



PROYECTO INVESTIGACIÓN GEOTÉRMICA DE COLOMBIA

ESTIMACIÓN PRELIMINAR DEL POTENCIAL GEOTÉRMICO DE COLOMBIA

Bogotá, agosto de 2020



El futuro
es de todos

Minenergía

SERVICIO GEOLÓGICO COLOMBIANO ©

Oscar Paredes Zapata
Director General

Mario Andrés Cuellar Cárdenas
Director Técnico de Geociencias Básicas

Claudia María Alfaro Valero
Coordinadora Grupo de Investigación Geotérmica

AUTORES

Claudia María Alfaro Valero
Jesús Bernardo Rueda Gutiérrez
Yenny Paola Casallas Veloza
Gina Z. Rodríguez Ospina
Jaison E. Malo Lázaro

Grupo de Investigación Geotérmica

Citación: Alfaro, C. M., Rueda Gutiérrez, J. B., Casallas Y. P., Rodríguez G. Z., y Malo J. E. (2020). *Estimación Preliminar del Potencial Geotérmico de Colombia*. Bogotá: Servicio Geológico Colombiano.

CONTENIDO

RESUMEN	5
ABSTRACT	6
INTRODUCCIÓN	7
1 ANTECEDENTES	9
1.1 Potencial geotérmico de Colombia	9
1.2 Método volumétrico	31
1.2.1 Descripción del Método Volumétrico	32
1.2.2 Aplicación del método volumétrico en el mundo	37
2 METODOLOGÍA	45
2.1 Evaluación del recurso	45
2.2 Fichas de información	51
2.2.1 Ficha geoquímica	52
2.2.2 Ficha Geológica	53
2.2.3 Ficha de Potencial	53
2.3 Consideraciones generales	55
2.3.1 Definición de áreas geotérmicas	55
2.3.2 Bloques geotérmicos	56
2.3.3 Consideraciones geológicas	57
3 RESULTADOS	58
3.1 Cálculo del potencial de las áreas geotérmicas	59
3.1.1 Área Geotérmica de Paipa	59
3.1.2 Área Geotérmica de Iza	63
3.1.3 Área Geotérmica de San Diego	65
3.1.4 Área Geotérmica del Volcán Cerro Bravo	68
3.1.5 Área Geotérmica Villamaría-Termales	71
3.1.6 Área Geotérmica Nereidas-Botero Londoño	73
3.1.7 Área Geotérmica Hacienda Granates	75
3.1.8 Área Geotérmica del Volcán Paramillo de Santa Rosa	77
3.1.9 Área Geotérmica de la Laguna Otún	80
3.1.10 Área Geotérmica Volcán Nevado del Tolima	82
3.1.11 Área Geotérmica Volcán Cerro Machín	84
3.1.12 Área Geotérmica Volcán del Huila	86
3.1.13 Área Geotérmica de la Caldera Gabriel López	88
3.1.14 Área Geotérmica de la Caldera del Paletará	90
3.1.15 Área Geotérmica de los Volcanes de Sotará – Sucubún	93
3.1.16 Área Geotérmica de los Volcanes Doña Juana-Las Ánimas	95

3.1.17	Área Geotérmica de los Volcanes Galeras-Morasurco	97
3.1.18	Área Geotérmica del Volcán de Sibundoy	99
3.1.19	Área Geotérmica del Volcán Azufral	102
3.1.20	Área Geotérmica del Volcán Cumbal	105
3.1.21	Área Geotérmica del Complejo Volcánico Chiles - Cerro Negro	108
3.2	Cálculo de potencial por departamentos	110
3.2.1	Antioquia	110
3.2.2	Arauca	112
3.2.3	Atlántico	113
3.2.4	Boyacá	115
3.2.5	Casanare	118
3.2.6	Cesar	120
3.2.7	Chocó	122
3.2.8	Cundinamarca	124
3.2.9	Guaviare	127
3.2.10	Huila	129
3.2.11	Magdalena	131
3.2.12	Meta	133
3.2.13	Nariño	135
3.2.14	Norte de Santander	136
3.2.15	Santander	139
3.2.16	Tolima	140
	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	143
	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	145
	ANEXOS	161

RESUMEN

A través del método volumétrico se calculó el potencial geotérmico de Colombia a partir de la información geotermométrica de los manantiales termales registrados en el territorio nacional y, asumiendo un volumen específico de influencia de un manantial o grupo de manantiales termales (clúster), como posible reservorio. Con un área de influencia de 2 km² y un espesor de 1.5 km para cada manantial termal, estos se agruparon en un total de 165 clústeres (grupo de manantiales o manantiales termales aislados) distribuidos en 21 áreas geotérmicas y 16 departamentos, localizados dentro y fuera de las áreas geotérmicas delimitadas de manera preliminar.

Las 21 áreas geotérmicas asociadas a sistemas volcánicos activos e inactivos se agrupan en cinco bloques localizadas en la Cordillera Oriental (Paipa - Iza); al norte (San Diego y Cerro Bravo - Cerro Machín) y sur (Huila - Sucubún y Las Ánimas - Chiles) de la Cordillera Central, con algunas áreas en el flanco oriental de la Cordillera Occidental (Azufral, Cumbal y Chiles – Cerro Negro). Los manantiales termales fuera de las áreas geotérmicas definidas se distribuyen en 16 departamentos localizados en zonas costeras (Atlántico, Magdalena, Chocó), en la Zona Andina (Boyacá, Antioquia, Tolima, Huila, Cauca, Nariño, Cesar, Norte de Santander, Santander) y en el piedemonte llanero, Llanos Orientales y amazonas (Arauca, Casanare, Meta, Guaviare).

La potencia eléctrica total de las 21 áreas geotérmicas distribuida en 80 clústeres se calculó en 1170.20 MWe con un calor almacenado de 138.60 EJ. El mayor recurso se encuentra en las áreas geotérmicas de San Diego, Santa Rosa, Cerro Machín y Nereidas Botero Londoño con 141.85, 137.24, 129.94 y 100.72 MWe, respectivamente, todas estas localizadas en el bloque norte de la Cordillera Central. Al sur se destacan las áreas de la Caldera del Paletará con 117.96 MWe y Azufral con 81.9 MWe.

De los 16 departamentos con presencia de manantiales termales se calculó un total de 24.95 MWe de potencia eléctrica y 49.56 EJ de calor, distribuidos en 85 clústeres. El mayor potencial está en el departamento de Huila con 12.09 MWe y 7.08 EJ, distribuidos en 11 clústeres. Cundinamarca presenta la mayor cantidad de manantiales termales (50) agrupados en 24 clústeres mostrando la mayor cantidad de calor (15.75 EJ) pero con una baja potencia de 1.99 MWe.

ABSTRACT

Using a volumetric method, the geothermal potential of Colombia was calculated from geothermometric information about hot springs that have been recorded within its national boundaries. Assuming a specific volume of influence for a spring or group of hot springs (cluster), they could act as a possible reservoir. With an area of influence of 2 km² and a thickness of 1.5 km for each hot spring, these were grouped into a total of 165 clusters (groups of springs or isolated hot springs) distributed among 21 geothermal areas and 16 departments, located outside of preliminary demarcation of the geothermal areas.

The 21 geothermal areas associated with active and inactive volcanic systems are grouped into five surrounding areas located in the Cordillera Oriental (Paipa - Iza). These are located to the north (San Diego and Cerro Bravo - Cerro Machín) and south (Huila - Sucubún and Las Ánimas - Chiles) of the Cordillera Central, with some areas on the eastern flank of the Cordillera Occidental (Azufra, Cumbal and Chiles - Cerro Negro). The hot springs outside the defined geothermal areas are distributed among 16 departments located in the coastal areas (Atlántico, Magdalena, Chocó), in the Andean area (Boyacá, Antioquia, Tolima, Huila, Cauca, Nariño, Cesar, Norte de Santander, Santander) and in the foothills of the Llanos, Llanos Orientales and Amazonas (Arauca, Casanare, Meta, Guaviare).

The total electrical power distributed among 80 of these clusters located within the 21 geothermal areas was calculated at 1170.20 MWe, with a stored heat of 138.60 EJ. The greatest resources were found in the geothermal areas of San Diego, Santa Rosa, Cerro Machín and Nereidas Botero Londoño, with 141.85, 137.24, 129.94 and 100.72 MWe, respectively. These areas are all located in the northern envelope of the Cordillera Central. To the south, the areas of the Caldera del Paletara, with 117.96 MWe, and Azufra, with 81.9 MWe stand out.

Of the 16 departments containing hot springs, a total of 24.95 MWe of electrical power and 49.56 EJ of heat were calculated, distributed among 85 clusters. The greatest potential is in the department of Huila, with 12.09 MWe and 7.08 EJ, distributed among 11 clusters. Cundinamarca has the largest number of hot springs (50) grouped into 24 clusters, showing the greatest amount of heat (15.75 EJ) but with a low power of 1.99 MWe.

INTRODUCCIÓN

La abundancia de los recursos geotérmicos en el territorio colombiano se infiere de su localización en límites entre placas tectónicas convergentes, sobre un segmento del Anillo de Fuego del Pacífico y, de la ocurrencia de manifestaciones superficiales del calor del subsuelo como volcanes, muchos de ellos con actividad cuaternaria, manantiales termales y fumarolas. Estos recursos representan una oportunidad de desarrollo para el país, no solo para la generación eléctrica, que es el uso de mayor demanda energética, sino para diversos usos directos de la energía térmica, los cuales según Lund y Toth (2020) incluyen a nivel global, balneología y usos recreativos de las aguas termales, calefacción, invernaderos y calentamiento del suelo, acuacultura, secado de cultivos agrícolas, procesos industriales diversos (curado de cemento, embotellamiento de agua y bebidas carbonatadas, pasteurización de leche, industria del cuero, extracción química, procesamiento de pulpa de papel, extracción de minerales, entre otros), fusión de nieve y refrigeración, principalmente.

Sin embargo, la utilización de los recursos geotérmicos en Colombia ha sido muy limitada. Las aguas termales se utilizan con fines recreativos desde tiempos inmemoriales y su uso en termalismo, actividad que forma parte del turismo de salud y bienestar, ha sido promovido desde hace pocos años por el Ministerio de Comercio, Industria y Turismo (Mincomercio, 2013). Por otra parte, y con excepción de una bomba de calor instalada en la localidad de Tocancipá, Cundinamarca, utilizada para refrigeración de un cuarto frío (Ortiz, 2017), en el país no existe un aprovechamiento industrial del calor geotérmico.

La cuantificación de los recursos geotérmicos implica un nivel de conocimiento detallado de los sistemas geotérmicos, lo cual está precedido por el desarrollo de programas de exploración mediante los cuales se definen entre otras variables, dimensiones y características físicas y fisicoquímicas de los reservorios y fluidos geotérmicos. Este nivel de conocimiento no está disponible todavía para los sistemas geotérmicos del territorio colombiano. No obstante, el sector energético de Colombia demanda información aproximada de la magnitud de estos recursos con el fin de hacer posible una proyección de su posible contribución a la diversificación de la matriz energética, objetivo de la línea estratégica de Generación de Energía, del Plan Integral de Cambio Climático del Ministerio de Minas y Energía (Minenergía, s.f.) y al cumplimiento de los objetivos del programa de transformación energética, que promueve la incorporación de energías renovables de fuentes no convencionales y la modernización del sector (Minenergía, 2018). Dicha aproximación también es requerida por el sector energético, con el fin de definir un plan de acción, para el desarrollo de estos recursos.

El presente trabajo cumple con el propósito de estimar de manera aproximada la magnitud de recursos geotérmicos asociados a sistemas hidrotermales convectivos y fue realizado a partir de la iniciativa de la Misión Exploratoria Geotermia del Banco Interamericano de Desarrollo (BID, 2019), en apoyo a los objetivos de Minenergía, de promover a la geotermia como fuente energética renovable no convencional. Para llevar a cabo esta estimación, los manantiales termales del territorio fueron considerados como entidades representativas de dichos sistemas y a éstos les fueron asignadas variables asumidas e inferidas para calcular calor total almacenado, calor recuperable y potencia eléctrica, siguiendo el método volumétrico del Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS, por su sigla en inglés) (Brook *et al.*, 1978). El alcance de la estimación no incluye los recursos asociados a posibles sistemas hidrotermales convectivos ciegos; es decir, sin manifestaciones superficiales, como tampoco posibles recursos de roca seca caliente, relacionados con cuerpos ígneos en enfriamiento, de baja permeabilidad (y saturación de agua), ni recursos geotérmicos geopresurizados enterrados en cuencas sedimentarias.

El trabajo se enmarca en el mandato dado al Servicio Geológico Colombiano (SGC) de adelantar investigaciones para caracterizar las áreas geotérmicas del país e implementar la metodología para estimar el potencial geotérmico, definido en el Pacto por los recursos minero-energéticos para el crecimiento sostenible y la expansión de oportunidades, del Plan Nacional de Desarrollo 2018-2022 (Colombia, 2019), así como en el proyecto, en implementación, “Atlas Geotérmico de Colombia” del Grupo de Trabajo Exploración de Recursos Geotérmicos, que forma parte de la Dirección de Geociencias Básicas, del SGC.

Objetivos

Evaluar el potencial energético de los recursos geotérmicos de Colombia a partir de la estimación preliminar de calor acumulado y potencia eléctrica, con base en información inferida y asumida para manantiales termales.

Proveer al Ministerio de Minas y Energía y a los posibles inversionistas interesados en proyectos productivos, insumos de información básicos para proyectar, desde esta fase temprana, el desarrollo de la geotermia de Colombia.

Implementar una metodología de evaluación del potencial energético para estimaciones soportadas en observaciones y datos, para aplicarla a futuro en la medida en que son concluidos los estudios de exploración con perforaciones.

Consolidar la investigación geotérmica en temas regionales como los propuestos en el proyecto Atlas Geotérmico de Colombia, el cual incluye la capa de estimación de potencial energético.

1 ANTECEDENTES

1.1 Potencial geotérmico de Colombia

El potencial de generación eléctrica de los recursos geotérmicos hidrotermales fue estimado por primera vez para Colombia, con base en criterio de expertos, entre 700 y 1370 MWe, con la tecnología disponible a 1999 (Gawell *et al.*, 1999). El mismo reporte estima que habría un aumento, en la capacidad de generación, a 1340 - 2210 MWe, con tecnología mejorada por desarrollo de avances en perforación y técnicas para aumentar la permeabilidad. Con base en esta estimación, Colombia fue considerada como uno de los países en donde se podría cubrir 20 % de la demanda energética a partir de fuente geotérmica.

A partir del estudio de reconocimiento de los recursos geotérmicos de la república de Colombia (OLADE y Geotérmica Italiana, 1982), se estableció que toda la cordillera volcánica colombiana (Cordillera Central) hospeda una pronunciada anomalía térmica de carácter regional, inferida a partir de la persistencia de la actividad magmática a lo largo de un prolongado período, en las mismas áreas y de la presencia de numerosos aparatos volcánicos centrales activos o muy recientes, cuyo basamento es en general de permeabilidad baja, variable y de difícil evaluación.

Dicho estudio de reconocimiento (OLADE y Geotérmica Italiana, 1982), así como la Investigación Geotérmica del Macizo volcánico del Ruiz (CHEC, CONTECOL, Geotérmica Italiana, 1983; Geocónsul, 1992) han aportado a la identificación de la gran mayoría de las áreas geotérmicas hidrotermales del territorio colombiano. Adicionalmente, el SGC ha propuesto nuevas áreas con base en la ocurrencia de manantiales termales (SGC, 2015) y posibles fuentes de calor (SGC, 2019). La lista de estas áreas es presentada en la tabla 1.

En algunas de estas áreas geotérmicas se han realizado estudios de exploración, como se describe brevemente a continuación:

Tabla 1. Áreas con recursos geotérmicos hidrotermales identificadas en Colombia

Área geotérmica	Referencia de la Identificación
Complejo volcánico Chiles – Cerro Negro	OLADE y Geotérmica Italiana (1982)
Volcán Azufral	
Volcán Doña Juana	
Volcán Sotará	
Volcán Puracé	
Volcán de Paipa	
Volcán Galeras	
Volcán Cumbal	
Volcán Nevado del Huila	
Volcán Cerro Bravo	
Volcán Nevado del Ruiz Sectores: Nereidas – Botero Londoño Villamaría – Termales Hacienda Granates	CHEC, CONTECOL, Geotérmica Italiana (1983); Geocónsul (1992)
Volcán Paramillo de Santa Rosa	
Laguna del Otún	
Volcán Nevado del Tolima	
Volcán Cerro Machín	
San Diego	SGC (2013)
Volcán de Sibundoy	Este trabajo
Caldera Gabriel López	
Sotará - Sucubún	
Iza	

Fuente: autores

Complejo volcánico Chiles – Cerro Negro: El área geotérmica del Complejo Volcánico Chiles – Cerro Negro (figura 1) fue reconocida como favorable a la presencia de campos geotérmicos industriales, a partir de evidencias geológicas de las que destacan su grado de evolución magmática, su edad reciente y persistencia de la actividad volcánica por un largo período de tiempo, la presencia de importantes manifestaciones termales como manantiales, así como un cráter de explosión freática y la existencia de un substrato de vulcanitas terciarias de espesor importante (OLADE y Geotérmica Italiana, 1982).



Figura 1. Complejo volcánico Chiles – Cerro Negro

Fuente: <https://www2.sgc.gov.co/sgc/volcanes/>

En el marco del Proyecto Geotérmico Binacional Tufiño-Chiles-Cerro Negro (Aquater, 1987), se realizó el estudio de prefactibilidad de un área con extensión de 1800 km² distribuidos entre territorio ecuatoriano y colombiano, la cual incluye este complejo volcánico. A partir de este estudio se formuló un modelo conceptual preliminar que propone: 1. una anomalía térmica regional relacionada con un gradiente geotérmico de 36 a 50 °C/km. 2. Intrusiones de magma relativamente someros que actúan como fuente de calor a profundidades entre 3 y 7 km, relacionados con los volcanes y estructuras del Valle Interandino. 3. Una capa sello conformada por productos volcánicos con intensa alteración hidrotermal argílica, 4. Un reservorio geotérmico profundo de permeabilidad secundaria, a más de 1300 m de profundidad con temperatura máxima estimada de 220-230 °C hacia el volcán Chiles, 5. Un reservorio superficial, a menos de 1000 m, con temperatura del orden de 100 °C y, 6. Una elevación media de la recarga de 3800 m.s.n.m. Los resultados de este trabajo incluyen la propuesta de tres pozos de gradiente térmico con profundidad de 400 a 600 m.

De acuerdo con la descripción de Beate (2005), la fuente de calor son los volcanes Chiles y Cerro Negro, las rocas del reservorio podrían ser rocas volcánicas del Terciario, con permeabilidad secundaria razonable, originada en el fracturamiento causado por la intersección entre las fallas activas NNE con fallas locales E-W y, la capa sello, correspondería a rocas con alteración hidrotermal que alcanzan la superficie en afloramientos encontrados a 2.5 Km N y 1.5 km al sur del volcán de Chiles que sugieren un reservorio de grandes dimensiones. Entre las manifestaciones hidrotermales, de mayor interés en la zona, se cuentan los manantiales termales de Aguas Hediondas con temperatura de descarga de 55 °C, pH ácido y fuerte descarga de H₂S, localizadas a lo largo de estructuras E-W, a 2-3 km al oriente del Volcán Chiles; terrazas de sílica sinter indicativas de descarga de aguas neutras cloruradas de un sistema geotérmico de alta temperatura, localizadas a 1 km al oriente de las anteriores y, aguas bicarbonatadas entre el volcán de Chiles y Tufiño (Ecuador).

En 2009, un pozo de gradiente térmico de 554 m de profundidad y diámetro delgado (NQ), fue perforado del lado ecuatoriano, a 3545 m.s.n.m, a unos 7 km al ESE del volcán Chiles. Su litología está conformada por depósitos mal clasificados del pleniglacial (till glacial), flujos de lava de composición riodacítica, flujo de lava de composición andesítica – dacítica y brechas volcánicas. A lo largo de la secuencia estratigráfica se identificó la presencia de alteración subpropilítica, extendida a lo largo de todo el pozo y argílica, en la parte superior de la secuencia (Chancusig, 2017). Las mediciones de temperatura para estimar el gradiente geotérmico no fueron realizadas (Beate y Urquizo, 2015).

El potencial del área geotérmica Tufiño-Chiles - Cerro Negro fue estimado en 138 MWe, en el lado ecuatoriano, a partir de información de superficie usando el método volumétrico de calor almacenado (Almeida, 1990).

Volcán Azufra! El área geotérmica del volcán Azufra! (figura 2), también fue identificada como favorable a la presencia de campos geotérmicos industriales, por el estudio de reconocimiento (OLADE y Geotérmica Italiana, 1982). Los rasgos geológicos en que se basa dicha identificación incluyen, su edad reciente y larga persistencia de la actividad volcánica, evolución magmática completa, presencia de cráteres de explosiones freáticas en el interior de la caldera, presencia de actividad fumarólica y de numerosas manifestaciones hidrotermales, sustrato constituido por vulcanitas terciarias y evidencia de un acuífero de alta temperatura.

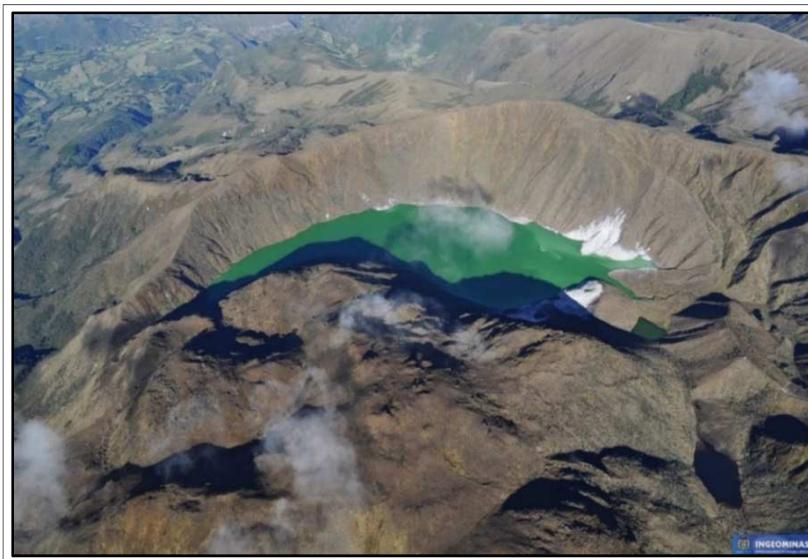


Figura 2. Volcán Azufra!

Fuente: <https://www2.sgc.gov.co/sgc/volcanes/>

Importantes rasgos de interés geotérmico fueron inferidos de la caracterización de la alteración hidrotermal de esta área, que sirvieron como base para el planteamiento del primer modelo conceptual del sistema, de alta entalpía, en el que se plantea un reservorio potencial de unos 250°C, entre la zona fílica-propilítica y una capa sello conformada por las zonas hidrotermales fílica y argílica (OLADE y Geotérmica Italiana, 1982).

Los estudios de prefactibilidad en etapa temprana, realizados en esta área geotérmica por el Servicio Geológico Colombiano, permitieron formular un modelo conceptual preliminar, basado en la integración de trabajos de exploración geológica, geofísica y geoquímica de fluidos. Este modelo propone una fuente de calor por debajo de 4000 m, un reservorio con temperatura entre 250 y 280°C a unos 2000 m de profundidad, posiblemente hospedado en ignimbritas o lavas; una capa sello conformada por depósitos de flujos piroclásticos y oleadas alterados hidrotermalmente; una zona de ebullición dentro del cráter, entre las

fallas regionales y locales (Cali - Patía y Tercán - Chimangual) y por encima de la zona de upflow, evidente en superficie a partir de manifestaciones hidrotermales con descarga de fluidos de pH ácido y alteración hidrotermal argílica avanzada y, una zona de flujo lateral (outflow) de mayor extensión (unos 11 km) en dirección SE (Alfaro *et al.*, 2015). Estudios complementarios de geología estructural (Rodríguez y Rueda, 2017), geofísica (Beltrán, 2016 y Rodríguez-Rodríguez, 2018) y modelamiento geológico 3D (Matiz, 2020), principalmente, han sido realizados en el marco de proyectos de exploración geotérmica del SGC. La integración de estos trabajos para la formulación de una nueva versión del modelo conceptual descriptivo está en proceso.

De acuerdo con Zapata (2015) la potencia eléctrica, estimada por el método volumétrico de calor almacenado, para esta área geotérmica, es de 89.5 MWe en promedio con una desviación estándar de 37 MWe.

Volcán de Paipa: El área geotérmica de Paipa también fue reconocida como de gran interés geotérmico (prioridad media-alta), principalmente a partir de la presencia del volcán, la abundancia y temperatura de descarga de sus manantiales termales y la cobertera sedimentaria, que sugiere la posibilidad de condiciones de permeabilidad favorables (OLADE y Geotérmica Italiana, 1982).



Figura 3. Complejo de domos Alto Los Godos. Volcán de Paipa
Fuente: autores

Varios modelos conceptuales han sido propuestos, para esta área geotérmica, a partir de estudios de exploración parciales, principalmente geológicos y geoquímicos (Ferreira y Hernández, 1988; Bertrami *et al.*, 1990; Alfaro *et al.*, 2005). De acuerdo con el modelo conceptual descriptivo más reciente, basado en la integración de los estudios de

exploración de superficie y subsuperficie (geología, geofísica de campos potenciales y magnetotelérfica y, geoquímica) concluidos por el SGC, el sistema geotérmico de Paipa localizado en el ambiente sedimentario de la Cordillera Oriental pero relacionado con un volcán del mismo nombre, está definido por los siguientes rasgos: una zona de recarga al oriente y sur del área a unos 2800 – 2900 m.s.n.m., un reservorio con temperatura alrededor de 230°C, hospedado en rocas del basamento y otro más somero en rocas sedimentarias de la formación Une; una fuente de calor magmática probablemente asociada a intrusiones como las que subyacen dos complejos de domos riolíticos (Alto Los Godos, figura 3 y Alto Los Volcanes), algunas de ellas posiblemente con desgasificación actual; capa sello conformada por niveles arcillosos presentes en la secuencia sedimentaria y dos zonas de descarga en los sectores llamados ITP-Lanceros y El Batán. El fluido geotérmico experimenta mezclas que enmascaran su composición, en particular con un circuito de agua salada (sulfatada sódica) que cambia completamente la firma química del agua del reservorio (Alfaro et al., 2017).

Una misión del Japan Consulting Institute (1983) realizó un estudio de factibilidad para la construcción de una planta de 15 MWe, para el Instituto Colombiano de Energía Eléctrica – ICEL (hoy Instituto de Planificación y Promoción de Soluciones Energéticas para las Zonas No Interconectadas – IPSE), después de llevar a cabo algunas actividades de campo y de revisar la información técnica disponible, sobre este sistema.

Volcán Nevado del Ruiz: Nereidas – Botero Londoño: El conocimiento de los sistemas geotérmicos albergados en el Complejo volcánico Cerro Bravo – Cerro Machín, localizado en la Cordillera Central de Colombia, se empezó a construir a partir de la caracterización de las principales fuentes termales y descargas de gas (Arango *et al.*, 1970). Este trabajo, realizado a partir del interés de la Central Hidroeléctrica de Caldas (CHEC), con fines de generación eléctrica, marcó el inicio del primer proyecto de exploración geotérmica propiamente dicho, realizado en Colombia, denominado Investigación geotérmica del Macizo Volcánico del Ruiz (CHEC, CONTECOL, Geotérmica Italiana, 1983), ver vista panorámica de la cima del Nevado del Ruiz en figura 4.



Figura 4. Cráter Arenas. Volcán Nevado del Ruiz
Fuente: <https://www2.sgc.gov.co/sgc/volcanes/>

Dicha investigación estableció que, aunque en toda la zona se puede considerar que existe una anomalía térmica regional, la distribución de los volcanes, su edad, las manifestaciones termales y la tectónica permiten seleccionar áreas específicas con mayores anomalías. Al norte del polígono, entre los lineamientos Nevado del Ruiz y Botero Londoño y Termales de San Vicente – Laguna del Otún – Cerro España, se identificó la zona más prometedora en la que, sin embargo, posiblemente existe un problema de permeabilidad dado el escaso fracturamiento y diaclasamiento de vulcanitas terciarias y cuaternarias y a la plasticidad del basamento metamórfico. Se planteó la posibilidad de desarrollar acuíferos en la zona de mayor contraste de permeabilidad en el contacto entre las lavas y las rocas del basamento, aunque los resultados de los estudios geofísicos y la emergencia de los manantiales termales sugieren circuitos independientes controlados por fallas, más que la existencia de un acuífero con extensión lateral (CHEC, Contecol, Geotérmica Italiana, 1983).

Los manantiales termales de San Vicente y Botero Londoño fueron destacados como los de mayor importancia geotérmica por su composición clorurada sódica, su temperatura de descarga (92 a 93 °C) y su temperatura geoquímica (230-240 °C). La zona de Las Nereidas – Laguna del Otún, también fue destacada por los espesores elevados establecidos para la cobertura volcánica, con manifestaciones de alta temperatura (83 – 85 °C) y una elevada relación H_2/CH_4 , que sugiere altas temperaturas en el reservorio. Al sur de la zona más prometedora, esta investigación destacó la importancia geotérmica del Cerro Machín, por considerar que alberga una anomalía térmica superficial inferida de su edad reciente, la estructura interpretada entonces como una caldera y el grado de evolución de sus productos (CHEC, Contecol, Geotérmica Italiana, 1983).

Giggenbach *et al.* (1990) postularon un modelo del sistema volcánico-magmático-hidrotermal, del Nevado del Ruiz, que representa la distribución potencial de fluidos dentro de la estructura volcánica. En este modelo se asumió que el sistema hidrotermal está centrado en el cráter del Nevado del Ruiz y se propuso la existencia de una envoltura extensa bifásica (vapor y salmuera), rodeando el sistema magmático que proporciona el ambiente para una intensa interacción fluido-roca que promueve la conversión de los fluidos inicialmente ácidos y oxidantes, del sistema magmático, a fluidos neutros y reductores, del sistema hidrotermal. La zona bifásica rodea una zona de una sola fase vapor y la separa de la salmuera clorurada sódica (fluido geotérmico), cuya dirección de flujo es al occidente, hacia la zona de los manantiales de Botero Londoño. Una cubierta rígida hidrotermal (capa sello) somera, cubre la fase vapor y la zona bifásica, impide la liberación del exceso de presión del fluido a la superficie y favorece un gradiente geotérmico elevado. Fluidos altamente inmaduros formados por absorción de gases magmáticos en agua subterránea superficial, descargan en la parte alta del edificio volcánico (manantiales de Aguas Calientes y Hotel Termales del Ruiz).

Para el flanco occidental del Nevado del Ruiz y hasta la zona de San Vicente (Paramillo de Santa Rosa), un modelo conceptual fue propuesto a partir de nuevos estudios de exploración (Zuluaga, 2012): La fuente de calor corresponde a por lo menos dos cámaras magmáticas superficiales en el sector Nevado del Ruiz – Nevado Santa Isabel. No hay evidencias de la existencia de un reservorio con extensión lateral. El reservorio y la circulación del fluido estarían controlados por el medio fisurado, posiblemente en rocas del complejo Cajamarca y/o en las intrusiones del Stock de Manizales y el Batolito de El Bosque, a unos 2 km de profundidad. El fluido profundo estaría a una temperatura superior a 230 °C. Teniendo en cuenta que la localización de los manantiales termales y el afloramiento de domos, están controlados por los sistemas de fallas N10° - 20°E: San Jerónimo y Palestina, fallas N40°-60°W: Villamaría – Termales, San Ramón, Nereidas, Rio Claro, San Eugenio y Campo Alegrito y, fallas N 60°-80° E: Falla Santa Rosa, se propusieron conductos de circulación del fluido geotérmico a la superficie (manifestaciones termales), en cinco bloques con dirección NW: Bloque I, al norte del volcán Nevado del Ruiz, con límite en la falla Villamaría – Termales. Bloque II, limitado por las fallas Villamaría - Termales y Nereidas. Bloque III, entre las fallas Nereidas y Rio Claro. Bloque IV: Entre los ríos Claro y Campolegrito y Bloque V, al suroccidente del área.

A partir de una revisión de la información de exploración de la Investigación Macizo Volcánico del Ruiz y observaciones complementarias, se identificaron tres zonas principales de interés geotérmico: Nereidas – Botero Londoño, Volcán Machín y Laguna del Otún. Otras áreas de interés secundario fueron identificadas y sugeridas para continuar con los estudios de exploración: Volcán Cerro Bravo, Falla Villamaría – Termales y Santa Rosa- San Vicente (Geocónsul, 1992). Este reporte fue la principal referencia para la descripción y definición de dichas áreas geotérmicas (polígonos), en este documento.

Según CHEC, Geocónsul, Geotérmica Italiana (1983), el sector de Nereidas del área geotérmica *Nereidas – Botero Londoño*, está a una cota elevada en el Nevado del Ruiz (y poca distancia de la chimenea volcánica, nota fuera de texto), por lo que se presume que tiene valores máximos de la anomalía térmica y registra un espesor elevado de la cobertera volcánica lo cual favorece las probabilidades de acuíferos profundos dentro de esta secuencia. Las principales fallas del área geotérmica son Nereidas y Río Claro, con dirección NW-SE. Esta área concentra varias manifestaciones hidrotermales como la fumarola Nereidas y manantiales termales con elevada relación H_2/CH_4 , indicadora de alta temperatura. Los manantiales termales son del tipo bicarbonatado-sulfatado (Nereidas, Chorro Negro) y clorurado neutro (Botero Londoño). De acuerdo con Geocónsul (1992), la fuente de calor de este sistema sería la cámara magmática del Nevado del Ruiz, al parecer constituida por partes semifundidas, en proceso de cristalización y porciones sólidas de rocas desgasificadas. Según este trabajo, la zona del fluido líquido alrededor de la zona bifásica planteada por Giggenbach (1990), solo estaría presente en las partes más fracturadas del subsuelo y no alrededor de todo el sistema hidrotermal y, el reservorio geotérmico que podría aprovecharse comercialmente podría corresponder a la zona bifásica, seguramente localizada en rocas del basamento y/o vulcanitas terciarias y cuaternarias.

En el área geotérmica Nereidas-Botero Londoño se perforó el pozo N1 (Nereidas-1), el que, hasta hoy, es el único pozo geotérmico exploratorio de Colombia, con longitud total de 1469 m y 1356 m de profundidad. La temperatura de fondo de pozo fue de 200 °C lo cual permitió confirmar la anomalía térmica a profundidades someras en el Valle de las Nereidas y definir la profundidad del basamento metamórfico (Complejo Cajamarca) a unos 760 m sobre el que se encuentran productos volcánicos (andesitas de dos piroxenos, andesitas anfibolíticas y dacitas). En la columna se identificaron cuatro zonas de alteración hidrotermal: argílica (de la superficie hasta unos 400 m), argílica – sericítica (entre 400 y 640 m), sericítica (entre 640 y 1067 m) y una zona llamada termometamórfica (desde 1067 m hasta el fondo del pozo), en la que se identificaron procesos como actinolización de anfíboles y albitización y epidotización de las plagioclasas (Monsalve *et al.*, 1998).

