámetros térmicos	26
2.3. MICROBIOLOGÍA	26
2.3.1. Muestreo microbiológico	26
2.3.2. Análisis microbiológico	27
2.4. POTENCIAL DE APROVECHAMIENTO	27
2.4.1. Generalidades	27
2.4.2. Acuicultura	27
2.4.3. Usos agrícolas	27
2.4.4. Usos mineromedicinales	28
3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	29
3.1. RASGOS GEOLÓGICOS REGIONALES	29
3.1.2. Geología Estructural	51
3.2. OCURRENCIA DE MANANTIALES EN EL DEPARTAMENTO DE CUNDINAMARCA	
53	
3.2.1. Bloque 2	60
3.2.2. Bloque 3	63
3.2.3. Bloque 4	69
3.2.5 Clasificación de Sistemas Geotérmicos en Cundinamarca	70
3.3. GEOQUÍMICA	75
3.3.1. Clasificación de los manantiales	81
3.3.2. Composición relativa Na-K-Mg	86
3.3.3. Geotermómetros	90
3.3.4. Elementos traza	93

3.3.5. Metales pesados.....	95
3.3.6. Composición Isotópica	96
3.4. CARACTERIZACIÓN MICROBIOLÓGICA	98
3.5. USOS POTENCIALES	101
3.5.1. Acuicultura	103
3.5.2. Usos Agrícolas.....	107
3.5.3. Usos mineromedicinales.....	107
4 CONCLUSIONES	114
5 RECOMENDACIONES	118
6 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	120
ANEXO 1.....	127
GLOSARIO MÉDICO	127
ANEXO 2.....	132
CONTROL DE CALIDAD ANALÍTICO	132
ANEXO 3.....	135
CRITERIOS PARA USOS DE LOS MANANTIALES TERMALES COMO AGUAS MINEROMEDICINALES	135
ANEXO 4.....	138
MAPAS DE USOS POTENCIALES DEL RECURSO GEOTÉRMICO EN CUNDINAMARCA.....	138
ANEXO 5.....	139
FOTOGRAFÍAS DE LOS MANANTIALES MÁS REPRESENTATIVOS DE CUNDINAMARCA.....	139
ANEXO 6.....	146
INFORME “MEDICIONES DE ELECTROMAGNETISMO EN LA ZONA DE LAS PISCINAS TERMALES EN EL MUNICIPIO DE TABIO”	146
ANEXO 7.....	166
DISTRIBUCIÓN DE LAS ESPECIES QUÍMICAS MAYORES EN MANANTIALES DE CUNDINAMARCA.....	166

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Caracterización química de manantiales de Cundinamarca reportada en literatura.	5
Tabla 2. Factores de calidad, procesos de monitoreo comúnmente utilizados y rangos adecuados para Acuicultura.	10
Tabla 3. Técnicas analíticas utilizadas para el análisis de las muestras. Información suministrada por el Laboratorio Thermochem Inc.	25
Tabla 4. Datos de localización y mediciones <i>in situ</i> para manantiales de Cundinamarca.	55
Tabla 5. Aspectos geológicos de los manantiales de Cundinamarca Bloque 1.	57
Tabla 6. Composición química de manantiales de Cundinamarca.	76
Tabla 7. Clasificación de los manantiales de Cundinamarca en función de su temperatura, y especies iónicas dominantes.	82
Tabla 8. Parámetros térmicos estimados a partir de la concentración de sílice, en manantiales del Departamento de Cundinamarca.	91
Tabla 10. Análisis microbiológico de manantiales termales de Cundinamarca.	100
Tabla 11. Uso actual de manantiales de Cundinamarca.	102
Tabla 13. Clasificación de los manantiales de Cundinamarca, de acuerdo con su uso potencial como aguas mineromedicinales.	108

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Granja de cultivo de Langostinos, Wairakei Nueva Zelanda.....	9
Figura 2. Curvas de crecimiento óptimo para diferentes cultivos.	15
Figura 3. Esquema de un Intercambiador de Calor para invernadero.	19
Figura 4. Proyecto de esterilización de suelos, Granja Oserian, Kenya.....	20
Figura 5. Pasos para procesar las frutas.....	21
Figura 6. Acuíferos en Cuencas Sedimentarias con la representación de un pozo de producción y su perfil de temperatura, el cual representa el comportamiento del gradiente geotérmico normal.	70
Figura 7. Modelo esquemático de un sistema de acuífero de basamento.....	71
Figura 8. Corte esquemático transversal de la Sabana de Bogotá, donde se representa la relación entre la tectónica actuante y la litología en la cuenca.	72
Figura 9. Modelo esquemático de un sistema en zona estrecha de fractura con un reservorio secundario somero.	73
Figura 10. Temperatura de descarga en manantiales de Cundinamarca.....	75
Figura 11. Variación de la concentración de sólidos totales disueltos en función de la temperatura.	81
Figura 12. Clasificación de los manantiales de Cundinamarca con base en la composición relativa de aniones dominantes.	83
Figura 15. Composición relativa Cl - HCO ₃ - SO ₄ para manantiales del Bloque 3.....	85
Figura 16. Composición relativa Cl-HCO ₃ -SO ₄ para manantiales del Bloque 4.....	85
Figura 17. Composición relativa Na-K-Mg para manantiales del Bloque 1.	87
Figura 18. Composición relativa Na-K-Mg para manantiales del Bloque 2.	87
Figura 19. Composición relativa Na-K-Mg para manantiales del Bloque 3.	88
Figura 23. Variación de la concentración de sílice y la temperatura estimada a partir del geotermómetro de cuarzo, para los posibles reservorios que alimentan los manantiales de Cundinamarca.	¡Error! Marcador no definido.

Figura 24. Modelo Entalpía-Sílice aplicado a manantiales de mayor temperatura y concentración en sílice.....	92
Figura 25. Variación de Deuterio frente a Oxígeno-18 para manantiales de Cundinamarca.....	98
Figura 26. Contenido de Tritio en algunos manantiales de Cundinamarca.....	99
Figura 27. Diagrama Lindal, para evaluación de usos potenciales del recurso geotérmico, de acuerdo con la temperatura del reservorio.	103
Figura 28. Arreglo para Acuicultura con intercambiador de calor.....	106

AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan sus agradecimientos a las UMATAs de los municipios que diligenciaron y enviaron oportunamente la encuesta realizada como sondeo preliminar de información sobre existencia de manantiales termales, actividad que antecedió el trabajo de campo. Gracias también a José Delfin Espinosa E., de Laboratorio de Aguas y Gases de INGEOMINAS, por su participación en la recolección de las muestras y medición de los parámetros físico-químicos en campo y en laboratorio y, a Olga de Bermoudes, del Proyecto de Exploración de Aguas Subterráneas de INGEOMINAS, por sus comentarios y aportes sobre la hidrología de la Sabana de Bogotá.

RESUMEN

Este inventario de manantiales, se presenta como una primera evaluación de los recursos geotérmicos del Departamento de Cundinamarca. Se incluyen sesenta (60) manantiales, de los cuales cuarenta y dos (42), son termales (con temperatura 4°C por encima de la promedio ambiental). Los manantiales restantes fueron incluidos teniendo en cuenta su uso mineromedicinal derivado de su contenido de sales y/o de la identificación organoléptica de sulfuro de hidrógeno. El trabajo incluye la localización y descripción geológica del lugar de ocurrencia de los manantiales, caracterización química, análisis isotópico, análisis microbiológico de indicadores de contaminación, y la identificación de algunos usos potenciales. Adicionalmente y con base en las observaciones, contiene una hipótesis acerca del tipo sistemas geotérmicos que ocurren en el departamento: acuíferos en cuencas sedimentarias, acuíferos en basamento debajo de cuencas sedimentarias y reservorios en zonas de fractura.

En general, los manantiales caracterizados del Departamento de Cundinamarca corresponden a recursos de baja temperatura, cuya fuente de calor más probable es el gradiente geotérmico normal. Sin embargo, el flanco oriental de la cordillera está afectado por una fuente de calor anómala, la cual probablemente está relacionada a la actividad tectónica regional. La distribución de estos manantiales muestra una tendencia a incrementar su temperatura de descarga hacia el oriente del departamento, y alcanza $73,6^{\circ}\text{C}$ en el Municipio de Paratebuena. El gradiente geotérmico máximo, entre 50 y $60^{\circ}\text{C}/\text{km}$, clasificado como mesotermal, se estima en las áreas geotérmicas de Gachetá, Tabio, Tibirita y Paratebuena. Los manantiales caracterizados son de composición muy variable, entre aguas dulces y aguas saladas, hasta de 15.700 mg/l de sólidos totales disueltos. En las últimas se identifica la contribución de una fuente salina de baja temperatura (manantiales de Yacopí, Útica y La Calera).

Gracias a la diversidad de la composición de los manantiales en este departamento se registra un potencial muy importante para su aprovechamiento como aguas mineromedicinales, tanto en usos tópicos como aguas inespecíficas (29 manantiales), bicarbonatadas (1 manantial), cloruradas (13 manantiales), sulfatadas (8 manantiales) y como agua de mesa mineral natural envasada (7 manantiales). Si se consideran varios factores como la calidad del recurso, la actividad económica tradicional y oportunidades de mercado de la región; las posibilidades de uso directo de la energía térmica fueron reconocidas en acuicultura, invernaderos, calefacción residencial, secado y aplicaciones agrícolas.

ABSTRACT

This inventory of springs is presented as a first approach to the evaluation of the geothermal resources from the Department of Cundinamarca; it includes sixty (60) springs from which, 42 are thermal springs (with a temperature 4°C above the mean environmental temperature). The remaining springs were included taking into account their medicinal utilization derived from their salts contents and/or from the organoleptic identification of hydrogen sulfide. The report includes the location and geological description of the places where the springs come to the surface, chemical characterization, isotopical analysis, microbiological analysis of pollution indicators and, the identification of some options of potential utilization. It additionally contains, based on the observations, a hypothesis about the type of geothermal systems occurring in the department: aquifers in sedimentary basins, basement aquifers beneath sedimentary basins and fractures zone Reservoirs.

In general, the geothermal features in the Department of Cundinamarca are low temperature resources, which heat source is likely the normal geothermal gradient. Nevertheless, the eastern flank of the cordillera is affected by an anomalous heat source, which is probably related to regional tectonic activity. The spatial distribution of the springs shows a tendency to increase their temperature towards the East of the Department, reaching a maximum of 73.6°C at Paratebueno locality. The maximum geothermal gradient, between 50 and 60°C/km, classified as mesothermal, is estimated in the geothermal areas of Gachetá, Tabio, Tibirita and Paratebueno. The springs show high variability in composition, between sweet and salty waters, which reach 15.700 mg/l of total dissolved solids. In the last, a contribution of a low temperature saline source is identified (springs from Yacopí, Útica and La Calera).

Due to the variety in composition of the springs in Cundinamarca, a very important potential is inferred for utilization in thermalism, for topic uses as unspecific waters (29 springs), bicarbonate waters (1 spring), chloride water (13 springs) and sulfate waters (8 springs) and, for utilization as natural bottled water (7 springs). Taking into account several factor as resource quality, traditional economic activities and market opportunities in the region, possibilities of direct utilization of the thermal energy were recognized in aquaculture, greenhouses, house/district heating, drying and agricultural applications.

1. INTRODUCCIÓN

El presente trabajo, se enmarca en el proyecto “Exploración y Evaluación de Recursos Geotérmicos” de INGEOMINAS, el cual tiene como misión proveer un conocimiento integral del recurso geotérmico colombiano, con el fin de identificar sus posibilidades de aprovechamiento en usos directos, como fuente de energía térmica, o indirectos, como fuente de energía para generación eléctrica.

Los manantiales termales son las principales manifestaciones superficiales de los sistemas geotérmicos y pueden proveer información sobre estos sistemas, en profundidad (Hochstein & Soengkono, 2001), su estudio geoquímico de las fases fluidas, su entorno geológico y su ubicación, permiten establecer el marco hidrológico general y definir algunos rasgos de su estructura tectónica superficial.

En general, se puede decir que el calor de las fuentes termales tiene los siguientes orígenes: 1. el calor generado por un volcán activo o una cámara magmática en enfriamiento, 2. un cuerpo intrusivo en enfriamiento, 3. el calor generado por el movimiento plástico de fallas regionales, 4. depósitos radiactivos, 5. adelgazamiento de la corteza terrestre, y 6. el gradiente geotérmico normal.

En principio la ocurrencia de las fuentes termales está relacionada con fallamiento de tipo distensivo, y aunque la gran mayoría de las fallas cartografiadas en Cundinamarca son de tipo compresivo, éstas también pueden presentar sectores con comportamiento distensivo o tener relacionadas pequeñas fallas distensivas, las cuales no aparecen cartografiadas y permiten la surgencia de los manantiales.

La ocurrencia de fuentes termales en Colombia, ha sido reconocida por los habitantes locales desde tiempos inmemoriales pero ha sido registrada solamente desde finales del siglo XIX. Si bien existen algunos estudios e inventarios de manantiales, el conocimiento de este recurso es aún muy limitado. Como un mecanismo para ampliar este conocimiento, el INGEOMINAS ha definido el inventario de fuentes termales departamental, a través del que además de localizar los manantiales, se obtiene información geoquímica y recomendaciones de uso (Lozano, 2002).

En el Departamento de Cundinamarca, las aguas termales han sido utilizadas desde antes de la llegada de los españoles. Es así como, según información registrada por los cronistas de indias, los caciques muiscas Tuna y Suba usaban el agua del manantial Sie Chitupcua, localizado en Suba, con fines terapéuticos (Gonzalo Gómez, comunicación verbal; en Arcila (2000)).

Este documento presenta el inventario de manantiales termales de Cundinamarca, conformado por una descripción geológica y la caracterización geoquímica y microbiológica de estas manifestaciones. Dado que en él se clasifican y priorizan las áreas de interés geotérmico, este documento podría ser utilizado como referencia para el plan de desarrollo del departamento.

Los manantiales reportados en este informe, fueron visitados y georeferenciados. La recolección de muestras se llevó a cabo en manantiales aptos para el muestreo; esto es, con caudal suficiente y agua corriente (no estancada). Algunos municipios en donde se registra la ocurrencia de manantiales no fueron visitados por problemas de orden público. Teniendo en cuenta los datos de campo, la interpretación geoquímica y algunos aspectos del entorno social, se plantearon recomendaciones sobre los usos potenciales.

1.1. LOCALIZACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

El área de estudio comprende el Departamento de Cundinamarca, el cual tiene un área de 22.623 Km² y sus altitudes oscilan entre 175 y 4.375 m.s.n.m. Específicamente, los estudios corresponden a las áreas y municipios que tienen fuentes termales y/o minerales. Dichos manantiales se encuentran distribuidos en todas las zonas fisiográficas del departamento: El valle del Magdalena, la vertiente occidental de la Cordillera Oriental y región del Sumapaz, el altiplano cundinamarqués, la vertiente oriental de la Cordillera Oriental y los Llanos Orientales.

Los ríos más importantes que drenan el departamento, y que están cerca de los manantiales estudiados, pertenecen a dos cuencas hidrográficas:

- Cuenca del Río Magdalena: Ríos Bogotá, Negro y Sumapaz.
- Cuenca del Río Meta: Río Negro, Machetá y Humea.

1.2. MARCO GEOQUÍMICO

La literatura registra manantiales termominerales en Cundinamarca, desde comienzos del siglo pasado (Ramon, 1913 en Forero, 1958). No obstante, su caracterización geoquímica se ha limitado a unos pocos manantiales localizados en los municipios de Choachí, Tabio, Anapoima, Tocaima, Girardot, Nimaima.

Una de las referencias más importantes para este trabajo y en general para la exploración geotérmica en Colombia es el Estudio de Reconocimiento (OLADE y Geotérmica Italiana, 1982), que incluyó un inventario de fuentes termales de la Cordillera Oriental. La Tabla 1, presenta los resultados de los 6 manantiales registrados por este trabajo, en el Departamento de Cundinamarca. De acuerdo con su clasificación como aguas bicarbonatadas y sulfatadas, principalmente, estos manantiales fueron considerados como pertenecientes a circuitos someros.

Tabla 1. Caracterización química de manantiales de Cundinamarca reportada en literatura.

Manantial	ID fuente original *	Concentración en mg/l													
		T (°C)	pH	Na	K	Ca	Mg	Li	B	Cl	SO ₄	HCO ₃	SiO ₂	SD	Clasificación
Choachi	68	52	6.6	64	5	52	8	0.18	0.19	50	15	336	41.4	571	Bicarbonatada
Girardot	75	33	6.6	17	10	184	14	0.02	0.03	7	178	506	17.4	933	Bicarbonatada
Tocaima	76	33	6.6	71	4	174	25	0.02	0.09	16	168	671	19.2	1148	Bicarbonatada
Tocaima	77	31	7.6	39	6	240	34	0.00	0.08	12	576	336	28.8	1271	Sulfatada
Anapoima	78	28	6.6	25	3	240	35	0.00	0.00	24	446	409	15	1197	Sulfatada-bicarbonatada
Tabio	79	55	7	506	7	54	4	0.22	0.14	780	0	220	51.6	1623	Clorurada

* OLADE y Geotérmica Italiana. 1982. Estudio de Reconocimiento de los Recursos Geotérmicos de la República de Colombia.

El Estudio de Reconocimiento (OLADE, 1982), incluyó además una ficha que resume los datos y observaciones de campo de manantiales ubicados en los municipios de Guatavita, Guasca, Sesquilé, Chocontá, Tibirita, Nemocón, Anapoima, Agua de Dios, Tocaima, Guataquí, Nimaima, Pandí, Ricaurte, Quetame y Gachetá. Este trabajo concluyó que desde el punto de vista térmico solamente son importantes los manantiales de Chocontá (Los Volcánes y Nápoles), Gachetá y Guasca, para los cuales proponen usos agrícolas e industriales de baja entalpía.

En el año 2000 INGEOMINAS realizó la primera etapa del Inventario de manantiales minerales y termales de Cundinamarca, en la Sabana de Bogotá y alrededores (Arcila, 2000 y Alfaro, 2000): Bogotá, Tabio, Choachí, Guasca, La Calera, Guatavita, Nemocón, Chocontá, Gachetá, Tibirita, Suesca, Sesquilé y Suba. Este trabajo señala que la temperatura en superficie y la composición química de estas aguas termales, reflejan un recurso de baja entalpía, como había sido observado antes (OLADE y Geotérmica Italiana, 1982). Teniendo como referencia una temperatura en el subsuelo de 100-110°C, calculada por el geotermómetro de cuarzo, este trabajo propone como aplicaciones de mayor energía, la deshidratación de material orgánico y sistemas de calefacción y refrigeración. El mayor potencial de utilización se atribuye a los municipios, de Gachetá, Tibirita y Tabio, teniendo en cuenta las temperaturas de los manantiales, tanto en superficie como la estimada para el fluido en el subsuelo, debido probablemente a un origen más profundo y menor dilución con aguas someras.

La gran mayoría de los manantiales inventariados en la primera etapa, en la Sabana de Bogotá y alrededores, fueron muestreadas nuevamente con el fin de hacer una caracterización más integral.

1.3.MARCO MICROBIOLÓGICO

En general, los manantiales termales son considerados ambientes extremos para los microorganismos debido a sus condiciones de temperatura, concentración de sales, pH, entre otros, que hacen desfavorables las condiciones para otras formas de vida. Además de los microorganismos autóctonos, cuya variedad depende de las propiedades fisicoquímicas del agua, en los manantiales pueden coexistir microorganismos alóctonos (procedentes de

otros habitats como suelo, heces y vegetales), los cuales se consideran contaminantes (De La Rosa & Mosso, 2002).

Desde el punto de vista del aprovechamiento de los manantiales minerales y termales, hay por lo menos dos aspectos de máximo interés para estudios de caracterización microbiológica: Las aplicaciones biotecnológicas derivadas de microorganismos autóctonos y la contaminación de los manantiales con microorganismos alóctonos patógenos, que limitarían su utilización en balnearios y como aguas minerales naturales embotelladas. Este trabajo contempla solamente la caracterización de algunos microorganismos indicadores de contaminación: Mesófilos aerobios, coliformes totales, coliformes fecales, *Pseudomonas aeruginosa*, mohos y levaduras.

Los mesófilos aerobios son microorganismos que necesitan oxígeno para subsistir y crecen en condiciones de temperatura intermedia, comprendida entre 10 a 45°C, siendo su rango óptimo, de 20 a 40°C¹. Estos microorganismos son en su mayoría bacterias y se consideran un indicador global de contaminación.

El bloque coliforme son un bloque muy heterogéneo de bacterias que agrupa a bacilos Gram negativos fermentativos y abarca los géneros *Klebsiella*, *Escherichia*, *Enterobacter*, *Citrobacter* y *Serratia*. Cuatro de estos géneros (*Klebsiella*, *Enterobacter*, *Citrobacter* y *Serratia*) presentes en grandes cantidades en el ambiente (fuentes de agua, vegetación y suelos), no están asociados necesariamente con la contaminación fecal y no plantean ni representan necesariamente un riesgo evidente para la salud. La determinación de coliformes totales indica de forma muy inespecífica la existencia de contaminación. Los coliformes fecales, de los que la *E. Coli* es el más representativo, indican contaminación reciente, pero no está necesariamente ligada con organismos patógenos (Marchand, D., 2003).

La presencia de *Pseudomonas aeruginosa* es un indicador complementario a coliformes totales y fecales en aguas y está asociado en comparación con los coliformes, a residuos fecales humanos más que de animales. Su carácter de indicador de la calidad del agua está relacionado con su resistencia al cloro que es superior a la de otros microorganismos aislados del agua. Este microorganismo es de alto riesgo para la salud, en especial de los neonatos, pacientes hospitalizados e inmunodeficientes. La cuantificación de las *Pseudomonas* es importante además porque tiene la capacidad de inhibir los coliformes debido a que sus catabolitos (piocinas) tienen efecto bactericida sobre coliformes, principalmente *E. coli*, con la consecuente disminución o diseminación conduciendo a resultados erróneos en el control de calidad de las aguas. Es decir que se podría correr el riesgo de consumir agua con índice de coliformes cero los cuales podrían estar inhibidos por *Pseudomonas* (Marchand, D., 2003).

Los Mohos son hongos microscópicos filamentosos aerobios. Su temperatura ideal de desarrollo es de 25°C. Aunque los mohos no siempre son peligrosos para la salud, estos pueden producir infecciones (micosis)². Las levaduras, que son un género de hongos

¹ Disponible en <www.microbiologia.com.ar/bacteriologia/fisiologia.php?Mostrar=fisicos>. Mayo 21 de 2003

² Disponible en www.maa.gba.gov.ar/alimentacion/ii.htm. Mayo 21 de 2003

unicelulares los cuales se reproducen por gemación o división, no son patógenas por naturaleza. Sin embargo las terapéuticas cada vez más agresivas, la drogadicción y la automedicación, pueden aumentar la vulnerabilidad a infecciones por levaduras (Giusiano y Mangiaterra, 2003).

Como un criterio de calidad microbiológica de las aguas minerales naturales, el contenido total de microorganismos revivificables (que se pueden crecer para su conteo) no debería superar 20 colonias por mililitro (2000 Unidades Formadoras de Colonias/ 100 ml), después de incubación a 20-22 °C durante 72 horas y 5 colonias por mililitro (500 Unidades formadoras de Colonias /100 ml) después de incubación a 37°C durante 24 horas³.

1.4. POTENCIAL DE APROVECHAMIENTO

Como resumieron Alfaro et al., (2002), los fluidos geotérmicos tienen un amplio espectro de aprovechamiento, derivado principalmente de su contenido energético y mineral. Desde el punto de vista energético, los usos del fluido geotérmico se han agrupado en dos categorías: Directos e indirectos.

Los usos indirectos consisten en la transformación de la energía térmica del fluido, en energía eléctrica. En un paso intermedio de esta transformación, la energía térmica es transformada en mecánica, que es la que proporciona el movimiento de las turbinas para la generación eléctrica. Esta aplicación demanda el beneficio del fluido geotérmico con la separación de vapor (motor de las turbinas) y agua.

En los usos directos el fluido geotérmico es utilizado como fuente de energía térmica, directamente o a través de intercambiadores de calor. Las aplicaciones más difundidas de esta categoría son los invernaderos, sistemas de calefacción, refrigeración, acuicultura, secado industrial, deshidratación de vegetales, generación eléctrica por ciclo binario (en donde el calor del fluido geotérmico se utiliza para vaporizar un fluido secundario – hidrocarburo liviano de bajo punto de ebullición- después de lo cual el fluido geotérmico es reinyectado), bombas de calor y usos balneológicos (mineromedicinales y recreación). Existen otras aplicaciones directas, derivadas del contenido de minerales de estas aguas como son la obtención de sales o compuestos inorgánicos, como sulfato de sodio y ácido bórico.

Teniendo en cuenta la tradición económica y cultural del país, el tipo de recurso identificado en el departamento de Cundinamarca y los requerimientos para implementar algunos de estos usos a partir del fluido descargado naturalmente, a continuación se presentan algunas particularidades sobre aplicación de las aguas termales en acuicultura, agricultura y en usos mineromedicinales.

1.4.1. Acuicultura

Este uso directo de la geotermia se discute en el presente informe con el fin de motivar estudios de investigación en Cundinamarca conducentes a desarrollar la técnica de la

³ Disponible en <www.igme.es/internet/web_aguas/igme/publica/pdflib8/6_calidad.pdf>

Acuicultura Geotérmica, que como se mostrará, tiene un buen potencial en el departamento. Sin embargo, no se pretende sentar lineamientos científicos sobre este tipo de acuicultura que requieren de un tratamiento especializado por parte de investigadores de las ciencias biológicas, pero si aspira a ser una referencia o un punto de partida para introducir esta técnica en Colombia.

La acuicultura es el cultivo y manejo de organismos de agua dulce o marinos en un ambiente de crecimiento acuático bajo condiciones controladas, que depende de la intensidad de producción. En proyectos geotérmicos de acuicultura el objetivo es calentar el agua a la temperatura óptima para el crecimiento de peces; se recomienda la revisión de documentos especializados del centro especializado en usos directos de la energía geotérmica Geoheat Center del Instituto de Tecnología de Oregon (Smith, 1981 a; Smith, 1981 b). El camarón y el Bagre alcanzan su valor óptimo de crecimiento a aproximadamente 32°C, con un 50% de crecimiento óptimo logrado entre 20 y 26°C, respectivamente; pero ambas especies declinan rápidamente a temperaturas más altas. La trucha tiene un rango mucho más estrecho, y crece mejor a temperaturas alrededor de los 15°C; sin embargo, es muy sensible a temperaturas más altas o inferiores (G. Gokcen 2002).

Como se aprecia en la información mencionada anteriormente, se puede decir que la acuicultura geotérmica tiene varias ventajas sobre la convencional. Por ejemplo, la acuicultura convencional depende directamente de los pisos térmicos para cultivar un tipo determinado de pez; por otro lado, en regiones de clima impredecible se produce la mortalidad de gran cantidad de especímenes por los cambios de temperatura en el agua. La acuicultura geotérmica brinda la posibilidad de mantener estas condiciones constantes por un periodo de tiempo ilimitado, reduciendo las pérdidas en los lotes de cultivo e incrementando su desarrollo.

La cría de diversas especies ha sido estudiada por científicos en varios países del mundo, llegando a resultados exitosos y a documentar procesos de cría y manejo de acuerdo a las condiciones ambientales de cada especie estudiada, optimizando tiempos de crecimiento y desarrollo. La fig. 1 muestra la granja de cultivo de Langostinos en Wairakei, Nueva Zelanda. El área máxima de la alberca que puede desarrollarse, esta restringida por el calor máximo disponible del recurso. La evaporación es generalmente el mecanismo mayor de pérdida de calor mientras la conducción es típicamente el menor. Otros ejemplos incluyen: Francia, Grecia, Islandia, Israel, Japón y Corea. Todas las granjas usan fluidos geotérmicos para controlar las temperaturas del agua en las instalaciones de acuicultura, para producir peces más grandes en un período de tiempo más corto y también para permitir la producción en invierno que de otra manera no sería posible. Las especies principales son Bagre y Tilapia.

Una industria emergente es el cultivo de especies vegetales adaptables para el consumo humano y animal. La economía de cosecha y procesamiento debe ser mejorada antes de que tal actividad llegue a ser comercialmente viable. Cultivos adaptables al crecimiento mejorado a partir de geotermia incluyen: el jacinto de agua y numerosas especies de algas (Gokcen, 2002).



Figura 1. Granja de cultivo de Langostinos, Wairakei Nueva Zelanda

Las aguas termales pueden ser utilizadas para acuicultura empleando tanto el fluido como el calor por ella contenido. Por ejemplo, las aguas que sean utilizadas directamente para el cultivo de peces deben seguir los parámetros que se describen en la Tabla 2, donde se presentan los factores de calidad que es necesario tener en cuenta para una práctica exitosa de la acuicultura. Propiedades como la temperatura dependen de la especie que se vaya a criar, las demás condiciones físico-químicas del agua se deben conservar para garantizar el desarrollo y evitar la mortalidad de los especímenes. Esto implica que es necesario tener bajo control en todo momento estos parámetros, lo que no significa que las características físico-químicas del agua termal natural no se puedan modificar para ajustarlas a dichos parámetros. En el caso de una fuente termal con una salinidad sumamente alta como para poder formar parte del ambiente acuático de los peces, se puede utilizar solo su temperatura para calentar o ser mezclada con un fluido de características químicas que permita reproducir el ambiente adecuado.

Calidad del agua a ser utilizada para acuicultura:

Debido a que para la práctica de la acuicultura es necesario simular las condiciones ideales en las que habitan y se desarrollan organismos vivos, es necesario controlar parámetros indispensables que afectan tanto la supervivencia de los animales, como su desarrollo. Estos parámetros han sido identificados luego de prolongados estudios en el tema y se describen a continuación:

- Temperatura:

La temperatura tiene una influencia sobre todos los procesos biológicos y químicos en una operación de acuicultura. Cada especie tiene su propia temperatura óptima donde crece mejor. La tasa de crecimiento es reducida cuando la temperatura es superior o inferior al punto óptimo y la mortalidad puede ocurrir en condiciones extremas.

- Oxígeno disuelto:

El nivel mínimo de oxígeno permisible depende de la temperatura y en una cierta extensión, de la especie. A través de un periodo de 24 horas el nivel de oxígeno disuelto en un estanque puede cambiar dramáticamente. Los niveles más bajos de oxígeno disuelto

Tabla 2. Factores de calidad, procesos de monitoreo comúnmente utilizados y rangos adecuados para Acuicultura.

Factor de calidad del agua	Procedimiento	Rangos adecuados para acuicultura
Temperatura	Termómetro, Telethermister	Depende de la especie
Oxígeno en disolución	Titrimétrico (Winker modificado), Polarografimetro, kits colorimétricos.	> 4-5 ppm para la mayoría de las especies.
Ammonia-Nitrogeno total (ionizado y desionizado)	Kits colorimétricos (Nesslerización o Salicylate), electrodos para ión específico.	NH ₃ <0.02
pH	Kit colorimétricos, medidor electrónico.	6-8
Alcalinidad	Titrimétrico con pH metro Titrimétrico con indicador químico.	Carbonato de calcio de 50-300 ppm
Dureza	Kit titrimétrico	>50 ppm, preferiblemente > 100 ppm en carbonato de calcio.
Dióxido de Carbono	Titrimétrico	<10 ppm
Salinidad	Conductivimetro, refractómetro titrimétrico	Las especies dependen típicamente de <0.5 – 1.0 ppt (para peces de agua dulce)
Cloro	Kit Colorimétrico	<0.02 ppm
Sulfuro de Hidrógeno	Kit Colorimétrico	No detectable
Nitritos	Kit Colorimétrico (Diazotización) electrodos para ión específico.	<1ppm; 0.1 ppm en agua.

(Tomado de GEOHEAT Center, 1988).

generalmente ocurren justo antes del amanecer y los niveles más altos se alcanzan en la tarde. Los peces de agua templada pueden tolerar mejor niveles bajos de oxígeno disuelto en comparación con peces de agua fría. El nivel debe ser mantenido por encima de 3.0 ppm o 5.0 ppm para peces de aguas templadas y frías, respectivamente.

- Desperdicios Nitrogenados:

La mayoría de los peces excretan amoníaco como su principal desecho nitrogenado. Tanto la temperatura como el pH causan la variación de TAN (Total Amonia-Nitrogen, ionizado y no ionizado). La cantidad de TAN en la forma tóxica no ionizada incrementa con el aumento en pH y temperatura. El amoníaco es removido por la acción bacteriana que inicialmente lo convierte en nitrito y subsecuentemente en nitrato. Niveles altos de nitrito causan la enfermedad denominada “Brown Blood” o sangre marrón, que es mortal para los peces. Cuando las concentraciones son de 0.5 ppm o mayores pueden reducir el crecimiento y afectar adversamente a los peces. Los peces pueden tolerar nitratos en concentraciones de varios cientos de ppm.

- pH

Los peces crecen mejor cuando el pH del agua se encuentra entre 6 y 9. La mortalidad ocurre a niveles por debajo de 4.5 y mayores a 10. Los niveles más bajos de pH están

normalmente asociados a concentraciones bajas de oxígeno disuelto. Los pH altos usualmente coinciden con niveles altos de oxígeno disuelto.

- Alcalinidad:

La alcalinidad es la capacidad de buffer del agua o su habilidad para absorber ácidos o bases y se expresa en ppm de carbonato de calcio. La alcalinidad es la medida de iones de carbonato y bicarbonato disueltos en el agua. El cambio de pH debido a la actividad fotosintética se puede reducir en estanques con alcalinidad mayor. Un rango aceptable es de 20 a 300 ppm.

Calcio y Magnesio son esenciales para los procesos biológicos de los peces (formación de huesos y escamas, coagulación de la sangre y otras reacciones metabólicas). Los peces pueden absorber calcio y magnesio directamente del agua o la comida. Los órganos mayores usados para la absorción son las agallas y el intestino junto con los riñones. La presencia de calcio en el agua contribuye a reducir la pérdida de otras sales de la sangre del pez.; como por ejemplo, sodio y potasio. (Tomado de: <http://members.optushome.com.au/chelmon/Hardness.htm>)

- Dureza:

Mientras la alcalinidad mide iones (negativos) de carbonatos y bicarbonatos, la dureza mide los iones positivos (calcio y magnesio). Para algunas especies, la dureza del agua puede ser importante y debe estar por encima de 50 ppm.

Tanto el sodio como el potasio, son sales importantes en la sangre del pez y son críticas para las funciones del corazón, los nervios y los músculos. Las investigaciones han mostrado que el calcio ambiental también es requerido para reabsorber estas sales perdidas. En aguas con poco calcio, los peces pueden perder cantidades significativas de sodio y potasio en el agua. Sin embargo, no es claro si el calcio juega un papel importante en el desarrollo embrionario. Un rango recomendado de calcio libre en aguas de cultivo es de 25 a 100 mg/L (50 a 250 mg/L dureza por CaCO₃). Un valor de dureza de CaCO₃ bajo es un indicador real de que la concentración de calcio es baja. Sin embargo, una dureza alta no refleja necesariamente una concentración alta de calcio. (Tomado de: <http://members.optushome.com.au/chelmon/Hardness.htm>)

- Dióxido de carbono:

Normalmente los problemas con dióxido de carbono pueden ocurrir cuando se utiliza agua subterránea, alta densidad de peces y sistemas de recirculación. Algunas soluciones para mantener el dióxido de carbono en niveles aceptables son la aireación, oxigenación o agregar un buffer al agua.

- Salinidad:

La salinidad es la concentración total de todos los iones en el agua. La salinidad influencia la concentración de amoníaco no ionizado. Los peces exhiben un rango de tolerancia a la salinidad. Durante la etapa de planeación la salinidad se debe chequear para ver si el agua es apropiada para el cultivo de la especie planeada.

- Cloro:

El agua de los acueductos municipales por lo general es tratada con cloro en una concentración de 1 ppm. Si se utiliza esta agua, el cloro residual se debe remover. Niveles superiores a 0.02 ppm son dañinos para los peces.

- Sulfuro de hidrógeno:

El sulfuro de hidrógeno se puede liberar cuando estanques con un contenido de oxígeno pobre en el fondo son disturbados. El sulfuro de hidrógeno tiene un olor a huevo podrido y puede ser extremadamente tóxico para los peces. También, puede estar presente en el agua subterránea.

Especies que se podrían cultivar en Cundinamarca:

De acuerdo al informe del Instituto Nacional de Pesca y Acuicultura (Beltrán & Villanada, 2000), las especies con mayores posibilidades de mercadeo son Tilapia y Cachama. La Tilapia ha sido estudiada en ambientes artificiales a partir de geotermia en otros países, los resultados han sido exitosos logrando el incremento de la producción y optimizar el tamaño de los especímenes, pero no se conocen estudios específicos para la Cachama. A continuación se presenta una síntesis de los métodos de cría utilizados, de acuerdo con Boyd & Rafferty (1998), para Tilapia. También, se considera a los Langostinos de agua dulce, que podrían ser una buena alternativa para las condiciones de Cundinamarca.

Cultivo de Tilapia:

Las grandes ventajas de la Tilapia consisten en: su resistencia a las enfermedades, su facilidad para la producción, la variedad de comida que puede consumir, su tolerancia a condiciones de baja calidad del agua y contenido de oxígeno disuelto.

La temperatura ideal para el cultivo de la Tilapia se encuentra entre 25 y 30°C dependiendo de la especie. En el mundo solo se cultivan unas cuantas especies de Tilapia como: *Oreochromis Aureus*, *Oreochromis Mossambicus*, *Oreochromis Niloticus*, *Tilapia Rendalli*, y *Tilapia Zilli*.

La tolerancia a las bajas temperaturas también depende de la especie y varía entre 8 y 13°C. A temperaturas más bajas que la óptima, el crecimiento puede verse disminuido de manera significativa. Si la temperatura llega a ser demasiado baja puede ocurrir la muerte de los animales.

Confinada en tanques, la Tilapia crece bien en grandes cantidades, siempre y cuando se conserve la calidad del agua. En un cultivo de peces, los tanques permiten tanto facilitar el manejo de lotes, como ejercer un grado de control relativamente alto de los parámetros de calidad que pueden ser ajustados para una máxima producción.

Como se mencionó anteriormente, la temperatura ideal del agua para el cultivo de Tilapia se encuentra entre 25 y 30°C, por lo que prácticamente puede ser producida a partir de geotermia en casi todos los lugares donde ocurren fuentes termales con temperaturas superiores a los 30°C. Fuentes termales con temperaturas en superficie inferiores a los

30°C, podrían presentar pérdida de calor en el proceso de circulación haciendo que la temperatura del agua que llene los tanques sea inferior a 25°C, que es el límite inferior de óptimo crecimiento. Sin embargo, es recomendable perforar pozos, ya que permiten obtener un fluido de mayor calidad, temperatura y caudal. Además, de ninguna manera es recomendable bombear agua de la fuente termal, ya que se puede acelerar su extinción.

Cultivo de Langostinos:

Con la variedad en la dieta de los colombianos, que ha venido teniendo auge en los últimos 10 años, se ha venido tomando conciencia de la importancia del consumo regular tanto del pescado como de la comida de mar en general. Esto ha hecho que el mercado para este tipo de alimentos se halla incrementado del 3.8 en 1993 al 5.8 en 1998, se calcula que el consumo para el 2025 crecerá por persona a 10 kg/año (Beltrán & Villanada, 2000).

La comida de mar se destaca por ser la que mejor aceptación tiene en el mercado internacional. Así, los cultivos de camarones en Colombia, que se encuentran localizados en la costa Atlántica, se dedican al mercado internacional en un 95% de la producción. Sin embargo, existen desventajas en esta práctica como son: riesgos por la sensibilidad del camarón a nuevas enfermedades, riesgos por cambios en las condiciones hídricas y de los suelos, el alto costo de los alimentos concentrados, así como las condiciones macroeconómicas y de orden público (Beltrán & Villanada, 2000).

Considerando lo anterior, La acuicultura de langostinos de agua dulce a partir de geotermia podría ser una alternativa viable tanto para el mercado interno como externo, debido al buen precio de comercialización de esta especie y la facilidad que habría para su puesta en el mercado internacional, considerando la ubicación estratégica de Cundinamarca.

Desde 1975 el Instituto Tecnológico de Oregon, E.U., ha venido experimentando con una especie gigante de langostino denominada *Macrobrachium rosenbergii* con resultados exitosos. A nivel comercial, en lugares como Wairakei, Nueva Zelanda, se cultiva esta especie con muy buenos resultados y sostenibilidad a través de los años.

El langostino gigante de agua dulce, *Macrobrachium rosenbergii*, es un crustáceo que normalmente habita en corrientes y estuarios de climas tropicales en el Pacífico Suroriental e Indonesia. Según investigaciones adelantadas por Anuenue Fisheries, Hawaii Department of Fish and Game, se sabe que estos animales acuáticos pueden existir en aguas que fluctúan estacionariamente entre 13 y 35°C, pero su crecimiento óptimo ocurre cuando los animales son criados en un ambiente termal de 27 a 29°C. En condiciones ambientales controladas, los langostinos pueden alcanzar la madurez sexual en seis meses.

Consideraciones importantes para el cultivo de Langostinos de agua dulce:

Como en cualquier otro proyecto de acuicultura, la empresa depende en alto grado de la cantidad y calidad del agua disponible. Con el fin de obtener el máximo crecimiento del cultivo de langostinos, es indispensable mantener un ambiente termal a 27°C. Por lo tanto, se debe hacer una proyección de la cantidad de agua requerida por estanque para los meses más fríos considerando las temperaturas promedio durante el día y la velocidad del viento.

Una vez se halla cumplido con los requerimientos de cantidad de agua, es necesario efectuar bioensayos y análisis químicos al agua. Los análisis químicos determinarán si el agua presenta o no concentraciones bajas de químicos como arsénico, fluoruro, boro y otros elementos que podrían deteriorar la supervivencia de los langostinos. Para tanques construidos a elevaciones entre los 1200 y 1500 metros y con temperaturas alrededor de los 27°C un contenido de oxígeno disuelto de 4 a 6 mg/L es ideal. Sin embargo, se ha observado que los langostinos pueden sobrevivir y criarse bien en ambientes con concentraciones de oxígeno disuelto de 2 mg/L. Así, si es difícil mantener las condiciones de oxígeno mínimo, es recomendable tener un equipo de ventilación como soporte. Estos equipos son también utilizados para otros cultivos de peces.

1.4.2. Usos agrícolas

Los usos agrícolas que se discutirán a continuación consisten en: invernaderos, aplicaciones a campo abierto y secado de frutas y vegetales. Estos usos directos de la geotermia tienen como característica común que emplean el calor contenido por un fluido termal en un amplio rango de temperaturas, que por lo general se pueden encontrar fácilmente en recursos geotérmicos de baja entalpía. En el caso de Cundinamarca, debido a la tradición agrícola en los diferentes municipios, estas aplicaciones son totalmente viables si se consideran sus características particulares, como son los pisos térmicos existentes que limitan a algunas cosechas, las heladas y la necesidad de aumentar la calidad y comercialización de los productos disponibles para mercadeo.

En Cundinamarca se tienen cultivos diversos a través del año, según el Departamento Administrativo de planeación de la Gobernación de Cundinamarca, los principales tipos de cultivos estacionales en el departamento son: arveja, frijol, maíz, papa y tomate (URPA – Cundinamarca, 2.000), que han sido cultivados con técnicas tradicionales. El uso de la geotermia para contribuir a mejorar la producción agrícola, radica en dos aspectos: la recreación de un ambiente positivo y permanente para el adecuado crecimiento de los cultivos y el mejor control de todos los procesos del cultivo hasta su cosecha.

En el mundo existen ejemplos exitosos de cultivos de fruta y vegetales a partir de ambientes generados por geotermia. En el caso particular de los invernaderos, son ampliamente difundidos los cultivos de tomate, pepino cohombro, rosas y lechuga hidropónica, algunos de los cuales se discutirán brevemente y a manera de ejemplo en este capítulo por ser de interés para la actividad agrícola del departamento.

Invernaderos

El uso más común de la energía geotérmica en agricultura se encuentra en la calefacción de invernaderos, que se ha desarrollado a gran escala en muchos países. El cultivo de vegetales y flores que no se dan en una estación o clima natural determinado, puede ahora conducir una tecnología ampliamente experimentada. Varias soluciones están disponibles para alcanzar las mejores condiciones de crecimiento, basadas en la temperatura óptima para cada planta (fig. 2), la cantidad de luz, la concentración de CO₂ en el ambiente del invernadero y la humedad tanto del suelo como del aire. Las paredes del invernadero se

pueden hacer de cristal, fibra de vidrio, paneles plásticos rígidos o de película plástica. Los paneles de cristal son más transparentes que el plástico y dejarán pasar mucha más luz, pero proporcionarán menos aislamiento térmico, son menos resistentes a los choques, y son más pesados y costosos que los paneles de plástico. Los invernaderos más simples se hacen solo de películas plásticas, pero algunos invernaderos se han construido recientemente con una capa doble de película separada por un espacio de aire. Este sistema reduce la pérdida de calor total del invernadero a través de las paredes de un 30 a 40%, e incrementa así enormemente la eficiencia.

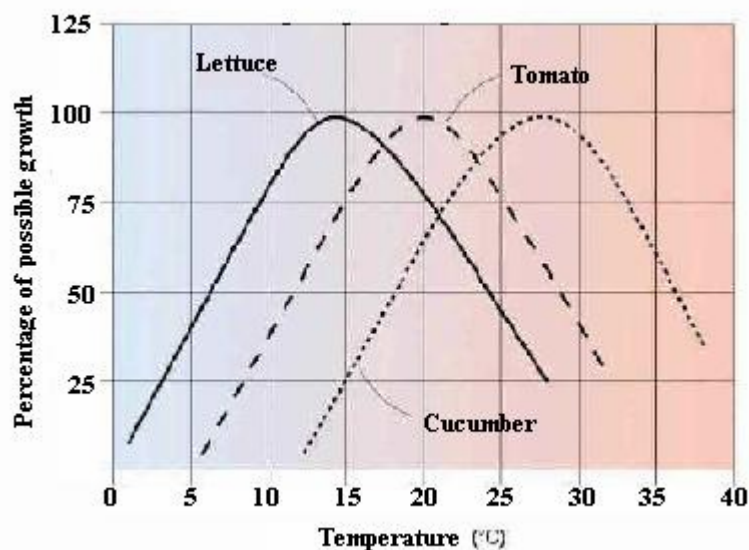


Figura 2. Curvas de crecimiento óptimo para diferentes cultivos.

La evaluación de un proyecto de invernadero en particular implica considerar los requisitos de calefacción de la estructura, el sistema para cumplir con esos requisitos y el consumo de energía anual. Todos los vegetales comúnmente comerciales, flores, plantas ornamentales y muchas semillas de árbol, son favorables para invernaderos. Las temperaturas del invernadero están en función de la cosecha; por ejemplo la gama de temperaturas típicas más altas, mantenidas para setas es aproximadamente de 18 a 27°C. El Shiitake crece durante todo el año en suelos calentados por líquidos geotérmicos en invernaderos de la provincia de Fujian, China. La época de cultivo es de menos de dos meses (las setas toman normalmente ocho a once meses para madurar). Los invernaderos geotérmicos obtienen un producto de mejor calidad y más barato.

Hay básicamente siete sistemas diferentes de calefacción geotérmica que se aplican a los invernaderos: de tubería delgada, unidades calentadoras, bobinas delgadas, calefacción del suelo, cascada, tubería plástica, o una combinación de varios. El líquido de la calefacción en estas unidades puede ser de alrededor de los 32°C.

La opción del tipo de la calefacción no está dictada por consideraciones de ingeniería, sino por la preferencia del cultivador. Algunos cultivos, como las rosas, requieren del control cercano de la humedad y una cantidad considerable de circulación de aire para prevenir el moho de la hoja.

La calefacción de invernaderos con agua geotérmica tiene varias ventajas, especialmente en regiones agrícolas marginales. Bajo condiciones climáticas controladas, la germinación puede ser acelerada, puesto que la humedad y la temperatura se pueden optimizar. Típicamente, los cortes de la planta requieren alrededor de un mes para el desarrollo óptimo de la raíz y del follaje necesitado para el trasplante final. Controlando temperatura y humedad, el tiempo requerido se puede reducir a la mitad. Con actividades correctamente previstas para el invernadero, es posible obtener un ciclo productivo más eficiente y provechoso. Por ejemplo, la producción de vegetales fuera de estación, se beneficia de los altos precios del mercado. Además, el crecimiento de las plantas en semilleros calentados por geotermia permite su cultivo en condiciones más densas y controladas, que reducen costos y riesgos de pérdida de cosechas, permitiendo un compromiso más seguro para contratos de entrega. (Banco Mundial, 2003).

Como se mencionaba anteriormente, los productos agrícolas que se han investigado más detalladamente para aplicaciones geotérmicas son: tomate, pepino cohombro, lechuga hidropónica y rosas, todos ellos con amplias posibilidades de desarrollo en Cundinamarca. A continuación se describen globalmente las características de cultivo para tomate y pepino cohombro de acuerdo con el documento “*Geothermal Green House Information Package*” (Boyd & Rafferty, 1.997):

Tomate:

El tomate es tal vez la especie vegetal más cultivada en invernadero. Se ha podido determinar que se alcanzan producciones en promedio de 20 a 25 libras por planta. El tomate se cultiva tradicionalmente en suelo, pero esta técnica ha sido ampliamente reemplazada por los cultivos con poco suelo, proveyendo a las plantas de los nutrientes que requiere por medios totalmente artificiales. Una gran ventaja de esta técnica radica en que no se necesita la esterilización del suelo, ni con vapor, ni químicos. Sin embargo, este tipo de agricultura es mucho más exigente que la convencional, ya que se requiere que el medio de nutrición este adecuadamente compuesto y balanceado durante todo el ciclo del cultivo.

Existen dos tipos de sistemas de cultivo en poco suelo: sistema hidropónico cerrado (con recirculación de nutrientes) y sistema hidropónico abierto o de bolsa (las soluciones nutrientes frescas son constantemente suministradas a la planta y los nutrientes excedentes no se colectan ni recirculan).

Los tomates de invernadero siempre crecen para ser transplantados. Un lugar dentro del invernadero debe ser dedicado para mantener las pequeñas plantas. Esta área puede ser otro invernadero contiguo separado por una entrada principal, esto con el fin de asegurar que la temperatura se mantendrá eficientemente.

Es importante mantener una adecuada temperatura, humedad y bajo control el dióxido de carbono. La temperatura varía de acuerdo al vegetal que se vaya a cultivar. En términos generales, cuando las intensidades de luz son bajas, temperaturas más bajas son utilizadas. Para el tomate, durante el día la temperatura se debe mantener de 21 a 24 °C. Durante la noche la temperatura debe estar entre 17 y 18 °C. Cuando la temperatura excede el rango 30 – 32 °C, debe ser utilizado un equipo de refrigeración para prevenir que se malogre el fruto y para lograr el desarrollo apropiado del color rojo.

La concentración normal de CO₂ en el ambiente es de 300 ppm. Si esta concentración es reducida en el ambiente del invernadero, se puede limitar el crecimiento de la planta. La adición de CO₂ ha demostrado que mejora el crecimiento de los vegetales. La concentración de CO₂ se debe ajustar de acuerdo a la intensidad de la luz y las etapas de crecimiento de la siguiente manera:

Clima de sol brillante	100 ppm
Clima nublado	750 ppm
Plantas jóvenes	700 ppm
Durante ventilación moderada	350 ppm

Pepino cohombro:

El pepino cohombro crece más rápido que el tomate y se produce más temprano. Las variedades europeas son cultivos muy populares para los invernaderos, produciendo frutas que pueden pesar alrededor de una libra y crecen de 25 a 30 cm de largo. A diferencia de los pepinos americanos, estos no producen semillas.

El pepino cohombro necesita de mayor temperatura que el tomate y crecen en sistemas de cultivo de 2 a tres veces al año. En sistemas de 2 cultivos por año la calidad de la fruta es casi igual, pero es mejor cuando se produce tres veces al año.

La temperatura requerida por el pepino durante el día es de 24 a 25°C y durante la noche de 21°C hasta la primera recolección. Luego de que haya comenzado la recolección, la temperatura se debe ir reduciendo por 1°C cada noche hasta alcanzar los 17°C, pero solo por un lapso de 2 a 3 días con el fin de estimular el crecimiento.

Para obtener los mejores resultados, una concentración de CO₂ de 1.000 a 1.500 ppm debe ser mantenida en la atmósfera del invernadero. Se han reportado incrementos en la producción cuando se ha aumentado los niveles de CO₂ en el invernadero del 20 al 40%.

Parámetros ambientales:

- Temperatura:

La temperatura del ambiente del invernadero controla la tasa de crecimiento de la planta. Normalmente a medida que aumenta la temperatura, los procesos químicos actúan más rápido. Este proceso es regulado por enzimas que actúan eficientemente en un rango estrecho de temperatura. Si la temperatura se encuentra arriba o debajo de este rango, la actividad de las enzimas se comienza a deteriorar. Esto causará que el proceso químico se reduzca o se detenga resultando en estrés.

- Humedad relativa:

La tasa de transpiración de las plantas es influenciada por la humedad relativa (RH) del aire del invernadero. Esto ocasiona que menos agua sea transpirada por las plantas, lo que significa que el transporte de los nutrientes desde las raíces a las hojas sea disminuido. La humedad alta puede también causar problemas con enfermedades en algunos casos.

- Dióxido de carbono:

La cantidad de fotosíntesis (crecimiento) de las plantas, es directamente influenciada por la concentración de CO₂ en el aire del invernadero. La concentración normal de CO₂ en el aire de la atmósfera es 350 ppm. En un día brillante, la concentración de CO₂ puede ser reducida a 100 ppm en un invernadero cerrado. Esto reducirá la tasa de fotosíntesis. Incrementando la concentración del CO₂ en el invernadero, se puede incrementar la velocidad del crecimiento.

- Luz:

La radiación activa fotosintética (PAR) es la luz útil para las plantas en su proceso de fotosíntesis. Medidas de PAR dan una indicación de la cantidad de fotosíntesis posible y crecimiento llevados a cabo por la planta.

- Oxígeno disuelto:

Para sistemas hidropónicos. El oxígeno disuelto en el estanque de soluciones nutrientes, influencia el proceso de respiración. La ausencia de oxígeno detendrá el proceso y dañará seriamente o matará la planta.

- pH:

El pH de una solución es una medida del número de iones de hidrógeno. El pH de una solución es importante porque controla la disponibilidad de sales fertilizantes.

- Conductividad eléctrica:

Para sistemas hidropónicos. La conductividad eléctrica mide la cantidad de sales disueltas en una solución.

Requerimientos de calefacción:

Con el fin de seleccionar un sistema de calefacción para un invernadero, el primer paso consiste en determinar el máximo requerimiento de calor para la estructura. La pérdida de calor para un invernadero está compuesta por dos elementos: a) pérdidas por transmisión a

través de las paredes y el techo y b) pérdidas por infiltración y ventilación ocasionadas por el calentamiento de aire frío exterior.

Intercambiadores de calor:

En la mayoría de las aplicaciones geotérmicas, se requiere un intercambiador de calor para separar al equipo de calefacción del fluido geotérmico. Esto debido a la corrosión e incrustaciones asociadas a la mayoría de los fluidos geotérmicos. Generalmente, el intercambiador de calor es ubicado entre dos circuitos, el circuito geotérmico y el llamado circuito limpio, como se muestra en la fig. 3.

Como resultado de este intercambio de calor, hay cierta pérdida de temperatura del fluido disponible para el uso en el equipo de calentamiento. Esta pérdida de temperatura depende del tipo de intercambiador. Así, con intercambiadores de placas, una pérdida de temperatura de 2 a 6°C debe ser esperada, para intercambiadores de escudo y tubería la pérdida puede ser de 8 a 10°C y para configuraciones caseras de 10 a 22°C. Por ejemplo, asumiendo un fluido geotérmico a una temperatura de 66°C, con el uso de un intercambiador de placas se obtendría un fluido a una temperatura de 60°C como se muestra en la fig. 3

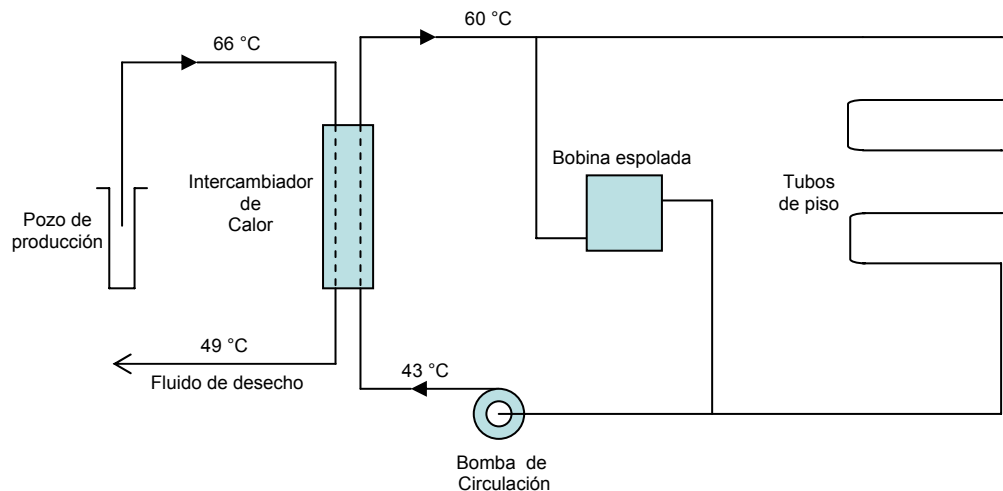


Figura 3. Esquema de un Intercambiador de Calor para invernadero.

Aplicaciones para la agricultura a campo abierto.

El agua termal se puede utilizar en agricultura a campo abierto para irrigar o para calentar el suelo y también para esterilizarlo. Estos usos son particularmente atractivos porque utilizan la calefacción en el extremo inferior de la gama de temperaturas donde hay abundancia del recurso. Ciertos cultivos de raíces (vegetales considerados típicamente como variedades de clima frío) y ciertas especies de árboles de crecimiento rápido (tales

como el álamo) demuestran un incremento en su desarrollo y producciones más grandes de cosecha si el suelo se mantiene a temperaturas de alrededor de los 21°C.

La irrigación superficial conjugada con la utilización de un aparato de calefacción del suelo enterrado por medio de una tubería, evita el problema de usar grandes cantidades de agua termal en la superficie.

Las ventajas principales del control de la temperatura en la agricultura a campo abierto son: 1) previene daño de la planta ocasionado por temperaturas bajas del aire, 2) prolonga la estación de crecimiento, aumenta el desarrollo de la planta e incrementa las producciones, 3) puede ser utilizada para esterilizar el suelo si el agua o el vapor de alta temperatura están disponibles. La esterilización del suelo puede controlar con eficacia parásitos y enfermedades. Entre una amplia gama de técnicas de esterilización disponibles, la vaporización del suelo y los métodos químicos son los más usados comúnmente. Los métodos de vaporización están basados en el calentamiento directo del suelo por contacto, ya sea por medio de tuberías enterradas en el suelo a las que se les inyecta vapor o aplicando vapor sobre la superficie del suelo bajo una cubierta plástica (fig. 4).



Figura 4. Proyecto de esterilización de suelos, Granja Oserian, Kenya.

Si las propiedades químicas satisfacen los estándares, el fluido geotérmico puede ser usado para irrigación.

Secado de productos agrícolas:

El secado de productos agrícolas es un uso industrial importante de fuentes geotérmicas de baja a media temperatura (40-150°C). El aire fresco o reciclado se fuerza para pasar a través de un convertidor aire-agua para ser calentado a temperaturas en el rango de 40 a 100°C. El aire caliente pasa a través de bandejas o correas con productos crudos dando por resultado la reducción en su contenido de agua. Los productos agrícolas que se secan usando energía geotérmica incluyen: cebolla, ajo, tomate, manzana, mango, pera, plátano, piña, alfalfa, granos, madera etc. Esta técnica se ha utilizado con éxito por más de 20 años en Broadlands Lucerne Company de Nueva Zelanda, que ha estado secando alfalfa con vapor a 175°C en un gran intercambiador de calor de aire forzado. Otros países que usan el calor geotérmico para los propósitos agrícolas incluyen Grecia, Guatemala, Israel, México y E.U. (Andritsos et al., 2002). La fig. 5 presenta los pasos del proceso de secado de fruta en Guatemala (Mérida, 1999).



1. Pesado de la fruta
2. Tajado
3. Disposición en las compartimentos del horno de secado
4. Procedimiento de secado
5. Producto terminado

Figura 5. Pasos para procesar las frutas.

1.4.3. Usos Mineromedicinales

La aplicación en usos mineromedicinales (también llamados balneología médica o termalismo) y con fines recreativos, utiliza principalmente las aguas descargadas naturalmente por los manantiales y aprovecha las propiedades térmicas y minerales de las esta aguas. Esta es una de las aplicaciones más antiguas y de más rápida implementación.

La actividad de las aguas mineromedicinales en el cuerpo humano, depende de parámetros como la temperatura, composición, propiedades mecánicas, acciones físicas y técnicas de administración. De acuerdo con Armijo y San Martín (1994), los principales mecanismos de acción de estas aguas son los siguientes (ver glosario de conceptos médicos presentado en el Anexo 1):

(1) Medios vitales o nutricios. Los medios vitales y nutricios se refieren a la mayor supervivencia de los órganos aislados en aguas minerales, que en soluciones isotónicas artificiales.

(2) Acción catalítica. La acción catalítica o cinética, positiva (aumento de la velocidad de reacción) y negativa (disminución de la velocidad de reacción), ha sido atribuida a los efectos primarios y secundarios de las aguas mineromedicinales. Los efectos primarios,

dependen de los iones que actúan como catalizadores más todos los iones presentes y los efectos secundarios, de las concentraciones reales de los iones catalíticamente activos.

(3) Zimosténica y zimasténica. Las acciones zimosténica y zimasténica, relativas a las enzimas, están relacionadas con la actividad catalítica de las aguas mineromedicinales. Estas aguas pueden comportarse como estimulantes o depresoras de sistemas enzimáticos como ptialina salivar humana, enzimas de hígado de animales intoxicados, ATPasa en hígado de ratas intoxicadas

(4) Acción antitóxica y anagotóxica. El poder antitóxico de algunas aguas mineromedicinales ha sido probado para venenos como estrictina, morfina, cocaína, toxina diftérica.

(5) Acción antihistamínica. También experimentalmente se ha demostrado el poder antihistamínico de ciertas aguas mineromedicinales sobre diferentes tejidos como intestino de cobaya, músculo bronquial de cerdo, presión arterial en gato y en el hombre. A la acción antihistamínica se asocia la acción antianafiláctica.

A través de los mecanismos dichos mecanismos, las aguas mineromedicinales tienen una acción paliativa o coadyuvante en tratamientos de diversas dolencias (Armijo y San Martín, 1994):

(1) Reumatismos: Crónicos inflamatorios (artritis reumatoidea, crónica juvenil, espondiloartritis anquilosantes), crónicos degenerativos (artrosis), abarticulares o paraarticulares y metabólicos.

(2) Problemas del aparato locomotor no reumáticos: Analgésicas, decontracturantes, facilitadoras de la movilidad, antiinflamatorias, agentes psicoterápicos, secuelas postraumáticas y quirúrgicas.

(3) Afecciones otorrinolaringológicas y broncopulmonares: Afecciones del oído, catarro tubo-timpánico recidivante (repetitivas), sorderas de origen rinofaríngeo, sorderas del oído medio o de transmisión, laberintopatías de naturaleza alérgica, tratamiento pre y postoperatorio de otosclerosis, rinitis crónicas, rinitis atróficas, sinusitis agudas recidivantes, sinusitis alérgicas, catarro nasofaríngeo o crónico, adenoides, laringitis inespecíficas, parálisis laríngeas, bronquitis crónicas, bronquiectasias, esclerosis pulmonar.

(4) Estomatología y afecciones gástricas e intestinales: Afecciones de la mucosa bucolingual, dispepsias, gastritis, enfermedad ulcerosa gastroduodenal, estreñimiento, enteritis, colitis.

(5) Afecciones hepáticas y de vías biliares: Hepatitis (paliativo de las alteraciones que causa), afecciones de la vesícula y vías biliares.

(6) Afecciones renales y de vías urinarias: Secuelas de neuropatías, albuminurias simples, litiasis, infecciones urinarias.

(7) Dermatología: Eccemas, psoriasis, dermatosis seborreicas y pruriginosas, acné juvenil y dermatitis.

(8) Ginecología: Procesos inflamatorios de los genitales internos, esterilidad femenina, disturbios de la época puberal, disturbios del climaterio.

(9) Afecciones metabólicas y endocrinas: Obesidad, diabetes, hiperlipoproteinemias, hiperuricemias, afecciones tiroideas, hormonoterapia, trastornos gonadales, anemia hipocrómica relacionada con trastornos menstruales.

(10) Afecciones cardiovasculares: Arteritis de miembros inferiores, insuficiencia de circulación coronaria, algunos trastornos arteriales cerebrales y retinianos, síndrome arterio-venoso-capilar, cardiopatías y distonías neurovegetativas de repercusión vascular, várices, flebitis.

(11) Hemopatías: Cuadros anémicos hipocrómicos o hiposiderémicos.

(12) Afecciones neurológicas: Afecciones del sistema nervioso periférico, polirradiculitis, neuralgias, secuelas de poliomielitis, distonías, hemiplejías, enfermedad de Parkinson, esclerosis simple o en placas.

(13) Psiquiatría (tratamiento de pequeñas perturbaciones psíquicas o mentales): Estados infraneuróticos, neurosis, personalidades psicopáticas, reacciones psíquicas anormales, inestabilidad psico-motora y síndromes psiquiátricos, enfermedades psicósomáticas (problemas del aparato digestivo, del aparato circulatorio o del aparato génito-urinario, coincidentes con situaciones emocionales).

(14) Afecciones alérgicas: Aparato respiratorio, afecciones cutáneas, aparato digestivo, alergia alimentaria.

1.5.OBJETIVOS

1.5.1. Presentar el primer inventario de fuentes termales y minerales del Departamento de Cundinamarca.

1.5.2. Caracterizar los manantiales de Cundinamarca en cuanto a su composición química y sus indicadores de contaminación microbiológica.

1.5.3. Identificar algunas posibilidades de aprovechamiento del recurso geotérmico de Cundinamarca, que puedan servir como referencia para planes de desarrollo en favor de las comunidades locales.

2. METODOLOGÍA

Las generalidades sobre el procedimiento para la elaboración de inventarios de manantiales termales son presentados en la “Guía para Inventario de Fuentes Termales” (Lozano, 2002).

Para el presente inventario, se recopiló la información disponible sobre la ocurrencia de manantiales en el departamento y se realizaron consultas a las UMATAS de algunos municipios, para confirmar la ocurrencia de este tipo de manantiales en su territorio e indagar sobre las actividades en que se soporta la economía local. A partir de esta información se llevaron a cabo las campañas de muestreo correspondientes.

2.1.GEOLOGÍA

Inicialmente, el departamento fue enmarcado dentro de una geología regional; en la cual se describieron, en forma general, las diferentes unidades estratigráficas que afloran en toda el área de estudio, así como las fallas que la afectan.

En cuanto a la conformación de grupos de manantiales, ésta se realizó con base en las fallas o sistemas de fallas que afectan al departamento; y las cuales lo dividen en cuatro bloques tectónicos (Acosta & Ulloa, 2002).

La geología de campo se basó en las observaciones estratigráficas y estructurales de los alrededores de los manantiales. Estas observaciones fueron analizadas en el trabajo de oficina y complementadas con informaciones de diversos autores, con el fin de determinar posibles relaciones con fallas activas.

2.2.GEOQUÍMICA

2.2.1. Muestreo y análisis

- **Muestreo para análisis químico e isotópico.** El muestreo de los manantiales se llevó a cabo de acuerdo con la metodología propuesta por Giggenbach & Goguel (1989). Se recolectaron tres muestras en cada punto: (1) 500 ml de muestra filtrada con filtro de 0.45 μ m y acidificada hasta pH inferior a 2, por adición de 5 ml de solución 4 N de ácido nítrico (HNO_3), para análisis de cationes, silicio y boro, (2) 1000 ml, de muestra sin tratamiento para determinaciones de sulfatos pH, conductividad, alcalinidad total, sulfuro de hidrógeno y cloruros y (3) 250 ml de agua preservada por adición de 5 ml de

solución de dicromato de potasio ($K_2Cr_2O_7$) y ácido nítrico suprapuro: 5 g $K_2Cr_2O_7$ en 250 ml de ácido nítrico 1:1 en volumen.

Para el análisis de ^{18}O y D, se recolectaron solamente 18 muestras de manantiales del Bloque 3, siguiendo la metodología recomendada por el Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA). Se recolectaron aproximadamente 100 ml de muestra en frascos plásticos llenos al tope, los cuales fueron remitidos al OIEA para su análisis correspondiente.

- **Análisis.** Los análisis de 45 de las 54 muestras, fueron realizados por el Laboratorio Thermochem Inc.⁴ aplicando las técnicas analíticas indicadas en la Tabla 3, en la cual se

Tabla 3. Técnicas analíticas utilizadas para el análisis de las muestras. Información suministrada por el Laboratorio Thermochem Inc.

Analito	Límite práctico de cuantificación	Método	Incertidumbre(+/-)	Desviación Estándar *
Na	0.05	FAA	0.012	0.01000
K	0.01	FAA	0.0025	0.00200
Ca	0.1	FAA	0.025	0.02000
Mg	0.005	FAA	0.0012	0.001
Li	0.05	FAE	0.012	0.010
Sr	0.05	FAA	0.012	0.01
Ba	0.001	ICPMS	0.00011	0.00009
B	0.2	Espectrofotométrico	0.050	0.04
Rb	0.1	FAA	0.025	0.02
Cs	0.1	FAA	0.025	0.02
Al	0.1	ICP	0.0040	0.0032
SiO ₂	0.05	Espectrofotométrico	0.012	0.01
Cl	0.025	IC	0.0062	0.005
F	0.025	IC	0.0062	0.005
SO ₄	0.1	IC	0.025	0.02
HCO ₃	0.25	Volumétrico	0.062	0.05
NO ₃	0.1	IC	0.025	0.02
PO ₄	0.15	IC	0.25	0.2
NH ₃	0.01	Fluorescencia	0.056	0.045
Br	0.1	IC	0.025	0.02
I		Ión selectivo	0.25	0.2
CN	0.05	Colorimétrico	0.012	0.01
pH		Potenciométrico	0.031	0.025
Sólidos totales disueltos	2	Gravimétrico	0.50	0.4
Fe	0.01	FAA	0.0012	0.001
Mn	0.0005	ICPMS	0.00002	0.00001
As	0.001	ICPMS	0.00021	0.00017
Se	0.001	ICPMS	0.00076	0.00061
Sb	0.003	ICPMS	0.000044	0.00004
Hg	0.0002	CVAA	0.00026	0.00021
Cd	0.0005	ICPMS	0.00001	0.00001
Cr	0.001	ICPMS	0.00007	0.00006
Cu	0.001	ICPMS	0.00003	0.00002
Pb	0.0005	ICPMS	0.00001	0.00001

FAA = Absorción atómica de llama. FAE = Emisión atómica de llama. ICPMS = Plasma acoplado inductivamente - Espectrometría de masas. IC = Cromatografía iónica. CVAA = Absorción Atómica con vapor en frío

* Desviación estándar de medidas de 5 patrones al límite de detección. Incertidumbre (a 95% de confianza) = Desviación estándar x $2.776 / \sqrt{5}$

⁴ Thermochem Inc. Laboratory & Consulting Services. Santa Rosa, California. USA

indican los límites prácticos de cuantificación para cada analito, así como la incertidumbre analítica para un límite de confianza del 95%, calculada para patrones de concentración cercana al límite de detección. El esquema de control de calidad analítico, los porcentajes de recuperación de un patrón externo y una muestra fortificada (“spiked”) y la comparación de los resultados de una muestra ciega, son presentados en el Anexo 2. Las nueve (9) muestras restantes fueron analizadas por el Laboratorio de Aguas y Gases de INGEOMINAS, dos (2) de ellas en el año 2000, las cuales corresponden a manantiales de Gachetá, que no fueron visitados en la segunda campaña de muestreo. Los análisis isotópicos fueron ejecutados por convenio de cooperación por el OIEA en Cracovia, Polonia y en el Laboratorio de Hidrología Isotópica del OIEA en Viena.

2.2.2. Evaluación geoquímica

Se aplicaron las herramientas geoquímicas enunciadas a continuación:

- Clasificación del agua de los manantiales, en función de la concentración relativa de aniones dominantes, Cl, SO₄, HCO₃, expresada en mg/l (Giggenbach, 1991).
- Clasificación del agua de los manantiales, en función de la concentración relativa de cationes mayores, Na+K, Ca, Mg, expresada en meq/l.
- Cálculo de la composición relativa Na-K-Mg (Giggenbach, 1988).

2.2.3. Parámetros térmicos

Teniendo en cuenta el ambiente geológico sedimentario en el que probablemente ocurren los acuíferos que alimentan los manantiales de este Departamento, no se aplicaron los geotermómetros alcalinos basados en el equilibrio entre feldespatos comunes en rocas ígneas y el fluido geotérmico. Se aplicaron solamente geotermómetros basados en la concentración de sílice (Nicholson, 1993), como indicador de temperatura mínima probable en el subsuelo. Para corregir el geotermómetro de cuarzo por dilución, se aplicó el modelo Entalpía – Sílice asumiendo, que la solubilidad del cuarzo controla el contenido de sílice en el reservorio, que el enfriamiento conductivo despreciable (disminución de la temperatura debido solamente a la mezcla), que no se registran procesos de ebullición y ausencia de precipitación de sílice, después de abandonar el reservorio (Nicholson, 1993). Adicionalmente, a partir de este geotermómetro se estimó el gradiente geotérmico, siguiendo la metodología propuesta por Swanberg y Morgan, 1980, aplicada para la estimación de gradientes geotérmicos como para el Mapa Geotérmico de Colombia (Alfaro, 2000).

2.3.MICROBIOLOGÍA

2.3.1. Muestreo microbiológico

Las muestras para análisis microbiológico se recolectaron en frascos de vidrio, de 500 ml, esterilizados. El procedimiento, indicado por el laboratorio analítico⁵, consistió en sumergir

⁵ Laboratorio Microbiólogos Asociados

el frasco por debajo del espejo de agua, destaparlo para permitir el llenado total del frasco y, volver a taparlo antes de sacarlo a la superficie. En el caso de manantiales poco profundos se flameó el aire circundante al frasco, haciendo uso de un mechero de alcohol, antes de destaparlo y durante las adiciones sucesivas de la muestra de agua, hasta llenarlo completamente y volver a taparlo; esto con el fin de reducir el riesgo de contaminación con microorganismos del aire. Las muestras fueron rotuladas y transportadas al laboratorio analítico, antes de 24 horas.

2.3.2. Análisis microbiológico

Las determinaciones de mesófilos aeróbios, coliformes totales, coliformes fecales, pseudomonas aeruginosa, mohos y levaduras, fueron realizadas por el Laboratorio de análisis y asesorías Microbiólogos Asociados por el método de filtración por membrana de 0.45 μ m y siembra en cultivos específicos de acuerdo con la Resolución 414 del Ministerio de Salud de 2002 (Comunicación verbal con el Microbiólogo Oscar Osorio).

2.4. POTENCIAL DE APROVECHAMIENTO

2.4.1. Generalidades

Con base en la temperatura geoquímica estimada en el reservorio, se utilizó el Diagrama Lindal (Gudmundsson et al., 1985 en Lund, 1999), para identificar de manera preliminar, las posibles aplicaciones industriales del fluido profundo inferido para cada uno de los Bloques. Otros aspectos fundamentales para la exploración, tales como la recarga, la confirmación de la existencia de un reservorio y su temperatura, sus dimensiones y condiciones de permeabilidad, deben ser evaluadas a través de estudios detallados, antes de iniciar cualquiera de los desarrollos propuestos.

2.4.2. Acuicultura

A partir de los datos de temperatura, pH, química de las aguas y actividad económica en los municipios, se pudo establecer de manera general los diferentes lugares donde la acuicultura geotérmica podría tener éxito. Considerando las especies que tendrían mejor acogida en el mercado local y externo, se tomó una temperatura mínima de 30°C, que por un lado propiciara el adecuado desarrollo de las especies y que por el otro diera un margen de pérdida de calor en el proceso previo a la utilización para llegar a la temperatura óptima de cultivo según la especie. Los parámetros químicos se aplican de acuerdo a los rangos descritos anteriormente en el capítulo de Potencial de Aprovechamiento.

2.4.3. Usos agrícolas

El principal criterio que se empleó para generar los mapas de distribución de los usos agrícolas en el departamento fue la temperatura. Debido a que se recomienda el empleo de intercambiadores de calor, la mayoría de los usos, a excepción del riego, no son afectados por las condiciones químicas o la calidad del agua termal. A continuación se resume este criterio de acuerdo al uso:

Uso	Temperatura mínima
Invernaderos	> 30 °C
Aplicaciones a campo abierto	> 21 °C
Secado de frutas	> 40 °C

De otro lado, se incluyeron factores como la disponibilidad de frutas, para el caso del secado, se consideraron los municipios en pisos térmicos altos y zonas afectadas por la acción de las heladas, ya que se verían beneficiados por una práctica de la agricultura complementada con geotermia. Con relación a los invernaderos, como se mencionaba anteriormente, el principal criterio fue la temperatura tanto del recurso geotérmico como del medio ambiente, ya que la combinación de estos dos parámetros arroja como resultado la especie apropiada para cultivar, que puede pertenecer a climas más húmedos o cálidos.

2.4.4. Usos mineromedicinales

Para identificar las posibles aplicaciones de las aguas termales en usos mineromedicinales, se utilizaron criterios generales de temperatura y composición, definidos por Armijo y San Martín (1994) resumidos en la Tabla del Anexo 3. Los manantiales se clasificaron de acuerdo con los parámetros disponibles, específicos para fines terapéuticos: temperatura en superficie, anión dominante, concentración de cationes específicos y mineralización.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados se presentan en cuatro temas principales: (1) Geología, el cual incluye la descripción de la geología regional, características de los cuatro Bloques geológicos y del área de emergencia de los manantiales, (2) geoquímica, en el que se describe la composición y estimación de parámetros térmicos, (3) microbiología, en el que fundamentalmente se identifican limitaciones para uso por contaminación biológica y (4) usos potenciales en acuicultura, agricultura y mineromedicinales (balneología y agua mineral envasada).

3.1. RASGOS GEOLÓGICOS REGIONALES

Los rasgos geológicos regionales corresponden a la descripción de las unidades que afloran en el Departamento de Cundinamarca y a la tectónica que las afecta. Las descripciones que se presentan a continuación son basadas en el trabajo realizado por los geólogos Jorge Acosta & Carlos Ulloa (2002): Mapa Geológico de Cundinamarca (Memoria Explicativa).

3.1.1 Estratigrafía

En el Departamento de Cundinamarca afloran rocas sedimentarias, de edad Cretáceo y Terciario; las cuales suprayacen a rocas paleozoicas, de bajo grado de metamorfismo. Adicionalmente, afloran unos pequeños cuerpos intrusivos hacia el norte del departamento.

De acuerdo con Acosta & Ulloa (2002), el departamento se divide en cuatro bloques tectónicos (ver Mapa Bloques Tectónicos y Ocurrencia de Fuentes Termales en Cundinamarca, Anexo 4). La descripción de las unidades se hace con base en dichos bloques.

3.1.1.1. Bloque 1: Valle Medio del Magdalena-Guaduas.

El bloque Valle Medio del Magdalena – Guaduas está localizado entre el límite occidental del departamento (Río Magdalena) y la Falla Bituima – La Salina. En el sector más occidental afloran rocas de edad Terciaria, mientras que al oriente se presentan rocas cretácicas y terciarias.

3.1.1.1.1. Grupo Guaguaquí (Kgg)

El Grupo Guaguaquí, designado por Ulloa et al. (1978), es una secuencia estratigráfica, la cual subyace al Grupo Olini en la Plancha 170 Vélez. Dicha unidad está en la misma posición estratigráfica de las formaciones Hondita y Loma Gorda, de De Porta (1966), pero

con características litológicas diferentes. Se ha definido como su localidad tipo la secuencia que aflora en la Quebrada Cristalina, al este del Caserío de Puerto Romero (Puerto Boyacá, Boyacá). En los sectores de La Azauncha, Llano Mateo, Quebrada Salinas (Municipio de Yacopí) y de la línea férrea entre Córdoba y Cambrás (Municipio de Guaduas), la unidad en mención subyace concordantemente al Grupo Olini.

Con respecto al Departamento de Cundinamarca, el Grupo Guaguaquí aflora al noroccidente; en una faja de 17 Km., de ancho (Municipio de Yacopí), la cual se adelgaza hacia el sur hasta alcanzar 2 Km., al oeste de Apulo. Está conformado por lodolitas calcáreas, negras con laminación paralela, concreciones grandes, capas medias a gruesas de caliza micrítica con concreciones. El espesor reportado por Rodríguez & Ulloa (1994b), en la Quebrada Cristalina oscila entre 800 y 1000 m. Con base en fauna colectada, Etayo (1979; en Rodríguez & Ulloa, 1994a) asignó una edad que comprende desde Albiano medio hasta el Coniaciano inferior.

3.1.1.1.2. Formación Hondita (Ksh)

La Formación Hondita fue definida por De Porta (1966), quien tomó este nombre de la Quebrada La Hondita del Municipio de Piedras (Tolima). En el Departamento de Cundinamarca, esta unidad se extiende desde Girardot hasta Guataquí.

La unidad en mención está constituida por una sucesión de capas delgadas a gruesas de calizas arenosas, las cuales alternan con lutitas y shales. Esta secuencia alcanza un espesor de 90 m.

El techo de esta unidad está compuesto por una capa de lodolitas grisáceas, laminadas.

Bürgl & Dumit (1954), de acuerdo con la posición estratigráfica evidenciada en la sección Girardot - Nariño, asignan una edad Turoniano a la Formación Hondita.

3.1.1.1.3 Formación Loma Gorda (Kslg)

La Formación Loma Gorda es una unidad definida por De Porta (1966). Dicha unidad está constituida por lodolitas y arcillolitas laminadas, con grandes concreciones calcáreas en la base y en el techo de la secuencia.

Con respecto al Departamento de Cundinamarca, esta unidad aflora entre Girardot y Guataquí, y entre Jerusalén y Tocaima.

En cuanto a su posición estratigráfica, la Formación Loma Gorda yace en forma concordante sobre la Formación Hondita y el contacto superior con el Grupo Olini es neto. El espesor de esta unidad es de 167 m.

Según Bürgl (1961), dentro de la unidad hay formas características del Coniaciano al Turoniano.

3.1.1.1.4 Grupo Olini (Kso)

Grupo Olini es un nombre propuesto por Petters (en De Porta, 1965) para describir alguna especie de foraminíferos, sin especificar la litología. En el presente trabajo se utiliza la definición de De Porta (1966), en la cual se agrupan dos niveles silíceos, denominados Lidita Inferior y Lidita Superior, los cuales fueron elevados a formaciones por Cáceres & Etayo (1969), y el nivel intermedio denominado Nivel de Lutitas y Arenas (De Porta, 1965). Dichas unidades se describen a continuación.

Formación Lidita Inferior

Cáceres & Etayo (1969) designan Formación Lidita Inferior a la secuencia silícea inferior del Grupo Olini. Esta unidad está compuesta por capas muy delgadas de chert, liditas y limolitas silíceas con estratificación ondulada no paralela y laminación paralela continua. A partir de cortes geológicos el espesor se ha estimado en 150 m.

Bürgl & Dumit (1954) asignan a esta unidad una edad Coniaciano temprano, con base en la fauna existente. Sin embargo, Martínez (1990; en Acosta & Ulloa, 2002) sugiere que puede alcanzar el Santoniano temprano.

Nivel de Lutitas

El Nivel de Lutitas es el nombre con el cual De Porta (1965) designa al conjunto intermedio del Grupo Olini. Está constituido por una secuencia de limolitas de cuarzo y lodolitas calcáreas y silíceas, con intercalaciones de capas muy gruesas de arena fina a media. Con base en cortes geológicos, el espesor se ha estimado en 100 m aproximadamente.

Tanto Bürgl & Dumit (1954) como Martínez (1990; en Acosta & Ulloa, 2002), asignan una edad Santoniano a esta unidad, con base en la fauna existente.

Formación Lidita Superior

La Formación Lidita Superior fue elevada en su rango por Cáceres & Etayo (1969). Inicialmente, sin el rango de formación, De Porta (1965) denominó de este modo a la secuencia superior del Grupo Olini. Esta unidad esta conformada por limolitas calcáreas, chert y calizas biomicríticas.

Bürgl & Dumit (1954) asignan una edad Campaniano a esta unidad; aunque, Martínez (1990; en Acosta & Ulloa, 2002) no descarta que alcance el Maastrichtiano.

En los sectores de Girardot – Tocaima y al norte de Guaduas, no es posible diferenciar los tres niveles del Grupo Olini. Solo se encuentra una franja conformada por una secuencia espesa de limolitas silíceas, calcáreas y chert, y algunas intercalaciones de capas delgadas de lodolitas negras.

En el Valle del Magdalena, el Grupo Olini subyace una secuencia de conglomerados de cuarzo con matriz calcárea denominada Formación Cimarrona. De Guaduas hacia el norte, se presentan unas arenitas y lodolitas calcáreas denominadas informalmente como Formación Córdoba. En el sector de Tocaima se presenta una secuencia de lodolitas y arenitas calcáreas llamadas informalmente Nivel de Lutitas y Arenas, las cuales infrayacen una secuencia de capas muy gruesas de arenitas de cuarzo denominada Formación La

Tabla.

3.1.1.1.5. Formación Cimarrona (Ksci)

La Formación Cimarrona tuvo como nombre original “Cimarrona Formation” (Washburne & White (1922; en Acosta & Ulloa, 2002)). Se trata de una secuencia conglomerática que aflora sobre la carretera Honda – Guaduas, y que, según De Porta (1966), está subdividida en cuatro miembros, los cuales de base a techo son: 1) Miembro La Fría (arenitas, gravas y conglomerados), 2) Nivel de Arenitas y Lutitas (ortocuarcitas de grano fino a medio, con intercalaciones de lutitas), 3) Miembro Zaragoza (lutitas e intercalaciones de ortocuarcitas) y 4) Miembro La Primavera (ortocuarcitas, gravas y conglomerados oligomícticos, con cemento calcáreo).

Gómez & Pedraza (1994), dividen esta sucesión en cuatro segmentos informales correspondientes a los miembros definidos por De Porta (1966). Sin embargo, estos autores retoman la idea de Raasveldt & Carvajal (1957) quienes consideran que la unidad en mención es un solo cuerpo conglomerático que se repite por causa de fallas inversas. Por lo anterior, Gómez & Pedraza (1994) proponen restringir el nombre de Formación Cimarrona a los segmentos definidos por ellos como Ca y Cc, los cuales se corresponden con los miembros La Fría y La Primavera de De Porta.

3.1.1.1.6. Formación La Tabla (Kslt)

La Formación La Tabla, definida por De Porta (1965), es la parte más alta de lo que se ha denominado Guadalupe en la región de Girardot – Guataquí. Dicho nombre proviene del Caserío La Tabla (Tolima). La sección tipo se encuentra en el camino entre Piedras y La Tabla. La parte inferior es predominantemente arenosa con alternancia de lutitas grises. En la parte media afloran bancos de lutitas con pequeñas intercalaciones de arenas, y en el techo se presentan conglomerados de gránulos, granos de cuarzo y chert, con matriz silíceo.

En el Departamento de Cundinamarca, esta unidad aflora al occidente de Apulo, al sur de Tocaima, y entre Girardot y Guataquí; sectores en los cuales se presenta como una secuencia de capas gruesas de areniscas de cuarzo, de grano fino a medio.

3.1.1.1.7. Formación Córdoba (Ksco)

La Formación Córdoba ha sido propuesta por Ulloa et al. (1978), en la Plancha 170, para nombrar una sucesión de capas muy gruesas de limolitas calcáreas con intercalaciones de calizas negras arenosas, y areniscas calcáreas, las cuales infrayacen a la Formación Seca. La localidad tipo aflora en la línea férrea Córdoba – Cambrás, al norte de Guaduas. Sin embargo, esta unidad corresponde a la Formación Umir de Morales et al. (1956).

Rodríguez & Ulloa (1994a), con base en fauna, asignan una edad Campaniano – Maastrichtiano.

3.1.1.1.8. Formación Nariño (Ksna)

El Nivel de Lutitas y Arenas corresponde a la denominación informal de De Porta (1966), para un nivel de lodolitas calcáreas con intercalación de calizas biomicríticas. Esta unidad aflora entre Girardot y Guataquí.

El espesor es de 160 m., medido en la sección La Virgen – El Retiro (Plancha 227).

Bürgl & Dumit (1954) le asignan una edad Campaniano – Maastrichtiano, mientras que Martínez (1990; en Acosta & Ulloa, 2002), le asigna una edad Maastrichtiano medio a tardío, con base en foraminíferos.

3.1.1.1.9. Formación Seca (TKs)

La Formación Seca ha sido propuesta por De Porta (1966) para denominar una secuencia de lodolitas y arenitas de color rojizo, la cual aflora en la Quebrada Seca, cerca de Cambao.

Dicha unidad hace parte del Sinclinal de Jerusalén – Guaduas y está delimitada por la Falla del Alto del Trigo. Está constituida por lodolitas café – grisáceas, con intercalaciones de arenitas y limolitas de cuarzo a subfeldespáticas. Hacia el sur de Jerusalén y en los alrededores de Tocaima, se presentan mantos de carbón en la parte inferior de la unidad.

Su ambiente es fluvial con extensas llanuras de inundación.

3.1.1.1.10. Formación Hoyón (Tih)

La Formación Hoyón es un nombre postulado por Raasveldt & Carvajal (1957; en De Porta, 1966) para hacer referencia a una secuencia conglomerática, la cual presenta una localidad tipo, definida por Van der Hammen (1958), en la Quebrada Chaguaní y en la confluencia con la Quebrada El Hoyón. Se presenta en el Sinclinal Jerusalén – Guaduas y se reconocen cuatro conjuntos: 1) Hoyón 1 (Miembro Cambao (De Porta, 1966)): Conformado por conglomerados con guijos de chert, cuarzo, liditas y fragmentos de rocas ígneas y metamórficas, intercaladas con cuarzoarenitas y limoarenitas, con un espesor total de 368 m.; 2) Hoyón 2 (Miembro Nivel de Lutitas (De Porta, 1966)): Constituida por arcillolitas café – amarillentas con esporádicas capas delgadas de conglomerados y arenitas inconsolidadas, con un espesor de 227 m.; 3) Hoyón 3 (Miembro Aguas Claras (De Porta, 1966)): Conformado por conglomerados polimícticos con intercalaciones de cuarzoarenitas y lodolitas rojas a púrpura, con un espesor de 160 m.; y 4) Hoyón 4: Está compuesto por lodolitas de color rojo – rosado a gris, y un espesor aflorante de 140 m.

De Porta (1966) asigna una edad Oligoceno Inferior a la base de la unidad, por asociación palinológica; mientras que Van der Hammen (1958) le asigna una edad Eoceno.

3.1.1.1.11. Formación San Juan de Río Seco (Tis)

Con el nombre Formación San Juan de Río Seco, De Porta (1966) designa la secuencia areno – arcillosa que se presenta entre las formaciones Hoyón y Santa Teresa, en el

Sinclinal Jerusalén – Guaduas.

Según De Porta (1966), esta unidad se divide en cinco segmentos; los cuales se describen a continuación, de base a techo: 1) San Juan 1 (Miembro Armadillos (De Porta, 1966)): Constituida por capas muy gruesas de arenitas gruesas a conglomeráticas y con un espesor estimado de 250 m.; 2) San Juan 2 (nivel inferior de lutitas del Miembro Almácigos (De Porta, 1966)): Conformada por una alternancia de capas gruesas a muy gruesas de arcillolitas y lodolitas rojas oscuras, con intercalaciones de cuarzoarenitas de grano fino a medio y un espesor de 333 m.; 3) San Juan 3 (nivel de arenitas del Miembro Los Almácigos (De Porta, 1966)): Capas gruesas a medias de cuarzoarenitas de grano medio a grueso, localmente conglomeráticas, con delgadas intercalaciones de lodolitas y un espesor de 217 m.; 4) San Juan 4 (nivel superior del Miembro Los Almácigos (De Porta, 1966)): Compuesta por capas gruesas arcillolitas marrón con intercalaciones de capas delgadas de cuarzoarenitas, y con un espesor de 175 m.; 5) San Juan 5 (Miembro de la Cruz (De Porta, 1966)): Alternancia de capas medias a gruesas de cuarzoarenitas de grano medio a grueso con lodolitas grises y oliva, con un espesor de 500 m.

El ambiente de depositación corresponde a fluvial meandriforme y su edad puede ser Oligoceno.

3.1.1.1.12. Formación La Cira (Toc)

La denominación Formación La Cira fue usada por Wheeler (1935), para nombrar la parte superior de lo que se conoce como Formación Colorado, en el Valle Medio del Magdalena. El nombre proviene del campo petrolero La Cira, localizado en la Concesión De Mares, Santander (De Porta, 1974).

En Cundinamarca, esta unidad aflora en sector NW del departamento, en el municipio de Yacopí, donde está conformado por capas medias a gruesas de arcillolitas grises y verdosas con delgadas intercalaciones de areniscas cuarzosas, de grano fino a medio. El espesor se estima variable entre 200 y 300 m.

3.1.1.1.13. Formación Santa Teresa (Tst)

El nombre Formación Santa Teresa fue asignado por De Porta (1966) a una secuencia que aflora, inmediatamente sobre la Formación San Juan de Río Seco, en el Sinclinal Jerusalén – Guaduas. Esta unidad se ubica en el núcleo del sinclinal en mención y está conformada por arcillolitas y lodolitas grises, con intercalaciones de limolitas y arenitas de cuarzo de grano fino a conglomeráticas.

De acuerdo con De Porta (1966), se trata de un depósito lagunar con conexiones al mar por medio de canales. Con base en la fauna de esta unidad, el mismo autor le asigna una edad Oligoceno.

3.1.1.1.14. Formación Barzalosa (Tba)

La Formación Barzalosa ha sido establecida como piso por Scheibe (1934; en Cáceres &

Etayo, 1969). Cáceres & Etayo (1969) la elevan a formación, y la separan en cuatro segmentos: El más inferior constituido por conglomerados, seguido por un conjunto de arcillolitas abigarradas con intercalaciones de conglomerados, a continuación se presentan arcillolitas y arenitas con vetas de yeso, y en el techo se presentan arcillolitas con intercalaciones de areniscas.

Esta unidad aflora entre Tocaima y Girardot.

3.1.1.1.15. Conglomerados de Carmen de Apicalá (Tsca)

Los Conglomerados de Carmen de Apicalá fueron denominados informalmente por Acosta et al. (2002). Afloran en el suroeste de Cundinamarca y constituye la base de la terraza de Tolemaida. Se divide en tres segmentos: El inferior está conformado por conglomerados y areniscas conglomeráticas de cuarzo lechoso y chert; el nivel intermedio está constituido por conglomerados con intercalaciones de arcillolitas y arcillolitas limosas; mientras que el nivel superior lo conforman capas de conglomerados con algunas capas de arenitas y lodolitas amarillas.

A partir de cortes geológicos se estima un espesor aproximado de 1500 m. Esta unidad puede corresponder con parte del Grupo Gualanday.

3.1.1.1.16. Grupo Honda (Tsh)

El nombre de Grupo Honda está asociado con la población del mismo nombre en el norte del Departamento del Tolima.

Buttler (1939, 1942) divide el Honda en dos partes: Una inferior y otra superior. Con base en esta división, De Porta (1965, 1966) propone los nombres de Formación Cambrás para la parte inferior y la Formación San Antonio para la parte superior. Adicionalmente, le asigna el nombre de Formación Los Limones para las arcillas y arenas rojas de la parte superior del Honda.

De Porta (1966; en Rodríguez & Ulloa, 1994), considera, con base en la fauna encontrada, que la edad del Honda está comprendida entre el Oligoceno superior y el Mioceno superior, y que estos sedimentos se depositaron en un ambiente continental de tipo lagunar.

Al sur se observa un solo paquete y al norte se alcanzan a diferenciar tres formaciones, las cuales se describen a continuación:

Formación Cambrás (Tmhc)

La Formación Cambrás deriva su nombre de la estación del ferrocarril Cambrás en el norte del municipio de Guaduas (DePorta, 1966).

Rodríguez & Ulloa (1981; en Acosta & Ulloa, 2002) dividen esta unidad en los miembros La Viuda y Salamina. Esta unidad está conformada por arcillolitas grises, verdosas y violáceas, con intercalaciones de cuarzoarenita de grano fino a medio. El espesor total es de 1455 m. Con base en su posición estratigráfica, la Formación Cambrás se considera de edad

Mioceno.

Formación San Antonio (Tmhs)

La Formación San Antonio debe su nombre a la Cordillera de San Antonio, localizada al este de la población de Honda. Está constituida por capas gruesas arenas, gravas y gravas arenosas, con niveles de lutitas. Con base en cortes geológicos, se estima un espesor de 1500 m. para esta unidad.

Formación Los Limones (Tmhl)

La Formación Los Limones es una denominación que procede de la quebrada del mismo nombre, afluente del Río Seco, al sureste del Municipio de Honda.

Dicha unidad está integrada por una sucesión de capas delgadas a medias de arenitas y lutitas rojas. Se estima un espesor de 300 m. Aflora principalmente en el extremo noroccidental de Cundinamarca.

3.1.1.1.17. Formación Mesa (Tsm)

La Formación Mesa fue nombrada inicialmente por Hettner (1892). De Porta (1966) la divide en los miembros Palmas, Bernal y Lumbí.

Esta unidad aflora al noroeste de Cundinamarca y está constituida por gravas y arenas con intercalaciones de capas de arcillas.

La parte inferior es considerada como de edad Plioceno Inferior, y la superior puede incluir el Pleistoceno.

3.1.1.1.18. Intrusión de Cáceres

La Intrusión de Cáceres es un nombre dado por Pratt (1961), quien describe cinco silos de diabasas que alcanzan hasta 10 m. de espesor y se localizan 1000 m. al este del pozo Cáceres-1, al noroccidente de Yacopí.

Según Fabre & Delaloye (1983), esta unidad está constituida por gabros que intruyen lutitas y limolitas del Grupo Guaguaquí.

3.1.1.2. Bloque 2: Anticlinorio Villeta.

El bloque del Anticlinorio de Villeta está localizado en el sector centro – occidente del Departamento de Cundinamarca. Está delimitado al occidente por la Falla Bituima – La Salina y al oriente por la base del escarpe generado por el Grupo Guadalupe, el cual coincide en gran parte con un sistema de fallas de cabalgamiento, entre las que se destacan las fallas Fusa, Quinina y Supatá.

3.1.1.2.1. Formación Murca (Kim)

La Formación Murca es un nombre dado por Moreno (1991), a una secuencia de arenitas subarcóicas y lodolitas negras que afloran a lo largo de la carretera Pacho – La Palma, en el Anticlinal de Murca.

Dicha unidad está constituida por tres segmentos de areniscas subarcóicas, separadas por dos segmentos intermedios de lodolitas negras. Su espesor alcanza 924 m., sin observarse la base.

Según Moreno (1989, 1990; en Acosta & Ulloa, 2002) la unidad corresponde a un depósito turbidítico. Con base en la fauna, Moreno (1990) le asigna una edad Valanginiano Superior.

3.1.1.2.2. Formación Útica (Kiut)

La Formación Útica es un nombre informal dado por Moreno (1991). Dicha unidad aflora entre Villeta y Útica, forma el núcleo de un Anticlinorio y está conformada por capas gruesas de areniscas subarcóicas y sublitoarenitas de grano fino a muy grueso, a veces conglomerados, con frecuentes intercalaciones de limolitas y lodolitas negras.

Moreno (1991), con base en fauna, asigna una edad Berriasiano Superior a esta unidad.

3.1.1.2.3. Formación La Naveta (Kiln)

La Formación La Naveta es una unidad definida por Cáceres & Etayo (1969). Previamente, Hubach (1931) había utilizado la denominación de Horizonte de La Naveta, para designar un nivel de arenita cuarcítica.

Esta unidad aflora al oriente de Apulo y está integrada por una sucesión de capas gruesas de bioesparita, con intercalaciones de lodolitas negras. Dicha secuencia infrayace unos conglomerados de cuarzo a arenitas medias de cuarzo; la cual, a su vez, subyace unas arenitas a lodolitas de cuarzo y feldespato.

3.1.1.2.4. Grupo Villeta

El Grupo Villeta ha sido definido por Cáceres & Etayo (1969) y Etayo (1979), como una unidad lodosa, con intercalaciones calcáreo – silíceas; la cual se presenta entre la Formación La Naveta, en la base, y el Grupo Guadalupe, en el techo. El nombre Villeta fue inicialmente utilizado por Hettner (1892) para designar una secuencia de shales negros.

A continuación se describen las unidades, de base a techo, que integran el Grupo Villeta, con base en la definición realizada por Cáceres y Etayo (1969):

Formación Trincheras (Kitr)

La Formación Trincheras es una unidad propuesta por Cáceres & Etayo (1969), constituida por lodolitas con intercalaciones de calizas y arenitas. Los mismos autores la dividen en dos segmentos. Acosta et al. (1997) y Acosta & Ulloa (2002) elevan estos dos segmentos a la

categoría de miembros: 1) El Miembro El Tigre (Kitrt), el cual es el miembro inferior, aflora en los alrededores de La Mesa, Anapoima y Apulo, está constituido por lodolitas negras con intercalaciones de calizas biomicríticas y cuarzoarenitas de grano fino a conglomeráticas. Con base en la fauna, Cáceres & Etayo (1969) le asignan una edad Aptiano Inferior. 2) El Miembro Anapoima (Kitra), que constituye el miembro superior, está conformado por arcillolitas laminadas con algunos niveles calcáreos. A partir de cortes geológicos se estima un espesor de 600 m. para este miembro.

Formación Socotá (Kis)

La Formación Socotá, propuesta de Martínez (1990; en Acosta & Ulloa, 2002), quien la eleva de rango de Miembro Socotá de Cáceres & Etayo (1969) a la categoría de formación, debido a que se puede cartografiar con facilidad.

La unidad en mención aflora entre los municipios de Viotá y Útica, y está constituida por cuarzoarenitas calcáreas con intercalaciones de lodolitas calcáreas y calizas. Etayo (1979), con base en la fauna encontrada, asigna una edad Aptiano tardío.

Formación El Peñón (Kipe)

La Formación El Peñón ha sido designada inicialmente como Margas El Peñón por Ulloa (1982; en Acosta & Ulloa, 2002). Dicha unidad se presenta en franjas delgadas, desde el oriente de Bituima hasta el noroccidente de La Peña. Está integrada por una secuencia de lodolitas y limolitas calcáreas. Con base en cortes geológicos, se estima un espesor de 200 m. Según Acosta & Ulloa (2002), y con base en la fauna existente, se determina una edad Aptiano superior. Los mismos autores sugieren un ambiente de plataforma con aguas poco profundas y tranquilas.

Formación Capotes (Kic)

La Formación Capotes corresponde a los miembros Medio, Capotes y Horizonte Las Esferitas (Hubach, 1931), según Acosta & Ulloa (2002). Esta unidad se presenta desde el Municipio de Viotá, en el sur, hasta los alrededores de Yacopí y Paime, al norte.

La unidad en mención está conformada por lodolitas negras calcáreas y arcillolitas lodosas no calcáreas en la base, mientras que hacia el techo se presentan capas medias a delgadas de caliza concrecional. Acosta & Ulloa (2002) han propuesto, como localidad de referencia, la sección entre la Quebrada El Piñal y el Km. 155, sobre la carretera Bituima – Guayabal de Siquima y obtienen un espesor de 550 m. De acuerdo con Etayo (1979), la fauna del Miembro Capotes corresponde a una edad Albiano temprano.

Según Acosta & Ulloa (2002), con base en el contenido de materia orgánica y yeso, el ambiente de depositación de esta unidad corresponde a una cuenca cerrada de aguas tranquilas.

Unidad Litoestratigráfica La Palma (Kipa)

La Unidad Estratigráfica La Palma, propuesta por Acosta & Ulloa (2002), había sido postulada inicialmente por Rodríguez & Ulloa (1994a) con el nombre informal de Grupo La Palma. Dicha unidad corresponde a las formaciones Paja, Tablazo y Simití, las cuales no

se pueden diferenciar en el noroccidente de Cundinamarca, donde afloran (municipios de Yacopí, Topaipí y La Palma). En este sector la unidad está integrada por una secuencia monótona y espesa de limolitas, lutitas y arcillolitas grises claras a negras. Según Acosta & Ulloa (2002), el espesor total de esta unidad oscila entre 1200 y 1400 m., con base en cortes geológicos.

De acuerdo con Rodríguez & Ulloa (1994a), la fauna colectada en esta unidad corresponde al intervalo Barremiano – Albiano superior, y el ambiente de depositación es marino de aguas someras y tranquilas, en un medio reductor.

Formación Hiló (Kih)

La Formación Hiló, denominada inicialmente por Hubach (1931) como Horizonte de Hiló, ha sido elevada a este rango por Cáceres & Etayo (1969) y Acosta (1993) es quien la formaliza.

Esta unidad está conformada por limolitas silíceas y calcáreas, interestratificadas con lodolitas calcáreas. Acosta & Ulloa (2002) obtuvieron un espesor de 470 m. en la sección medida en la carretera Bituima – Guayabal de Siquima.

Martínez (1990; en Acosta & Ulloa, 2002), con base en foraminíferos, determina una edad Albiano tardío – Cenomaniano temprano para esta unidad.

Limolitas de Pacho (Kslp)

Limolitas de Pacho es una denominación informal de Ulloa (1982; en Acosta & Ulloa, 2002) para designar una secuencia que aflora en los alrededores de Pacho. Dicha secuencia está constituida por lodolitas intercaladas con limolitas silíceas y arenitas de cuarzo. También se presentan concreciones de siderita de hasta 1,5 m. de diámetro.

Acosta & Ulloa (2002), estiman un espesor de 1050 m., con base en cortes geológicos, y asumen una edad Albiano tardío – Cenomaniano temprano para esta unidad.

Formación Areniscas de Chiquinquirá (Kichi)

La Formación Areniscas de Chiquinquirá es una denominación propuesta por Ulloa & Rodríguez (1991) para nombrar las capas arenosas y lodolíticas que afloran en la carretera Sutamarchán – Chiquinquirá.

Esta unidad aflora al norte de Cundinamarca y se presenta como un cambio facial de la parte superior de las Limolitas de Pacho (Acosta & Ulloa, 2002).

La unidad en mención está integrada por capas delgadas a gruesas de areniscas finas de cuarzo con intercalaciones de lodolitas y limolitas.

De acuerdo con Ulloa & Rodríguez (1991), la edad de esta unidad comprendería desde el Albiano medio hasta el Cenomaniano. Esta información se obtuvo por Bürgl & Dumit, (1954) y Etayo (1968). Según Acosta & Ulloa (2002), esta unidad corresponde a un ambiente litoral de alta energía.

Formación Simijaca (Kss)

La Formación Simijaca es un nombre informal designado por Ulloa & Rodríguez (1991) para una sucesión de lodolitas y limolitas grises oscuras, las cuales afloran al sur de Simijaca, bajo la Formación La Frontera.

Está integrada por arcillolitas negras a gris oscuro. Acosta & Ulloa (2002) estiman un espesor de 550 m., a partir de cortes geológicos, y definen como una cuenca cerrada el posible ambiente de depositación. Etayo (1979) sugiere una edad Cenomaniano.

Formación La Frontera (Ksf)

La Formación La Frontera ha sido denominada inicialmente por Hubach (1931) como Miembro Lidítico – Calcáreo La Frontera, en la cantera La Frontera (Municipio de Albán). Luego, Bürgl (1961) le da el nombre de Horizonte La Frontera, y Cáceres & Etayo (1969) le asignan el rango de formación. Esta unidad está constituida por franjas delgadas de lodolitas calcáreas grises, intercaladas con capas de lidita y micrita. Acosta & Ulloa (2002) midieron espesores de 70 m. en algunas secciones.

De acuerdo con Martínez (1990; en Acosta & Ulloa, 2002), la edad de esta unidad es Turoniano para la parte inferior y Coniaciano para la parte superior.

Formación Conejo (Kscn)

La Formación Conejo fue nombrada informalmente por Ulloa & Rodríguez (1991). Está conformada por una sucesión de arcillolitas y lodolitas, con intercalaciones de limolitas de cuarzo y cuarzoarenitas de grano fino a medio.

Según Acosta & Ulloa (2002), se estima un espesor de 400 m, con base en cortes geológicos.

Etayo (1979), con base en la fauna encontrada en esta unidad, le asigna una edad Coniaciano temprano.

3.1.1.2.5. Intrusión de Tragarepas (It)

Acosta & Ulloa (1996) reportan la presencia de un cuerpo ígneo, unos 7 Km. al norte de la población de Pacho, y con un radio no menor de 20 m. Presenta sulfuros diseminados.

3.1.1.3. Bloque 3: Sabana de Bogotá – Anticlinorio Los Farallones.

El bloque de la Sabana de Bogotá – Anticlinorio Los Farallones está localizado entre la base del escarpe generado por el Grupo Guadalupe, al occidente de la Sabana de Bogotá, y al oriente por la Falla de Santa María – Tesalia.

3.1.1.3.1. Grupo Quetame (PCq)

El Grupo Quetame es un nombre propuesto por Hettner (1892) y redefinido por Bürgl & Campbell (1965), para denominar una secuencia de estratos con bajo grado de

metamorfismo; la cual aflora en la carretera Bogotá – Villavicencio.

La unidad está integrada por cuarcitas que alternan con filitas y esquistos verdes, metaconglomerados y metalimolitas. La filitas y cuarcitas están intruidas por diques de pórfidos de composición intermedia (Acosta & Ulloa, 2002).

Según Ulloa et al. (1978), se trata de rocas del Pre – Devónico, que han sido afectadas por eventos de metamorfismo.

3.1.1.3.2. Grupo Farallones (Cdf)

El Grupo Farallones es una denominación de Segovia (1963) para una secuencia de limolitas, arcillolitas y conglomerados que afloran en los Farallones de Medina. El mismo autor le asigna una edad Devónico medio – Carbonífero.

Acosta & Ulloa (2002) han dividido este grupo, en el sector de Quetame – Servitá, en tres unidades: Arenisca de Gutiérrez, Devónico de Pipiral y Capas Rojas de Guatiquía. Estas unidades se describen a continuación.

Formación Arenisca de Gutiérrez (Pdg)

La Formación Arenisca de Gutiérrez ha sido designada por Renzoni (1965). Esta unidad se puede diferenciar al sur del departamento, en los municipios de Guayabetal, Quetame y Gutiérrez. Está integrada por conglomerados con clastos de cuarzo, rocas metamórficas y arenitas de grano fino a grueso. También presenta un nivel de 150 m. de lutitas grises oscuras con lentes de arenitas (Renzoni, 1968).

De acuerdo con estudios paleontológicos, la edad de esta unidad es Devoniano medio (Renzoni, 1968).

Formación Pipiral (Pdp)

La Formación Pipiral es una denominación informal de Ulloa et al. (1978) para designar una secuencia de limolitas y lutitas negras a grises verdosas, con algunas intercalaciones de calizas. El espesor es de 500 m. Según Acosta & Ulloa (2002), esta unidad aparentemente no aflora en el Departamento de Cundinamarca.

De acuerdo con De La Espriella & Cortés (1985; en Acosta & Ulloa, 2002), la edad de esta unidad es Devoniano Medio.

Capas Rojas del Guatiquía (Pcgc + Pcg)

Las Capas Rojas del Guatiquía es un término, usado por Ulloa et al. (1978), para determinar la unidad reseñada previamente por Renzoni (1968), en el valle del Río Guatiquía. Esta unidad aflora al suroriente del departamento y esta conformada por areniscas grises y rojizas, limolitas y lodolitas rojas, calizas, areniscas calcáreas y conglomerados.

3.1.1.3.3. Formación Batá (Jb)

La Formación Batá es una unidad designada por Rodríguez & Ulloa (1976). Inicialmente, Bürgl (1960) la describe como una secuencia de estratos, que afloran en el Río Batá; a los cuales denomina Liásico del Río Batá, mientras que Radelli (1967) los llama Formación Santa María. Según Rodríguez & Ulloa (1976), se trata de un conjunto constituido por conglomerados, limolitas y areniscas, con un espesor de 1160 m., y aflora al oriente del departamento (municipios de Gachalá y Medina).

De acuerdo con Rodríguez & Ulloa (1979; en Acosta & Ulloa, 2002), se ha encontrado fauna del Liásico (Jurásico Inferior) en la parte superior de esta unidad y, aunque no se ha encontrado fauna en la parte inferior, se puede considerar como Triásico Superior. El ambiente corresponde a un ambiente continental a marino, de aguas someras (Acosta & Ulloa, 2002).

3.1.1.3.4. Grupo Cáqueza

El Grupo Cáqueza es una denominación dada por Hubach (1957a), para la secuencia que aflora entre el puente de Cáqueza y la población de Quetame (carretera Bogotá – Villavicencio).

De acuerdo con Rodríguez & Ulloa (1979; en Acosta & Ulloa, 2002), el Grupo Cáqueza se divide en tres formaciones, las cuales de base a techo son: Calizas del Guavio, Lutitas de Macanal y Arenisca de Las Juntas; y se describen a continuación.

Formación Calizas del Guavio (Kicg)

La Formación Calizas del Guavio es una unidad propuesta por Rodríguez & Ulloa (1979; en Acosta & Ulloa, 2002), para designar una secuencia de conglomerados, lutitas y calizas que afloran al sureste del Cuadrángulo K-12 (Municipio de Gachalá).

Con respecto al Departamento de Cundinamarca, dicha unidad aflora en los Farallones de Medina y en los alrededores de Gachalá.

Según Acosta & Ulloa (2002), esta unidad está constituida por calizas grises claras, con intercalaciones de lutitas y limolitas negras, fosilíferas. Además presenta un conglomerado en la base, con cantos de arenitas, cuarcitas, limolitas y filitas, y en la mitad superior presenta niveles de cuarzoarenitas de grano fino a medio. El espesor es de 1000 m. aproximadamente. El ambiente de depositación es marino somero con aguas poco oxigenadas. Diana Gutiérrez le asigna una edad Titoniano (Jurásico Superior) a Berriasiano (Cretácico Inferior), con base en la fauna encontrada (Rodríguez & Ulloa, 1979; en Acosta & Ulloa, 2002).

Formación Lutitas de Macanal (Kilm)

La Formación Lutitas de Macanal ha sido denominada por Rodríguez & Ulloa (1979; en Acosta & Ulloa, 2002) para designar una secuencia de lutitas negras, con algunas intercalaciones de calizas, areniscas y bolsones de yeso; presentes en el cañón del Río Batá (Boyacá).

En el Departamento de Cundinamarca, esta unidad aflora al oriente, y comprende los municipios de Cáqueza, Quetame, Fosca, Fómeque, Gachalá y Ubalá. Conforme a Acosta & Ulloa (2002), esta unidad está integrada por lodolitas negras con intercalaciones de cuarzoarenitas de grano fino. También se presentan venas de calcita, nódulos arenosos y lentes de yeso. El espesor es de 2935 m., según Rodríguez & Ulloa (1979; en Acosta & Ulloa, 2002).

Diana Gutiérrez le asigna una edad Berriasiano a Valanginiano, con base en la fauna encontrada en esta unidad (Rodríguez & Ulloa, 1979; en Acosta & Ulloa, 2002).

Según Acosta & Ulloa (2002), esta unidad se depositó en un ambiente marino de aguas someras, en una cuenca cerrada.

Formación Areniscas de Las Juntas (Kiaj)

La Formación Areniscas de Las Juntas es una unidad propuesta por Rodríguez & Ulloa (1979; en Acosta & Ulloa, 2002), para designar dos niveles arenosos, con un nivel lutítico intermedio.

De manera informal, esta unidad se divide en tres miembros; los cuales, de más antiguo a más reciente son: Arenisca de El Volador, Lutitas Intermedias y Arenisca de Almeida.

Esta unidad aflora en los municipios de Fosca, Cáqueza, Ubalá, Gama y Junín. Está conformada por capas gruesas a muy gruesas de cuarzoarenitas de grano fino, con intercalaciones de lodolitas negras. Según Acosta & Ulloa (2002), el espesor de esta unidad es muy variable; en la Quebrada Las Brazas es de 480 m. y en otros sitios puede alcanzar 910 m.

De acuerdo con Bürgl (1960), la edad de esta unidad corresponde al Hauteriviano; por su posición estratigráfica. Rodríguez & Ulloa (1979; en Acosta & Ulloa, 2002), proponen un ambiente de depositación marino, posiblemente deltáico.

3.1.1.3.5. Formación Fómeque (Kif)

La Formación Fómeque es una denominación de Hubach (1957a y b) para designar una serie de “esquistos piritosos, caliza cristalina y areniscas cuarcíticas”, que afloran en la carretera Bogotá – Villavicencio.

Se trata de una faja en sentido NE-SW, localizada en el sector oriental de Cundinamarca y comprende desde el Municipio de Gutiérrez, al suroeste, hasta Manta, al noreste. Está conformada por lutitas grises oscuras a negras, intercaladas con lodolitas calcáreas, limolitas grises y calizas grises oscuras a negras.

Acosta & Ulloa (2002), con base en cortes geológicos, y el Anticlinorio Los Farallones como referencia, miden espesores para la unidad en mención, así: 1200 m. al occidente del Anticlinorio, y 800 m. al oriente del mismo.

De acuerdo con Rodríguez & Ulloa (1976), esta unidad se depositó en un ambiente marino

somero, con circulación restringida. Según Hubach (en Kehrler, 1933), la edad comprende entre Barremiano medio y Aptiano superior. Sin embargo, Hubach (1957b), Bürgl (1961) y Rodríguez & Ulloa (1976), con base en fauna colectada, consideran que la parte superior de esta unidad abarca hasta el Albiano inferior.

3.1.1.3.6. Conglomerados de El Gallo (Kig)

Conglomerados de El Gallo es una denominación informal para designar al conjunto de conglomerados que infrayace a la Formación Une en el sector de Sumapaz (Acosta & Ulloa, 2002). Esta unidad esta integrada por dos segmentos: El inferior, constituido por conglomerados polimícticos con cantos a gránulos de cuarcitas, arnita rojiza y calizas, en una matriz arenosa; y el superior, conformado por capas lenticulares a cuneiformes de conglomerados de cantos a gránulos de cuarzo lechoso, en una matriz de arena muy gruesa a media (Acosta & Ulloa, 2002).

Acosta & Ulloa (2002) sugieren una edad Albiano para esta unidad, con base en su posición estratigráfica, y un ambiente marino transgresivo, de alta energía para su depositación.

3.1.1.3.7. Formación Une (Kiu)

La Formación Une es una denominación establecida por Hubach (1957a y b) para designar un conjunto de areniscas que aflora en la carretera Bogotá – Villavicencio, entre Chipaque y Cáqueza.

Esta unidad está conformada por capas delgadas a gruesas de areniscas cuarzosas, de grano fino a grueso, localmente conglomeráticas, con intercalaciones de lodolitas negras. Según Acosta & Ulloa (2002), el espesor de esta unidad oscila entre 800 y 1100 m., en el sector del Páramo de Sumapaz.