La potencia eléctrica proyectada por Isagen (Rodríguez, 2011) para el llamado Proyecto Geotérmico en el Macizo Volcánico del Ruiz (zona Nereidas – Botero Londoño), es de 50 MWe.

Volcán Paramillo de Santa Rosa: Los estudios de exploración geotérmica del área del Paramillo de Santa Rosa, forman parte de la exploración del Nevado del Ruiz. De acuerdo con CHEC, Contecol, Geotérmica Italiana (1983), el Paramillo (figura 5) es el más viejo de los aparatos volcánicos de la zona, según se infiere de la erosión de sus productos, y aunque tiene estructura de volcán central y alto grado de evolución de sus productos, es muy viejo para tener asociada una anomalía térmica. Por otra parte, sus flujos piroclásticos principalmente hacia el norte y oriente formaron una secuencia de espesor importante de

vulcanitas, sobre rocas del basamento, lo cual sería favorable por sus condiciones de permeabilidad, para la formación de acuíferos.

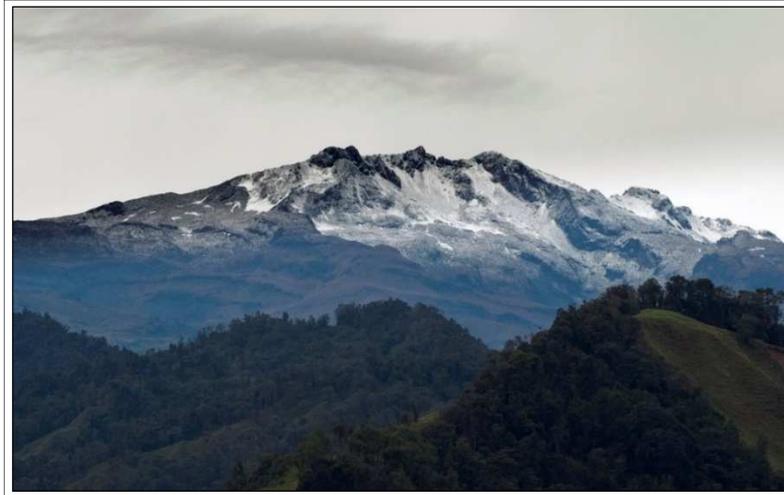


Figura 5. Paramillo de Santa Rosa

Fuente: <https://www2.sgc.gov.co/sgc/volcanes/>

Dicho estudio plantea un reservorio de gran extensión superficial, el cual alimenta los manantiales de San Vicente (Paramillo de Santa Rosa) y Botero Londoño (del área geotérmica Nereidas – Botero Londoño), que son los más interesantes como posibles recursos de alta entalpía en la zona. Sin embargo, la existencia de dicho reservorio es cuestionada en el mismo documento dado el afloramiento de los manantiales termales a través de fallas y la baja permeabilidad del basamento (CHEC, Contecol, Geotérmica Italiana, 1983). Por su parte, Geocónsul (1992), plantea que los manantiales termales del Paramillo (Santa Rosa y San Vicente) no pueden ser asociados a una fuente de calor cercana y por lo tanto es difícil encontrar en el subsuelo del área, temperaturas comercialmente aprovechables para generar electricidad por ciclo directo. Según este trabajo, estos manantiales están controlados estructuralmente por las fallas Aranzazu – Manizales y San Ramón. Las aguas de San Vicente, como las de Botero Londoño y la Quebrada El Billar, del área de Nereidas – Botero Londoño, son las únicas cloruradas sódicas neutras, típicas de fluido de reservorio geotérmico. En este escenario, este trabajo plantea que es posible que exista un yacimiento de baja entalpía aprovechable mediante pozos someros a lo largo de las estructuras mencionadas. Alfaro y Jaramillo (2002) plantearon la posibilidad de un sistema geotérmico de mayor temperatura (con base en geotermómetros acuosos) e independiente del sistema del Nevado del Ruiz (Botero Londoño); esto es, fuente de calor y reservorio propios. La fuente de calor podría estar asociada a una anomalía gravimétrica identificada por Beltrán (2017) en el mapa de anomalías residuales, cerca de los lugares de

ocurrencia de los manantiales termales, si ésta se interpreta como una intrusión en fase sólida, en enfriamiento.

Volcán Cerro Machín: El área geotérmica del volcán Cerro Machín, también fue incluida en la investigación geotérmica del Ruiz, aunque no fue objeto de trabajos de geofísica (CHEC, Contecol y Geotérmica Italiana, 1983). De acuerdo con este documento, el área geotérmica, considerada de dimensiones reducidas, tiene características vulcanológicas y geoquímicas de gran interés geotérmico como la presencia del volcán, su edad reciente y grado de evolución, la existencia de numerosas fuentes termales con temperatura de descarga elevada (hasta 94 °C), una alta relación H_2/CH_4 característica de gases calientes y geotermómetros cercanos a 180 °C, temperatura consistente con la inferida a partir de xenolitos. Este trabajo plantea la posibilidad de tener dos reservorios. Uno estaría en rocas del basamento, a través del cual emergen varios manantiales termales, cuya permeabilidad habría aumentado como resultado del grado elevado de fracturación y microfracturación, provocada por la intensa tectónica de la zona. El otro reservorio estaría hospedado en lavas que rellenan la parte baja de la estructura interpretada entonces como caldera (hoy reconocido como un anillo piroclástico complejo (SGC, 2020). Ver estructura del anillo piroclástico en figura 6. El espesor de estas lavas sería de 500 a 600 m y tendrían una permeabilidad significativa derivada del intenso fracturamiento relacionado con la intrusión de los domos. Las fracturas no selladas que conectan el sistema hidrotermal profundo con la superficie se hacen evidentes en la presencia de fumarolas localizadas en los domos del cráter. Para esta área, éste trabajo propuso un objetivo mínimo de 15 a 20 MWe.



Figura 6. Volcán Cerro Machín

Fuente: <https://www2.sgc.gov.co/sgc/volcanes/>

A partir de la reinterpretación de la información, un modelo esquematizado fue planteado (Geocónsul, 1992), en el que la fuente de calor es magmática muy somera. El reservorio es postulado nuevamente en el basamento intensamente fracturado por estructuras

regionales y por esfuerzos de ascenso de la cámara magmática y en productos volcánicos, en todo caso, posiblemente limitado al subsuelo de la caldera (anillo piroclástico). El fluido del reservorio sería líquido dominante, de alta entalpía (a unos 250°C), con escape de gases a la superficie de los domos. Los domos más recientes son postulados como posible capa sello. La recarga se produciría por infiltración a través de abundantes fracturas hasta la profundidad del reservorio y/o por el aporte de agua del Río Toche – Coello.

En la actualidad, el SGC está desarrollando estudios de exploración en el Volcán Cerro Machín, los cuales incluyen una revisión de la geología estructural y la alteración hidrotermal, estudios geofísicos de gravimetría, magnetometría y magnetotelúrica, así como la caracterización química e isotópica de gases.

San Diego: El área geotérmica de San Diego fue propuesta por el SGC, a partir de la ocurrencia de manantiales termales localizados alrededor del maar de San Diego (figura 7), del volcán El Escondido y de la intrusión andesítica de Puente Linda (SGC, 2015).



Figura 7. Volcán Maar de San Diego

Fuente: <https://www2.sgc.gov.co/sgc/volcanes/>

La exploración geotérmica del área está en fase temprana. A la fecha, se han concluido los trabajos de cartografía geológica y caracterización química de la fase acuosa de manantiales termales (Rueda-Gutiérrez y Rodríguez, 2016) y se avanza en los estudios geofísicos de campos potenciales y electromagnéticos, así como en la medición de radón en aire del suelo y la caracterización de gases burbujeantes en manantiales. De acuerdo con la cartografía 1:25.000, la geología de superficie está dominada por rocas del basamento metamórfico,

que corresponde al Complejo Cajamarca y, por intrusiones ígneas. Solo una pequeña porción del área está ocupada por rocas sedimentarias reconocidas por su alta concentración de elementos radiogénicos (Formación Berlín). La composición química de los manantiales termales es característica de cada zona lo que permite suponer que éstos provienen de sistemas geotérmicos diferentes; es decir, con fuentes de calor y reservorios diferentes. La fuente de calor para los posibles reservorios del maar de San Diego y del volcán de El Escondido, puede tener edades relativamente recientes (30 mil años o menos), mientras que, en la zona de Puente Linda, la fuente de calor posiblemente es la intrusión del mismo nombre cuya edad es de unos 400 mil años. El reservorio de mayor temperatura es el que alimenta a los manantiales de El Escondido, que de acuerdo con los geotermómetros más conservadores tendría una temperatura de 240°C (Rueda-Gutiérrez y Rodríguez, 2016).

Volcán Nevado del Tolima: Según la investigación del Macizo Volcánico del Ruiz (CHEC, Geocónsul, Geotérmica Italiana, 1983) el Nevado del Tolima (figura 8) es un volcán andesítico con actividad volcánica persistente, lo que sugiere la probabilidad de existencia de un gradiente geotérmico anómalo, aunque no registra una diferenciación significativa del magma ni estructuras caldéricas, lo que es interpretado en este trabajo como evidencia de una baja transmisión de calor (tiempo de residencia limitado), así como sistemas de alimentación de pequeñas dimensiones o muy profundos. Por otra parte, el reporte plantea que es probable que el basamento (rocas metamórficas del Grupo Cajamarca) y el espesor reducido de sus lavas antiguas, no favorezcan la formación de reservorios geotérmicos, lo que es consistente con la ausencia de alteración hidrotermal de alta temperatura caracterizada en xenolitos. Los manantiales termales asociados a este volcán son de composición sulfatada alcalinotérrica y sulfatada ligeramente ácida, lo que es atribuido a la lixiviación de rocas hidrotermalizadas y/o interacción con gases volcánicos (e hidrotermales) con alto contenido de sulfuro de hidrógeno. En resumen, esta área geotérmica no es considerada como de prioridad alta.



Figura 8. Volcán Nevado del Tolima

Fuente: <https://www2.sgc.gov.co/sgc/volcanes/>

No obstante, a partir de la composición sulfatada de las aguas termales de esta área geotérmica, Geocónsul (1992), subraya la posible absorción de vapor y gases de origen geotérmico y sugiere que, en consecuencia, el sistema del Nevado del Tolima debe tomarse en cuenta como posible prospecto geotérmico.

Cerro Bravo: El Cerro Bravo (figura 9) es el aparato volcánico más septentrional del polígono de trabajo de la investigación geotérmica del Macizo Volcánico del Ruiz (CHEC, Geocónsul, Geotérmica Italiana, 1983). Éste fue descrito como un estratovolcán activo con muchas erupciones en los últimos 6000 años y una diferenciación magmática importante de andesitas a dacitas evolucionadas, lo que permite suponer que ha producido una anomalía térmica superficial. Por otra parte, según dicha investigación, el edificio volcánico no presenta estructura caldérica, que confirmaría la emisión de grandes volúmenes de magma desde cámaras superficiales. Entre los productos del volcán fueron reportados algunos xenolitos lávicos con alteración hidrotermal argílica y fílica de temperatura media (150 a 200 °C) y rocas cuarzodioríticas con alteración propilítica (250 °C). Sus manantiales termales del tipo bicarbonatado sódico, de baja termalidad, fueron considerados por la investigación, como de poco interés, así como el sistema geotérmico en general.



Figura 9. Volcán Cerro Bravo

Fuente: <https://www2.sgc.gov.co/sgc/volcanes/>

No obstante, Thouret et al. (1985) definió al Cerro Bravo como un volcán compuesto, cuyo volcán moderno presenta dos estructuras caldéricas, una dentro de la otra, con un domo central. Sumado a lo anterior, Geocónsul (1992), propuso que el Cerro Bravo probablemente hospeda un reservorio geotérmico de alta entalpía, con base en las temperaturas geoquímicas calculadas para los manantiales termales bicarbonatados sódicos de temperatura de descarga moderada (45 °C). Además, según indica este informe, el basamento de este volcán es el Stock de Manizales, del que brotan sus manantiales termales, cuyas rocas probablemente son de buena permeabilidad, dada su fragilidad frente a esfuerzos tectónicos y locales. Además, junto con el Cerro Machín, este volcán presenta depósitos piroclásticos de gran extensión y composición rica en sílice, lo que implica una cámara magmática bastante evolucionada y no muy profunda. Por todo lo anterior (anomalía térmica, condiciones de permeabilidad favorables y posible temperatura del reservorio) el Cerro Bravo fue resaltado en dicho informe, como de interés geotérmico.

Villamaría – Termales: El área geotérmica de Villamaría – Termales (figura 10) propuesta por Geocónsul (1992) deriva su interés geotérmico de la composición del agua y gases de sus manantiales de aguas ácidas sulfatadas (Hotel Termales del Ruiz, Quebrada Agua Caliente y Rio Azufrado), de la actividad de la falla del mismo nombre, que controla su emergencia y de su relación con el Nevado del Ruiz. De acuerdo con este reporte, las manifestaciones al parecer corresponden a descarga de fluidos de un reservorio profundo de alta entalpía, el cual podría ser parte del propuesto para el área Nereidas – Botero Londoño.

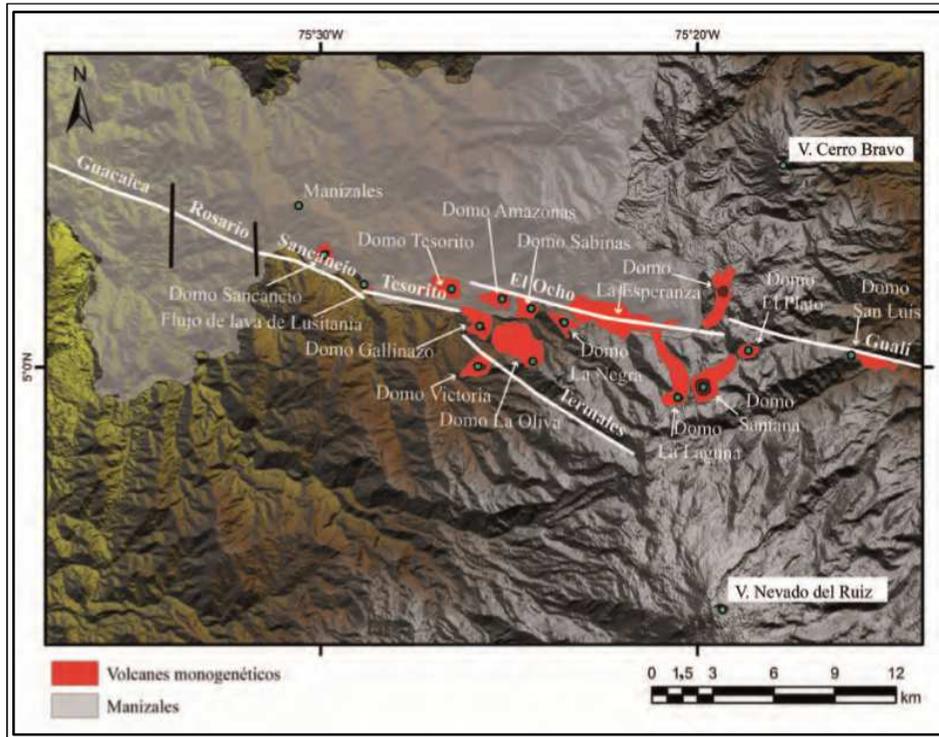


Figura 10. Área Geotérmica Villamaría – Termal
 Trazos en blanco corresponden a segmentos de la falla
 Fuente: Botero-Gómez *et al.* (2018)

Además de las manifestaciones termales, en el área se registra la ocurrencia de una serie de centros volcánicos monogenéticos (domos Sancancio, Tesorito, Gallinazo, Victoria, Oliva, La Negra, La Laguna, Santana, San Luis, El Plato, Sabinas, Amazonas, La Esperanza y flujo de lava Lusitania), de edades entre 1.8 y 0.045 Ma, alineados por el trazo de la falla Villamaría-Termal, en realidad un sistema de fallas, los cuales conforman el llamado Campo Volcánico Monogenético Villamaría-Termal (Botero-Gómez *et al.*, 2018), posiblemente relacionado genéticamente con el Complejo Volcánico del Nevado del Ruiz (Osorio *et al.*, 2018). La intensidad de esta actividad magmática sugiere que el área tiene una fuente de calor asegurada. Por otra parte, la naturaleza de las aguas sulfatadas cloruradas de pH extremadamente ácido (inferior a 2), indican que es muy probable que el sistema magmático que originó el complejo monogenético todavía domina al sistema hidrotermal, en esta área.

Laguna del Otún: El área geotérmica de la Laguna del Otún (figura 11), está relacionada con el estratovolcán Cerro España, localizado al sur del volcán Nevado de Santa Isabel, cuyos rasgos geológicos como la formación de una caldera, actividad post-caldérica, grado de evolución de sus productos, edad post-glacial, cercanía a otros aparatos volcánicos recientes, fueron considerados como indicadores de una anomalía térmica notable, de gran interés geotérmico (CHEC, Contecol, Geotérmica Italiana, 1983). De acuerdo con el mismo

trabajo, sus manifestaciones termales son escasas pero muy importantes por la evidencia de contribución de vapor geotérmico e incluyen a la Azufrera del Otún, un área de suelos calientes y un *steam vent* de alta relación H_2/CH_4 , indicativa de alta temperatura, así como el manantial del Bosque, caracterizado por su descarga de gas, composición sulfatada moderadamente ácida (pH 4), un caudal muy elevado ($1m^3/seg$) y baja temperatura ($21\text{ }^\circ C$). Otra característica de mucho interés para esta área como prospecto geotérmico, fue identificada en el mismo trabajo a partir del estudio gravimétrico, en el que se infirió un espesor de la cobertera volcánica alrededor 1000 m, que favorecería la formación de reservorios profundos al interior de esta secuencia, como en el sector de Las Nereidas.



Figura 11. Laguna del Otún

Localización aproximada de los volcanes Cerro Alsacia, Cerro España y Cerro Arenero
Fuente: SGC (2018)

Según Geocónsul (1992), en el polígono del área geotérmica de La laguna del Otún, se registran afloramientos de productos volcánicos de los volcanes Santa Isabel, Paramillo de Santa Rosa, Nevado del Quindío, Cerro España, Cerro Arenero y Cerro Alsacia. Además del colapso caldérico y los domos del Cerro España, estructuras como fallas NE-SW y NNE-SSW posiblemente normales, son de gran interés ya que delimitan ambos bordes de la Laguna y generan un pequeño graben en donde se aloja la laguna.

De acuerdo con la priorización que realizó Geocónsul (1992), la Laguna del Otún es la tercera área de mayor interés geotérmico del Macizo Volcánico del Ruiz, después de las áreas Nereidas – Botero Londoño y Cerro Machín. Los criterios de esta priorización fueron el vulcanismo reciente de la zona, intenso fracturamiento, posible espesor considerable de

rocas volcánicas y atractiva composición química de los fluidos de las manifestaciones termales.

Otras áreas geotérmicas hidrotermales asociadas a volcanes

Áreas geotérmicas como las asociadas a los volcanes Doña Juana, Sotará, Puracé, Cumbal, Galeras y Nevado del Huila, si bien no han sido objeto de estudios de prefactibilidad propiamente dichos, fueron descritas a partir de criterios generales de geología y geoquímica de fluidos en el estudio de reconocimiento (Olade y Geotérmica Italiana, 1982), cuyas principales conclusiones son resumidas a continuación.

Doña Juana, Sotará y Puracé: Las áreas geotérmicas Doña Juana, Sotará y Puracé (figura 12), registran rasgos geológicos y geoquímicos de fluidos, que sugieren condiciones favorables a la existencia de una anomalía térmica importante, pero también posibles problemas de permeabilidad.



Figura 12. Volcanes Doña Juana, Sotará y Puracé

El Puracé, es el volcán más septentrional de la Cadena Volcánica de los Coconucos, ilustrada en la imagen inferior izquierda, localizada en el interior de la Caldera volcánica del Paletará

Fuente: <https://www2.sgc.gov.co/sgc/volcanes/>

Doña Juana es un estratovolcán activo con caldera central parcialmente rellena por domos lávicos y productos piroclásticos recientes, cuya historia eruptiva prolongada y compleja revela la existencia de una cámara magmática superficial de grandes dimensiones, lo que implica una fuerte anomalía térmica. El Sotará, es un volcán andesítico explosivo con caldera somital y domos dacíticos post-caldéricos; su basamento está conformado por rocas del Complejo Diabásico, cuya permeabilidad puede ser muy significativa y depende de su grado de fracturación, y rocas metamórficas. Posteriormente, Pulgarín et al. (2010) definieron como basamento del volcán Sotará, los complejos Quebrada Grande y Esquistos de Mazamorra. El Puracé, es un volcán andesítico y dacítico muy activo, localizado al norte de la Cadena Volcánica de los Coconucos; su basamento está constituido por rocas metamórficas del Complejo Cajamarca, intruídas por stocks graníticos. Los tres volcanes se caracterizan por tener afloramiento del basamento a cotas altas, lo cual se interpreta como indicativo de baja probabilidad de encontrar productos volcánicos de espesor suficiente para hospedar acuíferos.

En los volcanes Doña Juana y Sotará, se caracterizaron xenolitos con alteración hidrotermal de alta temperatura similar a la descrita para el volcán Azufral, aunque en dichos fragmentos, también se identificaron rocas metamórficas del basamento sin alteración hidrotermal lo que es interpretado un como basamento ubicado a poca profundidad sin circulación de fluidos hidrotermales. Por otra parte, para los dos volcanes se espera un espesor considerable de vulcanitas, aunque limitado al área de sus calderas, que podrían contener reservorios. El basamento metamórfico del volcán Puracé, por su parte, es de escasa permeabilidad y se desconoce el espesor de su serie volcánica. En las tres áreas en mención y particularmente en la del volcán Puracé, se registra la abundancia de manantiales termales que indican la existencia de fluidos profundos de temperatura importantes como recurso geotérmico (entre 160 a 200 °C).

Cumbal y Galeras: Los volcanes Cumbal y Galeras (figura 13) son estratovolcanes activos con basamento a profundidad suficiente para permitir el desarrollo de acuíferos en el interior de la serie volcánica. Los dos volcanes registran actividad terciaria y cuaternaria, es decir la permanencia prolongada de magma a poca profundidad lo que sugiere una importante anomalía termal. En los dos volcanes se registra una evolución magmática modesta, que es un poco mayor en el volcán Cumbal, desde andesitas hasta dacitas.



Figura 13. Volcanes Cumbal y Galeras
Fuente: <https://www2.sgc.gov.co/sgc/volcanes/>

Las manifestaciones termales de estas áreas son de baja termalidad y su composición química no refleja la contribución de agua de reservorio geotérmico. Estas áreas fueron interpretadas como prometedoras dada su anomalía térmica y condiciones de permeabilidad, pero su prioridad no fue considerada elevada.

Nevado del Huila: El volcán Nevado del Huila (figura 14) es un cono lávico andesítico con evolución magmática limitada, actividad persistente por periodo prolongado hasta la actualidad. El basamento es un batolito cuarzodiorítico intensamente facturado con afloramientos a cotas altas y registra manantiales termales de baja temperatura. Por lo anterior este sistema no parece tener gran interés geotérmico y fue clasificado como de baja prioridad.



Figura 14. Nevado del Huila
Fuente: <https://www2.sgc.gov.co/sgc/volcanes/>

Iza: En el área geotérmica de Iza, localizada en el ambiente sedimentario de la Cordillera Oriental, frecuentemente agrupada y relacionada con la de Paipa, se han formulado algunos modelos conceptuales a partir de estudios de exploración parciales.

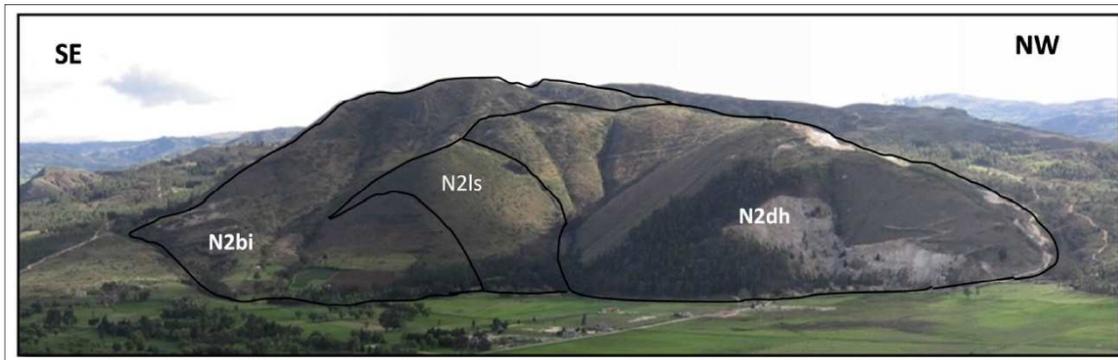


Figura 15. Criptodomo de Iza
Brecha Intrusiva (N2bi), domo Los Sauces (N2ls) y domo Holcim
Fuente: Rojas *et al.* (2009)

De acuerdo con Rincón y Romero (1990), quienes caracterizaron los rasgos geológicos del área, propusieron un sistema con fuente de calor magmática relacionado con una intrusión ígnea riolítica identificada como el domo de Iza (figura 15); un fluido geotérmico con temperatura mayor a 250 °C (epidota y biotita) inferida de alteración hidrotermal, reservorio en arenitas de la Formación Tierna con permeabilidad primaria y un reservorio alterno conformado por las tobas del domo con permeabilidad secundaria; una capa sello de lodolitas con intercalaciones de arenitas cuarzosas de la Formación Guadalupe, zona de recarga en las elevaciones de los alrededores a través de rocas fuertemente fracturadas y la zona de descarga, en manantiales asociados a zonas de debilidad producida por el cruce de fallas.

Barrera (1998), incluyó en el trabajo geológico la caracterización de aguas termales y propuso el origen de los manantiales a partir de dos reservorios diferentes, llamados horizontes geotérmicos, propuso la intrusión ígnea como la fuente de calor, definió como posibles rocas de reservorio formaciones sedimentarias con permeabilidad primaria y secundaria, como las arenitas de las Formaciones Une y Ermitaño, propuso una temperatura para el fluido profundo de hasta 269 °C y una capa sello conformada por rocas impermeables como las de shales negros de la Formación Churuvita.

El Servicio Geológico Colombiano, ha realizado algunos estudios de exploración en esta área, como cartografía geología en escala 1:25.000, geoquímica preliminar de la fase acuosa de manantiales termales y avances en los estudios geofísicos. En el marco de la cartografía

geológica, se caracterizó el cuerpo intrusivo riolítico de Iza, el cual fue clasificado como un criptodomo y conformado por tres cuerpos dómicos (Rojas *et al.*, 2009). A partir de la caracterización química e isotópica de los manantiales, se estimaron temperaturas geoquímicas por encima de 250 °C y se propuso una zona de recarga a unos 3900 m.s.n.m. (Alfaro, 2002a y 2002b). Se realizó el estudio de gravimetría y magnetometría de un polígono que envuelve las áreas geotérmicas de Paipa e Iza, encontrando en la zona una anomalía gravimétrica positiva posiblemente relacionada con el domo de Iza (Beltrán, 2015). Adicionalmente, se realizó un perfil magnetotelúrico de dirección NW que se extendió desde el área geotérmica de Paipa hasta la de Iza, en el que se registró una pequeña anomalía resistiva posiblemente también relacionada con las rocas que subyacen el criptodomo (González-Idárraga y Rodríguez-Rodríguez, 2017).

Sistemas geotérmicos en cuencas sedimentarias: Además de las áreas geotérmicas descritas, es muy posible que en el territorio existan recursos geotérmicos de entalpía intermedia y baja, relacionadas con cuencas sedimentarias, como se puede interpretar de anomalías positivas observadas en el Mapa preliminar de Gradientes Geotérmicos (Alvarado *et al.*, 2008), presentado en la figura 16.

De acuerdo con Alfaro *et al.* (2009), las anomalías positivas de gradiente geotérmico, con valores por encima de 40 °C/km, están localizadas en las cuencas de Valle Medio del Magdalena y Caguán – Putumayo (hasta 65 °C), Sinú – San Jacinto (hasta 60.5 °C/km), Llanos Orientales (hasta 59 °C/km), Valle Superior del Magdalena (hasta 59 °C/km), Catatumbo (hasta 54 °C/km) y Cordillera Oriental (hasta 53 °C/km). Las anomalías de mayor extensión corresponden a las de las cuencas de los Llanos Orientales y Cordillera Oriental.

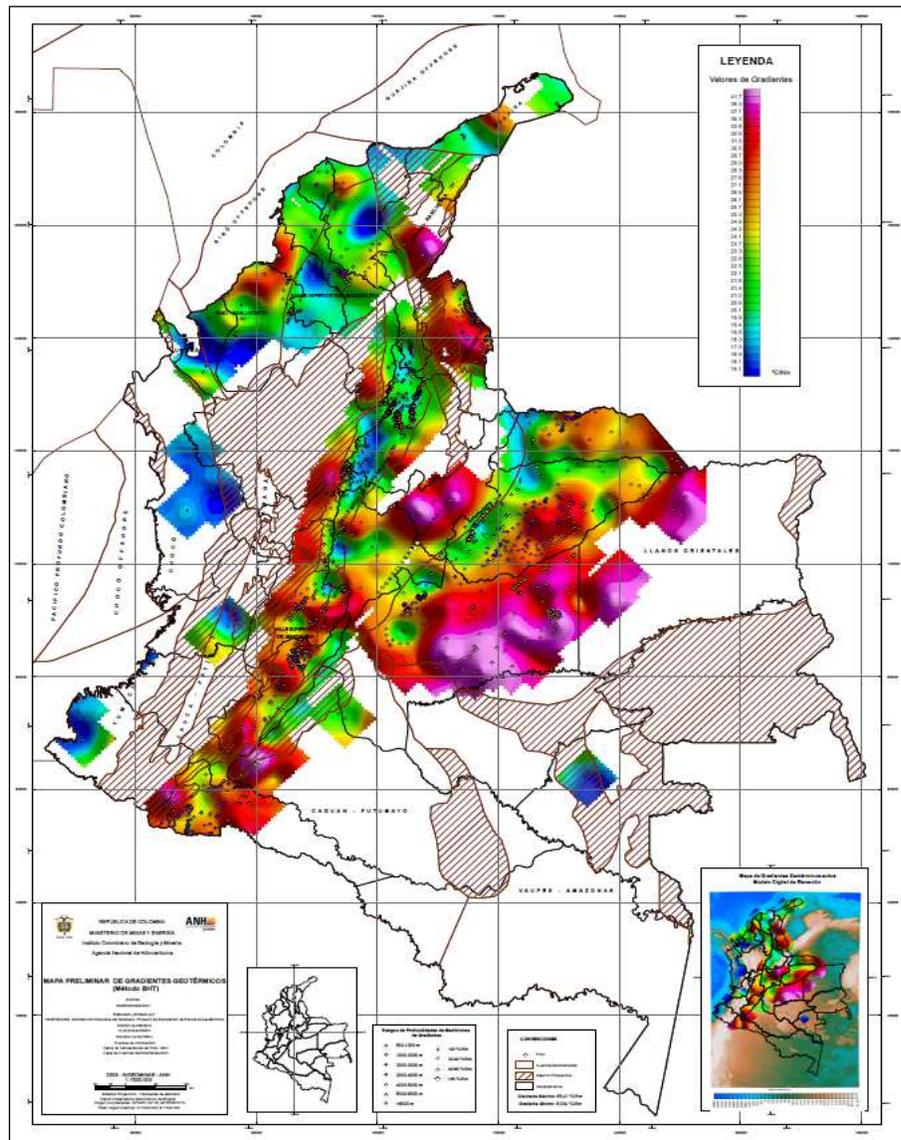


Figura 16. Mapa preliminar de gradientes geotérmicos
Fuente: Alvarado *et al.*, 2008

1.2 Método volumétrico

La determinación del potencial geotérmico de un país es indispensable para dimensionar el posible aporte de esta fuente de energía, sostenible y ambientalmente amigable, tanto a la generación eléctrica como a una gama amplia de usos directos de la energía térmica. La estimación del potencial energético de los recursos geotérmicos, es una actividad realizada a lo largo del tiempo, tanto por países que disponen de recursos de alta entalpía, como aquellos localizados en las zonas de mayor actividad tectónica, como por países localizados

en zonas tectónicamente más estables en la región intraplaca, en donde los recursos geotérmicos son de menor energía.

La evaluación de los recursos geotérmicos durante la etapa de prefactibilidad se realiza por cuatro (4) métodos principales: (1) flujo térmico superficial, (2) volumétrico (*heat in place o stored heat*), (3) fractura plana y (4) calor magmático o cámara magmática (Muffler y Cataldi, 1978; OLADE y BID, 1993). Muffler y Cataldi (1978) concluyeron que el método volumétrico, también denominado Calor volumétrico o Calor almacenado, porque está basado en el cálculo de la energía contenida en un determinado volumen de roca, probablemente es el más utilizado y conveniente para estimar recursos geotérmicos y hacer comparaciones entre áreas y ambientes geológicos. Los mismos autores concluyen que si bien este método no es por sí mismo más riguroso que los demás, tiene las siguientes ventajas: permite la discriminación y compensación de los errores inevitables cuando se introducen aproximaciones y suposiciones geológicas y físicas y otras asunciones subjetivas, es aplicable a cualquier entorno geológico, está basado en una serie de parámetros geológicos y físicos que, al menos en principio, pueden ser medidos o estimados para un área específica y, sus mayores incertidumbres (recuperabilidad y reabastecimiento) pueden resolverse en el futuro previsible.

De acuerdo con Muffler y Cataldi (1978), las principales debilidades del método tienen que ver con: 1. La estimación del factor de recuperación, basada únicamente en hipótesis, el cual es función del modelo de producción del fluido asumido y de su variación con temperatura, de la porosidad efectiva y de la profundidad y, 2. La suposición de *status quo* o condiciones de un momento determinado, sin tener en cuenta el reabastecimiento de calor que sin duda ocurre aún en períodos de tiempo geológico relativamente cortos desde profundidades mayores.

1.2.1 Descripción del Método Volumétrico

El método volumétrico se basa en la estimación progresiva del recurso accesible base, el recurso accesible utilizable y la potencia eléctrica. El recurso accesible base o calor almacenado, es definido como la energía térmica almacenada hasta una determinada profundidad de la corteza en un área específica con respecto a la temperatura media anual. El recurso accesible utilizable también llamado recurso, es la energía térmica que puede ser económica y legalmente extraída en un determinado tiempo (inferior a 100 años) y es calculado a partir del calor acumulado y el calor extraíble a través de pozos. La potencia eléctrica, en este contexto, es la capacidad instalada proyectada para una planta de generación eléctrica a partir del recurso accesible utilizable y del factor de utilización, que a su vez representa la eficiencia de la conversión efectiva respecto a la ideal (Muffler y Cataldi, 1978).