Tanto Bürgl (1957), como Campbell (1962), consideran que la edad de esta unidad es Albiano – Cenomaniano. El ambiente de depositación ha sido propuesto como marino – deltáico por Rodríguez & Ulloa (1976).

3.1.1.3.8. Formación Chipaque (Ksc)

La Formación Chipaque fue denominada por Hubach (1931) y redefinida por Renzoni (1962, 1968). Esta unidad aflora en los alrededores de la Sabana de Bogotá, y está conformada por lodolitas negras, con ocasionales intercalaciones de calizas en la parte inferior – alta, y areniscas de cuarzo en la parte superior. También ocurren algunos niveles de carbón en las partes inferior y superior de la secuencia.

Rodríguez & Ulloa (1976) proponen un ambiente de depositación marino de aguas poco profundas, con circulación restringida, para esta unidad. Según Hubach (1957a), Bürgl (1959) y Etayo (1964; en Acosta & Ulloa, 2002), la edad de esta unidad comprende desde el Cenomaniano Superior hasta el Coniaciano.

3.1.1.3.9. Grupo Guadalupe (Ksg)

El Grupo Guadalupe es una unidad, cuyo nombre lo emplea inicialmente Hettner (1892). Posteriormente, Renzoni (1962, 1968) redefine esta unidad, le da el rango de grupo, y la divide en tres formaciones denominadas Arenisca Dura, Plaeners, y Labor y Tierna.

Formación Arenisca Dura (Ksgd)

La Formación Arenisca Dura es una unidad cuyo nombre ha sido propuesto por Hubach (1931). Posteriormente, Renzoni (1962) le da el rango de formación. Esta unidad aflora en los alrededores de la Sabana de Bogotá, y forma escarpes de difícil acceso.

Está conformada por capas muy delgadas a muy gruesas de cuarzoarenitas de grano fino, con intercalaciones de limolitas de cuarzo y lodolitas negras. Acosta & Ulloa (2002), miden un espesor de 250 m., en la carretera Tabio – Subachoque.

Con base en la fauna encontrada, Etayo (1964; en Acosta & Ulloa, 2002) le asigna una edad Santoniano. El ambiente en el cual se depositó esta unidad corresponde al de mar siliciclástico somero (no litoral) (Acosta & Ulloa, 2002).

Formación Plaeners (Ksgpl)

La Formación Plaeners es una unidad denominada inicialmente por Hubach (1931) como Nivel Plaeners. Renzoni (1968) le da la categoría de formación.

Esta unidad está constituida por liditas y chert, con intercalaciones de lodolitas y arcillolitas, comúnmente silíceas. Presenta grandes cantidades de foraminíferos. Se estima un espesor de 100 m, con base en cortes geológicos.

De acuerdo con la fauna encontrada, Pérez & Salazar (1978) le asignan una edad Campaniano – Maastrichtiano. Según los mismos autores, el ambiente de depositación parece corresponder a plataforma, con poca influencia clástica gruesoarenular.

Formación Labor y Tierna (Ksglt)

La Formación Labor y Tierna corresponde a la parte superior del Grupo Guadalupe. Hubach (1931) es quien primero emplea este término, y Renzoni (1962,1968) le da la categoría de formación. La unidad en mención está conformada por capas medias a gruesas de arenitas de cuarzo de grano fino a grueso. También presenta algunas intercalaciones de lodolitas y limolitas de cuarzo. Conforme con Acosta & Ulloa (2002), la unidad tiene un espesor de 260 m., medido en la Quebrada Nemicé.

Pérez & Salazar (1978) asignan una edad Maastrichtiano temprano, basados en la fauna de esta unidad, y proponen un ambiente de condiciones litorales, con influencia mareal, para su depositación.

3.1.1.3.10. Formación Guaduas (KTg)

La Formación Guaduas es una denominación inicial de Hettner (1892). Hubach (1957) la redefine. Está constituida por arcillolitas con intercalaciones de cuarzoarenitas de grano

fino a medio y algunas capas de carbón. A partir de cortes geológicos se estima un espesor de 700 m. para esta unidad (Acosta & Ulloa, 2002).

Con base en la palinología, Van der Hammen (1957), asigna una edad comprendida entre el Maastrichtiano y el Paleoceno.

Sarmiento (1992; en Acosta & Ulloa, 2002) propone como ambiente de depósito una costa clástica, con subambientes tales como llanura deltáica fluvial, llanura de marea, albufera y barra paralela.

3.1.1.3.11. Formación Cacho (Tpc)

La Formación Cacho se considera inicialmente como un miembro de la Formación Bogotá (Hubach, 1957). Posteriormente, Campbell (1962) le da el rango de formación. Está integrada por areniscas de cuarzo, de grano medio a grueso y conglomeráticas. Localmente, presenta lentes de areniscas de grano fino a limolitas e intercalaciones delgadas de lodolitas.

Van der Hammen (1958), considera que esta unidad puede corresponder al Paleoceno temprano.

3.1.1.3.12. Formación Bogotá (Tpb)

La Formación Bogotá es una denominación utilizada inicialmente por Hettner (1892). Hubach (1957a) redefine esta unidad.

Dicha formación aflora desde el Sinclinal de Usme, al sur de Bogotá, hasta el nororiente de Cundinamarca, y continúa en Boyacá.

Litológicamente esta unidad se divide en dos partes (Acosta & Ulloa, 2002):

La parte inferior está conformada por arenitas subfeldespáticas a sublitoarenitas, de grano fino a medio, con intercalaciones de lodolitas y arcillolitas de color gris verdoso.

La parte superior está conformada por una secuencia alternada de arcillolitas y limolitas abigarradas, con algunas intercalaciones de capas muy gruesas de cuarzoarenitas, de grano medio a grueso.

De acuerdo con Acosta & Ulloa (2002), y con base en cortes geológicos, se estima un espesor de 250 m. para la parte inferior, y de 500 m. para la superior.

Hoorn (1988; en Acosta & Ulloa, 2002), basado en la fauna encontrada, asigna una edad Paleoceno tardío a Eoceno temprano. En cuanto al ambiente de depositación, Acosta & Ulloa (2002) proponen condiciones fluviales meandriformes para la parte inferior, y de llanura de inundación, con depósitos de barra de meandro relativamente delgados, para la parte superior.

3.1.1.3.13. Formación Fusa (Tf)

La Formación Fusa es un término informal, propuesto por Acosta & Ulloa (2002), para designar a la secuencia que se presenta sobre la Formación Guaduas, en el Sinclinal de Fusa, pero con características litológicas diferentes a la Formación Bogotá.

Esta unidad aflora desde el Sinclinal Fusa, al norte, hasta el Páramo de Sumapaz, en el sur. Está integrada por capas delgadas de arcillolitas grises y rojizas, con intercalaciones de arenitas finas a gruesas.

Acosta & Ulloa (2002) proponen como ambiente de depositación ríos meandriformes y llanuras de inundación.

3.1.1.3.14. Formación Regadera (Tr)

La Formación Regadera es una denominación de Hubach (1957a) para designar a la base de la Formación Usme. Jullivert (1963) le da el rango de formación.

La unidad en mención aflora en los sinclinales de Usme y de Siecha – Sisga, y esta conformada por tres conjuntos arenosos, intercalados con dos arcillosos. Los conjuntos arenosos están integrados por capas medias a gruesas de arenitas finas a conglomeráticas; mientras que las lodolitas son grises verdosas y presentan intercalaciones de capas delgadas a medias de arenitas cuarzo – feldespáticas.

Hubach (1957a) considera que esta unidad corresponde al Eoceno, lo que ha sido corroborado por Acosta & Beltrán (1987; en Acosta & Ulloa, 2002), y además proponen varios ambientes de depositación: fluvial anastomosado, meandriforme, llanuras de inundación y de laguna.

3.1.1.3.15. Formación Usme (Tsu)

La Formación Usme, propuesta por Hubach (1957a) y redefinida por Jullivert (1963), está conformada por dos partes: En la base predominan lodolitas con intercalaciones de arenitas finas, mientras que la parte superior está constituida por arenitas de cuarzo de grano grueso y conglomerados de cuarzo.

Esta unidad aflora en el Sinclinal de Usme y, según Acosta & Ulloa (2002), el espesor se estima en 500 m., a partir de cortes geológicos.

Aunque no se ha definido una edad para esta unidad, De Porta (1974) sugiere que puede corresponder al Oligoceno – Mioceno, o solamente Mioceno.

La parte inferior correspondería a un ambiente de plataforma interna, mientras que la superior correspondería a barras de arena, que representarían la salida del mar y el retorno a ambientes continentales.

3.1.1.3.16. Formación Tilatá (Tqt)

La Formación Tilatá ha sido definida por Scheibe (1938), cerca de la población de Chocontá.

Dicha unidad se presenta en el centro de la Sabana de Bogotá, y hace parte de los núcleos de los sinclinales amplios. Está constituida por arenisca conglomerática, conglomerados de gravas a cantos bien redondeados, arcillas rojas y capas de turba.

3.1.1.4. Bloque 4: Piedemonte Llanero

El bloque Piedemonte Llanero se encuentra localizado entre las falla Santa María y Tesalia, al occidente, y el límite oriental del departamento. Las formaciones Areniscas de las Juntas, Fómeque, Une y Chipaque, aunque afloran en este bloque, han sido descritas previamente.

3.1.1.4.1. Grupo Palmichal (Tkp)

El Grupo Palmichal es una unidad propuesta por Ulloa & Rodríguez (1979), para designar una secuencia de areniscas, lutitas y conglomerados finos que afloran en la Quebrada Palmichal.

Esta unidad aflora en Cundinamarca, entre las fallas de Santa María y Tesalia, municipios de Medina y Ubalá. Está conformada por areniscas cuarzosas de grano fino a grueso, con intercalaciones de capas muy delgadas de lutitas y limolitas grises. Hacia el techo se presentan niveles de conglomerados finos. También se presentan lentes de caliza en la parte media. Ulloa & Rodríguez (1979) miden un espesor para este grupo de 530 m., en el Río Guayuriba.

Ulloa et al. (1978), con base en la posición estratigráfica, proponen una edad Coniaciano – Paleoceno. El ambiente de depositación corresponde a aguas someras con influencia deltáica (Acosta & Ulloa, 2002).

3.1.1.4.2. Formación Arcillas del Limbo (Tal)

La Formación Arcillas del Limbo corresponde a una denominación inicial de Hubach (1941, en Van der Hammen, 1960). Esta unidad fue redefinida por Rodríguez & Ulloa (1976). Aflora como una delgada faja al oeste de la Falla de Guaicaramo, y está constituida por arcillas grises y verdosas, con intercalaciones de cuarzoarenitas de grano medio a grueso, en capas de 1 a 5 m.

Van der Hammen (1955b en Acosta & Ulloa, 2002) considera que esta unidad corresponde al Paleoceno. El ambiente de depositación sería pantanoso a lagunar marino (Acosta & Ulloa, 2002).

3.1.1.4.3. Formación Areniscas del Limbo (Tarl)

La Formación Areniscas del Limbo hace referencia a una sucesión de areniscas

conglomeráticas, arcillolitas, areniscas y lutitas, que afloran cerca del Caserío de El Limbo (Hubach (1941), en Van der Hammen, 1960).

Aflora como una franja NE-SW, al oriente de Cundinamarca, y está conformada por conglomerados con cantos de cuarzo, las cuales varían a areniscas de grano fino, intercaladas con arcillolitas, lutitas y cuarzoarenitas de grano fino a medio. En la parte media se presenta un nivel lenticular de hierro oolítico. Tiene un espesor que oscila entre 120 y 163 m. (Acosta & Ulloa, 2002).

De acuerdo con Duque – Caro (en Ulloa et al., 1978), basado en la fauna encontrada, la edad de esta unidad es Eoceno superior. Acosta & Ulloa (2002) proponen un ambiente deltáico, con influencias lagunares marinas.

3.1.1.4.4. Formación San Fernando (Tsf)

La Formación San Fernando ha sido definida por Renz (1938; en Rodríguez & Ulloa, 1979), para designar una secuencia de lutitas y arcillolitas grises a verdosas, con intercalaciones de arenisca que afloran al norte de la Sierra de la Macarena.

En Cundinamarca afloran al este del Sinclinorio de Medina y está constituido por arcillolitas grises y cuarzoarenitas de grano medio a grueso. En las partes inferior y media se presentan lentes de carbón de hasta 30 cm. El espesor oscila entre 800 y 1000 m. (Acosta & Ulloa, 2002).

Según Duque (en Rodríguez & Ulloa, 1976) la edad es Oligoceno – Mioceno inferior. El ambiente de depositación corresponde a marino lagunar con influencia deltáica (Acosta & Ulloa, 2002).

3.1.1.4.5. Formación Diablo (Td)

La Formación Diablo es una unidad definida por Renz (1938; en Rodríguez & Ulloa, 1976) para designar una secuencia de areniscas y lutitas que afloran en el Río Cusiana. Esta unidad aflora en el flanco este del Sinclinorio de Medina y está compuesta por capas muy gruesas de cuarzoarenitas de grano medio a grueso, con lentes de conglomerados, e intercalaciones de capas delgadas de arcillolitas y limolitas silíceas. Conforme con Rodríguez & Ulloa (1976), el espesor aproximado es de 400 m. Duque (en Rodríguez & Ulloa, 1976), con base en palinología y micropaleontología, asigna una edad entre Mioceno inferior y Mioceno medio.

Esta unidad representaría un ambiente marino lagunar con influencias deltáicas (Acosta & Ulloa, 2002).

3.1.1.4.6. Formación Caja (Tc)

La Formación Caja es un término usado por Valencia (en Van der Hammen, 1958) para designar una secuencia de areniscas y conglomerados con intercalaciones de arcillolitas, que afloran en el Río Caja, al oeste de Tauramena (Boyacá). Aflora en el sector del

Piedemonte Llanero y está conformada por una alternancia de lutitas, arenisca de grano fino a medio, y conglomerados con cantos de hasta 5 cm. de diámetro, en una matriz arenosa. En la parte inferior se presentan lentes de carbón de entre 20 y 50 cm. En este sector se observa un espesor de 1600 m. (Acosta & Ulloa, 2002).

Según Acosta & Ulloa (2002), el ambiente para la parte inferior corresponde a marino de zona de oleaje, mientras que la parte superior es pantanoso fluvial.

3.1.1.4.7. Formación La Corneta (Qtlc)

La Formación La Corneta es un nombre propuesto por Rodríguez & Ulloa (1976) para designar una secuencia de gravas interstratificadas con limolitas, las cuales afloran en la Quebrada La Corneta, que a su vez desemboca en el Río Guavio, en la localidad de Nazareth (Boyacá).

Esta unidad aflora en la parte central del Sinclinal de Nazareth y esta conformada por gravas con cantos de arenisca y cuarzo, de hasta 70 cm. de diámetro. El espesor es de 120 m. (Acosta & Ulloa, 2002).

Según Ulloa & Rodríguez (1979), esta unidad corresponde al Pleistoceno Superior. El ambiente de depositación es fluvial de molasa (Acosta & Ulloa, 2002).

3.1.1.5. Depósitos Cuaternarios

Los depósitos cuaternarios que se presentan en el Departamento de Cundinamarca se pueden diferenciar en los siguientes tipos:

3.1.1.5.1. Terrazas Altas (Qta)

Las terrazas altas son depósitos compuestos principalmente por gravas y arenas. Van der Hammen et al. (1973; en Acosta & Ulloa, 2002) diferencia dos unidades en la Sabana de Bogotá: Formación Subachoque y Formación Sabana.

3.1.1.5.2. Depósitos Aluviales (Qal)

Los depósitos aluviales corresponden a terrazas bajas y aluviones a lo largo de los ríos. Estos depósitos están conformados por bloques de areniscas y calizas, redondeados a subredondeados, en una matriz inconsolidada de arenas y arcillas.

3.1.1.5.3. Complejos de Conos (Qcc)

Los complejos de conos corresponden a diferentes tipos de conos: fluvio-glaciares, aluviales y de derrubios (Acosta & Ulloa, 2002). En cuanto a su composición, textura, y espesor; pueden ser variables debido a las diferentes fuentes de aporte. Este tipo de unidad se presenta principalmente en el sector sur de la Sabana de Bogotá.

3.1.1.5.4. Depósitos de Morrena (Qm)

Los depósitos de morrena están constituidos por bloques angulares de arenitas de cuarzo, las cuales alcanzan hasta 10 m. de diámetro, en una matriz areno-arcillosa. Estos depósitos se presentan en los cerros más altos del departamento, especialmente en el Páramo de Sumapaz.

3.1.1.5.5. Depósitos Fluvioglaciares (Qf)

Los depósitos fluvioglaciares corresponden a depósitos no diferenciados: antiguos depósitos glaciares, coluviales, flujos activos y estabilizados; y están conformados por material arcilloso o por bloques de areniscas en una matriz areno-arcillosa. Este tipo de depósito se presenta principalmente en los municipios de Guayabal de Siquima, Albán, Cachipay, Anolaima y Viotá.

3.1.2. Geología Estructural

El Departamento de Cundinamarca está localizado en la parte meridional de la Cordillera Oriental, la cual presenta una dirección N-S a NE en esta región. Según Sarmiento (2001), la Cordillera Oriental presenta una amplia zona de deformación como resultado de la subducción de las placas Nazca y Caribe bajo la Suramérica.

De la misma manera como se ha descrito la estratigrafía, la descripción de las diferentes estructuras se hace con base en la división por bloques tectónicos (Acosta & Ulloa, 2002).

3.1.2.1. Bloque 1: Valle Medio del Magdalena - Guaduas.

El bloque del Valle del Magdalena – Guaduas comprende desde el límite occidental del departamento hasta las fallas Bituima y La Salina, al oriente. Dichas fallas son inversas con planos que buzanan hacia el oriente (Acosta & Ulloa, 2002).

Al occidente de este bloque se presentan otras dos fallas inversas con vergencia al occidente: La Falla Honda, en la cual rocas de edad Oligoceno cabalgan sobre depósitos del Mioceno, y la Falla Cambrás, donde rocas cretácicas cabalgan sobre rocas terciarias (Acosta & Ulloa, 2002).

Otras estructuras importantes en este bloque son los sinclinales Jerusalén – Guaduas, Córdoba y San Pedro. En general, estas estructuras tienen una dirección N-S a N-NE. Cabe anotar que la Falla El Alto del Trigo, la cual es de cabalgamiento con vergencia al occidente y paralela a la Falla Bituima, afecta al flanco oriental del Sinclinal Jerusalén – Guaduas (Acosta & Ulloa, 2002).

Adicionalmente, existe otro tipo de cabalgamiento, del cual se destaca la Falla Vianí. Estas fallas son de rumbo con movimiento dextral. La Falla Vianí corta y desplaza otras estructuras como el Sinclinal Jerusalén – Guaduas y las fallas Bituima y Alto del Trigo (Acosta & Ulloa, 2002).

3.1.2.2. Bloque 2: Anticlinorio Villeta.

El bloque Anticlinorio Villeta está localizado en el sector centro – occidente del Departamento de Cundinamarca. Está delimitado al occidente por la Falla Bituima – La Salina y al oriente por la base del escarpe generado por el Grupo Guadalupe, el cual coincide en gran parte con un sistema de fallas de cabalgamiento, entre las que se destacan las fallas Fusa, Quinini y Supatá.

En el sector norte se presentan amplios pliegues afectados por fallas de cabalgamiento, con planos que buzcan hacia el oriente. Mientras que en la parte sur se presentan escasos pliegues pequeños y apretados, y una gran cantidad de fallas de cabalgamiento. Este sector fue cabalgado por las zonas aledañas, lo que generó una rampa tectónica (Acosta & Ulloa, 2002).

3.1.2.3. Bloque 3: Sabana de Bogotá – Anticlinorio Los Farallones.

El bloque de la Sabana de Bogotá – Anticlinorio de los Farallones está localizado entre la base del escarpe generado por el Grupo Guadalupe, al occidente de la Sabana de Bogotá, y al oriente por la Falla Santa María – Tesalia.

Hacia el occidente de este bloque se presenta una gran cantidad de fallas de cabalgamiento con vergencias hacia el occidente. Según Acosta & Ulloa (2002), dichas fallas están asociadas con pliegues anticlinales, a veces invertidos y generalmente fallados. Estos anticlinales están separados por amplios y extensos sinclinales, como Cabrera, San Juan, Usme, Fusagasuga, Río Frío, Checua – Lenguazaque, Sisga, Guachetá, La Pradera – Subachoque.

Las fallas inversas del sector occidental presentan vergencias hacia el oeste, mientras que las del oriental tienen vergencias hacia el este; lo que indica que el sector central es un bloque levantado, a partir de fallas inversas (Acosta & Ulloa, 2002).

En la zona oriental del bloque se presentan estructuras como el Anticlinal Río Blanco – Machetá y el Sinclinal Sueva, los cuales están afectados por fallas inversas, con vergencias hacia el oriente (Acosta & Ulloa, 2002). Entre estas fallas se destacan Machetá y Chorrera – Salinero. Tanto en este sector, como en la Sabana de Bogotá, se presentan algunas fallas inversas con vergencias al occidente. Según Acosta & Ulloa (2002), estas fallas son consideradas como retrocabalgamientos de las fallas principales.

En el sector sur oriental del departamento, donde se encuentra el Macizo de Quetame, constituido por rocas cambro-ordovícicas, las cuales están afectadas por fallas normales, de rumbo, inversas de alto ángulo y cabalgamientos (Ulloa et al. (1978).

El límite oriental del bloque está constituido por las fallas Tesalia y Santa María, las cuales son cabalgamientos con vergencias hacia el oriente. Estas fallas hacen cabalgar rocas paleozoicas sobre unidades terciarias y cuaternarias.

De acuerdo con Ujueta (1992; en Acosta & Ulloa, 2002), este sector presenta fallas verticales de carácter profundo, orientadas NW-SE, y relacionadas con focos de actividad

magmática hidrotermal.

3.1.2.4. Bloque 4: Piedemonte Llanero

El bloque Piedemonte Llanero se encuentra localizado entre las fallas Santa María y Tesalia, al occidente, y el límite oriental del departamento.

En este bloque se presenta el Sinclinorio Medina, en el cual se incluyen amplios sinclinales y anticlinales que se generaron en unidades terciarias y cuaternarias.

El sector noroccidental de este bloque está constituido por rocas cretácicas, las cuales están afectadas por cabalgamientos, con vergencia al oriente, y anticlinales invertidos, cuyos ejes tienen la misma vergencia (Acosta & Ulloa, 2002).

La estructura más oriental es la Falla Guaicaramo, a la cual Colleta et al. (1990; en Acosta & Ulloa, 2002) le atribuye una actividad de falla normal, durante el Jurásico Superior – Cretácico Inferior. Mientras que en el Neógeno, la falla sufrió un cambio en su movimiento y se tornó en cabalgamiento con vergencia al oriente (Acosta & Ulloa, 2002).

3.2. OCURRENCIA DE MANANTIALES EN EL DEPARTAMENTO DE CUNDINAMARCA

En el Departamento de Cundinamarca se presentan manantiales termales y minerales a todo lo largo y ancho del territorio. Con el fin de facilitar la observación y evaluación geoquímica preliminar de los manantiales, estos fueron agrupados de acuerdo con su distribución espacial en los cuatro bloques tectónicos que dividen el Departamento (Acosta & Ulloa, 2002).

En el presente trabajo se han logrado ubicar 60 manantiales. Sin embargo, aunque se tuvo conocimiento de la existencia de otros más, no se pudieron visitar debido a problemas de orden público. El Anexo 5 presenta fotografías de algunos de los manantiales más representativos del departamento.

El Bloque 1 corresponde al Valle Medio del Magdalena – Guaduas y está constituido por 12 manantiales, de cuales se muestrearon 11.

El Bloque 2 hace referencia al bloque Anticlinorio Villeta y está conformado por 11 manantiales. Se muestrearon ocho manantiales.

El Bloque 3 pertenece al bloque Sabana de Bogotá – Anticlinorio Los Farallones y le corresponden 33 manantiales, 29 de los cuales fueron muestreados.

Finalmente, el Bloque 4 corresponde al bloque Piedemonte Llanero y está constituido por cuatro manantiales, todos muestreados.

En las Tabla 4 y 5 se presentan los parámetros físico-químicos medidos *in situ* y se describen vías de acceso, localizaciones y rasgos geológicos de los sitios donde emergen los manantiales, respectivamente.

Tabla 4. Datos de localización y mediciones *in situ* para manantiales de Cundinamarca

Bloque 1. Bloque Valle Medio del Magdalena - Guaduas											
No. IGM	Manantial	Municipio	Longitud (E)	Latitud (N)	Altitud (msnm)	k ($\mu\text{s}/\text{cm}^2$)	pH Campo	T°C	Olor a H ₂ S	Nitritos (mg/l)	Observaciones
189-01	El Hatico	Yacopi	971949	1102539	811	7730.0	7.30	23.8	No	0.01	Salado de agua fría con deposición de óxidos de hierro. Caudal estimado: 0,29 l/s
208-02	La Tigra	Villeta	949871	1047470	1473	927.0	6.92	20.8	Si	0.01	Deposición de azufre y de un posible mineral con calcio
208-04	Salsipuedes-RNegro	Caparrapí	946722	1065987	469	1807.0	7.07	27.9	Fuerte	0.01	Deposición de azufre y de un posible mineral con calcio. Caudal estimado 0,24 l/s
245-01	Casablanca	Ricaurte	930760	963287	294	792.0	6.66	31.8	Fuerte	0,00	Dos manantiales de 5,4 y 6,45 l/s. Algas
245-02	Azufrada La Quebrada	Ricaurte	924915	974885	301	794.0	6.81	31.5	Fuerte	0,00	Fuerte olor a azufre
245-03	Los Chorros	Agua de Dios	934688	974172	329	115.3	6.14	36.2	No	0,00	Duchas. Tanque sellado. Caudal estimado 0,24 l/s
245-04	Los Chorros II	Agua de Dios	934641	974231	368	121.0	6.30	36.2	No	0,00	Duchas. Tanque sellado. Caudal estimado 0,32 l/s
245-05	Agua Blanca	Girardot	917378	969437	323				Si	0,00	Agua muy diluida con lluvia. No se pudo muestrear
245-06	Macanda	Guataquí	923558	988247	458	1896.0	6.64	28.0	Fuerte	0,00	Deposición de azufre y de un posible mineral con calcio. Caudal estimado 0,3 l/s
245-07	El Gran Pozo Azufrado	Tocaima	936620	987318	354	1125.0	6.80	33.8	Fuerte	0.06	Agua lodosa con olor a azufre. Caudal estimado 1 l/s
245-08	Los Pocitos Azufrados	Tocaima	936968	987099	361	2390.0	6.73	25.6	Fuerte	0.03	Agua negra. 18 manantiales
246-01	Azufrada Charcolargo	Apulo	940910	995640	775	1937.0	6.67	27.4	Fuerte	0,00	Caudal no permanente. Manantial frío.
Bloque 2. Bloque Anticlinorio Villeta											
189-02	El Salitre Y.	Yacopi	976660	1092445	999	25300.0	6.63	46.8	No	0,00	Óxidos de hierro. Caudal estimado 1 l/s
208-01	Las Salinas	Nimaima	965008	1060602	795					-----	Agua empozada. No se pudo muestrear. Proyecto turístico
208-03	San Ignacio	Villeta	951378	1041884	884	1548.0	6.94	26.3	Fuerte	0.04	Deposición de azufre y de un posible mineral con calcio. Caudal estimado 0,48 l/s
208-05	El Peñón	Útica	955561	1065148	504	14140.0	7.12	26.1	Si	0,00	Deposición de azufre coloidal
208-06	El Salitre U.	Útica	955851	1065015	520	21200.0	7.32	27.0	No	0.13	Salado de agua fría con deposición de óxidos de hierro
208-07	Hotel Abacoa	Útica	955377	1065349	522	2010.0	7.17	31.0	Si	0,00	Deposición de azufre coloidal
227-08	El Espino	La Mesa	949964	1007160	752	2340.0	7.07	24.6	Si	0.01	Azufre coloidal
227-10	El Piñal	Guayabal de Siquima	952494	1031172	1127	2790.0	6.43	32.4	No	-----	Óxidos de hierro. Derrumbe tapó el manantial inicial.
227-11	El Volcán	Bituima	948752	1028476	1318	1693.0	6.80	21.5	Fuerte	-----	Desarrollo de algas blanquecinas a amarillo pálido
246-02	Santa Lucia	Anapoima	949689	995279	671	1537.0	6.84	26.6	No	0,00	Manantial frío. Óxidos de hierro. Caudal 0,3 l/s
246-03	Santa Ana	Anapoima	949148	994365	620	1302.0	6.75	25.4	No	0.02	Manantial frío. Óxidos de hierro.
Bloque 3. Sabana de Bogotá y Anticlinorio Los Farallones											
No. IGM	Manantial	Municipio	Longitud (E)	Latitud (N)	Altitud (msnm)	k ($\mu\text{s}/\text{cm}^2$)	pH Campo	T°C	Olor a H ₂ S	Nitritos (mg/l)	Observaciones
209-01	Nápoles	Chocontá	1047830	1055651	2483	122.6	6.137	46.7	No	0.00	Depósitos de óxido férrico. Arsénico (?) Gases débiles e intermitentes. Caudal estimado 2,9 l/s
209-02	Los Volcanes	Chocontá	1048422	1054758	2337	226.0	7.19	53.7	Si	0.00	Depósitos de óxido férrico, algas verdes y gases permanentes. Caudal estimado 1,3 l/s
209-03	Hacienda Susatá	Nemocón	1026365	1056953	2679	175.3	5.98	33.1	No	0.00	Depósitos de óxido férrico. Algas escasas. Pobre en gases. Caudal estimado 0,6 l/s
209-04	Piscina Municipal	Nemocón	1022353	1051907	2627	73.0	6.03	33.7	Si	0.00	Agua entubada a la piscina. Temperatura medida en la salida del tubo. Caudal estimado 0,2 l/s

Tabla 4. Continuación. Datos de localización y mediciones *in situ* para manantiales de Cundinamarca

Bloque 3. Sabana de Bogotá y Anticlinorio Los Farallones											
No. IGM	Manantial	Municipio	Longitud (E)	Latitud (N)	Altitud (msnm)	k (µs/cm²)	pH Campo	T°C	Olor a H ₂ S	Nitritos (mg/l)	Observaciones
209-05	Agua Clara	Suesca	1039638	1069082	2723	39.2	5.143	33.2	No	0.00	Manantial captado. Salida espasmódica de gas abundante. Caudal estimado 0,3 l/s
209-06	Repetidora	Chocontá	1044131	1062300	2612	29.6	5.091	22.2	No	0.00	Diferentes sitios de muestreo. Las medición con termocupla se realizó en un tanque pequeño, afuera del manantial.
209-07	Hda Achury	Sesquilié								-----	Manantial desaparecido
209-09	Leonilde	Nemocón	1022380	1052098	2624	45.5	5.026	25.2	No	0.00	Peces
209-10	Los Volcanes 2	Chocontá	1048415	1054715	2327	224.0	6.89	53.2	Si	0.00	Dos tanques en cemento.
209-11	Los Volcanes 3	Chocontá	1048549	1054752	2345	234.0	7.23	58.3	Si	0.00	El manantial surge por debajo del coluvión.
210-01	El Paraiso Codecal	Tibirita	1060831	1051712	1609	2410.0	6.158	43.3	No	0.00	Depósitos de óxido férrico. Pobre en gases
210-02	El Paraiso Termal	Tibirita	1061210	1051360	1664	1363.0	6.147	50.8	No	0.00	Depósitos de óxido férrico. Presencia moderada de algas. Caudal estimado 1,3 l/s
210-03	Vereda Peñas	Manta	1060692	1051743	1634	983.0	6.752	36.8	No	0.05	Depósitos de óxido férrico. Pobre en gases
210-04	El Paraiso	Manta	1060727	1051736	1637	1220.0	7.33	32.9	No	0.00	Depósitos de óxido férrico
227-01	El Zipa	Tabio	996912	1036233	2624	2980.0	7.11	50.0	No	0.00	Abundancia de algas verdes. Vegetación acuática
227-02	Aguas Calientes 3	Tabio	996883	1036219	2632	2640.0	7.798	37.1	No	0.00	Abundancia de algas verdes.
227-03	Bavaria	Bogotá	1000816	1002540	2625	163.6	5.978	31.1	No	0.00	Presenta un buchón en el sitio donde emerge
227-04	Los Lagartos	Bogotá	998873	1012358	2595	285.0	6.446	36.0	No	0.00	Pozo de ~40 m de profundidad
227-05	Aguas Calientes 2	Tabio	996806	1036165	2611	2060.0	6.88	32.0	No	0.00	Lotos, peces y caracoles
227-06	Aguas Calientes 1	Tabio	996867	1036180	2595	2620.0	7.01	37.1	No	0.00	Piscina
227-07	El Zipa 2	Tabio	996904	1036216	2622	2830.0	6.73	59.5	No	0.00	Algas verdes
227-09	Agua Caliente S. F.	San Francisco	979907	1036765	2183	407.0	7.51	49.1	No	0.00	Caudal estimado 0,6 l/s
228-01	Aguas Calientes G.	Guasca	1024379	1030976	2643	53.3	5.938	35.4	No	0.00	Diferentes sitios de muestreo. 24/03/2000 ya no existe. 30/04/2002 en la piscina (mezcla con aguas más frías). 27/09/2002 al lado del puente. Abundancia de óxidos de hierro.
228-02	Soratama	La Calera	1009333	1009208	2673	12650.0	7.734	27.1	Si	0.04	Alberca. Abundantes gases y algas verdes. Posible infiltración de agua por grietas.
228-03	Spa H. del Mar	La Calera	1009239	1009145	2656	11230.0	7.44	33.0	Si	0.03	Algas. Óxido férrico. Caudal estimado 1,5 l/s
228-04	Montecillo	Guatavita	1026064	1036098	2623	118.8	5.646	39.0	No	0.01	Gases intermitentes y débiles. En la actualidad el agua del manantial está mezclada con el agua de una quebrada. Anteriormente estaban separadas.
228-05	Qda El Zaque	Gachetá	1044488	1024649	1835	1245.0	6.86	66.9	No	0.00	Depósitos de óxido férrico. Caudal estimado 5 l/s
228-06	Sie Chitupcua	Bogotá								-----	También llamado El Salitre. Desaparecido por sobre-explotación de pozos.
228-07	La Rivera	Gachetá	1044488	1024649	1835		7	57.9	No	-----	Depósitos de óxido férrico, emerge de la roca alrededor de la piscina.
247-01	Los Volcanes Ch.	Choachí	1017719	994859	1852	890.0	6.722	35.0	Si	0.00	Manantial débil. Depósito de algas. Sales blancas
247-02	Santa Mónica	Choachí	1017802	994852	1829	658.0	6.668	50.2	Fuerte	0.01	Manantial capturado en tanque de concreto, Gases abundantes. Caudal estimado 1,3 l/s
247-03	Termales Soberín	Quetame								-----	
265-01	Azufrera Pandi	Pandi	953057	955372	699	584.0	7.01	23.2	Fuerte	0.00	Caudal estimado 0,8 l/s
Bloque 4. Piedemonte Llanero											
229-01	Charco Largo	Santamaría del Batá	1086457	1014705	380	306.0	6.11	34.0	No	0.00	Oxidos de hierro. Varios puntos de surgencia. Caudal estimado 0,2 l/s
248-01	Aguas Calientes-Sauna	Paratebueno	1108723	999854	324	975.0	6.77	73.7	Interferencia por hidrocarburos	0.00	Sauna. Caudal estimado de varios puntos de surgencia 4 l/s. Algas de color amarillo pálido. Un posible olor a azufre está enmascarado por un fuerte olor a crudo.
248-02	Aguas Calientes-El Mohán	Paratebueno	1108765	999867	339	1145.0	5.98	66.0	Interferencia por hidrocarburos	0.00	Manantial cercano a otro de crudo. El caudal estimado de dos surgencias 5 l/s
248-03	Playas R. Humea	Paratebueno	1086386	979027	314	115.4	6.49	39.8	No	0.00	Depósitos de óxido férrico. Caudal estimado 0,3 l/s

Tabla 5. Aspectos geológicos de los manantiales de Cundinamarca Bloque 1

Bloque 1. Bloque Valle Medio del Magdalena - Guaduas			
No. IGM	Manantial	Unidad Geológica	Observaciones Geológicas
189-01	El Hatico	Grupo Guaguaquí	Lutitas grises oscuras a negras. Muy cerca de la Falla Guadualito (inversa)
208-02	La Tigriera	Grupo Guaguaquí	Lutitas y limolitas grises oscuras, fracturadas. Cerca de la Falla Bituima
208-04	Salsipuedes-RNegro	Depósitos aluviales	Depósitos aluviales recientes sobre lutitas de la Formación Seca. Falla Alto del Trigo.
245-01	Casablanca	Formación Seca	Arenitas pardas de grano fino, cuarzosas, cerca al contacto con la Formación Barzalosa
245-02	Azufrada La Quebrada	Formación Barzalosa	Areniscas conglomeráticas, cerca de la Falla Río Bogotá
245-03	Los Chorros	Formación La Tabla	Depósitos aluviales sobre conglomerados. Sistema de Fallas Agua de Dios
245-04	Los Chorros II	Formación La Tabla	Conglomerados. Sistema de Fallas Agua de Dios
245-05	Agua Blanca	Formación Nariño	Depósitos aluviales recientes sobre lutitas y arenitas de la Formación Nariño
245-06	Macanda	Formación Hondita	Areniscas de grano medio a muy grueso. Presencia de sales. Cerca de la Falla Jerusalén
245-07	El Gran Pozo Azufrado	Depósitos aluviales	Depósitos aluviales de la Quebrada Acuatá sobre la Formación Barzalosa
245-08	Los Pocitos Azufrados	Grupo Olini	18 pozos con una tendencia N60E. Posible Falla. Lutitas grises oscuras a negras
246-01	Azufrada Charcolargo	Grupo Guaguaquí	Depósitos coluviales sobre lutitas y arenitas del Grupo Guaguaquí. Falla Salcedo
Bloque 2. Bloque Anticlinorio Villeta			
189-02	El Salitre Y.	Grupo La Palma	Limolitas grises claras, cerca al cruce de las fallas La Victoria e Ibama
208-01	Las Salinas	Formación Murca	Depósitos aluviales sobre lodolitas negras de la Formación Murca. Venas de cuarzo
208-03	San Ignacio	Formación Trincheras	Limolitas grises oscuras a negras, fracturadas. Falla Bituima
208-05	El Peñón	Formación Útica	Depósitos aluviales recientes del Río Negro, sobre la Formación Útica. Fallas
208-06	El Salitre U.	Formación Útica	Coluvión sobre la Formación Útica. Fallas de cabalgamiento con dirección N-S
208-07	Hotel Abacoa	Formación Útica	Depósitos aluviales, del Río Negro y la Quebrada Negra, sobre la Formación Útica
227-08	El Espino	Formación Socotá	Lutitas y limolitas negras con algunas venas de cuarzo
227-10	El Piñal	Formación Capotes	Quebrada afectada por una fuerte inestabilidad en sus orillas. El manantial surge de la base de un derrumbe. Lutitas negras.
227-11	El Volcán	Formación Simijaca	Lodolitas y limolitas grises oscuras a negras. Entre las fallas Alto del Trigo y Bituima
246-02	Santa Lucía	Depósitos Aluviales	Conglomerados de arenitas, en una matriz arenosa dejados por el Río Bogotá
246-03	Santa Ana	Depósitos Aluviales	Conglomerados de arenitas, en una matriz arenosa dejados por el Río Bogotá
Bloque 3. Sabana de Bogotá y Anticlinorio Los Farallones			
209-02	Los Volcanes	Grupo Guadalupe	Depósitos de ladera sobre el Grupo Guadalupe. Falla Suralá
209-03	Hacienda Susatá	Formación Guaduas	Depósitos de ladera sobre la Formación Guaduas. Cerca de la Falla Cucunubá
209-04	Piscina Municipal	Formación Chipaque	Coluvión sobre la Formación Chipaque
209-05	Agua Clara	Depósitos Aluviales	Depósitos aluviales sobre la Formación Guaduas
209-06	Repetidora	Grupo Guadalupe	Depósitos aluviales sobre las formaciones Labor y Tierra
209-07	Hda Achury	Formación Guaduas	Lineamiento SE - NW. Depósitos aluviales sobre la Formación Guaduas
209-09	Leonilde	Terrazas	Terrazas sobre la Formación Chipaque
209-10	Los Volcanes 2	Grupo Guadalupe	Depósitos aluviales sobre el Grupo Guadalupe. Falla Suralá.
209-11	Los Volcanes 3	Grupo Guadalupe	Coluvión sobre la el Grupo Guadalupe
210-01	El Paraiso Codecal	Formación Une	Depósitos aluviales sobre la Formación Une. Falla de rumbo distal N-S
210-02	El Paraiso Termal	Formación Une	Depósitos aluviales sobre la Formación Une. Falla de rumbo distal N-S
210-03	Vereda Peñas	Formación Une	Depósitos aluviales sobre la Formación Une. Falla de rumbo distal N-S
210-04	El Paraiso	Formación Une	Depósitos aluviales sobre la Formación Une. Falla de rumbo distal N-S
227-01	El Zipa	Depósitos Aluviales	Depósitos aluviales sobre la Formación Arenisca Dura
227-02	Aguas Calientes 3	Grupo Guadalupe	Depósitos aluviales sobre el Grupo Guadalupe
227-03	Bavaria	Terrazas	Posible falla de rumbo sinistral, con dirección casi E-W
227-04	Los Lagartos	Terrazas	Falla Usaquén-Sasaima
227-05	Aguas Calientes 2	Grupo Guadalupe	Abanico aluvial cubriendo una posible zona de fractura
227-06	Aguas Calientes 1	Grupo Guadalupe	Abanico aluvial cubriendo una posible zona de fractura
227-07	El Zipa 2	Depósitos Aluviales	Abanico aluvial cubriendo una posible zona de fractura
227-09	Agua Caliente S. F.	Grupo Guadalupe	Coluvión sobre la Formación Arenisca Dura
228-01	Aguas Calientes G.	Formación Bogotá	Depósitos aluviales sobre las formaciones Bogotá y Cacho
228-02	Soratama	Formación Guaduas	Falla Teusacá, en unos depósitos de ladera
228-03	Spa H. del Mar	Formación Guaduas	Depósitos coluviales sobre la Formación Guaduas
228-04	Montecillo	Formación Guaduas	Depósitos aluviales sobre la Formación Guaduas
228-05	Oda El Zaque	Formación Une	Terrazas sobre el contacto entre las formaciones Une y Fômeque
228-06	Sie Chitupcua	Formación Guaduas	Falla que limita el occidente de la Loma de Suba
228-07	La Rivera	Formación Une	Terrazas sobre el contacto entre las formaciones Une y Fômeque
247-01	Los Volcanes Ch.	Formación Une	Manantial entre areniscas
247-02	Santa Mónica	Formación Une	Depósitos de ladera por remoción en masa
247-03	Termales Soberín	Formación Calizas del Guavio	Contacto entre areniscas cuarzosas y una pequeña terraza del Río Negro
265-01	Azufrera Pandí	Formación Guaduas	Terraza aluvial del Río Sumapaz, cambio de pendiente a capas de areniscas
Bloque 4. Bloque Piedemonte Llanero			
229-01	Charco Largo	Grupo Palmichal	Capas casi verticales de areniscas del Grupo Palmichal cerca del contacto con las Areniscas del Limbo
248-01	Aguas Calientes-Sauna	Formación Areniscas Del Limbo	Posible asociación con fallas satélites de la Falla Guaicaramo. Se observan algunas tendencias en la surgencia, através de fracturas en areniscas.
248-02	Aguas Calientes-El Mohán	Formación Areniscas Del Limbo	Se presentan grandes cantos de areniscas. Falla satélite de la Guaicaramo. Agua y crudo
248-03	Playas R. Humea	Formación San Fernando	Fracturas entre areniscas grises oscuras. Coluvión.

3.2.1.1. El Hatico

Este manantial El Hatico (189-01) está localizado en el Municipio de Yacopí y su acceso es por la vía que conduce desde la cabecera hasta Aposentos y Guadualito, unos 50 m. adelante del puente sobre el Río Hatico.

Este manantial salado descende entre lutitas grises oscuras a negras del Grupo Guaguaquí, muy cerca de la Falla Guadualito, la cual pone en contacto la unidad en mención con la Unidad Litoestratigráfica La Palma. Dicha falla es inversa y su plano buza hacia el oriente.

3.1.2.2. La Tigrera

El manantial La Tigrera (208-02) está ubicado en el Km. 10 de la vía que de Villeta conduce a Guaduas, sitio La Tigrera, en la orilla derecha de la carretera, frente a un lavadero de carros.

El manantial La Tigrera surge entre limolitas grises oscuras a negras del Grupo Guaguaquí, muy cerca de la Falla Bituima, la cual es de bajo ángulo. En este sector la Formación Hiló cabalga sobre el Grupo Guaguaquí.

3.2.1.3. Salsipuedes – Río Negro

El manantial Salsipuedes – Río Negro (208-04) tiene acceso por la vía que de Guaduas conduce a Caparrapí y, un Km. después de pasar la Inspección Guaduoero y de cruzar el puente sobre el Río Negro, se gira a la derecha para tomar un carreteable en mal estado hasta llegar a la Finca Río Negro, propiedad el Sr. Luis Mahecha. El manantial está localizado en el sector oriental de la finca, en la orilla norte del Río Negro.

El manantial Salsipuedes emerge entre depósitos aluviales del Río Negro, los cuales cubren lutitas de Grupo Guaguaquí. El sitio de surgencia es cercano a la Falla Alto del Trigo con una tendencia N-S y su plano de falla que buza al oriente. Dicha falla es inversa y, según Acosta et al., (1997, en Acosta & Ulloa (2002)), es de corte bajo de la Falla Bituima.

3.2.1.4. Casablanca

El acceso al manantial Casablanca (245-01) es por la vía Ricaurte – Nilo, en el Km. 14. Antes de llegar a Piscinas Casablanca, la carretera pasa sobre un canal de agua con fuerte olor a sulfuro (H₂S).

Se trata de dos manantiales que emergen entre depósitos de coluvión localizado en el piedemonte de la Serranía Los Callejones, la cual está constituida geológicamente por las formaciones Lidita Superior, La Tabla y Seca. Los cantos son angulares a subangulares, con tamaños desde guijo hasta bloque, los cuales yacen sobre potentes capas de areniscas finas, cuarzosas, de color rojizo, correspondientes a la Formación Seca. Estos manantiales están cercanos a la Quebrada Pagüey, cuyo curso es controlado por la Falla Nebraska.

Según OLADE et al (1982), de la Formación Lidita Superior afloran cherts ricos en piritita.

3.2.1.5. Azufrada La Quebrada

Para llegar a la Azufrada La Quebrada (245-02) se toma la carretera que de Ricaurte va a la Vereda Manuel Sur, se gira a la izquierda, cerca de una pista de motocross, por un camellón (carreteable) hacia el noroeste, hasta llegar al pie de Loma Gorda.

El manantial surge entre areniscas de grano medio a conglomeráticas, subangulares a subredondeadas, de la Formación Barzalosa. Adicionalmente, se encuentra cerca a la traza de la Falla Río Bogotá.

3.2.1.6. Manantiales de Agua de Dios

Las fuentes termales Los Chorros (245-03) y Los Chorros II (245-04) están ubicadas en el Municipio de Agua de Dios, en la vía hacia Nilo, Vereda Los Chorros, a orillas de la Quebrada Los Chorros y frente a un lavadero público. Este municipio tiene construidas duchas a partir de los dos manantiales.

Los manantiales Los Chorros y Los Chorros II emergen entre conglomerados con clastos de hasta 6 cm. de diámetro, redondeados; en un sector donde se presenta el Sistema de Fallas Agua de Dios, el cual está conformado por fallas de cabalgamiento cuyo plano de buzamiento está hacia el occidente. Este sistema de fallas es desplazado hacia el suroriente por una falla dextral con dirección N15°W (Acosta et al., 2002). En este sector afloran rocas del Cretácico Inferior correspondientes a las formaciones La Tabla, Barzalosa, La Cira y bancos calcáreos de la Lidita Superior del Grupo Olini.

3.2.1.7. Agua Blanca

Las duchas azufradas Agua Blanca (245-05) están localizadas en el Municipio de Girardot, Vereda Agua Blanca, en la llanura aluvial de la Quebrada El Ojo. Se trata de tres manantiales de aguas aparentemente sulfuradas que descienden del cerro. No se pudo realizar el muestreo debido al régimen de lluvia alto que había diluido la concentración de los manantiales. Adicionalmente, no se pudieron observar con claridad los puntos de surgencia.

Estos manantiales surgen de los depósitos aluviales de la Quebrada El Ojo, los cuales cubren las lodolitas y arenitas calcáreas de la Formación Nariño.

3.2.1.8. Macanda

El manantial Macanda (245-06) tiene su acceso por la vía Girardot – Nariño – Guataquí. Al llegar al Km. 41 desde Girardot, llega a la tienda del Sr. Jorge Sabogal en la Vereda Vagal y gira a la derecha por un carreteable, unos 3 Km. hasta llegar al final del mismo, en la finca Macanda.

Este manantial asciende entre areniscas calcáreas de grano grueso de la Formación Hondita, cerca a la Falla Jerusalén.

Cabe anotar que según OLADE et al (1982), hay varias fuentes azufradas en el sector, las cuales brotan entre niveles de lilitas que tradicionalmente son buenos acuíferos. También argumentan la carga de azufre por la presencia de abundante pirita concrecionaria.

3.2.1.9. El Gran Pozo Azufrado

El acceso a El Gran pozo Azufrado (245-07) es a través de la vía Tocaima – Jerusalén, y en el Km. 3,5 gira a la izquierda y toma un carreteable por espacio de 300 m.

El Gran Pozo Azufrado emerge entre los depósitos aluviales de la Quebrada Acuatá. Estos depósitos podrían cubrir un ramal sur de la Falla Bituima.

3.2.1.10 Los Pocitos Azufrados

Los Pocitos Azufrados (245-08) son 18 manantiales de aguas sulfuradas que se ubican en el Km. 3 de la vía Tocaima – Jerusalén, a la derecha de la vía.

Los manantiales están alineados con una tendencia N60°E y surgen entre lutitas del Grupo Olini. Posiblemente, esta tendencia tenga relación con una falla.

3.2.1.11. Azufrada Charcolargo

El manantial Azufrada Charcolargo (246-01) está constituido por agua sulfurada ubicado en la Vereda Charcolargo, Km. 6 de la vía Apulo – Naranjalito.

El manantial Charcolargo desciende de un depósito coluvial de poca extensión (no cartografiado), constituido por detritos de lutitas y arenitas del Nivel de Lutitas del Grupo Olini. La estructura cercana más importante es la Falla Salcedo, la cual es un cabalgamiento con vergencia al occidente y una dirección N30°E (Acosta & Ulloa, 2001). En el sector se presentan otras fallas de cabalgamiento, paralelas a la Falla Salcedo; así como una falla transversal a ésta, con dirección N60°W, y buzamiento hacia el suroeste; muy cerca del manantial.

3.2.1. Bloque 2

3.2.2.1. El Salitre Y.

El manantial El Salitre Y. (189-02) tiene acceso por la vía Yacopí – Íbama, hasta llegar a la Vereda el Limonar y tomar un camino que baja a la Finca El Salitre, propiedad del Sr. Antonio Cuellar. El manantial está localizado entre un potrero, antes de bajar al Río El Salitre y está protegido por algunos árboles.

El manantial emerge entre limolitas grises claras del Grupo La Palma, muy cerca de la traza de la Falla Íbama y de la intersección de ésta con la Falla La Victoria.

3.2.2.2. Las Salinas

Los manantiales Las Salinas (208-01) son varias fuentes saladas, las cuales están localizadas al final de la vía Nimaima – Las Salinas, cerca de la desembocadura de Río Pinsaima en el Río Negro. No se pudo muestrear debido a que el agua estaba estancada en el momento de la visita y a que otros puntos de surgencia estaban cubiertos por el cauce del Río Pinsaima. Se presenta depositación de óxidos de hierro. En épocas de sequía es común ver cristales blancos de sal que cubren las playas y las piedras del lecho del río.

Los manantiales están ubicados en la llanura aluvial del Río Pinsaima, sobre la Formación Murca y cerca de la Falla Canoas – La Peña.

Según López & Murcia (1957), los estratos de lodolitas negras están afectados por fuerzas tectónicas en forma de espejos de fricción, planos de exfoliación y venas de cuarzo lechoso. Algunas fallas de la región son de poca magnitud y de ángulo alto.

De acuerdo con OLADE et al (1982), el curso del río Pinsaima está controlado por una falla en su último trayecto antes de llegar a la confluencia con el Río Negro. La falla tiene una dirección casi E-W.

3.2.2.3. San Ignacio

El acceso al manantial San Ignacio (208-03) es a través de la vía Villeta – El Puente – Chapaima, se debe tomar la desviación al Alto de Torres, cruzar el Río Bituima por un puente peatonal de madera. El manantial se encuentra bajo un árbol, entre cultivos de caña y maíz.

El manantial emerge en la llanura aluvial del Río Bituima, la cual yace sobre la Formación Trincheras. La estructura cercana más importante es la Falla Bituima, la cual es inversa y su plano buza al oriente.

3.2.2.4. Manantiales de Útica

El manantial El Peñón (208-05) está localizado en las afueras de Útica, sector de Pueblo Viejo, en el costado sur del Río Negro; El Salitre (208-06) está ubicado en el Barrio Alfonso López, Sector El Prado; y el Hotel Abacoa (208-07) está situado en la calle principal, cerca de la entrada desde Villeta.

El Peñón surge entre depósitos aluviales del Río Negro. El Sistema de Fallas Quebradanegra es la estructura más importante. Se trata de varias fallas de cabalgamiento, paralelas entre sí y con una dirección casi N-S. El manantial El Salitre emerge entre un coluvión, frente a El Peñón, en la otra orilla del río, mientras que el manantial del Hotel Abacoa emerge entre depósitos aluviales del Río Negro y la Quebrada Negra. Todos los depósitos recientes reposan sobre la Formación Útica.

3.2.2.5. El Espino

Para llegar al manantial El Espino (227-08) se toma inicialmente la vía La Mesa – San Joaquín, y luego la San Joaquín – Quipile; y en el Km. 3 de la última se continúa por una quebrada aguas arriba, unos 400 m. El manantial emerge en la parte media de unas lodolitas negras, las cuales forman un salto en la quebrada.

Las lodolitas negras, entre las cuales emerge este manantial, hacen parte de la Formación Socotá y presentan algunas venas de cuarzo.

3.2.2.6. El Piñal

Al tomar la vía Guayabal de Siquima – Bituima, después del peaje se presenta un descenso hasta llegar a la Quebrada El Piñal (límite entre estos dos municipios), en la cual se encuentra un carreteable que conduce a la Finca El Derrumbe. El manantial El Piñal (227-10) está localizado a orillas de la quebrada, en el sector nororiental. En la actualidad, el manantial está sepultado por un derrumbe y, bajo el mismo, emerge un escaso caudal, a más baja temperatura.

El derrumbe, bajo el cual emerge el manantial, reposa sobre lutitas de la Formación Capotes. La Quebrada El Piñal presenta un aparente control estructural en gran parte de su curso y gran inestabilidad en las rocas de las orillas.

3.2.2.7. El Volcán

El manantial El Volcán (227-11) está ubicado en la Vereda El Volcán, Municipio de Bituima, en una curva de la carretera, frente a la casa de Doña Dolores Hernández.

El manantial emerge entre limolitas calcáreas de la Formación Lidita Superior del Grupo Olini. En este sector, la unidad en mención se encuentra entre las fallas Alto del Trigo y Bituima.

3.2.2.8. Manantiales de Anapoima

Las Duchas Medicinales Santa Lucía (246-02) están localizadas a un Km. de Anapoima por la vía a El Triunfo, mientras que el manantial Santa Ana (246-03) está localizado en el sector del mismo nombre, al cual se puede llegar a través de la vía Anapoima – Las Palmas, luego de girar a la izquierda.

Ambos manantiales emergen entre depósitos aluviales, caracterizados por cantos hasta tamaño bloque en una matriz arenosa. Estos depósitos fueron posiblemente dejados por el Río Bogotá. En la región afloran rocas cretácicas de las formaciones Trincheras, Socotá y Capotes; las cuales hacen parte del Grupo Villeta.

3.2.2. Bloque 3

3.2.3.1. Nápoles

El balneario Nápoles (209-01) se encuentra en la Vereda El Boquerón, a la cual se llega por la vía El Sisga - Machetá. Desde allí se toma un sendero que conduce a los manantiales en la Quebrada Nápoles, 10 minutos de camino aproximadamente.

Los manantiales del Balneario Nápoles surgen entre depósitos aluviales de poco espesor, los cuales están localizados en el cauce de la Quebrada Nápoles y cubren las areniscas de la Formación Cacho.

De acuerdo con OLADE et al (1982), las areniscas se presentan invertidas y el contacto entre las formaciones Cacho y Guaduas estaría próximo a las surgencias de los manantiales.

3.2.3.2. Balneario Los Volcanes

El balneario se encuentra entre El Sisga y Machetá, 800 m. abajo del Balneario Nápoles, luego de descender por una gradas de cemento un trayecto de 200 m. Se presentan tres manantiales. El manantial Los Volcanes (209-02) es el más cercano a las piscinas. Los Volcanes 2 (209-10) está localizado dentro del balneario, al cruzar el Río Machetá, en la orilla sur, y es captado en dos tanques de concreto. Los Volcanes 3 (209-11) se encuentra al partir del balneario Los Volcanes, 200 m. aguas abajo por el Río Machetá, en una curva del río, costado sur.

Todos los manantiales se encuentran en depósitos de ladera, sobre la Formación Arenisca Tierna del Grupo Guadalupe y están cerca de la traza de la Falla Suralá, inversa y de ángulo alto; la cual es perpendicular al curso del Río Machetá. Aunque, también puede pensarse en una posible falla que controle al río estructuralmente. La Falla Suralá pone en contacto a las areniscas friables de la Formación Cacho con arcillolitas de la Formación Guaduas, que en este sector presenta poco espesor. De acuerdo con Montoya & Reyes (2003), aunque la Falla Suralá es inversa, puede tener una componente de rumbo; ya que hay sectores donde las unidades están oblicuas a su trazo.

3.2.3.3. Hacienda Susatá

La Hacienda Susatá se encuentra en la vereda del mismo nombre, en el Km. 6 de la vía entre Nemocón y la Laguna de Suesca. El manantial (209-03) está ubicado en un sauzal entre la casa y la piscina.

El manantial emerge entre unos depósitos de ladera, los cuales yacen sobre la Formación Guaduas en el flanco oriental del Sinclinal Checua – Lenguazaque. En este sector, la Formación Guaduas está cerca al contacto con la Formación Arenisca Tierna del Grupo Guadalupe. Adicionalmente, cerca del sitio de surgencia se encuentra la Falla Cucunubá.

3.2.3.4. Manantiales Urbanos de Nemocón

El manantial de la Piscina Municipal (209-04) está localizado en el perímetro urbano del Municipio de Nemocón, en el sector de Salinas, debajo de la piscina municipal. El manantial Leonilde (209-09) está ubicado en el patio de la casa de la Señora Leonilde Latorre, a unos 250 m. de la piscina municipal.

Los manantiales localizados en el perímetro urbano de Nemocón, se encuentran entre depósitos coluviales y de terraza, los cuales cubren la Formación Chipaque.

3.2.3.5. Aguas Claras

Al balneario Aguas Claras (209-05) se llega después de tomar la vía Chocontá – Suesca, girar al norte y seguir la carrilera en forma paralela hasta llegar a la Vereda Hato Grande.

El manantial se encuentra entre depósitos aluviales de la Quebrada Ovejeras, los cuales cubren a la Formación Guaduas, muy cerca del contacto con la Formación Arenisca Tierna del Grupo Guadalupe, que forma un escarpe y el respectivo cambio de pendiente cerca del manantial.