La Circular 790 del USGS (Brook *et al.*, 1978), refinó la metodología de evaluación del potencial propuesta previamente en EE. UU, a través de la Circular 726 de 1975, con la implementación del método para los sistemas convectivos con temperaturas de 90 °C o superiores. Brook *et al.* (1978) estimaron el potencial geotérmico a partir del estudio de 215 sistemas hidrotermales convectivos identificados, unos con temperaturas iguales o superiores a 90 °C y otros con temperaturas mayores a 150 °C, todos en profundidades hasta de 3 km. Según los autores, los sistemas hidrotermales convectivos estudiados se relacionan a una actividad volcánica reciente y áreas con alto flujo de calor en EE. UU., siendo las zonas de fallas los conductos principales para el flujo de los fluidos junto con la intersección de estructuras. Los reservorios de los cuales fluye el fluido están compuestos por roca porosa o fracturada, siendo esta última la más importante para sistemas de alta temperatura.

La estimación del potencial fue hecha bajo la asunción de que cada reservorio (volumen de roca y agua específica) no tiene reabastecimiento de calor de los alrededores, por lo que el cálculo es una estimación mínima. Estos autores clasificaron los sistemas, al igual que se había hecho en 1975, como vapor-dominantes, de agua caliente de alta temperatura (mayores a 150 °C) y de agua caliente de temperatura intermedia (de 150 °C a 90 °C), y aunque cada reservorio es complejo, heterogéneo y varía de lugar a lugar, asumieron una única temperatura característica.

La descripción metodológica presentada a continuación se basa en la Circular 790 de USGS (Muffler y Cataldi, 1978).

Calor almacenado o recurso accesible base: La estimación del calor almacenado se basa en la expresión matemática presentada en la ecuación 1, según Brook *et al.* (1978), en la que las variables empleadas son estimadas para cada sistema hidrotermal convectivo:

$$q_R = \rho c * a * d * (t_r - t_o) \quad (1)$$

Donde:

- q_R : Energía termal total del reservorio (J)
- ρc : Calor específico volumétrico de la roca húmeda (asumieron 2700 kJ/m³/°C con porosidad de la roca del 15 %)
- a : Área del reservorio
- d : Espesor del reservorio
- t_r : Temperatura del reservorio
- t_o : Temperatura de referencia (asumieron temperatura constante para todo el territorio de 15 °C).

El método volumétrico (Brook *et al.*, 1978), contempla la incorporación de la estimación métodos estadísticos para calcular la incertidumbre en términos de desviación estándar y límites de confianza de recurso accesible base, recurso, energía eléctrica y calor

aprovechable. Esta incertidumbre es el resultado, a su vez, de la incertidumbre en los valores estimados para temperatura, área y espesor, los cuales son subjetivos y están basados en información geológica, geotermométrica, geofísica y mediciones en perforaciones.

Para la determinación de la incertidumbre de estas estimaciones, se asume que cada variable tiene una distribución de probabilidad triangular, en la que se definen valor mínimo, valor más probable y valor máximo (figura 17). Los valores por debajo del mínimo y por encima del máximo, se asumen con probabilidad cero (0). Si el valor promedio no es igual al valor de máxima probabilidad, la función de densidad de probabilidad registra una asimetría.

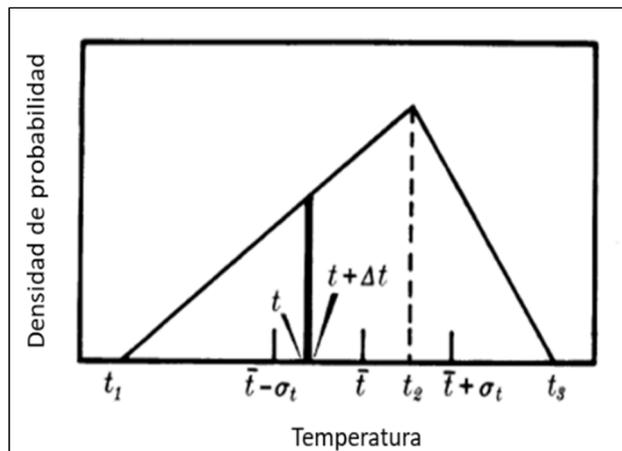


Figura 17. Ejemplo de densidad de probabilidad para la variable temperatura

El valor mínimo de temperatura corresponde a t_1 , el valor más probable t_2 y el valor máximo t_3

Fuente: Brook *et al.* (1978)

Para determinar el valor de la temperatura del reservorio, la circular 790 (Brook *et al.*, 1978) señala la utilización de información de pozos y/o geotermómetros, con la aclaración que ellos son útiles solo para sistemas de agua caliente dado que los componentes SiO_2 , Na, K, Ca, Mg, Cl, HCO_3 y CO_3 son solubles en estos sistemas, mientras que en los sistemas vapor calentados, no. Los geotermómetros usados para el cálculo fueron sílice amorfa, Na-K, Na-K-Ca, Na-K-Ca-Mg (corregido) e isótopos de ^{18}O en sulfato-agua para aguas sulfatadas. En cuanto al volumen del reservorio, asumieron un volumen constante de $3,3 \text{ km}^3$.

En cuanto al volumen del reservorio, en la Circular 790 indican que la mayor incertidumbre se trata del área porque en la mayoría de los sistemas este valor es estimado por evidencia indirecta con base en información geológica, geoquímica y geofísica, y solo en muy pocos

casos se cuenta con valores aproximados por perforaciones, por lo tanto, proponen un valor mínimo, máximo y probable (tabla 2). En el caso del espesor del reservorio, se asumió como un valor uniforme 3 km su profundidad, y los topes respecto a la superficie de 0,5; 1,5 y 2 km. Los valores de espesor propuestos son relacionados en la tabla 2.

Recurso extraíble o recuperable (recurso): Para estimar el recurso geotermal o calor recuperable de sistemas de agua caliente (q_{WH}), se relacionan el calor almacenado en el reservorio (q_R) por el factor de recuperación termal (Rg), así:

$$Rg = q_{WH} / q_R$$

$$q_{WH} = Rg * q_R \quad (2)$$

$$q_{WH} = m_{WH} (h_{WH} - h_0) \quad (3)$$

Donde:

- m_{WH} : masa recuperable
- h_{WH} : entalpía del fluido producido
- h_0 : entalpía de referencia a 15°C

Muffler y Cataldi (1978) concluyeron que el factor de recuperación (Rg), para sistemas geotermales varía de acuerdo con el tipo de fluido dominante en el reservorio así: Líquido dominante, valor teórico de 0,5, pero valores experimentales alrededor del mundo, de 0,05 hasta 0,15. Vapor dominante, puede exceder el 0,15. Líquido y vapor dominante, decrece linealmente hasta 0 cuando la porosidad se hace 0. A partir de investigaciones más recientes basadas en datos experimentales (Williams *et al.*, 2008 y Sanyal *et al.*, 2002) se establecieron valores menores para Rg (tabla 2).

Potencia eléctrica: La estimación de la potencia eléctrica (J/s) a partir de la energía térmica disponible, se basa en la ecuación 4

$$q_{WH} = W_a * EC \quad (4)$$

En donde W_a es trabajo disponible y EC el factor de utilización o eficiencia de conversión, el cual da cuenta de pérdidas de un ciclo de generación de potencia real. Los ciclos de generación más importantes son vapor saturado, *single flash*, *dual flash* y binario.

El trabajo utilizable en generación eléctrica o potencia eléctrica (Pe) a su vez, depende de un factor de pérdidas de calor en superficie (FPS), asumido como (0,9 ó 10 %) y el tiempo de vida útil de la planta de generación eléctrica proyectada, equivalente a 30 años expresados en segundos (LT).

La ecuación de potencia eléctrica (Pe) queda transformada en (Geokeri, 2019):

$$Pe = \frac{(q_{wh} * FPS * EC)}{LT} \quad (5)$$

Observaciones sobre el método volumétrico

El método volumétrico descrito anteriormente desarrollado por el USGS (Nathenson, 1978; Muffler and Cataldi, 1978; White y Williams, 1975; Muffler y Guffanti, 1978), se ha convertido en uno de los métodos estándar para la evaluación del recurso en sistemas geotermales (Quinao y Zarrouk (2014), y junto con la aplicación de las simulaciones con Monte Carlo, es una herramienta importante para evaluar la capacidad eléctrica de un reservorio geotérmico durante las etapas tempranas de exploración (Garg y Combs, 2015). En los últimos años se han usado diferentes valores para las variables de los cálculos, y se han hecho actualizaciones y modificaciones por varios autores, tal es el caso de Quinao y Zarrouk (2014) y Garg y Combs (2015), entre otros.

Quinao y Zarrouk (2014), proporcionan una revisión y comparación entre los métodos volumétricos presentados por el USGS y el publicado por el Australian Geothermal Reporting Code Committee (AGRCC) (Lawless *et al.*, 2010). Señalan que en el primero la energía termal se evalúa para un volumen de roca del reservorio sobre condiciones ambientales (15 °C), ignorando la energía contenida en el fluido in situ, y su aprovechamiento depende de un factor de recuperación R_g (Williams *et al.*, 2008; Nathenson, 1978; Muffler y Cataldi, 1978 en la tabla 2); mientras que el método publicado por el AGRCC (2010) define que la energía térmica total de un depósito incluye no solo la energía térmica de la roca, sino también el vapor y el agua líquida y, al igual que el método del USGS, un factor de recuperación (Quinao y Zarrouk, 2014), además de un factor de conversión a energía eléctrica (EC) η_c (Quinao y Zarrouk, 2014; Garg y Comb, 2015 en tabla 2). Estos autores concluyeron que ambos métodos llegan prácticamente al mismo resultado, siendo ligeramente menor el resultado del calor contenido por el método del USGS al ignorar el fluido in situ, pero que el valor del factor de recuperación y eficiencia de conversión si influyen sustancialmente en los resultados de potencial. Consideran que para estados iniciales de desarrollo de geotermia (prefactibilidad) es suficiente emplear el valor de EC de 10-12 % sugerido por el AGRCC, y que el enfoque de trabajo máximo y exergía es teóricamente más robusto, pero es innecesariamente complicado cuando se requiere un enfoque más genérico, como hacer una evaluación a nivel nacional del potencial geotérmico no desarrollado, como es para este caso de estudio.

Garg y Combs (2015) indican que el valor EC depende del ciclo a utilizar. Estos autores recomiendan usar un valor de EC de 40% para plantas tipo flash y para evaluaciones en fases tempranas de evaluación, anteriores a la perforación de pozos, asumir valores muy bajos, incluso de cero (0). Concluyen que el trabajo disponible y el valor de EC deberá ser evaluado de acuerdo del tipo de ciclo (binario o flash) para la conversión de potencia, y al menos

durante las fases tempranas de exploración y anteriores a las perforaciones de pozos, el factor de recuperación termal debe ser asumido como cero.

1.2.2 Aplicación del método volumétrico en el mundo

EL método volumétrico, ha sido utilizado ampliamente alrededor del mundo, para estimar el potencial energético de los recursos geotérmicos. A continuación, se reseñan brevemente algunos ejemplos de la aplicación de este método y se presenta un resumen de las variables y asunciones utilizadas (tabla 2).

1.2.2.1 Norteamérica

Estados Unidos de América (EE. UU.): Siguiendo el procedimiento descrito del método volumétrico, Circular 790 (USGS, 1978), el recurso geotérmico de los Estados Unidos asociado a los sistemas hidrotermales convectivos, con temperatura por encima de 90°C, fue estimado en 9600 EJ de calor almacenado, 2400 EJ de recurso extraíble, entre 95000 y 150000 MWe por 30 años, y entre 230 y 350 EJ de calor aprovechable.

1.2.2.2 Latinoamérica

La Organización Latinoamérica de Energía -OLADE (1983), teniendo en cuenta el alto grado de incertidumbre que presenta la estimación de los parámetros básicos necesarios para efectuar la evaluación del potencial de un campo geotérmico, recomendó utilizar la metodología de evaluación del recurso geotérmico presentada en la Circular 790 del USGS por Brook *et al.* (1978), al finalizar los estudios de la fase de prefactibilidad

Ecuador: Beate y Urquiza (2015), publicaron, el estado actual de la geotermia en el Ecuador para el periodo 2010 - 2015. En esa publicación señalaron que varios autores han estimado el potencial eléctrico para varios prospectos ecuatorianos usando el método volumétrico (*heat in place*) de acuerdo con la metodología de Muffler y Cataldi (1978). Almeida (1992) estimó para los prospectos de Chachimbiro 113 MWe, para Tufiño 138 MWe y para Chalupas 283 MWe; Electroguayas (2009) estimó 100 MWe para Oyacachi.

México: Iglesias *et al.* (2011) actualizaron la primera estimación hecha en el año 2003, de los recursos geotérmicos de temperatura intermedia a baja ($T \leq 200^\circ\text{C}$) para el territorio mexicano. En ambos estudios utilizaron el método volumétrico de Brook *et al.* (1978) de la ecuación 1 y simulaciones Montecarlo para estimar los recursos geotérmicos y sus correspondientes incertidumbres, de acuerdo con Nathenson (1978). Para las simulaciones Montecarlo usaron 5.000 iteraciones como el número óptimo para utilizar cada simulación. Las variables empleadas para el cálculo de energía del reservorio están relacionadas en la tabla 2.

En total estimaron los recursos de 918 sistemas geotérmicos incluyendo 1797 manifestaciones superficiales, localizados en 26 de los 32 estados mexicanos. Estimaron los recursos como la sumatoria estadística de las variables aleatorias de las energías térmicas de los sistemas geotérmicos para cada estado y, una estimación regional para México, con la suma estadística de todos 918 sistemas geotérmicos identificados. Usando distribución estadística, encontraron que en los 918 sistemas hay potencial energético en un rango de 1168 EJ y 1274 EJ con el 90% de confianza; y que la distribución estadística de las temperaturas inferidas de reservorio se encuentra entre 151 y 208 °C (5 %), 102 y 151 °C (40 %), 60 y 102 °C (50 %), y 36 y 60 °C (5 %).

Paralelamente, Hiriart *et al.*, (2011) determinó el potencial geotérmico para México, en el marco de la Estrategia Nacional de Energía. Para esta estimación del potencial geotérmico de recursos hidrotermales, se incluyeron las 20 zonas geotérmicas consideradas de mayor interés. En este trabajo se aplicó el modelo de tipo volumétrico definido por el USGS *Heat in Place* (Brook *et al.*, 1978) y un modelo simplificado de descompresión gradual (Hiriart y Sánchez, 1985, en Hiriart *et al.*, 2011), ambos acoplados a una simulación Montecarlo.

Como resultado, Hiriart y Sánchez (1985) hizo una comparación entre los cálculos de potencial para cada zona geotérmica calculada por ambos métodos. Por el método volumétrico estimó 762 MWe y por el de modelo de descompresión 701 MWe.

1.2.2.3 Unión Europea

La comunidad europea en 1988 publicó por primera vez el Atlas de recursos geotérmicos europeos, compilando y evaluando sus recursos geotermales. La actualización de este, usando el método volumétrico, se presentó en el Atlas editado por Hurter y Hänel (2002). Posteriormente, el Consejo de Energía Geotérmica Europea (EGEC, por sus siglas en inglés) desarrolló en 2013 un estudio para estimar y proyectar el potencial geotermal de la Unión Europea (UE-27), y Croacia (que para el momento de la publicación aún no hacía parte de la UE), Islandia, Turquía y Suiza, usando el método volumétrico (*heat in place*).

Teniendo en cuenta las trayectorias establecidas en los Planes de Acción Nacionales de Energía Renovable (NREAPs, por sus siglas en inglés) de los Estados miembros de la UE, estimaron que la capacidad crecerá de 0.9 GWe instalados en 2013 a 1.4 GWe en 2020, por lo que la producción de electricidad geotérmica en 2020 está prevista en 11 TWh. Trasladaron los valores de potencia eléctrica a potencial económico usando valores del Costo de Energía Nivelado (LCoE, por sus siglas en inglés) en los escenarios de 150 EUR/MWh para el año 2030 y 100 EUR/MWh para el 2050. Para el 2020 estimaron para la UE un total de 21.2 TWh de potencia eléctrica; para el 2030, 34 TWh equivalentes al 1% de la producción de electricidad proyectada para la UE; y para el 2050, gracias al crecimiento económico, innovación en conceptos de perforación y reducción sustancial de los costos, estimaron un aumento en el potencial de 2570 TWh equivalente al 50% de la electricidad

producida para la UE y más de 4000 TWh incluyendo Islandia, Turquía y Suiza (Van Wees *et al.*, 2013). En la tabla 3 se muestran las proyecciones hechas por este estudio para los años 2020, 2030 y 2050.

Ejemplos de estudios casos puntuales para la estimación del potencial geotérmico usando el método volumétrico de Brook *et al.* (1978), se encuentran en Italia. Doveri *et al.* (2010) estimaron el potencial geotérmico de campos sin explotar o mínimamente explotados del Sector El Tirreno, en Italia Central, con recurso o calor recuperable de 2200-2920 MWe. Por otra parte, Cinti *et al.* (2018) realizaron la evaluación del potencial geotermal teórico de dos distritos volcánicos italianos, El Distrito Sabatini y el Vicano-Cimino. La evaluación se realizó para reservorios hidrotermales no explotados, en los cuales hicieron la evaluación de la presión parcial CO₂ (p_{CO_2}) en acuíferos someros y profundos para delimitar las áreas geotérmicas de interés. La capacidad termal extraíble del reservorio geotérmico o potencial geotérmico teórico estimado para los distritos fue de 3681-5594 MWt; las variables utilizadas para la estimación son las descritas en la tabla 2.

1.2.2.4 Oceanía

En el año 2010, el Grupo de Energía Geotérmica de Australia (AGEG, por sus siglas en inglés) y la Asociación de Energía Geotérmica Australiana (AGEA, por sus siglas en inglés), establecieron formalmente un código para reportar las reservas y recursos geotermales (*Reporting code for geothermal Reserves and Resources-RCGRR*). De acuerdo con Lawless *et al.* (2010) este código definió que el método propuesto para las etapas tempranas de exploración geotérmica es el *Stored Heat* o método volumétrico.

Australia: Basados en el RCGRR publicado en el 2010, algunas compañías han usado el método volumétrico para estimar el potencial de áreas geotérmicas donde tienen licencias, tal es el caso de Olympic Dam, al sur de Australia, por la compañía Green Rock Energy Ltda., estimando una potencia eléctrica de 400 MWe (Goldstein *et al.*, 2009).

Nueva Zelanda: Con base en la información disponible y conocimiento adquirido de campos geotérmicos individuales de Nueva Zelanda se estimó, por medio del método volumétrico, la capacidad de generación eléctrica para el sistema geotermal de la región de Waikato, ubicado al centro y norte de la isla norte de Nueva Zelanda. La capacidad de generación fue estimada en 3100 MWe para 30 años, y sumando los percentiles de 10 y 90, se estableció el rango de 2200 a 4400 MWe (Sinclair Knight Merz Limited, 2002).

Recientemente se hizo la evaluación del potencial del campo geotérmico Rotorua, localizado cerca del margen sur de la caldera Rotorua de la zona volcánica de Taupo en el centro de la isla norte de Nueva Zelanda, empleando un método híbrido entre el método volumétrico, un diseño experimental de simulaciones y el método Montecarlo para generar una distribución probabilística. Estimaron el potencial eléctrico, al 95 % de confianza, con

un percentil de 10, P10, de 148-153 MWe, P50 entre 147-153 MWe y P90 entre 146-151 MWe (Ciriaco *et al.*, 2018).

1.2.2.5 Asia

En el continente asiático se ha aplicado el método volumétrico para estimar también el potencial geotérmico en campos en exploración o países, tales como:

Rusia: Al noreste de Rusia, al sur de la península de Kamchatka se realizó la evaluación del campo geotérmico Mutnovsky asociado al volcán con el mismo nombre. Para estimar la capacidad de producción del reservorio, usaron primero el método volumétrico (*stored heat*) para estimar las reservas disponibles de energía eléctrica, y segundo el método de probabilidad de Monte Carlo. La evaluación sugirió una capacidad eléctrica de 70-100 MWe para este campo (Assaoulov, 1994). Los valores de las variables que utilizaron se referencian en la tabla 2.

Filipinas: La estimación del recurso geotermal para Filipinas fue hecha usando el método volumétrico. Con una capacidad instalada de 1902.32 MWe, correspondiente al 50% de los recursos identificados, y 18.4% de la energía suministrada a todo el país, evaluaron su potencial para desarrollar y expandir los campos geotérmicos existentes y optimizar las plantas de generación. Un total de 3377 MWe fue estimado con recurso positivo de 1796.99 MWe, recurso probable de 530 MWe y recurso posible recurso de 1050 MWe (Pastor *et al.*, 2010). Los valores de las variables que utilizaron se referencian en la tabla 2.

Japón: Miyazaki *et al.* (1990) usaron el método volumétrico *heat in place* (Brook *et al.* (1978) para la evaluación de los recursos geotérmicos de Japón, en desarrollo del proyecto “Nationwide Geothermal Resources Exploration” realizado por las entidades New Energy and Industrial Technology Development Organization – NEDO – y el Servicio Geológico Japonés. Los sistemas hidrotermales convectivos de Japón fueron clasificados como de alta temperatura (>150 °C), de intermedia temperatura (150 °C a 90 °C) y de baja temperatura (90 °C a 42 °C). La energía termal y recurso recuperable para los sistemas de alta temperatura fueron estimados en 48.5×10^{18} J y 20540 MWe, respectivamente.

Indonesia: Se realizó la evaluación del campo geotérmico prospecto de Tompasso, localizado al norte de Sulawesi en Indonesia. El campo tiene producción de 60 MWe, gracias a 8 pozos instalados y dividido en 3 clústeres. Para la evaluación del recurso se utilizó el método volumétrico con escenarios de producción a 20, 25 y 30 años, y cálculos para la reducción de presión usando el método Monte Carlo, para optimizar la producción futura. Se estimó que, para 25 años de producción, la potencia eléctrica en el percentil de 10 (P10) es de 71 MWe, para P50 de 51 MWe y para P90 de 33MWe (Handoko, 2010).

Tabla 2. Valores de las variables aleatorias utilizadas para estimar calor almacenado y potencia eléctrica en referencias citadas

Variable	Unidades	Valores variables aleatorias			País	Referencia	Observaciones
		Mínimo	probable	Máximo			
Área (A)	Km ²	1	2	3	EE. UU.	Brook <i>et al.</i> (1978)	Para el caso de manantiales termales individuales.
		1	2	3	Latinoamérica	OLADE (1983)	OLADE sigue la metodología de Brook <i>et al.</i> (1978).
		2,688 *0,5	2,688	2,688*1,5			Para una sola manifestación superficial.
		0.5*A ₂	área de la envolvente (A ₂)	1.5*A ₂	México	Iglesias <i>et al.</i> (2011)	Si las áreas más probables de manifestaciones se superponen.
		-	variable	-	Italia	Cinti <i>et al.</i> (2018)	Es la evaluada con base en la distribución de pCO ₂ de un mapa de contornos usando técnicas estadísticas (kriging).
		-	3	9	Rusia	Assaoulov (1994)	Evaluación para el campo geotérmico de Mutnovsky en Kamchatka.
Espesor (H)	Km	-	variable	-	Filipinas	Pastor <i>et al.</i> (2010)	Definida por límites geofísicos, geológicos y manifestaciones termales en superficie.
		1.0	1.5	2.5	EE. UU.	Brook <i>et al.</i> (1978)	-
		1.0	1.5	2.5	México	Iglesias <i>et al.</i> (2011)	Con base en la metodología de Brook <i>et al.</i> (1978)
		-	variable	-	Italia	Cinti <i>et al.</i> (2018)	Calculada como la diferencia entre el tope del reservorio y 3 km de profundidad (considerada como la máxima profundidad económicamente explotable).
		-	variable	-	Japón	Miyazaki <i>et al.</i> (1990)	Calculado por medio de datos de gravimetría a profundidad, asumiendo que los reservorios se encuentran limitados por rocas del basamento impermeables.
		-	1.5	1.5	Rusia	Assaoulov (1994)	Evaluación para el campo geotérmico de Mutnovsky en Kamchatka.
Porosidad (ø)	%	-	15	-	Filipinas	Pastor <i>et al.</i> (2010)	Asumida como la profundidad de la mayoría de campos geotérmicos en el mundo.
		-	15	-	México	Iglesias <i>et al.</i> (2011)	-
		-	10	10	Japón	Miyazaki <i>et al.</i> (1990)	-
		-	5	-	Rusia	Assaoulov (1994)	Evaluación para el campo geotérmico de Mutnovsky en Kamchatka.
Temperatura de referencia (t ₀)	°C	-	5	-	Filipinas	Pastor <i>et al.</i> (2010)	Para densidades de 2700 kg/m ³
		-	variable	-	México	Iglesias <i>et al.</i> (2011)	Las temperaturas de referencia mínima, más probable y máxima fueron adoptadas de promedios anuales de largo plazo para cada Estado mexicano correspondiente a los publicados por el Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática.
		-	25	-	Europa	Hurter y Hänel (2002)	Excepto para los países en los que la temperatura media anual está por debajo, por ejemplo, Suecia.
		-	15	-	Japón	Miyazaki <i>et al.</i> (1990)	-
Temperatura del reservorio (t _r)	°C	-	180	-	Filipinas	Pastor <i>et al.</i> (2010)	Temperatura arbitraria. Se considera mínima temperatura que soporta una columna de vapor con suficiente presión de boca de pozo.
Temperatura del reservorio (t _r)	°C	-	variable	-	México	Iglesias <i>et al.</i> (2011)	Siguieron las reglas: <ol style="list-style-type: none"> Correspondieron al máximo de todas las temperaturas de muestras en las localidades. En caso de que la temperatura calculada con los geotermómetros sea menor que T₁, no se tienen en cuenta. Si después de hacer el filtrado descrito en b. quedan menos de dos geotermómetros en la localidad, no se tienen en cuenta esas temperaturas. El promedio entre todos los geotermómetros restantes en la localidad más las temperaturas de muestras, será la temperatura promedio T₂. La temperatura máxima T₃, correspondió al indicada por los geotermómetros.

Estimación preliminar de potencial geotérmico de Colombia

Variable	Unidades	Valores variables aleatorias			País	Referencia	Observaciones
		Mínimo	probable	Máximo			
		-	variable	-	Italia	Cinti <i>et al.</i> (2018)	Los datos usados fueron jerárquicamente: a. Temperaturas de fondo del pozo. b. Geotermómetros de gas. c. Mapa de temperatura del tope del reservorio. Las temperaturas mínimas y máximas fueron consideradas para obtener el mínimo y máximo potencial termal.
		-	variable	-	Japón	Miyazaki <i>et al.</i> (1990)	Temperaturas estimadas por la isoterma profunda de Curie y las temperaturas registradas en pozos por el Servicio Geológico Japonés (GSJ).
		-	270	280	Rusia	Assaoulov (1994)	Evaluación para el campo geotérmico de Mutnovsky en Kamchatka.
		-	variable	-	Filipinas	Pastor <i>et al.</i> (2010)	Por experiencia la temperatura medida de pozos excede los valores obtenidos de los cálculos convencionales de geotermometría.
Factor de recuperación (R _g)	-	-	0.25	-	EE. UU.	Nathenson (1978)	En sistemas de agua caliente con reservorios idealizados con porosidad del 20%. Para una estimación más realística y basados en las experiencias mundiales, registran el R _g entre 0,05 hasta 0,15. En sistemas vapor dominante, tales como Larderello-Travale.
		-	0.5	-		Muffler y Cataldi (1978)	
		-	> 0.15	-		Williams <i>et al.</i> (2008)	
		0.11	0.15	0.19			
		0.08	-	0.2			
		0.1	-	0.25	Latinoamérica	OLADE (1983)	Basado en Nathenson (1978)
		0	0.25	0.5			Para sistemas líquido dominantes, según Brook <i>et al.</i> (1979).
		-	0.4	-			Para sistemas vapor dominantes, según Brook <i>et al.</i> (1979).
		-	0.5	-			Para sistemas de convección hidrotermal de temperaturas entre 90 °C y 150 °C, según Brook <i>et al.</i> (1979).
		-	0.24	-	Europa	Hurter y Hänel (2002)	Si la extracción del recurso es planeada con un solo pozo productivo.
		-	0.1	-			
		-	0.125	-	Unión Europea	Van Wees <i>et al.</i> (2013).	-
		-	2.5 x ø (porosidad de la roca)	-	Australia	Quinao y Zarrouk (2014)	Según el método AGRCC, para reservorios con porosidad por encima del 7%.
		0.1	0.175	0.25	-	Williams (2007) en Quinao y Zarrouk (2014)	Usan el promedio entre 0.1 y 0.25 como valor probable, basado en el método del USGS.
-	0.267	-	Rusia	Assaoulov (1994)	Evaluación para el campo geotérmico de Mutnovsky en Kamchatka.		
-	0.15	-	Filipinas	Pastor <i>et al.</i> (2010)	Basados en Muffler y Cataldi (1978)		
Eficiencia de conversión (EC)	%	0.10	0.12	-	-	Zarrouk y Moon (2014) en Quinao y Zarrouk (2014)	Según el método AGRCC.
		-	0.4	-	-	Brook <i>et al.</i> (1978)	-
		-	-	0.4	-	Garg y Combs (2015)	Como valor máximo, con tendencia a cero y dependiendo del tipo de ciclo (binario o flash) a utilizar.
		-	0.6	-	Unión Europea	Van Wees <i>et al.</i> (2013).	Para ciclo Carnot en proyecciones a los años 2020 y 2030, con incremento a 0.7 para el 2050.
		-	0,09	-	Rusia	Assaoulov (1994)	Evaluación para el campo geotérmico de Mutnovsky en Kamchatka.
		0.1	0.1	0.2	Filipinas	Pastor <i>et al.</i> (2010)	Para plantas Flash simple

Fuente: autores

Tabla 3. Estimaciones de Potencial geotérmico para los años 2020, 2030 y 2050 en los países de la UE e Islandia, Turquía y Suiza

País	Escenario de proyección	Generación de electricidad geotérmica en bruto (TWh)	Meta de electricidad geotérmica en NREAPs (TWh)	Potencial económico geotérmico (TWh)	Potencial económico geotérmico (TWh)	Producción de energía geotermal compartida en bruto (%)	Capacidad instalada del potencial económico geotérmico (MWe)
		2010	2020	2030	2050		
Austria	actual	0,002	0,002	0,1	67,1	69	8511
Bélgica	actual	0	0,002	0	22,28	17	2826
Bulgaria	actual	0	0	0,1	71,66	112	9089
Croacia	actual	0	NA	3	49,97	NA	6338
República Checa	actual	0	0,002	0,04	30,68	26	3891
Dinamarca	actual	0	0	0,03	29,43	55	3732
Estonia	actual	0	0	0,04	1,67	9	212
actual	actual	0,153	0,475				
	(menor a 300 EUR/MWh)		3				
	(menor a 200 EUR/MWh)		0,01	7,53			
	(menor a 150 EUR/MWh)			0,39			
	(menor a 100 EUR/MWh)				653,02	83	82828
Alemania	actual	0,027	1,65				
	(menor a 300 EUR/MWh)		9,91				
	(menor a 200 EUR/MWh)		0,28	15,6			
	(menor a 150 EUR/MWh)			1,37			
	(menor a 100 EUR/MWh)				345,59	40	43834
Grecia	actual	0	0,073				
	(menor a 300 EUR/MWh)		9,43				
	(menor a 200 EUR/MWh)		0,08	1,61			
	(menor a 150 EUR/MWh)			0,47			
	(menor a 100 EUR/MWh)				81,3	103	10312
Hungría	actual	0	0,41	17,06	173,69	338	22031
Islandia	actual	4,5	5,8	73,7	321,89	NA	40829
Irlanda	actual	0	0,035				
	(menor a 300 EUR/MWh)		0,58				
	(menor a 200 EUR/MWh)		0,06	0,59			
	(menor a 150 EUR/MWh)			0,19			
	(menor a 100 EUR/MWh)				27,26	69	3457
Italia	actual	5,63	6,75	12,07	225,83	54	28644
Letonia	actual	0	0	0,01	2,84	31	360
Lituania	actual	0	0	0,04	18,71	236	2374
Luxemburgo	actual	0	0	0	2,66	42	337

Estimación preliminar de potencial geotérmico de Colombia

País	Escenario de proyección	Generación de electricidad geotérmica en bruto (TWh)	Meta de electricidad geotérmica en NREAPs (TWh)	Potencial económico geotérmico (TWh)	Potencial económico geotérmico (TWh)	Producción de energía geotermal compartida en bruto (%)	Capacidad instalada del potencial económico geotérmico (MWe)
		2010	2020	2030	2050		
Polonia	actual	0	0	0	143,56	66	18210
Portugal	actual	0,16	0,48				
	(menor a 300 EUR/MWh)		0,45				
	(menor a 200 EUR/MWh)		0,03	0,39			
	(menor a 150 EUR/MWh)			0,16			
	(menor a 100 EUR/MWh)				63	85	8000
Rumania	actual	0	0	0,17	104,65	125	13274
Eslovaquia	actual	0	0,03	0,89	54,57	142	6922
Eslovenia	actual	0	0	0,01	8,15	36	1033
España	actual	0	0,3	0,52	348,58	84	44214
Suecia	actual						
Suiza	actual	0	NA				
	(menor a 300 EUR/MWh)		0,17				
	(menor a 200 EUR/MWh)			1,13			
	(menor a 150 EUR/MWh)						
	(menor a 100 EUR/MWh)				42,9	NA	5448
Holanda	actual	0	0	0,23	51,76	32	6565
Turquía	actual	0,7	NA	62,31	965,9	NA	122515
Reino Unido	actual	0	0				
	(menor a 300 EUR/MWh)		0,28				
	(menor a 200 EUR/MWh)			0,43			
	(menor a 150 EUR/MWh)			0,02			
	(menor a 100 EUR/MWh)				41,8	8	5303

Fuente: Van Vees *et al.* (2013)

2 METODOLOGÍA

Para la evaluación del recurso geotérmico se utilizó el método volumétrico, basado en la Circular 790 de USGS (1978) y descrito en el capítulo anterior, aplicado a manantiales termales del territorio, cuya información proviene del Inventario Nacional de Manifestaciones Hidrotermales (SGC, 2015).

2.1 Evaluación del recurso

La estimación de la potencia eléctrica fue realizada en tres pasos: calor almacenado, calor recuperable y potencia eléctrica, siguiendo el procedimiento resumido en el flujograma de la figura 18.

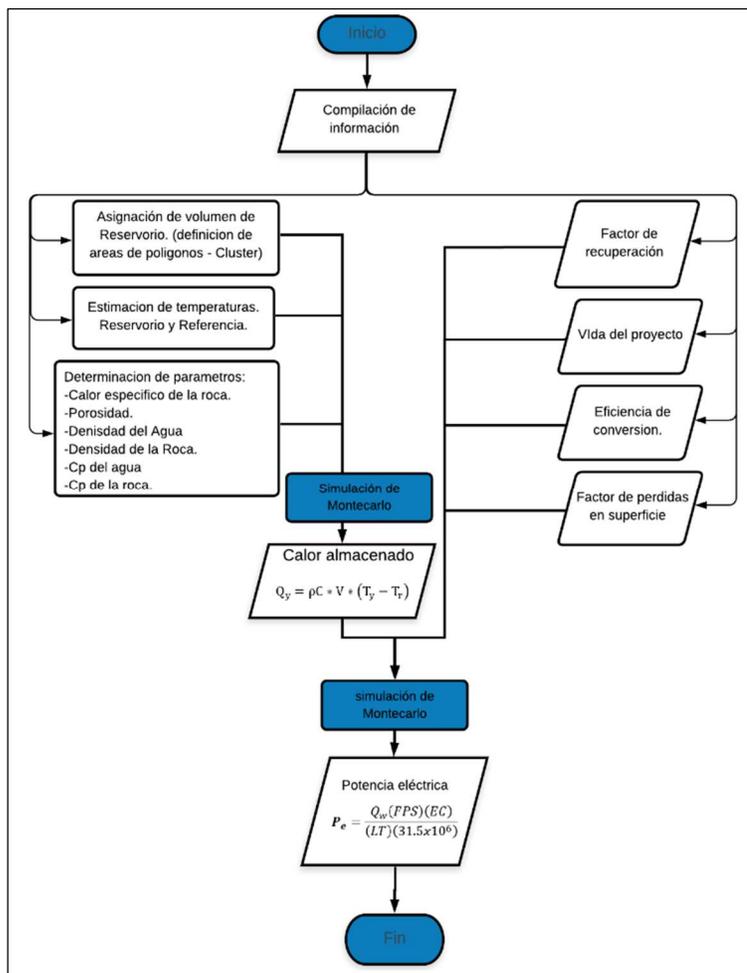


Figura 18. Flujograma de trabajo para estimación de calor almacenado y potencia eléctrica
Fuente: autores

Calor Almacenado: El calor almacenado (recurso accesible base) fue calculado a partir de las variables área, espesor, capacidad específica volumétrica (que a su vez depende de la porosidad y la capacidad calorífica específica del agua y de la matriz de roca, de acuerdo con la temperatura) y, la diferencia entre las temperaturas del reservorio y de referencia (en este caso la temperatura media ambiental), como fue indicado en la ecuación 1. Para definir la distribución triangular de densidad de probabilidad de las variables involucradas, se definieron valores mínimo, esperado y máximo, para cada clúster de manantiales, cuya definición se explicará más adelante. El cálculo por simulación de Montecarlo se hizo utilizando un script escrito en Visual Basic (GEOKERI 2019) y realizando 9000 iteraciones.

La tabla 4 muestra las variables usadas para la estimación del calor almacenado, también los valores de referencia usados, sus unidades y la fuente del criterio usado para dichos valores.

Tabla 4. Valores usados para la estimación del calor almacenado

VARIABLE	UNIDADES	VALORES REFERENCIA			FUENTE
		MÍNIMO	ESPERADO	MÁXIMO	
Área del reservorio	Km ²	Área clúster - 1/2Clúster	Área Clúster	Área clúster + 1/2Clúster	Brooke <i>et al.</i> (1978)
Espesor del reservorio	Km	1	1,5	2,5	Brooke <i>et al.</i> (1978)
Volumen de reservorio	Km ³	Calculado a partir de área y espesor de reservorio			
Calor específico volumétrico de la roca	KJ/m ³ °C	Calculado a partir de calor específico de la roca y del agua			
T reservorio	°C	A partir de geotermómetros			Este informe
T media ambiental	°C	Calculada con altura			Eslava, 1992
Porosidad		0,1	0,11	0,15	Brooke <i>et al.</i> (1978)
Densidad del agua	Kg/m ³	Tomada de tabla de vapor a la temperatura del reservorio			
Densidad de la roca	Kg/m ³	2600	2700	2800	GEOKERI, 2019
Cp agua	KJ/Kg K	Tomada de tabla de vapor a la temperatura del reservorio			GEOKERI, 2019
Cp de la roca	KJ/Kg°C	0,9	1	1,1	GEOKERI, 2019

Fuente: autores

Área del reservorio (A): La mayor incertidumbre en la estimación de la energía térmica en un reservorio es el área. En Colombia el avance de la exploración hasta la formulación de modelos conceptuales descriptivos, es decir sin llevar a cabo perforaciones exploratorias, no permite la determinación del área aproximada de los reservorios; por

lo tanto, se asumió como evidencia de la existencia reservorios de agua caliente la ocurrencia de manantiales termales individuales o grupos de manantiales termales (clústeres). A los manantiales individuales se les asignó un área mínima de 1 km², esperada o más probable de 2 km² y una máxima de 3 km², siguiendo la recomendación de la Circular 790 (Brooke *et al.*, 1978). En el caso de manantiales termales localizados a distancia inferior a 1.6 km, el área asignada a manantiales individuales sufre superposición con las de los manantiales vecinos. En este caso la extensión total del clúster de manantiales fue calculada a partir del área envolvente de los manantiales cercanos. El valor resultante fue considerado como el área esperada, el valor mínimo como 0.5 veces el área esperada y el valor máximo, como 1.5 veces, el área esperada. La figura 19, ilustra la asignación de la extensión del área para un manantial individual y para clústeres conformados por dos o más manantiales.

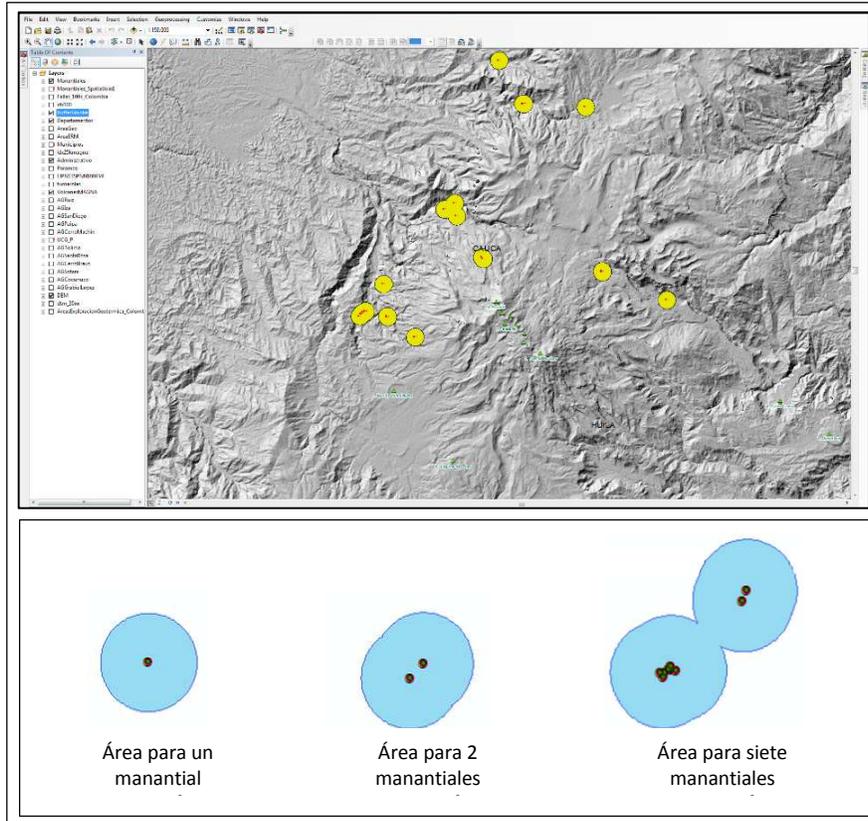


Figura 19. Estimación de áreas para calculo del calor almacenado dependiendo del número de manantiales contenidos en los Clústeres

Fuente: autores

Espesor del reservorio (d): El espesor del área asignada a los manantiales o clústeres de manantiales, se asumió por simplicidad como uniforme, con valor esperado de 1.5, mínimo de 1.0 y máximo de 2.5 km. La figura 20 ilustra que, si bien el área de un clúster de manantiales puede aumentar de acuerdo con su envolvente, el espesor se mantiene en los valores asumidos como mínimo, esperado y máximo. Finalmente, el volumen del reservorio es estimado a partir del área y el espesor del reservorio.

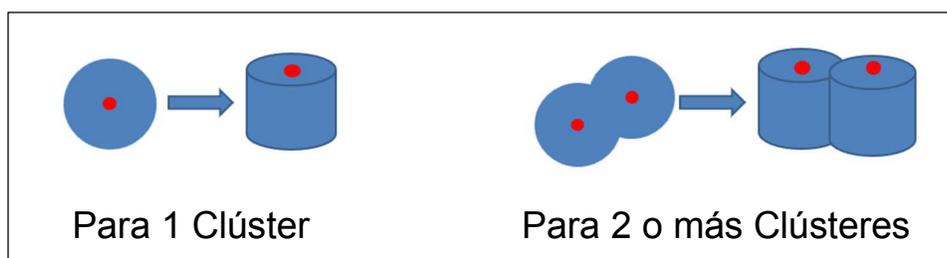


Figura 20. Ilustración del volumen asumido para el reservorio a partir manantiales individuales o clústeres de manantiales

Fuente: autores

Calor específico volumétrico de la roca (ρc): El calor específico volumétrico de la roca es la capacidad de almacenamiento de calor en un volumen de roca saturada en agua. Como se indica en la ecuación 6, el calor específico volumétrico se calcula a partir de las variables Porosidad (Φ), densidad del agua (ρ_w), densidad de la roca (ρ_r), capacidad calorífica del agua (c_w) y capacidad calorífica de la roca (c_r), a la temperatura del reservorio. Los valores usados en este trabajo para dichas variables son mostrados en la tabla 5.

$$\rho c = \Phi \rho_w c_w + (1 - \Phi) \rho_r c_r \quad (6)$$

Temperatura de referencia (t_o): La temperatura de referencia, t_o , se tomó como la temperatura media ambiental calculada para para cada manantial usando la ecuación 7 que obedece al perfil altitudinal de la temperatura media del aire en Colombia (Eslava, 1992). El resultado de dicho cálculo fue asumido como la temperatura de referencia esperada, la temperatura mínima como 0.5 veces la temperatura esperada y la temperatura máxima, como 1.5 veces la misma temperatura.

$$t_o = 28.1 - 0.00553h \quad (7)$$

Donde:

t_o = la temperatura media anual del aire en °C

h = Altitud (m.s.n.m.)

Para clústeres con 2 o más manantiales la temperatura de referencia se estimó a partir de la media de la temperatura media ambiental a la altura promedio de los manantiales. Temperatura de reservorio (t_r): La temperatura de fluidos profundos, presumiblemente alojados en reservorios geotérmicos, fue estimada a partir de geotermómetros acuosos, basados en la composición química de los manantiales termales. La base de datos de manantiales para la estimación fue tomada del inventario nacional de manifestaciones hidrotermales de Colombia del Servicio Geológico Colombiano (SGC, 2015).

Las temperaturas mínima, esperada y máxima asignadas al reservorio, fueron propuestas a partir de la temperatura de descarga y de los geotermómetros acuosos más ampliamente utilizados, sílice amorfa, calcedonia y cuarzo, Na/K y Na-K-Ca y en algunas oportunidades, K/Mg, Na/Li y Li/Mg, calculados con base en la composición química reportada en el Inventario Nacional de Manifestaciones Hidrotermales (SGC, 2015). Las ecuaciones de los geotermómetros aplicados son presentadas en la tabla 5.

Tabla 5. Geotermómetros usados para estimación de temperaturas de reservorio

Geotermómetro	Ecuación	Referencia
SiO ₂	$\text{Amorfa: } t^{\circ}\text{C} = \frac{731}{4.52 - \log(\text{SiO}_2)} - 273.15$ $\text{Calcedonia: } t^{\circ}\text{C} = \frac{1032}{4.69 - \log(\text{SiO}_2)} - 273.15$ $\text{Cuarzo: } t^{\circ}\text{C} = \frac{1309}{5.19 - \log(\text{SiO}_2)} - 273.15$	Fournier (1977) en Nicholson (1993)
Na – K	$t^{\circ}\text{C} = \frac{1390}{\log\left(\frac{\text{Na}}{\text{K}}\right) + 1.750} - 273.15$	Giggenbach (1988)
Na – K - Ca	$t^{\circ}\text{C} = \frac{1647}{\log\left(\frac{\text{Na}}{\text{K}}\right) + \beta \log\left(\frac{\sqrt{\text{Ca}}}{\text{Na}}\right) + 2.24} - 273.15$ $\beta = \frac{4}{3} \text{ para } \frac{\text{Ca}^{\frac{1}{2}}}{\text{Na}} > 1 \text{ y } t < 100^{\circ}\text{C}$ $\beta = \frac{1}{3} \text{ para } \frac{\text{Ca}^{\frac{1}{2}}}{\text{Na}} < 1 \text{ ó si } t_4 > 100^{\circ}\text{C}$	Fournier y Truesdell (1973)
K/Mg	$t^{\circ}\text{C} = \frac{-4410}{\log\left(\frac{\text{K}^2}{\text{Mg}}\right) - 14} - 273.15$	Giggenbach (1988)
Na/Li	$t^{\circ}\text{C} = \frac{1590}{\log\left(\frac{\text{Na}}{\text{Li}}\right) + 0.779} - 273.15$	Kharaka <i>et al.</i> (1982) en Nicholson (1993)
Li/Mg	$t^{\circ}\text{C} = \frac{2200}{\log\left(\frac{\text{Li}}{\sqrt{\text{Mg}}}\right) + 5.47} - 273.15$	Kharaka y Mariner (1989) en Nicholson (1993)

Fuente: autores

El procedimiento para la selección de las temperaturas es indicado en el diagrama de flujo de la figura 21. En casos excepcionales como en manantiales de las áreas geotérmicas de Paipa y Chiles-Cerro Negro, la temperatura del reservorio fue seleccionada a partir de geotermómetros de gases. En el caso de manantiales con evidencia de influencia de agua del mar, se ignoraron los geotermómetros alcalinos y se seleccionó la temperatura del geotermómetro de sílice, como temperatura máxima. La estimación se hizo de manera conservadora para prevenir posibles estimaciones demasiado optimistas de la temperatura de reservorio.

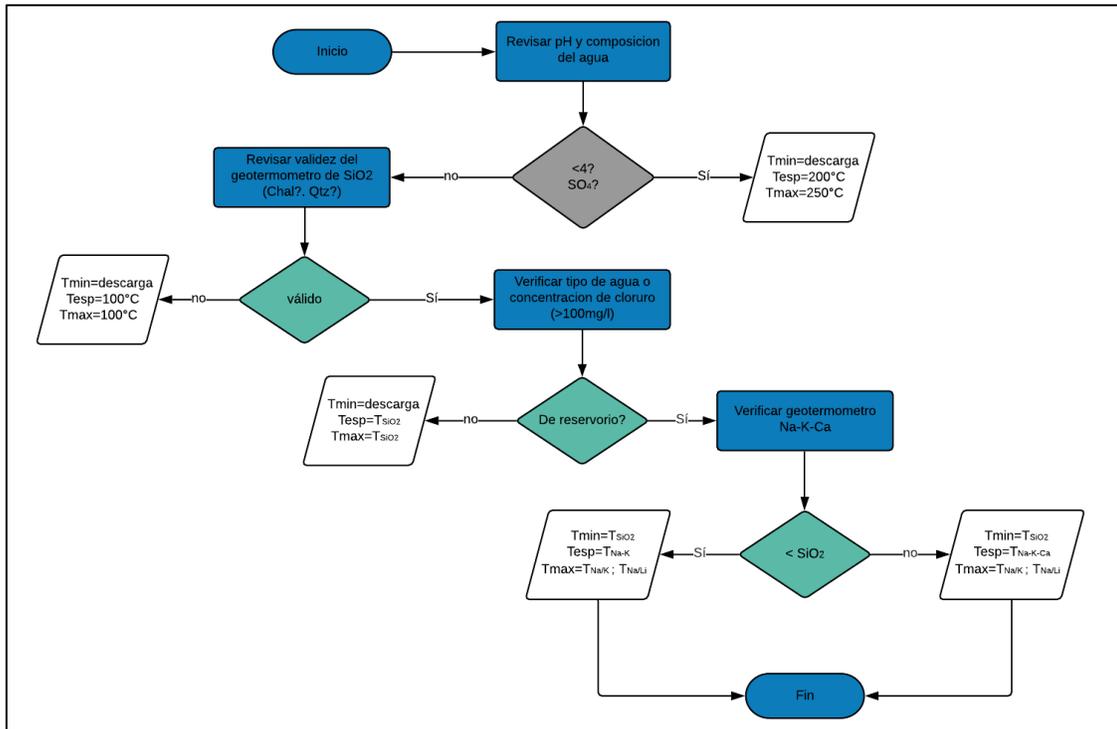


Figura 21. Diagrama de flujo metodología utilizada para selección de temperaturas de manantiales o clústeres de manantiales

Para manantiales con pH inferior a 4, de composición sulfatada, se asumió origen vapor calentado y la existencia de vapor geotérmico para el que se asumieron temperaturas de 200 y 250°C

Fuente: autores

Recurso geotérmico o calor recuperable: Como se observó en la tabla 2, existe variedad de criterios para la selección del factor de recuperación (Rg) el varía con el tipo de roca y su permeabilidad. La circular 790 de USGC recomienda usar un valor de 0.25 (25%) para el factor de recuperación; para este trabajo se utilizó dicho valor de Rg como máximo, y para los valores esperado y mínimo, 0.1 y 0.05, respectivamente, como se muestra en la tabla 6.

Potencia eléctrica: Para la estimación de la potencia eléctrica, objetivo final del procedimiento descrito, se utilizó la ecuación 5.

Tabla 6. Valores usados para la estimación de la potencia eléctrica

VARIABLE	UNIDADES	VALORES REFERENCIA			FUENTE
		MÍNIMO	ESPERADO	MÁXIMO	
Factor de recuperación	--	0.05	0.1	0.25	--
Calor recuperado de pozo	KJ	Estimado en calculo anterior			--
Vida del proyecto	año	30			Quinao y Zarrouk (2014)
Eficiencia de conversión	--	a partir de un ciclo binario con de acuerdo con la temperatura del fluido			GEOKERI (2019)
Factor de pérdidas en superficie	--	0.9			GEOKERI (2019)

Fuente: autores

Los valores de la eficiencia de conversión (EC) fueron seleccionados de acuerdo con la temperatura del fluido de reservorio a partir de la tabla 7, construida por Geokeri (2019), basada en el análisis termodinámico de un ciclo binario de dos fases.

Tabla 7. Eficiencia de conversión en función de la temperatura del fluido geotérmico

Eficiencia de conversión recomendada	
Temperatura* de yacimiento (°C)	EC
280	0.17
260	0.15
240	0.13
220	0.11
200	0.08
180	0.05
160	0.04
140	0.02
120	0.01
<120	0.001

*Para temperaturas menores a 120 °C y mayores a 280 °C, se asignaron valores extrapolados en la función lineal calculada entre 120 y 280 °C

Fuente: GEOKERI, 2019

2.2 Fichas de información

Para la organización y presentación de la información, se elaboraron tres fichas de información denominadas: ficha geoquímica, ficha geológica y ficha de potencial, las cuales son descritas brevemente a continuación.

2.2.1 Ficha geoquímica

La ficha geoquímica contiene la información concerniente a los manantiales termales ubicados en un área geotérmica o departamento; se indican, el nombre del área geotérmica, un identificador asignado a cada clúster de manantiales termales, los nombres de los manantiales que conforman el clúster, el rango de los parámetros fisicoquímicos medidos *in situ*, valores de temperatura, mínima, esperada y máxima, seleccionados para el clúster y fotografías de los sitios de emergencia de dichos manantiales. Esta ficha es ilustrada en la figura 22.

GEOTERMÓMETROS					
AREA GEOTÉRMICA VOLCÁNICA:	Identificación de área geotérmica				
Localización:	Departamento	ID:			
Características de los manantiales termales					
Parámetros químicos			Número de manantiales:		
Nombre manantial	composición química		Parámetros fisicoquímicos		
La Cabaña	Composición química		Rango de temperatura de descarga (°C):		
			Rango de pH:		
			Rango conductividad (µS/cm):		
Temperaturas usadas en el calculo de potencial					
Temperatura mínima del reservorio (°C)		Temperatura esperada del reservorio (°C)		Temperatura máxima del reservorio (°C)	
Geotermómetro usado	Valor	Geotermómetro usado	Valor	Geotermómetro usado	Valor
Temperaturas usadas para el cálculo de potencial					
Consideraciones geotermométricas					
Observaciones a temperaturas usadas					
Fotografías de los manantiales					
Imágenes de manantiales					
Observaciones					

Figura 22. Ficha Geoquímica

Fuente: autores

2.2.2 Ficha Geológica

La ficha geológica contiene mapa de ubicación del área geotérmica, imagen de la plancha geológica usada, un hipervínculo al mapa oficial, corte geológico, y una descripción geológica de las rocas presentes en el rango de profundidad en el que se asume la existencia del posible reservorio del área geotérmica (0.5 a 3 km, de acuerdo con Brook *et al.*, 1978). La figura 23 muestra un ejemplo de la ficha geológica.

Área Geotérmica		
<p>Mapa de ubicación del área geotérmica sobre mapa de Colombia, Departamental sobre DEM</p>		<p>Imagen de mapa geológico con área geotérmica identificada</p>
<p>Ver mapa Geológico (pdf)</p>		
<p>Corte geológico con área geotérmica identificada</p>		
Possible reservorio	litología	Descripción
<p>Descripción de la litología del posible reservorio</p>		
<p>Bibliografía: Referencia de bibliografía usada</p>		
<p>Observaciones:</p>		

Figura 23. Ficha Geológica
Fuente: autores

2.2.3 Ficha de Potencial

La figura 24 muestra la ficha de potencial, esta contiene el nombre del área geotérmica, identificación del clúster, número de manantiales termales incluidos en el mismo,

resumen de los valores de las variables utilizadas para los cálculos del calor almacenado, calor recuperable y la potencia eléctrica, por área geotérmica o departamento, curvas de distribución de probabilidad de calor almacenado y potencia eléctrica y mapa de localización del clúster resaltado, en el área geotérmica o departamento.

Nombre del área geotérmica			
Localización: Departamento de ubicación del área		Manifestaciones termales: Tipo de manifestación	
ID: Identificación del Clúster		Número de termales	
Potencial estimado en MW- Modelo volumétrico			
Parámetros	Mínimo	Esperado	Máximo
Área del yacimiento (Km ²)			
Espesor del yacimiento (Km)			
Volumen del yacimiento (Km ³)			
Calor específico volumétrico de la roca (kJ/m ³ °C)			
T yacimiento (°C)			
T referencia (°C)			
Porosidad			
Densidad del agua (kg/m ³)			
Densidad de la roca (kg/m ³)			
Cp agua (kJ/kg K)			
Cp de la roca (kJ/kg°C)			
Parámetros Potencial Eléctrica	Mínimo	Esperado	Máximo
Factor de recuperación			
Calor recuperado pozo (KJ)			
Vida del proyecto (Años)			
Eficiencia de Conversión			
Factor de Pérdidas en Superficie			
Resultados con Montecarlo			
	Calor almacenado (EJ)	Potencia eléctrica (MW)	
Media			
Intervalo de confianza del 90%			
Desviación estándar			
Mediana			
Incertidumbre			
Grafico resultado de cálculo para calor almacenado		Grafico resultado de cálculo para potencia eléctrica	
Imagen de ubicación del clúster en áreas geotérmicas			
Observaciones			
Aspectos que se consideren necesarios			

Figura 24. Ficha Potencial

Fuente: autores

2.3 Consideraciones generales

2.3.1 Definición de áreas geotérmicas

Las áreas geotérmicas se consideran como zonas de estudio en donde se han hecho, o se proyecta hacer, trabajos de exploración por parte del SGC y que fueron definidas con base en atributos geológicos y la localización de los manantiales termales. Se deben entender como áreas preliminares donde, en muchos casos, no se ha realizado el reconocimiento de campo. Hasta el momento, solamente se han realizado trabajos de exploración (geología, geofísica y geoquímica) en seis de estas áreas. Lo anterior quiere decir que dichas áreas pueden variar (en extensión) a medida que se conozca más acerca de ellas. Independiente de lo anterior, el cálculo del potencial no se basó en el tamaño del área geotérmica sino más bien, y como se explicó en la metodología, en el área generada por un *buffer* alrededor de un manantial o la unión de varios manantiales termales.

No se tienen en cuenta los sistemas geotérmicos ciegos, es decir, que la delimitación de las áreas es basada en características visibles en superficie, pero no se descarta el potencial geotérmico que pueda existir sin mostrar manifestación superficial, o incluso estar en zonas no volcánicas y en cuencas sedimentarias.

Un total de 21 áreas geotérmicas se han definido en todo el territorio colombiano (figura 25), separadas geográficamente y relacionadas directamente a la presencia de actividad volcánica. Del total de las áreas, solo dos se encuentran en la Cordillera Oriental, Paipa e Iza. La mayoría se ubican en la Cordillera Central, estas son: San Diego, Cerro Bravo, Villamaría – Termales, Nereidas Botero Londoño, Hacienda Granates, Santa Rosa, Laguna de Otún, Nevado del Tolima, Cerro Machín, volcán del Huila, caldera Gabriel López, caldera Paletará, volcanes de Sotará – Sucubún, volcanes Doña Juana-Las Ánimas, volcanes Galeras-Morasurco y el volcán de Sibundoy. En el límite del flanco occidental de la Codillera Central y flanco oriental de la Cordillera Occidental se encuentran las áreas geotérmicas de Azufral, Cumbal y Chiles - Cerro Negro.

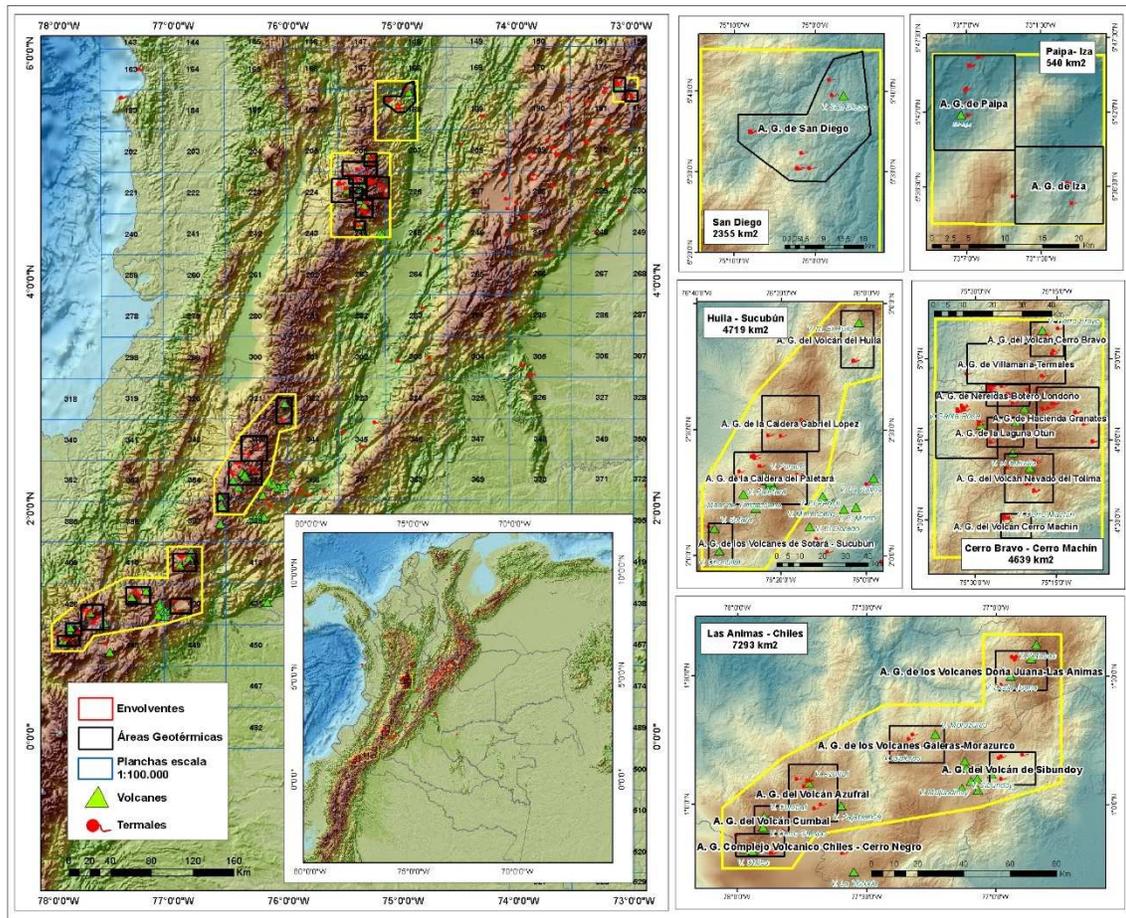


Figura 25. Localización de las áreas geotérmicas (polígonos negros) y bloques geotérmicos (polígonos amarillos)

Fuente: autores

2.3.2 Bloques geotérmicos

Los bloques son polígonos que agrupan diferentes áreas geotérmicas dependiendo de la ubicación geográfica. En total son cinco bloques, estando una de ellas, San Diego, conformada por una sola área geotérmica. El tamaño y la forma de los bloques se basa en la distribución de las áreas geotérmicas (figura 25, tabla 8), dejando un espacio considerable más allá del límite de las áreas de estudio. El bloque Paipa – Iza agrupa a estas dos áreas geotérmicas. El bloque Cerro Bravo – Cerro Machín agrupa ocho áreas, el bloque Huila - Sucubún agrupa cinco áreas, mientras que el bloque Las Ánimas – Chiles agrupa seis áreas geotérmicas.

Tabla 8. Áreas y bloques geotérmicos

Área Geotérmica	Área (Km ²)	Bloque	Área (Km ²)
A. G. de Paipa	143	Paipa - Iza	540
A. G. de Iza	127		
A. G. de San Diego	495	San Diego	2355
A. G. del Volcán Cerro Bravo	133	Cerro Bravo - Cerro Machín	4639
A. G. de Villamaría-Termale	457		
A. G. de Nereidas-Botero Londoño	108		
A. G. de Hacienda Granates	363		
A. G. del Volcán de Santa Rosa	473		
A. G. de la Laguna Otún	123		
A. G. del Volcán Nevado del Tolima	280		
A. G. del Volcán Cerro Machín	88		
A. G. del Volcán del Huila	359	Huila - Sucubún	4719
A. G. de la Caldera Gabriel López	606		
A. G. de la Caldera del Paletará	741		
A. G. de los Volcanes de Sotará - Sucubún	246		
A. G. de los Volcanes Doña Juana-Las Ánimas	378	Las Ánimas - Chiles	7293
A. G. de los Volcanes Galeras-Morasurco	381		
A. G. del Volcán de Sibundoy	283		
A. G. del Volcán Azufral	516		
A. G. del Volcán Cumbal	176		
A. G. Complejo Volcánico Chiles - Cerro Negro	203		

Fuente: autores

2.3.3 Consideraciones geológicas

Las descripciones de la geología de las áreas geotérmicas, así como del posible reservorio presentadas en las fichas geológicas, se basaron en los mapas y cortes geológicos a diferentes escalas descritos en trabajos anteriores. En el caso de la descripción de reservorio geotérmico, se describió la geología deducida por los cortes, a una profundidad mínima y máxima de 0.5 y 3 km respectivamente. De cualquier manera, el cálculo del potencial no tuvo en cuenta la litología de cada reservorio, debido a que se tomaron los mismos valores de propiedad físicas de las rocas (ver metodología) para todas las áreas geotérmicas.

Inicialmente, y sin tener información de perforaciones para confirmar lo contrario, se cree que la permeabilidad de la mayoría de los posibles reservorios, estaría dada por porosidad secundaria en rocas ígneas y metamórficas.

3 RESULTADOS

Los resultados de la estimación del potencial energético de los recursos geotérmicos, son resumidos a continuación, en las tablas 9 y 10, para áreas geotérmicas y departamentos, respectivamente. Posteriormente se presenta una descripción de la ubicación, generalidades de la zona, localización de los termales y rasgos generales de la geología. Las fichas en donde se presentan los parámetros usados para el cálculo del potencial, la química de las aguas termales y algunos datos relevantes del posible reservorio son presentadas en los Anexos 1 y 2, para áreas geotérmicas y departamentos, respectivamente.

Tabla 9. Calor almacenado y potencia eléctrica en áreas geotérmicas definidas

Área Geotérmica	Termales	Clústeres	Calor** (EJ)	Intervalo confianza 90%	Calor recuperable (EJ)	Potencia** (MWe)	Intervalo confianza 90%
Paipa	14	4	4,31	3,41 a 5,22	0,5	21,50	10,96 a 32,04
Paipa*	14	--	2,87	--	--	20,89	--
Iza	4	3	2,72	2,27 a 3,14	0,3	12,09	6,45 a 178,73
San Diego	15	6	12,51	11,45 a 13,6	1,15	141,85	118 a 165
Volcán Cerro Bravo	8	4	7,94	6,96 a 8,92	0,88	79,73	63,49 a 95,98
Villamaría-Termales	9	3	4,83	4,03 a 5,62	0,51	38,50	27,39 a 49,71
Nereidas-Botero Londoño	14	5	12,19	10,55 a 13,83	1,31	100,72	71,60 a 129,85
Hacienda Granates	19	9	11,57	10,39 a 12,76	1,36	67,24	52,04 a 82,43
Volcán de Santa Rosa	20	3	10,66	9,27 a 12,05	1,07	137,24	105,6 a 168,9
Laguna Otún	1	1	0,63	0,3 a 0,95	0,08	0,08	0,03 a 0,13
Nevado del Tolima	18	4	8,66	7,50 a 9,82	1,17	82,70	60,70 a 104,71
Volcán Cerro Machín	14	2	10,05	8,29 a 11,81	1,14	129,94	93,65 a 166,23
Volcán del Huila	4	1	0,76	0,37 a 1,14	0,09	0,1	0,03 a 0,16
Caldera Gabriel López	8	4	5,15	4,55 a 5,75	0,57	24,78	19,69 a 29,83
Caldera del Paletará	21	8	14,27	12,86 a 15,67	1,48	117,96	96,13 a 139,78
Volcanes de Sotará - Sucubún	2	2	2,82	2,37 a 3,27	0,3	17,43	12,06 a 22,62
Volcanes Doña Juana-Las Animas	6	3	5,30	4,62 a 5,99	0,55	37,84	29,82 a 45,86
Volcanes Galeras- Morasurco	8	4	4,87	4,22 a 5,51	0,68	29,49	20,68 a 38,29
Volcán de Sibundoy	4	3	3,09	2,66 a 3,52	0,33	9,8	5,52 a 12,83
Volcán Azufral	8	6	9,6	8,69 a 10,52	0,91	81,9	67,41 a 96,36
Volcán Cumbal	1	2	2,56	1,59 a 3,51	0,25	15,66	5,41 a 25,90
Complejo Volcánico Chiles - Cerro Negro	5	3	4,14	3,5 a 4,8	0,48	23,77	16,98 a 30,55
TOTAL	203	80	138,60	136,76 a 140,43	15,11	1170,20	1138,81 a 1201,58

Fuente: autores

*Áreas con dimensiones de reservorio inferidas por modelo 3D de densidad. No se toman en cuenta para la suma total de calor y potencia.