3.2.3.6. Repetidora

El manantial Repetidora (209-06) se encuentra en al pié del cerro en el cual se encuentran las antenas repetidoras de TELECOM, al occidente de Chocontá. Al llegar a la puerta de entrada de la estación de televisión, se desciende por unas gradas hasta la fuente termal, la cual está cercada. Se presentan dos surgencias.

El manantial surge entre depósitos aluviales del Río Bogotá, los cuales cubren sedimentitas de la Formación Tilatá.

3.2.3.7. Hacienda Achury

Este manantial Hda Achury (209-07) estaba localizado en el Municipio de Sesquilé. En la actualidad el manantial está desaparecido.

El sitio del manantial está localizado en depósitos aluviales que reposan sobre la Formación Guaduas. Se pudo observar un posible lineamiento en dirección SE-NW.

3.2.3.8. Fuentes termales de Tibirita

Los balnearios están localizados en jurisdicción del Municipio de Tibirita, sobre el Km. 11 de la vía Machetá – Guateque, antes del puente sobre la Quebrada Carrefur, a la derecha de la calzada. En el balneario El Paraíso CODECAL se presentan tres manantiales, dos de los cuales (210-03 y 210-04) se encuentran al otro lado del Río Macheta, entre cafetales, en jurisdicción del Municipio de Manta. Estos últimos manantiales están separados entre sí unos 35 m. El manantial 210-01 es el que se utiliza propiamente en el balneario. Por otra parte, en el balneario el Paraíso Termal, localizado a unos 100 m. delante de El paraíso –

CODECAL, por la vía hacia Guateque, solo se presenta un manantial (210-02).

Los manantiales surgen entre depósitos aluviales recientes, los cuales reposan sobre arenitas de la Formación Une, en ambos lados del Río Machetá. En este sector el río está controlado por una falla de rumbo dextral con dirección N-S (Ulloa & Rodríguez, 1975). Los manantiales se ubican cerca de los cambios de pendiente.

3.2.3.9. Fuentes Termales de Tabio

Los manantiales se presentan en dos predios: El Balneario El Zipa y la Finca Aguas Calientes. El balneario El Zipa está ubicado a un Km., aproximadamente, al noroccidente del parque principal de Tabio, y en él se presentan dos manantiales (227-01 y 227-07). El manantial El Zipa 2 (227-07) es el más pequeño y caliente, y está contiguo a la Finca Aguas Calientes. La Finca Aguas Calientes tiene su acceso por una portada a una cuadra de la plaza de Tabio y en ella se presentan tres manantiales: Aguas Calientes 3 (227-02) es el más próximo al Balneario El Zipa, Aguas Calientes 2 (227-05) es el más cercano a la casa principal y está cubierto por lotos, y Aguas Calientes 1 (227-06) hace parte de la piscina de la finca.

Los manantiales localizados en el Balneario El Zipa y en la Finca Aguas Calientes, emergen entre depósitos aluviales y terrazas, los cuales reposan sobre la Formación Arenisca Dura del Grupo Guadalupe. La Serranía de Tenjo – Tabio, localizada al occidente de los manantiales, está caracterizada por la presencia de diferentes fallas de cabalgamiento. Según Scheibe (1918), las fuentes termales de Tabio emergen a través de depósitos cuaternarios constituidos por cascajo, arena y limo; los cuales han sido transportados por lluvias y corrientes de agua. También se presenta turba.

El Geólogo Luis Eduardo Vásquez, de INGEOMINAS, trabajó recientemente el área de Tabio y utilizó el método de medición electromagnética en el dominio del tiempo. Dicho trabajo, el cual es presentado en su totalidad en el Anexo 6, se hizo con el propósito de determinar zonas de baja resistividad en el subsuelo del lugar donde se encuentran las fuentes termales. De igual manera, determinar algunas estructuras relacionadas con los manantiales.

De acuerdo con el Geólogo Vásquez, existe un gran potencial de aguas termales en el sector occidental, a unos 100 m de profundidad, del área por él estudiada. Este potencial se hace más somero a medida que se avanza hacia el oriente, sitio en el cual se presentan los manantiales. El Geólogo Vásquez también observó una tendencia SW-NE, que atraviesa el valle, y que podría corresponder a una fractura o sistema de fracturas.

3.2.3.10. Fuentes termales de Bogotá

El manantial del Conjunto Residencial Parque Bavaria (227-03) está localizado en una fuente de agua cubierta por un buchón.

En el Club Los Lagartos, al noroccidente de Bogotá, hay un pozo de agua termal de unos 40 m. de profundidad (227-04).

En la misma área del club se presentaban otros manantiales, los cuales han desaparecido bajo sectores anegados o se han extinguido, como es el caso del manantial Sie Chitupcua (228-06), también denominado El Salitre, situado en el sector noroccidental de la Loma de Suba, en la Vereda El Salitre, a unos 300 m. al occidente de la carretera de Cota.

El manantial Bavaria emerge entre depósitos de flujos torrenciales del piedemonte oriental. Según INGEOMINAS y UNIANDES (1997), existe una falla de rumbo sinistral, la cual corta los cerros orientales. Al extrapolar dicha falla hacia el occidente, su traza pasaría muy cerca del manantial.

En cuanto al pozo de agua termal del Club Los Lagartos, éste está localizado en depósitos aluviales recientes del Río Juan Amarillo, afluente del Río Bogotá. Estos depósitos están constituidos por arcilla y limos. Un rasgo estructural importante es la Falla Usaquén – Sasaima, la cual es de rumbo dextral, controla el curso del Río Juan Amarillo y le imprime una abrupta terminación a la parte sur de los cerros de Suba, Cota – Chía y Tenjo - Tabio (INGEOMINAS y UNIANDES, 1997).

Cabe anotar que en el sector de la Loma de Suba se presentaban varias fuentes termales, las cuales fueron anegadas y en la actualidad estarían bajo el lago del Club Los Lagartos.

Según Royo y Gómez (1946a y b), En la zona sur de la Loma de Suba se presenta una serie de manantiales, algunos de ellos relacionados entre si por medio de fallas. Dichas fallas delimitan la loma así: En un sentido local NW-SE se presenta una falla, hoy denominada Falla Usaquén – Sasaima (INGEOMINAS y UNIANDES 1997), la cual sería responsable de la alineación de los manantiales de Las Pléyades con el manantial del Club Los Lagartos y se constituye en el límite sur de la loma. En los límites occidental y oriental de la loma se presentan otras fallas que tienen relación con los mismos manantiales en mención. Con respecto a la oriental, Falla Niza – Los Lagartos, ésta relacionaría al manantial del club con otro en Niza (Royo y Gómez, 1946a y b). En cuanto a la falla al occidente de la loma de Suba, ésta tendría relación con el manantial Sie Chitupcua (228-06), el cual emergía entre rocas de la Formación Guaduas.

3.2.3.11. Agua Caliente S. F.

El manantial Agua Caliente S. F. (227-09) está localizado en la Hacienda Agua Caliente, al final del carretable que desde San Francisco, conduce a la Vereda El Peñón Alto. Luego continúa un camino hasta llegar a una zona de camping y al manantial.

Este manantial surge en un depósito coluvial, el cual yace sobre areniscas de la Formación Arenisca Dura del Grupo Guadalupe.

3.2.3.12. Aguas Calientes G.

El manantial Aguas Calientes G. (228-01) está localizado al NE de la cabecera municipal de Guasca, y se llega a él por un carretable después de recorrerlo por una longitud de 4 Km. Este carretable conduce a la Vereda Guandita, y junto al puente sobre una quebrada afluente del Río Aves, se presenta el manantial. El manantial inicial, localizado en la parte

exterior de la piscina, se tapó. El último muestreo se realizó en un manantial que emerge por un lado del puente.

Los manantiales emergen entre depósitos aluviales del Río Aves y afluentes. Estos depósitos reposan sobre las arenitas de la Formación Cacho. El valle aluvial se presenta entre dos colinas, elongadas en sentido N-S, con un posible control estructural. Se puede observar el desarrollo de coluviones en las laderas cercanas.

3.2.3.13. Soratama

En la vía Bogotá - La Calera, después de la Escuela El Salitre, unos 250 m. adelante hay un giro a la izquierda y continúa un carretable unos 300 m, hasta llegar al final del mismo. Luego se toma un corto sendero para llegar a una piscina con el manantial (228-02).

Este manantial aparece entre depósitos de ladera, los cuales cubren a la Formación Guaduas. Adicionalmente, hay proximidad con la Falla Teusacá.

3.2.3.14. Spa H. del Mar

En la Vía Bogotá – La Calera, 3 Km. adelante del Alto de Patios (9 Km. desde Bogotá), por el lado izquierdo de la calzada se encuentra una portada. El manantial (228-03) está ubicado en predios del Spa Elena del Mar.

Este manantial se encuentra en un cambio de pendiente, en la base de un coluvión y podría estar relacionado con la Falla Teusacá. El coluvión cubre la Formación Guaduas.

3.2.3.15. Montecillo

En el Km. 2 de la vía Guatavita – Guasca se encuentra un sendero que desciende hasta la orilla suroriental del Embalse del Tominé, cerca de los tanques del acueducto del antiguo pueblo de Guatavita. El manantial (228-04) emerge en el lecho de una pequeña quebrada que desemboca en el embalse, muy cerca de las ruinas del antiguo caserío.

El manantial se encuentra en el cambio de pendiente marcado por los depósitos de ladera, los cuales gradan a llanura aluvial; en el flanco occidental del Anticlinal Guatavita. Los depósitos yacen sobre la Formación Guaduas.

Según OLADE et al (1982), cerca del manantial se presentan areniscas de grano medio a grueso, las cuales corresponden al Grupo Guadalupe y se encuentran bajo arcillolitas limosas de la Formación Guaduas. El contacto entre las unidades en mención es fallado y el manantial está a pocos metros del cierre del Anticlinal Guatavita, hacia el SE.

3.2.3.16. Manantiales de Gachetá

En el Km. 5 de la vía Gachetá – Bogotá, margen occidental de la carretera, se encuentra el Balneario La Rivera, donde se presenta un manantial (228-07). Muy cerca del balneario se presenta otro manantial localizado a orillas de la Quebrada El Zaque (228-05). Se debe

cruzar la quebrada a través de un puente peatonal.

Las fuentes termales emergen a través de las terrazas de la quebrada, la cual presenta un control estructural. Las terrazas se encuentran sobre el contacto entre las formaciones Une y Chipaque. También puede existir una relación con la Falla Chorrera – Salinero.

3.2.3.17. Manantiales de Choachí

En la vía Choachí – La Calera, Km. 2,5, margen izquierda de la calzada, se encuentra el balneario Los Volcanes (247-01). El manantial está localizado en la parte alta del balneario a unos 100 m. de la piscina. En el mismo sitio de la vía, pero en la margen izquierda de la misma, se presenta el Balneario Santa Mónica (247-02), a cuyo manantial se tiene acceso por un sendero de unos 300 m.

El manantial Los Volcanes Ch. está afectado por un deslizamiento y se encuentra entre areniscas de la Formación Une. En cuanto al Balneario Santa Mónica, éste tiene un manantial que emerge a través de depósitos de ladera que cubren las areniscas de la Formación Une.

3.2.3.18. Termas Soberín

Los Termas Soberín (247-03), se encuentran 1 Km abajo del Corregimiento de Puente Quetame, Municipio de Quetame, Vía Bogotá – Villavicencio. El manantial emerge en el costado izquierdo del Río Negro, en frente a un peaje. Un puente peatonal colgante permite atravesar el río. Sin embargo, los habitantes de los predios no nos permitieron pasar a muestrear.

De acuerdo con OLADE et al (1982), el manantial surge en el contacto entre unas areniscas blancas, cuarzosas y una pequeña terraza del río. Las areniscas tienen un fuerte buzamiento hacia el río y corresponden a la base del Cretácico (Eduardo López, comunicación verbal).

3.2.3.19. Azufrera Pandi

En la vía que de Pandi conduce a Icononzo, justo antes de llegar al puente sobre el Río Sumapaz, existe un carretable paralelo al mismo río, aguas abajo. Dicho carretable termina en el balneario Azufrera de Pandi (265-01).

El manantial está localizado en un cambio de pendiente, entre la llanura aluvial del Río Sumapaz y una ladera que contiene capas de areniscas, en posición subhorizontal. Muy cerca se encuentra el contacto entre la Formación Guaduas y el Grupo Guadalupe.

Según OLADE et al (1982), las capas de areniscas corresponden al Grupo Guadalupe y son cuarcíticas de grano fino a medio. Sobre las areniscas se observan arcillolitas rojizas de la Formación Guaduas.

3.2.3. Bloque 4

El Grupo 4 está conformado por cuatro manantiales. Se ha tenido en cuenta el manantial Charco Largo debido a su proximidad con Cundinamarca y a su semejanza con la caracterización físico-química de los manantiales de Paratebueno.

3.2.4.1. Charco Largo

El manantial Charco Largo (229-01) está localizado en el Municipio de Santamaría del Batá (Boyacá), a orillas del Río Guavio (límite entre Cundinamarca y Boyacá). Debe tomarse la vía San Pedro de Jagua – Santamaría, o viceversa, cruzar un puente colgante en el sector de Charco Largo y continuar aguas arriba, por el lado de Boyacá, unos 100 m.

El manantial surge entre coluviones de cuarzoarenitas correspondientes al Grupo Palmichal, cerca del contacto con la Formación Arcillas del Limbo, cuyas capas están casi verticales.

3.2.4.2. Aguas Calientes – El Sauna

Por la carretera Marginal de la Selva, vía Villavicencio – Yopal, después de Maya, la vía llega al sitio Punta de Cerca. A la izquierda de la calzada hay un carreteable, en cuyo Km. 10 está ubicado el sitio Aguas Calientes, a orillas de la Quebrada del mismo nombre. El manantial está localizado bajo un sauna rústico (plástico y madera) y se le ha denominado Aguas Calientes – El Sauna (248-01). Existe otro manantial ubicado a 50 m de El sauna, tiene el nombre de El Mohán (248-02) y está contiguo a una emanación de crudo.

Estos manantiales surgen entre arenitas de la Formación Areniscas del Limbo. Se observa una tendencia N70°E en la surgencia. Habría una posible asociación con fallas satélites normales de la Falla Guaicaramo. Adicionalmente, se observan diaclasas con disposiciones N-S/75°E, N46°E/66°W y N64°E/70°E. En los sitios de surgencia se presentan grandes cantos rodados de areniscas.

3.2.4.3. Playas del Río Humea

En el Km. 3 de la carretera que parte de la Marginal de la Selva y conduce a Medina, antes de llegar al Alto de la Macarena, se adentra un camino a la Finca Buenavista y desciende hasta las orillas del Río Humea. Los manantiales (248-03) surgen entre derrubios de pendiente y entre areniscas en la orilla del Río Humea.

Se presentan varios puntos de surgencia entre areniscas grises oscuras, hacia el tope de la Formación San Fernando. Las capas tienen una disposición N44°E/ 20°W y las fracturas, a través de las cuales emergen los manantiales, presentan las siguientes disposiciones estructurales: N30°W/90° y N20°W/70°NE.

3.2.5 Clasificación de Sistemas Geotérmicos en Cundinamarca

Si se tienen en cuenta parámetros como la temperatura de las aguas termales, sus relaciones geológicas y su grado de mineralización, se pudieron agrupar en sistemas de acuerdo con la clasificación propuesta por Dickson & Fanelli (1994). En términos generales, se puede decir que los acuíferos geotérmicos en Cundinamarca son de temperatura baja a intermedia y se agrupan en los siguientes tipos de sistemas: Acuíferos en Cuencas Sedimentarias, Acuíferos de Basamento Bajo Cuencas Sedimentarias y Sistemas en Zona de Fractura. Esta clasificación es general, pero se trató de incorporar elementos propios de la Cordillera Oriental considerando la información disponible. Las fuentes en los municipios de Yacopí (manantial El Hático), Villeta, La Mesa, Guataquí, Tocaima, Apulo, Anapoima y Pandi no fueron clasificados dentro de ningún grupo, debido a que no son termales. A continuación se describen cada uno de los sistemas mencionados anteriormente:

3.2.5.1. Acuíferos en Cuencas Sedimentarias:

Estos son acuíferos muy comunes y tienen como características principales las siguientes, ver fig. 6:

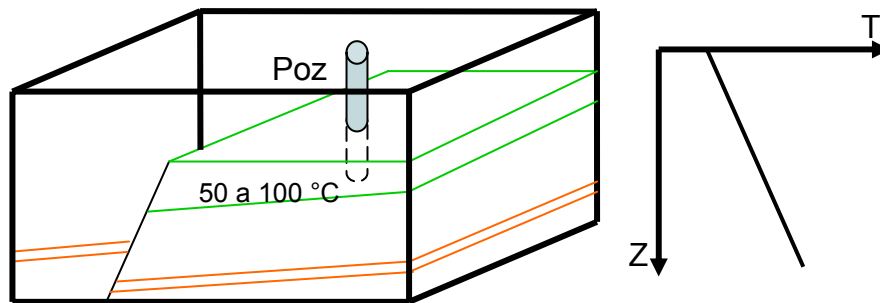


Figura 6. Acuíferos en Cuencas Sedimentarias con la representación de un pozo de producción y su perfil de temperatura, el cual representa el comportamiento del gradiente geotérmico normal.

- Las aguas son por lo general cognatas, fósiles, sedimentadas o de formación y por lo tanto mineralizadas.
- No hay convección, la temperatura del acuífero es controlada por el flujo de calor terrestre promedio, la conductividad térmica de las rocas y la profundidad del acuífero.
- El agua termal aflora en superficie por la acción de fracturas profundas.

Para beneficiar este tipo de sistemas es necesario perforar pozos de 1.5 a 2 km de profundidad para obtener fluidos con temperaturas, en cabeza de pozo, entre los 60 y 75 °C. El potencial de generación a largo plazo se encuentra entre 1 y 3 Mwt/km².

Las fuentes termales, El Salitre del municipio de Yacopí, al igual que Zoratama y Spa Helena del Mar del Municipio de la Calera, se clasifican como provenientes de Acuíferos en Cuencas Sedimentarias.

3.2.5.2. Acuíferos de Basamento Bajo Cuenas Sedimentarias:

En este tipo de sistema existe un acuífero altamente permeable dentro o sobre la parte superior de un basamento cubierto por una secuencia de rocas sedimentarias más jóvenes de baja permeabilidad. Convección forzada por el movimiento de fluidos calientes en el centro de la cuenca, migran dentro del acuífero a una estructura anticlinal de la cuenca (Hoschtein & Yang, 1988). En general, este tipo de acuíferos presenta las siguientes características:

- Es un recurso de baja temperatura y se puede obtener de 50 a 60°C desde profundidades entre 0.5 a 1 km (Ver fig.7).
- El área de la cual el calor puede ser extraído es enorme.
- La mineralización de los fluidos es baja.

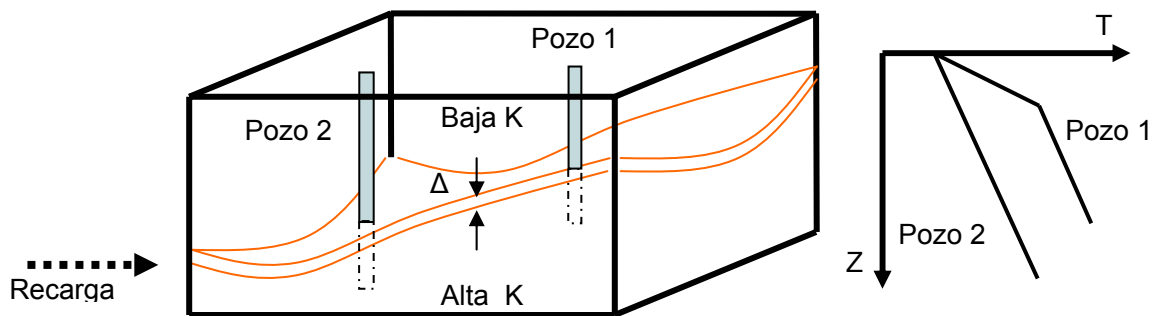


Figura 7. Modelo esquemático de un sistema de acuífero de basamento. Los perfiles de temperatura son para 2 pozos ficticios, basados en el supuesto caso de que la conductividad térmica k de los sedimentos en la parte superior del acuífero es mucho menor que la de las rocas del basamento.

Los sistemas geotérmicos que se desarrollan en la Sabana de Bogotá, se clasifican en esta categoría. En un estudio adelantado en INGEOMINAS por Bermoude y Velandia en 1999, sobre la importancia de las fallas longitudinales y transversales en la Sabana de Bogotá, se pudo determinar que existe una tectónica de bloques que afecta rocas cretácicas y terciarias. Este sistema de estructuras, conforma el basamento de la cuenca y ofrece una permeabilidad secundaria muy eficiente para la recarga lateral de los acuíferos en los depósitos cuaternarios suprayacentes (ver fig. 8). Este mecanismo puede estar propiciando la penetración de aguas meteóricas hasta lugares profundos de la cuenca (> 1 km) donde, por el gradiente geotérmico normal son calentadas y posteriormente, utilizando el mismo sistema de fallas y fracturas ascienden a la superficie para dar lugar a las fuentes termales de la Sabana de Bogotá. Estas aguas pueden tener un mismo origen, como sugiere su hidrología; aunque su mineralización no es homogénea, hay que considerar que esto obedece a los diferentes trayectos que debe emprender el agua en contacto con diferentes litologías en su flujo a través de fallas y fracturas. Donde además, pueden ocurrir infinidad de mezclas que a la vez que alteran la composición química del agua, también afectan su temperatura.

Las fuentes termales de Cundinamarca clasificadas como pertenecientes a Acuíferos de Basamento Bajo Cuencas Sedimentarias son las de los municipios: Cucunuba, Chocontá (Repetidora), Nemocón, Guatavita, Guasca, Tabio, Bogotá, La Calera y Choachí.

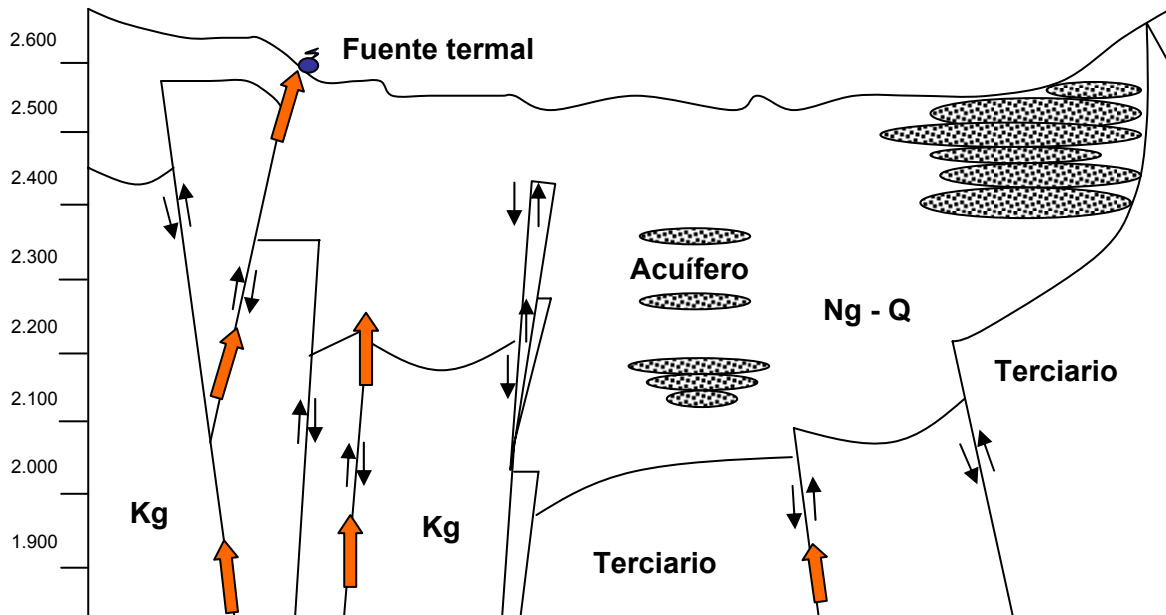


Figura 8. Corte esquemático transversal de la Sabana de Bogotá, donde se representa la relación entre la tectónica actuante y la litología en la cuenca. La cobertura del cuaternario Ng-Q contiene los acuíferos que se explotan en la Sabana y que se encuentran sobre el basamento cretácico. La permeabilidad de este basamento es secundaria por fracturamiento. Las aguas termales utilizan las fallas y fracturas para moverse desde las partes profundas de la cuenca hasta la superficie, luego de ser calentadas por el gradiente geotérmico normal (Modificado de Bermoude & Velandia, 1.999).

Las fuentes termales de Ricaurte, Tocaima y Agua de Dios pertenecen a sistemas de Acuíferos de Basamento Bajo Cuencas Sedimentarias, solo que las aguas provienen de la cuenca del Río Magdalena.

3.2.5.3. Sistemas en Zona de Fractura (Reservorios en zonas estrechas de fractura):

En este caso, el reservorio principal consiste en una zona de fractura pendiente y estrecha (<100 m de ancho) (Huang & Goff, 1986), la cual a menudo y como respuesta a una actividad tectónica reciente, exhibe una gran permeabilidad vertical, a diferencia de las demás rocas del entorno que tienen permeabilidades bajas. Para el caso de Cundinamarca es difícil hacer una lista de características tipo, debido a que la parte oriental de la cordillera presenta una complejidad estructural que hace que cada sistema pueda tener características muy particulares en relación a su hidrología.

Si la temperatura del fluido en la base de la zona de fractura es superior a 200°C, como ocurre cuando la corteza superior se calienta por deformación de la corteza inferior, o por

intrusiones volcánicas profundas, temperaturas a profundidades económicas ($> 125^{\circ}\text{C}$) prevalecen en el reservorio. Estos fluidos también pueden descargar agua cerca al punto de ebullición (ver fig. 9).

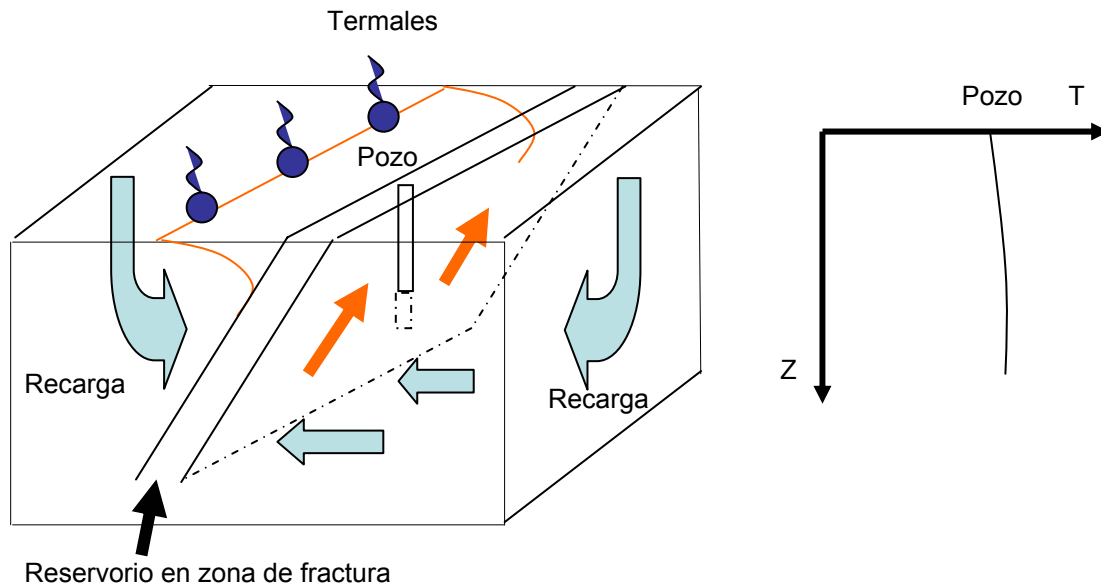


Figura 9. Modelo esquemático de un sistema en zona estrecha de fractura con un reservorio secundario somero. La totalidad de la zona de fractura y el agua caliente ascendente constituyen el reservorio primario.

En la parte oriental de Cundinamarca, existe un flujo de calor anómalo que calienta el agua subterránea, como en el caso de manantiales en los municipios de Chocontá (Nápoles y Los volcanes), Manta, Gachetá y Paratebueno, siendo estos últimos los más calientes en el departamento. En este caso, la ocurrencia de un flujo de calor anómalo es coincidente con el trazo de fallas de tipo regional, como el sistema de fallas del Borde Llanero y otras fallas asociadas. En general, estas aguas a pesar de tener una temperatura relativamente alta en superficie (40 a 74°C), tienen una baja mineralización, lo que indica que el tiempo de residencia es lo suficientemente corto como para evitar un mayor intercambio iónico con la roca. También, es indicio de que estas aguas tienen una circulación rápida, se calientan en la zona de fractura y buscan un camino para aflorar, ya sea un río una quebrada o fracturas en las rocas más superiores.

La existencia de un gradiente anómalo en la parte oriental de la cordillera, se evidencia no solo por la temperatura de los manantiales, sino también en los resultados de estudios específicos encaminados a determinar la historia térmica de la cordillera oriental y su implicación en el proceso de maduración de hidrocarburos. En estudios realizados por Mora (1996, 2000; en Sarmiento, 2001) y Lance-Le Cornec (1998; en Sarmiento, 2001), a partir de temperaturas medidas en pozos de petróleo y análisis en vitrinita, con el fin de desarrollar modelos de madurez en materia orgánica, se obtuvo resultados que corroboran la existencia de una fuente de calor en los alrededores del municipio de Paratebueno, donde

se determinó un gradiente de 3.62°F/100ft (56°C/km). La alta temperatura en los manantiales de Paratebueno y el valor calculado del gradiente geotérmico en este lugar, hacen pensar en una relación directa entre la actividad profunda de las fallas del Borde Llanero y la generación de calor a partir de este proceso. Esta clase de fuente de calor, ha sido documentada por Hochstein y Regenauer-Lieb (1998) para sistemas geotérmicos desarrollados en los Himalayas, donde el calor proviene de la colisión de placas. A una escala regional, para el caso concreto de la Cordillera Oriental, tanto su tectónica compresiva como complejo comportamiento en profundidad, parecen aún estar desarrollando un papel importante en su historia térmica, evidenciado en el desarrollo de sistemas geotérmicos durante la evolución tectónica de esta parte del país.

3.3. GEOQUÍMICA

La temperatura como primer indicador del contenido energético del fluido, muestra una tendencia de incremento hacia el oriente del Departamento de Cundinamarca, principalmente en los manantiales de los Bloques 3 y 4, como se ilustra en el esquema de la fig. 10.

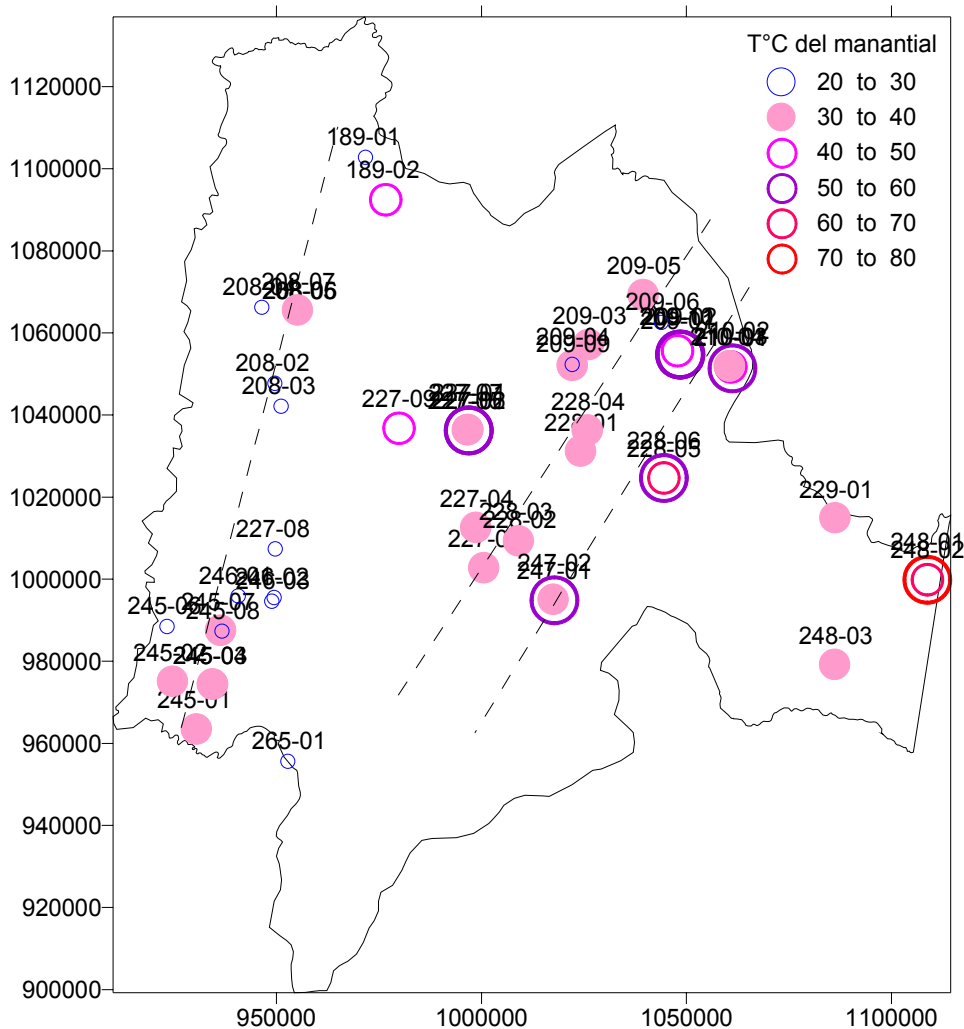


Figura 10. Temperatura de descarga en manantiales de Cundinamarca. Se registra una tendencia al incremento hacia el este del Departamento. De igual manera, se registran tendencias lineales que parecen relacionar manantiales de temperatura semejante, lo cual podría estar relacionado con emergencia a lo largo fallas y con niveles de infiltración semejantes. La temperatura máxima es de 73.7°C en un manantial de Paratebueno.

El Bloque 1, correspondiente al Valle medio – Guaduas, está conformado por doce (12) manantiales, localizados en los municipios de Yacopí, Villeta, Caparrapí, Ricaurte, Agua de Dios, Guataquí, Tocaima y Apulo, once de ellos caracterizados químicamente como se observa en la Tabla 6. La temperatura mínima de los manantiales de este grupo es de

Tabla 6. Composición química de manantiales de Cundinamarca

No. IGM	Concentración en mg/l																		
	pH Lab	Na	K	Ca	Mg	Li	Sr	Ba	Fe	B	SiO2	Al	Sb	As	Cd	Cs	Cr	Cu	Pb
BLOQUE 1																			
189-01	7.52	1470.0	2.36	191	19.8	0.57	3.69	0.064	1.16	<0.150	32.8	0.0051	<0.0025	0.0016	<0.0005	<0.050	0.0016	<0.0025	<0.0005
208-02	7.19	4.1	0.676	189	14.6	0.031	1.53	0.118	<0.101	<0.150	11.4	<0.0051	<0.0025	<0.0005	<0.0005	<0.050	<0.0002	<0.0025	<0.0005
208-04	7.13	83.9	1.61	214	95.5	0.146	4.5	0.024	0.177	0.298	26	0.011	<0.0025	<0.0005	<0.0005	<0.050	<0.0002	<0.0025	<0.0005
245-01	7.36	16.8	10.6	123	14.2	0.052	1.3	0.441	0.149	<0.150	18.9	0.0076	<0.0025	<0.0005	<0.0005	<0.050	<0.0002	<0.0025	<0.0005
245-02	7.03	39.2	6.98	86.9	28.4	0.039	1.37	1.73	0.197	0.109	20.3	0.053	<0.0025	<0.0005	<0.0005	<0.050	<0.0002	<0.0025	<0.0005
245-03	6.91	5.9	1.83	14.3	0.859	<0.010	<0.100	0.052	<0.101	<0.150	19.2	<0.0051	<0.0025	0.0006	<0.0005	<0.050	0.0004	<0.0025	0.0029
245-04	6.87	8.8	1.83	13.3	0.867	<0.010	<0.100	0.063	0.352	<0.150	18.3	0.051	<0.0025	<0.0005	<0.0005	<0.050	<0.0002	<0.0025	<0.0005
245-06	7.15	184.0	9.35	185	55.4	0.171	2.56	0.048	0.197	0.435	17.6	<0.0051	<0.0025	<0.0005	<0.0005	<0.050	<0.0002	<0.0025	<0.0005
245-07	7.05	72.1	6.07	146	25.5	0.052	1.19	1	0.217	0.147	20.7	<0.0051	<0.0025	0.0007	<0.0005	<0.050	0.0011	<0.0025	<0.0005
245-08	7.01	211.0	3.63	274	69.1	0.104	2.13	0.068	0.183	0.208	22.9	0.0096	<0.0025	0.0021	<0.0005	<0.050	0.0008	0.003	<0.0005
246-01	7.08	34.5	4.83	401	50.6	0.121	3.17	0.022	0.212	0.134	15.4	0.01	<0.0025	0.0007	<0.0005	<0.050	0.0004	<0.0025	<0.0005
BLOQUE 2																			
189-02	7.11	5510.0	8.43	410	47.1	1.49	17.8	0.209	3.07	0.336	36.4	<0.0051	0.0048	0.037	<0.0005	<0.050	<0.0002	<0.0025	<0.0005
208-03	7.03	67.3	2.74	238	37.9	0.165	5.24	0.064	<0.101	0.482	16.5	0.049	<0.0025	0.0006	<0.0005	<0.050	<0.0002	<0.0025	<0.0005
208-05		3200.0	28.00	700.00	52.00	5.10	24.00		0.20	11.00	17.14	<2							
208-06		4900.0	41.00	820.00	43.00	7.20	28.00		0.20	8.60	17.14	<2							
208-07		68.0	5.40	450.00	75.00	<0.1	4.60		1.30	0.30	17.14	<2							
227-08	7.1	143.0	4.51	301	96.3	0.203	15.3	0.037	<0.101	0.607	16.4	<0.0051	<0.0025	<0.0005	<0.0005	<0.050	<0.0002	0.003	<0.0005
246-02	7.35	40.9	4.57	235	61	0.055	0.873	0.016	1.18	<0.150	21	0.024	<0.0025	<0.0005	<0.0005	<0.050	<0.0002	<0.0025	<0.0005
246-03	7.29	28.2	2.79	232	28.2	0.039	1.98	0.029	0.36	<0.150	16	<0.0051	<0.0025	<0.0005	<0.0005	<0.050	<0.0002	<0.0025	<0.0005
BLOQUE 3																			
209-01	7.26	10.1	4.38	6.98	2.07	0.017	0.061	0.128	1.84	<0.150	24.20	0.017	<0.0001	<0.0005	<0.00004	<0.100	0.0044	<0.00007	0.0001
209-02	7.73	5.9	2.12	30.5	4.43	<0.010	0.104	0.093	0.054	<0.150	37.9	<0.010	<0.0001	<0.0005	<0.00004	<0.100	0.0024	0.0003	0.00007
209-03	7.52	14.5	1.33	14.1	3.26	0.056	0.069	0.087	0.089	<0.150	22.3	0.056	<0.0001	<0.0005	<0.00004	<0.100	0.0025	0.0008	0.00006
209-04	7.06	6.1	1.09	5.44	0.867	0.014	<0.100	0.043	0.44	<0.150	19.4	<0.0051	<0.0025	<0.0005	<0.0005	<0.050	<0.0002	<0.0025	0.0016
209-05	6.82	2.7	0.866	3.94	0.411	0.038	<0.050	0.0033	0.016	<0.150	18.4	0.038	<0.0001	<0.0005	0.0011	<0.100	0.0026	0.0022	0.00006
209-06	6.56	2.2	1.07	1.9	0.266	0.011	<0.050	0.0036	0.032	<0.150	13.3	0.011	<0.0001	<0.0005	0.0001	<0.100	0.0052	<0.00007	0.00004

Tabla 6. Continuación. Composición química de manantiales de Cundinamarca

No. IGM	Concentración en mg/l																		
	pH Lab	Na	K	Ca	Mg	Li	Sr	Ba	Fe	B	SiO2	Al	Sb	As	Cd	Cs	Cr	Cu	Pb
BLOQUE 3																			
209-10	7.4	4.5	1.64	34.6	4.42	0.016	<0.100	0.089	<0.101	<0.150	31.5	<0.0051	<0.0025	<0.0005	<0.0005	<0.050	<0.0002	<0.0025	<0.0005
209-11	7.43	6.7	2.85	33.9	3.33	0.025	0.113	0.153	<0.101	<0.150	34.2	0.0073	<0.0025	<0.0005	<0.0005	<0.050	<0.0002	<0.0025	<0.0005
210-01	7.4	365.0	7.53	97.6	5.84	0.013	4.5	0.982	0.148	0.841	44	0.013	<0.0001	<0.0005	<0.00004	<0.100	0.006	0.0036	<0.00002
210-02	7.48	203.0	6.35	51.2	4.33	0.012	2.09	0.336	1.15	0.446	49.1	0.012	<0.0001	<0.0005	<0.00004	<0.100	0.0053	0.0004	0.0001
210-03	7.87	209.0	2.76	7.23	2.05	0.084	0.208	0.084	0.113	0.459	30.1	0.084	<0.0001	<0.0005	<0.00004	<0.100	0.006	0.0003	0.0001
210-04	7.75	261.0	2.9	7.64	2.47	0.141	0.172	0.087	0.108	0.665	35.1	0.0097	<0.0025	<0.0005	<0.0005	<0.050	<0.0002	<0.0025	<0.0005
227-01	8.11	532.0	6.69	47.2	3.69	0.017	0.993	3.29	0.042	0.114	47	0.017	<0.0001	<0.0005	<0.00004	<0.100	0.0069	0.0015	0.0002
227-02	7.61	465.0	6.4	45.3	3.66	0.088	0.892	2.91	0.156	<0.150	45.3	0.088	<0.0001	<0.0005	<0.00004	<0.100	0.0072	0.0014	0.00006
227-03	7.1	19.0	1.77	10.3	1.32	0.032	<0.050	0.061	2.1	<0.150	16.5	0.032	<0.0001	0.0023	0.0003	<0.100	0.012	0.0005	0.0008
227-04	7.3	32.8	4.18	14.9	2.83	<0.010	0.107	0.43	1.49	<0.150	20.6	<0.010	<0.0001	<0.0005	<0.00004	<0.100	0.016	0.0003	0.0001
227-05	7.29	364.0	5.26	47.7	4.25	0.173	0.839	2.34	0.219	0.122	37	<0.0051	<0.0025	<0.0005	<0.0005	<0.050	<0.0002	<0.0025	<0.0005
227-06	7.25	473.0	7.36	50.5	4.51	0.214	0.925	3.07	0.149	0.145	44.6	<0.0051	<0.0025	0.0008	<0.0005	<0.050	<0.0002	<0.0025	<0.0005
227-07	7.52	493.0	6.88	47.6	4.5	0.227	0.945	3.31	<0.101	0.153	47.3	<0.0051	<0.0025	<0.0005	<0.0005	<0.050	<0.0002	<0.0025	<0.0005
227-09	7.76	44.8	3.98	31.2	3.78	0.126	0.342	0.476	<0.101	<0.150	29.4	<0.0051	<0.0025	<0.0005	<0.0005	<0.050	<0.0002	<0.0025	<0.0005
228-01	7.44	2.5	0.971	2.28	2.78	0.043	<0.050	0.019	0.102	<0.150	25.2	0.043	<0.0001	<0.0005	<0.00004	<0.100	0.0091	0.0005	0.00007
228-02	8.02	2600.0	6.49	45.7	7.99	0.0048	0.948	0.588	0.295	<0.150	26.1	0.0048	<0.0001	<0.0005	<0.00004	<0.100	0.0011	0.0002	0.0001
228-03	7.83	2340.0	5.69	44.9	9.4	0.166	0.894	2.92	0.325	<0.150	29.6	0.013	<0.0025	<0.0005	<0.0005	<0.050	<0.0002	<0.0025	0.0024
228-04	7.37	8.0	2.17	7.91	1.4	0.084	<0.050	0.062	1.77	<0.150	23	0.084	<0.0001	<0.0005	<0.00004	<0.100	0.011	0.0027	0.00002
228-05		216.0	1	13.06	1.9	0.0				0.1	45								
228-07		240.0	10	22.84	1.5	0.2				0.1	57								
247-01	7.68	79.8	7.56	73.7	17	0.059	1.72	0.165	0.239	0.224	28.3	0.059	<0.0001	<0.0005	<0.00004	<0.100	0.0074	0.0003	0.0003
247-02	7.8	67.2	6.79	48.7	6.82	0.02	1.48	0.219	0.021	0.17	36.4	0.02	<0.0001	<0.0005	<0.00004	<0.100	0.0081	0.0004	0.00004
265-01	7.44	33.4	4.03	82.6	8.09	0.081	0.502	0.322	0.25	<0.150	17.1	0.0075	<0.0025	0.0009	<0.0005	<0.050	<0.0002	<0.0025	<0.0005
BLOQUE 4																			
248-01		160.0	6.0	52	2.0	0.1	1.1		0.5	<0.2	51.4	<0.2							
248-02		184.0	5.6	38	1.8	0.1	1.3		0.3	0.3	47.1	<0.2							
248-03		18.0	6.0	29	1.3	<0.1	<0.2		3.3	<0.2	27.9	<0.2							
229-01		44.0	5.6	18.00	2.00	<0.1	<0.2		2.50	<0.2	21.43	<2							

1 = Thermochem Inc. 2 = Aguas y Gases de INGEOMINAS

Tabla 6. Continuación. Composición química de manantiales de Cundinamarca

No. IGM	Concentración en mg/l																Balance lónico	Σ especies disueltas (mg/l)	Laboratorio
	Mn	Hg	Rb	Se	Cl	F	Br	SO4	HCO3	NH4	NO3	I	Ptotal	CN	Cationes	Aniones			
BLOQUE 1																			
189-01	0.174	<0.0003	<1.00	<0.0019	2400	0.171	0.534	121	405	<2.00	5.95	1.3	<0.500	<0.050	75.30	76.87	-1.03	4655	1
208-02	0.007	<0.0003	<0.100	<0.0019	0.777	0.045	<0.100	132	491	<2.00	1.57	<1.00	<0.150	<0.050	10.87	10.82	0.22	847	1
208-04	0.008	<0.0003	<0.100	<0.0019	2.69	0.231	<0.100	688	529	<2.00	0.138	<1.00	<1.50	<0.050	22.35	23.09	-1.63	1646	1
245-01	0.021	<0.0003	<0.100	<0.0019	5.58	0.249	<0.100	50.4	447	0.987	<0.100	<1.00	<0.150	<0.050	8.41	8.55	-0.84	689	1
245-02	0.019	<0.0003	<0.100	<0.0019	15.2	0.34	<0.100	121	340	1.03	<0.100	7	<0.150	<0.050	8.68	8.54	0.78	662	1
245-03	0.0052	0.0003	<0.100	<0.0019	2.14	0.248	<0.100	7.7	52.6	<2.00	0.754	<1.00	0.331	<0.050	1.09	1.10	-0.46	105	1
245-04	0.017	0.0003	<0.100	<0.0019	3.48	0.27	<0.100	0.661	62.2	<2.00	<0.100	<1.00	0.326	<0.050	1.17	1.15	0.86	110	1
245-06	0.0031	0.0006	<0.100	0.002	21.3	0.672	0.163	447	746	2.95	<0.100	<1.00	<1.50	<0.050	22.28	22.18	0.22	1669	1
245-07	0.07	<0.0003	<0.100	0.0024	16.2	0.539	0.125	227	471	1.26	<0.100	4.7	<1.50	<0.050	12.79	12.94	-0.55	988	1
245-08	0.202	<0.0003	<0.100	0.002	45	0.998	0.246	1040	445	0.224	<0.100	2.7	<1.50	<0.050	28.70	30.28	-2.68	2114	1
246-01	0.049	<0.0003	<0.100	<0.0019	2.02	0.099	<0.100	832	517	1.17	<0.100	1.8	<1.50	<0.050	25.95	25.87	0.16	1861	1
BLOQUE 2																			
189-02	0.069	<0.0003	<0.100	0.0024	9030	0.438	1.37	332	320	9.58	<0.100	3	<15.0	<0.050	265.27	266.91	-0.31	15721	1
208-03	<0.0025	0.0003	<0.100	<0.0019	10.4	0.417	<0.100	476	508	1.37	<0.100	<1.00	<0.750	<0.050	18.21	18.56	-0.95	1363	1
208-05	<0.1				4579.00	1.69		55.00	824.2		3.60				180.34	143.91	11.23	9501	2
208-06	0.10				7313.00	1.49		<0.7	670.5		0.50				260.23	217.36	8.98	13851	2
208-07	0.40				28.40	0.26		944.00	628.6		0.80				31.83	30.79	1.66	2224	2
227-08	0.018	<0.0003	<0.100	<0.0019	8.5	0.378	<0.100	1010	570	4.01	<0.100	<1.00	<1.50	<0.050	29.88	30.65	-1.26	2165	1
246-02	0.116	<0.0003	<0.100	<0.0019	13.5	0.608	<0.100	664	314	0.236	0.436	1.1	<1.50	<0.050	18.68	19.39	-1.87	1357	1
246-03	0.018	<0.0003	<0.100	<0.0019	44.7	0.448	<0.100	335	437	<2.00	<0.100	1.4	<1.50	<0.050	15.25	15.43	-0.59	1127	1
BLOQUE 3																			
209-01	0.314	<0.0007	<0.100	<0.0019	0.609	0.12	<0.100	6.01	64.3	0.52	<0.100	<1.00	0.055	<0.050	1.10	1.20	-0.34	121	1
209-02	0.066	<0.0007	<0.100	<0.0019	1.62	0.303	<0.100	3.22	135	0.063	<0.100	<1.00	<0.050	<0.050	2.20	2.34	-3.10	221	1
209-03	0.036	<0.0007	<0.100	<0.0019	2.97	0.205	<0.100	<0.100	107	2.38	<0.100	<1.00	<0.050	<0.050	1.78	1.85	-1.91	168	1
209-04	0.033	0.0003	<0.100	<0.0019	3.48	0.183	<0.100	3.27	29.2	<2.00	<0.100	<1.00	<0.150	<0.050	0.64	0.65	-1.17	70	1
209-05	0.002	<0.0007	<0.100	<0.0019	0.251	0.265	<0.100	2.16	18.1	<0.010	0.659	<1.00	0.618	<0.050	0.37	0.36	1.61	47	1
209-06	0.0032	<0.0007	<0.100	<0.0019	0.32	0.131	<0.100	2.27	11.8	<0.010	2.7	<1.00	0.443	<0.050	0.24	0.26	-2.71	33	1

Tabla 6. Continuación. Composición química de manantiales de Cundinamarca

No. IGM	Concentración en mg/l																Balance Iónico	Σ especies disueltas (mg/l)	Laboratorio
	Mn	Hg	Rb	Se	Cl	F	Br	SO4	HCO3	NH4	NO3	I	Ptotal	CN	Cationes	Aniones			
BLOQUE 3																			
209-10	0.072	<0.0003	<0.100	<0.0019	1.12	0.219	<0.100	3.16	131	0.267	<0.100	<1.00	<0.150	<0.050	2.34	2.26	1.92	212	1
209-11	0.059	<0.0003	<0.100	<0.0019	2.91	0.306	<0.100	2.53	133	0.236	<0.100	<1.00	<0.150	<0.050	2.35	2.33	0.41	220	1
210-01	0.1	<0.0007	<0.100	<0.0019	597	0.536	0.333	0.259	337	2.38	0.281	<1.00	0.3	<0.050	21.66	22.40	-1.67	1460	1
210-02	0.066	<0.0007	<0.100	<0.0019	256	0.455	0.171	0.242	340	2.46	<0.100	<1.00	<0.100	<0.050	12.09	12.82	-2.94	914	1
210-03	0.026	<0.0007	<0.100	<0.0019	96.9	0.989	<0.100	<0.100	450	0.046	0.656	<1.00	<0.050	<0.050	9.71	10.16	-2.29	799	1
210-04	0.016	<0.0003	<0.100	<0.0019	134	1.23	0.103	<0.100	523	<2.00	<0.100	<1.00	<0.150	<0.050	12.03	12.42	-1.58	968	1
227-01	0.07	<0.0007	<0.100	<0.0019	793	0.546	0.12	1.74	225	1.74	<0.100	<1.00	<0.250	<0.050	26.13	26.12	0.01	1661	1
227-02	0.089	<0.0007	<0.100	<0.0019	698	0.51	<0.100	5.34	195	0.094	<0.100	<1.00	<0.250	<0.050	23.02	23.02	0.00	1468	1
227-03	0.05	<0.0007	<0.100	<0.0019	15.1	0.356	<0.100	7.16	61.2	0.034	0.73	<1.00	0.305	<0.050	1.50	1.60	-3.09	135	1
227-04	0.047	<0.0007	<0.100	<0.0019	8.82	0.339	<0.100	<0.100	143	0.103	7.42	<1.00	0.083	<0.050	2.52	2.61	-1.70	229	1
227-05	0.077	<0.0003	<0.100	<0.0019	554	0.334	<0.100	18.1	161	0.233	3.56	1	<0.150	<0.050	18.78	18.66	0.32	1195	1
227-06	0.075	0.0003	<0.100	<0.0019	726	0.438	0.103	2	197	0.236	5.39	1.2	<0.150	<0.050	23.75	23.77	-0.04	1510	1
227-07	0.067	<0.0003	<0.100	<0.0019	771	0.521	0.12	1.33	213	1.35	<0.100	<1.00	<0.150	<0.050	24.53	25.30	-1.53	1589	1
227-09	0.004	<0.0003	<0.100	<0.0019	27.9	0.424	<0.100	0.164	192	0.643	<0.100	<1.00	<0.150	<0.050	3.99	3.96	0.33	334	1
228-01	0.209	<0.0007	<0.100	<0.0019	0.329	0.183	<0.100	3.86	28	0.434	0.48	<1.00	0.075	<0.050	0.51	0.56	-4.68	66	1
228-02	0.0038	<0.0007	<0.100	<0.0019	3930	0.859	<5.00	8.91	284	<0.010	<5.00	<1.00	<1.00	<0.050	116.18	115.75	0.19	6912	1
228-03	0.028	<0.0003	<0.100	<0.0019	3700	0.941	<0.100	9.09	277	<2.00	3.12	2.9	<7.50	<0.050	104.99	109.15	-1.95	6421	1
228-04	0.093	<0.0007	<0.100	<0.0019	7.78	0.274	<0.100	2.76	41.8	0.262	0.668	<1.00	0.102	<0.050	0.94	0.98	-1.98	97	1
228-05					129			0	502.5						10.22	11.88	-7.47	928	2
228-06					195			0	472.5						11.98	13.25	-5.01	1019	2
247-01	0.101	<0.0007	<0.100	<0.0019	61.1	0.638	<0.100	51.2	395	0.291	<0.100	<1.00	<0.050	<0.050	8.81	9.30	-2.72	716	1
247-02	0.105	<0.0007	<0.100	<0.0019	44.5	0.573	<0.100	2.84	326	3.76	<0.100	<1.00	<0.050	<0.050	6.34	6.69	-2.71	542	1
265-01	0.113	<0.0003	<0.100	<0.0019	2.57	0.084	<0.100	43.1	334	<2.00	<0.100	<1.00	<0.150	<0.050	6.37	6.45	-0.62	526	1
BLOQUE 4																			
248-01	0.2				244	0.47		0.8	72.6		<0.5				9.91	8.11	9.96	591	2
248-02	0.2				298	0.54		1.0	89.7		<0.5				10.23	9.93	1.52	668	2
248-03	0.2				2	0.19		8.3	44.7		<0.5				2.49	0.97	43.85	141	2
229-01	<0.1				63.30	0.52		<0.7	53.10		<0.5				3.12	2.68	7.51	210	2

1 = Thermochem Inc. 2 = Aguas y Gases de INGEOMINAS

20.8°C y la máxima, de 36.2°C, registrada en los manantiales de Los Chorros del municipio de Agua de Dios.

El Bloque 2, del Anticlinorio de Villeta, con 11 manantiales localizados en los municipios de Yacopí, Villeta, Útica, La Mesa, Anapoima, Guayabal de Síquima, Bituima y Nimaima, 8 de los cuales fueron analizados, presenta temperaturas mínima de 21.5°C y máxima de 46.8°C, registrada en uno de los manantiales de Yacopí, aunque el promedio es del mismo orden de los manantiales del Bloque 1 (29°C).

El Bloque 3, Sabana de Bogotá – Anticlinorio de los Farallones, que es el más numeroso con 30 manantiales (29 de ellos caracterizados químicamente), en los municipios de Chocontá, Nemocón, Suesca, Tibirita, Manta, Tabio, Bogotá, San Francisco, Guasca, La Calera, Gachetá, Choachí y Pandi, tiene una temperatura mínima de 22.2°C, máxima de 66.9°C, registrada en uno de los manantiales de Gachetá. Su temperatura promedio alcanza 40.6°C.

Finalmente el Bloque 4 correspondiente al Pie de Monte, está conformado por 4 manantiales, su temperatura promedio es de 53.4°C y la máxima de 73.7°C, registrada en uno de los manantiales de Paratebuena. Uno de los manantiales de este Bloque, pertenece al municipio de Santamaría del Batá, localizado entre los departamentos de Cundinamarca y Boyacá y fue incluido dadas su similitud con los de Paratebuena, en algunos rasgos geoquímicos que serán señalados más adelante.

Como se observó en la fig. 10, algunos de los manantiales están localizados a lo largo de tendencias lineales que podrían relacionar manantiales de temperatura semejante. Es el caso de los manantiales de los Bloques 1 y 2 con temperaturas inferiores a 40°C y del Bloque 3 con temperaturas en el rango de 30 a 40°C y entre 50 y 60°C. La temperatura en el subsuelo, presenta una tendencia similar, como se mostrará para el geotermómetro de cuarzo, proporcional al contenido de sílice disuelta.

Los resultados de los análisis químicos, cuya óptima calidad analítica es inferida de los balances iónicos y de la información del Anexo 2, son presentados en la Tabla 6. La totalidad de los manantiales registran un pH en el rango de neutralidad (6-8) y muestran una gran variabilidad en el contenido sólidos totales disueltos, reflejado en la sumatoria de especies disueltas, entre 33 y 15721 mg/l. Como se observa en la Fig. 11, la temperatura no muestra una variación proporcional al contenido de sólidos totales disueltos, lo cual es contrario al comportamiento de manantiales provenientes de un reservorio geotérmico, en donde estos sólidos obtienen su mayor concentración. Además de la diferencia en composición de los probables acuíferos que alimentan estos manantiales, aún cuando provienen de ambientes geológicos semejantes, los fluidos descargados seguramente sufren también procesos diferentes. Cerca de la mitad de los manantiales (29), entre ellos tibios y calientes, incluidos los de máxima temperatura (248-01 y 248-02 de Paratebuena) son dulces, con una concentración de sólidos totales disueltos inferior a 1 g/l. En el otro extremo, se ubican algunos manantiales no termales de alta salinidad, como se indica en la clasificación por temperatura presentada en la Tabla 7. En estos se infiere la contribución de fuentes salinas diferentes al fluido geotérmico, que seguramente corresponde a depósitos de cloruro de sodio, como indica su composición clorurada sódica. Este es el caso de los

manantiales localizados en Yacopí (189-01 y 02), Útica (208-05 y 06) y La Calera (228-02 y 03).

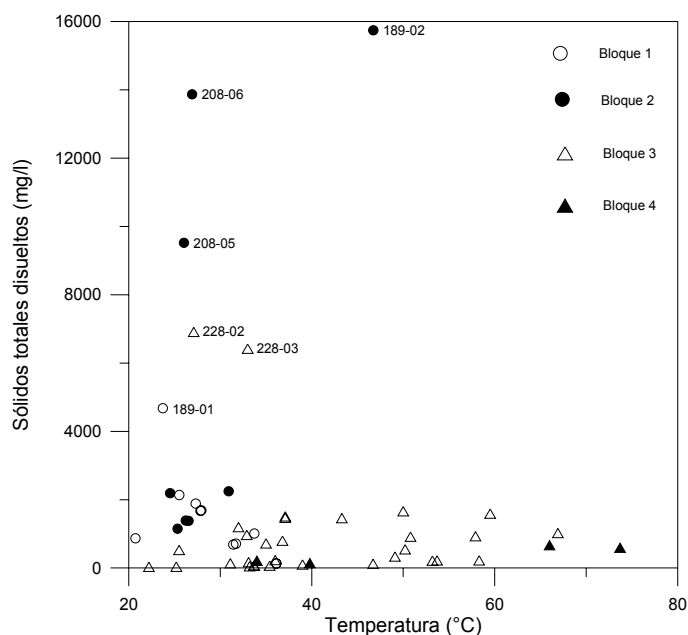


Figura 11. Variación de la concentración de sólidos totales disueltos en función de la temperatura. Los manantiales 189-01 y 189-02 de Yacopí, 208-05 y 208-06 de Útica y 228-03 y 228-03 de La Calera, registran los máximos contenidos de sólidos disueltos que en uno de los manantiales de Yacopí, alcanzan 15700 mg/l. La fuente de sal clorurada sódica, no es termal como se concluye de la temperatura observada para estos manantiales.

La distribución de las especies químicas mayores, presentada en el Anexo 7, permite definir concentraciones máximas de sodio y cloruro en los manantiales de Yacopí, Útica, y La Calera, que como se dijo antes se atribuye a la contribución de una fuente de sal no termal. Las concentraciones máximas de calcio, magnesio, sulfato y bicarbonato, se observan en manantiales de los Bloques 1 y 2, indicando su origen somero. Las concentraciones máximas de potasio, litio y fluoruro parecen estar asociadas a la fuente salina que alimenta los manantiales salinos de Útica. Finalmente, el estroncio alcanza sus niveles máximos en los manantiales de Yacopí, Útica y La Mesa. En éste último, la concentración de estroncio (15.3 mg/l) no está relacionada con un elevado contenido de sólidos totales disueltos el cual es equivalente a 2165 mg/l.

3.3.1. Clasificación de los manantiales

A partir de los análisis químicos presentados en la Tabla 6, se realizó la clasificación de los manantiales de acuerdo con su temperatura, su composición relativa de aniones y de cationes dominantes, presentada en la Tabla 7. La fig. 12 ilustra la clasificación a partir de la composición relativa de aniones para todos los manantiales del Departamento, en la que se observa un predominio de aguas bicarbonatadas y sulfatadas en el Valle Medio – Guaduas y Anticlinorio de Villeta (Bloques 1 y 2), ausencia de aguas sulfatadas y un

incremento en el carácter clorurado de las aguas y como se ha dicho, de su temperatura, en la Sabana de Bogotá – Anticlinorio de Los Farallones (Bloque 3) y dominio de las aguas cloruradas en el Pie de Monte (Bloque 4). A continuación se explica en detalle esta clasificación.

Tabla 7. Clasificación de los manantiales de Cundinamarca en función de su temperatura, y especies iónicas dominantes.

No. IGM	T°C del manantial	T° Ambiente promedio	CLASIFICACIÓN POR TEMPERATURA	%Cl	%SO ₄	%HCO ₃	CLASIFICACIÓN POR ANIONES	%Na+K	Na/K	%Ca	%Mg	CLASIFICACIÓN POR CATIONES
BLOQUE 1												
189-01	23.8	20	No termal	82.02	4.14	13.84	Clorurada	85.10	0.02	12.70	2.19	Sódica/potásica
208-02	20.8	24	No termal	0.12	21.16	78.71	Bicarbonatadas	1.82	0.01	86.98	11.20	Cálcica
208-04	27.9	21	Tibia	0.22	56.41	43.37	Sulfatada	16.51	0.01	47.88	35.61	Cálcica-magnésica
245-01	31.8	27	Tibia	1.11	10.02	88.87	Bicarbonatadas	12.02	0.15	73.78	14.20	Cálcica
245-02	31.5	27	Tibia	3.19	25.41	71.40	Bicarbonatadas	21.91	0.14	50.55	27.54	Cálcica
245-03	36.2	26	Tibia	3.43	12.33	84.24	Bicarbonatadas	27.69	0.22	65.73	6.58	Cálcica
245-04	36.2	26	Tibia	5.25	1.00	93.76	Bicarbonatadas	36.84	0.23	56.97	6.19	Cálcica
245-06	28.0	27	No termal	1.75	36.81	61.43	Bicarbonatadas	37.27	0.09	41.84	20.88	Cálcica-Sódica/potásica
245-07	33.8	26	Tibia	2.27	31.78	65.95	Bicarbonatadas	25.88	0.07	57.41	16.71	Cálcica
245-08	25.6	26	No termal	2.94	67.97	29.08	Sulfatada	32.26	0.02	47.69	20.05	Cálcica
246-01	27.4	26	No termal	0.15	61.58	38.27	Sulfatada	6.27	0.02	77.44	16.29	Cálcica
BLOQUE 2												
189-02	46.8	20	Tibia	93.27	3.43	3.31	Clorurada	90.76	0.03	7.76	1.49	Sódica/potásica
208-03	26.3	24	No termal	1.05	47.87	51.09	Bicarbonatadas	16.60	0.02	65.91	17.49	Cálcica
208-05	26.1	26	No termal	83.89	1.01	15.10	Clorurada	78.05	0.07	19.53	2.42	Sódica/potásica
208-06	27.0	26	No termal	91.60	0.00	8.40	Clorurada	82.76	0.08	15.85	1.39	Sódica/potásica
208-07	31.0	26	Tibia	1.77	58.96	39.26	Sulfatada	9.72	0.02	70.65	19.63	Cálcica
227-08	24.6	22	No termal	0.54	63.58	35.88	Sulfatada	21.54	0.03	51.18	27.29	Cálcica
227-10	32.4	19	Tibia									
227-11	21.5	20	No termal									
246-02	26.6	25	No termal	1.36	66.97	31.67	Sulfatada	10.12	0.03	62.74	27.14	Cálcica
246-03	25.4	25	No termal	5.47	41.02	53.51	Bicarbonatadas	8.51	0.02	76.08	15.41	Cálcica
BLOQUE 3												
209-01	46.7	13	Tibia	0.86	8.47	90.67	Bicarbonatadas	51.40	1.06	32.53	16.08	Sódica/potásica
209-02	53.7	13	Caliente	1.16	2.30	96.54	Bicarbonatadas	14.10	0.12	69.16	16.74	Cálcica
209-03	33.1	14	Tibia	2.70	0.00	97.30	Bicarbonatadas	40.49	0.16	42.96	16.55	Cálcica-Sódica/potásica
209-04	33.7	14	Tibia	9.68	9.10	81.22	Bicarbonatadas	46.07	0.34	42.61	11.32	Sódica/potásica-cálcica
209-05	33.2	14	Tibia	1.22	10.53	88.25	Bicarbonatadas	37.50	0.37	53.25	9.26	Cálcica
209-06	22.2	13	Tibia	2.22	15.77	82.00	Bicarbonatadas	51.58	0.95	39.26	9.16	Sódica/potásica
209-09	25.2	14	Tibia									
209-10	53.2	13	Caliente	0.83	2.34	96.84	Bicarbonatadas	10.11	0.08	74.11	15.78	Cálcica
209-11	58.3	13	Caliente	2.10	1.83	96.07	Bicarbonatadas	15.56	0.14	72.56	11.88	Cálcica
210-01	43.3	18	Tibia	63.90	0.03	36.07	Clorurada	74.96	0.13	22.77	2.27	Sódica/potásica
210-02	50.8	18	Caliente	42.94	0.04	57.02	Bicarbonatadas	75.48	0.21	21.50	3.03	Sódica/potásica
210-03	36.8	18	Tibia	17.72	0.00	82.28	Bicarbonatadas	94.51	0.65	3.73	1.76	Sódica/potásica
210-04	32.9	18	Tibia	20.40	0.00	79.60	Bicarbonatadas	95.11	0.64	3.18	1.71	Sódica/potásica
227-01	50.0	14	Caliente	77.76	0.17	22.06	Clorurada	89.73	0.24	9.09	1.18	Sódica/potásica
227-02	37.1	14	Tibia	77.70	0.59	21.71	Clorurada	88.80	0.24	9.87	1.33	Sódica/potásica
227-03	31.1	14	Tibia	18.09	8.58	73.33	Bicarbonatadas	58.24	0.29	34.41	7.35	Sódica/potásica
227-04	36.0	14	Tibia	5.81	0.00	94.19	Bicarbonatadas	60.99	0.48	29.63	9.38	Sódica/potásica
227-05	32.0	14	Tibia	75.57	2.47	21.96	Clorurada	85.35	0.19	12.75	1.89	Sódica/potásica
227-06	37.1	14	Tibia	78.49	0.22	21.30	Clorurada	87.74	0.25	10.67	1.59	Sódica/potásica
227-07	59.5	14	Caliente	78.25	0.13	21.62	Clorurada	88.69	0.25	9.77	1.54	Sódica/potásica
227-09	49.1	20	Tibia	12.68	0.07	87.25	Bicarbonatadas	52.23	0.22	39.75	8.03	Sódica/potásica
228-01	35.4	13	Tibia	1.02	11.99	86.99	Bicarbonatadas	28.14	0.72	23.70	48.16	Magnésica
228-02	27.1	13	Tibia	93.06	0.21	6.73	Clorurada	97.46	0.24	1.97	0.57	Sódica/potásica
228-03	33.0	13	Tibia	92.82	0.23	6.95	Clorurada	97.11	0.21	2.14	0.75	Sódica/potásica
228-04	39.0	14	Tibia	14.86	5.27	79.86	Bicarbonatadas	43.93	0.47	43.30	12.77	Sódica/potásica-Cálcica
228-05	66.9	19	Caliente	20.43	0.00	79.57	Bicarbonatadas	92.07	0.13	6.38	1.55	Sódica/potásica
228-07	57.9	19	Caliente	29.21	0.00	70.79	Bicarbonatadas	89.40	0.74	9.55	1.05	Sódica/potásica
247-01	35.0	18	Tibia	12.04	10.09	77.86	Bicarbonatadas	41.80	0.17	42.04	16.16	Cálcica-Sódica/potásica
247-02	50.2	18	Caliente	11.92	0.76	87.32	Bicarbonatadas	50.76	0.24	39.92	9.32	Sódica/potásica
265-01	25.5	23	No termal	0.68	11.35	87.97	Bicarbonatadas	24.46	0.08	64.94	10.60	Cálcica
BLOQUE 4												
248-01	73.7	27	Caliente	76.87	0.25	22.87	Clorurada	71.99	0.20	26.32	1.69	Sódica/potásica
248-02	66.0	27	Caliente	76.67	0.26	23.08	Clorurada	79.89	0.25	18.64	1.47	Sódica/potásica
248-03*	39.8	27	Tibia									
229-01	34.0	19	Tibia	54.38	0.00	45.62	Clorurada	65.85	0.53	28.82	5.34	Sódica/potásica

* El porcentaje de error analítico no permite hacer las clasificaciones correspondientes

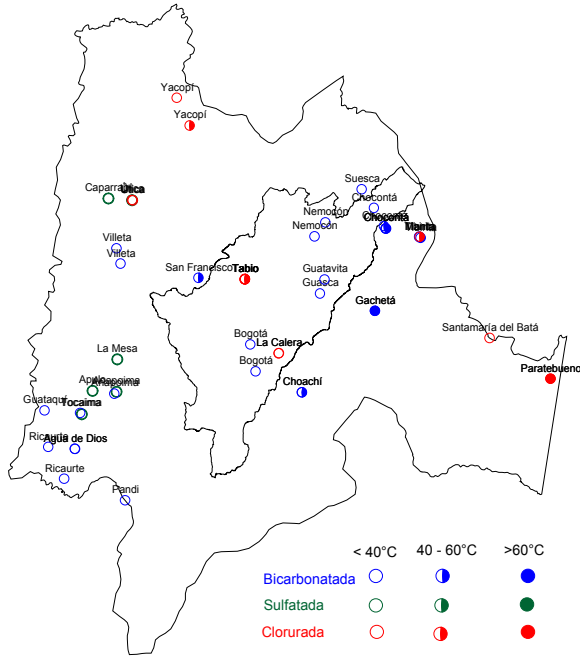


Figura 12. Clasificación de los manantiales de Cundinamarca con base en la composición relativa de aniones dominantes. En los Bloques 1 y 2, predominan aguas bicarbonatadas y sulfatadas mientras que en los Bloques 3 y 4, se incrementa el carácter clorurado al igual que la temperatura. El polígono trazado en el interior del croquis del departamento, corresponde a la Sabana de Bogotá, área en la que se localizan la mayoría de los manantiales del Bloque 3, a excepción de los de Pandi, San Francisco, Suesca, Coachí, Gachetá, Chocontá y Titirita.

En el Bloque 1, la clasificación por aniones ilustrada en la fig. 13, señala el carácter bicarbonatado y sulfatado de estos manantiales, los cuales como se observa en la Tabla 7, son además cálcicos. Comparando estos rasgos de composición con la temperatura, estos manantiales son de circulación somera y bajo tiempo de residencia. Opuesto a los demás manantiales del Bloque, el manantial 189-01 de Yacopí, es clorurado sódico. Sin embargo como se dijo arriba, se trata de un manantial no termal, al parecer alimentado por una fuente rica en cloruro de sodio.

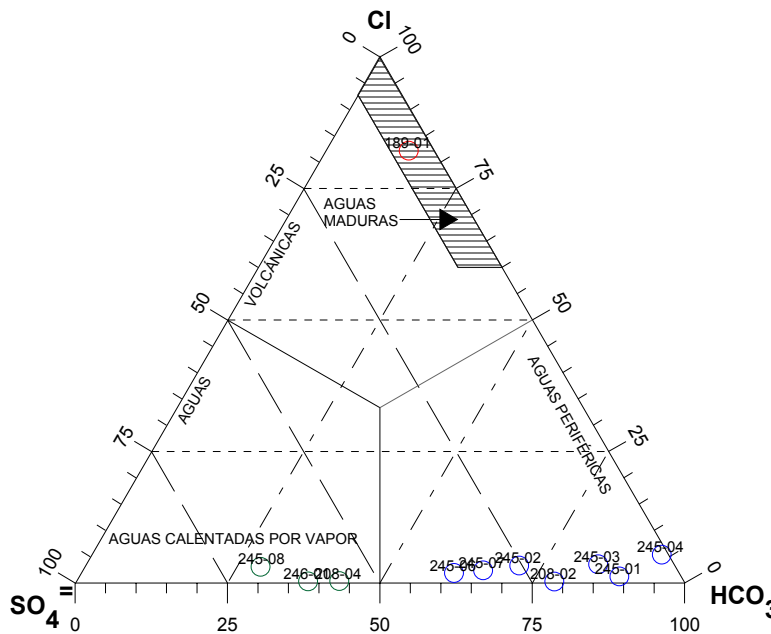


Figura 13. Composición relativa Cl- HCO₃-SO₄ para manantiales del Bloque 1. La mayoría de los manantiales de este Bloque son bicarbonatados. Los tres manantiales sulfatados que se registran son no termales y por tanto su origen no parece estar asociado a calentamiento por vapor. El manantial no termal 189-01 es clorurado probablemente por la contribución de una fuente salina fría.

La clasificación de los manantiales del Bloque 2, presentada en la fig. 14, es muy semejante a la del Bloque anterior. Estas aguas son bicarbonatadas y sulfatadas (cálcicas principalmente). En este Bloque se registran tres manantiales clorurados sódicos, cuya salinidad probablemente también es derivada de una fuente diferente al fluido geotérmico. Dos de ellos (208-05 y 208-06, localizados en Útica) son no termales. El tercero ubicado en Yacopí (189-02), registra la máxima salinidad de todos los manantiales caracterizados en Cundinamarca (15721 mg/l), pero descarga agua tibia (46.8°C), denotando la contribución de la fuente termal.

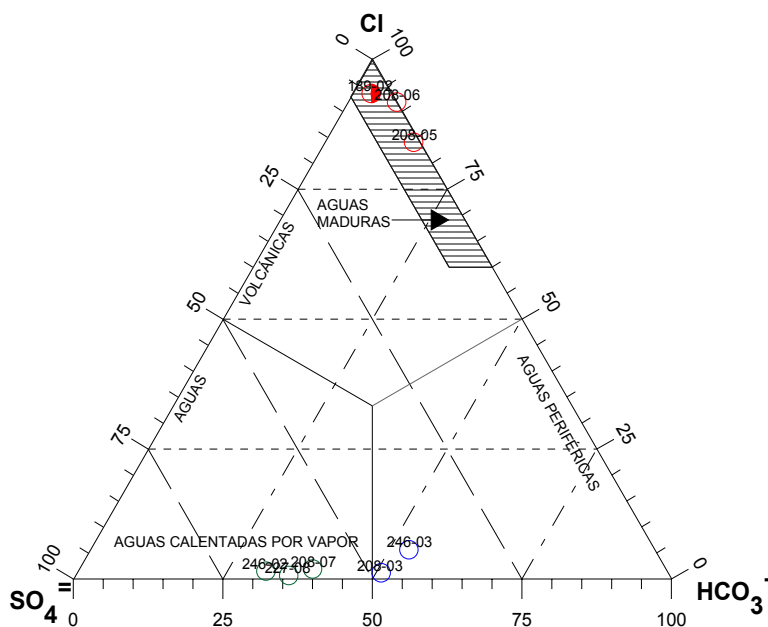


Figura 14. Composición relativa Cl-HCO₃-SO₄ para manantiales del Bloque 2. Para los manantiales clorurados 189-02 de Yacopí y 208-05 y 206-06 de Útica, se infirió la contribución de una fuente clorurada sódica no termal (Fig.11). El manantial 189-02, aunque recibe el máximo aporte de dicha fuente salina también recibe una contribución significativa de fluido geotérmico, que eleva la temperatura del manantial a 46.8°C.

Los manantiales del Bloque 3, son bicarbonatados y clorurados, como se ilustra en la fig. 15. Con excepción del manantial de Pandi (265-01), los manantiales de este Bloque son termales y la gran mayoría son de agua dulce; es decir, con un contenido salino inferior a 1g/l. Solamente en los termales de La Calera (228-02 y 228-03), se hace evidente la contribución de una fuente de cloruro de sodio no termal, con un contenido de sólidos totales disueltos de 6912 y 6421 mg/l, respectivamente. El contenido de sólidos totales disueltos en los demás manantiales clorurados de este Bloque (Titirita, Manta, Tabio y Choachí), no supera 1600 mg/l. A pesar de su carácter clorurado, estos manantiales no son los más calientes del Bloque; lo son dos manantiales bicarbonatados, con contenido de sólidos totales cercano a 1000 mg/l, ubicados en Gachetá, los cuales alcanzan temperatura de 67 y 58°C.

La fig. 16, ilustra la composición relativa de aniones para el Bloque 4. Se excluye el manantial tibio de Paratebueno 248-03, cuyo balance iónico no es satisfactorio. Dos de los manantiales restantes, con las máximas temperaturas registradas en todo el Departamento con 66 y 73.7°C, con una concentración de sólidos totales disueltos de solamente unos 600 mg/l y contribución de cloruros del orden de 80%, son los de mayor probabilidad de

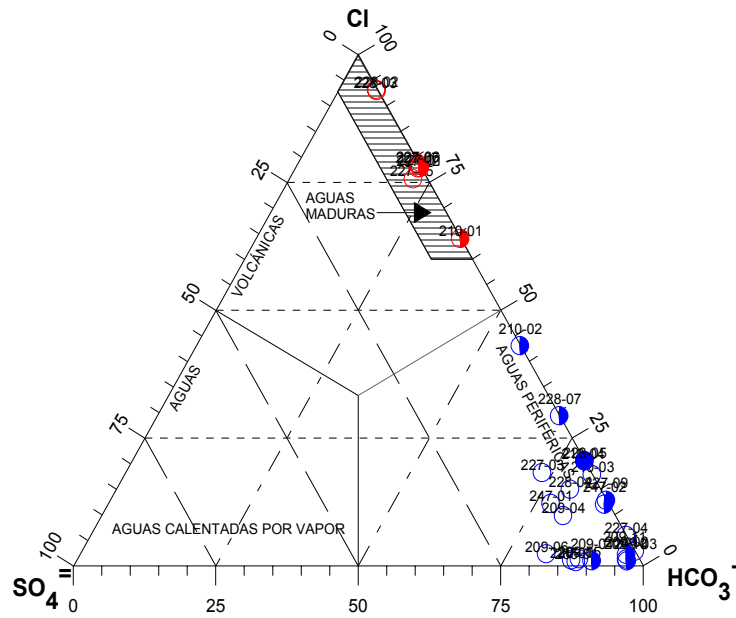


Figura 15. Composición relativa Cl - HCO₃ - SO₄ para manantiales del Bloque 3. Las aguas de los manantiales de este Bloque se distribuyen entre bicarbonatadas y cloruradas. La composición de los manantiales de La Calera (228-02 y 03) como para otros de los Bloques 1 y 2 de Yacopí y Útica, está dominada por la contribución de una fuente salina de baja temperatura, aunque son tibios. Los manantiales clorurados restantes 210-01 de Tibirita y 227-01, 227-02, 227-05, 227-06 y 227-07 de Tabio, probablemente se originan en un reservorio geotérmico o por infiltración más profunda del agua meteórica. Su concentración de sólidos totales disueltos, inferior a 1700 mg/l, no evidencia la contribución de una fuente salina fría. Los manantiales bicarbonatados en este Bloque, incrementan su temperatura por encima de 40°C alcanzando un máximo de 67°C en Gachetá (228-05).

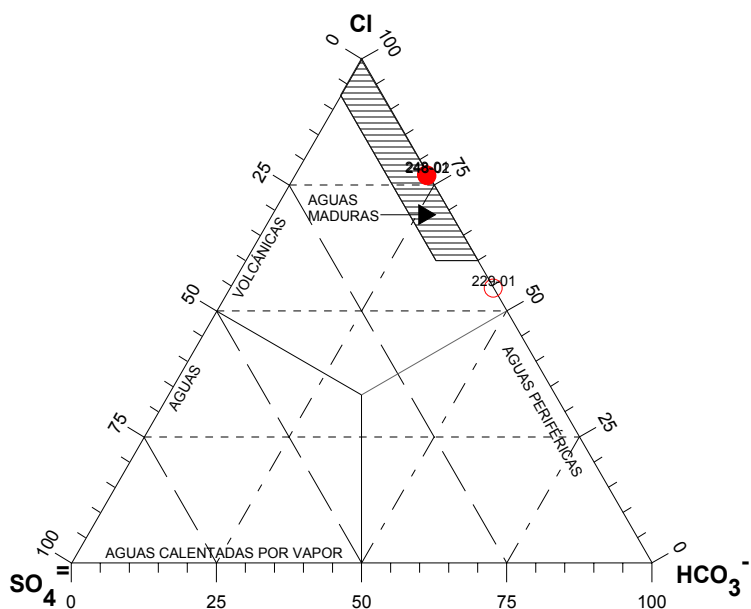


Figura 16. Composición relativa Cl-HCO₃-SO₄ para manantiales del Bloque 4. Los manantiales de este Bloque son clorurados, de baja salinidad y podrían originarse a partir de un reservorio geotérmico o por infiltración profunda de agua meteórica, como los manantiales clorurados termales del Bloque anterior. No se incluye el manantial 248-03 por baja confiabilidad en sus resultados analíticos.

contribución de fluido geotérmico profundo y contenido energético. En el manantial de Santamaría de Bata, 229-01, se infiere una dilución mayor a la que sufren los de Paratebuena, a partir de su temperatura (34°C), de su baja salinidad (210mg/l de sólidos totales disueltos), y de la disminución del carácter clorurado, a un 54%, por mezcla con aguas bicarbonatadas.

3.3.2. Composición relativa Na-K-Mg

La composición relativa Na-K-Mg, usada como indicador de procesos de dilución y como geotermómetro, a partir de equilibrios entre minerales feldespáticos (albita, adularia y clorita), presentes en rocas ígneas, tiene una aplicación limitada para este grupo de datos, a la inferencia de procesos de dilución por aumento en la composición de magnesio, como indicador de aguas someras.

Las figs. 17 a 19 y 22, presentan el diagrama triangular $\text{Na}/1000\text{-K}/100\text{-Mg}^{1/2}$, para los cuatro Bloques. Los manantiales en los cuales se identificó la probable contribución de una fuente salina clorurada sódica (189-01 y 189-02 en Yacopí, 208-05 y 208-06 en Útica y 228-02 y 228-03 en La Calera), a partir de su contenido de sólidos totales disueltos, su carácter clorurado y a excepción de 189-02, su baja temperatura, muestran una concentración de sodio muy alta en su mayoría por encima de la línea de equilibrio lo que es consistente con una composición no controlada por equilibrio entre los minerales albita, adularia y clorita, involucrados en este diagrama e impide observar el origen somero a partir del contenido de magnesio, que muy seguramente se observaría en estos manantiales, si no tuvieran la interferencia de dicha fuente.

La composición relativa Na-K-Mg, para los manantiales de los Bloques 1 y 2, es presentada en las figs. 17 y 18. La contribución dominante de agua somera se hace evidente en la mayoría de estos manantiales por su alta concentración relativa de magnesio.

En el Bloque 3, 18 de los 30 manantiales exhiben una gran influencia de aguas someras indica por la predominancia del magnesio, como se observa en la fig. 19. Los manantiales de Tibirita, Manta, Tabio y Gachetá, los cuales como se dijo arriba, parecen tener un origen geotérmico inferido de su temperatura y de su carácter clorurado probablemente no afectado por la contribución de una fuente salina externa, señalan una influencia menor de las aguas someras con una composición relativa mayor en sodio que los ubica en el diagrama cerca de la zona de equilibrio parcial. Los manantiales de Tabio, que por su proximidad, pueden asociarse a un mismo sistema, señalan un proceso de dilución en el cual, el manantial principal del Balneario El Zipa (227-01) sería el miembro más representativo del fluido profundo.

El proceso de dilución postulado a partir de la composición relativa Na-K-Mg para los manantiales de Tabio es consistente con la variación lineal del contenido de sodio y cloruro, presentada en la fig. 20 y del contenido de sílice (proporcional a la temperatura del subsuelo) con los sólidos totales disueltos, presentada en la fig. 21.

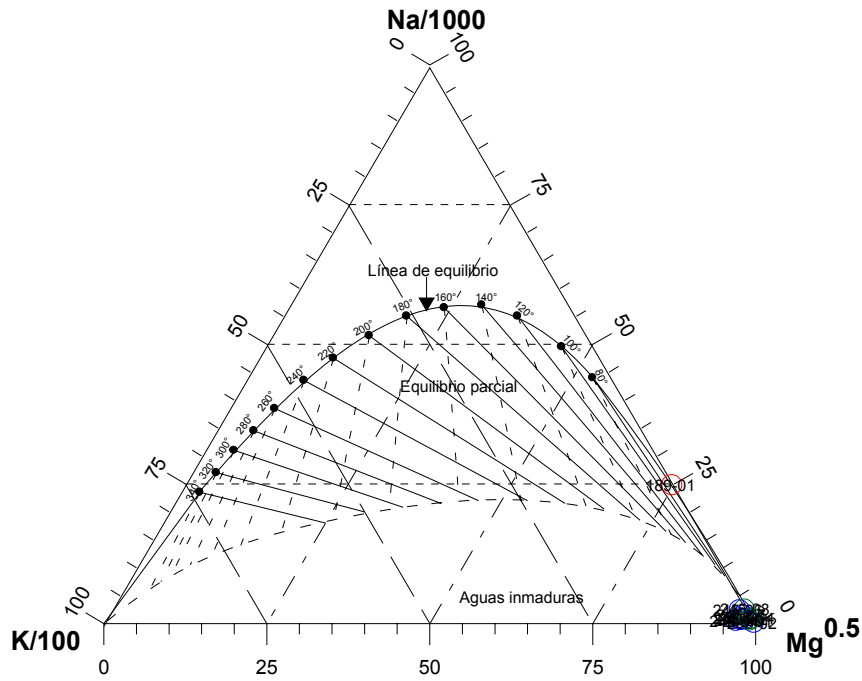


Figura 17. Composición relativa Na-K-Mg para manantiales del Bloque 1. La abundancia relativa dominante del magnesio revela el origen somero de estos manantiales sulfatados y bicarbonatados con temperatura inferior a 40°C. El manantial 189-01 registra una mayor concentración de sodio, consistente con el aporte que percibe de la fuente clorurada sódica fría.

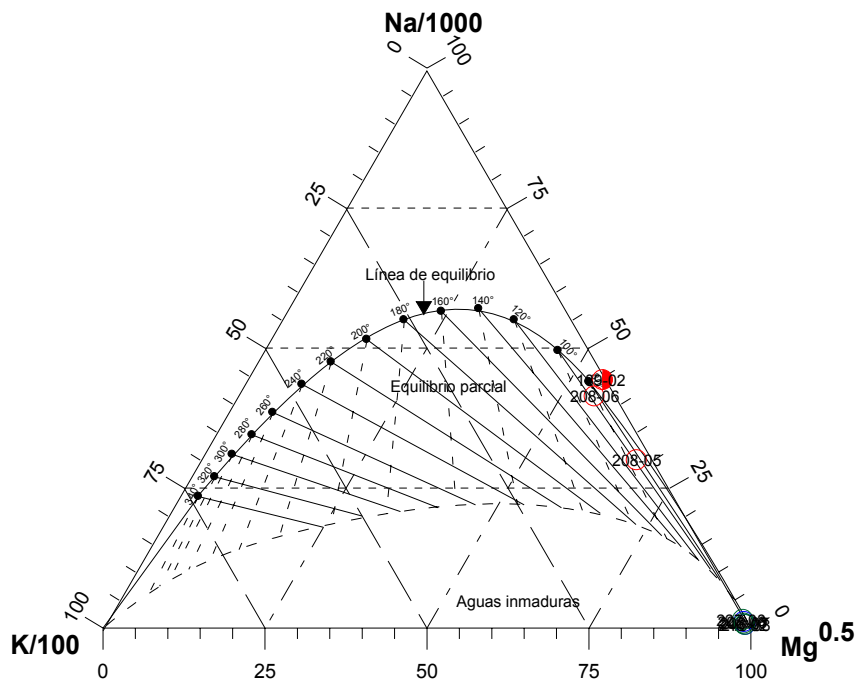


Figura 18. Composición relativa Na-K-Mg para manantiales del Bloque 2. El efecto de la contribución de la fuente clorurada sódica fría, se ve reflejada en el contenido relativo de sodio de los manantiales 189-02 de Yacopí y 208-05 y 208-06 de Útica. En los manantiales restantes se visualiza un origen somero de acuerdo con su alto contenido relativo de Mg.

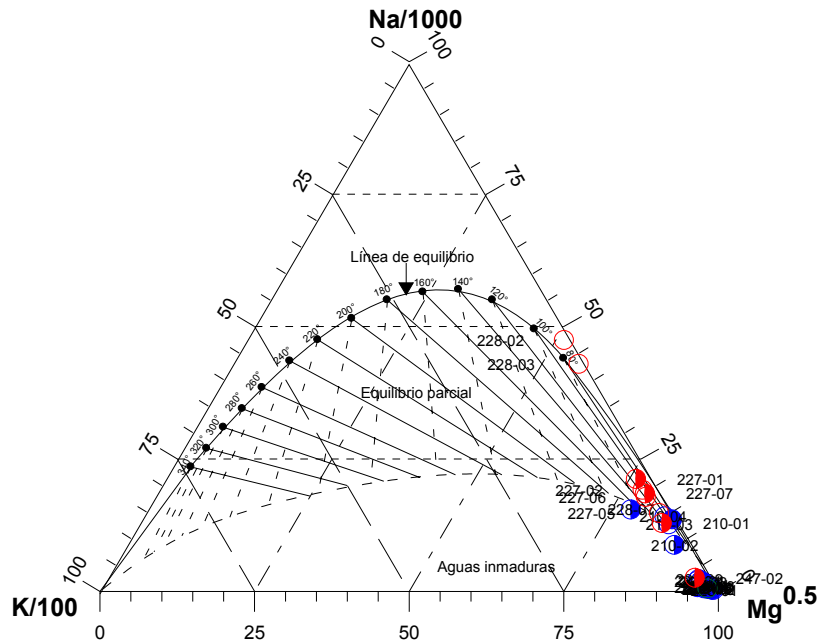


Figura 19. Composición relativa Na-K-Mg para manantiales del Bloque 3. Como en los Bloques anteriores la mayoría de los manantiales reflejan una contribución dominante de agua somera, a partir de la concentración relativa de magnesio. Los menos afectados por dicho tipo de agua, son los manantiales de Tibirita (210-01 y 210-02), Manta (210-04 y 210-05), Tabio (227-01, 227-02, 227-05, 227-06, 227-07) y Gachetá (228-07), lo cual se refleja en una mayor composición relativa de sodio. En los manantiales de Tabio se observa una tendencia lineal que podría corresponder a un proceso de dilución originado a partir del manantial 227-01. Los manantiales de la Calera (228-02 y 228-03), muestran una concentración alta de sodio asociada con una fuente clorurada sódica no termal.

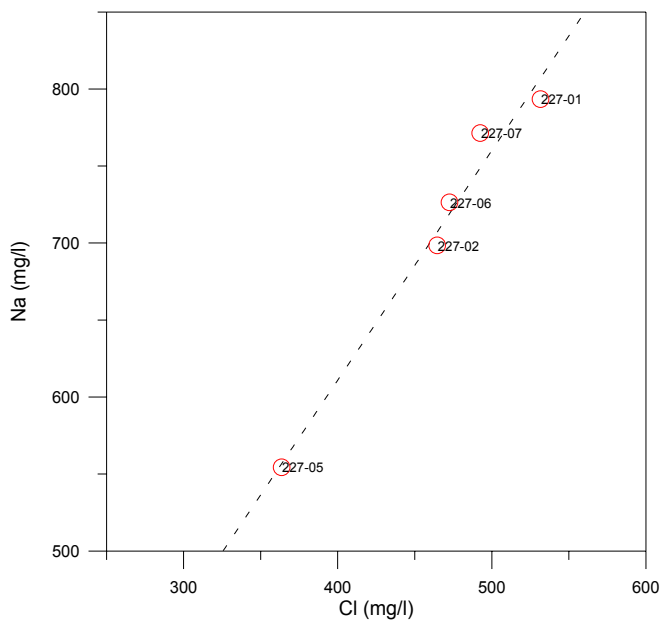


Figura 20. Variación de la concentración de sodio frente a la concentración de cloruro, para manantiales de Tabio. Se identifica una tendencia de mezcla o dilución, que relaciona a todos los manantiales muestreados. El manantial 227-05, recibe la mayor contribución de agua subterránea de baja temperatura lo cual conlleva a la mayor dilución y disminución de la temperatura (32°C).

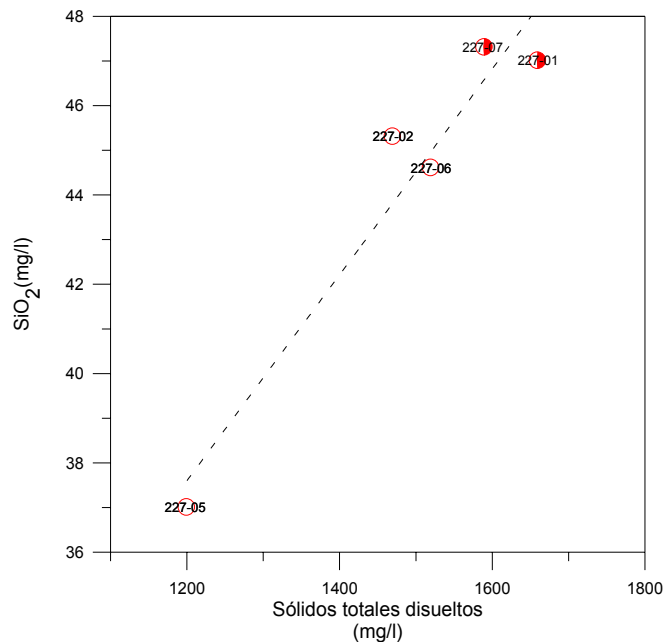


Figura 21. Variación del contenido de sólidos totales disueltos, en función de la concentración de SiO₂ (proporcional a la temperatura mínima del probable reservorio), para manantiales de Tabio. Esta variación es consistente con la mezcla propuesta en la figura anterior. A medida que avanza el proceso de dilución con agua fría, disminuyen las concentraciones de sólidos totales disueltos y de sílice, así como la temperatura.

En el Bloque 4, la mayor influencia de agua subterránea somera inferida a partir de la clasificación por anión dominante en el manantial 229-01 de Santamaría de Batá, también se evidencia a partir de la composición relativa Na-K-Mg, representada en la fig. 22. Los manantiales de Paratebueno muestran una menor composición relativa de magnesio es decir de aporte de aguas subterráneas frías, que el manantial de Santamaría del Batá. La temperatura del reservorio sería cercana a 150°C; según se infiere de la extrapolación sobre la línea de equilibrio. La validez de esta posibilidad dependerá de la coexistencia en el reservorio, de albita, adularia y clorita, lo cual solamente puede ser validado a través de estudios de exploración en pozos perforados.

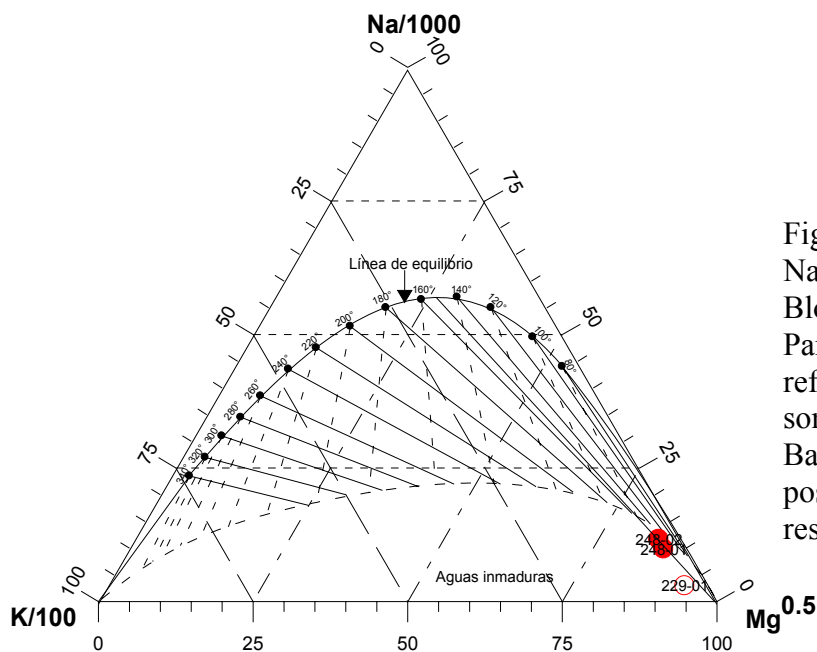


Figura 22. Composición relativa Na-K-Mg para manantiales del Bloque 4. Los manantiales de Paratebueno (248-01 y 248-02) reflejan menor influencia de agua somera que el de Santamaría del Batá (229-01) y una temperatura posible alrededor de 150°C en el reservorio.

3.3.3. Geotermómetros

La Tabla 8 presenta la estimación de la temperatura de los posibles reservorios que alimentan los manantiales de Cundinamarca. Como se planteó en la metodología, solamente se calcularon los geotermómetros basados en la concentración de sílice. Se utilizó la fórmula para el geotermómetro de cuarzo sin pérdida de vapor. Como la temperatura en superficie, la concentración de sílice aumenta en los manantiales de Cundinamarca hacia el oriente y con ella, el valor del geotermómetro, como se ilustra en la fig. 23. Las temperaturas máximas estimadas, se registran en los manantiales clorurados de mayor temperatura en superficie, así: Tibirita, 101°C, Tabio, 99°C, Gachetá 108 y Paratebueno, 103°C. Este resultado sugiere que el recurso geotérmico es de baja energía. Teniendo en cuenta que la confiabilidad del geotermómetro disminuye por debajo de los 180°C, es probable que la solubilidad de la sílice esté controlada por calcedonia u otras especies de sílice, que como se observa en la tabla conduciría a temperaturas menores. Sin embargo se utilizó el geotermómetro de cuarzo para hacer posible la estimación de los gradientes geotérmicos, según la metodología indicada.

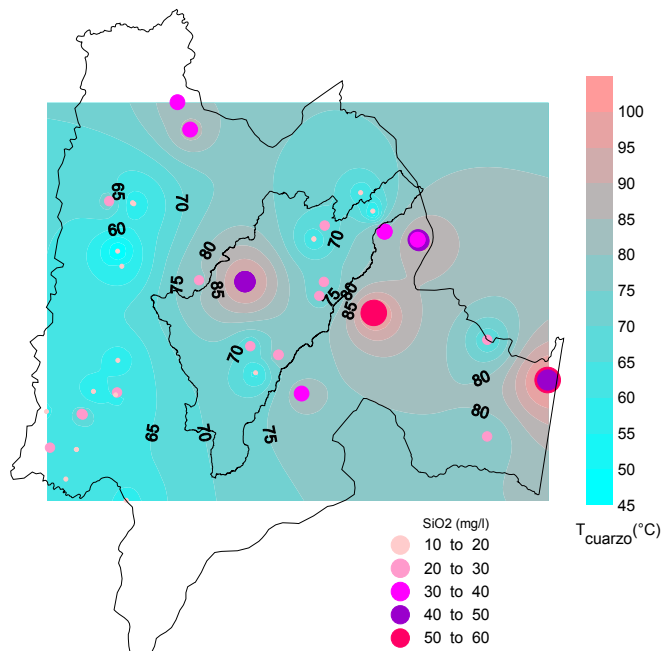


Figura 23. Variación de la concentración de sílice y la temperatura estimada a partir del geotermómetro de cuarzo, para los posibles reservorios que alimentan los manantiales de Cundinamarca. Como la variación de la temperatura en superficie, la temperatura estimada en profundidad a partir del geotermómetro de sílice, se incrementa hacia el oriente alcanzando sus valores máximos en los manantiales de los municipios de Tibirita, Tabio, Gachetá y Paratebueno.

Tabla 8. Parámetros térmicos estimados a partir de la concentración de sílice, en manantiales del Departamento de Cundinamarca.

No. IGM	Manantial	Municipio	GEOTERMÓMETROS (°C)		Gradiente geotérmico (°C/km)
			Cuarzo	Calcedonia	
BLOQUE 1					
189-01	El Hatico	Yacopí	83	52	44
208-02	La Tigra	Villeta	44	11	14
208-04	Salsipuedes-Río Negro	Caparrapí	74	42	37
245-01	Casablanca	Ricaurte	61	29	24
245-02	Azufrada La Quebrada	Ricaurte	64	32	26
245-03	Los Chorros	Agua de Dios	62	30	25
245-04	Los Chorros II	Agua de Dios	60	28	24
245-06	Macanda	Guataquí	59	27	22
245-07	El Gran Poza Azufrada	Tocaima	65	33	27
245-08	Los Pocitos Azufrados	Tocaima	69	37	30
246-01	Azufrada Charcolargo	Apulo	54	22	20
BLOQUE 2					
189-02	El Salitre	Yacopí	88	57	47
208-03	San Ignacio	Villeta	57	24	23
208-05	El Peñón	Útica	58	26	22
208-06	El Salitre	Útica	58	26	22
208-07	Hotel Abacoa	Útica	58	26	22
227-08	El Espino	La Mesa	56	24	24
246-02	Santa Lucía	Anapoima	65	33	28
246-03	Santa Ana	Anapoima	55	23	21
BLOQUE 3					
209-01	Nápoles	Chocontá	71	39	41
209-02	Los Volcanes	Chocontá	89	59	54
209-03	Hacienda Susatá	Nemocón	68	36	38
209-04	La Piscina Municipal	Nemocón	62	30	34
209-05	Agua Clara	Suesca	60	28	33
209-06	Repetidora	Chocontá	49	16	25
209-10	Los Volcanes 2	Chocontá	82	50	48
209-11	Los Volcanes 3	Chocontá	85	54	50
210-01	El Paraíso	Tibirita	96	66	55
210-02	El Paraíso Termal	Tibirita	101	71	58
210-03	Manta Vereda Peñas	Manta	80	48	43
210-04	El Paraíso Codecal	Manta	86	55	48
227-01	El Zipa	Tabio	99	69	60
227-02	Aguas Calientes	Tabio	97	67	58
227-03	Parque Central Bavaria	Bogotá	57	24	30
227-04	Club Los Lagartos	Bogotá	65	33	36
227-05	Finca Agua Caliente 2	Tabio	88	58	52
227-06	Finca Agua Caliente 1	Tabio	97	66	58
227-07	El Zipa 2	Tabio	99	69	60
227-09	Agua Caliente	San Francisco	79	47	41
228-01	Aguas Calientes	Guasca	73	41	42
228-02	Zoratama	La Calera	74	42	43
228-03	Spa Helena del Mar	La Calera	79	48	46
228-04	Montecillo	Guatavita	69	37	38
228-05	Quebrada El Zaque	Gachetá	97	85	54
228-07	La Rivera	Gachetá	108	95	63
247-01	Los Volcanes	Choachí	77	46	41
247-02	Santa Mónica	Choachí	88	57	49
265-01	Azufrada	Pandi	58	26	24
BLOQUE 4					
248-01	Aguas Calientes-Sauna	Paratebuena	103	73	53
248-02	Aguas Calientes-El Mohán	Paratebuena	99	69	51
248-03	Playas del Río Humea	Paratebuena	77	45	35
229-01	Charco Largo	Santamaría del Batá	66	34	33

Los gradientes geotérmicos estimados para el Departamento de Cundinamarca, presentados en la Tabla 8, están en su mayoría en el rango definido como normal (20-40 °C/km). Gradiente geotérmicos mesotermiales (entre 40 y 70°C) se estiman en manantiales los municipios de Yacopí y La Calera y en aquellos con mayor temperatura superficial, localizados en los municipios de Tibirita, Manta, Tabio, Gachetá y Paratebueno. El mayor gradiente geotérmico, equivalente a 63°C/km, se registra en Gachetá.

El modelo de dilución simple entalpía-sílice (Fig. 24) fue aplicado con el fin de indicar temperaturas máximas probables en los posibles reservorios, asumiendo que el cuarzo controla la concentración de sílice y haciendo otras suposiciones indicadas en la metodología. Dado que no se dispone del contenido de sílice en manantiales fríos, se tomó como referencia de línea de base de sílice, el manantial tibio de la Repetidora de Chocontá (209-01); se consideraron los manantiales clorurados de mayor temperatura en superficie y con contenido de sílice superior a 45 mg/l, hallados en los Bloques 3 y 4. El modelo señala 800 kJ/kg (190°C) en el posible reservorio de Tibirita (210-01). Para el reservorio de Tabio (227-01) se estima una entalpía de 730 kJ/kg, equivalente a 170°C, para el de Gachetá (228-07), 580 kJ/kg ó unos 138 °C y para el de Paratebueno (248-01), 480 kJ/kg ó 115°C. De acuerdo con el modelo, los recursos geotérmicos de Tibirita, Tabio y Gachetá se clasificarían como de energía intermedia (125-225°C) y tendrían un potencial de utilización más amplio. La comprobación de las temperaturas del fluido profundo está sujeta a estudios en pozos perforados.

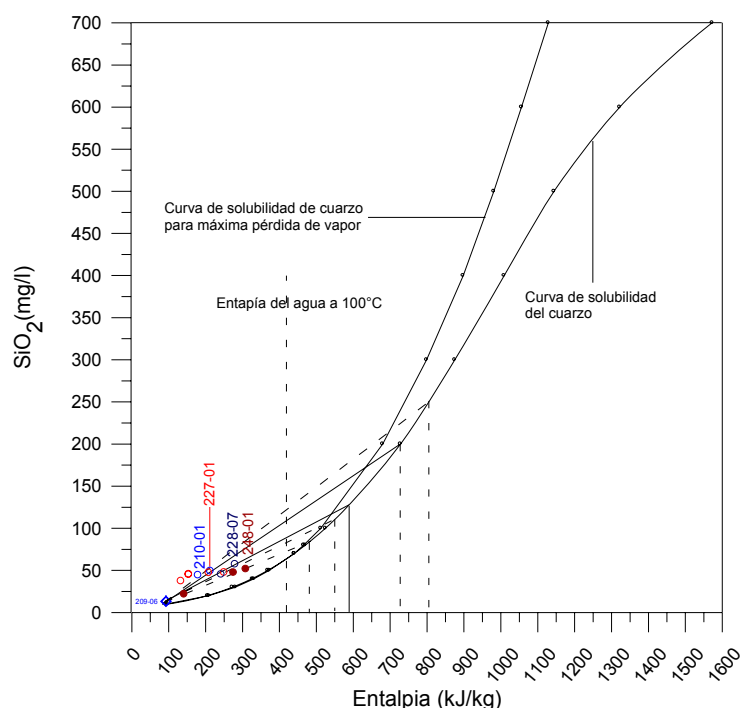


Figura 24. Modelo Entalpía-Sílice aplicado a manantiales de mayor temperatura y concentración en sílice. Las temperaturas estimadas a partir del contenido de sílice, contrarrestando el efecto de dilución, señalan magnitudes posibles hasta de 190°C en Tibirita, de 170 en Tabio y Gachetá y de 115°C en Paratebueno, lo cual ampliaría el potencial de utilización del recurso geotérmico de Cundinamarca, al de sistemas de temperatura intermedia.

Los manantiales de Tabio, de los cuales se identifica únicamente el 227-01, en la fig. 24, no muestran una variación lineal de la concentración de sílice con la entalpía, con pendiente positiva como se esperaría para el proceso de dilución simple. Es posible que este comportamiento se deba a que además del enfriamiento convectivo, se registre un enfriamiento conductivo, sin disminución de la concentración de sílice. Si este fuera el caso, la temperatura estaría siendo sobreestimada y sería más confiable la inferida a partir del manantial más caliente (de mayor entalpía), en unos 130°C (500 kJ/kg). Procesos de enfriamiento por conducción podrían también registrarse en manantiales de otros municipios; sin embargo no se hacen evidentes ya que son individuales y estos procesos se identifican por comparación entre manantiales relacionados con el mismo sistema, como en el caso de Tabio.

3.3.4. Elementos traza

En la Tabla 6, se incluyen los resultados de elementos menores y traza (concentraciones menores a 1 mg/l). La evaluación de la concentración de estos elementos, tiene aplicación como trazadores del origen de los fluidos (Li, B, Rb and Cs), algunos de ellos como indicadores de contaminación (como metales pesados y nutrientes lavados de fertilizantes) y en la evaluación del potencial terapéutico. A continuación se describen los resultados de estos elementos para los manantiales de Cundinamarca, a partir de la comparación de su concentración con los valores consignados en el Decreto 475 de 1998 para agua potable⁶, la Resolución 012186 de 1991, para agua potable envasada⁷, la norma para agua potable de la EPA (Environmental Protection Agency)⁸ y el Código Alimentario Español de Septiembre de 1967 (en Armijo y Sanmartín, 1994), que define algunos parámetros adicionales para las aguas minerales.

En los manantiales de Cundinamarca, los mayores contenidos de litio, boro y estroncio, se registran en los manantiales de Yacopí (189-02) y Útica (208-05 y 208-06) alcanzando valores máximos en Útica. El litio que en general registra concentraciones inferiores a 1 mg/l, alcanza niveles de 1.5, 5.1 y 7.2 mg/l, para estos tres manantiales, a partir de lo cual se clasifican como litínicos, de acuerdo con el Código Alimentario Español. Las características de las fuentes salinas de estos manantiales son diferentes, como se infiere de su relación Cl/Li equivalente a 6060 en el municipio de Yacopí y de 900 y 1015, en Útica. Aunque el carácter litínico podría impartirle a estos manantiales actividad para el tratamiento de enfermedad maniaco-depresiva y como diurético, para el tratamiento de hiperuricémicas (exceso de ácido úrico) (Saz, P.), a través de la cura hidropónica (ingestión dosificada), su aplicación está limitada por el alto contenido de sales de estos manantiales (sólidos totales disueltos): 15721 mg/l en el manantial de Yacopí y 9501 y 13851 mg/l, en los manantiales, de Útica.

El máximo valor permitido para el boro en agua potable, de acuerdo con el Decreto 475 de 1998, es de 0.3 mg/l, ya que si bien se utiliza como complemento vitamínico, puede tener efectos adversos para la salud (Saz, P.). En Cundinamarca, 10 de los manantiales incluidos en el presente trabajo, exceden dicha concentración: 189-02 en Yacopí, 245-06 en

⁶ Ministerio de Salud, República de Colombia.

⁷ Ministerio de Salud, República de Colombia.

⁸ Disponible en <www.epa.gov/safewater/agua/estandares.html>. Mayo 22 de 2003

Guataquí, 210-01, 210-02 y 210-04, en Tibitita, 210-03 en Manta, 208-03 en Villeta, 227-08 en La Mesa y 208-05 y 208-06 en Útica. En los manantiales citados de Útica, el boro alcanza sus valores máximos de 11 y 8.6 mg/l, equivalentes a 44.6 y 34.6 mg/l como ácido metabórico (HBO_2), respectivamente, por lo cual estos manantiales se clasifican de acuerdo con el Código Alimentario Español, como boratados (contenido mayor a 4 mg/l).

El estroncio cuyo contenido en agua es un poco mayor al de litio y boro (en agua potable puede ir hasta 4 mg/l), llega hasta 18 mg/l en el manantial 189-02 y hasta 24 y 28 mg/l en los manantiales 208-05 y 208-06. Las aguas con contenido de estroncio superior a 10 mg son clasificadas como estroncicas, por el Código alimentario español. En esta categoría se clasifican los manantiales 227-08 de La Mesa, 189-02 de Yacopí, 208-05 y 208-06 de Útica. Los beneficios potenciales del estroncio sobre la salud humana, se basan en el incremento de la resistencia a la caries, aunque a dosis altas puede producir osteomalacia (debilitamiento de los huesos normalmente provocado por defecto de vitamina D). Este elemento además incrementa la masa ósea vertebral y a bajas dosis ha mostrado estimular la formación ósea y disminuir la resorción⁹. A nivel cutáneo se ha visto que inhibe las citokinas inflamatorias (moléculas protéicas que cumplen función de comunicación intercelular) derivadas del queratinocito (células de la epidermis).

Las concentraciones de cesio y rubidio, resultaron inferiores al límite práctico de cuantificación, equivalente a 0.1 mg/l, para las 45 muestras de manantiales en que se midieron estos parámetros.

El contenido de bario en los manantiales de Cundinamarca, es en general, inferior a 0.5 mg/l, que es el límite máximo para agua potable reportado por el Decreto 475. Exceden dicho límite los manantiales 228-02 y 228-03 de La Calera, 210-01 de Tibirita, 245-02 de Ricaurte, 245-07 de Tocaima y los manantiales del municipio de Tabio (227-01, 227-02, 227-05, 227-06, 227-07), que registran las concentraciones máximas de este elemento en un rango entre 3.31 y 2.34 mg/l, disminuyendo con la temperatura a medida que el proceso de dilución avanza.

Como en la mayoría de aguas naturales con pH neutro, el contenido de aluminio en los manantiales de Cundinamarca, es bajo (inferior a 0.1 mg/l), valor que no excede el máximo permitido para agua potable, de acuerdo con el Decreto 475 sobre agua potable de 1998. Por su parte, el contenido de amonio medido en 45 manantiales, registra un valor máximo de 9.58 mg/l en el manantial de mayor contenido de sólidos disueltos (189-02 en Yacopí). El valor máximo en agua potable, 0.5 mg/l¹⁰, es superado además por los manantiales 209-01 en Chocontá, 227-09 en San Francisco, 245-01 y 245-02 en Ricaurte, 246-01 de Apulo, 245-07 en Tocaima, 227-01 y 227-07 en Tabio, 208-03 en Villeta, 209-03 en Nemocón, 210-01 en Tibirita, 245-06 en Guataquí, 247-02 en Choachí y 227-08 en El Espino.

La concentración de los halógenos fluoruro, bromuro y yoduro, no registran una relación evidente con el contenido de cloruros ni con la salinidad total. Las concentraciones

⁹ Disponible <<http://www.abcmedicus.com/articulo/id/239/pagina/18/osteoporosis.html>>

¹⁰ Parámetro no incluido en la legislación colombiana. El valor máximo citado corresponde al registrado para la Comunidad Económica Europea. Disponible en <www.lenntech.com/EECDirectory.htm>

máximas de fluoruros, se registran en los manantiales 208-06 y 208-06 de Útica. Estos manantiales exceden ligeramente el nivel máximo permitido en agua potable (1.2 para la regulación colombiana y 2.4 mg/l para la EPA). La concentración máxima de bromuro (1,37 mg/l), registrada en el manantial 189-02 de Yacopí, es inferior a 4 mg/l que es el valor mínimo para clasificar un manantial como bromurado.

El yoduro en la mayoría de los manantiales, se encuentra en niveles inferiores a 1 mg/l. Con concentraciones mayores, y por lo tanto considerados como manantiales yodurados, de acuerdo con el Código Alimentario Español, se registran los manantiales de 189-01 y 189-02 en Yacopí, 245-07 y 245-08 en Tocaima, 246-01 en Apulo, 246-02 y 246-03 en Anapoima, 227-06 en Tabio, 228-03 en la Calera y 245-02 en Ricaurte, en donde se encuentra la concentración máxima (7 mg/l). Estos manantiales podrían tener potencial de utilización como preventivas del bocio exoftálmico (Saz, P); no obstante, su utilización como cura hidropónica no incluiría a los manantiales de Ricaurte, Tocaima y Apulo, debido a su olor a sulfuro de hidrógeno.

Con relación a las especies consideradas nutrientes, los manantiales de Cundinamarca registran concentraciones inferiores al límite máximo permitido para nitrato el cual es equivalente 10 mg/l según la regulación colombiana para agua potable. La concentración máxima de 7.42, se registra en el manantial del Club Los Lagartos en Bogotá, 227-04. Los niveles mayores a 3 mg/l sugieren en al menos 6 manantiales, la posible influencia moderada de prácticas agrícolas. El nitrito reportado en la Tabla 4, no muestra concentraciones superiores a la máxima para agua potable, equivalente a 0.1 mg/l. El fósforo, cuya concentración se prefiere por debajo de 0.07 mg/l (ó 0.2 expresada como fosfato), registra una concentración máxima de 0.6 mg/l, en el manantial de Agua Clara en Suesca (209-05). Otros manantiales que superan el máximo permitido para fósforo son 209-06 de Chocontá, 245-03, 245-04 de Agua de Dios, 227-03 y 227-04 en Bogotá, 210-01 en Tibirita, 228-04 en Guatavita y 228-01 en Guasca.

Finalmente, el cianuro total en los manantiales de Cundinamarca, no excede en ningún caso la concentración máxima permitida de 0.05 mg/l para agua potable en Colombia y de 0.2 mg/l para la EPA.

3.3.5. Metales pesados

La caracterización de los manantiales de Cundinamarca incluyó los análisis de algunos metales pesados considerados de interés sanitario por su carácter altamente tóxico como, antimonio, arsénico, cadmio, cromo, cobre, plomo, mercurio, selenio y manganeso, cuyos resultados son presentados en la Tabla 6. El arsénico se determinó además debido a su actividad biológica; en un rango entre 0.2 y 1 mg/l permitiría clasificar las aguas de manantiales minerales en el Bloque balneológico específico como aguas arsenicales, con beneficios para la salud por reducción del tiempo del metabolismo.

Con pocas excepciones para cromo y manganeso, las concentraciones de estos metales no exceden los límites permitidos para agua potable. Es decir que estos elementos no se constituyen en parámetros restrictivos para el aprovechamiento de los manantiales de Cundinamarca.