** Datos estadísticos mostrados más adelante en la descripción de cada área geotérmica y en las fichas.

Tabla 10. Calor almacenado y potencia eléctrica en departamentos con presencia de manantiales termales

Departamento	Termales	Clústeres	Calor (EJ)	Intervalo de confianza del 90%	Calor recuperable (EJ)	Potencia (MWe)	Intervalo de confianza del 90%
Antioquia	5	5	2,04	1,7 a 2,3	0,284	2,27	1,27 a 3,27
Arauca	1	1	0,52	0,23 a 0,80	0,064	0,07	0,02 a 0,11
Atlántico	1	1	0,47	0,20 a 0,75	0,061	0,06	0,02 a 0,10
Boyacá	19	18	11,16	10,44 a 11,87	1,341	1,43	1,31 a 1,55
Casanare	3	3	1,64	1,39 a 1,89	0,196	0,21	0,17 a 0,25
Cesar	1	1	0,47	0,20 a 0,75	0,062	0,06	0,02 a 0,10
Chocó	4	3	2,30	1,91 a 2,68	0,305	3,27	1,86 a 4,69
Cundinamarca	50	24	15,75	14,87 a 16,62	1,887	1,99	1,84 a 2,13
Guaviare	1	1	0,53	0,26 a 0,79	0,062	0,07	0,02 a 0,11
Huila	15	11	7,08	6,49 a 7,67	0,843	12,09	7,06 a 17,13
Magdalena	1	1	0,50	0,24 a 0,77	0,061	0,06	0,02 a 0,11
Meta	5	2	0,32	0,26 a 0,38	0,316	2,54	3,19 a 2,89
Nariño	1	1	0,59	0,28 a 0,90	0,074	0,07	0,02 a 0,13
Norte de Santander	6	6	3,42	3,07 a 3,77	0,708	0,43	0,37 a 0,49
Santander	4	4	1,74	1,4 a 2,0	0,212	0,21	0,17 a 0,26
Tolima	4	3	1,04	0,83 a 1,24	0,138	0,13	0,09 a 0,17
TOTAL	121	85	49,56	48,82 a 50,31	6,614	24,95	22,80 a 27,10

Fuente: autores

Este documento incluye un mapa creado mediante el uso del software ArcGIS® de Esri donde se muestra, además de la ubicación, los datos de potencia eléctrica y calor almacenado de cada área geotérmica y departamento, así como algunas de las estadísticas que aporta el método Montecarlo (Anexo 3). Las figuras que acompañan la descripción de la áreas geotérmicas y departamentos, ilustra la ubicación de los manantiales témales (símbolos rojos), clústeres (círculos amarillos), volcanes activos e inactivo (triángulos verdes) además del área geotérmica (polígono negro).

3.1 Cálculo del potencial de las áreas geotérmicas

Las siguientes 21 área geotérmicas asociadas a sistemas volcánicos activos e inactivos, representan las zonas con mayor recurso geotérmico. Aunque pueden representar un único sistema geotérmico, dada la metodología usada, basada en clústeres de manantiales, se asumen diferentes reservorios para una misma área.

3.1.1 Área Geotérmica de Paipa

Localización y generalidades: El área geotérmica de Paipa está localizada al sur del municipio del mismo nombre, en el departamento de Boyacá, entre las planchas 171 y 191 a escala 1:100.000 del Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC) (figura 26). La extensión del polígono propuesto como área geotérmica es de 143 km², los cuales no se superponen con zonas protegidas de parques naturales ni páramos. Su temperatura media, teniendo como referencia la reportada para el municipio está entre 12 y 16 °C.

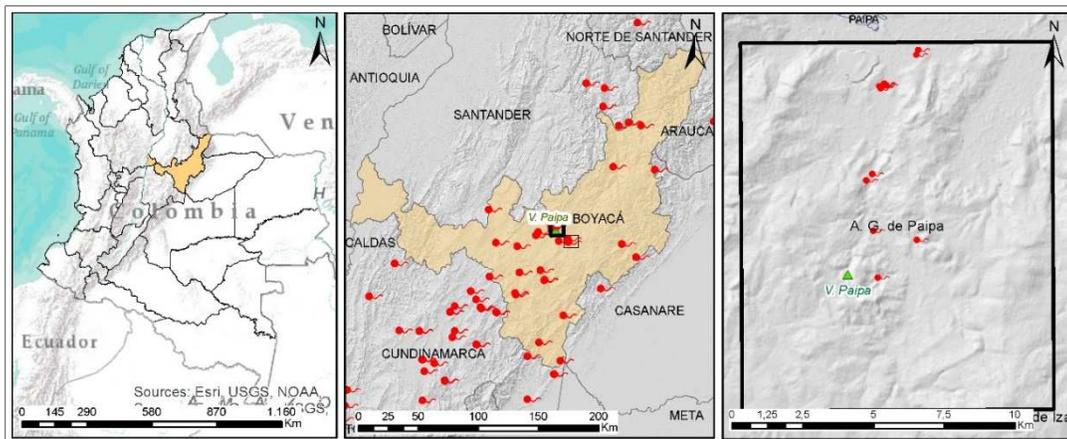


Figura 26. Localización del área geotérmica del Paipa

A) Mapa de Colombia. B) Área geotérmica en el departamento de Boyacá. C) Mapa de manantiales termales localizados dentro del área geotérmica

Fuente: autores

Manantiales termales y geología: En el área se localizan al menos 14 manantiales termales, agrupados en cuatro clústeres. En el clúster PP-01 se localizan nueve manantiales, de los sectores conocidos como ITP-Lanceros y SALPA, en la llanura de inundación del río Chicamocha, caracterizados por pH en el rango de la neutralidad (6.3 – 7.9), temperatura entre 21 y 74 °C, alta conductividad eléctrica (entre 28.000 y 64.000 $\mu\text{S}/\text{cm}$) debida a la concentración elevada de sales, cuya composición es dominada por sulfato de sodio y, una abundante descarga de gases (ficha de geoquímica, Anexo 1). En el clúster PP-02 se localizan dos manantiales del sector de La Playa, con rasgos similares a los descritos para el clúster 1, pero con caudal mucho menor y baja descarga de gases. En el clúster PP-03 se localizan dos manantiales termales de baja temperatura (21-23 °C) y baja conductividad eléctrica (250 y 80 $\mu\text{S}/\text{cm}$). Uno de ellos, conocido como El Hervidero, es una manantial de pH moderadamente ácido (3.8), del tipo sulfatado sódico y descarga muy abundante de gases. El otro manantial, denominado Cruz de Murcia, de pH neutro, bicarbonatado sódico y sin descarga de gases, es utilizado como fuente de suministro de agua de un acueducto veredal. El clúster 4, corresponde a un solo manantial denominado Olitas, asociado a la quebrada del mismo nombre, del tipo químico bicarbonatado sódico, de baja temperatura (23 °C), pH alrededor de 6 y baja conductividad eléctrica (170-383 $\mu\text{S}/\text{cm}$).

A partir de la cartografía geológica 1:25.000 (Velandia y Cepeda, 2004), la emergencia de los manantiales del clúster PP-01 ocurre, a través de rocas sedimentarias con permeabilidad primaria, cerca del contacto entre las formaciones Cuaternario aluvial, Tilatá, de edad Neógeno, y Labor y Tierna, de edad Cretácica, en la zona de influencia de la intersección entre fallas inversas de bajo ángulo, El Hornito - El Bizcocho y El Hornito

– El Batán. Los manantiales del clúster PP-02, ocurren cerca del contacto entre las formaciones sedimentarias cretácicas Plaeners, de alta permeabilidad secundaria, y Los Pinos, de baja permeabilidad, en zona de influencia de la intersección entre fallas inversas de bajo ángulo de El Batán y Rancho Grande. Los manantiales del clúster PP-03, emergen de rocas ígneas como depósitos piroclásticos del volcán de Paipa (El Hervidero) y lavas del complejo de domos del Alto Los Godos (manantial de Cruz de Murcia). El manantial Olitas, del clúster PP-04, emerge a través de rocas del complejo de domos de Los Volcanes y depósitos piroclásticos que cubren dichos domos.

La geología del área geotérmica está dominada por rocas sedimentarias de las Formaciones Tibasosa, Une, Conejo, Plaeners Los Pinos, Labor y Tierna, de edad Cretácico; Guaduas, de edad Cretácico-Paleógeno; Bogotá, de edad Paleógeno; Tilatá y vulcanitas originadas en el volcán de Paipa (depósitos piroclásticos y domos de composición riolítica- traquítica), de edad Neógeno y, depósitos aluviales y una brecha hidrotermal de edad Cuaternario (Velandia, 2003; Cepeda y Pardo, 2004). A partir de la extrapolación de la información geológica de la plancha 172, al noreste del área, en donde aflora el basamento (Ulloa *et al.*, 2001); el basamento del área geotérmica estaría conformado por rocas metamórficas (Macizo de Floresta), sedimentarias (Cucho, Floresta y Tibet) e ígneas (intrusiones como el Stock de Chuscales, Stock de Otengá y Cuarzomonzonita de Santa Rosita), de edad Paleozóico y, por rocas metamórficas e ígneas (como el intrusivo de Aguachica), de edad Jurásico–Paleozóico. La edad de las rocas ígneas relacionadas con el volcán de Paipa, fue medida para cinco eventos de depósitos piroclásticos entre 1 ± 0.1 Ma y 9.9 ± 0.1 Ma, por el método de huellas de fisión (GIANG-SGC, 2016) y, en lavas de los domos, entre 1.01 ± 0.1 y 2.80 ± 0.031 Ma, por el método de Ar-Ar (Rueda, 2017).

Las rocas que se proponen como posibles reservorios geotérmicos, a partir de los cortes geológico A-A' y B-B' de la cartografía 1:25.000 (Velandia y Cepeda, 2004), corresponden a las areniscas de la Formación Une, calizas y areniscas de la Formación Tibasosa, niveles arenosos de las formaciones Cucho y Tibet, del basamento y, el basamento metamórfico e ígneo (ver ficha de geología del reservorio, Anexo 1).

Potencial geotérmico: La estimación del potencial energético del área geotérmica de Paipa, se basó en la suma de los valores calculados para tres de los cuatro clústeres de manantiales, cuya extensión total acumulada es cercana a 9.26 Km^2 (figura 27). El calor almacenado acumulado es de 4.31 EJ y la potencia de 21.50 MWe (ficha de potencial, Anexo 1). El clúster PP-3, fue excluido por estar conformado por manantiales de baja temperatura (21 a 23 °C) sin evidencia de la contribución del fluido geotérmico profundo.

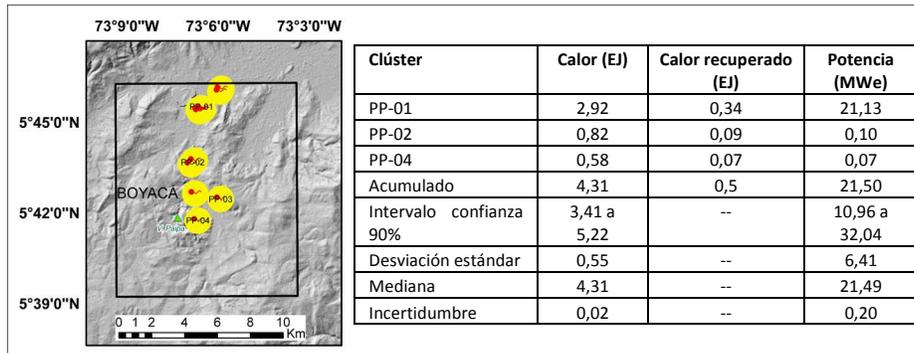


Figura 27. Clústeres tomados como base para el cálculo de potencial y tabla de calor almacenado y potencia eléctrica en el área geotérmica de Paipa
Fuente: autores

Potencial geotérmico a partir de la geometría del reservorio inferida del modelo conceptual: Una primera aproximación a la geometría del reservorio geotérmico fue propuesta a partir del modelo 3D de densidad, que sirvió como base de la actualización del modelo conceptual de esta área geotérmica. Dicho modelo muestra una zona de baja densidad, interpretada como el reservorio, en medio de dos zonas de alta densidad (2.5 a 2.86 g/cc), que corresponden a las rocas intrusivas que subyacen los complejos de domos Alto Los Volcanes y Alto de los Godos, como se ilustra en la figura 28. Un cálculo muy conservador del volumen del reservorio (1.1 km³) fue realizado a partir de estimación de la extensión de la zona de densidad inferior a 2 g/cc (2.75 km²) y un espesor de 400 m, asumido como el de arenas de la formación Une, en el rango de profundidad de 2300 a 1900 m.s.n.m. (Alfaro *et al.*, 2017).

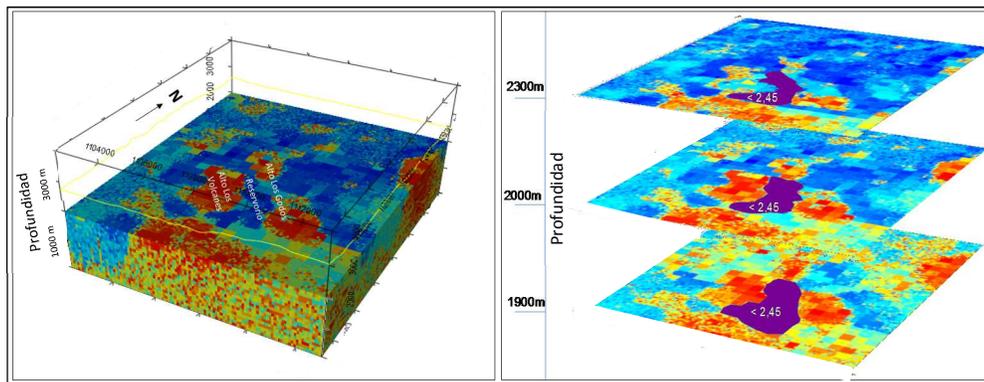


Figura 28. Reservorio en Paipa

A) Modelo de densidades 3D y reservorio como la zona de baja densidad (en azul) en medio de las intrusiones de alta densidad (en rojo) (Alfaro *et al.*, 2017). B) Estimación del área de baja densidad (<2.45 g/cc) asumida como reservorio (Alfaro *et al.*, 2017)

Fuente: autores

No obstante, si se considera un rango más amplio de densidad para definir el reservorio, entre 1.9 y 2.45 g/cc, su extensión sería de 6.2 km², como se indica en la figura 28. Si adicionalmente se asume un espesor de 1.1 km de rocas sedimentarias con permeabilidad razonable, como las Formaciones Une y Tibasosa, de la cobertura sedimentaria cretácica y, Cucho y Tibet, consideradas como parte sedimentaria del basamento, el volumen del reservorio alcanzaría de 6.82 km³. Para proponer dicho espesor, se tomó como referencia el techo del basamento metamórfico, que estaría aproximadamente a dicha profundidad (1.1 km), en la zona del reservorio propuesto (Alfaro *et al.*, 2017).

Con base en el volumen estimado para el reservorio y asumiendo las mismas temperaturas de referencia y del reservorio, el calor almacenado es de 2.87 EJ y la potencia eléctrica de 20.89 MWe, (ficha de potencial, Anexo 1).

3.1.2 Área Geotérmica de Iza

Localización y generalidades: El área geotérmica de Iza, está ubicada en la provincia del Sugamuxi, departamento de Boyacá, entre las planchas 191 y 192 a escala 1:100.000 del IGAC. Su extensión es de 126.3 Km² y está localizada en la cabecera del municipio de Iza y zona rural de los municipios de Cuítiva y Pesca, en límites con Iza (figura 29). El polígono propuesto para el área geotérmica no abarca zonas de parques naturales, ni páramos. La temperatura media del área, tomando como referencia la media ambiental del municipio de Iza, es de 12 a 16 °C.

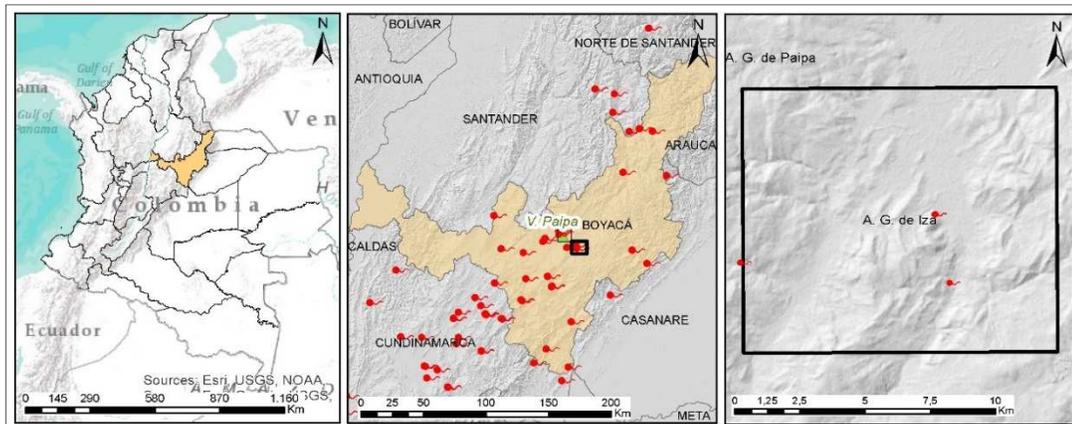


Figura 29. Localización del área geotérmica de Iza

A) Mapa de Colombia. B) Área geotérmica en el Departamento de Boyacá. C) Mapa de manantiales
termales dentro del área geotérmica

Fuente: autores

Manantiales termales y geología: En el área geotérmica de Iza, se localizan cuatro manantiales termales. Los manantiales conocidos como Erika y Balneario Público, ubicados dentro de la cabecera del municipio, en la cuenca de la quebrada Agua Caliente (afluente del río Iza), son del tipo clorurado sódico, tienen pH neutro, una temperatura de descarga de 47 y 53 °C y conductividad eléctrica de 2800 y 3300 $\mu\text{S}/\text{cm}$, (ficha de geoquímica, Anexo 1). Los puntos de emergencia de estos manantiales están a poca distancia del criptodomo riolítico de Iza, en la zona de fracturamiento causada por la Falla Matamora (Rojas *et al.*, 2009). En la zona rural del municipio de Cuítiva, en la ribera del río Tota, se encuentra El Batán, manantial termal de agua dulce (conductividad eléctrica del orden de 600 $\mu\text{S}/\text{cm}$) y composición bicarbonatada sódica, pH neutro y temperatura de 56 °C. Este manantial surge a través de depósitos aluviales que suprayacen la secuencia sedimentaria cretácica, sobre el flanco occidental del Anticlinal de Tota (Rojas *et al.*, 2009). Por último, el manantial de Las Moyas, también de agua dulce (103 $\mu\text{S}/\text{cm}$), está ubicado en el límite occidental del área geotérmica, en zona rural de municipio de Pesca; es del tipo bicarbonatado cálcico-magnésico con temperatura de 24 °C y pH neutro. Este manantial, emerge de las areniscas cuarzosas de la Formación Une, en cercanías al miembro calcáreo de la Formación Tibasosa (Ulloa *et al.*, 1976), a menos de dos kilómetros de la Falla de Soápage, cartografiada por Renzoni *et al.* (1998).

De acuerdo con Rojas *et al.* (2009), la geología del área está conformada por rocas sedimentarias de edades Cretácico, Paleógeno y Cuaternario y rocas ígneas, de edad Neógeno - Cuaternario. Los afloramientos de rocas cretácicas corresponden a las formaciones Tilatá, Une, Churuvita, Conejo, Plaeners, Los Pinos, Labor y Tierna. La formación Guaduas está en la transición entre el Cretácico y el Paleógeno. Las rocas del Paleógeno corresponden a las formaciones Socha Inferior, Socha Superior, Picacho y Concentración. Las rocas ígneas están representadas por el criptodomo de Iza, en el que se diferencian los domos Holcim y Los Sauces y la llamada Brecha Intrusiva. También forman parte de estas rocas, los depósitos piroclásticos de Los Naranjos. La edad de las rocas ígneas ha sido datada en 6.01 ± 0.06 (Rueda, 2017). Las rocas del Cuaternario están conformadas por depósitos glaciales, aluviales-lacustres y coluviales. Dentro de la secuencia de rocas descrita se encuentran varios niveles de rocas permeables como areniscas, conglomerados y calizas y, rocas impermeables como arcillolitas y limolitas (Rojas *et al.*, 2009).

Las formaciones que se proponen como posibles reservorios a partir de la cartografía geológica 1:25.000, son rocas intrusivas de los domos Holcim, Los Sauces y la brecha Intrusiva, así como las formaciones sedimentarias Labor y Tierna y Plaeners, de permeabilidad primaria (intergranular) y secundaria (fracturamiento) (ficha de geología del reservorio, Anexo 1).

Potencial geotérmico: La estimación del potencial energético del área geotérmica, se basó en la adición de los valores estimados para tres grupos de manantiales identificados, cuya área total es equivalente a 126 km². Los valores máximos de calor almacenado y potencia eléctrica son hallados para el clúster IZ-01, como se indica en la figura 30. Los valores acumulados para el área corresponden a 2.72 EJ de calor almacenado y 12.09 MWe de potencia eléctrica (ficha de potencial, Anexo 1).

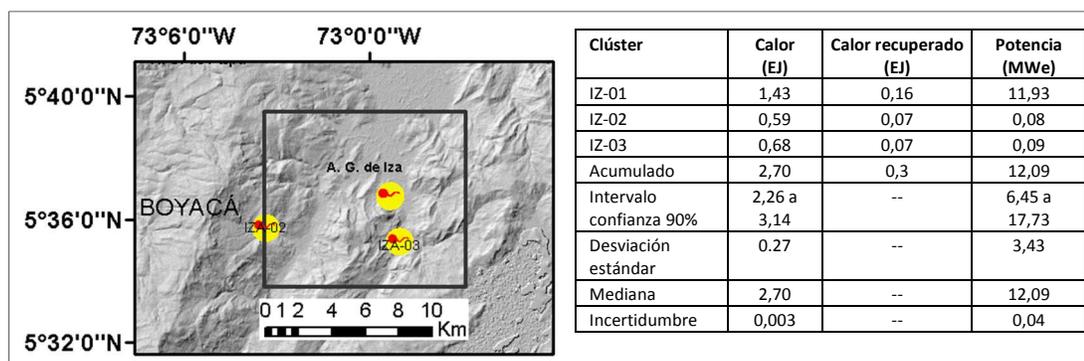


Figura 30. Clústeres tomados como base para el cálculo de potencial y tabla de calor almacenado y potencia eléctrica en el área geotérmica de Iza

Fuente: autores

3.1.3 Área Geotérmica de San Diego

Localización y generalidades: El área geotérmica de San Diego, está ubicada entre los municipios de Samaná y Norcasia, departamento de Caldas y, Nariño, departamento de Antioquia, entre las planchas 188 y 168 a escala 1:100.000 del IGAC (figura 31). Su extensión es de 495 Km². Al suroccidente del polígono, se localiza el Parque Nacional Natural Selva de Florencia, el cual ocupa una pequeña extensión del área geotérmica. En la zona no se registra la ocurrencia de Páramos. La temperatura media del área está entre 20 y 24 °C.

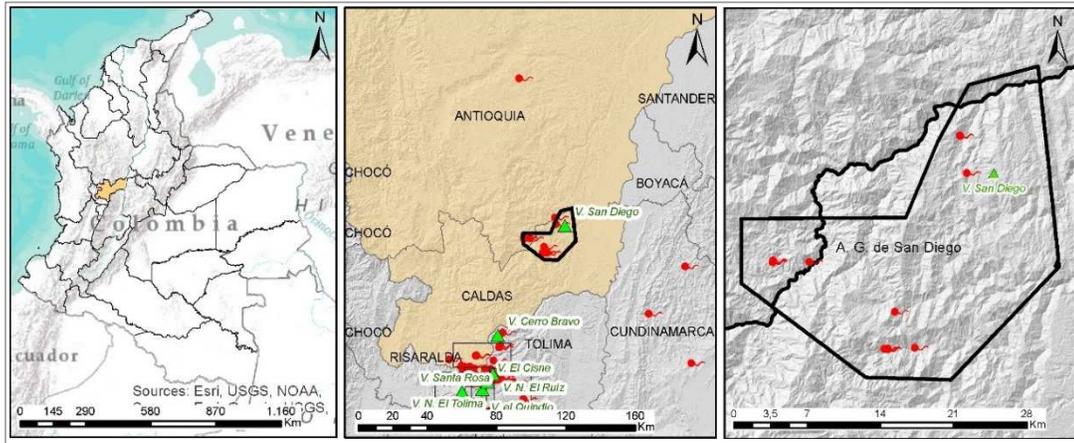


Figura 31. Localización del área geotérmica de San Diego

A) Mapa de Colombia. B) Área geotérmica en los departamentos de Caldas y Antioquia. C) Mapa de manantiales termales dentro del área geotérmica

Fuente: autores

Manantiales termales y geología: El área geotérmica hospeda 15 manantiales termales localizados en tres sectores principales; maar de San Diego, volcán El Escondido de Florencia e intrusión ígnea de Puente Linda, sector también conocido como El Espíritu Santo. La ocurrencia de estos manantiales termales está asociada a los cuerpos de agua de La Laguna de San Diego y los ríos Samaná, Manso, San Antonio y Dulce. Todos los manantiales del área se caracterizan por tener un pH neutro (entre 6.1 y 6.7), una conductividad eléctrica elevada (entre 2000 y 12500 $\mu\text{S}/\text{cm}$) y temperaturas moderadas (entre 32 y 44°C). En cada sector domina un tipo químico de agua; bicarbonatado sódico, en los manantiales termales del maar de San Diego; clorurado sódico, en los del Volcán El Escondido y clorurado-bicarbonatado sódico, en Puente Linda (ficha de geoquímica, Anexo 1). En el sector del maar de San Diego, se registran tres manantiales termales. Uno de ellos, localizado al borde la Laguna de San Diego, emerge de los esquistos del basamento (Complejo Cajamarca) y los otros dos (La Calera I y II), a través de depósitos del volcán de San Diego cerca del contacto entre rocas del Intrusivo Gnésico y el Complejo Cajamarca en la zona de influencia de la falla Palestina. Al norte del sector se registran emanaciones de gas de baja temperatura y presión. En el sector de El Escondido se encuentran seis manantiales los cuales emergen, uno en el contacto entre el intrusivo Stock de Florencia y el basamento metamórfico, cuatro de cuarzodioritas del Stock de Florencia a lo largo del río San Antonio y uno sobre el mismo río San Antonio cerca del contacto entre el Stock de Florencia y el Complejo Ígneo de Samaná. En el sector de Puente Linda, caracterizado por fracturamiento E-W, emergen seis manantiales, cinco en la zona de contacto entre un pórfido andesítico y el Complejo Cajamarca y, uno a través del Complejo Cajamarca, a lo largo del río Dulce (Rueda y Rodríguez, 2016).

La geología del área geotérmica de San Diego está dominada por los afloramientos del basamento metamórfico Paleozoico de la Cordillera Central, es decir el Complejo Cajamarca conformado por varias facies denominadas grupo máfico, cuarzo, pelítico, calcáreo y rocas metamórficas de bajo grado sin diferenciar. Intruyendo el basamento se encuentran rocas de edad Pérmico-Triásico (Intrusivo Néisico), Jurásico (Batolito de Sonsón), Mesozoico (Alaskita y Complejo ígneo de Samaná) y Cenozoico (Stock de Florencia). Adicionalmente, se registran pórfidos andesíticos con firma adakítica y dacíticos de edades Mioceno, Plioceno, depósitos cuaternarios aluviales y piroclásticos y una sola formación sedimentaria denominada Berlín, conformada por arcillolitas, lodolitas y areniscas, de edad Albiano. La actividad magmática efusiva más reciente, corresponde a los domos de los volcanes El Escondido de Florencia (153.7 ± 38.5 ka y 55 ± 23 ka), el Maar de San Diego de 89 ± 4.4 ka, datados por el método Ar-Ar y la intrusión del cuerpo porfirítico de Puente Linda, datado en 2.1 ± 1.9 Ma, por el método U-Pb, los que se proponen como fuente de calor de los fluidos geotérmicos que alimentan los manantiales termales (Rueda y Rodríguez, 2016).

Las formaciones geológicas que se proponen como posibles reservorios geotérmicos, a partir de la cartografía geológica 1:25.000, corresponden a rocas ígneas como el Batolito de Sonsón, el Stock de Florencia, el Complejo Samaná y el Intrusivo Gnésico y, facies metamórficas del basamento metamórfico, como esquistos, filitas, cuarcitas y esquistos grafitosos. Por tratarse todas de rocas cristalinas, se presume que, de existir reservorios de fluidos geotermales, éstos estarían hospedados en rocas de permeabilidad secundaria (ficha de geología del reservorio, Anexo 1).

Potencial geotérmico: La estimación del potencial energético del área geotérmica se basó en la sumatoria de los valores calculados para siete clústeres de manantiales (figura 32), cuya extensión total acumulada es de cerca de 15 Km^2 . El calor almacenado acumulado es de 12.51 EJ y la potencia de 133.79 MWe (ficha de potencial, Anexo 1). La potencia eléctrica más elevada es estimada para el clúster SD-07 conformado por los cuatro manantiales más cercanos al Volcán El Escondido de Florencia (44.51 MWe).

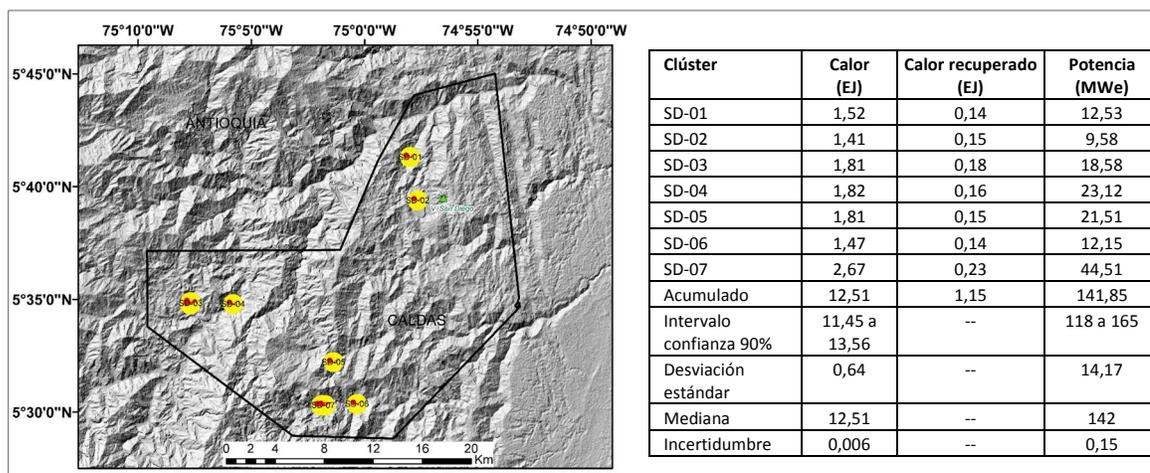


Figura 32. Clústeres tomados como base para el cálculo de potencial y tabla de calor almacenado y potencia eléctrica en el área geotérmica de San Diego
Fuente: autores

3.1.4 Área Geotérmica del Volcán Cerro Bravo

Localización y generalidades: El volcán Cerro Bravo, está ubicado en el municipio de Herveo, departamento del Tolima, al oriente del Municipio de Manizales, en la plancha 206 a escala 1:100.000 del IGAC (figura 33). La extensión del polígono propuesto para esta área geotérmica es de 133 km², ocupada parcialmente al occidente, por el Parque Nacional Natural de Los Nevados. La zona de descarga del sistema hidrotermal se localiza al oriente y suroriente del volcán, fuera del área del parque con excepción de dos manantiales que se localizan muy cerca en el límite oriental del mismo. Esta área no se registra la ocurrencia de Páramos. La temperatura media del área, teniendo como referencia la temperatura media ambiental a la altura de ocurrencia de los manantiales termales y la del municipio de Herveo está entre 8 y 12 °C.

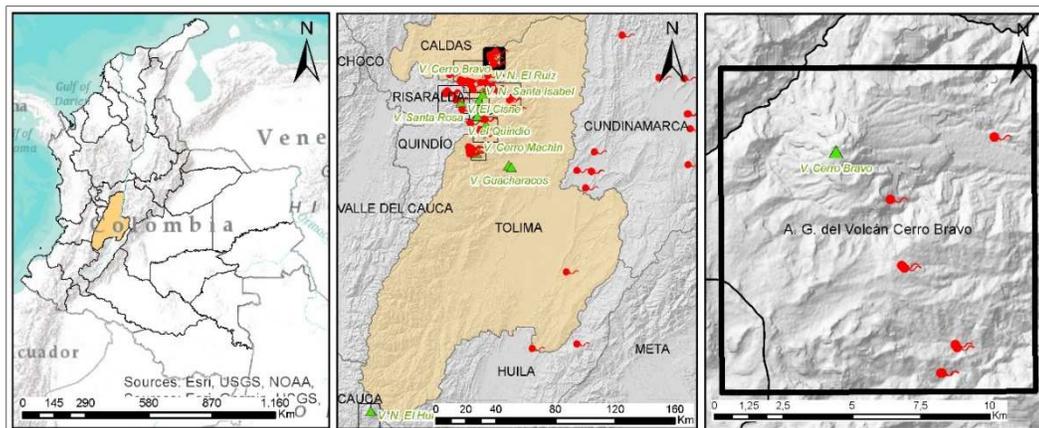


Figura 33. Localización del área geotérmica del Cerro Bravo

A) Mapa de Colombia. B) Área geotérmica en el departamento del Tolima. C) Mapa de manantiales termales localizados dentro del área geotérmica

Fuente: autores

Manantiales termales y geología: En el área se localizan ocho manantiales termales, agrupados en cuatro clústeres, de características y composición química similares. La temperatura de descarga de estas manifestaciones está entre 28 y 46 °C, tienen pH neutro, entre 6.2 y 6.8 y conductividades eléctricas entre 1100 y 2342 $\mu\text{S}/\text{cm}$. El tipo químico dominante de estos manantiales es bicarbonatada sódico (ficha de geoquímica, Anexo 1). El primero de los clústeres, conformado por un manantial termal llamado Jordán, emerge a través de la Formación Casabianca, cerca del contacto con rocas del basamento (Complejo Cajamarca), en una zona posiblemente controlada estructuralmente por la intersección entre fallas del sistema de Palestina (NE) y fallas transversales que controlan el cauce de la quebrada Jordán. Los manantiales de los clústeres restantes emergen a través de rocas del Stock de Manizales, en un área afectada por fracturas casi verticales de dirección E-W, ENE-WSW, cerca de las quebradas Jordán, Aguacatal y San Luis.