Las concentraciones máximas de antimonio y arsénico, equivalentes a 0.0048 y 0.037 mg/l, se registran en el manantial de máxima salinidad 189-02, de Yacopí. Como para los anteriores, las concentraciones de cadmio, cobre, plomo, mercurio y selenio en los manantiales caracterizados de Cundinamarca, está muy por debajo de la máxima permitida para agua potable, equivalente a 0.003, 1.0, 0.01, 0.001 y 0.01 mg/l, respectivamente.

La concentración de cromo total en los manantiales 227-03 y 227-04 en Bogotá y 228-04 en Guatavita, supera ligeramente el límite permitido de 0.01 mg/l definido por la norma colombiana para Cr VI, con valores de 0.011, 0.016 y 0.012 mg/l, respectivamente. Por su parte el manganeso, sobrepasa también ligeramente la concentración máxima para agua potable, de 0.1 mg/l, en los manantiales 247-01, 247-02 en Choachí, 265-01 en Pandí, 246-02 en Anapoima, 189-01 en Yacopí, 248-01, 248-02 y 248-03 en Paratebueno, 245-08 en Tocapima, 228-01 en Guasca, 209-01 en Chocontá, y 208-07 en Útica, el cual alcanza el valor máximo de 0.4 mg/l.

3.3.6. Composición Isotópica

La composición de isótopos estables del agua analizada para 50 de las muestras del Departamento de Cundinamarca, es presentada en la Tabla 9 e ilustrada en la fig. 25. Se observa una composición isotópica bien diferenciada para los Bloques 1, 3 y 4. Esta diferenciación permite establecer que los niveles de recarga para los manantiales de cada uno de estos bloques son diferentes y/o que las precipitaciones de cada uno de ellos están sujetas a regímenes de vientos (origen y dinámica de nubes), diferentes. Los manantiales del Bloque 3, localizados a las altitudes mayores (Sabana de Bogotá – Anticlinorio Los Farallones), tienen la composición más ligera; los manantiales del Bloque 4 (Piedemonte Llanero), tienen la composición isotópica más pesada y los manantiales del Bloque 3, una composición intermedia. Los manantiales del Bloque 2 tienen una composición isotópica más dispersa, poniendo en evidencia un proceso de evaporación para los manantiales de Útica. A excepción de estos últimos, la composición isotópica de todos manantiales se halla muy cerca de las líneas de precipitación tomadas como referencia (local, definida para la Sabana de Bogotá por Castrillón, 2001 y global). El manantial 228-01 de Guasca, registra un ligero enriquecimiento en oxígeno 18 atribuido a errores en la preservación de la muestra ya que sus características de temperatura y (35°C) y su concentración de sólidos totales disueltos (66 mg/l) no son consistentes con evaporación, ni con otros procesos que podrían justificar dicho enriquecimiento.

Como se espera de las geoquímicas estimadas para el fluido profundo, que permiten establecer que los recursos geotérmicos del departamento son de baja temperatura, ninguno de los manantiales del departamento registra enriquecimiento en oxígeno-18 por interacción fluido-roca a altas temperaturas.

Tabla 9. Isótopos estables en manantiales termales de Cundinamarca. Resultados expresado en unidades delta (\square) referidas al patrón internacional V-SMOW (Viena-Standard Mid Ocean Water).

Grupo 1. Bloque Valle Medio del Magdalena - Guaduas						
No. IGM	Manantial	Municipio	$\delta^{18}\text{O}$ [‰] V-SMOW	$\delta^2\text{H}$ [‰] V-SMOW	TRIO	
					T [UT]	\pm
189-01	El Hatico	Yacopí	-7.63	-53.60		
208-02	La Tigrrera	Villeta	-8.19	-58.60		
208-04	Salsipuedes-	Caparrapí	-8.64	-62.80		
245-01	Casablanca	Ricaurte	-8.30	-58.20	0.08	0.30
245-02	Azufrada La	Ricaurte	-8.91	-62.30	0.08	0.30
245-03	Los Chorros	Agua de Dios	-8.56	-59.95	-0.22	0.28
245-04	Los Chorros II	Agua de Dios	-8.52	-57.40	0.58	0.29
245-06	Macanda	Guataquí	-9.14	-62.90	0.79	0.30
245-07	El Gran Pozo	Tocaima	-8.78	-61.60	0.25	0.30
245-08	Los Pocitos	Tocaima	-8.72	-61.30	0.72	0.3
246-01	Azufrada	Apulo	-8.71	-61.0	1.72	0.32
Grupo 2. Bloque Anticlinorio Villeta						
189-02	El Salitre Y.	Yacopí	-7.47	-49.50		
208-05	El Peñón	Útica	-5.71	-51.30		
208-06	El Salitre U.	Útica	-7.23	-54.20		
208-07	Hotel Abacoa	Útica	-6.30	-46.70		
227-08	El Espino	La Mesa	-8.46	-57.90	0.69	0.29
246-02	Santa Lucia	Anapoima	-8.18	-59.05	0.53	0.28
246-03	Santa Ana	Anapoima	-8.30	-59.30	1.01	0.30
Grupo 3. Bloque Sabana de Bogotá y Anticlinorio Los Farallones						
209-01	Nápoles	Chocontá	-10.74	-74.1		
209-02	Los Volcanes	Chocontá	-10.44	-72.8		
209-03	Hacienda Susatá	Nemocón	-10.06	-70.3		
209-04	Piscina	Nemocón	-10.05	-71.7		
209-05	Agua Clara	Suesca	-10.30	-71.9		
209-06	Repetidora	Chocontá	-10.03	-72.6		
209-09	Leonilde	Nemocón	-10.17	-70.5		
209-10	Los Volcanes 2	Chocontá	-10.56	-73.6		
209-11	Los Volcanes 3	Chocontá	-10.39	-71.4	0.26	0.29
210-01	El Paraiso Codecal	Tibirita	-9.60	-65.7		
210-02	El Paraiso Termal	Tibirita	-9.82	-66.6		
210-03	Vereda Peñas	Manta	-9.39	-66.4		
210-04	El Paraiso	Manta	-9.53	-67.1	0.48	0.33
227-01	El Zipa	Tabio	-9.82	-68.2		
227-02	Aguas Calientes 3	Tabio	-9.70	-69.0		
227-03	Bavaria	Bogotá	-9.99	-68.7		
227-04	Los Lagartos	Bogotá	-9.03	-64.8		
227-05	Aguas	Tabio	-9.74	-68.30	0.56	0.29
227-06	Aguas	Tabio	-9.65	-68.30	0.13	0.28
227-07	El Zipa 2	Tabio	-9.89	-69.00	0.00	0.28
227-09	Agua Caliente S. F.	San Francisco	-9.65	-65.70	0.22	0.28
228-01	Aguas Calientes G.	Guasca	-9.83	-75.3		
228-02	Soratama	La Calera	-10.54	-72.7		
228-03	Spa H. del Mar	La Calera	-10.69	-71.80	0.38	0.29
228-04	Montecillo	Guatavita	-9.92	-68.8		
247-01	Los Volcanes Ch.	Choachí	-10.77	-76.9		
247-02	Santa Mónica	Choachí	-11.03	-79.9		
265-01	Azufrera Pandi	Pandi	-8.23	-59.30	0.34	0.29
Grupo 4. Bloque Piedemonte Llanero						
229-01	Charco Largo	Santamaría del Batá	-7.16	-47.30		
248-01	Aguas Calientes-Sauna	Paratebueno	-7.11	-48.30		
248-02	Aguas Calientes-El Mohán	Paratebueno	-6.93	-46.20		
248-03	Playas R. Humea	Paratebueno	-7.67	-49.80		

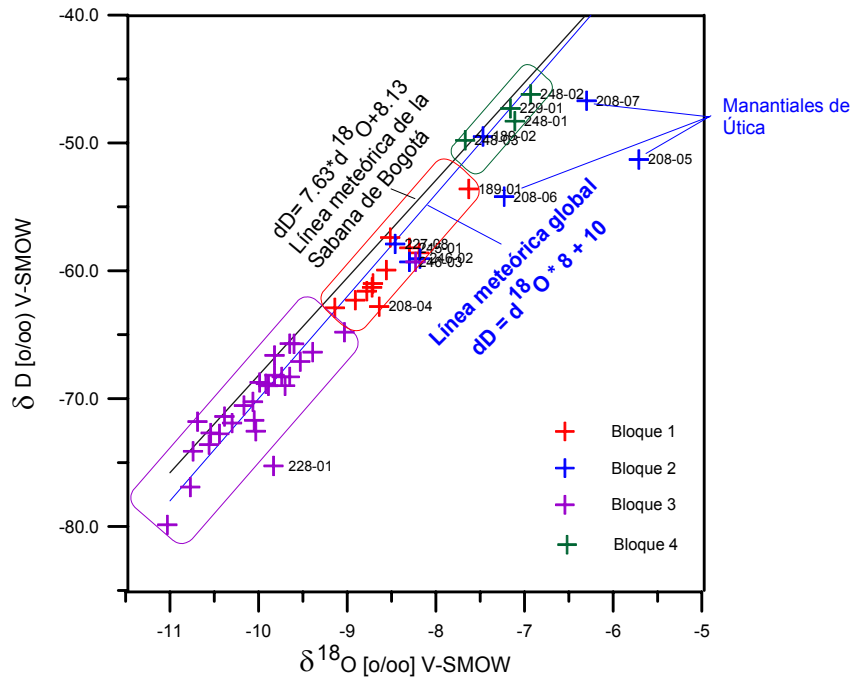


Figura 25. Variación de Deuterio frente a Oxígeno-18 para manantiales de Cundinamarca. Los Bloques 1, 3 y 4 registran una composición isotópica bien diferenciada que señala la recarga de agua más ligera para el Bloque 3, más pesada para el Bloque 4 e, intermedia para el Bloque 1. En el Bloque 2, se identifican procesos de evaporación en los manantiales de Útica. Línea meteórica calculada para la Sabana de Bogotá, tomada de Castrillón, 2001.

El contenido de tritio, medido en 19 manantiales y representado en la fig. 26, es en general inferior a 0.8 U.T., lo cual sugiere, según la interpretación cualitativa de Clark & Fritz (1997), que la recarga de estos manantiales es submoderna (anterior al año 1.952). No obstante considerando el contenido promedio de tritio del agua de lluvia en la zona de Paipa, equivalente a 1.4 ± 0.6 U.T. (Alfaro, C., 2002), como representativa de la lluvia local de esta latitud, se postula una mezcla de agua submoderna y agua actual. En el manantial 246-01 de Apulo, con el mayor contenido de tritio, es el único en donde la contribución de agua actual es dominante.

3.4. CARACTERIZACIÓN MICROBIOLÓGICA

Los resultados de la caracterización microbiológica orientada a evaluar índices de contaminación, son presentados en la Tabla 10. Se reporta el análisis de 47 muestras. No fue posible analizar la totalidad de los manantiales, por las restricciones de tiempo para ejecución del análisis después de la recolección de la muestra, el cual no debe superar 24 horas.

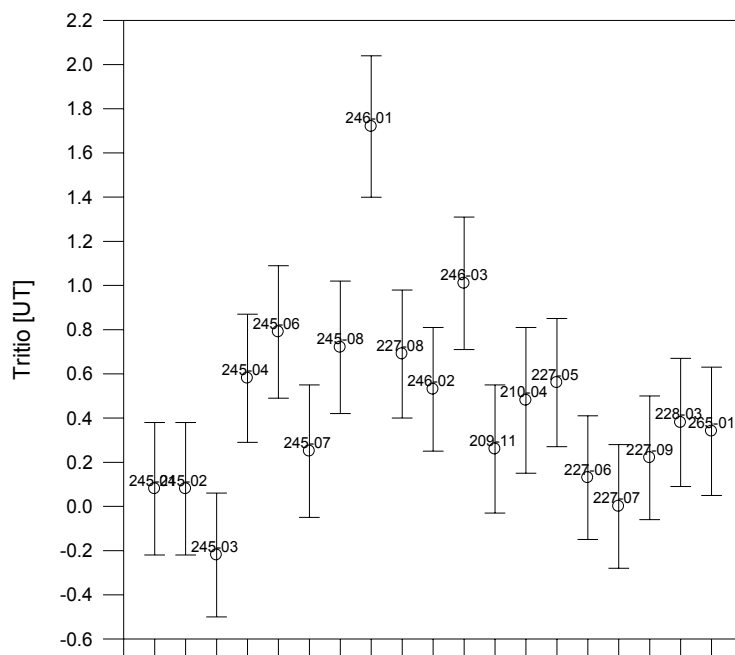


Figura 26. Contenido de Tritio en algunos manantiales de Cundinamarca. El contenido de tritio inferior a 0.8 U.T. sugiere una recarga subactual para la mayoría de manantiales.

Considerando los microorganismos mesófilos aerobios, como buen indicador de los revivifables o que se pueden crecer para su conteo, 27 de los 46 manantiales analizados de Cundinamarca, cumplen con el criterio general para aguas minerales naturales de no exceder 2000 Unidades Formadoras de Colonias/ 100 ml. Estos son 209-03 y 209-04, en Nemocón, 245-01 y 245-02, en Ricaurte, 248-01, 248-02 y 248-03, en Paratebuena, 189-02, en Yacopí, 210-01 y 210-02 en Tibirita, 247-01 y 247-02 en Choachí, 227-03 y 227-04 en Parque Central Bavaria y el Club los Lagartos, en Bogotá, 246-03 y 246-02 en Anapoima, 245-07 y 245-08, en Tocaima, 209-01 y 209-11, en Chocontá, 228-03 (Spa), en La Calera, 245-03 y 245-04 en Agua de Dios, 245-06 en Guataquí, 208-06, en Útica, 246-01 en Apulo y 227-07, en Tabio. También cumple con dicho criterio, el manantial 229-01 de Santamaría del Batá (Boyacá). Los manantiales restantes exceden el valor límite de 2000, alcanzando valores hasta de 380.000 y 350.000 UFC/100 ml, en los manantiales 228-04 de Guatavita y 209-09, de Nemocón, respectivamente, los cuales no tienen ningún aprovechamiento en la actualidad.

Aunque los coliformes totales que por sí mismos tampoco constituyen una amenaza para la salud, se espera que estén ausentes de aguas para consumo según normas internacionales y, según el Decreto 475 y la Resolución 12186 para agua potable envasada. A excepción de los manantiales tibios 209-03 y 209-04 en Nemocón y 245-02 en Ricaurte y del manantial no termal 246-03 en Anapoima, los restantes 43 manantiales, registran contenido de coliformes totales entre 6 y 270000 UFC/100 ml. La relación de mesófilos/coliformes en el manantial 209-09 en Nemocón es 5 veces mayor a la más alta registrada en los manantiales restantes (437 frente a 85): tiene una concentración de 350000 UFC/100 ml en mesófilos aerobios y 800 UFC/100 en coliformes totales. Es decir que en este manantial existe una contribución significativamente mayor de una fuente de microorganismos diferente a los

coliformes totales, lo cual podría estar relacionado con los usos dados a este manantial localizado dentro de una vivienda.

Tabla 10. Análisis microbiológico de manantiales termales de Cundinamarca

No. IGM	Municipio	Manantial	Mesófilos Aerobios UFC/100 ml	Coliformes Totales UFC/100 ml	Coliformes Fecales UFC/100 ml	Pseudomonas aureoginosa NMP/100ml	Mohos UFC/100 ml	Levaduras UFC/100 ml
BLOQUE 1								
208-02	Villeta	La Tigresa	48000	28000	0	0	126	150
208-04	Caparrapí	Salsipuedes-Rio Negro	11000	2000	0	0	30	200
245-01	Ricaurte	Casablanca	510	6	0	0	1	0
245-02	Ricaurte	Azufrada La Quebrada	0	0	0	0	2	0
245-03	Agua de Dios	Los Chorros	1400	500	0	0	4	3
245-04	Agua de Dios	Los Chorros II	870	80	0	0	1	1
245-06	Guataquí	Macanda	990	580	0	0	24	34
245-07	Tocaima	El Gran Poza Azufrada	520	440	0	0	64	25
245-08	Tocaima	Los Pocitos Azufrados	925	140	0	0	150	0
246-01	Apulo	Azufrada Charcolargo	1500	1100	0	0	30	25
BLOQUE 2								
189-02	Yacopí	El Salitre	63	59	0	0	0	23
208-05	Útica	El Peñón	2200	1100	0	0	15	0
208-06	Útica	El Salitre	1300	1100	0	0	20	2
208-07	Útica	Hotel Abacoa	4800	2500	0	0	10	147
246-02	Anapoima	Santa Lucia	430	79	0	0	15	6
246-03	Anapoima	Santa Ana	260	0	0	0	10	20
BLOQUE 3								
209-01	Chocontá	Nápoles	1000	300	0	<2.2	8	0
209-02	Chocontá	Los Volcanes	11000	7900	0	<2.2	1	0
209-03	Nemocón	Hacienda Susatá	100	0	0	<2.2	8	0
209-04	Nemocón	La Piscina Municipal	0	0	0	<2.2	0	0
209-05	Suesca	Agua Clara	17000	200	0	<2.2	20	22
209-06	Chocontá	Repetidora	3200	400	0	<2.2	18	9
209-09	Nemocón	Casa Leonilde Latorre	350000	800	0	<2.2	55	140
209-10	Chocontá	Los Volcanes 2	3500	3400	0	<2.2	2	0
209-11	Chocontá	Los Volcanes 3	600	300	0	<2.2	3	0
210-01	Tibirita	El Paraiso	430	120	0	<2.2	0	0
210-02	Tibirita	El Paraiso Termal	130	80	0	<2.2	0	0
210-03	Manta	Manta Vereda Peñas	5000	3500	0	<2.2	0	16
210-04	Manta	El Paraiso Codecal	4400	1700	0	<2.2	6	3
227-01	Tabio	El Zipa	46000	33000	0	<2.2	240	12
227-02	Tabio	Aguas Calientes	19000	11000	0	<2.2	1000	50
227-03	Bogotá	Parque Central Bavaria	400	200	0	<2.2	10	2
227-04	Bogotá	Club Los Lagartos	200	100	0	<2.2	2	16
227-05	Tabio	Finca Agua Caliente 2	64000	37000	0	<2.2	580	29
227-06	Tabio	Finca Agua Caliente 1	43000	30000	0	<2.2	800	35
227-07	Tabio	El Zipa 2	1500	820	0	<2.2	14	0
227-09	San Francisco	Agua Caliente	2400	1200	0	0	30	0
228-01	Guasca	Aguas Calientes	14000	600	0	<2.2	650	270
228-02	La Calera	Zoratama	9200	1200	0	<2.2	6	1
228-03	La Calera	Spa Helena del Mar	700	33	0	<2.2	51	11
228-04	Guatavita	Montecillo	380000	270000	0	<2.2	160	69
247-01	Choachí	Los Volcanes	400	300	0	<2.2	7	0
247-02	Choachí	Santa Mónica	200	20	0	<2.2	0	0
BLOQUE 4								
248-01	Paratebuena	Aguas Calientes-Sauna	45	22	0	0	0	0
248-02	Paratebuena	Aguas Calientes-El Mohán	32	6	0	0	0	10
248-03	Paratebuena	Playas del Río Humea	850	640	0	0	17	34
229-01	Santamaría del Batá	Charco Largo	640	510	0	0	40	0

UFC= Unidades Formadores de Colonias . NMP=Número más probable

Las coliformes fecales que aunque sugieren contaminación reciente con materias fecales que no representa necesariamente una contaminación inminente con agentes patógenos, registró una concentración de cero en todos los manantiales. De igual manera la *Pseudomonas aeruginosa*, como se señaló antes, hubiera sido de utilidad para identificar el origen animal o humano de las heces en caso de haber detectado coliformes totales, registra un valor de cero o inferior a 2.2 NMP/100 ml.

En resumen, la mayoría de los manantiales de Cundinamarca registran una carga alta de bacterias no provenientes de contaminación por heces (altos contenidos de mesófilos y coliformes totales, frente a contenido cero (0) de coliformes fecales). En los manantiales con potencial de utilización como aguas de mesa envasadas y en balnearios, se deben hacer estudios detallados de caracterización microbiológica para identificar restricciones de uso, en caso de que se trate de microorganismos patógenos o en el mejor de los casos, para ampliar el potencial de utilización de estos recursos a aplicaciones biotecnológicas.

El contenido de mesófilos aerobios que incluye a todos los microorganismos analizados. Aunque su concentración no guarda una relación simple y directa con ninguno de los parámetros fisicoquímicos medidos, en el caso de los manantiales de Cundinamarca, se observa que en general aquellos con temperatura superior a 40°C (14 con caracterización microbiológica), registran un nivel inferior a 2000 UFC, con excepción de 4 manantiales: 227-01 que es el manantial principal de balneario de Tabio con 46000 UFC/100ml, 209-02 y 209-10, en Chocontá con 11000 y 3400 UFC/100ml, respectivamente y, 227-09 en San Francisco, con 2400 UFC/100ml.

3.5. USOS POTENCIALES

En la actualidad, el principal aprovechamiento de los manantiales termominerales de Cundinamarca es en balnearios con fines de recreación y medicinales, no específicos. Como se presentada en la Tabla 11, existen otros usos menores como abastecimiento doméstico y para consumo del ganado. De acuerdo con las características de estos manantiales existen otras posibilidades de aprovechamiento a partir de temperatura estimada en profundidad y aún a partir del agua en las condiciones de descarga natural.

Como se planteó anteriormente, el recurso geotérmico del Departamento de Cundinamarca es de baja energía (menor a 125°C); la temperatura máxima estimada en profundidad a partir del geotermómetro de cuarzo es del orden de 100°C, en manantiales de Tibirita, Tabio, Gachetá y Paratebueno. Para estos municipios y de acuerdo con el Diagrama Lindal, de evaluación de usos potenciales del recurso geotérmico de acuerdo con la temperatura del reservorio (fig. 27), el uso de máximo requerimiento energético a partir del fluido geotérmico profundo (por extracción a través de pozos), es el secado de productos agrícolas y carnes y el calentamiento residencial o en invernaderos. Otros usos de menor requerimiento energético aplicables a la gran mayoría de los sistemas restantes, son los sistemas de refrigeración para bodegas de almacenamiento, acuicultura, calentamiento del suelo, biodegradación e incubado y cría de peces. Cualquiera de estos proyectos, cuya posibilidad se plantea en este documento de forma preliminar, con base en muy pocos criterios, deben estar soportados por estudios de exploración detallados a través de los

cuales se comprueben las temperaturas en profundidad, la existencia de reservorios y sus dimensiones, la idoneidad de la recarga y demás condiciones del sistema hidrotermal.

Tabla 11. Uso actual de manantiales de Cundinamarca.

Manantial	Municipio	No. IGM	Uso Actual	Infraestructura
BLOQUE 1				
El Hatico	Yacopí	189-01	Ganadería	Ninguna
La Tigretera	Villeta	208-02	Medicinal	Ninguna
Salsipuedes-Río Negro	Caparrapí	208-04	Medicinal	Ninguna
Casablanca	Ricaurte	245-01	Medicinal - Recreación	Piscinas
Azufrada La Quebrada	Ricaurte	245-02	Medicinal - Recreación	Ninguna
Los Chorros	Agua de Dios	245-03	Medicinal	Duchas
Los Chorros II	Agua de Dios	245-04	Medicinal	Duchas
Macanda	Guataquí	245-06	Abastecimiento doméstico, medicinal, ganadería	Ninguna
El Gran Pozo Azufrado	Tocaima	245-07	Medicinal, recreación	Piscinas
Los Pocitos Azufrados	Tocaima	245-08	Medicinal, recreación, abastecimiento doméstico	Piscinas
Azufrada Charcolargo	Apulo	246-01	Abastecimiento doméstico, ganadería, medicinal	Ninguna
BLOQUE 2				
El Salitre Y.	Yacopí	189-02	Ganadería, Recreación, Medicinal	Ninguna
San Ignacio	Villeta	208-03	Medicinal	Ninguna
El Peñón	Utica	208-05	Medicinal	Tanque en concreto
El Salitre U.	Utica	208-06	Medicinal y ganadería	Ninguna
Hotel Abacoa	Utica	208-07	Recreación - Medicinal	Piscina
El Espino	La Mesa	227-08	Medicinal - Recreación	Ninguna
Santa Lucía	Anapoima	246-02	Medicinal - Irrigación	Duchas
Santa Ana	Anapoima	246-03	Medicinal - Recreación	Duchas - Piscina
BLOQUE 3				
Nápoles	Chocontá	209-01	Recreación - Medicinal	Piscinas
Los Volcanes	Chocontá	209-02	Recreación - Medicinal	Piscinas
Hacienda Susatá	Nemocón	209-03	Ninguno	Ninguna
La Piscina Municipal	Nemocón	209-04	Recreación	Piscina
Agua Clara	Suesca	209-05	Recreación	Piscina
Repetidora	Chocontá	209-06	Ganado y abastecimiento doméstico	Ninguna
Los Volcanes 2	Chocontá	209-10	Recreación - Medicinal	Piscina - Turco
Los Volcanes 3	Chocontá	209-11	Recreación - Medicinal	Piscina - Turco
El Paraiso Codecal	Tibirita	210-01	Recreación - Medicinal	Piscina
El Paraiso Termal	Tibirita	210-02	Recreación - Medicinal	Piscina
Vereda Peñas	Manta	210-03	Medicinal - Recreación	Tanque techado
El Paraiso	Manta	210-04	Medicinal - Recreación	Tanque techado
El Zipa	Tabio	227-01	Recreación	Piscina
Aguas Calientes 3	Tabio	227-02	Recreación - Medicinal	Piscina privada
Bavaria	Bogotá	227-03	Ninguno	Fuente de agua
Los Lagartos	Bogotá	227-04	Medicinal Recreación	Pozo
Agua Caliente 2	Tabio	227-05	Ninguno	Estanque para peces
Agua Caliente 1	Tabio	227-06	Recreación - Medicinal	Piscina privada
El Zipa 2	Tabio	227-07	Recreación - Medicinal	Piscina
Agua Caliente S.F.	San Francisco	227-09	Recreación - Medicinal	Ninguna
Aguas Calientes G.	Guasca	228-01	Recreación	Piscina
Soratama	La Calera	228-02	Recreación - Medicinal	Piscina privada
Spa Helena del Mar	La Calera	228-03	Medicinal	Piscina
Montecillo	Guatavita	228-04	Medicinal	Ninguna
Quebrada El Zaque	Gachetá	228-05	Ninguno	
La Rivera	Gachetá	228-07	Recreación - Medicinal	Piscina
Los Volcanes Ch.	Choachí	247-01	Recreación - Medicinal	Piscina
Santa Mónica	Choachí	247-02	Recreación - Medicinal	Piscina
Azufrada	Pandi	265-01	Recreación - Medicinal	Piscina
BLOQUE 4				
Aguas Calientes-Sauna	Paratebuena	248-01	Recreación - Medicinal	Sauna rudimentario
Aguas Calientes-El Mohán	Paratebuena	248-02	Recreación - Medicinal	Ninguna
Playas R. Humea	Paratebuena	248-03	Medicinal - Recreación - Abastecimiento doméstico	Ninguna
Charco Largo	Santamaría del Batá	229-01	Medicinal Recreación	Ninguna

A continuación se dan algunas pautas generales sobre posibilidades de utilización de los manantiales de Cundinamarca, en sus condiciones de descarga natural, en acuicultura, prácticas agrícolas y usos medicinales específicos.

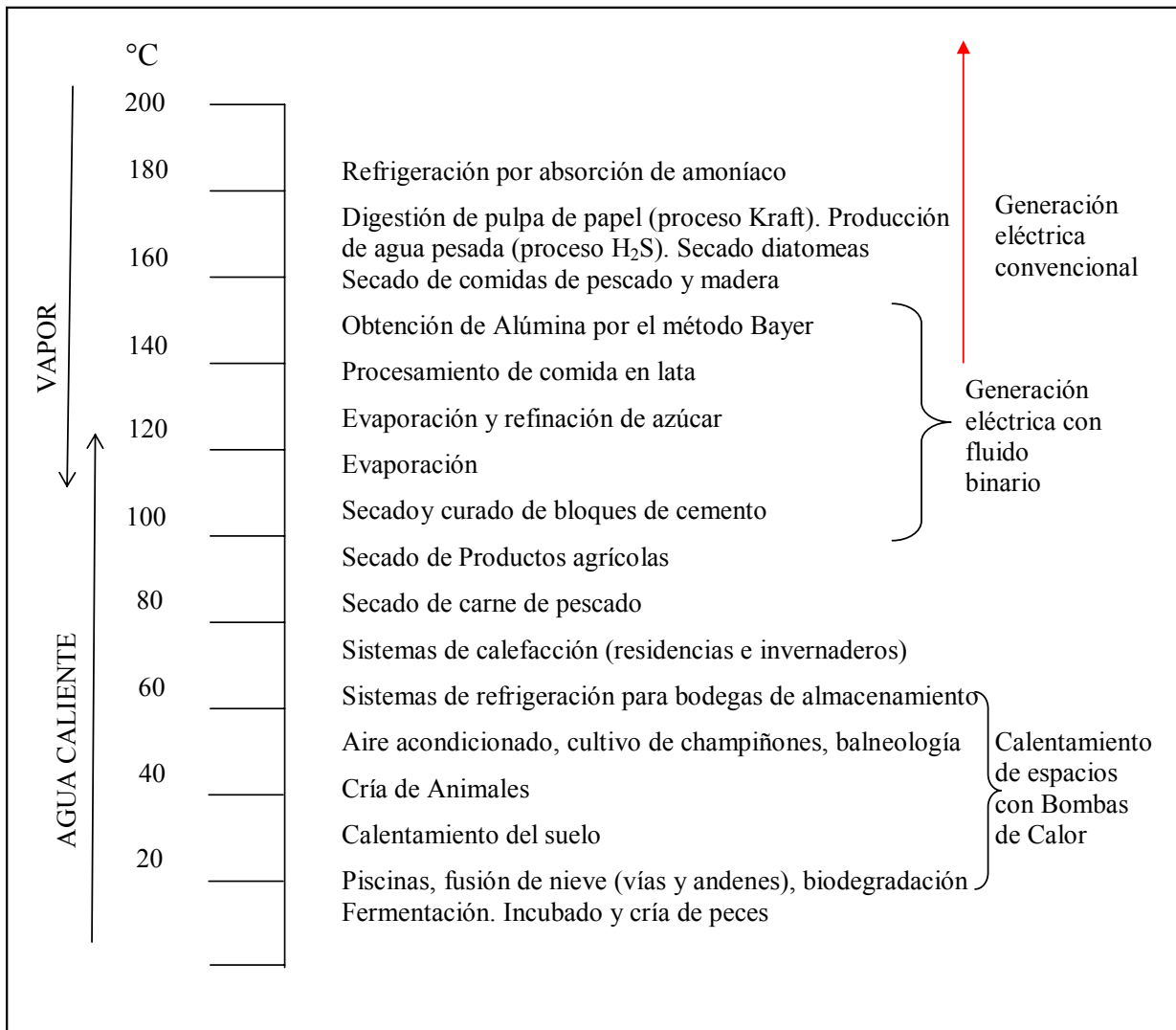


Figura 27. Diagrama Lindal, para evaluación de usos potenciales del recurso geotérmico, de acuerdo con la temperatura del reservorio. (Gudmundsson et al., 1985, en Lund et al., 1999) En la generación eléctrica se utilizan sistemas hasta de 325°C.

3.5.1. Acuicultura

La acuicultura está ampliamente difundida en Cundinamarca, según datos de URPA del año 2.000, 64 municipios desarrollan esta actividad en algún grado. Las especies más comunes en el departamento son: Trucha Arco Iris, Mojarra Roja, Mojarra Plateada, Cachama Blanca, Bocachico, Yamú, Carpa Espejo y Dorada. A pesar de que la acuicultura ha crecido en un 48% durante los últimos 8 años, en la actualidad se ve afectada por varios factores externos, entre los que se destacan el orden público y la dificultad para la distribución oportuna a los puertos aéreos internacionales (Beltrán & Villaneda, 2000).

En este inventario, se pudieron visitar 58 fuentes termales que se ubican en un rango de temperaturas de 21 a 74°C y tienen una clasificación química diversa, señalada en la Tabla 7, lo cual hace que el recurso geotérmico de Cundinamarca sea importante y apropiado para el uso directo, en este caso en particular brinda múltiples oportunidades para las aplicaciones en acuicultura. La implementación de esta técnica en Cundinamarca podría ser una práctica exitosa, ya que resolvería las dificultades que actualmente afronta la acuicultura convencional.

Con base en la temperatura de las fuentes termales de Cundinamarca, se pudieron seleccionar 35 con temperaturas superiores a los 30°C como las más promisorias para ser empleadas en acuicultura. Basados en la composición química de estas fuentes termales, para el cultivo de peces a partir de geotermia, se identificaron como los municipios más apropiados: Choachí, La Calera, Chocontá, Paratebueno, Ricaurte, San Francisco, Tabio, Titirita y Tocaima (ver Mapa de Fuentes Termales de Cundinamarca con Potencial Para Utilización en Acuicultura Geotérmica, en Anexo 4). Otros municipios con fuentes termales de temperaturas adecuadas como Bogotá, Gachetá, Guasca, Guatavita, Manta, Nemocón, Santa María del Bata y Suesca, muestran alcalinidades y durezas inferiores a los límites adecuados y se recomienda la utilización de intercambiadores de calor o un tratamiento adicional para las aguas. Sin embargo, termales cercanos a manantiales con mineralizaciones apropiadas como Nápoles (Chocontá) y Playas del Rio Humea (Paratebueno), también se observan con baja alcalinidad y dureza (Nápoles), lo que indica una mayor dilución para estas aguas.

Debido a que el recurso geotérmico ocurre en varios municipios, es posible evitar las zonas con dificultades de orden público; si lo que se quiere es cultivar especies atractivas para el mercado internacional también se podría escoger una ubicación en cercanías a Bogotá con el fin de llevar a cabo la distribución del producto de manera oportuna.

Las aguas termales pueden ser utilizadas para acuicultura empleando tanto el agua como el calor por ella contenido. Por ejemplo, las aguas que sean utilizadas directamente para el cultivo de peces deben seguir unos parámetros que se describen en la Tabla 2, donde se presentan los factores de calidad que es necesario tener en cuenta para una práctica exitosa de la acuicultura. Propiedades como la temperatura dependen de la especie que se vaya a criar, las demás condiciones físico-químicas del agua se deben conservar para garantizar el desarrollo y evitar la mortalidad de los especímenes. Esto implica que es necesario tener bajo control en todo momento estos parámetros, lo que no significa que las características físico-químicas del agua termal natural no se puedan modificar para ajustarlas a dichos parámetros. En el caso de una fuente termal con una salinidad sumamente alta como para poder formar parte del ambiente acuático de los peces, se puede utilizar solo su temperatura para calentar o ser mezclada con un fluido de características químicas que permitan reproducir el ambiente adecuado.

Con base en la temperatura de las fuentes termales de Cundinamarca, se pudieron seleccionar 35 con temperaturas superiores a los 30°C como las más promisorias para ser empleadas en acuicultura (Tabla 12). El límite inferior de temperatura se escogió debido a que la temperatura ideal de utilización es de 27°C y se calcula que en el proceso de transporte del fluido al lugar de utilización o en el proceso que se realiza en el

intercambiador de calor, se pueden perder en promedio 3°C por conducción térmica (ver fig. 28. Arreglo para Acuicultura con intercambiador de calor). En general, se puede establecer que existe un recurso de considerable importancia que tiene la posibilidad de ser empleado para acuicultura. Sin embargo hay que enfatizar que la calidad del agua, en algunos casos debido a su baja dureza o alcalinidad, no es adecuada para recrear el ambiente natural de los peces sin un tratamiento previo a la utilización.

Tabla 12. Manantiales termales de Cundinamarca adecuados para uso en Acuicultura. Los valores sombreados representan niveles por debajo de los límites adecuados y los amarillos se ubican por encima de dichos límites.

No. IGM	Manantial	Municipio	T°C	pH Lab	Alcalinidad	Dureza
227-03	Bavaria	Bogotá	31.1	7.1	16.9	31.2
227-04	Club Los Lagartos	Bogotá	36	7.3	24.4	48.9
247-01	Los Volcanes Ch.	Choachí	35	7.68	120.8	254.2
247-02	Santa Monica	Choachí	50.2	7.8	79.8	149.8
209-01	Napoles	Chocontá	46.7	7.26	11.4	26.0
209-02	Los Volcanes	Chocontá	53.7	7.73	50.0	94.5
209-10	Los Volcanes 2	Chocontá	53.2	7.4	56.7	104.7
209-11	Los Volcanes 3	Chocontá	58.3	7.43	55.6	98.5
228-05	Qda. El Zaque	Gachetá	66.9	6.86	21.4	40.5
228-07	La Rivera	Gachetá	57.9	7	37.4	63.3
228-01	Aguas Calientes G.	Guasca	35.4	7.44	3.7	17.1
228-04	Montecillo	Guatavita	39	7.37	13.0	25.5
228-03	Spa H. del Mar	La Calera	33	7.83	73.6	150.9
210-03	Vereda Peñas	Manta	36.8	7.87	11.9	26.5
210-04	El Paraiso	Manta	32.9	7.75	12.5	29.3
209-03	Hacienda Susata	Nemocón	33.1	7.52	23.1	48.7
209-04	Piscina Municipal	Nemocón	33.7	7.06	8.9	17.2
248-01	Aguas Calientes-Sauna	Paratebueno	73.7	6.77	85.2	138.2
248-02	Aguas Calientes-El Mohán	Paratebueno	66	5.98	62.3	102.4
248-03	Playas R. Humea	Paratebueno	39.8	6.49	47.5	77.8
245-01	Casablanca	Ricaurte	31.8	7.36	201.6	365.9
245-02	Azufrada La Quebrada	Ricaurte	31.5	7.03	142.5	334.1
227-09	Agua Caliente S.F.	San Francisco	49.1	7.76	51.1	93.6
229-01	Charco Largo	Santamaría del Batá	34	6.11	29.5	53.2
209-05	Agua Clara	Suesca	33.2	6.82	6.5	11.5
227-01	El Zipa	Tabio	50	8.11	77.4	133.2
227-02	Aguas Calientes 3	Tabio	37.1	7.61	74.3	128.3
227-05	Aguas Calientes 2	Tabio	32	7.29	78.2	136.7
227-06	Aguas Calientes 1	Tabio	37.1	7.25	82.8	144.8
227-07	El Zipa 2	Tabio	59.5	7.52	78.0	137.5
210-01	El Paraiso Codecal	Tibirita	43.3	7.4	160.0	268.0
210-02	El Paraiso Termal	Tibirita	50.8	7.48	83.9	145.8
245-07	El Gran Pozo Azufrado	Tocaima	33.8	7.05	239.3	469.9
208-07	Hotel Abacoa	Útica	31	7.17	737.7	1,433.6
189-02	El Salitre Y.	Yacopí	46.8	7.11	672.1	1,218.8

Para poder cultivar peces y langostinos de agua dulce en estos sitios, se recomienda el empleo de intercambiadores de calor, que pueden hacer que un fluido con las condiciones químicas adecuadas sea calentado por el fluido geotérmico (ver Mapa de Fuentes Termales de Cundinamarca con Potencial Para Utilización en Acuicultura Geotérmica, en Anexo 4).

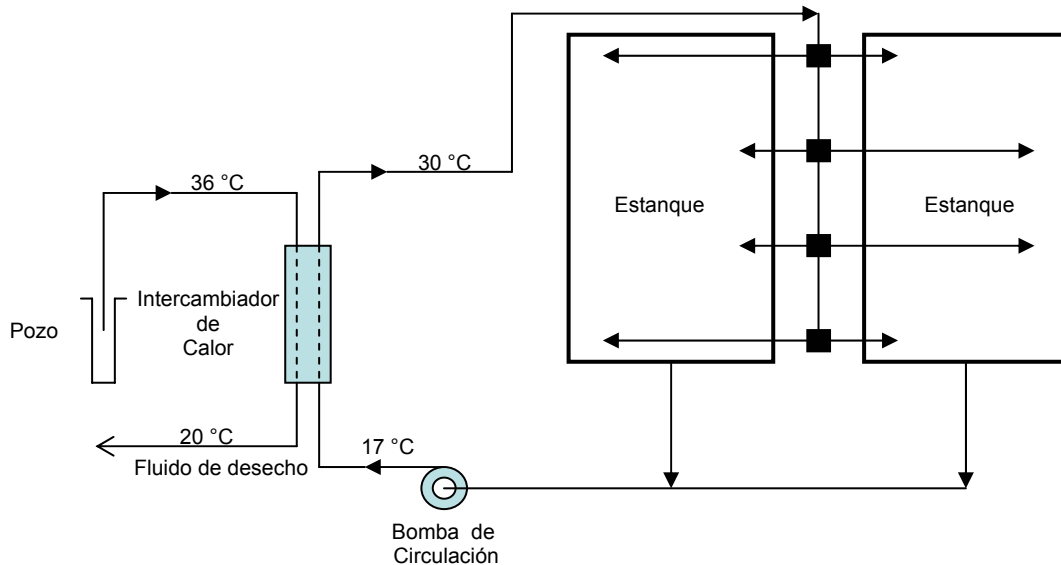


Figura 28. Arreglo para Acuicultura con intercambiador de calor.

Sistemas de acuicultura geotérmica que se podrían emplear en Cundinamarca:

Los materiales para construcción de los tanques deben ser resistentes a la corrosión y no tóxicos, como la fibra de vidrio y el concreto. En cuanto a las formas, las más comunes son rectangulares y circulares, siendo esta última la más popular, ya que normalmente facilita auto limpieza del tanque. Las formas rectangulares deben seguir las proporciones 30:3:1 para permitir un buen patrón de flujo. A continuación se describen 2 tipos de sistemas que podrían ser implementados en Cundinamarca:

- Sistema de flujo directo (flow through system):

En este sistema el agua termal que ingresa al tanque debe ya cumplir con los requisitos de calidad que se presentan en la Tabla 2. Además de un conducto de ingreso, el tanque debe contar con un drenaje, que en una forma circular, se ubica en el centro para evacuar los desechos. La aireación puede no ser requerida si el agua es cambiada rápidamente (una a cuatro veces por hora). Para soportar el requerimiento de oxígeno de 100 libras de Tilapia es necesario un flujo de 6 a 12 galones por minuto. El sistema de flujo directo, puede ser instalado de manera que aproveche la gravedad para su alimentación de agua. Los requerimientos de aireación pueden ser estimados utilizando los rangos de aireación y el consumo de oxígeno de la Tilapia, que consume 4.5 gramos de oxígeno por cada 100 libras

de pez cada hora en reposo y varias veces más oxígeno cuando se encuentran alimentándose y en actividad.

- Sistema de Recirculación (Recirculating System):

En este tipo de sistema del 90 al 99% del agua es reciclada. Los principales componentes para un sistema de recirculación son un filtro y un biofiltro. El filtro se emplea para remover desperdicios sólidos y el biofiltro es usado para remover productos de desecho tóxicos (amoníaco y nitrito) que son producidos por los peces.

Existen muchos diseños efectivos de biofiltros, pero todos operan bajo el mismo principio, proveer una gran superficie para atrapar bacterias vitrificadas que transforman amoníaco en nitrito, que luego es convertido en nitrato. El tamaño del biofiltro puede ser modificado luego de hacer un balance entre la cantidad de producción de amoníaco y la cantidad que se remueve.

3.5.2. Usos Agrícolas

De acuerdo a estos criterios, se seleccionaron los lugares con un potencial de aprovechamiento basado en la información primaria recolectada y que se sintetiza en el Mapa de Fuentes termales de Cundinamarca con Potencial para Usos Agrícolas, del Anexo 4. Este mapa representa las fuentes termales que dan indicios de un recurso geotérmico importante para el uso recomendado. Sin embargo, es necesario adelantar estudios geocientíficos detallados que permitan determinar el potencial concreto para cada sitio donde se piense implementar alguno de estos usos propuestos.

Las aguas termales en municipios como Pandi, Ricaurte, Agua de Dios, Tocaima, La Mesa, Apulo, Anapoima, Caparrapí, Útica y Yacopí, debido a sus características de temperatura y la altitud a la que se encuentran, son útiles para procesos agrícolas. Las fuentes termales con mayores temperaturas y en climas fríos ofrecen una mayor gama de usos, como es el caso de municipios como: Chocontá, Gachetá, Choachí, Tabio y Subachoque, donde se pueden hacer usos en secado, agricultura e invernaderos. Los municipios como Bogotá, La Calera, Guasca, Guatavita, Suesca y Nemocon, debido a que las temperaturas de sus fuentes termales no superan los 40°C, se consideran como apropiadas para ser utilizadas en invernaderos y usos agrícolas. Por el caudal y temperatura de las fuentes del municipio de Paratebueno, el uso es adecuado para secado y usos agrícolas, entre otros.

3.5.3. Usos mineromedicinales

La Tabla 13 presenta el resumen de la clasificación de los manantiales de Cundinamarca de acuerdo con los posibles usos mineromedicinales, incluyendo el agua natural de manantial embotellada. Para identificar los usos tópicos se tuvieron en cuenta, la temperatura, el contenido de minerales y la clasificación por anión dominante para aquellos con contenido mineral superior a 1g/l, de acuerdo con los criterios definidos por Amijo & San Martín (1994) y resumidos en el Anexo 3. Para usos como agua de manantial embotellada se tuvieron en cuenta, la temperatura, el contenido de sólidos totales disueltos y los criterios restrictivos (olor a H₂S, contenido de microorganismo indicadores de contaminación, y contenido de elementos menores, traza y metales pesados).

Tabla 13. Clasificación de los manantiales de Cundinamarca, de acuerdo con su uso potencial como aguas mineromedicinales.

No. IGM	Manantial	Clasificación por temperatura	Clasificación de acuerdo con su posible uso tópico ⁽¹⁾	Acción terapéutica de acuerdo con la temperatura del manantial	Restricciones para uso como agua natural de manantial embotellada			Posible uso como agua natural de manantial embotellada ⁽¹⁾
					Por olor a H ₂ S	Por exceso de Coliformes totales	Por exceso de elementos menores, traza o metales pesados	
						Rango de NMP*	Si/No	
BLOQUE 1								
189-01	El Hatico	Hipotermal	Clorurada	Efecto vasoconstrictor	No			Mn
208-02	La Tigrera	Hipotermal	Indeterminada	Efecto vasoconstrictor	Si	4000 - 28000	Si	
208-04	Salsipuedes-Rio Negro	Hipotermal	Sulfatada	Efecto vasoconstrictor	Fuerte	286 - 2000	No	
245-01	Casablanca	Mesotermal	Indeterminada	Estimulante, mejora circulación, activación de cambios metabólicos, vasoconstrictores	Fuerte	1 - 6	No	
245-02	Azufrada La Quebrada	Mesotermal	Indeterminada	Estimulante, mejora circulación, activación de cambios metabólicos, vasoconstrictores	Fuerte	0 - 0	No	Ba
245-03	Los Chorros	Mesotermal	Indeterminada	Sedante	No	71 - 500	No	P
245-04	Los Chorros II	Mesotermal	Indeterminada	Sedante	No	11 - 80	No	P
245-06	Macanda	Hipotermal	Bicarbonatada	Efecto vasoconstrictor	Fuerte	83 - 580	No	B
245-07	El Gran Pozo Azufrado	Mesotermal	Indeterminada	Estimulante, mejora circulación, activación de cambios metabólicos, vasoconstrictores	Fuerte	63 - 440	No	Ba
245-08	Los Pocitos Azufrados	Hipotermal	Sulfatada	Efecto vasoconstrictor	Fuerte	20 - 140	No	Mn
246-01	Azufrada Charcolargo	Hipotermal	Sulfatada	Efecto vasoconstrictor	Fuerte	157 - 1100	No	
BLOQUE 2								
189-02	El Salitre Y.	Mesotermal	Clorurada	Tratamiento contracciones e hipertonia muscular	No	8 - 59	No	B
208-03	San Ignacio	Hipotermal	Sulfatada	Efecto vasoconstrictor	Fuerte	-	No	B
208-05	El Peñón	Hipotermal	Clorurada	Efecto vasoconstrictor	Si	157 - 1100	No	B
208-06	El Salitre U.	Hipotermal	Clorurada	Efecto vasoconstrictor	No	157 - 1100	No	B
208-07	Hotel Abacoa	Mesotermal	Sulfatada	Estimulante, mejora circulación, activación de cambios metabólicos, vasoconstrictores	Si	357 - 2500	No	Mn
227-08	El Espino	Hipotermal	Sulfatada	Efecto vasoconstrictor	Si	-	No	B
246-02	Santa Lucia	Hipotermal	Sulfatada	Efecto vasoconstrictor	No	11 - 79	No	Mn
246-03	Santa Ana	Hipotermal	Sulfatada	Efecto vasoconstrictor	No	0 - 0	No	Sulfatada cálcica, yodadurada

Tabla 13. Continuación. Clasificación de los manantiales de Cundinamarca, de acuerdo con su uso potencial como aguas mineromedicinales.

No. IGM	Manantial	Clasificación por temperatura	Clasificación de acuerdo con su posible uso tópico ⁽¹⁾	Acción terapéutica de acuerdo con la temperatura del manantial	Restricciones para uso como agua natural de manantial embotellada			Posible uso como agua natural de manantial embotellada ⁽¹⁾
					Por olor a H ₂ S	Por exceso de Coliformes totales	Por exceso de elementos menores, traza o metales pesados	
						Rango de NMP*	Si/No	
BLOQUE 3								
209-01	Nápoles	Mesotermal	Indeterminada	Tratamiento contracciones e hipertonía muscular	No	43 - 300	No	Mn
209-02	Los Volcanes	Hipertermal	Indeterminada	Depende de la temperatura de utilización	Si	1129 - 7900	No	
209-03	Hacienda Susatá	Mesotermal	Indeterminada	Estimulante, mejora circulación, activación de cambios metabólicos, vasoconstrictores	No	0 - 0	No	Diurética
209-04	La Piscina Municipal	Mesotermal	Indeterminada	Estimulante, mejora circulación, activación de cambios metabólicos, vasoconstrictores	Si	0 - 0	No	
209-05	Agua Clara	Mesotermal	Indeterminada	Estimulante, mejora circulación, activación de cambios metabólicos, vasoconstrictores	No	29 - 200	No	P
209-06	Repetidora	Hipotermal		Efecto vasoconstrictor	No	57 - 400	No	P
209-10	Los Volcanes 2	Hipertermal	Indeterminada	Depende de la temperatura de utilización	Si	486 - 3400	No	
209-11	Los Volcanes 3	Hipertermal	Indeterminada	Depende de la temperatura de utilización	Si	43 - 300	No	
210-01	El Paraiso Codecal	Mesotermal	Clorurada, silícea	Tratamiento contracciones e hipertonía muscular	No	17 - 120	No	B, P, Ba
210-02	El Paraiso Termal	Hipertermal	Indeterminada silícea		No	11 - 80	No	B
210-03	Vereda Peñas	Mesotermal	Indeterminada	Sedante	No	500 - 3500	No	B
210-04	El Paraiso	Mesotermal	Indeterminada	Estimulante, mejora circulación, activación de cambios metabólicos, vasoconstrictores	No	243 - 1700	No	B
227-01	El Zipa	Hipertermal	Clorurada, silícea		No	4714 - 33000	Si	Ba
227-02	Aguas Calientes 3	Mesotermal	Clorurada, silícea	Tratamiento contracciones e hipertonía muscular	No	1571 - 11000	No	Ba
227-03	Bavaria	Mesotermal	Indeterminada	Estimulante, mejora circulación, activación de cambios metabólicos, vasoconstrictores	No	29 - 200	No	P, Cr
227-04	Los Lagartos	Mesotermal	Indeterminada	Sedante	No	14 - 100	No	P, Cr

Tabla 13. Continuación. Clasificación de los manantiales de Cundinamarca, de acuerdo con su uso potencial como aguas mineromedicinales.

No. IGM	Manantial	Clasificación por temperatura	Clasificación de acuerdo con su posible uso tópico ⁽¹⁾	Acción terapéutica de acuerdo con la temperatura del manantial	Restricciones para uso como agua natural de manantial embotellada			Posible uso como agua natural de manantial embotellada ⁽¹⁾
					Por olor a H ₂ S	Por exceso de Coliformes totales	Por exceso de elementos menores, traza o metales pesados	
BLOQUE 3						Rango de NMP*	Si/No	
227-05	Finca Agua Caliente 2	Mesotermal	Clorurada	Estimulante, mejora circulación, activación de cambios metabólicos, vasoconstrictores	No	5286 - 37000	Si	Ba
227-06	Finca Agua Caliente 1	Mesotermal	Clorurada, silícea	Sedante	No	4286 - 30000	Si	Ba
227-07	El Zipa 2	Hipertermal	Clorurada silícea		No	117 - 820	No	Ba
227-09	Agua Caliente S.F.	Mesotermal	Indeterminada		No	171 - 1200	No	
228-01	Aguas Calientes G.	Mesotermal	Indeterminada	Sedante	No	86 - 600	No	P, Mn
228-02	Soratama	Hipotermal	Clorurada	Efecto vasoconstrictor	Si	171 - 1200	No	Ba
228-03	Spa Helena del Mar	Mesotermal	Clorurada	Estimulante, mejora circulación, activación de cambios metabólicos, vasoconstrictores	Si	5 - 33	No	Ba
228-04	Montecillo	Mesotermal			No	38571 - 270000	Si	P, Cr
228-05	Quebrada El Zaque	Hipertermal	Indeterminada silícea	Depende de la temperatura de utilización	No	-	No	
228-07	La Rivera	Hipertermal	Clorurada bicarbonatada silícea	Depende de la temperatura de utilización	No	-	No	
247-01	Los Volcanes Ch.	Mesotermal	Indeterminada	Sedante	Si	43 - 300	No	Mn
247-02	Santa Mónica	Hipertermal	Indeterminada	Depende de la temperatura de utilización	Fuerte	3 - 20	No	Mn
265-01	Azufrada	Hipotermal	Indeterminada	Efecto vasoconstrictor	Fuerte	-	No	Mn
BLOQUE 4								
248-01	Aguas Calientes-Sauna	Hipertermal	Indeterminada silícea	Depende de la temperatura de utilización	Interferencia por hidrocarburos	3 - 22	No	Mn
248-02	Aguas Calientes-El Mohán	Hipertermal	Indeterminada silícea	Depende de la temperatura de utilización	Interferencia por hidrocarburos	1 - 6	No	Mn
248-03	Playas R. Humea	Mesotermal	Indeterminada	Tratamiento contracciones e hipertonia muscular	No	91 - 640	No	Mn
229-01	Charco Largo	Mesotermal	Indeterminada	Estimulante, mejora circulación, activación de cambios metabólicos, vasoconstrictores	No	73 - 510	No	Diurética

(1) La identificación del posible uso, se basa en los criterios de clasificación presentados en el Anexo 6.

Un resumen de los posibles usos mineromedicinales es presentado en los mapas del Anexo 4.

La identificación de los usos posibles, señalada en la tabla anterior, se hizo a partir de la comparación de la composición química y microbiológica de los manantiales, con la clasificación de Armijo & Sanmartín (1994) resumida por Alfaro et al., 2002 (Anexo 3) y con los contenidos límites, establecidos por la regulación colombiana para agua potable y envasada (Decreto 475 de 1998 y Resolución 12186 de 1991) y para usos del agua (Decreto 1594 de 1984), respectivamente. Dado que los límites de coliformes totales en agua natural están expresados en número más probable (NMP) se asumió el criterio experimental promedio de que una colonia está formada por uno o máximo 7 individuos para poder relacionar con las mediciones reportadas en unidades formadoras de colonias (UFC)¹¹. Es decir que el número total de coliformes fecales estaría entre el número de colonias (UFC) reportado y esa cifra dividida por 7. A este rango corresponde la columna “Restricciones para uso como agua mineral – Por exceso de Coliformes totales”, de la Tabla 13.

Para la recomendación de usos tópicos se tuvo en cuenta todo el rango de temperatura de los manantiales en superficie, considerando que aún no termales, con temperatura inferior a la indiferente (34-36°C), tienen actividad vasoconstrictora y que en su mayoría éstos se ubican en municipios calientes. Para las aguas de mesa envasadas se consideraron los manantiales con temperatura máxima de 35°C, dado que como plantean Armijo & Sanmartín (1994), a partir de esta temperatura los manantiales se utilizan normalmente para usos tópicos, entre otras cosas por la posible inestabilidad del agua al disminuir su temperatura. Adicionalmente se consideraron variables que podrían restringir el uso de las aguas de los manantiales, principalmente como agua de mesa, tales como olor a H₂S o a hidrocarburos, concentraciones por encima de los límites permitidos para agua potable, de coliformes fecales, metales pesados ((Mn y Cr total) y elementos menores (bario y boro). El fósforo que en ocasiones supera el límite permitido no se consideró excluyente para el uso como agua envasada dado sus niveles moderados y su probable origen en prácticas agrícolas que podrían evitarse a través de identificación y protección de áreas de recarga, en caso de implementar este aprovechamiento.

A continuación se describen de una manera global, los usos potenciales recomendados como aguas mineromedicinales. Se advierte que la materialización de estos usos, exige la ejecución de estudios de exploración detallados que permitan, probar la existencia de los posibles reservorios, estimar las dimensiones del recurso geotérmico, identificar la zona de recarga para implementar planes de protección, definir la estabilidad térmica, química y microbiológica de los manantiales, hacer caracterizaciones específicas como los análisis de Estafilococo Dorado y Legionella, para usos tópicos y de potencial redox, DQO y DBO para uso como agua envasada, e integrar investigaciones y ensayos médicos.

En el Bloque 1, los manantiales 208-02 de Villeta, 245-01 y 245-02 de Ricaurte, 245-03 y 245-04 de Agua de Dios, 245-06 de Guataquí y 245-07 de Tocaima, podrían ser aprovechados en usos tópicos (baños y duchas) como aguas indeterminadas en tratamientos de procesos álgicos y contracturantes de aparato locomotor, articulares o musculares, de

¹¹ Comunicación verbal con el Químico Gerardo Navas. Laboratorio Acualab. Bogotá

origen reumático, traumático, distrófico, algias pelvianas, enterocolitis espasmódicas y álgicas, dermatosis crónicas pruriginosas, gota articular. En razón de su temperatura, los manantiales 245-01 y 245-02, tienen actividad como estimulantes, en el mejoramiento de la circulación y activación de cambios metabólicos y en el tratamiento de contracciones e hipertonia muscular y los manantiales 245-03 y 245-04, como sedantes. Adicionalmente estos últimos, podrían ser utilizados como agua mineral natural envasada con propiedades diuréticas, derivadas de su muy baja mineralización.

El manantial 189-01 de Yacopí, por su carácter clorurado podría tener propiedades como coadyuvante o apoyo a tratamientos de 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 distonías vegetativas, enfermedades psicósomáticas y estado de estrés psíquico.

Los manantiales 208-04 y 245-08, de carácter sulfatado y mineralización mayor que 1 g/l, podrían tener uso tópico en tratamiento en enfermedades de la piel como la psoriasis.

En el Bloque 2, los usos tópicos sugeridos se derivan del carácter sulfatado y clorurado de sus aguas. Los manantiales sulfatados 246-01 de Apulo, 208-03 de Villeta, 208-07 de Útica, 227-08 de La Mesa, 246-02 y 246-03 de Anapoima, podrían ser utilizados en tratamiento de psoriasis. Además, el manantial 208-07 tendría propiedades derivadas de su temperatura como estimulante, agente de mejoramiento de la circulación y activador de cambios metabólicos. El manantial 246-03, podría ser utilizado como agua mineral natural envasada dado que por ser sulfatada cálcica tendría actividad sobre el equilibrio neurovegetativo (simpático), acción diurética (prevención de formaciones calcúscas), procesos hepatobiliares (en tratamiento de migraña, colitis) y por su carácter yodada, tendría la propiedad de prevenir el bocio.

Los manantiales más salinos, 189-02 de Yacopí y 208-05 y 208-06 de Útica, tendrían propiedades relacionadas con su carácter clorurado (Anexo 3), en tratamiento de enfermedades reumáticas y otras citadas para el manantial 189-01, del Bloque 1. Dependiendo de la temperatura de utilización, el manantial hipertermal 189-02, podría ser utilizado además como estimulante, sedante o en tratamiento de contracciones e hipertonia muscular.