La geología del área geotérmica está constituida por rocas volcanosedimentarias de la formación Casabianca, de edad Neógeno, conformada por rocas volcanogénicas de grano grueso y en menor proporción de tobas y sedimentitas volcánicas retrabajadas y acumuladas por cauces fluviales, localizada al noreste del área; el stock de Manizales, que es un cuerpo intrusivo de edad Cretácico – Paleozoico, compuesto por rocas granitoides (granodiorita-tonalita con facies ocasionales un poco más ácidas), con edades de 62.4 ± 36 Ma en circones determinada por trazas de fisión y 56 ± 2 y 57 ± 2 Ma, por el método K/Ar en biotitas cuyo intenso diaclasamiento con divisiones ortogonales tiene una dirección dominante coincidente con las fallas regionales (N-S y NE), localizado al oriente del área; el Complejo Cajamarca, formado por una secuencia polimetamórfica de edad Paleozoico y específicamente la facies de esquistos cuarzo-

sericíticos, micáceos y cuarzosos, filitas y cuarzofilitas, localizada en el borde oriental del área; flujos andesíticos porfiríticos y basálticos de edad Neógeno, localizados al sur del área; flujos andesíticos cuaternarios (coladas de lava) asociados a los cuellos volcánicos de Cerro Bravo, Páramo Herveo y El Contenido, ubicados al norte del área y, por último, depósitos piroclásticos cuaternarios que siguen la morfología preexistente, no consolidados, constituidos por cenizas, lapilli y cantos de pumita, con lentes arenosos de origen glaciario, los cuales se localizan al occidente y cubren cerca de la mitad del área (Mosquera *et al.*, 1998 y González, 2001).

Las formaciones geológicas que se proponen como posibles reservorios geotérmicos, a partir del corte geológico A-A' de la cartografía 1:100.000 (Mosquera *et al.*, 1998), son las formaciones del Complejo Cajamarca, los flujos piroclásticos porfiríticos y basálticos, intrusiones ígneas del Batolito de Sonsón, cuyos afloramientos están al norte fuera del área geotérmica y, el Stock de Manizales. Es decir que el reservorio geotérmico posiblemente está hospedado en rocas cristalinas con permeabilidad secundaria (ficha de geología del reservorio, anexo 1).

Potencial geotérmico: La estimación del potencial energético del área geotérmica, está basada en la suma de los valores calculados para los cuatro clústeres de manantiales, cuya extensión total acumulada es cercana a 10 Km² (figura 34). El calor almacenado acumulado es de 7.93 EJ y la potencia de 79,42 MWe (ficha de potencial, Anexo 1).

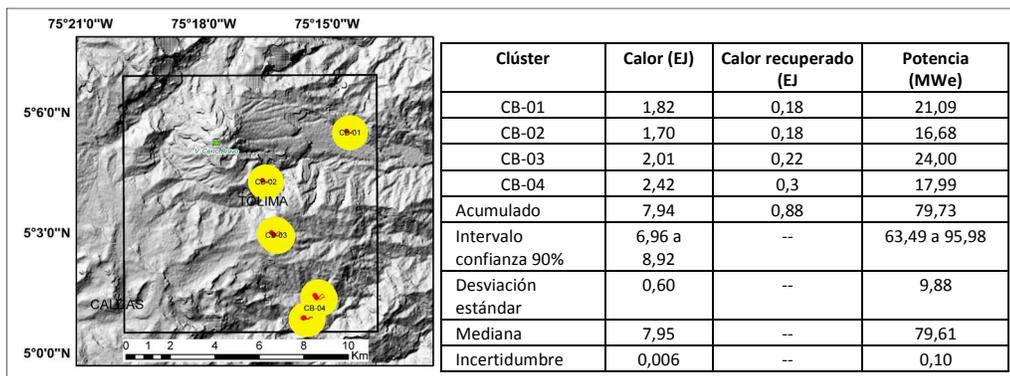


Figura 34. Clústeres tomados como base para el cálculo de potencial y tabla de calor almacenado y potencia eléctrica en el área geotérmica del volcán Cerro Bravo

Fuente: autores

3.1.5 Área Geotérmica Villamaría-Termalés

Localización y generalidades: El área geotérmica está ubicada al sureste del departamento de Caldas y noroeste de Tolima, y al norte del Volcán Nevado El Ruíz (V. N. El Ruíz). Se localiza en las planchas 206 y 225, ambas a escala 1:100.000. La extensión del área geotérmica es de 456,60 km² e incluye parte del terreno del Páramo Los Nevados y del Parque Nacional Natural Los Nevados. Las poblaciones más cercanas son las ciudades de Manizales y Villamaría, ubicadas en el extremo noroeste del área geotérmica. La temperatura media se encuentra entre 3 °C a 23 °C, las temperaturas más bajas se registran en cercanías del Volcán Nevado del Ruíz (figura 35).

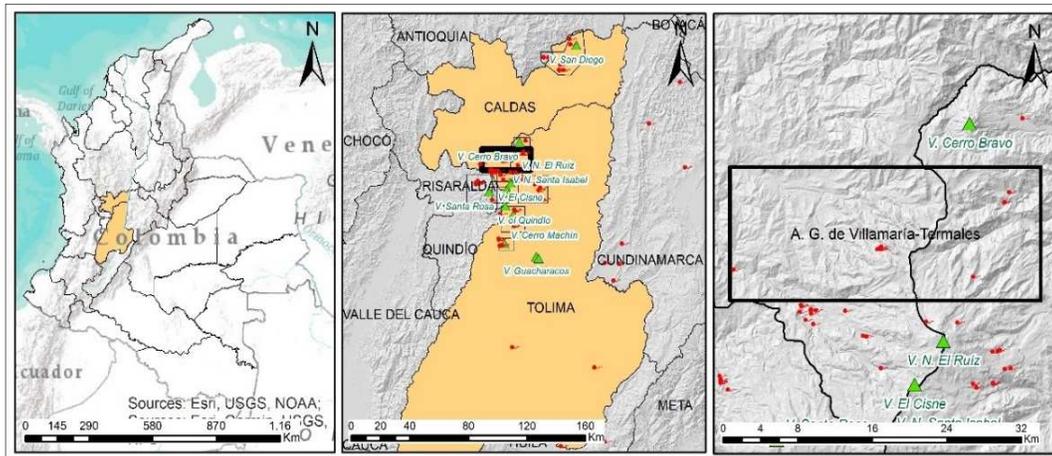


Figura 35. Localización área geotérmica Villamaría Termalés

A) Mapa de Colombia. B) Áreas geotérmicas en los departamentos del Tolima y Caldas. C) Mapa de manantiales termalés dentro del área geotérmica

Fuente: autores

Manantiales termalés y geología: El área geotérmica de Villamaría Termalés hospeda nueve manantiales termalés localizados al noreste y noroeste del volcán Nevado El Ruíz, en los valles de la quebrada Termalés y Río Claro en el departamento de Caldas y la quebrada Aguascalientes del departamento de Tolima. En cada uno de estos sectores domina un tipo químico de agua; bicarbonatada sódica en el manantial termal de Hacienda Guamal en cercanías de Río Claro y sulfatada sódica magnésica en los Termalés de La Gruta, Termalés del Ruíz I, II y II, Mina de Hierro I y II y Termalés del Otoño y Aguascalientes. Los manantiales de esta área geotérmica se caracterizan por tener pH entre 1.0 a 6.1 y conductividad eléctrica elevada entre 3100 y 39360 $\mu\text{S}/\text{cm}$ y, temperaturas de descarga moderadas (entre 30 y 64 °C). La ocurrencia de estos manantiales termalés está asociada a los depósitos de flujos de lodo volcánico (de ceniza a bloques) que suprayacen las lavas andesíticas y localmente a las cuarzodioritas del

Stock de Manizales. Estos termales se asocian con el segmento sur de la falla Villamaría – Termales, que controla el cauce de la quebrada Termales (ficha de geoquímica, Anexo 1).

La geología del área está dominada por un Conjunto de Lavas Pre-Ruíz y flujos de lavas correspondientes al primer periodo eruptivo del Ruíz, todas ellas de composición andesítica a dacítica. Al sur del área geotérmica, se encuentran flujos de lavas interestratificados con depósitos piroclásticos y lahares (Martínez *et al.*, 2014). Hacia el norte aflora una tonalita biotítica del Stock de Manizales y hacia el noreste afloran rocas esquistosas cuarzo-sericíticas, micáceas y cuarzosas, filitas y cuarzo-filitas, localmente con intercalaciones de esquistos cloríticos y actinolíticos del Complejo Cajamarca, separadas de arenitas, shales negros, arenitas feldespáticas, lentes de chert y calizas del Complejo Quebradagrande por la Falla de San Jerónimo (González, 2001).

Con base en los perfiles geológicos de la cartografía con escala 1:25.000 de Martínez *et al.* (2014) y la cartografía escala 1:100.000 de González (2001), se proponen como posibles reservorios para esta área geotérmica, rocas andesíticas a dacíticas del Conjunto de Lavas Pre-Ruíz, granodioritas biotíticas del Batolito El Bosque, lutitas carbonosas del Complejo Quebradagrande o rocas metamórficas del Complejo Cajamarca (ficha de geología del reservorio, Anexo 1)

Potencial geotérmico: La estimación del potencial energético se basó en la sumatoria del potencial calculado para tres grupos de manantiales (figura 36), cuya extensión total es de 7 Km². El calor almacenado sumó 4.83 EJ y la potencia 38.50 MWe (ficha de potencial, Anexo 1). La potencia eléctrica más elevada es estimada para el grupo VT-01 conformado por siete manantiales; éstos son: Termales del Ruíz I, II y II, La Gruta, Termales del Otoño y Minal del Hierro I y II (20.05 MWe).

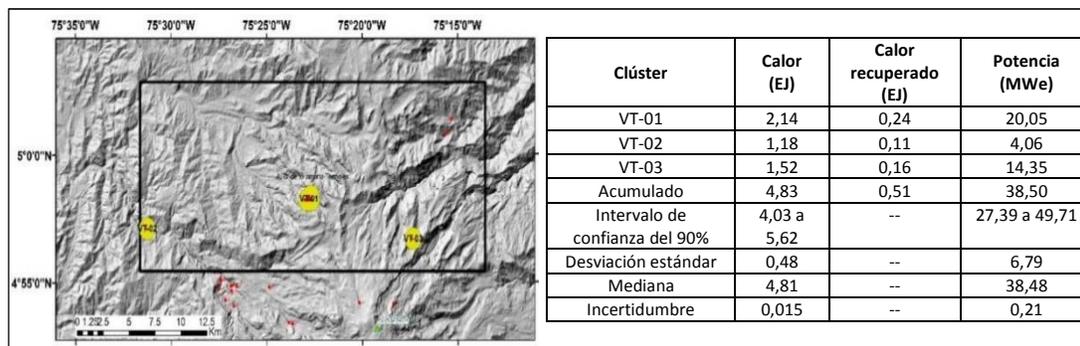


Figura 36. Clústeres tomados como base para el cálculo de potencial y tabla de calor almacenado y potencia eléctrica en el área geotérmica de Villamaría – Termales
Fuente: autores

3.1.6 Área Geotérmica Nereidas-Botero Londoño

Localización y generalidades: El área geotérmica está ubicada al sur del departamento de Caldas; y al oeste del Volcán Nevado El Ruíz. Se localiza en la plancha 225 a escala 1:100.000 con una extensión del polígono propuesto como área geotérmica de 107.24 km². El área incluye al oriente parte de la extensión del Páramo Los Nevados y del Parque Nacional Natural Los Nevados. Las poblaciones más cercanas son las ciudades de Manizales al norte y Villamaría, al norte y, Chinchiná y Santa Rosa de Cabal, al occidente del área geotérmica. La temperatura media del área geotérmica se encuentra entre 3 °C a 14 °C, las temperaturas más bajas se registran en cercanías del Volcán Nevado del Ruíz (figura 37).

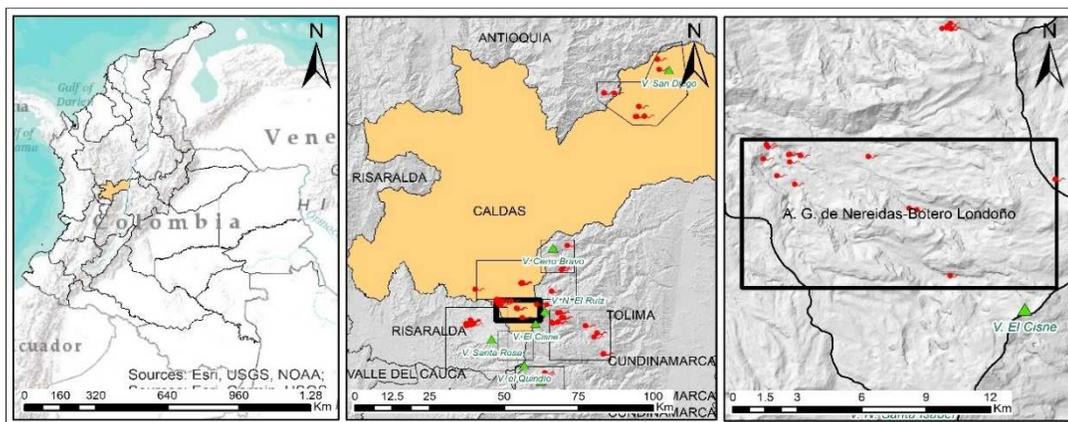


Figura 37. Localización área geotérmica Nereidas-Botero Londoño

A) Mapa de Colombia. B) Áreas geotérmicas en el departamento de Caldas. C) Mapa de manantiales termales dentro del área geotérmica

Fuente: autores

Manantiales termales y geología: El área geotérmica hospeda 14 manantiales termales localizados al oeste del volcán Nevado El Ruíz, en los valles del río Claro y río Gualí, quebrada Las Nereidas y Hojas Anchas, del departamento de Caldas. En cada uno de estos sectores domina un tipo químico de agua; clorurada sódica en los manantiales de Botero Londoño (Quebrada Nereidas, Hacienda El Plan, La Piscina, La Quinta) y Laguna alta (1, 2 y 3); bicarbonatada magnésica sódica en el manantial Hacienda Termales Cascada; bicarbonatada magnésica cálcica en el manantial La Poa; bicarbonatada cálcica sódica en Nereidas I y II; sulfatada cálcica en el manantial Gualí y, sulfatada sódica en el manantial de Chorronegro. Los manantiales se caracterizan por tener pH de 2.7 a 8.1, conductividad eléctrica entre 139 y 4900 $\mu\text{S}/\text{cm}$ y temperaturas de descarga entre 27 y 95 °C (ficha de geoquímica, Anexo 1). La ocurrencia de estos manantiales está asociada a lo esquistos del Complejo Cajamarca y depósitos cuaternarios que los suprayacen, a

depósitos de flujo volcánico en contacto con lavas andesíticas, flujos glaciares, depósitos de ignimbritas y depósitos piroclásticos o, directamente a lavas andesíticas. Su ocurrencia puede relacionarse a las fallas Nereidas, Río Claro y/o al cruce de fallas Río Claro y Nereidas con las fallas Laguna Baja y Termalés.

En el sector más oriental en cercanías del V. N. El Ruíz y noroeste del área geotérmica, la geología está dominada por conjuntos de lavas del Volcán Nereidas, adosadas a lavas antiguas y lavas más recientes del Segundo Periodo Eruptivo, junto con depósitos de lava del Volcán La Olleta. Las lavas están caracterizadas por tener fenocristales de plagioclasa y máficos en una matriz afanítica. Hacia el centro y oeste del área geotérmica, predominan un conjunto de lavas y depósitos volcánicos. Los flujos de lava corresponden al Periodo Eruptivo PRE-Ruíz y al Primer Periodo Eruptivo Ruíz. Las lavas presentan composición andesítica a dacítica, y los depósitos son matriz soportados, con fragmentos pómez tamaño *lapilli* medio diseminados en una matriz de tamaño ceniza media a fina la cual está constituida por contenidos variables de pómez, líticos y cristales (Martínez *et al.*, 2014).

Con base en los perfiles geológicos de la cartografía con escala 1:25.000 de Martínez *et al.* (2014) y escala 1:100.000 de González (2001), se proponen como posibles reservorios para esta área geotérmica, rocas andesíticas del Conjunto de Lavas del Primer periodo Eruptivo Ruíz, andesíticas a dacíticas del Conjunto de Lavas Pre-Ruíz o rocas metamórficas del Complejo Cajamarca (ficha de geología del reservorio, Anexo 1).

Potencial geotérmico: La estimación del potencial energético se basó en la sumatoria del potencial calculado para cinco grupos de manantiales (figura 38), cuya extensión total es de 16.8 Km². El calor almacenado sumó 12.19 EJ y la potencia 100.72 MWe (ficha de potencial, Anexo 1). La potencia eléctrica más elevada es estimada para el grupo NB-01 conformado por nueve manantiales, éstos son: Botero Londoño, Quebrada Nereidas, Hacienda El Plan, La Quinta, La Piscina, Hacienda Termalés Cascada, Laguna Alta 1, 2 y 3 (72.27 MWe).

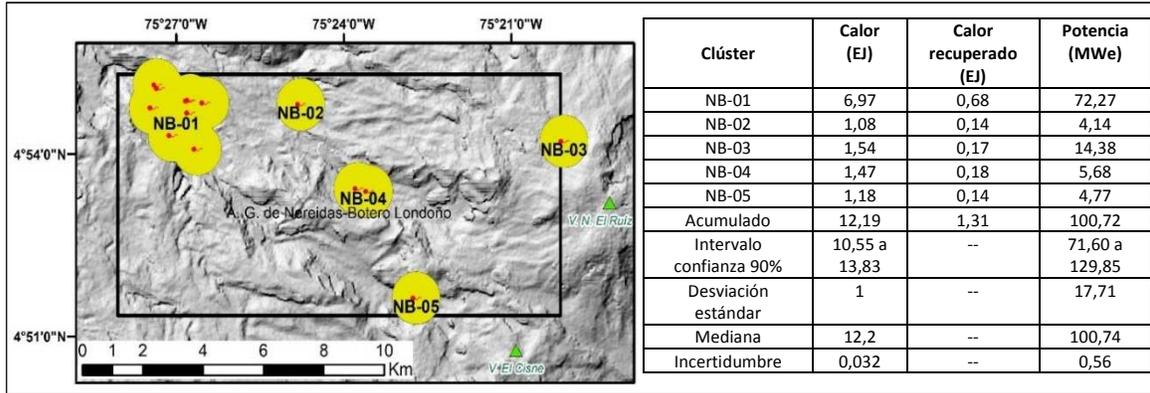


Figura 38. Clústeres tomados como base para el cálculo de potencial y tabla de calor almacenado y potencia eléctrica en el área geotérmica de Nereidas – Botero Londoño

Fuente: autores

3.1.7 Área Geotérmica Hacienda Granates

Localización y generalidades: El área geotérmica está ubicada al norte del departamento del Tolima y al este de los volcanes Nevado El Ruíz, El Cisne y Nevado Santa Isabel. Se localiza en las planchas 225 y 226 ambas a escala 1:100.000. La extensión del área geotérmica es de 362.36 km². El área de estudio incluye, al oeste, parte de la extensión del Páramo Los Nevados y del Parque Nacional Natural Los Nevados. La población más cercana es el municipio de Murillo, ubicada al noreste del área geotérmica. La temperatura media se encuentra entre 3 °C a 16 °C, las temperaturas más bajas se registran en cercanías del Volcán Nevado del Ruíz (figura 39).

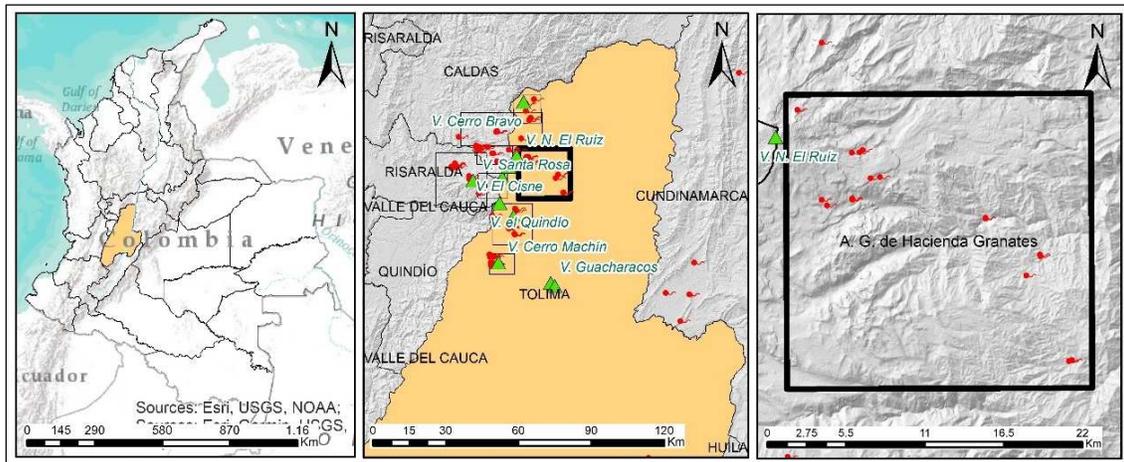


Figura 39. Localización área geotérmica Hacienda Granates

A) Mapa de Colombia. B) Área geotérmica en el departamento de Tolima. C) Mapa de manantiales termales dentro del área geotérmica

Fuente: autores

Manantiales termales y geología: El área geotérmica hospeda 19 manantiales termales localizados al este del volcán Nevado El Ruíz, en los valles de las quebradas El Oso, Agua Blanca, La Cascada, La Arenosa y Guamal del departamento de Tolima. En cada uno de estos sectores domina un tipo químico de agua; sulfatada cálcica en los manantiales de El Coquito, Aguablanca, La Cabaña, El Balcón y Botalón, Los Derrumbes y La Azufrera, sulfatada magnésica cálcica en Cañaverál III, sulfatada magnésica cálcica en El Calvario, bicarbonatada sulfatada magnésica cálcica en Cañaverál I, bicarbonatada magnésica cálcica en Cañaverál II, bicarbonatada cálcica en el manantial Piscina Cannan, bicarbonatada sódica en Guamal I y II y La Yuca I, II y III, y, clorurada sódica en Hacienda Granates I y II. Los manantiales de esta área geotérmica se caracterizan por tener pH entre 2.6 a 9.4 y conductividad eléctrica entre 160 y 4380 $\mu\text{S}/\text{cm}$ y temperaturas de descarga moderadas (entre 21 y 55 °C) (ficha de geoquímica, Anexo 1). La ocurrencia de estos manantiales termales está asociada a depósitos de ceniza volcánica, depósitos piroclásticos, flujos andesíticos, al contacto de depósitos aluviales del río Recio con la granodiorita moscovítica del Batolito del Bosque o únicamente al Batolito del Bosque. Las emergencias de los manantiales pueden relacionarse con lineamientos tectónicos con dirección NE-SW, a la falla de Palestina y la falla Nereidas con dirección E-W.

Hacia el borde noroccidental del área geotérmica la geología es dominada por rocas andesíticas del conjunto de Lavas del Primer periodo Eruptivo Ruíz, lavas más recientes del Segundo Periodo Eruptivo y la Unidad Eruptiva Ruíz 3 compuesta por un depósito matriz soportado y clasto soportado, compuesto de fragmentos de pómez subangulares según la cartografía 1:25.000 de Martínez *et al.* (2014). El resto de área geotérmica está dominado por el Batolito de El Bosque, correspondiente a granodiorita biotítica leucocrática de grano medio de 49.1 ± 1.7 Ma datado por el método de K/Ar en biotita, de acuerdo (González, 1998; Vesga y Barrero (1978) en Martínez *et al.*, 2014).

Con base en los perfiles geológicos de la cartografía escala 1:25.000 de Martínez *et al.* (2014) y la cartografía escala 1:100.000 de González (2001) y Barrero y Vesga (1976), se proponen como posibles reservorios para esta área, rocas andesíticas a dacíticas del Conjunto de Lavas Pre-Ruiz, la granodiorita biotítica del Batolito El Bosque, o rocas metamórficas del Complejo Cajamarca (ficha de geología del reservorio, anexo 1).

Potencial geotérmico: La estimación del potencial energético se basó en la sumatoria del potencial calculado para nueve grupos de manantiales (figura 40), cuya extensión total es de 21.9 Km^2 . El calor almacenado sumó 11.57 EJ y la potencia 67.24 MWe (ficha de potencial, Anexo 1). La potencia eléctrica más elevada es estimada para los grupos HG-02 y HG-05 conformados por tres y dos manantiales, respectivamente; éstos son: El Coquito, Aguablanca, La Cabaña, El Balcón y Botalón (22.56 y 18.89 MWe).

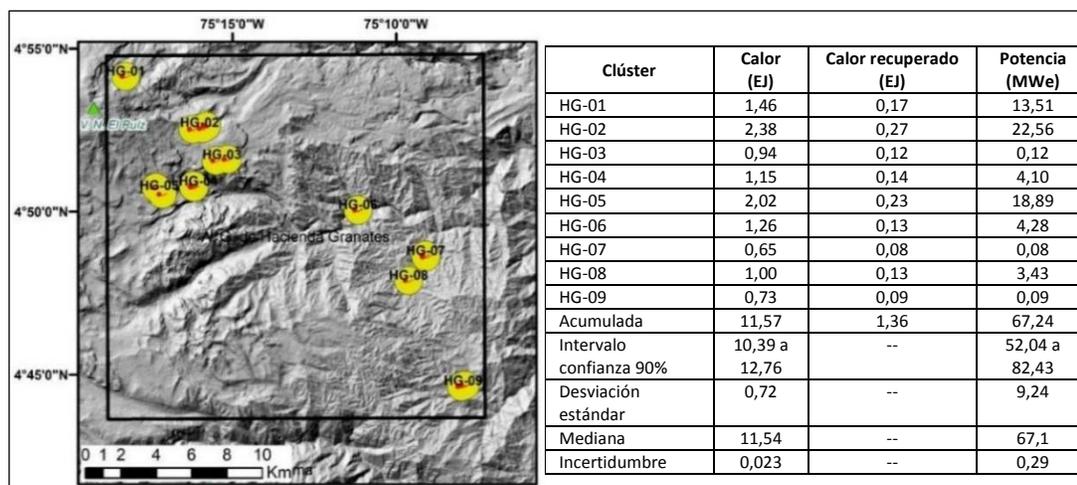


Figura 40. Clústeres tomados como base para el cálculo de potencial y tabla de calor almacenado y potencia eléctrica en el área geotérmica Hacienda Granates

Fuente: autores

3.1.8 Área Geotérmica del Volcán Paramillo de Santa Rosa

Localización y generalidades: El área geotérmica está ubicada al sureste del departamento de Risaralda, alrededor del Volcán Paramillo de Santa Rosa, y al este del Volcán Nevado El Ruíz. Se localiza en la plancha 224 y 225, ambas a escala 1:100.000. La extensión del polígono propuesto como área geotérmica es de 473.15 km². El área de estudio incluye al este parte del área del Páramo Los Nevados y del Parque Nacional Natural Los Nevados. La población más cercana es el municipio de Santa Rosa de Cabal, ubicada al noroeste del área geotérmica. La temperatura media del área geotérmica se encuentra entre 3 °C a 22 °C, las temperaturas más bajas se registran en cercanías del Paramillo de Santa Rosa (figura 41).

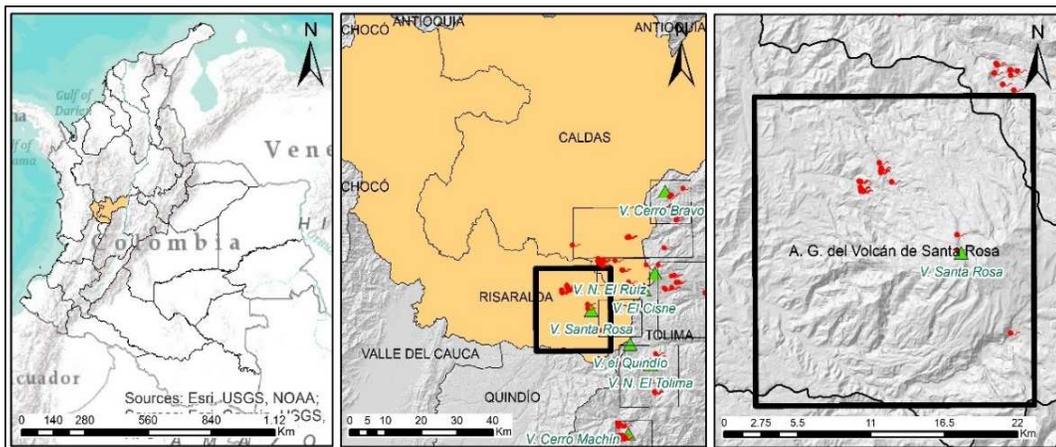


Figura 41. Localización área geotérmica Santa Rosa

A) Mapa de Colombia. B) Área geotérmica en el departamento de Risaralda. C) Mapa de manantiales termales dentro del área geotérmica

Fuente: autores

Manantiales termales y geología: El área geotérmica del Paramillo Santa Rosa hospeda 20 manantiales termales localizados al oeste del Paramillo de Santa Rosa, en los valles de los ríos San Ramón, quebrada Santa Helena y en el Paramillo propiamente, cerca de los nacimientos del Rio San Ramón, en el departamento de Risaralda. En cada uno de estos sectores domina un tipo químico de agua; bicarbonatada sódica en los manantiales Santa Rosa Balneario 1, 2, 3 y 4, Hotel Cascada, Hotel Piscina, Hotel Cueva del Diablo, Hotel Helechos, Hotel Pozo Miguel y Hotel Pie de Cascada; bicarbonatada cálcica en el manantial La Sierra 1; clorurada sódica en los manantiales San Vicente Turco 1 y 2, Piscina Alta, Termal del Puente, Sauna Bajo, Sauna Huéspedes y Tanque y, sulfatada cálcica en La Sierra 2. Los manantiales de esta área geotérmica se caracterizan por tener pH entre 3.8 a 7.2 y conductividad eléctrica entre 133 a 4039 $\mu\text{S}/\text{cm}$ y temperaturas de descarga moderadas a altas (entre 17 y 84 °C) (ficha de geoquímica, Anexo 1). La ocurrencia de estos manantiales termales está asociada a flujos de lava andesíticas de la Formación Tarapacá y el miembro sedimentario del Complejo Quebradagrande. Las emergencias de los manantiales pueden estar asociadas a lineamientos tectónicos con dirección NW-SE, a la falla de San Jerónimo N-S y la falla Santa Rosa NE-SW.

Según la cartografía geológica a escala 1:25.000 (Pulgarín *et al.*, 2017), el área geotérmica está dominada por depósitos de origen volcánico. Hacia el costado oriental, en cercanías de la cima del Volcán Santa Rosa aflora predominantemente, la Formación La Sierra, compuesta por andesitas y andesitas basálticas superpuestas con espesores hasta de 200 m. Se caracteriza por tener textura porfirítica, de grano grueso a medio-granular. Localmente presenta variaciones texturales y alteración hidrotermal. Se estimó la edad desde 568.1 ± 12.7 ka hasta 460.3 ± 4.2 ka. Hacia el norte y noroeste del área geotérmica, afloran lavas de la Formación Tarapacá, compuesta por andesitas masivas con una edad

de 2.3 ± 0.1 Ma. En todo el lado central y occidental del área geotérmica, predomina la unidad litoestratigráfica La Samaria, la cual está conformada por depósitos volcanoclásticos primarios masivos, muy alterados, matriz soportados, constituidos por fragmentos de andesitas embebidos en matriz vítreo-cristalina tamaño ceniza fina y secundarios masivos a pobremente estratificados, matriz soportados, mal seleccionados con fragmentos que varían de taño de lapilli gruesa a bloque gruesa, compuestos de líticos de andesitas de textura porfirítica. La edad para esta unidad esta entre 0.79 ± 0.22 Ma y 460.3 ± 4.2 ka (Pulgarín *et al.*, 2017). Hacia el noroeste y por sectores del área geotérmica, aflora el miembro sedimentario del Complejo Quebradagrande, compuesto predominantemente por lutitas carbonosas, y en menor proporción grauvacas, arenitas feldespáticas, limolitas y liditas (González, 2001). La edad asignada a esta unidad es Valanginiano-Albiano (Martínez *et al.*, 2014).

Con base en los perfiles geológicos de la cartografía con escala 1:25.000 de Pulgarín *et al.* (2017), se proponen como posibles reservorios, rocas andesíticas de la Formación La Sierra o la Formación Tarapacá, depósitos volcanoclásticos matriz soportados de la Unidad Litoestratigráfica Samaria, el miembro sedimentario del Complejo Quebradagrande o rocas metamórficas del Complejo Cajamarca (ficha de geología del reservorio, Anexo 1)

Potencial geotérmico: La estimación del potencial energético se basó en la sumatoria del potencial calculado para tres grupos de manantiales (figura 42), cuya extensión total es de 11.9 Km². El calor almacenado sumó 10.66 EJ y la potencia 137.24 MWe (ficha de potencial, Anexo 1). La potencia eléctrica más elevada es estimada para el clúster SR-01 conformado por 11 manantiales (67.91 MWe).

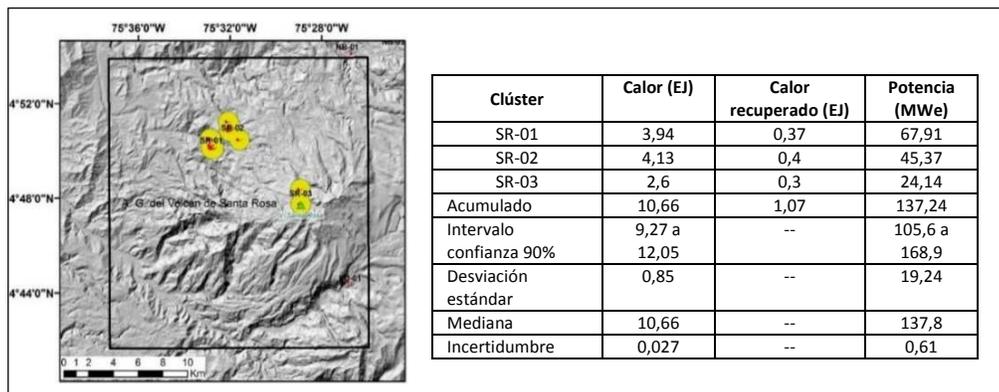


Figura 42. Clústeres tomados como base para el cálculo de potencial y tabla de calor almacenado y potencia eléctrica en el área geotérmica de Santa Rosa

Fuente: autores

3.1.9 Área Geotérmica de la Laguna Otún

Localización y generalidades: El área geotérmica está ubicada al sureste del departamento de Risaralda, sur de Caldas y oeste de Tolima; al este del Volcán Paramillo de Santa Rosa y alrededor del Volcán Nevado de Santa Isabel. Se localiza en la plancha 225 a escala 1:100.000. La extensión del polígono propuesto como área geotérmica es de 122.94 km². El área de estudio está incluida en el Páramo Los Nevados y del Parque Nacional Natural Los Nevados. La población más cercana al oeste es el municipio de Santa Rosa de Cabal y al noreste Murillo. La temperatura media del área geotérmica se encuentra entre 3 °C a 13 °C (figura 43).