En el Bloque 3, la gran mayoría de los manantiales termales (19) tienen potencial de utilización como aguas indeterminadas (Anexo 3), dada su baja mineralización. Estos son: 209-01, 209-02, 209-10 y 209-11 de Choncontá, 209-03 y 209-04, de Nemocón, 209-05 de Suesca, 210-02 en Tibirita, 210-03 y 210-04, en Manta, 227-03 y 227-04 en Bogotá, 227-09 en San Francisco, 228-01 en Guasca, 228-05 en Gachetá, 247-01 y 247-02 en Choachí y 265-01 en Pandi. El manantial 209-06 podría ser utilizado como agua de mesa diurética, dada su baja temperatura y mineralización. No se le incluye como manantial indeterminado, dado que es también de baja temperatura 22.2°C y pertenece al municipio de Chocontá, cuya temperatura ambiente es baja (13°C). En la Tabla 10 se indican propiedades

adicionales, derivadas de la temperatura natural o de utilización, en el caso de las hipertermales.

En el Bloque 3, se registran además los manantiales clorurados 210-01 en Tibirita, 227-01, 227-02, 227-05, 227-06 y 227-07 de Tabio, 228-02 y 228-03 en La Calera. A excepción del 228-02, estos manantiales son mesotermales o hipertermales, lo cual refuerza sus propiedades terapéuticas. Como se ha señalado para este tipo de recurso, estos manantiales podrían utilizarse como coadyuvante en múltiples tratamientos, citados arriba para el caso del manantial 189-01.

Adicionalmente, los manantiales 210-01, 210-02, 227-01, 227-02, 227-06, 227-07 y 228-05 son silíceas, lo cual les imparte las propiedades para flexibilizar y elastizar la piel y para aliviar la esclerodermia (endurecimiento de la piel).

Por otra parte el manantial 228-07 de Gachetá, es además de clorurado, bicarbonatado y silíceo, por lo cual podría ser utilizado también para tratamiento de neuralgias, dermatopatías, ginecopatías y para flexibilizar la piel. Este tendría aplicaciones adicionales derivadas de su temperatura de utilización, como se indica en el Anexo 3.

Considerando la alta carga microbiológica del manantial 228-04 (Guatavita) que por su composición sería indeterminado y por su temperatura podría ser utilizada en tratamiento de contracciones e hipertonia muscular, no se recomienda aprovechamiento alguno en las condiciones actuales. Si el interés de la localidad fuera utilizar este recurso en usos mineromedicinales, se haría necesario establecer la fuente y naturaleza de la carga microbiológica, así como identificar su área de protección para tomar las medidas técnicas de protección necesarias.

Finalmente, todos los manantiales del Bloque 4, tendrían uso potencial como aguas indeterminadas. Los manantiales 248-01 y 248-02, de Paratebuena, son además silíceos con propiedades de flexibilización de la piel. Por ser manantiales hipertermales, pueden además ofrecer los beneficios de todos los rangos de temperatura, dependiendo de cuál sea la de utilización.

Finalmente, el manantial 229-01, del municipio de Santamaría del Batá en Boyacá, podría ser utilizado también como agua de mesa diurética, dada su baja mineralización.

4 CONCLUSIONES

- 4.1 La temperatura de los manantiales termales del Departamento de Cundinamarca, muestra una tendencia global a incrementarse desde el Bloque 1, al occidente, hacia el Bloque 4, al oriente. La distribución de estos manantiales registra por lo menos tres tendencias aproximadamente lineales NE-SW, las cuales relacionan grupos de manantiales con temperatura semejante, en los Bloques 1 y 3. Es decir que podría existir una relación entre tectónica regional y la ocurrencia de las fuentes termales de este departamento.
- 4.2 En Cundinamarca se registran por lo menos 42 manantiales termales, 11 de ellos calientes (con temperatura mayor a 50°C) distribuidos en el Bloque 3 (Gachetá, Tibirita, Chocontá, Tabio y Choachí) y el Bloque 4 (Paratebueno). La temperatura máxima en superficie, equivalente a 73.7°, corresponde a uno de los manantiales de Paratebueno.
- 4.3 Aunque la mayoría de las fallas cartografiadas en Cundinamarca son de tipo compresivo, la surgencia de los manantiales, generalmente asociada a fallamiento distensivo, sugiere la posibilidad de que existan sectores con comportamiento distensivo o pequeñas fallas distensivas, no cartografiadas.
- 4.4 De acuerdo con la clasificación por anión dominante, los manantiales de los Bloques 1 y 2, de menor temperatura, son esencialmente bicarbonatados y sulfatados, mientras que los de los Bloques 3 y 4, con mayor temperatura, son principalmente bicarbonatados y clorurados. La concentración de cloruros en los Bloques 3 y 4, exceptuando los manantiales de La Calera, parece estar gobernada por un mayor tiempo de residencia y/o por infiltración más profunda. Como los manantiales de La Calera, los Yacopí y Útica de los Bloques 1 y 2, reciben la contribución de una fuente no termal clorurada sódica, que eleva su concentración de sólidos totales disueltos hasta 15700 mg/l en uno de los manantiales de Yacopí.
- 4.5 Los termómetros geoquímicos indican, para los probables reservorios de agua caliente, temperaturas del orden de 100°C, a partir de lo cual se infiere un recurso geotérmico de baja energía (temperatura inferior a 125°C). No obstante, es posible que la temperatura alcance magnitudes máximas de 115°C en Paratebueno, 170°C, en Tabio, 137°C y Gachetá y 190° en Tibirita, como se estima a partir del modelo Entalpía-Sílice, es decir que es posible que los de Tabio, Gachetá y Tibirita, sean sistemas geotérmicos de energía intermedia (entre 125 y 225°C).

- 4.6 En Cundinamarca, el gradiente geotérmico inferido es normal aunque se registran anomalías mesotermiales (valor máximo del orden de 60°C/km). Como se espera a partir de la temperatura superficial, los manantiales que señalan los gradientes mayores se localizan en los municipios de Gachetá, Tabio, Tibirita y Paratebuena.
- 4.7 En general los manantiales de Cundinamarca están exentos de contaminación con minerales pesados. Las excepciones muy escasas se deben a la presencia de manganeso y cromo total, en concentraciones que exceden muy ligeramente los límites permitidos aún para agua potable.
- 4.8 Los manantiales inventariados en el Departamento de Cundinamarca, tienen una carga microbiológica alta, lo cual pone en evidencia la necesidad de realizar estudios de identificación de zonas de recarga para delimitar zonas de protección y poner en práctica otras medidas que aseguren la sostenibilidad del recurso. El agua de estos manantiales podría ser potabilizada por filtración para potabilización; la excepción es el manantial 228-04 en Guatavita, dado que excede la concentración máxima permitida para agua natural con posibilidad de potabilización por dicho procedimiento. Se debe tener en cuenta que de acuerdo con normas internacionales, el procedimiento de microfiltración no es permitido, para la producción aguas minerales naturales embotelladas, las cuales deben ser libres de microorganismos patógenos, en su estado natural.
- 4.9 Al recurso geotérmico de Cundinamarca, está asociada la ocurrencia de un buen número de manantiales de temperatura y composición muy variadas, que podrían ser utilizadas para mejorar la calidad de vida de las comunidades locales, a través de la optimización e implementación de nuevos balnearios para recreación y práctica de terapias médicas específicas. De igual manera, algunos de estos manantiales podrían ser aprovechados como agua natural envasada oligometálica o de mineralización media.
- 4.10 Con base en la temperatura de las fuentes termales de Cundinamarca, se pudieron seleccionar 35 con temperaturas superiores a los 30°C como las más promisorias para ser empleadas en acuicultura. En general, se puede establecer que existe un recurso de considerable importancia que tiene la posibilidad de ser empleado para acuicultura. Para poder cultivar peces y langostinos de agua dulce en estos sitios, se requiere complementar la mineralización de las aguas en algunos de estos sitios, mencionados anteriormente, incrementando la mineralización de las aguas o prospectando un fluido más adecuado por medio de pozos que permitan la obtención de un fluido menos diluido.
- 4.11 Para el cultivo de peces a partir de geotermia, se identificaron como los municipios más apropiados: Choachí, La Calera, Chocontá, Paratebuena, Ricaurte, San Francisco, Tabio, Tibirita y Tocaima. Otros municipios con fuentes termales de temperaturas adecuadas como: Bogotá, Gachetá, Guasca, Guatavita, Manta, Nemocón, Santa María del Bata y Suesca, muestran alcalinidades y durezas inferiores a los límites establecidos, posiblemente debido a dilución por mezcla con agua superficial. Así, fuentes termales cercanas a manantiales con mineralizaciones apropiadas como Nápoles (Chocontá) y

Playas del Rio Humea (Paratebueno), también se observan con baja alcalinidad y dureza, lo que podría indicar una mayor dilución para estas aguas.

- 4.12 Los usos agrícolas para el caso específico de Cundinamarca se benefician de varias ventajas de infraestructura, sobre todo en el aprovechamiento de productos con potencial de exportación, considerando que Cundinamarca junto con Bogotá, conforman la primera región exportada de Colombia.
- 4.13 El uso directo de los recursos geotérmicos del departamento, puede contribuir a mejorar la calidad y cantidad de ciertos productos agrícolas que son cultivados tradicionalmente en Colombia. Las principales ventajas de este tipo de agricultura radican en la facilidad que presta a los cultivadores de poder manipular el ambiente de crecimiento y de esta forma poder llevar a cabo un proceso productivo de mayor rendimiento.
- 4.14 A pesar de que el recurso geotérmico de Cundinamarca es de baja entalpía, son muchos los usos que se pueden obtener con un adecuado manejo de las fuentes termales con que cuenta el departamento. El cultivo de especies no tradicionales como las algas y los hongos, podría abrir un nuevo campo de oportunidades para inversionistas y cultivadores interesados en productos especiales, que en los últimos años han demostrado ser latamente rentables y de gran proyección en los mercados local y extranjero.
- 4.15. La tectónica regional puede influenciar tanto la ocurrencia de las fuentes termales como su temperatura. Las termales de la Sabana de Bogotá, Bloque 3, por sus bajas temperaturas y mineralización, sugieren que son calentadas por el gradiente geotérmico normal. El fallamiento local parece ser lo suficientemente profundo como para servir de conducto por el cual viaja agua subterránea, calentada en niveles relativamente profundos de la cuenca, hasta alcanzar la superficie donde aflora en forma de una fuente termal de temperatura baja a intermedia. Las zonas de fractura, que permiten el paso de los fluidos, están relacionadas con fallas de tipo regional y son conductos muy eficientes, tanto para la recarga como para la descarga de agua subterránea, lo cual hace que en profundidad la interacción fluido-roca sea muy corta, y evita el intercambio iónico que se refleja en la mineralización del fluido y la alteración de la roca.
- 4.16. Las fuentes termales de Paratebueno, presentan temperaturas anómalas, consideradas para el ambiente geológico de la Cordillera Oriental, donde una fuente de calor de alta temperatura resulta difícil de explicar. Sin embargo, la localización de estas fuentes termales, sobre el trazo de la Falla Guaicaramo, sugiere que, además del conducto que puede ser este sistema de fallas para la ocurrencia de las fuentes termales, está también relacionado con el origen del calor. Las fuentes termales de Paratebueno, parecen ser calentadas en profundidad por rocas que sufren la deformación generada por la tectónica de la zona, lo que hace que una gran cantidad de calor se almacene allí y sea transmitido por conducción térmica al agua subterránea. El calentamiento en profundidad puede implicar ebullición y la generación de un sistema convectivo en la zona de fractura. Es aquí donde la ocurrencia de estas fuentes termales tendría gran

importancia, ya que puede ser un indicio de la actividad tectónica de la zona y el estudio de su fuente de calor puede ayudar a entender no solo estas relaciones tectónicas regionales, sino también la forma como este gradiente geotérmico anómalo y sectorizado está afectando la maduración de la cuenca.

5 RECOMENDACIONES

- 5.1 Extender el alcance del inventario de manantiales a estudios de exploración aun hasta la etapa de perforación, con el fin de confirmar la existencia de reservorios geotérmicos y sus características como dimensiones, recarga, temperatura y permeabilidad, indispensables para determinar el aprovechamiento sostenible del recurso, principalmente en los sistemas de los municipios de Tibirita, Tabio, Gachetá y Paratebuena, en los cuales de comprobarse una temperatura intermedia, ampliarían su potencial de utilización a usos industriales de mayor requerimiento energético.
- 5.2 Completar y monitorear por un período mínimo de un año, las caracterizaciones geoquímica y microbiológica de todos los manantiales, con el fin de verificar su estabilidad en el tiempo. Se recomienda incluir los análisis Legionella y Estafilococo dorado, en manantiales con potencial de aprovechamiento en balnearios y los de DBO, DQO y oxígeno disuelto, en manantiales probablemente utilizables para producir agua de mesa envasada.
- 5.3 Promover la investigación multidisciplinaria e interinstitucional para materializar los usos directos recomendados (aguas mineromedicinales, acuicultura y agricultura) y para ajustar a las condiciones locales, las técnicas utilizadas en otros lugares del mundo, en estos desarrollos.
- 5.4 Difundir entre la comunidad médica, la potencialidad de las aguas termales y recursos relacionados (peloides y algas) para promover su integración a esta investigación y dar el rigor científico suficiente a las recomendaciones planteadas.
- 5.5 Además de Tilapia, Cachama y Langostinos, en el departamento se pueden cultivar trucha y Bagre, que tienen un buen mercado local. En el caso de la trucha, a pesar de que es de clima y aguas frías, se ha observado en diversos ensayos que su crecimiento alcanza niveles óptimos cuando el agua en la que habita se mantiene permanentemente a 15°C. Para el Bagre, un cultivo sería exitoso considerando que es una especie muy resistente y que la gran cantidad de estos peces se captura en ríos, que por lo general están altamente contaminados, por lo que pueden incorporar en su organismo especies químicas que podrían ser tóxicas para los seres humanos. Lo que no ocurriría en un ambiente controlado como el que se lograría implementando la acuicultura geotérmica.
- 5.6 Aunque en este estudio se encontró una gran cantidad de fuentes termales adecuadas para uso directo, como la acuicultura, es recomendable llevar a cabo perforaciones con el fin de poder obtener un fluido de mayor calidad, temperatura y caudal. Para tener éxito en la ubicación del pozo, es necesario llevar a cabo estudios previos como geofísica y geología, para conocer la profundidad a la que se encuentra el agua termal,

la roca que la contiene y su profundidad. La explotación a través de pozos evita el deterioro de las fuentes termales y hace posible controlar el flujo según sea el requerimiento de la utilización con el fin de lograr un adecuado aprovechamiento del recurso.

- 5.7 Las grandes ventajas de mercadeo que ofrece Cundinamarca, no solo para el consumo local sino también para exportación, hacen que la rentabilidad de una empresa de este tipo pueda tener éxito. Sin embargo, se requiere de proyectos de investigación donde se hagan ensayos con bases científicas adecuadas que permitan desarrollar esta práctica de la manera adecuada.
- 5.8 Debido a la vocación agrícola que tiene Cundinamarca, el sector agrícola podría sacar provecho de una adecuada utilización del recurso geotérmico en la región. Se destacan los cultivos de tomate, pepino cohombro, lechuga hidropónica, plantas ornamentales, semillas y rosas, los cuales podrían ser rentables a pequeñas escalas. Sin embargo, es necesario aclarar que se requiere investigación y ensayos con las variedades locales, con el fin de determinar si las técnicas utilizadas en otros países exitosamente, son adaptables a la situación de Colombia.
- 5.9 Los invernaderos calentados a partir de un fluido geotérmico podrían beneficiar el crecimiento de frutas que son cultivadas en otros pisos térmicos como Piña y Papaya, que serían mercadeadas localmente.
- 5.10 Hacer un estudio específico de calefacción de suelos en la Sabana con miras a contrarrestar el efecto de las heladas que ocurren en tiempo de verano (diciembre y enero), particularmente en los cultivos de papa. A partir de un circuito sencillo de tuberías enterradas en el suelo es posible conducir el fluido termal a una temperatura de 21 °C, con la finalidad de que haya un intercambio de calor entre con el suelo y se pueda mantener constante durante toda la noche evitando que el hielo sobre las plantas permanezca demasiado tiempo en contacto con la planta antes de derretirse.
- 5.11 Con fines principalmente de exportación, en municipios con climas templados o cálidos donde se cultivan frutas tropicales, es posible hacer uso de la técnica del secado. Este producto tiene la gran ventaja de que se puede producir a bajos costos y ser almacenado por periodos de tiempo relativamente largos, lo que permite su exportación a países de estaciones donde la disponibilidad de frutas en general es escasa y las frutas tropicales en particular son muy apreciadas.

6 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ACOSTA, J. 1993. Cambios laterales de la Formación Hiló. Memorias VI Congreso Colombiano de Geología, Tomo I, pp. 182-195. Medellín.
- ACOSTA, J., CAICEDO, J., CÁRDENAS, J. y GUATAME, R. 2002. Mapa Geológico de Colombia, Plancha 245 – Girardot, Memoria Explicativa. Ingeominas, Esc: 1:100.000, 90 p, Bogotá.
- ACOSTA, J. y ULLOA, C. 1996. Geología de la Plancha 208 – Villeta, (en prensa) Ingeominas. Bogotá.
- ACOSTA, J. y ULLOA, C. 2001. Geología de la Plancha 246 – Fusagasugá, Memoria Explicativa (en prensa). Ingeominas, Esc. 1:100.000, 76 p. Bogotá.
- ACOSTA, J. y ULLOA, C. 2002. Mapa Geológico del Departamento de Cundinamarca. Memoria Explicativa. Ingeominas. Esc: 1:250.000. Bogotá.
- ACOSTA, J., ULLOA, C. y MARTÍNEZ, J. I. 1997. Geología de la Plancha 227 “Bogotá Noroeste”, (en prensa) Ingeominas. Bogotá.
- ALFARO, C. 2000. Mapa Geotérmico Versión 1.0. Escala a 1:1'500.000. INGEOMINAS. Memoria Explicativa. 41 p. Bogotá
- ALFARO, C. 2000. Geoquímica de manantiales minerales y termales de Cundinamarca. Primera campaña de muestreo. Ingeominas. 18 p. Bogotá
- ALFARO, C. 2002. Estudio isotópico de aguas del área geotérmica de Paipa. INGEOMINAS. Informe no publicado, 17 pp. , Bogotá.
- ALFARO, C., AGUIRRE, A., JARAMILLO, L.F. 2002. Inventario de fuentes termales en el Parque Nacional Natural Los Nevados. Informe Ingeominas. No publicado. 101 pp.
- ARCILA, N. A. 2000. Inventario de aguas termales y minerales, Sabana de Bogotá y flanco oriental de la Cordillera Oriental, Departamento de Cundinamarca. Ingeominas, Informe no publicado, 35 p., Bogotá.
- ARMIJO, M.; SAN MARTÍN J. 1994. Curas balnearias y climáticas. Talasoterapia y Helioterapia. Editorial Complutense. 688 p. España.
- BELTRÁN, C., VILLANEDA, A. 2.000. Perfil de la Pesca y la Acuicultura en Colombia. Instituto Nacional de Pesca y Acuicultura (INPA).

- BERMOUDES, O. y VELANDIA F. 1.999. Fallas longitudinales y transversales en la Sabana de Bogotá, Colombia. pp 1 – 12. Bogotá.
- BOYD, T., RAFFERTY, K. 1.997. Geothermal Greenhouse Information Package. GEOHEAT CENTER. Oregon Institute of Technology. pp. 2.1 – 4.11. Klamath Falls Oregon, E.U.
- BOYD, T., RAFFERTY, K. 1.998. Aquaculture Information Package. GEOHEAT CENTER. Oregon Institute of Technology. pp. 1.1 – 7.1. Klamath Falls Oregon, E.U.
- BÜRGL, H. 1957. Bioestratigrafía de la Sabana de Bogotá y alrededores. Bol. Geol., Serv. Geol. Nal., vol. 3, No. 2, Bogotá.
- BÜRGL, H. 1959. Estratigrafía y estructura de la región entre Chía y Tenjo, Departamento de Cundinamarca. Servicio Geológico Nacional, Informe 1331 (Inédito), 10 p., Bogotá.
- BÜRGL, H. 1960. El Jurásico e infracretáceo del Río Batá, Boyacá. Bol. Geol., Serv. Geol. Nal., vol. 6, No. 1 – 3, pp. 169 – 211, Bogotá.
- BÜRGL, H. 1961. Historia geológica de Colombia. Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. Vol. 11, No. 43, pp. 137 – 191, Bogotá.
- BÜRGL, H. y CAMPBELL, C. 1965. Section through the Eastern Cordillera of Colombia. Geol. Soc. America, vol. 76, No. 5.
- BÜRGL, H. y DUMIT, Y. 1954. El Cretáceo superior en la región de Girardot. Bol. Geol., Serv. Geol. Nal., vol. 2, No. 1, pp. 23-48, Bogotá.
- BUTTLER, J. W.1939. Geology of Middle and Upper Magdalena Valley. World Petroleum, 10, No. 3, pp. 95-100, New York.
- BUTTLER, J. W.1942. Geology of Honda District, Colombia. Bull. Am. Ass. Petr. Geol., vol. 26, No. 5, pp. 793-837, Tulsa.
- CÁCERES, C. y ETAYO, F. 1969. Bosquejo geológico de la región del Tequendama. Primer Congreso Colombiano de Geología (Opúsculo guía de excursión). 23 p.
- CAMPBELL, C. 1962. A section through the Eastern Cordillera of Colombia between Bogotá and Villavicencio. Colombian Society of Petroleum Geologists and Geophysicists, 4th Annual Field Conference.
- CASTRILLÓN, F. 2001. Caracterización geoquímica e isotópica de los acuíferos de la Cuenca Alta del Río Bogotá. Ingeominas. Informe interno. No publicado 33 pp.

- CLARK, I. and FRITZ, P. 1997. Environmental isotopes and hydrogeology. CRC Press. 328 pp. USA
- DE LA ROSA, J. M.C. y MOSSO ROMEO, M.A. Diversidad microbiana de las aguas termales. Disponible en: www.igme.es/internal/web_aguas/igme/publica/pdfart3/diversidad.pdf . Octubre 9 de 2002. 10 a.m.
- DE PORTA, J. 1965. Estratigrafía del Cretácico superior y Terciario en el extremo sur del Valle Medio del Magdalena. Bol. de Geol., UIS, No. 19, 50 p., Bucaramanga.
- DE PORTA, J. 1966. Geología del extremo sur del Valle Medio del Magdalena entre Honda y Guataquí. Bol. de Geol., UIS, No. 22 – 23, 347 p., Bucaramanga.
- DE PORTA, 1974. Colombia (deuxieme partie). L'éxique Stratigraphique International, vol. V, Fascicule 4b, Cntr. Nat. Rech. Sci., París.
- DICKSON, M. y FANELLY, M. 1995. Small Geothermal Resources. UNITAR/UNDP Center for Small Energy Resources. Pp 31 – 59. Roma, Italia.
- ETAYO, F. 1979. Zonation of the Cretaceous of Central Colombia by ammonites. Pub. Geol. Esp. Ingeominas, No. 2, pp. 1-186. Bogotá.
- FABRE, A. y DELALOYE, M. 1983. Intrusiones básicas cretácicas en las sedimentitas de la parte central de la Cordillera Oriental. Geol. Norandina, No. 6, Bogotá.
- FORERO, H. 1958. Extractos de informes e informaciones No. 1295. Investigaciones de Geología Económica. Servicio Geológico Nacional.
- GIGGENBACH, W. F., 1988. Geothermal solute equilibria. Derivation of Na-K-Mg-Ca geoindicators. Geochim. Cosmochim. Acta, 52: 2749-2765
- GIGGENBACH, W.F., 1989. Collection and analices of geothermal and volcanic water and gas discharges. Fourth Edition. Report CD2401. Department of Scientific and Industrial Research, Petone, New Zealand. 81 pp
- GIGGENBACH , W. F. 1991. Chemical Techniches in geothermal exploration. En: D'Amore, F. Application of Geochemistry in Geothermal Reservoir Development. 119-142. Rome.
- GOBERNACIÓN DE CUNDINAMARCA, Departamento Administrativo de Planeación. Mapa de Municipios con Acuicultura en Cundinamarca. URPA 2.000. URL:<http://www.cundinamarca.gov.co/cundinamarca>
- GOBERNACIÓN DE CUNDINAMARCA, Departamento Administrativo de Planeación. Mapa de Principales Cultivos Transitorios en Cundinamarca. URPA 2.000. URL:<http://www.cundinamarca.gov.co/cundinamarca>

- GOBERNACIÓN DE CUNDINAMARCA, Departamento Administrativo de Planeación. Mapa de Cultivos Anuales y con producción de café en Cundinamarca. URPA 2.000. URL: <http://www.cundinamarca.gov.co/cundinamarca>
- GOKCEN, G. 2002. Opportunities of geothermal energy use in Cundinamarca region-Colombia. pp 10 – 28, Izmir, Turkey.
- GÓMEZ, P. E. y PEDRAZA, P. 1994. El Maastrichtiano de la región Honda – Guaduas, límite N del Valle Superior del Magdalena. U. Nal. de Colombia. III-1 a III-19, Bogotá.
- GIUSANO, G. Y MANGIATERRA, M. Infecciones por levaduras en pacientes pediátricos hospitalizados. Disponible en <<http://www.unne.edu.ar/cyt/medicina/m-041.pdf>>. Mayo 21 de 2003.
- HETTNER, A. 1892. Die Kordillere von Bogota. Peterm. Mitt., Erg. –Bd. 22, Heft No. 104, 131 p., 9 Fig., 2 Taf. (Kart., Prof.).
- HOCHSTEIN, M. y REGENAUER-LIEB 1998. Heat generation with collision of two plates: the Himalayan geothermal belt. Journal of Volcanology and Geothermal Research. Vol. 83, pp 75 – 92.
- HOCHSTEIN, M. y SOENCKONO, S. 2001. Surface manifestations. Geothermal Institute, Geotherm 601, 10 p. Auckland, New Zealand.
- HUBACH, E. 1931. Exploración de la región de Apulo – San Antonio – Viotá. Bol. Min. Petr., T. 4, No. 25-27, pp. 41-60, Bogotá.
- HUBACH, E. 1957a. Estratigrafía de la Sabana de Bogotá y alrededores. Bol. Geol., Inst. Geol. Nal., vol. 5, No. 2, pp. 93 – 112, Bogotá.
- HUBACH, E. 1957b. Contribución a las unidades estratigráficas de Colombia. Inst. Geol. Nal., Informe 1212, 166 p., Bogotá.
- INGEOMINAS y UNIVERSIDAD DE LOS ANDES. 1997. Microzonificación Sísmica de Santa Fe de Bogotá. Ingeominas, Informe 2439, 130p, Bogotá.
- JULIVERT, M. 1963. Los rasgos tectónicos de la región de la Sabana de Bogotá y los mecanismos de formación de las estructuras. Boletín de Geología UIS, No. 13 – 14, pp. 1 – 104, Bucaramanga.
- KEHRER, W. 1933. El Carboniano del Borde Llanero de la Cordillera Oriental. Bol. Min. Petr., No. 49 – 54, pp. 105 – 121, Bogotá.
- LÓPEZ, J. y MURCIA, A. 1957. Fuentes saladas del Municipio de Nimaima, Cundinamarca. Instituto Geológico Nacional, Informe 1237, 14 p., Bogotá.
- LOZANO, E. 2002. Guía para inventario de fuentes termales. Ingeominas, informe interno

no publicado, 48 p., Bogotá.

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.

MARCHAND, E. Microorganismos indicadores de la calidad del agua de consumo humano en Lima Metropolitana. Disponible en http://sisbib.unmsm.edu.pe/bibvirtual/tesis/Basic/Marchand_P_E/antecedentes.htm. Mayo 21 de 2003.

MONTOYA, D. Y REYES, G. 2003. Geología de la Plancha 209 – Zipaquirá (en preparación). Ingeominas, Bogotá.

MORALES, L. G., et al. 1956. General geology and oil occurrences of the Middle Magdalena Valley, Colombia. Servicio Geológico Nacional. Informe No. 1480, pp. 1-76, Bogotá.

MORENO, M. 1991. Provenance of the lower Cretaceous sedimentary sequences, Central part, Eastern Cordillera, Colombia. Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. 18 (69). Bogotá.

NICHOLSON, K. 1993. Geothermal Fluids. Chemistry and Exploration Techniques. Springer Verlag. 263. Germany.

ORGANIZACIÓN LATINO AMERICANA DE ENERGÍA (OLADE), ICEL, GEOTÉRMICA ITALIANA S. R. L. AND CONTECOL. 1982. Estudio de Reconocimiento de los Recursos Geotérmicos de la República de Colombia. 455 pp.

PÉREZ, G., y SALAZAR, A. 1978. Estratigrafía y facies del Grupo Guadalupe. Geol. Col., No. 10, pp. 7-85, Bogotá.

PRATT, S. 1961. Cundinamarca – Boyacá Muzo emerald mines. Col. Soc. Petr. Geol. Geoph. Geological field-trips Colombia 1959-1978, pp. 33-64, Bogotá.

RAASVELDT, H. C. y CARVAJAL, J. M. 1957. Mapa geológico de la República de Colombia. Inst. Geol. Nal. Plancha M-8 (Ataco), Esc. 1:200.000, Bogotá.

RADELLI, L. 1967. Géologie des Andes colombiennes. Travaux de Géologie. Laboratorio Fac. Sc. de Grenoble. No. 6.

RENZONI, G. 1962. Apuntes acerca de la litología y tectónica de la zona al este y sureste de Bogotá. Bol. Geol., vol. 10, No. 1 -3, pp. 59 – 79, Bogotá.

RENZONI, G. 1965. Geología del Cuadrángulo L-11, Villavicencio. Serv. Geol. Nal. e Inventario Minero Nal., Esc. 1:200.000, Bogotá.

RENZONI, G. 1968. Geología del Macizo de Quetame. Geol. Col., No. 5, pp. 75-127,

Bogotá.

- RODRÍGUEZ, E. y ULLOA, C. 1976. Geología del Cuadrángulo K – 12, Guateque. Ingeominas, Informe 1701, Bogotá.
- RODRÍGUEZ, E. y ULLOA, C. 1994a. Mapa geológico de la Plancha 189 – La Palma. Ingeominas. Bogotá.
- RODRÍGUEZ, E. y ULLOA, C. 1994b. Mapa geológico de la Plancha 169 – puerto Boyacá. Ingeominas. Bogotá.
- ROYO Y GÓMEZ, J. 1946a. La hidrología subterránea al sur de la Loma de Suba (Cundinamarca). Ingeominas, Informe 509, 11 p, Bogotá.
- ROYO Y GÓMEZ, J. 1946b. Los manantiales termales de Las Pléyades, Municipio de Suba, Cundinamarca. Ingeominas, Informe 509A, 14 p, Bogotá.
- SARMIENTO, L.F. (2001). Mesozoic rifting and Cenozoic basin inversion history of the Eastern Cordillera, Colombian Andes: Inferences from tectonic models. Netherlands Research School of Sedimentary Geology (NSG), publicación No. 2002.01.01. 295 p.
- SAZ, PABLO. Crenoterapia. Aguas Minero-Medicinales. Clasificación. Disponible en http://www.unizar.es/med_naturista/hidroterapia/Crenoterapia.pdf. Mayo de 2003.
- SCHEIBE, R. 1918. Las fuentes calientes de Tabio. Ingeominas, Informe 380, 9 p, Bogotá.
- SCHEIBE, E. A. 1938. Estudios geológicos sobre la Cordillera Oriental de Colombia (Cordillera de Bogotá). Est. Geol. Pal. Cord. Col., 1ª parte, 58 p., Esc. 1:1000.000, Bogotá.
- SMITH, K. 1981a. Use of geothermal energy for aquaculture purposes, phase III, final report. GEOHEAT CENTER. Oregon Institute of Technology. pp 1 – 13. Klamath Falls, Oregon, E.U.
- SMITH, K. 1981b. A Layman's guide to geothermal aquaculture. GEOHEAT CENTER. Oregon Institute of Technology. pp 1 – 12. Klamath Falls, Oregon, E.U.
- ULLOA, C.; RODRÍGUEZ, E. y MONROY, G. 1978. Geología del Departamento de Cundinamarca. Informe Interno 1861. Ingeominas. 39 p. Bogotá.
- ULLOA, C. y RODRÍGUEZ, E. 1975. Mapa geológico del Cuadrángulo K-12 Guateque – Colombia. Ingeominas, Bogotá.
- ULLOA, C.; RODRÍGUEZ, E. 1979. Geología de las planchas 170 – Vélez y 190 – Chiquinquirá. Ingeominas, Informe No. 1794, Bogotá.
- ULLOA, C.; RODRÍGUEZ, E. 1991. Mapa geológico de la Plancha 190 – Chiquinquirá. Ingeominas, Bogotá.

- VAN DER HAMMEN, T. 1957. Estratigrafía palinológica de la Sabana de Bogotá (Cordillera Oriental). Bol. Geol., Inst. Geol. Nal., vol. 5, No. 2, pp. 189 – 203, Bogotá.
- VAN DER HAMMEN, T. 1958. Estratigrafía del Terciario y Maastrichtiano continentales y tectogénesis de los Andes Colombianos. Boletín Geológico, Servicio Geológico Nacional, VII 1-3, pp. 67-128. Bogotá.
- VAN DER HAMMEN, T. 1960. Estratigrafía del Terciario y Maastrichtiano continentales y tectogénesis de los Andes colombianos. Serv. Geol. Nal., Informe 1279, Bogotá.
- WHEELER. 1935. Tertiary stratigraphy of the Middle Magdalena Valley. Proc. Acad. Nat. Science. Philadelphia, Vol. 87 (1935), pp. 7-39.

ANEXO 1

GLOSARIO MÉDICO

(Tomado de Alfaro et al., 2002)

Abarticulares. Que no afectan a una articulación o que se encuentra lejos de una articulación.

Acción Zimosténica. Es la acción de las aguas alcalinas sobre el proceso enzimático digestivo.

Adenoideo. Semejante a una glándula.

Albuminuria. Presencia de albúmina sérica en la orina. La albúmina sérica es una proteína que sirve como medio de transporte para ácidos grasos, bilirrubina y, para hormonas como cortisol y tiroxina.

Aguas mineromedicinales. Son aguas minerales utilizables como agentes terapéuticos o aguas minerales que dadas sus características especiales se han acreditado oficialmente como agentes terapéuticos y han sido declaradas de utilidad pública, por los organismos pertinentes.

Aguas minerales naturales. Son aguas de origen subterráneo, libre de contaminación bacteriológica, con mineralización mínima de 1 g de sólidos disueltos por kg de agua o 250 mg de CO₂ libre, con propiedades favorables para la salud (Comité Coordinador de la FAO/OMS).

Aguas potables. Son aguas transparentes, incoloras, inodoras e insípidas y que por sus características físicas, químicas y microbiológicas no alcanzan los límites máximos admitidos oficialmente.

Aguas mineromedicinales envasadas. Son aguas minerales cuya composición determinada, que suele sobrepasar los niveles establecidos al agua potable, pueden cumplir una función terapéutica (aparato digestivo, vías urinarias, actividades metabólicas).

Aguas de mesa. Son aguas minerales envasadas que se pueden ingerir como bebida habitual por ser favorables para la salud y no determinar acciones terapéuticas definidas.

Anagotóxico, ca. Que actúa en forma antagónica a la de una toxina o que contrarresta su acción.

Anemia hipocrómica. Estado caracterizado por disminución desproporcionada de la hemoglobina y aumento de la palidez.

Antihistamínico, ca. Que contrarresta la acción de la histamina; es decir, que ayuda a disminuir la frecuencia cardíaca y la secreción gástrica. También ayuda a la dilatación de los bronquios y de los músculos lisos, y al aumento de la presión arterial.

ATPasa. Adenosintrifosfatasa. Encima que acelera las reacciones químicas en el organismo y produce el ATP, la cual es una sustancia que almacena y transporta la energía utilizada por todos los seres vivos.

Catarro tubo-timpánico recidivante. Trastorno causado por la presencia de masas densas y duras alrededor de los huesecillos auditivos de la caja del tímpano.

Decontracturante. Que reduce el estado de alta resistencia fija al estiramiento pasivo de un músculo, que resulta de fibrosis de los tejidos que dan sostén a los músculos o a las articulaciones, o de trastornos de las fibras musculares.

Dermatosis. Enfermedad de la piel sin inflamación, con sensación de picazón y/o excreción excesiva de sebo.

Distonía neurovegetativa. Se caracteriza por una disfunción de los centros vegetativos que resulta en una liberación inadecuada de adrenalina y produciendo mareos. No se sabe su causa ni su duración y el tratamiento es sintomático.

Disturbios del climaterio. Se considera al climaterio como una fase transitoria de la vida de la mujer, situada entre la etapa reproductiva y la no reproductiva. El signo principal de esa transición es la desaparición de la menstruación y la aparición de múltiples síntomas de naturaleza hormonal y psíquica que alteran muchas facetas de su vida entre ellas su sexualidad.

Dispepsia. Trastorno de la actividad o función de la digestión; suele aplicarse a las molestias epigástricas que siguen a las comidas.

Eccema. Inflamación de la piel caracterizada por pápulas y vesículas, con sensación de picazón como reacción ante agentes internos y externos.

Enfermedad de Parkinson. Enfermedad de progreso lento caracterizada por temblor de músculos en reposo, debilidad muscular y lentitud de movimientos voluntarios.

Época puberal. Este período comprende (1) la pubertad, etapa en la que se desarrollan los órganos sexuales, que suele ser más temprana en las niñas (10-13 años, aunque este rango puede ser más amplio dependiendo de las condiciones ambientales) que en los niños (12-15 años) y (2) la adolescencia, que es la etapa final del proceso de crecimiento.

Esclerosis. Endurecimiento del sistema nervioso central o de los vasos sanguíneos.

Esclerosis pulmonar. Endurecimiento de los pulmones debido a un aumento del tejido conjuntivo normal que sirve de sostén a las células propias de estos órganos.

Espondiloartritis anquilosantes. Artritis que afecta a la columna vertebral y produce dolor y rigidez por inflamación de las articulaciones.

Flebitis. Inflación de una vena que se caracteriza por rigidez y dolor de la parte afectada.

Hematopoyesis. Formación y desarrollo de los elementos formes de la sangre (eritrocitos, leucocitos y plaquetas).

Hemiplejía. Parálisis de un lado del cuerpo.

Hidrología médica (o crenoterapia). Parte de la ciencia médica que se ocupa las características esenciales y posible interés terapéutico de las aguas mineromedicinales en toda su amplitud.

Hidroterapia. Estudio de las aplicaciones tópicas sobre piel o mucosas de las aguas naturales, como vector de acciones mecánicas y térmicas.

Hiperlipoproteinemias. Exceso de lipoproteínas, triglicéridos y colesterol en la sangre.

Hiperuricemia. Exceso de ácido úrico en la sangre, necesario para el desarrollo de la gota y puede ocasionar enfermedades renales.

Hiposideremia. Existencia de poco hierro en la sangre.

Hormonaterapia. Endocrinoterapia. Consiste en la administración de hormonas naturales, proteicas o esteroideas, o derivados de las mismas para combatir algunos tipos de cáncer.

Laberintopatía. Lesión que afecta al oído interno y que ocasiona pérdida del equilibrio.

Litiasis. Trastorno caracterizado por la formación de cálculos y concreciones, especialmente en el sistema urinario.

Otosclerosis. Formación de hueso esponjoso en el laberinto óseo (oído), produce pérdida auditiva.

Poliomielitis. Enfermedad que afecta principalmente a los niños, causada por un virus; caracterizada por fiebre, dolor de garganta, dolor de cabeza, vómitos, rigidez de cuello y espalda. Puede afectar el sistema nervioso central y ocasionar deformidad permanente.

Polirradiculitis. Inflamación de las raíces nerviosas. Es una causa de infección del sistema nervioso central.

Pruriginoso (a). De la naturaleza del prurito (picazón) que tiende a causarlo.

Psoriasis. Enfermedad de la piel caracterizada por la presencia de manchas redondas, secas y escamosas con predilección por superficies como uñas, cuero cabelludo, genitales y región lumbosacra.

Ptialina. Es una enzima salivar que cataliza el bolo alimenticio logrando una rápida y fácil digestión.

Resolutivo. Que rebaja la producción de humores.

Revulsivo. Que extrae sangre de una parte para pasarla a otra, como es el caso de la conirritación.

Sedante. Sustancia que afecta la actividad del sistema nervioso, sin causar inconsciencia ni

insensibilidad.

Trastornos gonadales. Trastornos de las glándulas sexuales (ovarios y testículos).

Vasoconstrictor. Actúa disminuyendo el flujo sanguíneo en el medio donde es aplicado, debido a una disminución de los vasos sanguíneos. La mayoría de los anestésicos presenta la asociación de algún vasoconstrictor, lo que es extremadamente importante en la medida en que este agente hace que la anestesia permanezca más tiempo en contacto en la región en la que fue depositado, ya que se reabsorbe de forma más lenta. Existen diferentes tipos de vasoconstrictores, pero los más utilizados son los adrenérgicos (adrenalina/noradrenalina) y los sintéticos.

ANEXO 2

CONTROL DE CALIDAD ANALÍTICO

El esquema del control analítico aplicado por el Laboratorio Thermochem Inc., ejecutor de los análisis de 45 muestras, es el siguiente:

ESQUEMA DE CONTROL DE CALIDAD ANALÍTICO			
PARÁMETRO	FRECUENCIA	LÍMITE DE ADVERTENCIA	LÍMITE DE CONTROL
Replicación de análisis	1 por 10 muestras	5%	10%
Muestra fortificada ("spiked") / índice de recuperación	1 por 10 muestras	10%	15%
Patrón / control interno	1 por 10 muestras	5%	10%
Patrón externo	1 por curva patrón	5%	10%
Certificación de Laboratorio	Servicios de salud del Estado de California		

Como se observa a continuación, los índices de recuperación reportados para la muestra fortificada y el patrón externo, en un rango entre 94 y 119 y 92 y 112, respectivamente, son satisfactorios.

	Porcentaje de Recuperación	
	Muestra fortificada ("spiked")	Patrón externo
Analito	mg/L	mg/L
Na	97	101
K	98	98.3
Ca	97	101
Mg	99.5	104
Li	95	102
Sr	94	101
Ba	100	99
Fe	99	99.1
B	104	102
SiO ₂	98.3	96.3
Al	99	92
Sb	114	97
As	104	102
Cd	105	101
Cs	99	103
Cr	96	104
Cu	102	104
Pb	106	103
Mn	95	100
Hg	97	101
Rb	99	101
Se	119	101
Cl	100	99
F	97	106
Br	101	92
SO ₄	102	99
Alcalinidad total como HCO ₃	98	101
NH ₄	99	96
NO ₃	104	102
I	103	112
P total	103	ND
CN	110	ND
Sólidos totales disueltos	NA	ND
pH (unidades)	NA	ND
NA = No applicable		
NA = No disponible		

La comparación entre los resultados de una muestra y su duplicado, remitido al laboratorio como muestra ciega, es muy satisfactoria por cuanto el porcentaje de la diferencia no excede 6.4%.

VERIFICACIÓN DE DUPLICADOS CON MUESTRA CIEGA

Manantial	Municipio	No. Laboratorio Thermochem	STD	pH Lab	Na	K	Ca	Mg	Li	Sr	Ba	Fe	B	SiO2	Al	Sb	As
La Piscina Municipal	Nemocón	10382 - 6	69.6	7.06	6.1	1.09	5.44	0.867	0.014	<0.100	0.043	0.44	<0.150	19.4	<0.0051	<0.0025	<0.0005
Muestra ciega	Nemocón	10382 - 9	71.7	6.92	6.6	1.08	5.4	0.901	0.014	<0.100	0.042	0.482	<0.150	18.9	<0.0051	<0.0025	<0.0005
PORCENTAJE DE LA DIFERENCIA ENTRE DUPLICADOS			-1.5	1.0	-3.8	0.5	0.4	-1.9	0.0		1.2	-4.6		1.3			
Manantial	Municipio	No. Laboratorio Thermochem	Cd	Cs	Cr	Cu	Pb	Mn	Hg	Rb	Se	Cl	F	Br	SO4	HCO3	NH4
La Piscina Municipal	Nemocón	10382 - 6	<0.0005	<0.050	<0.0002	<0.0025	0.0016	0.033	0.0003	<0.100	<0.0019	3.48	0.183	<0.100	3.27	29.2	<2.00
Muestra ciega	Nemocón	10382 - 9	<0.0005	<0.050	<0.0002	<0.0025	<0.0005	0.033	<0.0003	<0.100	<0.0019	3.57	0.161	<0.100	3.31	31.1	<2.00
PORCENTAJE DE LA DIFERENCIA ENTRE DUPLICADOS								0.0				-1.3	6.4		-0.6	-3.2	
Manantial	Municipio	No. Laboratorio Thermochem	NO3	I	Ptotal	CN	Σ especies disueltas (mg/l)										
La Piscina Municipal	Nemocón	10382 - 6	<0.100	<1.00	<0.150	<0.050	70										
Muestra ciega	Nemocón	10382 - 9	<0.100	<1.00	0.131	<0.050	72										
PORCENTAJE DE LA DIFERENCIA ENTRE DUPLICADOS							-1.4										

ANEXO 3

CRITERIOS PARA USOS DE LOS MANANTIALES TERMALES COMO AGUAS MINEROMEDICINALES

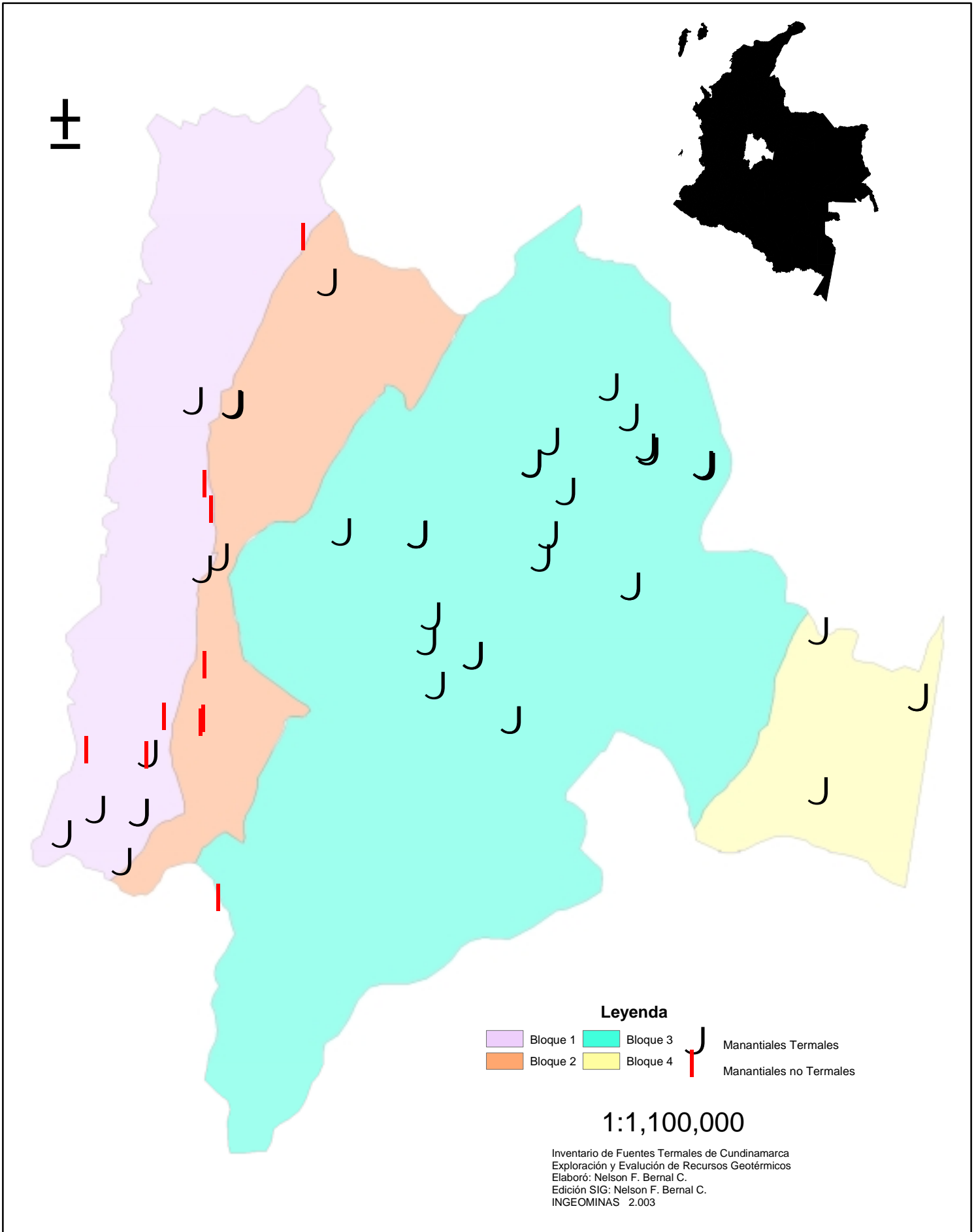
Tipo	Criterio de Clasificación	Acción terapéutica	Técnicas de Administración
Cloruradas	Mayor de 20% de aniones totales en eq/ Más de 607 mg/l	Estimulantes de la cicatrización y reparación de afecciones óseas y ganglionares, favorables en el tratamiento de afecciones respiratorias y cutáneas. Coadyuvante o apoyo a tratamientos en: Reumatismos crónicos, espondilartrosis 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 distonías	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 o 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 motilidad gástrica e intestinal, facilitando la salida de la bilis al intestino y reduciendo 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, Cálcidas	Acción sobre el equilibrio neurovegetativo (simpático), acción diurética (prevención de formaciones calcúscas), 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 mucosas. Inhalaciones para problemas respiratorios (nebulizadores y aerosoles)
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 hialal.	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	
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		Rango (°C)	Tipo de manantial
30-34	Estimulantes. Mejoradores de la circulación de órganos internos. Activadores de cambios metabólicos. Vasoconstrictores		Hasta 20	Frías
35-37	Sedantes		20-30	Hipotermiales
37 - 50 ⁽¹⁾	Revulsivos y resolutivos: Combatir contracciones e hipertonia muscular		30-50	Mesotermiales
(1) Por encima de 50°C, se registran quemaduras de la piel			>50	Hipertermiales

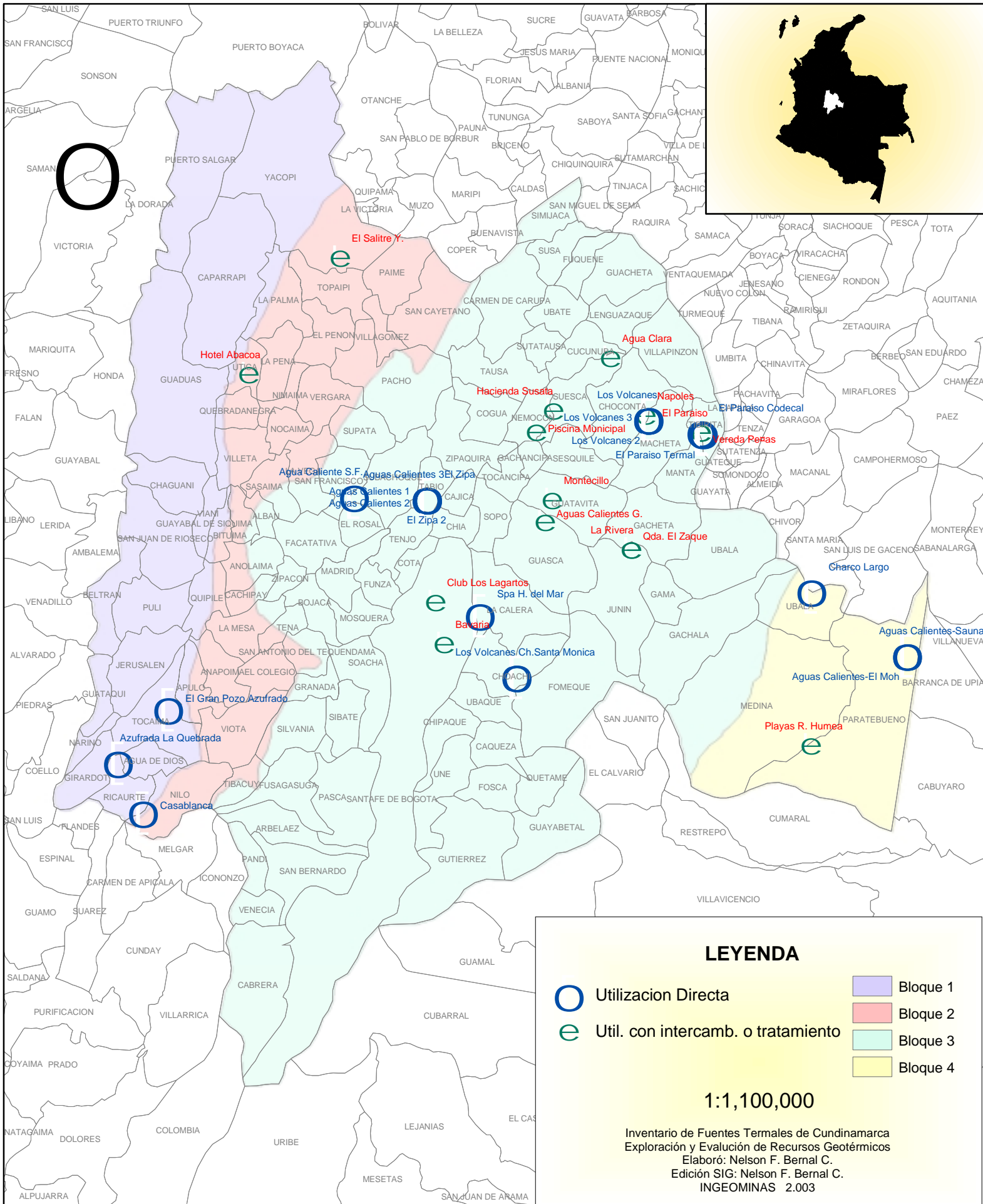
ANEXO 4

MAPAS DE USOS POTENCIALES DEL RECURSO GEOTÉRMICO EN CUNDINAMARCA





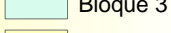
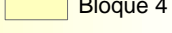
Mapa Bloques Tectónicos y Ocurrencia de Fuentes Termales en Cundinamarca



Mapa de Fuentes Termales de Cundinamarca con Potencial para Utilización en Acuicultura Geotérmica



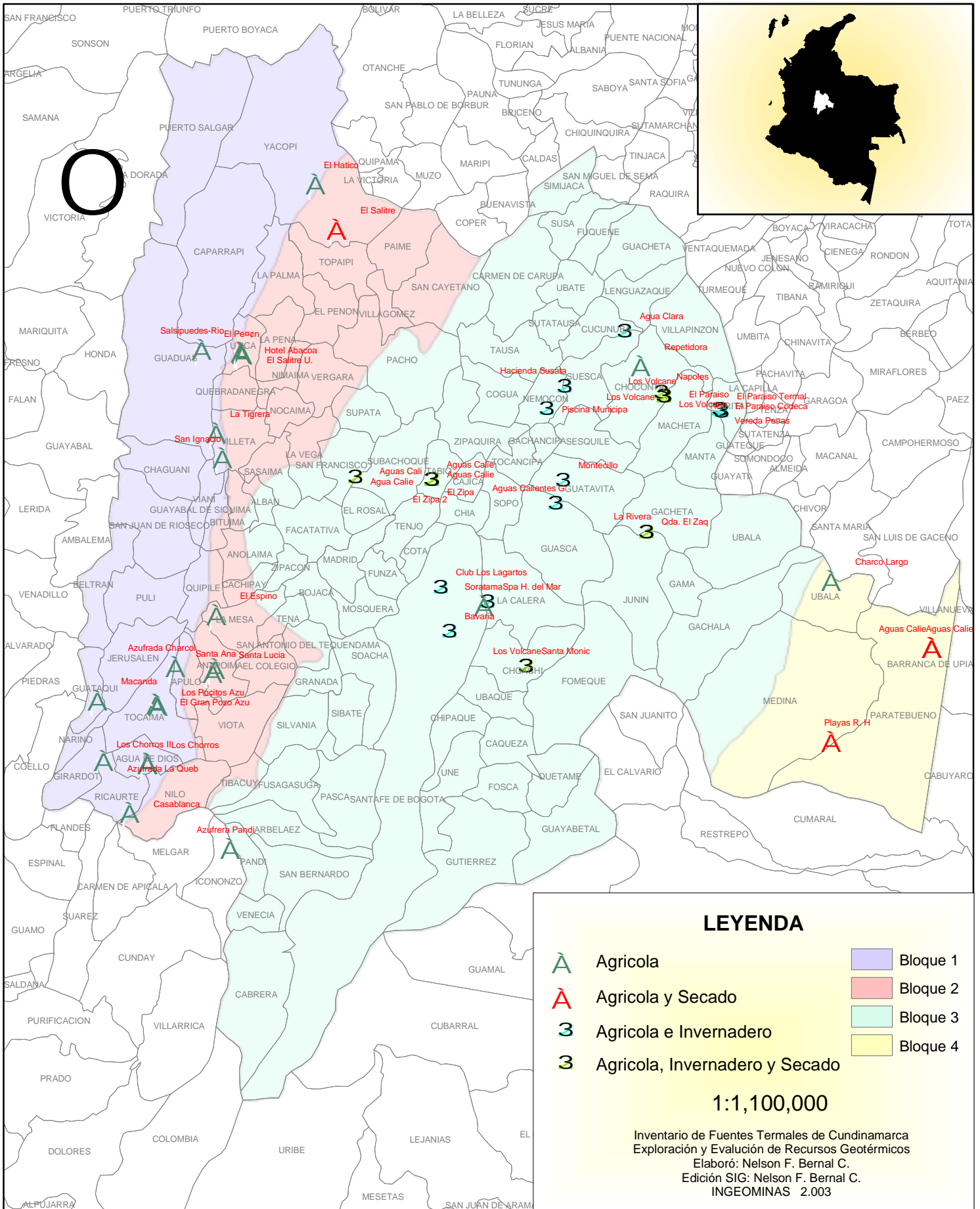
LEYENDA

-  Utilización Directa
-  Util. con intercamb. o tratamiento
-  Bloque 1
-  Bloque 2
-  Bloque 3
-  Bloque 4

1:1,100,000

Inventario de Fuentes Termales de Cundinamarca
 Exploración y Evaluación de Recursos Geotérmicos
 Elaboró: Nelson F. Bernal C.
 Edición SIG: Nelson F. Bernal C.
 INGEOMINAS 2.003

Mapa de Fuentes Termales de Cundinamarca con Potencial para Usos Agrícolas



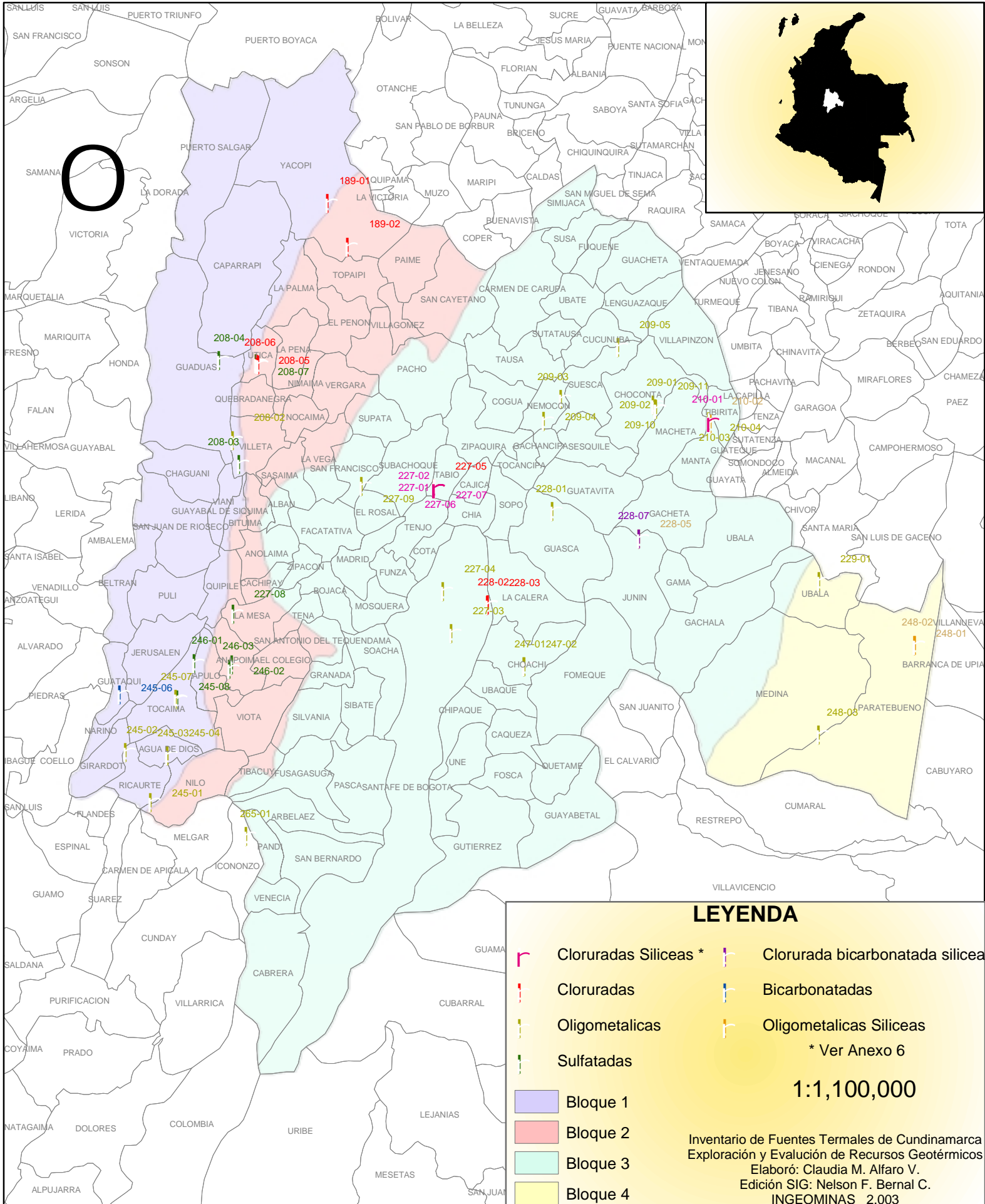
LEYENDA

- | | | | |
|--|--------------------------------|--|----------|
| | Agrícola | | Bloque 1 |
| | Agrícola y Secado | | Bloque 2 |
| | Agrícola e Invernadero | | Bloque 3 |
| | Agrícola, Invernadero y Secado | | Bloque 4 |

1:1,100,000

Inventario de Fuentes Termales de Cundinamarca
 Exploración y Evaluación de Recursos Geotérmicos
 Elaboró: Nelson F. Bernal C.
 Edición SIG: Nelson F. Bernal C.
 INGEOMINAS 2.003

Mapa de Fuentes Termales de Cundinamarca con Potencial para Utilización en Balneología.