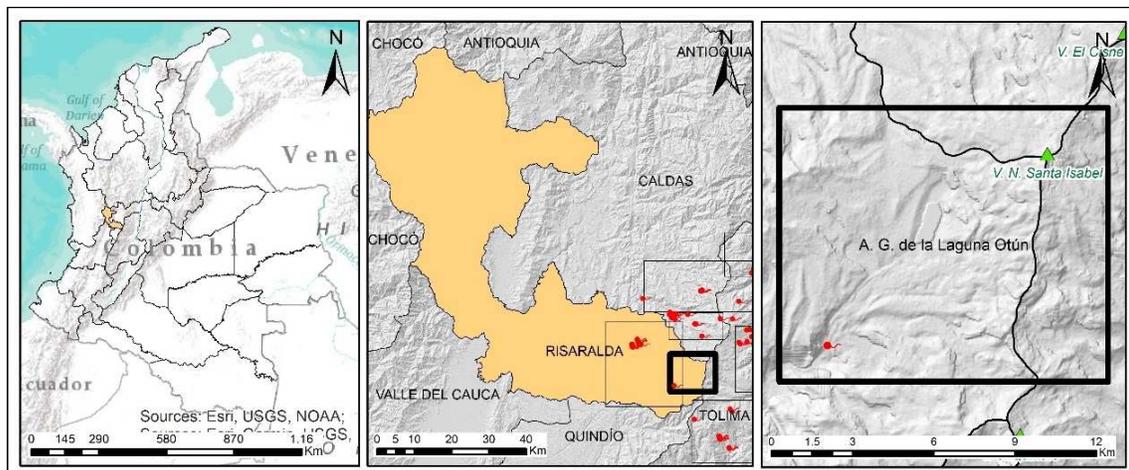


Figura 43. Localización del área geotérmica Laguna Otún

A) Mapa de Colombia. B) Área geotérmica en el departamento de Risaralda. C) Mapa de manantiales termales dentro del área geotérmica

Fuente: autores

Manantiales termales y geología: El área geotérmica de Laguna Otún hospeda un manantial termal localizado al sureste del Paramillo de Santa Rosa o suroeste del Volcán Nevado Santa Isabel, en el valle del río Otún del departamento de Risaralda. El tipo químico de agua del manantial corresponde a sulfatada cálcica con pH de 4.0 a 5.0; con conductividad eléctrica entre 1050 a 1100 $\mu\text{S}/\text{cm}$ y temperatura de descarga de 21 y 22°C (ficha de geoquímica, Anexo 1). La ocurrencia del manantial termal está asociada a flujos de lava andesíticas de la Formación Alsacia-Arenero. La emergencia del manantial puede estar asociada al trazo de la falla de Palestina.

Según la cartografía geológica a escala 1:25.000 (Pulgarín *et al.*, 2017), el oeste del área geotérmica está dominada por depósitos de origen volcánico, por las unidades La sierra, Las Águilas y Alsacia-Arenero. La Formación La Sierra, se compone de andesitas y

andesitas basálticas superpuestas con espesores hasta de 200 m; y localmente con brechas basales. Se caracteriza por tener textura porfirítica. Localmente presenta variaciones texturales y alteración hidrotermal; se estimó la edad desde 568.1 ± 12.7 ka hasta 460.3 ± 4.2 ka. La formación Las Águilas está constituida por un conjunto de capas de roca de composición andesítica, con espesor hasta de 100 m, se distribuye radialmente desde la cima del Volcán Paramillo Santa Rosa; se estima la edad de 260.3 ± 5.7 ka. La formación Alsacia-Arenero corresponde a andesitas de textura porfirítica medio a grueso-granular, con abundantes fenocristales de plagioclasa + anfíbol + piroxeno \pm olivino, en una matriz afanítica de color gris oscuro a medio.

Hacia el costado oriental, de acuerdo con la cartografía de González (2001), escala 1:100.000, se caracteriza igualmente por flujos de lavas de composición andesítica, de edad del Mioceno-Pleistoceno y flujos andesíticos recientes asociados preferencialmente, a los cuellos volcánicos del Nevado de Santa Isabel, que por lo general se intercalan con flujos de lodo volcánico y en parte rellenan valles glaciares preexistentes, de edad Holoceno. Con base en los perfiles geológicos de la cartografía con escala 1:25.000 de Pulgarín *et al.* (2017), se proponen como posibles reservorios para esta área geotérmica las rocas andesíticas de la Formación Tarapacá o Formación La Sierra, o rocas metamórficas del Complejo Cajamarca (ficha de geología del reservorio, Anexo 1)

Potencial geotérmico: La estimación del potencial energético se basó en el potencial calculado para área del único manantial existente en el área geotérmica (figura 44), cuya extensión total es de 2.0 Km². El calor almacenado estimado es de 0.63 EJ y la potencia 0.08 MWe (ficha de potencial, Anexo 1)

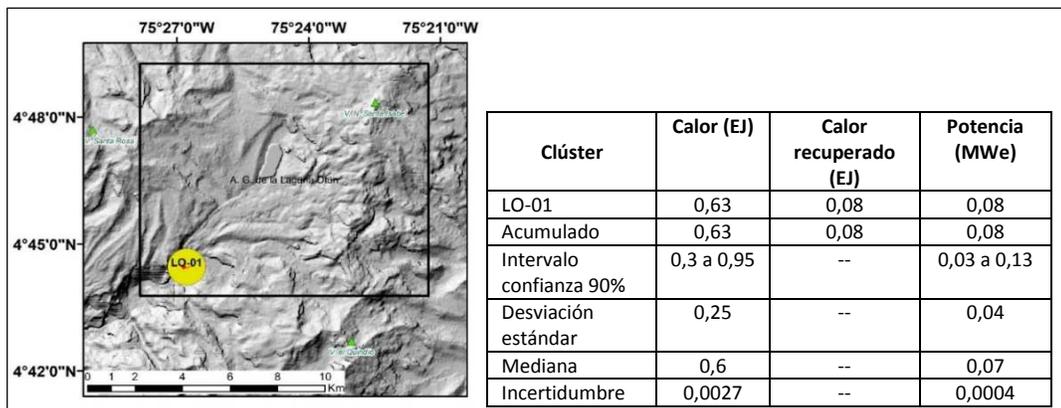


Figura 44. Clústeres tomados como base para el cálculo de potencial y tabla de calor almacenado y potencia eléctrica en el área geotérmica de la Laguna de Otún
Fuente: autores

3.1.10 Área Geotérmica Volcán Nevado del Tolima

Localización y generalidades: El área geotérmica se encuentra ubicada en el noroccidente del departamento de Tolima, con solo una pequeña área (costado noroccidental) en el departamento de Quindío (figura 45). Se localiza en las planchas 225 y 244 a escala 1:100.000 del IGAC y abarca un área de 280.55 km². La población más cerca es el municipio de Juntas, ubicada en el extremo centro-sur del área geotérmica con una temperatura media de 7 °C. El área de estudio cubre parte de extensión del Páramo del Parque Los Nevados y del Parque Nacional Natural Los Nevados.

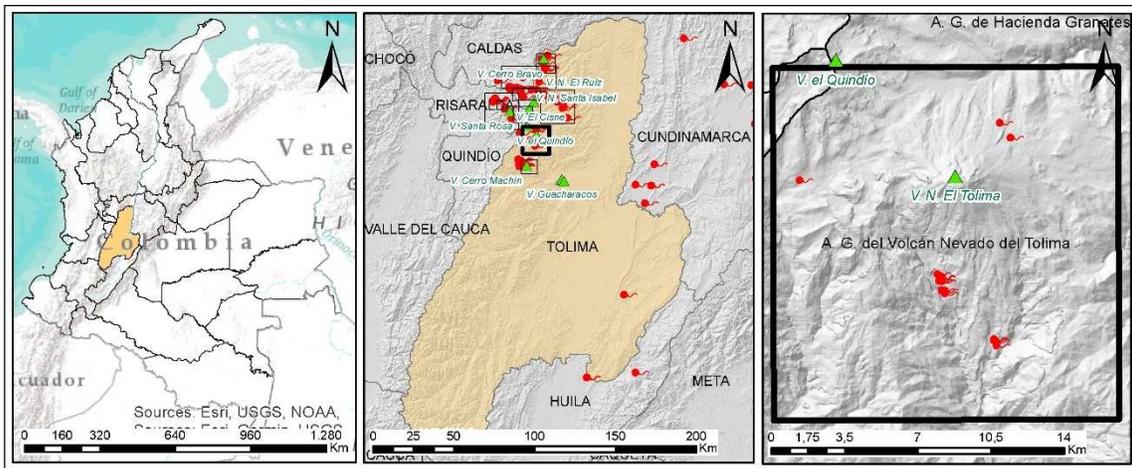


Figura 45. Localización del área geotérmica del volcán Nevado del Tolima

A) Mapa de Colombia. B) Área geotérmica en el departamento del Tolima. C) Mapa de manantiales termales dentro del área geotérmica

Fuente: autores

Manantiales termales y geología: En el área se presenta un total de 18 termales agrupados en cuatro clústeres (figura 46) localizados alrededor del edificio volcánico con temperaturas que van desde 26 hasta 55 °C, pH neutro de 6 a 7.44 y conductividades entre 1311 y 3740 $\mu\text{S}/\text{cm}$. La composición de las aguas es mayormente bicarbonatada-sulfatada y magnésica-sódica, aunque para el grupo de termales El Cañón, predomina la firma de aguas sulfatadas (ficha de geoquímica, Anexo 1). Los termales del norte, clúster NT-01 denominados Cañón I a III emergen sobre las quebradas El Cebollar y Los Cazadores en medio de los depósitos de piroclásticos del volcán. El termal de Aquilino, al oeste emerge cerca a la quebrada El Salado en medio de depósitos piroclásticos y aluviales muy cerca al trazo principal de la falla Palestina. El grupo con más cantidad de termales denominados Rancho I al X emergen en el valle del río Combeima entre depósitos del río y andesitas sobre una Falla cubierta descrita por Mosquera *et al.* (1998)

en dirección N30°-50°W. Finalmente, al sur, emergen los termales denominados El Palmar, cerca de la quebrada Las Perlas sobre esquistos y lavas andesíticas.

La geología del sur del área geotérmica consta del complejo metamórfico de Cajamarca con esquistos verdes y sericíticos, mientras que al norte se exponen las lavas andesíticas del volcán Nevado del Tolima, así como los depósitos piroclásticos, glaciares y aluviales (Mosquera *et al.*, 1998). El volcán Nevado del Tolima se presenta como un estravolcán con un evento de colapso de caldera en el Mioceno Medio donde se sobreponen domos y rocas extrusivas de edad Pleistoceno y los productos piroclásticos más jóvenes (Thouret *et al.*, 1995). En el costado noreste aflora la granodiorita biotítica del Batolito del Bosque de 49.1 ± 1.7 Ma (Barrero y Vesga, 1978).

Basados en el perfil geológico de la plancha 225 a escala 1:100.000 de Mosquera *et al.* (1998) que pasa justo en medio del edificio volcánico del Nevado del Tolima y por la localización de los manantiales termales, se puede inferir la geología del posible reservorio en el complejo Cajamarca, el Batolito del Bosque y posiblemente en las lavas andesíticas, dado su espesor (ficha de geología del reservorio, Anexo 1).

Potencial geotérmico: La estimación del potencial energético se basó en el total de cuatro clústeres (figura 46), con un área total de 11.61 km². El calor almacenado es de 8.66 EJ y la potencia 82.7 MWe (Ficha Potencial Estimado en Anexo 1). La potencia más elevada se estima para el clúster NT-03 con 51.37 MWe representado por los manantiales de El Rancho I a X (ficha de potencial, Anexo 1).

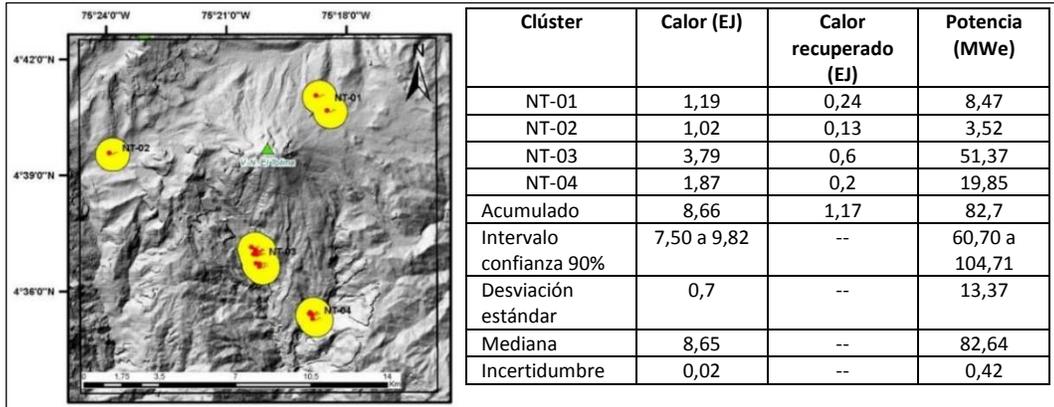


Figura 46. Clústeres tomados como base para el cálculo de potencial y tabla de calor almacenado y potencia eléctrica en el área geotérmica del volcán Nevado del Tolima
Fuente: autores

3.1.11 Área Geotérmica Volcán Cerro Machín

Localización y generalidades: Se ubica en el departamento del Tolima a aproximadamente 70 km de la capital del departamento, Ibagué, y se localiza en la plancha 244 a escala 1:100.000 del IGAC. La población más grande y cercana es el municipio de Cajamarca, pero dentro de la zona de estudio se encuentran los corregimientos de Toche y Tapias, municipio de Ibagué. Cubre un área de 86.93 km² y solo una pequeña área del páramo (Los Nevados) se encuentra dentro de la zona de estudio. La temperatura promedio de la zona es de 16.8 °C.

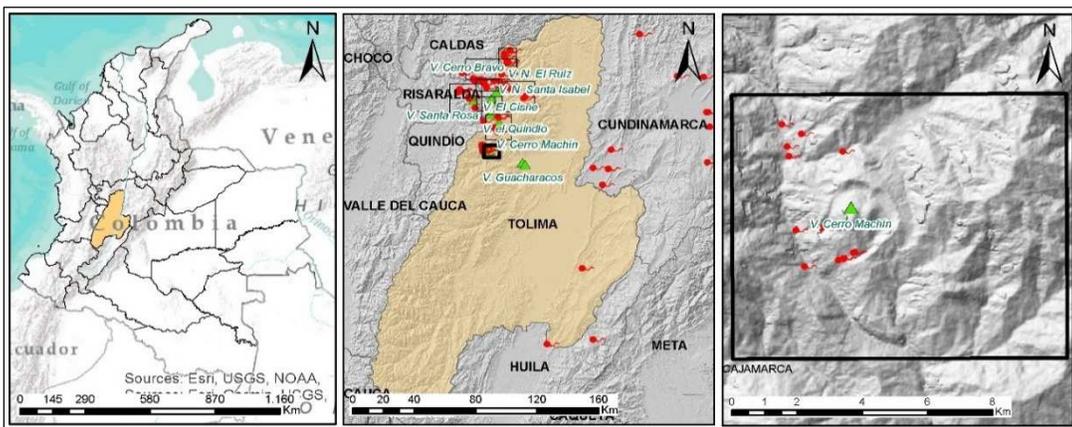


Figura 47. Localización del área geotérmica del volcán Cerro Machín
A) Mapa de Colombia. B) Área geotérmica en el departamento del Tolima. C) Mapa de manantiales termales dentro del área geotérmica
Fuente: autores

Manantiales termales y geología: El área geotérmica hospeda 14 manantiales termales localizados en dos sectores. El primer sector corresponde al norte del área, cerca de la cabecera del corregimiento de Toche, asociados al río Toche y la quebrada San Juan. El segundo sector corresponde a termales cercanos al volcán relacionados al río Toche, al cráter del volcán y a la quebrada Aguacaliente. En el primer sector dominan las aguas bicarbonatadas cálcicas y en el segundo las bicarbonatadas-cloruradas sódicas. Los manantiales se caracterizan por tener pH neutro (entre 6.17 y 8.30), una conductividad eléctrica entre 1100 y 3233 $\mu\text{mS/cm}$ y temperaturas entre 32 y 94 °C, siendo una de las áreas geotérmicas con temperaturas de descarga más altas (ficha de geoquímica, Anexo 1). Los termales cerca al volcán emergen del complejo metamórfico de Cajamarca mientras que, al norte, emergen de los depósitos recientes de río Toche y depósitos de origen volcánico.

La geología que más abunda es el complejo metamórfico de Cajamarca donde predominan los esquistos verdes y sericíticos (Mosquera *et al.*, 1982). Cepeda *et al.* (1995) describen las unidades correspondientes a la actividad del volcán Cerro Machín, caracterizando flujos de ceniza con edades de entre 5100 y 1205 años A. P., flujos de colapso de domos dacíticos localizados dentro y fuera del cráter principal, oleadas piroclásticas, lahares y caídas piroclásticas. La estructura más importante es la falla Cajamarca en dirección NE con movimiento dextral controlando algunos termales de la quebrada San Juan.

Basados en la cartografía 1:100.000 de Mosquera *et al.* (1982), es posible proponer que el posible reservorio esté alojado en el complejo Cajamarca, suponiendo una profundidad de uno y dos kilómetros. Por otro lado, Geoconsul (1992) propone las capas volcánicas inferiores como posible reservorio basados en que el edificio volcánico corresponde a una caldera colapsada. Trabajos como los de Cepeda *et al.* (1995), Rueda (2005) y Thouret *et al.* (1995) reportan edades de hasta 47000 años A. P., con un evento reciente hace 820 años A. P., correspondientes a la formación de las paredes actuales del cráter y la extrusión de los domos intracratericos. La principal estructura presente en la zona es la falla de rumbo de Cajamarca en dirección NE (ficha de geología del reservorio, Anexo 1).

Potencial energético: La estimación del potencial energético se basó en el total de los dos grupos de termales (figura 48), cuya área es de 13.017 Km². El calor almacenado sumó 10.05 EJ y la potencia 129.39 MWe (Ficha Potencial Estimado en Anexo 1). La potencia más elevada es estimada para el grupo CM-01 conformado por los manantiales más calientes, las Estatuas y Puente Tierra con 92.42 MWe de potencia (ficha de potencial, Anexo 1).

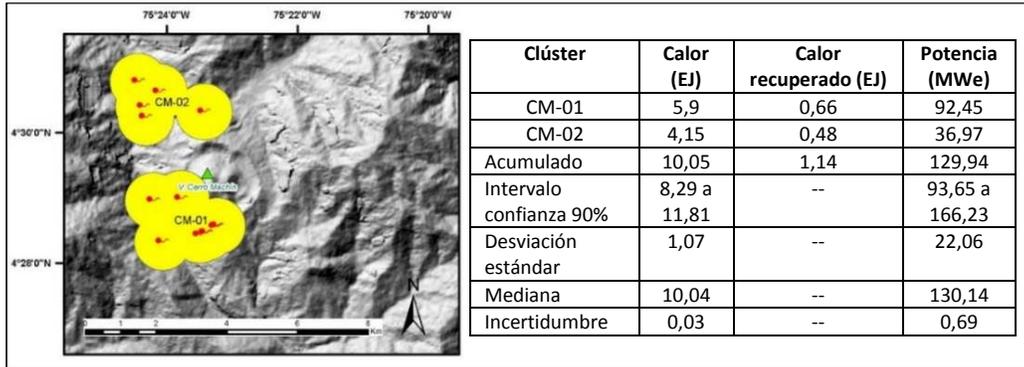


Figura 48. Clústeres tomados como base para el cálculo de potencial y tabla de calor almacenado y potencia eléctrica en el área geotérmica del volcán Cerro Machín

Fuente: autores

3.1.12 Área Geotérmica Volcán del Huila

Localización y generalidades: El área geotérmica se localiza al norte del departamento del Cauca cubriendo una pequeña área de Huila, entre las planchas 321, 322, 343 y 344 a escala 1:100.000 del IGAC. La extensión del polígono propuesto como área geotérmica es de 359.86 km², el cual se superpone con parte de la zona de paramo del Nevado del Huila. La población más cercana es el resguardo de Tóez, Municipio de Páez con una temperatura media entre 12 y 13 °C.

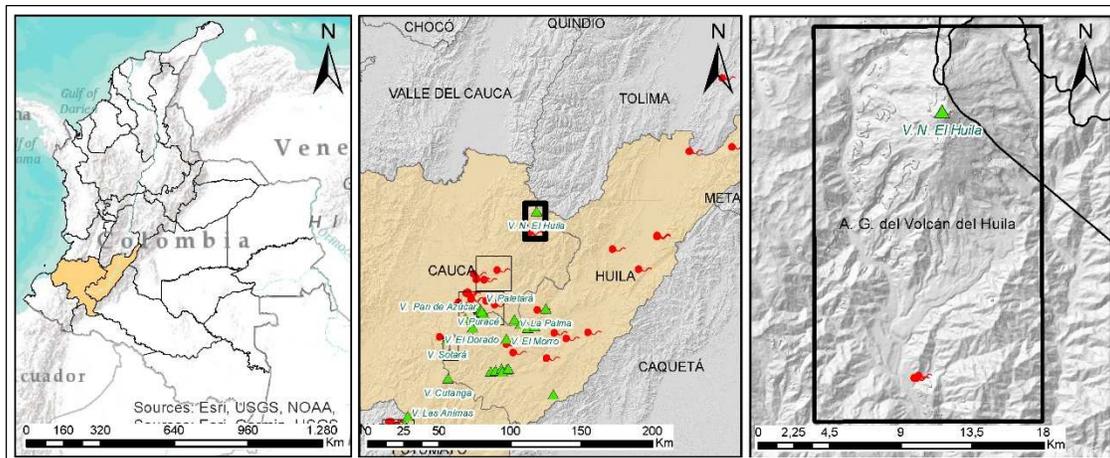


Figura 49. Localización del área geotérmica del volcán del Huila

A) Mapa de Colombia. B) Área geotérmica en los departamentos de Huila, Tolima y Cauca. C) Mapa de manantiales termales dentro del área geotérmica

Fuente: autores

Manantiales termales y geología: En el área geotérmica se localizan cuatro manantiales termales conocidos como Agua Caliente. Los cuatro presentan un pH neutro de entre 6.66 y 7.31 con temperaturas de descarga entre 32.4 y 42.1 °C. La conductividad está entre 724 y 1347 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (ver ficha de geoquímica, Anexo 1). Todos los manantiales afloran a borde de la quebrada Tóez y emergen de los depósitos aluviales que suprayacen el Batolito de la Plata. Justo por donde emergen los manantiales termales se infiere una falla en dirección NE.

Basados en la cartografía de Correa (2009) se puede ver la ocurrencia de las rocas más antiguas del área geotérmica correspondientes al Gneis de Quintero y el complejo metamórfico de Cajamarca. En el sur, el gneis de Quintero lo conforma gneises y esquistos cuarzofeldespáticos micáceos con edad de entre 1268 y 242 Ma (Maya, 1992), mientras que el complejo Cajamarca, al oeste, se expresa con esquistos verdes y negros, cuarzo-micáceos y cuarcitas (Correa, 2009). El batolito de La Plata es la roca que más se expone, después de los productos eruptivos del volcán del Huila. Este batolito corresponde a dioritas, Cuarzodioritas, granodioritas y granitos con diques afaníticos más básicos. Pulgarín (2000) dató este cuerpo obteniendo una edad de 125 ± 3 Ma y de 93.5 Ma para uno de los diques. Al suroccidente se encuentra una secuencia de rocas con ligero metamorfismo compuesta por pizarras, filitas, calizas y meta-areniscas y limolitas (Ingeominas 1995). Correa (2009) describe un pequeño cuerpo al suroeste, que intruye la secuencia sedimentaria, de textura porfirítica y composición andesítica y dacítica con evidencia de alteración hidrotermal. El área está afectada por las fallas NE Moras Oeste, Mora Este y Calambayú así como por la falla SE de Verdún (Arcila y Monsalve, 1996 en Correa, 2009). La geología de los productos eruptivos del volcán Nevado del Huila se detallan en Correa (2009) donde describe a un edificio volcánico compuesto casi por completo por coladas de lava de hasta 200 m compuestas por una matriz afanítica con fenocristales de plagioclasas y algunos anfíboles, así como microfenocristales de piroxenos. En la cima se hallan 4 picos alineados representados por domos de lava. Los productos más recientes hacen referencia a depósitos volcanoclásticos y a los domos en la cima del volcán; se observan avalanchas de escombros por el Río Páez producto de la destrucción de las lavas del estadio Pre-Huila al igual que depósitos de morrena. La composición química de las lavas varía de andesitas a dacitas de afinidad calcoalcalina metaluminosas.

Basados en la cartografía de Correa (2009) se puede asumir como posible reservorio el Batolito de la Plata o batolito de Ibagué (Silverio, 2002) basados en que sirve de basamento a gran parte del edificio volcánico y se encuentra bajo el lugar donde emergen los termales. El complejo Cajamarca se presenta en una porción del área geotérmica, pero dada extensión en otras áreas, no se descarta como posible reservorio. Por otro lado, dada la conformación del volcán, casi en su mayoría por coladas de lava,

estas podrían igualmente alojar el fluido geotérmico (ficha de geología del reservorio, Anexo 1).

Potencial energético: La estimación del potencial energético del área geotérmica del único clúster (figura 50), cuya área es de 2.59 Km², sumó 0.1 MWe con un calor almacenado de 0.76 EJ (ficha de potencial. Anexo 1), conformado por los termales Agua Caliente.

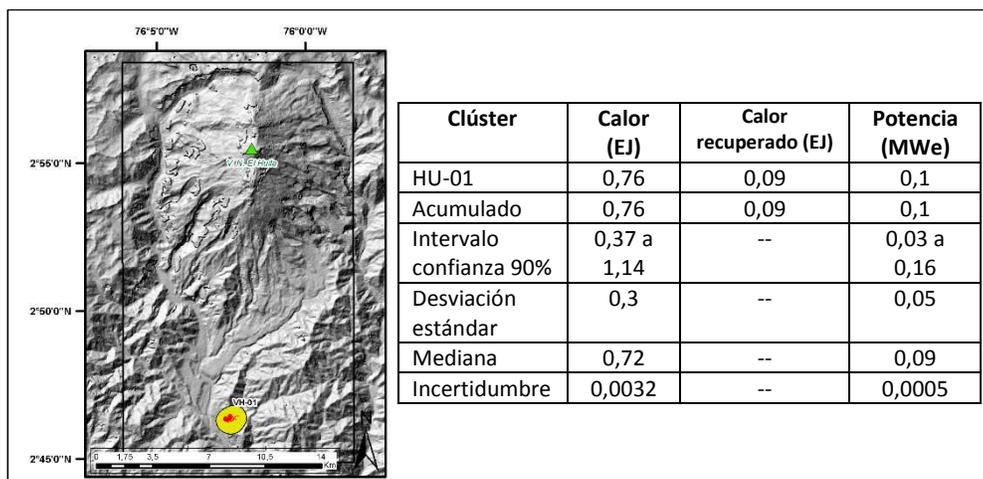


Figura 50. Clústeres tomados como base para el cálculo de potencial y tabla de calor almacenado y potencia eléctrica en el área geotérmica del volcán Nevado del Huila
Fuente: autores

3.1.13 Área Geotérmica de la Caldera Gabriel López

Localización y generalidades: El área geotérmica se localiza en el oriente del departamento de Cauca. Abarca las planchas 343 y 365 del IGAC 343 a escala 1:100.000, con un área es de 602.18 km² con la presencia del PNN de Puracé – Coconucos. Dentro del área geotérmica se localizan las poblaciones Gabriel López y Silvia. La temperatura media de la zona es de 18 °C (figura 51).

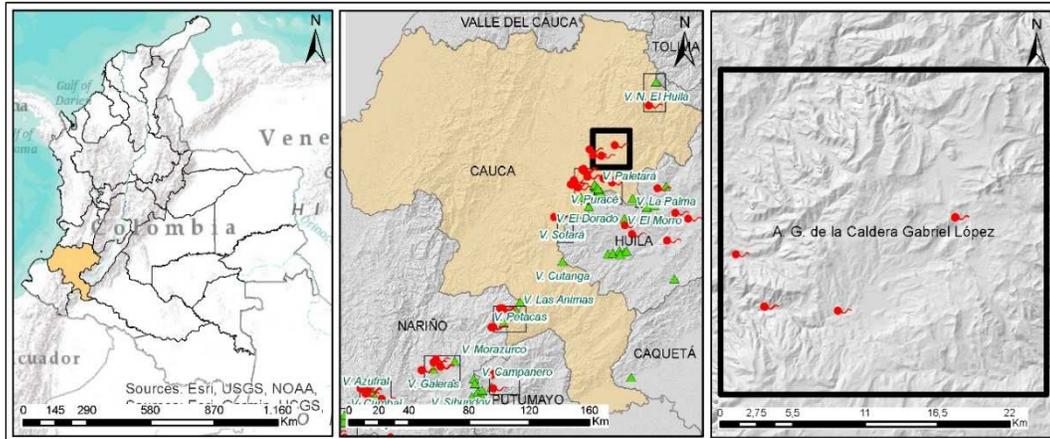


Figura 51. Localización del área geotérmica de la Caldera Gabriel López

A) Mapa de Colombia. B) Área geotérmica en el departamento del Cauca. C) Mapa de manantiales termales dentro del área geotérmica

Fuente: autores

Manantiales termales y geología: un total de 8 termales se distribuyen dentro de la caldera con temperaturas de entre 24 y 53 °C. pH de 6.30 a 7.12 con conductividades bajas de 174 a 514 $\mu\text{S}/\text{cm}$ y altas que van de 68070 a 7220 $\mu\text{S}/\text{cm}$ con un extremo de 11860 para el manantial el Saldado (ficha de geoquímica, Anexo 1). Las aguas se clasifican como bicarbonatadas sódicas y cloruradas. Los termales Chuscales I y II del este emergen de lavas andesíticas cerca de la falla Calambayú. El manantial el Salado, localizado al oeste, emergen de los depósitos aluviales del río Cofre. El grupo de termales de Las Mangas emergen de depósitos piroclásticos y volcanoclásticos en río Palacé, cerca al trazo de la caldera y las fallas San Jerónimo y Moras este. El termal Finca La Trampa localizado al sur emerge igualmente cerca al río Palacé de entre flujos de cenizas y en un sector controlado por la falla Moras Este y algunas otras inferidas en dirección NE y NW.

Al noroccidente del área aflora el complejo quebrada Grande, así como esquistos verdes del complejo Arquía. La geología en su mayoría está dominada por depósitos de flujos de lava del miembro lávico Polindara con espesores de hasta 1200 m de composición andesíticas y fenocristales de plagioclasas, hornblenda y piroxenos, de edad Plioceno (Torres 1997), además de niveles de flujos de ceniza, bloques y caídas. La caldera es atravesada de norte a sur por las fallas Silvia Pijao San Jerónimo, Moras este y Calambayú y, la falla Paso de Bobo en dirección este a oeste.

Aunque el perfil de la cartografía 1:100.000 de Silverio (2002) se localiza fuera del área de estudio, este corta algunas de las formaciones que se encuentran dentro del área geotérmica. Basado en este perfil, se propone que el reservorio esté alojado en el

complejo Cajamarca y gneis de Quintero, así como en las lavas andesíticas del miembro Polindara (ficha de geología del reservorio, Anexo 1).

Potencial geotérmico: La estimación del potencial energético se basó en el total de cuatro clústeres (figura 52), cuyas áreas suman 8 Km². El calor almacenado sumó 5.15 EJ y la potencia 24.78 MWe (Ficha Potencial Estimado en Anexo 1). La potencia más elevada es estimada para el grupo CGL-03 conformado por los termales de Las Mangas 1, 2, 3 y 4 con 10.42 MWe.

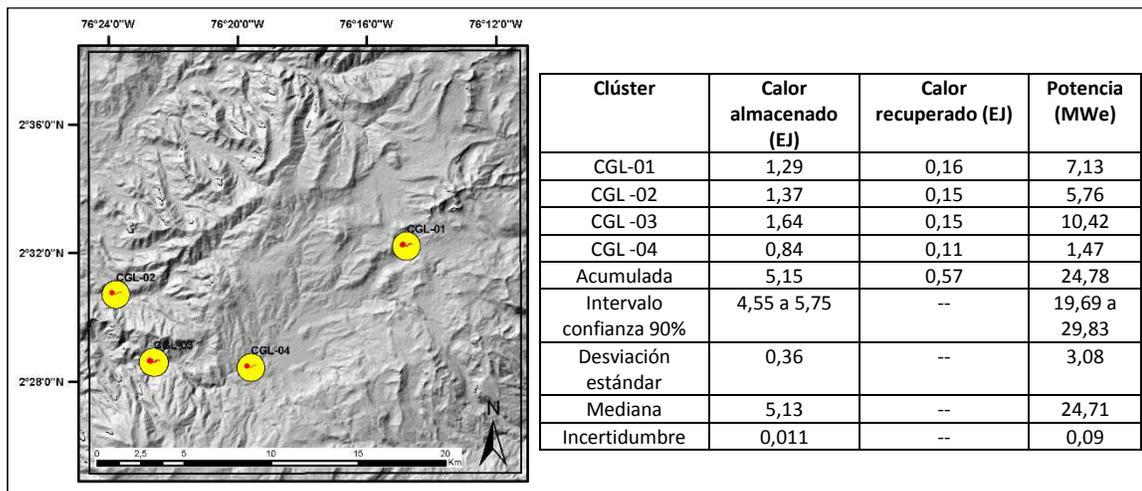


Figura 52. Clústeres tomados como base para el cálculo de potencial y tabla de calor almacenado y potencia eléctrica en el área geotérmica de la Caldera Gabriel López

Fuente: autores

3.1.14 Área Geotérmica de la Caldera del Paletará

Localización y generalidades: El área geotérmica de está localizada en los departamentos del Cauca y del Huila, aunque el edificio volcánico principal hace parte del Cauca, dentro de la plancha 365 a escala 1:100.000 del IGAC (figura 53). La extensión del área geotérmica es de 740.82 km² y parte de ella se superpone con zona de paramo. Su temperatura media, teniendo como referencia la reportada para el municipio de Coconuco está entre 9 y 16 °C.