ANEXO 5

FOTOGRAFÍAS DE LOS MANANTIALES MÁS REPRESENTATIVOS DE CUNDINAMARCA



245-01. Manantial: Casablanca. Municipio: Ricaurte. Bloque 1. Temperatura: 31.8°C. Conductividad: 792 \square S/cm. Rasgo particular: Máximo caudal, estimado en 11.8 l/s



189-02. Manantial: El Salitre. Municipio: Yacopí. Bloque 2. Temperatura: 46.8°C. Conductividad: 25300 \square S/cm. Rasgo particular: Máxima concentración de sólidos totales disueltos, alrededor de 15.700 mg/l.



209-02. Manantial: Los Volcanes. Municipio: Chocontá. Bloque 3. Temperatura: 53.7°C. Conductividad: 226 \square S/cm. Rasgo particular: Abundante población de algas y descarga de gas.



209-03. Manantial: Hacienda Susatá. Municipio: Nemocón. Bloque 3. Temperatura: 33.1°C. Conductividad: 226 \square S/cm.



227-02. Manantial: Aguas Calientes 3. Municipio: Tabio. Bloque 3. Temperatura: 37.1°C.
Conductividad: 2640 \square S/cm.



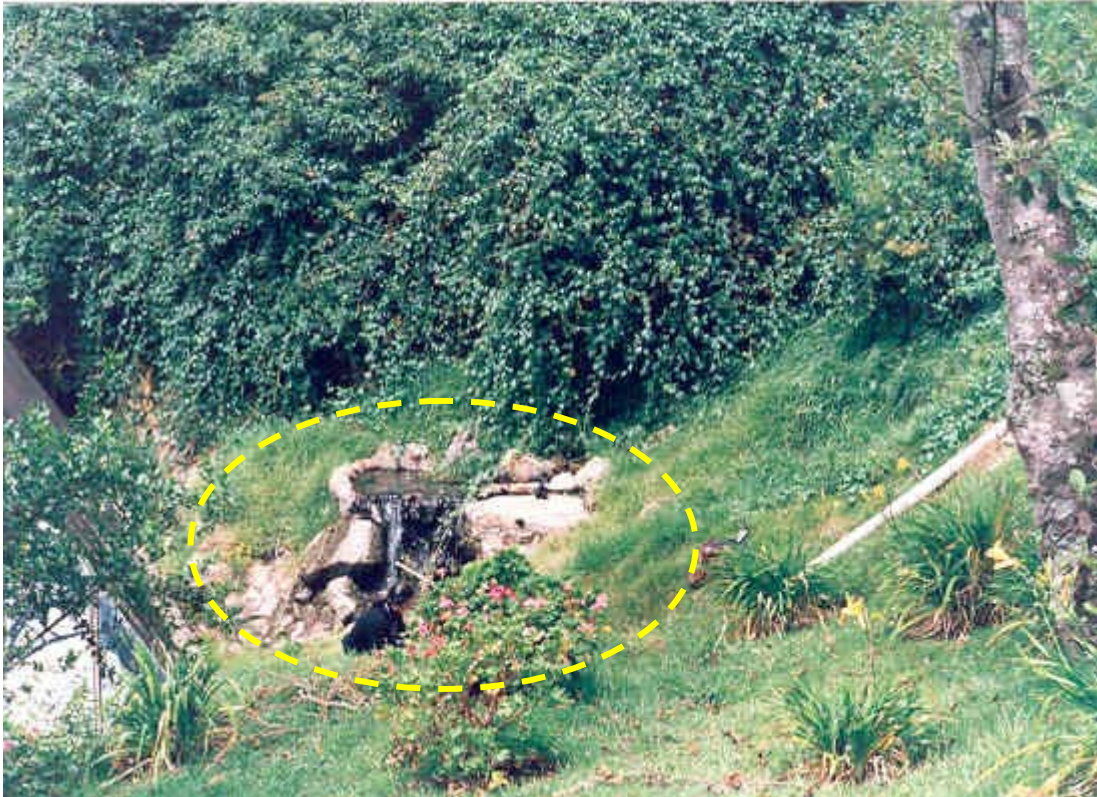
227-03. Manantial: Bavaria 3. Municipio: Bogotá. Bloque 3. Temperatura: 31.1°C.
Conductividad: 163.6 \square S/cm.



227-05. Manantial: Agua Caliente 2.
Municipio: Tabio.
Bloque 3.
Temperatura: 32.0°C.
Conductividad: 2060 \square S/cm.

227-07.
Manantial: El Zipa 2.
Municipio: Tabio.
Bloque 3.
Temperatura: 32.0°C.
Conductividad: 2830 \square S/cm.





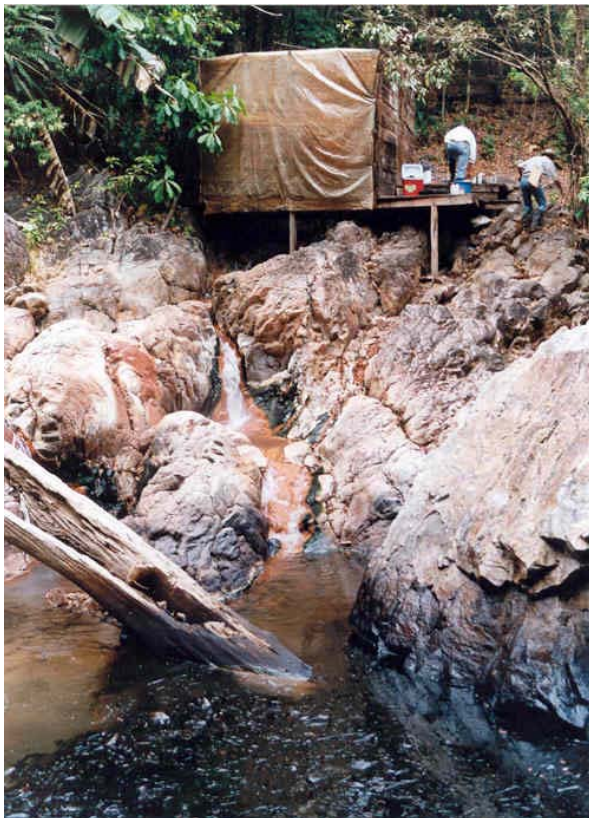
228-03. Manantial: Spa-Helena del Mar. Municipio: La Calera. Bloque 3. Temperatura: 33°C. Conductividad: 11230 μ S/cm. Rasgo particular: Abundancia de algas.



28-07. Manantial: La Rivera. Municipio: Gachetá. Bloque 3. Temperatura: 66.9 °C.



247-02. Manantial: Santa Mónica. Municipio: Choachí. Bloque 3. Temperatura: 50.2°C.
Conductividad: 658 \square S/cm.



248-01. Manantial: Aguas Calientes -
Sauna.
Municipio: Paratebuena.
Bloque 4.
Temperatura: 73.7 °C.
Conductividad: 975 \square S/cm.
Rasgo particular. Es el manantial más
caliente de los registrados en este
inventario. Obsérvese la mancha de crudo
sobre las rocas y el agua.

ANEXO 6

**INFORME “MEDICIONES DE ELECTROMAGNETISMO EN LA ZONA DE LAS
PISCINAS TERMALES EN EL MUNICIPIO DE TABIO”**



SUBDIRECCIÓN DE ENSAYOS Y SERVICIOS TECNOLÓGICOS

**MEDICIONES DE ELECTROMAGNETISMO EN LA ZONA DE LAS
PISCINAS TERMALES EN EL MUNICIPIO DE TABIO**

**LABORATORIO DE GEOFÍSICA
(Informe LGF- 014)**

CLIENTE INTERNO: Proyecto RS2-02

**Preparado por
LUIS VÁSQUEZ**

Bogotá, Mayo de 2003

CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN

- 1.1. Generalidades
- 1.2. Localización del Área de estudio
- 1.3. Objetivos
- 1.4. Metodología
- 1.5. Marco Geológico
- 1.6. Hipótesis de Trabajo

2. PROSPECCIÓN GEOFÍSICA

- 2.1. Marco Teórico
- 2.2. Adquisición o muestreo de series de datos
- 2.3. Procesamiento de datos
- 2.4. Mapas

3. SÍNTESIS DE LOS RESULTADOS

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

1. INTRODUCCIÓN

1.1. GENERALIDADES

Dentro de las actividades programadas por el Proyecto RS2-02 'Exploración y Evaluación de Recursos Geotérmicos' de la Subdirección de Georecursos del INGEOMINAS, se contempló adelantar un estudio de exploración geofísica en el municipio de Tabio, con el fin de reunir información geocientífica que contribuya a determinar la fuente de las aguas termales en esa región.

Para ese efecto, se llevó a cabo una comisión de trabajo durante el periodo comprendido entre el 11 y 14 de Noviembre de 2002.

1.2. LOCALIZACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

El área de trabajo se localiza en el municipio de Tabio, al occidente de la zona urbana, dentro de la zona de recreación de las piscinas de agua termal.

En general el acceso es bastante bueno, con varias vías pavimentadas y otros carretables en perfecto estado. La zona es plana en gran proporción, rodeada por algunas colinas y zonas montañosas.

1.3. OBJETIVOS

Los objetivos fueron los siguientes:

1. Delimitación de zonas con baja resistividad, que se puedan relacionar con las fuentes termales en profundidad.
2. Determinación de rasgos estructurales asociados al fenómeno termal.

1.4. METODOLOGÍA

Para poder alcanzar los objetivos planteados se empleó la siguiente metodología:

1. Se hizo una evaluación previa de la información geológica y geofísica existente.
2. Se utilizó un método de medición electromagnético en el dominio del tiempo.
3. Se procesó y analizó la información adquirida en el terreno

1.5. SÍNTESIS GEOLÓGICA

El área de estudio, descrita en detalle en trabajos anteriores, está constituida esencialmente por rocas sedimentarias con edades que van desde el cretáceo hasta el Terciario, cubiertos discordantemente por sedimentos inconsolidados del Cuaternario tales como coluviones y aluviones recientes.

1.6. HIPÓTESIS DE TRABAJO

Dentro del área, las aguas termales presentan un elevado contenido de sales lo cual hace que se asemeje al agua de mar. Por este motivo, se espera que su resistividad eléctrica sea lo suficientemente pequeña como para diferenciarla del entorno geológico circundante el cual por lo general es poco conductivo o aislante. Este contraste favorece a la exploración geoelectrica o electromagnética para ser usada con perspectivas de éxito.

Así, por ejemplo, el agua de mar, presenta valores de resistividad menores de 2 ohm-m; el agua salobre presenta valores entre 2 y 8 ohm-m y el agua dulce valores superiores a 10 ohm-m. Las rocas sedimentarias por su parte presentan valores que oscilan entre 10 y 10000 ohm-m.

2. PROSPECCIÓN GEOFÍSICA

2.1. MARCO TEÓRICO

2.1.1. FUNDAMENTOS

En el mundo que nos rodea, siempre que exista un campo eléctrico variable se crea un campo magnético y viceversa de acuerdo con las Leyes físicas de Oersted, Ampere, Faraday y Lenz, expresadas matemáticamente en las ecuaciones de Maxwell:

$$\nabla \times H = J + \partial D / \partial t$$

$$\nabla \times E = - \partial B / \partial t$$

Donde H es el campo magnético, J es la densidad de corriente eléctrica, D es la corriente eléctrica de desplazamiento, E es la intensidad del campo eléctrico y B es la inducción magnética. Nabla (∇) representa la variación de un campo físico en el espacio y las derivadas representan la variación con respecto al tiempo.

Para poder relacionar éstos fenómenos con las propiedades físicas del subsuelo o con sus estructuras existen unas ecuaciones denominadas constitutivas (Nabighian, 1987). Una de las más importantes en términos de prospección geofísica es la Ley de Ohm, la cual relaciona la densidad de corriente a la intensidad del campo eléctrico así:

$$J = \sigma E$$

Donde σ es una propiedad del medio conocida como la conductividad eléctrica, cuyo inverso es la resistividad eléctrica $\rho=1/\sigma$. Cualquiera de las dos se utiliza para caracterizar el medio.

Otra ecuación constitutiva es la que relaciona la intensidad del campo eléctrico con la corriente de desplazamiento:

$$D = \varepsilon E$$

Donde ε es otra propiedad de los materiales conocida como permitividad dieléctrica.

La tercera de las ecuaciones constitutivas es la que relaciona la fuerza del campo magnético con la inducción magnética:

$$B = \mu H$$

Donde μ es la permeabilidad magnética del medio.

Combinando las ecuaciones constitutivas con las ecuaciones de Maxwell, se llega a lo siguiente:

$$\nabla \times H = (\sigma + \partial (\varepsilon)/\partial t).E$$

$$\nabla \times E = - \mu .\partial H/\partial t$$

2.1.2. MÉTODO ELECTROMAGNÉTICO

Se basa en el fenómeno de inducción electromagnética, la cual permite la propagación de las ondas electromagnéticas de un cuerpo a otro sin tocarlo directamente, es decir, sin hacer contacto físico con él.

Si desde la superficie del terreno y a partir de una fuente **T_x** se genera un campo electromagnético primario **E_p** a través de un cable o espira, éste se propaga hacia profundidad a través de los diferentes cuerpos o masas de roca con una conductividad específica (o su inverso la resistividad ρ_1). Si existen materiales conductivos con resistividad menor ρ_2 , alrededor de éstos se genera un segundo campo electromagnético **E_s** de intensidad menor, el cual puede ser detectado en superficie a través de un sensor o receptor **R_x**. (fig. 1)

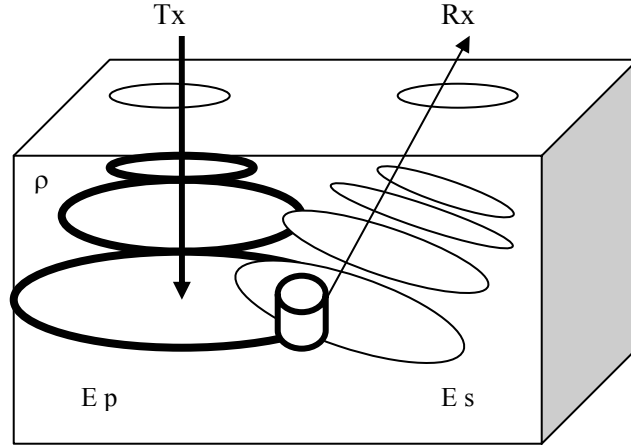


Figura 1. Principio del Método Electromagnético

El método se puede emplear bajo dos dominios: el dominio de la frecuencia y el dominio del tiempo. En cualquiera de ellos se investiga la capacidad o propiedad eléctrica de los materiales con la profundidad bajo un punto de referencia y esto se conoce como un Sondeo Electromagnético (SEM).

Los sondeos electromagnéticos (SEM) en general se realizan para determinar las variaciones de la conductividad o resistividad eléctrica de las capas de la corteza de La Tierra con la profundidad. Cuando se utiliza una fuente artificial para producir un campo electromagnético se les conoce como métodos de sondeo con fuente controlada.

La mayoría de SEM consiste en hacer mediciones a frecuencias o tiempos determinados, empleando una fuente (Tx) y un receptor (Rx) fijos. La distribución de corrientes inducidas en el subsuelo depende del producto de la conductividad eléctrica, la permeabilidad magnética y la frecuencia (Spies y Frischknecht, 1991). Como las corrientes de baja frecuencia se difunden a mayor profundidad que las de alta frecuencia, las mediciones de la respuesta electromagnética a diferentes frecuencias o tiempos contienen información sobre la variación de la conductividad con la profundidad. Alternativamente, se pueden hacer sondeos midiendo la respuesta a varias separaciones entre fuente y receptor para una sola frecuencia o tiempo. Pueden ser utilizados en una gran variedad de estudios científicos en donde se encuentren rocas estratificadas, desde investigaciones superficiales de procesos de meteorización hasta delineación de las estructuras de la corteza profunda. Los SEM proporcionan mejor resolución y son menos distorsionados por variaciones laterales de resistividad que los métodos de sondeo con fuente natural o con los de corriente directa.

2.2. ADQUISICIÓN DE LOS DATOS

2.2.1. Equipo

Para la medición de la resistividad se empleó un equipo de electromagnetismo en el dominio del tiempo, australiano, marca SIROTEM. Dentro de sus componentes tiene 2 microprocesadores: uno para adquisición y otro para manejo de datos. Con el primero recibe los datos y calcula resultados y con el otro los procesa y almacena. Cuenta con una memoria RAM para almacenar hasta 400 sondeos o registros SEM. Trae un reloj para registrar la fecha y hora en tiempo real o de medición de los parámetros. Opera con una pareja de baterías de 12 voltios y 15 amperios-hora, cada una. Cuenta con un sistema de medición de 53 ventanas de tiempo de decaimiento y una sensibilidad para detectar valores hasta de 1 nanovoltio por amperio.

2.2.2. Arreglo de Inducción Electromagnética

La geometría del arreglo del cable en el terreno fue el de una ‘espira’ cuadrada por la cual se hace circular una corriente eléctrica a partir de pulsos bipolares.(fig. 2)



Figura 2. a) pulso eléctrico bipolar b) arreglo sencillo (single loop)

Este arreglo recibe el nombre de arreglo sencillo y consiste en que la misma espira sirve tanto de transmisor (Tx) como de receptor (Rx). Una vez tomada la medición, la espira se va desplazando o conectando al cuadrado vecino y así sucesivamente hasta obtener el perfil deseado.

Los pulsos tienen un período de encendido y un periodo de apagado de igual valor, generalmente de 8.3333 milisegundos en zonas donde existen redes eléctricas de 60 Hertz. El equipo efectúa la medición del campo secundario, en un rango que va de 8 microsegundos hasta 2 segundos, durante el periodo de apagado.

2.2.3. Datos

La respuesta obtenida es una señal de decaimiento del voltaje con el tiempo o curva de decaimiento transiente, en microvoltios/amperio, la cual puede verse en la pantalla del equipo. (fig. 3)

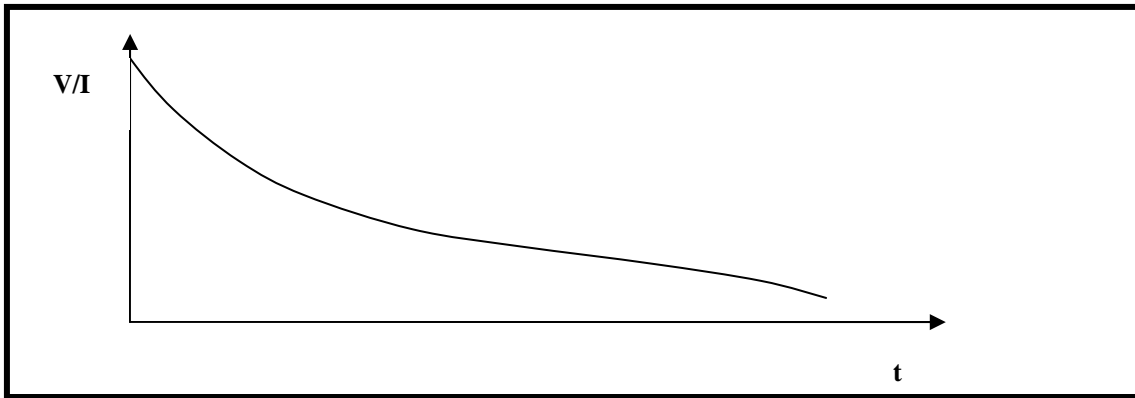


Figura 3. Curva de decaimiento del voltaje contra el tiempo.

El valor de resistividad aparente es calculado por el microprocesador para obtener la curva de variación de la resistividad contra el tiempo, la cual se despliega directamente en la pantalla del equipo para efectos de control. Dicho valor se expresa así:

$$\mathbf{Ra} = 6.32 \cdot 10^{-12} * \mathbf{A}^{2/3} * \mathbf{b}^{4/3} * (\mathbf{V/I})^{-2/3} * \mathbf{t}^{-5/3}$$

Donde **Ra** es la resistividad aparente, **A** es el área efectiva de la espira del receptor, **b** es el lado de la espira del transmisor, **V/I** es la respuesta transiente y **t** es el tiempo de retraso a partir del comienzo del decaimiento.

La relación de los datos adquiridos se encuentra en un formato denominado AMIRA y éstos están consignados en el anexo. En total se midieron 15 Sondeos Electromagnéticos SEM en la zona plana del área de estudio, empleando arreglos de 25x25 y 50x50 m., para una profundidad de penetración promedio de 150 m.

2.3. PROCESAMIENTO DE LOS DATOS

Los datos adquiridos fueron trasladados del equipo al computador, mediante una interfase en serie RS-232. Se almacenaron en archivos con extensión .sir, para que pudieran ser leídos por el programa EMVISION, con el cual se editaron y procesaron.

El procesamiento consistió en convertir los valores de resistividad aparente en función del tiempo, a valores de resistividad verdadera en función de la profundidad. Esto se realiza empleando el método del problema inverso, el cual, consiste en hallar la distribución de propiedades físicas del subsuelo a partir de una serie finita de mediciones u observaciones, en este caso de la resistividad eléctrica en función del tiempo.

La formulación del problema inverso está basada en la siguiente ecuación:

$$E(r_0, t_0) = E_p(r_0, t_0) + \int G(r_0, r; t) \cdot E(r, t) \cdot \rho_a(r) \cdot dv$$

Donde r_0 denota un punto de observación y t es el tiempo del transiente. La resistividad aparente ρ_a es la diferencia entre la resistividad real y la resistividad de referencia ρ . G es el tensor función de Green para el campo eléctrico y dV es una pequeña porción de volumen.

Lo anterior se transforma a lo siguiente:

$$E(r_0, z_0) = E_p(r_0, z_0) + \iiint G(r_0, r; z_0, z) \cdot E(r, z) \cdot dr \cdot \rho_a(r) \cdot dz$$

Donde r_0 denota un punto de observación y z es la profundidad.

Dicha transformación se llevó a cabo a partir de un algoritmo matemático desarrollado en Australia por la CSIRO, el cual viene incorporado con el programa mencionado. Dicho algoritmo denominado GRENDL encuentra soluciones al problema inverso para un semiespacio homogéneo y estratificado horizontalmente. Los datos son tratados simultáneamente, a manera de perfiles que muestran la variación de la resistividad con la profundidad.

Los perfiles se almacenan en archivos con extensión .ses, y pueden ser grabados como imágenes para su posterior presentación.

2.4. MAPAS

Los datos fueron adquiridos en perfiles compuestos por diferente número de sondeos electromagnéticos, presentados en el Anexo.

Para tener una perspectiva areal de los resultados se elaboraron mapas de iso-resistividad con valores obtenidos para diferentes profundidades y con curvas de contornos cada 5 ohm-m. Es así como se seleccionaron las siguientes: 5, 30, 50 y 100 m de profundidad, presentadas en las figs. 4 a 7.

Mapa de iso-resistividad a 5 m de profundidad

Muestra valores de resistividad menores de 10 ohm-m hacia la parte nororiental del área estudiada, en una franja SW45NE, pasando por el sector de las piscinas. Hacia el resto del área se presentan valores de hasta 50 ohm-m o más.

Mapa de iso-resistividad a 30 m de profundidad

Muestra también valores de resistividad muy bajos en una franja SW45NE, pasando por el sector de las piscinas pero más hacia el occidente. Hacia la parte Occidental continúan los valores de más de 50 ohm-m.

Mapa de iso-resistividad a 50 m de profundidad

Muestra valores de resistividad entre 10 y 20 ohm-m, predominando sobre los de 50 ohm-m.

Mapa de iso-resistividad a 100 m de profundidad

Vuelve a destacarse valores de resistividad menores de 10 ohm-m en una franja SW45NE, pero concentrados hacia la parte occidental del área, y los valores de 50 ohm-m o más se presentan hacia el sector nororiental.

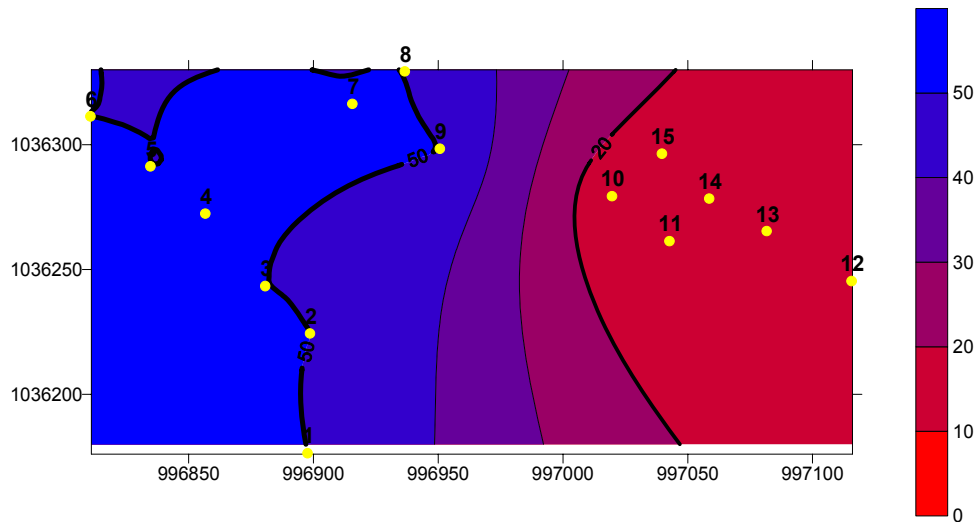


Figura 4. Isorresistividad a 5 m de profundidad.

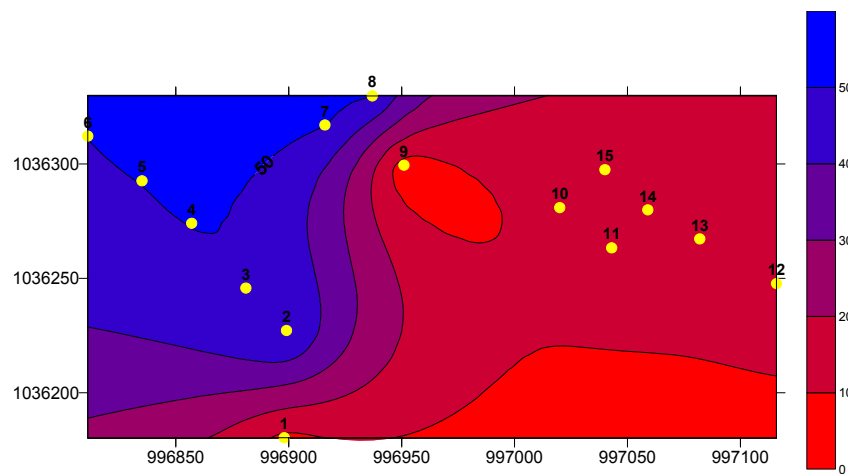


Figura 5. Isorresistividad a 30 m de profundidad

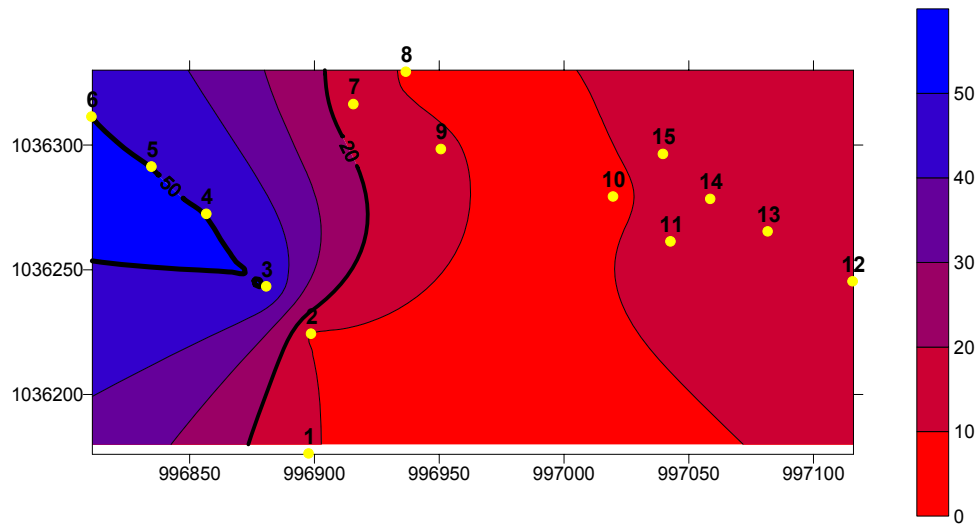


Fig. 6. Isorrestividad a 50 m de profundidad.

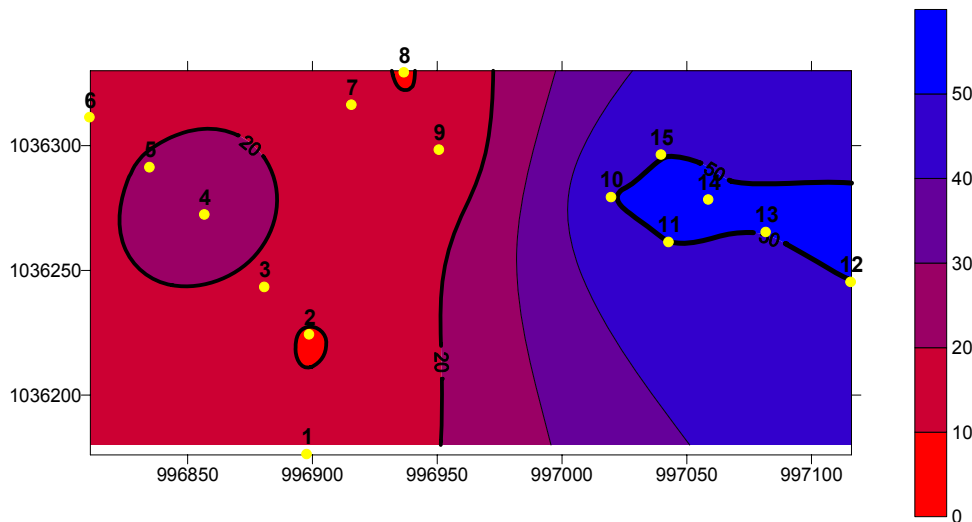


Figura 7. Isorresistividad a 100 m

3. SÍNTESIS DE LOS RESULTADOS

Como es bien conocido, la resistividad eléctrica (o su inversa, la conductividad) puede ser electrónica (metálica) o iónica (electrolítica). En las rocas sedimentarias, la mayoría de sus constituyentes principales como son el cuarzo, calcita y los feldespatos son prácticamente aislantes y no conducen la corriente; por eso, la resistividad de la formación (ρ_f) es en general alta. La manera como puede existir conducción es a través de los fluidos contenidos en sus espacios porosos o fracturas, es decir, de forma iónica; así, la resistividad del fluido (ρ_w) es relativamente más baja.

Al realizar mediciones de resistividad desde la superficie del terreno mediante un método eléctrico o electromagnético se obtienen resultados que constituyen la distribución de valores de resistividad total (ρ_t) con la profundidad. Dicha resistividad total involucra tanto la resistividad de la formación como la resistividad del fluido contenido (agua, aceite, gas u otro cualquiera).

De la observación de los mapas se podría decir que hacia el occidente del área y hacia profundidad existe un buen potencial de aguas termales a unos 100m, las cuales se van encontrando más cerca de la superficie (50, 30 y 5 m de profundidad) a medida que se avanza hacia el oriente, es decir, hacia las piscinas de Tabio.

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- Las mediciones realizadas en diferentes puntos de fuentes termales permitieron establecer que la resistividad del agua de las mismas decae linealmente con el aumento de la Temperatura.
- La resistividad total (roca más fluido) está relacionada directamente con la resistividad del agua mediante la textura del material y por lo tanto también decae con el aumento de la temperatura de las fuentes termales. De esta manera, resistividades medidas a partir de los Sondeos Electromagnéticos (SEM) son indicativos de la presencia de aguas termales cuando su valor es inferior a 1 ohm-m. (o conductividades mayores de 10.000 $\mu\text{mhos/cm}$)
- Existen fuentes termales a diferentes profundidades en el municipio de Tabio que van desde la aparición en superficie hasta más de 100 m. Para confirmar esta interpretación se recomienda llevar a cabo perforaciones en los sectores indicados para evaluar el potencial real de las fuentes termales y determinar sus características físico-químicas.
- Los SEM tuvieron una profundidad de penetración que alcanzó como máximo los 150 m. Debido a esta limitante se recomienda emplear métodos geofísicos alternos (magnetometría, gravimetría, gradiente gravimétrico, sísmica) para tratar de llegar a un modelo que pueda explicar o dar indicios sobre la profundidad de la fuente de las aguas termales.
- En cuanto a rasgos estructurales, se puede concluir que existe una tendencia SW-NE que atraviesa el valle de Tabio, la cual podría corresponder a un sistema de fracturas o fallas en esa dirección.

**DATOS DE LOS SONDEOS ELECTROMAGNÉTICOS REALIZADOS
EN LA ZONA DE LAS PISCINAS TERMALES DEL MUNICIPIO DE
TABIO.**

A continuación se presentan los datos de las mediciones en formato AMIRA.

:

[0,12-05-02,11:57,1,1,1,25,2,1,1,23,0,1,1,128,0,0,4.76,6,0,4,625,625]0ca7

[1, 9095 2, 1009 2, 2685 1, 3880 3, 1116 4, 6317 3, 3324 3, 1970 3,/
1081 3, 5492 2, 2605 2, 1173 2, 6171 1, 3360 1, 2021 1, 7999 0,/
-1295 0,-3411 0,-4090 0,-6523 0,-7663 0,-6335 0,-6446 0,-6866 0,/
-6613 0]24d3

[2, 3847 1, 2166 1, 1468 1, 6108 2, 1052 2, 5685 1, 3256 1, 4745 1,/
1951 1, 1839 1, 2027 1, 1762 1, 1893 1, 2257 1, 1777 1, 1307 1,/
1464 1, 1356 1, 1585 1, 1469 1, 1181 1, 1070 1, 1046 1, 9868 0,/
1049 1]2464

[0,12-05-02,12:03,1,1,1,25,2,1,1,24,0,1,1,128,0,0,5.60,40,0,2,625,625]0cc6

[1, 3180 3, 1409 3, 3639 2, 1515 2, 8030 1, 4033 1, 2004 1, 1177 1,/
9285 0, 6899 0, 6112 0, 4007 0, 2971 0, 2402 0, 9244-1, 5872-1,/
1489 0, 9592-1, 7613-1, 4471-1,-7054-2, 3190-2,-5922-1,-7619-1,/
-1846-1]2518

[2, 8596 1, 2556 1, 2333 1, 2613 1, 2217 1, 1889 1, 1827 1, 1759 1,/
1883 1, 1969 1, 1948 1, 1762 1, 1873 1, 1775 1, 1750 1, 1565 1,/
1478 1, 1557 1, 1508 1, 1502 1, 1150 1, 1180 1, 1193 1, 1328 1,/
1223 1]245e

[0,12-05-02,12:06,1,1,1,25,2,1,1,25,0,1,1,256,0,0,5.59,40,0,2,625,625]0cd4

[1, 3154 3, 1405 3, 3642 2, 1525 2, 8144 1, 4157 1, 2292 1, 1469 1,/
1014 1, 6537 0, 5640 0, 2470 0, 1984 0, 3033 0, 3297 0, 3102 0,/
5464-1, 1413 0, 2036 0, 1988 0, 6393-1, 1333 0, 2338-1, 2009-1,/
3941-1]2472

[2, 9582 1, 2559 1, 2138 1, 1994 1, 2534 1, 1971 1, 1887 1, 1772 1,/
1633 1, 1689 1, 1815 1, 1952 1, 1790 1, 2080 1, 1919 1, 1641 1,/
1371 1, 1583 1, 1551 1, 1823 1, 1268 1, 1164 1, 1164 1, 1214 1,/
1236 1]2451

[0,12-05-02,12:07,1,1,1,25,2,1,1,26,0,1,1,512,0,0,5.57,40,0,2,625,625]0ccf

[1, 3129 3, 1400 3, 3646 2, 1518 2, 8297 1, 4113 1, 2098 1, 1218 1,/
7704 0, 7525 0, 5185 0, 3917 0, 3880 0, 2450 0, 2484 0, 1856 0,/
1662 0, 2834 0, 1407 0, 8217-1, 1360 0, 8468-1, 6464-1, 9086-1,/
1906-1]24a1

[2, 1072 2, 3049 1, 3009 1, 2427 1, 3307 1, 2256 1, 2533 1, 2740 1,/
2637 1, 2354 1, 2034 1, 1905 1, 1980 1, 1965 1, 1786 1, 1508 1,/
1502 1, 1497 1, 1505 1, 1464 1, 1223 1, 1155 1, 1217 1, 1206 1,/
1169 1]2421

[0,12-05-02,12:09,1,1,1,25,2,1,1,27,0,1,1,1024,0,0,5.58,40,0,2,625,625]0d02

[1, 3076 3, 1393 3, 3615 2, 1520 2, 8030 1, 4190 1, 2128 1, 1395 1,/
9865 0, 7049 0, 5682 0, 4000 0, 3629 0, 2692 0, 2762 0, 2775 0,/
1452 0, 1060 0, 2142 0, 1343 0, 7967-1, 5842-1, 8588-1, 2096-1,/
4201-1]248d

[2, 1373 2, 2648 1, 2292 1, 2177 1, 2252 1, 2128 1, 1966 1, 2018 1,/
2006 1, 2161 1, 1858 1, 1908 1, 1961 1, 1958 1, 1916 1, 1583 1,/
1556 1, 1566 1, 1611 1, 1543 1, 1272 1, 1256 1, 1261 1, 1221 1,/
1263 1]2431

[0,12-05-02,12:31,1,1,1,25,2,1,1,28,0,1,2,1024,0,0,5.69,40,0,2,625,625]0d01

[1, 7976 2, 2993 2, 1103 2, 6017 1, 3940 1, 2439 1, 1439 1, 9740 0,/
6632 0, 4719 0, 3637 0, 2699 0, 1677 0, 1489 0, 1125 0, 1148 0,/
8947-1, 8924-1, 3327-1, 8399-1, 6778-1, 1046-1,-5217-3, 5457-2,/
-3500-1]2522
[2, 2111 2, 2352 1, 2325 1, 2386 1, 2406 1, 2235 1, 2175 1, 2154 1,/
2202 1, 2181 1, 2144 1, 2086 1, 2109 1, 2216 1, 2154 1, 2009 1,/
2014 1, 1990 1, 2102 1, 2039 1, 1953 1, 1951 1, 1911 1, 1893 1,/
1905 1]2400

[0,12-05-02,12:43,1,1,1,25,2,1,1,29,0,1,3,1024,0,0,5.71,41,0,2,625,625]0d00

[1, 8305 2, 1617 2, 5558 1, 3019 1, 2004 1, 1329 1, 9386 0, 5957 0,/
4847 0, 3480 0, 2645 0, 1473 0, 1055 0, 9304-1, 5074-1, 6272-1,/
8566-2, 3547-1,-8725-2, 1546-1,-3146-1,-1084-2,-1175-1,-2431-1,/
4377-1]2544
[2, 2864 2, 2138 1, 2086 1, 2186 1, 2171 1, 1998 1, 2003 1, 2020 1,/
1974 1, 1981 1, 1902 1, 1946 1, 1913 1, 1920 1, 1948 1, 1861 1,/
1832 1, 1876 1, 1852 1, 1871 1, 1749 1, 1736 1, 1755 1, 1792 1,/
1785 1]2462

[0,12-05-02,12:47,1,1,1,25,2,1,1,30,0,1,3,512,0,0,5.72,41,0,2,625,625]0cce

[1, 8324 2, 1644 2, 5666 1, 3014 1, 2214 1, 1417 1, 7913 0, 5225 0,/
4080 0, 3397 0, 2453 0, 2314 0, 1747 0, 1567 0, 1770 0, 6992-1,/
3716-1, 5187-1,-1228-1, 6221-2, 8062-1,-5177-2,-1359-1, 5930-1,/
3681-1]24fc
[2, 2820 2, 2312 1, 2335 1, 2343 1, 2277 1, 1945 1, 1919 1, 1931 1,/
2062 1, 2063 1, 1866 1, 1986 1, 2101 1, 2044 1, 1972 1, 1871 1,/
1967 1, 1893 1, 1874 1, 1844 1, 1786 1, 1722 1, 1791 1, 1821 1,/
1784 1]2450

[0,12-05-02,12:49,1,1,1,25,2,1,1,31,0,1,3,2048,0,0,5.85,42,0,2,625,625]0d0c

[1, 8828 2, 1640 2, 5498 1, 3079 1, 1884 1, 1282 1, 8525 0, 5028 0,/
3879 0, 2943 0, 1834 0, 1012 0, 5082-1, 1813-1, 3359-2, 3260-1,/
1160-1, 3372-1, 6152-1, 2122-1,-1276-1,-3923-1,-4239-1,-2941-1,/
-3376-1]253d
[2, 2787 2, 2356 1, 2171 1, 2307 1, 2278 1, 2138 1, 2100 1, 2088 1,/
2113 1, 2160 1, 2050 1, 2036 1, 2077 1, 2072 1, 2054 1, 2026 1,/
2020 1, 1982 1, 1931 1, 1905 1, 1873 1, 1857 1, 1850 1, 1860 1,/
1836 1]2416

[0,12-05-02,13:02,1,1,1,25,2,1,1,32,0,1,4,2048,0,0,5.68,39,0,2,625,625]0d0b

[1, 5543 2, 9438 1, 3083 1, 1675 1, 9983 0, 6507 0, 4443 0, 3178 0,/
2120 0, 1651 0, 1056 0, 5965-1, 9280-1, 7250-1, 1126-1, 2796-1,/
-8668-2, 4100-2, 1036-1,-1247-1,-5521-2,-1185-2,-8017-2, 3578-2,/
3488-1]2560
[2, 2865 2, 1936 1, 1996 1, 1931 1, 1946 1, 1723 1, 1734 1, 1700 1,/
1694 1, 1693 1, 1665 1, 1650 1, 1627 1, 1640 1, 1668 1, 1604 1,/
1629 1, 1626 1, 1615 1, 1599 1, 1544 1, 1516 1, 1526 1, 1507 1,/
1524 1]2452

[0,12-05-02,13:05,1,1,1,25,2,1,1,33,0,1,4,4096,0,0,5.70,39,0,2,625,625]0d0d

[1, 9691 2, 9577 1, 3049 1, 1651 1, 1046 1, 6569 0, 4202 0, 2737 0,/
1918 0, 1313 0, 1001 0, 6191-1, 2364-1, 2520-2, 2569-1, 3148-1,/
2176-1, 1747-1, 4422-2, 2661-2,-5286-2, 8000-2, 2288-2,-5626-2,/
2793-1]2528
[2, 2987 2, 1895 1, 1913 1, 1998 1, 1908 1, 1711 1, 1723 1, 1746 1,/
1750 1, 1750 1, 1672 1, 1698 1, 1684 1, 1830 1, 1661 1, 1596 1,/
1608 1, 1613 1, 1600 1, 1596 1, 1528 1, 1554 1, 1553 1, 1545 1,/
1545 1]245d

[0,12-05-02,13:16,1,1,1,25,2,1,1,34,0,1,5,4096,0,0,5.83,38,0,2,625,625]0d14

[1, 1194 3, 1013 2, 2990 1, 1422 1, 9698 0, 5671 0, 3437 0, 2381 0,/
1637 0, 1331 0, 7024-1, 4459-1, 4067-1, 2570-1, 2699-1, 8574-2,/
1217-1, 1436-2, 3232-1, 1480-1, 1134-1,-3099-2,-1266-1,-1285-2,/
-6091-2]2547
[2, 3707 2, 1891 1, 1863 1, 1899 1, 1870 1, 1674 1, 1665 1, 1675 1,/
1671 1, 1720 1, 1580 1, 1584 1, 1589 1, 1587 1, 1571 1, 1545 1,/
1535 1, 1550 1, 1559 1, 1577 1, 1511 1, 1516 1, 1500 1, 1506 1,/
1506 1]2451

[0,12-05-02,13:27,1,1,1,25,2,1,1,35,0,1,6,4096,0,0,5.89,38,0,2,625,625]0d1e

[1, 1176 3, 1400 2, 3596 1, 1613 1, 9853 0, 6263 0, 3624 0, 2674 0,/
1665 0, 1285 0, 9489-1, 6373-1, 5213-1, 2206-1, 2220-1, 1834-1,/
2006-1, 2975-2, 9021-2,-1167-1,-5782-2, 1075-1, 9503-2,-3459-2,/
-1179-1]254f
[2, 4714 2, 2417 1, 3398 1, 2808 1, 2969 1, 2038 1, 2092 1, 2186 1,/
2099 1, 1989 1, 1922 1, 1949 1, 1931 1, 1988 1, 1951 1, 1865 1,/
1844 1, 1839 1, 1869 1, 1869 1, 1792 1, 1772 1, 1787 1, 1797 1,/
1772 1]24a9

[0,12-05-02,14:47,1,1,1,25,2,1,1,36,0,1,7,4096,0,0,5.76,39,0,2,625,625]0d20

[1, 9654 2, 2641 2, 8956 1, 4634 1, 2884 1, 1772 1, 1111 1, 7702 0,/
5693 0, 3979 0, 3096 0, 1477 0, 1151 0, 3729-1, 1091 0, 3403-1,/
4769-1, 5987-2, 1204-1, 7350-1,-1154-1,-1683-1,-2203-1, 3147-1,/
-1030-3]251d
[2, 2190 2, 2439 1, 3284 1, 2419 1, 3503 1, 2444 1, 2835 1, 3695 1,/
3272 1, 2696 1, 2981 1, 2773 1, 3190 1, 3111 1, 3012 1, 2310 1,/
2060 1, 2093 1, 2543 1, 2507 1, 1765 1, 1828 1, 1720 1, 1807 1,/
1728 1]2433

[0,12-05-02,14:51,1,1,1,25,2,1,1,37,0,1,7,2048,0,0,5.78,39,0,2,625,625]0d19

[1, 9363 2, 2639 2, 8584 1, 4706 1, 2944 1, 1933 1, 1068 1, 6487 0,/
5429 0, 3513 0, 1958 0, 1618 0, 1054 0, 1330 0, 4480-1, 6360-1,/
3900-1, 5475-1, 1472-1, 7830-1, 2699-1, 1271-2, 1402-1, 1397-1,/
-7282-3]2504
[2, 2511 2, 8655 1, 9938 1, 3564 1, 2693 1, 4627 1, 3926 1, 4771 1,/
2318 1, 2382 1, 2213 1, 2614 1, 2062 1, 2858 1, 2179 1, 1942 1,/
2389 1, 2141 1, 2028 1, 2310 1, 1759 1, 1786 1, 1611 1, 1599 1,/
1556 1]2465

[0,12-05-02,15:00,1,1,1,25,2,1,1,38,0,1,8,2048,0,0,5.73,39,0,2,625,625]0d11

[1, 8401 2, 3193 2, 1034 2, 5364 1, 3581 1, 2208 1, 1439 1, 9589 0,/
7678 0, 5808 0, 4151 0, 2140 0, 2017 0, 1444 0, 1347 0, 3952-1,/
9397-1, 9813-2,-2433-1, 7367-1,-1667-1, 1955-1, 4488-1,-5730-2,/
-1797-1]252f

[2, 3184 2, 2269 1, 2374 1, 3713 1, 2512 1, 1764 1, 3512 1, 2591 1,/
2519 1, 2188 1, 1628 1, 1993 1, 1924 1, 1620 1, 3886 1, 2037 1,/
2224 1, 1606 1, 2373 1, 2102 1, 1602 1, 1547 1, 1427 1, 1471 1,/
1649 1]2439

[0,12-05-02,15:04,1,1,1,25,2,1,1,39,0,1,8,4096,0,0,5.77,38,0,2,625,625]0d1e

[1, 9582 2, 3187 2, 1014 2, 5392 1, 3417 1, 2131 1, 1278 1, 9165 0,/
7420 0, 5242 0, 3813 0, 3327 0, 1478 0, 1475 0, 1076 0, 5060-1,/
5414-1,-4327-2,-7891-3, 3216-1,-3294-2, 7261-2, 1214-2, 3904-1,/
5309-1]24f0

[2, 4918 2, 2038 1, 3937 1, 4921 1, 1966 1, 2299 1, 3548 1, 1915 1,/
2762 1, 3000 1, 3009 1, 2882 1, 3654 1, 3201 1, 3399 1, 1678 1,/
2046 1, 2172 1, 1752 1, 2018 1, 1313 1, 1347 1, 1345 1, 1312 1,/
1830 1]243f

[0,12-05-02,15:19,1,1,1,25,2,1,1,40,0,1,9,4096,0,0,5.90,40,0,2,625,625]0d11

[1, 1559 3, 8758 2, 2765 2, 1298 2, 7399 1, 4143 1, 2203 1, 1302 1,/
8800 0, 6247 0, 3559 0, 2242 0, 1332 0, 7361-1, 6014-1, 2786-1,/
4932-1, 4586-1, 5357-1, 2211-1, 1613-1, 2443-1, 1912-2,-1144-1,/
-8286-2]250f

[2, 4861 2, 3369 1, 2409 1, 2964 1, 3647 1, 2168 1, 1910 1, 2336 1,/
2814 1, 2526 1, 3361 1, 2123 1, 2238 1, 2206 1, 2011 1, 2367 1,/
1486 1, 1718 1, 1461 1, 1657 1, 1368 1, 1442 1, 1506 1, 1482 1,/
1529 1]243b

[0,12-05-02,15:35,1,1,1,25,2,1,1,41,0,1,10,4096,0,0,5.89,39,0,2,625,625]0d48

[1, 3604 3, 2943 3, 8058 2, 3484 2, 1863 2, 9469 1, 4585 1, 2568 1,/
1585 1, 1023 1, 5665 0, 2868 0, 1711 0, 7883-1, 4658-1, 3435-1,/
3134-2, 5849-2, 6164-2, 4150-2, 1658-2, 2030-3, 2624-2,-7592-2,/
1930-2]2534

[2, 2233 2, 3016 1, 1337 1, 1535 1, 1200 1, 7636 0, 8485 0, 9183 0,/
6606 0, 1900 1, 1491 1, 6399 0, 6161 0, 9934 0, 1494 1, 4406 0,/
4603 0, 4446 0, 5193 0, 4383 0, 4082 0, 3047 0, 3021 0, 4003 0,/
5510 0]242d

[0,12-05-02,16:10,1,1,1,25,2,1,1,42,0,1,11,4096,0,0,6.06,41,0,2,625,625]0d33

[1, 4105 3, 4071 3, 1014 3, 3983 2, 2024 2, 9845 1, 4742 1, 2674 1,/
1662 1, 1112 1, 5940 0, 2897 0, 1628 0, 8889-1, 2004-1,-8730-2,/
-2310-1, 8070-3,-2433-1,-2583-1,-2119-1,-2394-1,-1008-1,-1431-1,/
-3928-2]2558

[2, 2318 2, 3553 1, 1153 1, 1042 1, 9458 0, 7330 0, 7742 0, 7173 0,/
7027 0, 7396 0, 6699 0, 6631 0, 6345 0, 6498 0, 6574 0, 6685 0,/
5704 0, 5581 0, 5660 0, 6062 0, 5436 0, 5202 0, 5351 0, 5365 0,/
5420 0]2466

[0,12-05-02,16:14,1,1,1,25,2,1,1,43,0,1,11,2048,0,0,6.10,40,0,2,625,625]0d2d

[1, 3752 3, 4053 3, 1009 3, 3961 2, 2002 2, 9792 1, 4735 1, 2651 1,/
1672 1, 1128 1, 5842 0, 2660 0, 1635 0, 9267-1,-2161-2,-1341-1,/
-1349-1,-2379-1,-2868-1,-2505-1,-8328-2,-1329-1,-1794-1,-1074-1,/
-1821-1]257f

[2, 2902 2, 3993 1, 1640 1, 1413 1, 1121 1, 8112 0, 9253 0, 1068 1,/
8832 0, 8250 0, 8472 0, 7832 0, 7183 0, 7726 0, 7369 0, 7970 0,/
6772 0, 6510 0, 7568 0, 6665 0, 5376 0, 5428 0, 5309 0, 5265 0,/
5339 0]2474

[0,12-05-02,16:17,1,1,1,25,2,1,1,44,0,1,11,8192,0,0,6.14,40,0,2,625,625]0d3b

[1, 3177 3, 4022 3, 9998 2, 3931 2, 1990 2, 9732 1, 4680 1, 2655 1,/
1657 1, 1104 1, 6122 0, 2984 0, 1690 0, 9564-1, 3518-1,-8951-3,/
5387-2,-1520-1,-7618-2,-3291-1,-2108-1,-1570-1,-8268-2,-1213-1,/
1403-2]2576

[2, 4017 2, 3619 1, 1180 1, 1163 1, 1067 1, 7712 0, 7054 0, 8348 0,/
7879 0, 8294 0, 6766 0, 7381 0, 7240 0, 7135 0, 7322 0, 6166 0,/
6432 0, 6745 0, 6614 0, 6625 0, 5465 0, 5452 0, 5376 0, 5238 0,/
5424 0]246c

[0,12-06-02,11:27,1,1,1,25,2,1,1,45,0,1,12,4096,0,0,5.48,39,0,2,625,625]0d47

[1, 4874 3, 3241 3, 8347 2, 3446 2, 1791 2, 8891 1, 4319 1, 2520 1,/
1626 1, 1134 1, 6939 0, 4271 0, 2617 0, 1495 0, 9862-1, 5368-1,/
3724-1, 2882-1, 2723-2, 8289-2, 1334-1, 6617-2,-5788-2, 2883-2,/
1401-2]252a

[2, 5409 0, 3553 1, 2002 1, 2726 1, 1982 1, 1482 1, 2257 1, 1411 1,/
1685 1, 1413 1, 1240 1, 1278 1, 1441 1, 1471 1, 1376 1, 9515 0,/
9098 0, 8995 0, 9101 0, 9801 0, 6261 0, 5748 0, 5627 0, 5639 0,/
5555 0]2456

[0,12-06-02,11:36,1,1,1,25,2,1,1,46,0,1,13,4096,0,0,5.72,40,0,2,625,625]0d3e

[1, 4480 3, 3938 3, 9773 2, 3866 2, 1964 2, 9694 1, 4797 1, 2780 1,/
1816 1, 1239 1, 7255 0, 4096 0, 2473 0, 1580 0, 9904-1, 5595-1,/
3051-1, 1375-1, 1319-1, 8220-2,-8964-3, 4379-2,-1271-3,-4717-2,/
-1533-2]2563

[2, 2025 2, 3528 1, 1016 1, 9101 0, 1261 1, 6646 0, 6392 0, 6618 0,/
8184 0, 5891 0, 6068 0, 5260 0, 5211 0, 5013 0, 5820 0, 4405 0,/
4070 0, 4443 0, 4375 0, 4178 0, 3305 0, 3291 0, 3215 0, 3292 0,/
3325 0]2423

[0,12-06-02,11:46,1,1,1,25,2,1,1,47,0,1,14,4096,0,0,5.77,39,0,2,625,625]0d4e

[1, 3797 3, 3372 3, 8346 2, 3343 2, 1742 2, 8826 1, 4397 1, 2549 1,/
1607 1, 1073 1, 6405 0, 3536 0, 2088 0, 1205 0, 6397-1, 4272-1,/
2498-1, 2275-1, 4657-2, 1565-1,-1082-2, 5138-2, 1975-2, 3342-2,/
-5531-3]2525

[2, 2518 2, 8099 0, 7581 0, 8041 0, 8491 0, 5889 0, 4890 0, 5520 0,/
5339 0, 5409 0, 4374 0, 4394 0, 4361 0, 4539 0, 4416 0, 3783 0,/
3728 0, 3686 0, 3712 0, 3605 0, 2985 0, 2945 0, 2897 0, 2861 0,/
2780 0]248d

[0,12-06-02,11:54,1,1,1,25,2,1,1,48,0,1,15,4096,0,0,5.52,38,0,2,625,625]0d47

[1, 3317 3, 2020 3, 5817 2, 2588 2, 1424 2, 7294 1, 3587 1, 2049 1,/

1287 1, 8310 0, 4907 0, 2647 0, 1637 0, 9701-1, 9583-1, 3453-1,
2954-3, 2075-2, 2854-2,-2394-1,-1808-1,-1460-1,-1792-1,-9072-2,
-1629-1]2561
[2, 4759 2, 1966 1, 1980 1, 1924 1, 1947 1, 1529 1, 1536 1, 1586 1,
1550 1, 1541 1, 1447 1, 1426 1, 1437 1, 1412 1, 1427 1, 1375 1,
1379 1, 1372 1, 1371 1, 1352 1, 1271 1, 1259 1, 1261 1, 1248 1,
1272 1]243e

;

ANEXO 7

DISTRIBUCIÓN DE LAS ESPECIES QUÍMICAS MAYORES EN MANANTIALES DE CUNDINAMARCA