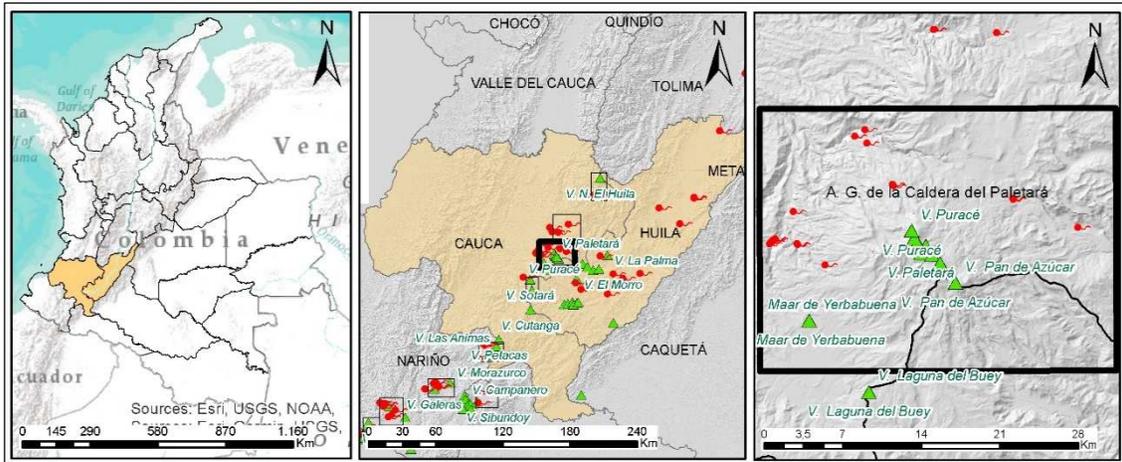


Figura 53. Localización del área geotérmica de la Caldera del Paletará

A) Mapa de Colombia. B) Área geotérmica en los departamentos de Cauca y Huila. C) Mapa de manantiales termales dentro del área geotérmica

Fuente: autores

Manantiales termales y geología: Veintiún termales se distribuyen dentro del área geotérmica en 8 grupos. Los termales del norte representados por Tabío, La Bajada y Guarquelló son termales ácidos con pH de entre 2.24 y 2.54, temperaturas entre 23.2 y 25.4 °C y conductividades de 2902 y 3760 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Estos termales emergen cerca el río San Francisco en lavas andesíticas e ignimbritas, posiblemente asociados a la falla Coconucos. Los termales La Mina, Los Hornos y Pozo Azul presentan también pH ácidos de entre 1.71 a 3.76 con algunos valores altos de 5.2 y 5.4. El manantial Pozo Azul presenta una temperatura de 90 °C, mientras que para termales La Mina y Los Hornos es de 44.6 a 69.5 °C, respectivamente. La conductividad para estos manantiales es de 2610 a 8080 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Los manantiales de Los Hornos y Pozo Azul emergen de las lavas andesíticas del miembro Chagartón, mientras que el de La Mina emerge de lavas andesíticas del Río Shaka y Puracé. El otro grupo de termales (Grupos Aguahirviendo, Laguna Esmeralda, Aguatibia El Salado, San Juan y Versailles) presenta pH más neutros que van entre 4.35 y 8.1 con temperaturas de 30.3 a 74 °C y conductividad de 339 hasta 7690 $\mu\text{S}/\text{cm}$ con valores anómalos altos de 10704 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Los manantiales de Aguahirviendo afloran de depósitos piroclásticos de la caldera de Chagartón, los de Laguna Esmeralda y San Juan emergen de lavas del miembro Shaka, los de Aguatibia El Salado afloran de lavas e ignimbritas y, por último, los termales de Versailles, afloran de lavas del miembro Río Negro cerca al complejo metamórfico de Cajamarca.

Aunque el área geotérmica no abarca la caldera en su totalidad, si encierra los centros eruptivos de la cadena volcánica los Coconucos (figura 54). Las rocas más antiguas corresponden al complejo metamórfico de Cajamarca conformada por esquistos verdes, negros y cuarzo-micáceos. Se encuentra filitas, metalimotlitas y chert, así como esquistos

sericíticos y cuarcitas (Marquínez *et al.*, 2003). Sobre el complejo metamórfico se expone la Formación Popayán y sus miembros Polindara y Chagartón, definido por Monsalve (2000) como lavas de composición andesítica, con un espesor de 100 metros en los ríos Cauca y La Calera, cuyo origen sería la antigua caldera del Paletará, en donde descansarían los flujos de lava intercalados con depósitos piroclásticos de mucho menor espesor, provenientes de la estructura de la caldera de Chagartón (López *et al.*, 2011).

Basados en la cartografía 1:100.000 de Marquínez *et al.* (2003) es posible proponer que el reservorio esté alojado en el complejo Cajamarca. Por otro lado, y dependiendo del espesor, las lavas del grupo Popayán (miembros Polindara y Chagartón) alojarían el reservorio geotérmico (ficha de geología del reservorio, Anexo 1).

Potencial geotérmico: La estimación del potencial se basó en el total de los ocho clústeres (figura 54), con un área total de 20.82 Km². El calor almacenado sumó un total de 14.27 EJ y la potencia 117.52 MWe (ficha de potencial, Anexo 1). La potencia más elevada es estimada para el clúster CP-06 con 24.54 MWe, representado por los termales de Aguatibia El Salado Colorado y Balneario Aguatibia.

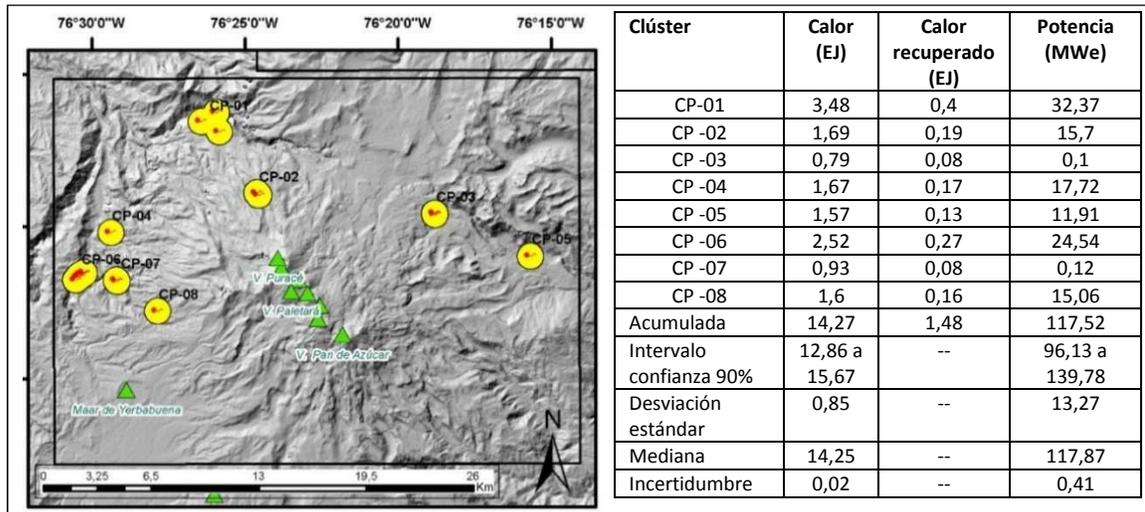


Figura 54. Clústeres tomados como base para el cálculo de potencial y tabla de calor almacenado y potencia eléctrica en el área geotérmica de la Caldera del Paletará
Fuente: autores

3.1.15 Área Geotérmica de los Volcanes de Sotará – Sucubún

Localización y generalidades: El área geotérmica se encuentra ubicada cercana a el municipio de Sotará, en el límite entre los departamentos de Cauca y Huila. Se localiza entre las planchas 364, 365, 487 y 388 a escala 1:100.000 del IGAG (figura 55). Su extensión es de aproximadamente 178 km², y se superpone con el Parque Nacional Puracé, pero no con zona de paramos. La temperatura media del área está entre 13 y 14 °C.

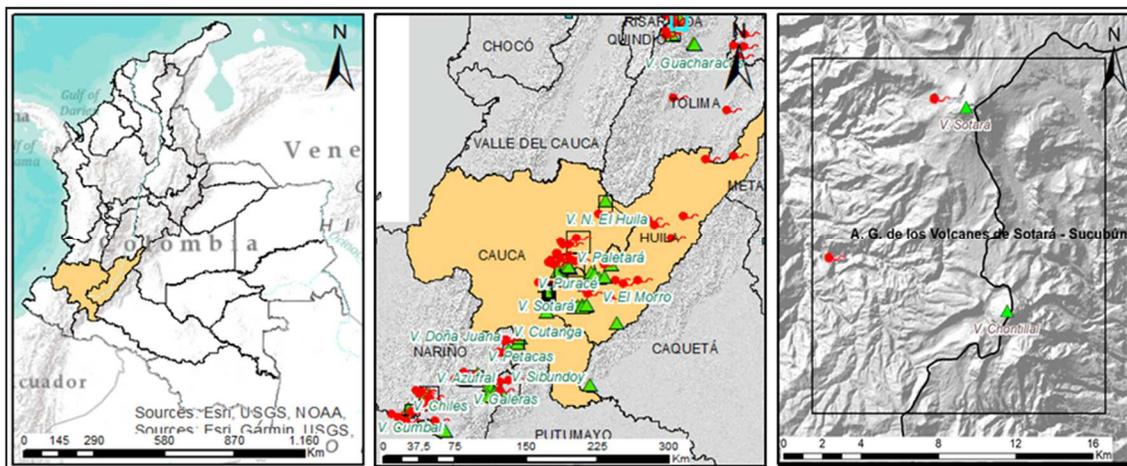


Figura 55. Localización del área geotérmica Sotará – Sucubún

A) Mapa de Colombia. B) Área geotérmica en los departamentos del Cauca y Huila. C) Mapa de manantiales termales dentro del área geotérmica

Fuente: autores

Manantiales termales y geología: El área geotérmica hospeda dos manantiales termales localizados al noreste y sureste del volcán Sotará. La ocurrencia de estos manantiales termales está asociada a los cuerpos de aguas ríos Patía y Cauca. Los manantiales del área presentan pH neutro entre 5.8 y 7.15, una conductividad eléctrica entre 908 $\mu\text{S}/\text{cm}$ y 6586 $\mu\text{S}/\text{cm}$ y temperaturas moderadas entre 33.8 y 42.6 °C. En el sector domina la composición Bicarbonatada (ficha de geoquímica, Anexo 1). Los manantiales emergen sobre cenizas que recubren ignimbritas meteorizadas o flujos de ceniza.

La geología del área geotérmica corresponde a rocas metamórficas, ígneas y sedimentarias que cubren un rango temporal desde el Paleozoico hasta el Neógeno. Sobre todos estos tipos de rocas reposa discordantemente una espesa cubierta volcánica formada en diferentes eventos de actividad de varios centros eruptivos de la Cadena Volcánica de Los Coconucos y también de un vulcanismo básico menos extenso; depósitos no consolidados recientes de tipo fluvial se presentan a lo largo de los

principales ríos y se destaca el fluvio lacustre que conforma el Valle de Laboyos donde está asentada la zona urbana de Pitalito (Cárdenas *et al.*, 2003).

Las formaciones geológicas que se proponen como posible reservorio geotérmico, a partir de la cartografía geológica 1:100.000, corresponde a las formaciones Popayán, Complejo Quebradagrande, Esquistos Mazamorra y el Complejo Arquia. En La formación Popayán se encuentran algunos depósitos de flujo piroclástico de pómez (ignimbritas), depósitos de caída piroclástica y depósitos de lahar correlacionados con la unidad Eruptiva San Pedro-Turupamba. La edad asociada a estos depósitos es Neogeno-Cuaternario, el Complejo Quebradagrande corresponde a un conjunto de rocas volcánicas, volcanoclásticas y sedimentarias, de afinidad oceánica, con evidencias de deformación, y que afloran en el W colombiano, entre las fallas San Jerónimo y Silvia-Pijao (Maya y González, 1995 en Pulgarín *et al.*, 2010), la edad asignada a esta unidad es Valanginiano-Albiano, los esquistos de Mazamorra están conformados por esquistos verdes y negros, esquistos cuarzo-micáceos y cuarcitas; se asume, para esta unidad, una edad del Paleozoico Temprano; basado en la correlación que se hace con el Complejo Cajamarca y el Complejo Arquía, corresponde a un intrusivo de composición granodiorítica, que sufrió metamorfismo dinámico, y se emplazó tectónicamente en el área y que por razones del grado de metamorfismo, presenta tres tipos litológicos: una cuarzo-diorita fracturada y cizallada, que se encuentra principalmente al centro del cuerpo; un neis milonítico que exhibe un buen bandeamiento y un esquisto milonítico que se presenta hacia los bordes del mismo (ficha de geología del reservorio, Anexo 1).

Potencial geotérmico: La estimación del potencial energético se basó en el resultante de la sumatoria de dos grupos de manantiales cuya extensión total es de aproximadamente 4 Km² (figura 56). El calor almacenado sumó 2.82 EJ y la potencia de 17.34 MWe (Ficha Potencial Estimado en Anexo 1).

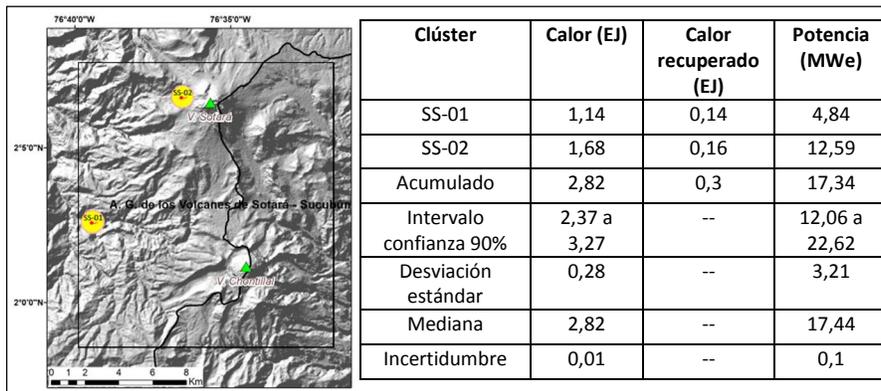


Figura 56. Clústeres tomados como base para el cálculo de potencial y tabla de calor almacenado y potencia eléctrica en el área geotérmica Sotará – Sucubún
Fuente: autores

3.1.16 Área Geotérmica de los Volcanes Doña Juana-Las Ánimas

Localización y generalidades: El área geotérmica de los volcanes Doña Juana- Las Animas se encuentra ubicada en la cordillera Central, en el límite entre los departamentos de Nariño y Cauca. La población más cercana es el municipio de La Cruz, se localiza en la plancha 411 a escala 1:100.000 del IGAG (figura 57). Su extensión es de aproximadamente 378 km². El área geotérmica se superpone con el Parque Nacional Complejo volcánico Doña Juana Cascabel. La zona se superpone con área de paramo Doña Juana Chimayoy. La temperatura media del área es en promedio de 15 °C.

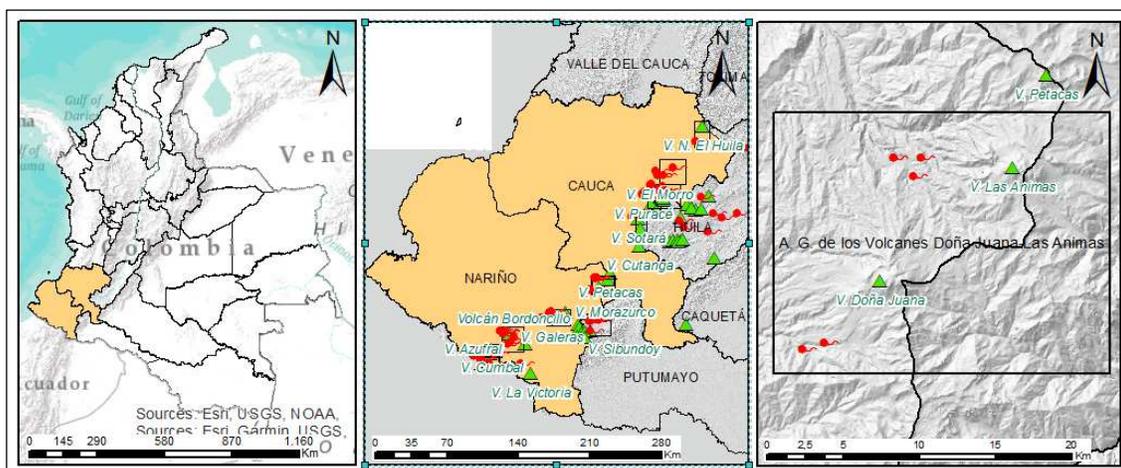


Figura 57. Localización del área geotérmica Doña Juana – Las Animas

A) Mapa de Colombia. B) Área geotérmica en los departamentos de Nariño y Cauca. C) Mapa de manantiales termales dentro del área geotérmica

Fuente: autores

Manantiales termales y geología: El área geotérmica hospeda seis manantiales termales en dos sectores, uno al oeste del volcán Las Animas y el segundo al sureste del volcán Doña Juana, ambos grupos en el departamento de Nariño. La ocurrencia de estos manantiales está asociada a los cuerpos de agua río Tujumbina y Guacatú. Los manantiales del área se caracterizan por tener pH neutro entre 5.8 y 6.7, una conductividad eléctrica baja entre 545 y 2700 $\mu\text{S}/\text{cm}$ y temperatura moderada (entre 31 y 55 °C). En cada sector domina un tipo químico de agua; sulfatado sódico, en los manantiales al suroeste del área y clorurado sódico en el norte del área geotérmica. En el sector suroeste se registran dos manantiales termales. Estos emergen de la Unidad Eruptiva Agua Tibia, descrita por Pulgarín *et al.* (2008), como depósitos de lahar muy antiguos probablemente no asociados al Complejo Volcánico Doña Juana. Estructuralmente este manantial se relaciona a las fallas tipo NE que afectan el basamento en la Formación Quebradagrande y varios pórfidos dacíticos. En el sector

norte se encuentran cuatro manantiales termales, dos de los cuales emergen a través de un depósito de flujo de pómez de la Unidad Eruptiva Tajumbina, en contacto erosivo sobre un depósito aluvial conglomerático. Estructuralmente se relacionan a las fallas tipo NE que afectan el basamento en la Formación Quebradagrande y varios pórfidos dacíticos y dos emergen sobre aluviones en el cauce del río Tajumbina, que corta depósitos de flujos y lodo piroclástico. Estructuralmente estos manantiales se relacionan con las fallas tipo NE que afectan el basamento en la Formación Quebradagrande y varios pórfidos dacíticos (Núñez, 2002).

La geología del área geotérmica de los volcanes Doña Juana - Las Animas afloran rocas del Precámbrico hasta depósitos del Cuaternario que conforman una morfología muy irregular, dominada por grandes sistemas de fallas de dirección NE-SW predominante.

Las formaciones geológicas que se proponen como posible reservorio geotérmico, a partir de la cartografía geológica 1:100.000, estaría conformada por la Formación El Chiflón conformada por dacitas masivas, diaclasadas, localmente columnares, andesitas clinopiroxénicas porfiríticas, rocas masivas, efusivas. El Complejo Quebradagrande, secuencia volcanosedimentaria con intercalaciones de conglomerados matriz soportados, arenitas y limolitas verdes, flujos volcánicos básicos y tobas, y las rocas metamórficas de Pompeya con alteración sericítica alrededor de las venillas, y clorita y epidota, como alteración propílica.

Potencial geotérmico: La estimación del potencial energético se basó en la sumatoria de los valores calculados para tres grupos de manantiales cuya extensión total es de aproximadamente 9.8 Km² (figura 56). El calor almacenado sumó 5.30 EJ y la potencia de 37.84 MWe (Ficha de potencial, Anexo 1). La potencia eléctrica más elevada es estimada para el grupo DJA-02 conformado por los manantiales Ánimas y Churos (19.76 MWe).

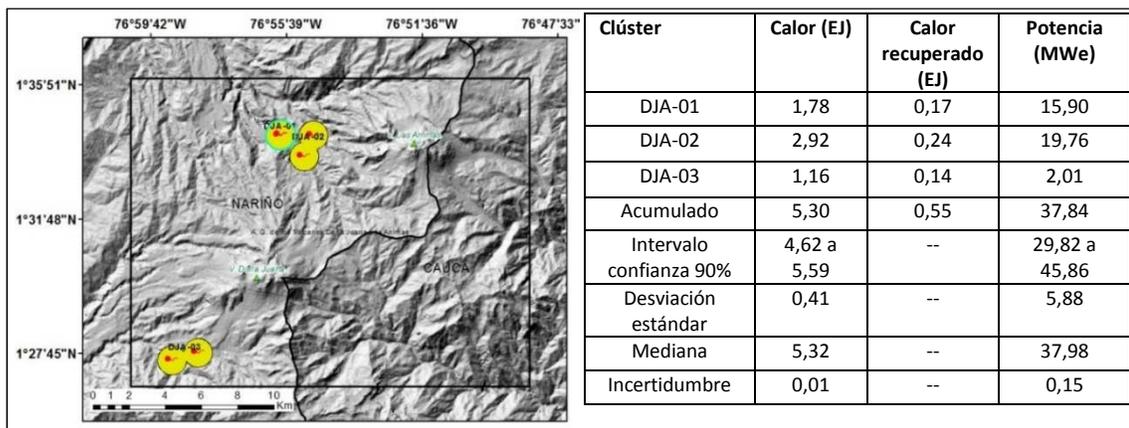


Figura 58. Clústeres tomados como base para el cálculo de potencial y tabla de calor almacenado y potencia eléctrica en el área geotérmica Doña Juana – Las Animas
Fuente: autores

3.1.17 Área Geotérmica de los Volcanes Galeras-Morazurco

Localización y generalidades: El área geotérmica de los volcanes Galeras – Morazurco se encuentra ubicada en la cordillera Central, en departamento de Nariño, se localiza en las planchas 429 a escala 1:100.000 del IGAG (figura 59). Su extensión es de aproximadamente 381 km². La población más cercana es la ciudad de Pasto con una temperatura promedio de 14 °C.

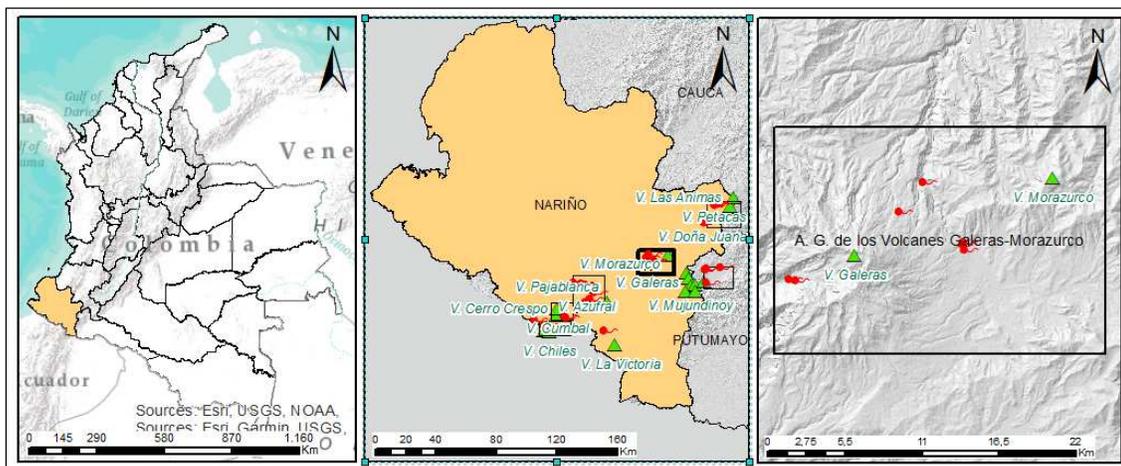


Figura 59. Localización del área geotérmica Galeras – Morazurco
A) Mapa de Colombia. B) Área geotérmica en el departamento de Nariño. C) Mapa de manantiales termales dentro del área Geotérmica
Fuente: autores

Manantiales termales y geología: El área geotérmica hospeda ocho manantiales termales localizados en cuatro sectores, uno al oeste del volcán Galeras y tres entre los volcanes Galeras y Morasurco. La ocurrencia de estos manantiales está asociada a los cuerpos de agua Rio Pasto y Rio Azufral. Presentan pH ácidos y neutros entre 2.6 y 7.4, conductividades eléctricas bajas entre 1510 a 3320 $\mu\text{S}/\text{cm}$ y temperaturas moderadas entre 20.5 y 42.0 °C. En esta área geotérmica, dominan los manantiales termales de composición bicarbonatada, sulfatada y mezclas entre aguas bicarbonatadas y sulfatadas (ver ficha de geoquímica, Anexo 1). En el sector Oeste del volcán Galeras se registran dos manantiales termales, clúster GM-04. Estos manantiales termales emergen en el anillo de colapso al oeste del edificio volcánico y se pueden asociar a estructuras en dirección NE en los flancos del volcán. En el área ubicada entre los volcanes Galeras y Morasurco con se encuentran seis manantiales termales. Un manantial ubicado al norte del centro del área clúster GM-01 emerge de lahares y lavas asociados al Complejo Volcánico de Galeras. La emergencia de este manantial parece estar asociada a la zona de fracturación del tipo NE (Falla Buesaco perteneciente al Sistema de Falla Romeral, a la falla Pasto al sur). Un manantial se ubica en el centro del área (clúster GM-02), emerge de lavas intercaladas con flujos de caída de cenizas indiferenciadas posiblemente asociadas a la zona de fracturación en dirección NE (Falla Buesaco perteneciente al Sistema de Falla Romeral). Cuatro manantiales ubicados al sur este del centro del área clúster GM-03, los cuales emergen sobre coluviones y aluviones cuaternarios alternados con vulcanitas terciarias a cuaternarias.

Las formaciones geológicas que se proponen como posible reservorio, a partir de la cartografía geológica 1:100.000, estaría conformada por avalanchas ardientes y de escombros, presentes principalmente en los valles de los ríos Guáitara y Azufral, y en el Cerro Caballo Rucio; son rocas compuestas principalmente por fragmentos de material formado en el momento de la explosión o de fragmentos de un domo o lava que se colapsó. Las lavas que afloran especialmente en el área del complejo volcánico de Galeras, se tratan principalmente de flujos máficos de forma tabular, lavas aa y lavas en bloques; generalmente se hallan intercalados con otros materiales volcánicos; son rocas porfiríticas, con fenocristales que rara vez sobrepasan los 2 mm en su mayor diámetro y que presentan evidentes texturas de flujo y el Grupo Diabásico, que hace parte del basamento de volcán Galeras y aflora en los ríos El Barranco y Chacaguaico. Está compuesto principalmente por metadiabasas y metabasaltos, algunos almohadillados o amigdalares, y en menor proporción por matapiroclastitas y por metasedimentitas; la plagioclasa y el clinopiroxeno son los principales constituyentes minerales de las metabasitas, incluidas las metapiroclastitas.

Potencial geotérmico: La estimación del potencial energético se basó en el resultante de la sumatoria de los valores para cuatro clústeres de manantiales (figura 60) cuya extensión total es de aproximadamente 9.8 Km^2 . El calor almacenado sumó 4.87 EJ y la

potencia de 29.49 MWe (Ficha de potencial, Anexo 1). La potencia eléctrica más elevada se estima para el clúster GM-01 conformado por un manantial (24.01 MWe).

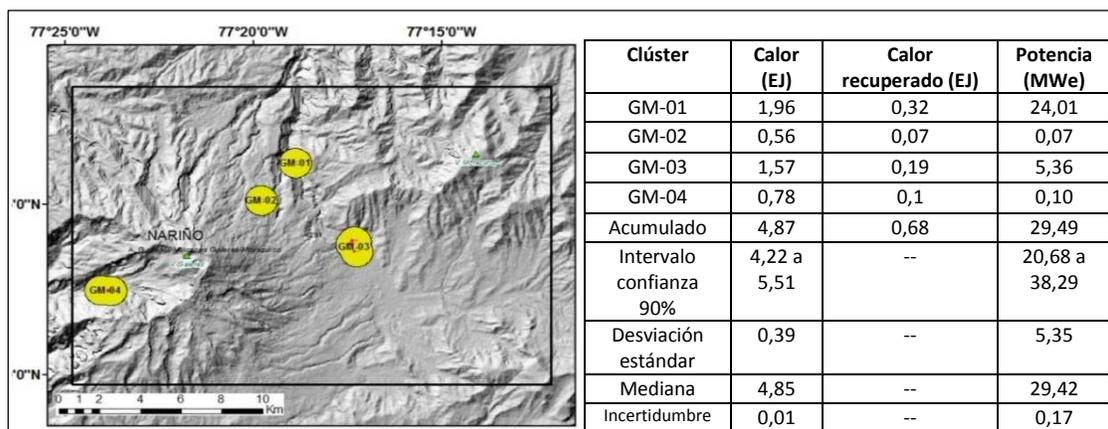


Figura 60. Clústeres tomados como base para el cálculo de potencial y tabla de calor almacenado y potencia eléctrica en el área geotérmica Galeras – Morasurco
Fuente: autores

3.1.18 Área Geotérmica del Volcán de Sibundoy

Localización y generalidades: El valle del Sibundoy, ubicado en el departamento del Putumayo al suroccidente de Colombia, hospeda un sistema geotérmico con una extensión aproximada de 282 Km² relacionado con el volcán de Sibundoy (figura 61). Esta área geotérmica abarca jurisdicciones de los municipios de Colón, Sibundoy, Santiago, San Francisco y San Andrés, cuyas temperaturas medias esta entre 16 a 19 °C. Esta área geotérmica, hace parte de la plancha 430 Mocoa a escala 1:100.000 del IGAC.

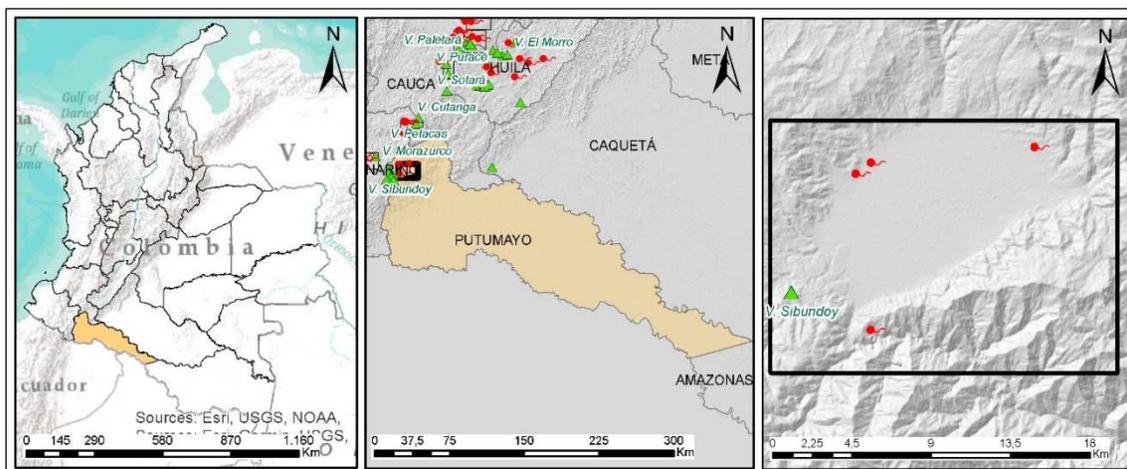


Figura 61. Localización del área geotérmica del volcán Sibundoy

A) Mapa de Colombia. B) Área geotérmica en el departamento del Putumayo. C) Mapa de manantiales termales dentro del área Geotérmica

Fuente: autores

Manantiales termales y geología: El área geotérmica de Sibundoy hospeda cuatro manantiales termales localizados en 3 sectores principales alrededor del Valle del Sibundoy y del volcán del mismo nombre (ver Ficha Geoquímica en Anexo 1). La ocurrencia de estos manantiales termales está asociada a los afluentes que llegan al Río San Pedro y Putumayo. En cada uno de estos sectores domina un tipo químico de agua; sulfatada sódica para los manantiales de Sibundoy; bicarbonatada sódica en los manantiales de la Josefina y clorurada sódica en los Baños de Colón y Balsayaco. Los manantiales de esta área geotérmica se caracterizan por tener pH entre 7 y 9.1, una conductividad eléctrica baja a moderada (entre 196 y 3095 $\mu\text{S}/\text{cm}$) y temperaturas moderadas a altas (entre 25 y 77 °C). Los manantiales de Baños de Colón y La Josefina, emergen entre depósitos caóticos con bloques y fragmentos de diferentes tamaños y composición con abundancia de matriz arcillosa y lodosa. El manantial de Sibundoy se encuentra en el abanico y depósitos fluviolacustres de Sibundoy constituidos por bloques, gravas, arenas y lodos. El manantial de Balsayaco emerge entre la secuencia volcanosedimentaria de la formación Saldaña.

Esta área geotérmica hace parte de la plancha cartográfica 430 Mocoa, en la que afloran rocas del Proterozoico hasta depósitos cuaternarios. Las rocas precámbricas están caracterizadas por el Complejo Migmatítico La Cocha- Río Téllez, que aflora al norte del Valle de Sibundoy, compuesto por un conjunto de rocas metamórficas principalmente migmatitas, neises y anfibolitas con textura generalmente néisica y esquistosa (Núñez, 2003) que han sufrido un metamorfismo regional desde la facies de esquistos verdes, con un protolito ígneo de composición granodiorítica y sedimentario pelítico para la mayoría de los neises. En la zona, el contacto entre el Complejo Migmatítico La Cocha

Rio Tellez y la cuarzomonzodiorita Sombrerillos es tectónico, aunque en algunos sectores parece ser de tipo intrusivo (Núñez, 2003). Las rocas Triásicas - Jurásicas están representadas por la formación Saldaña, de carácter volcanosedimentario y por los cuerpos intrusivos cuarzomonzodiorita Sombrerillos y monzogranito Mocoa. La formación Saldaña es descrita como un conjunto de rocas volcánicas de textura porfirítica a afanítica conformadas por tobas y flujos de lavas, con frecuencia se encuentran ignimbritas e intercalaciones de lodolitas y arenitas (Núñez, 2003). La complejidad tectónica del área y la ausencia de niveles guía, impiden estimar con certeza un espesor, sin embargo, se obtuvo un espesor de 1700 m entre los ríos Mandiyaco y Fragua (Núñez, 2003). El monzogranito de Mocoa presenta variaciones a granito, granodiorita, cuarzodiorita el cual se extiende al oriente del Sistema de Fallas de Algeciras, que en el área está representada por la falla San Francisco – Yunguillo. El Cretácico está representado por las Formaciones Caballos y Villeta en el flanco este de la Cordillera Central.

La actividad volcánica se inició en el Mioceno hasta la actualidad y se ha relacionado con depósitos volcánicos como lavas, piroclastos y lahares. Los depósitos piroclásticos de flujo y caída presentan un avanzado grado de meteorización, algunos tienen una composición riolítica, con abundantes fragmentos de pómez y líticos oxidados, principalmente dacitas (Núñez, 2003). Las lavas son de principalmente andesitas de textura afanítica a porfirítica, con fenocristales de plagioclasa y tiene como accesorios hornblenda y piroxenos, ocasionalmente biotita. Se han reportado espesores mayores a 1000 m y edades del inicio de la actividad volcánica en la zona desde el Mioceno hasta la actualidad (Núñez, 2003). El Valle de Sibundoy tiene una forma romboidal de área aproximada de 100 km², se trata de una cuenca de origen tectónico generada por el Sistema de fallas de Algeciras, que en el sector está representado por la falla Francisco-Yunguillo. En este valle encuentra el volcán del Sibundoy, identificado fotogeológicamente por Buchelli (1986). Este volcán se emplaza sobre el flanco suroccidental del valle del Sibundoy, al noroeste del departamento de Putumayo (Roberson *et al.*, 2002). El volcán se ubica en el Alto de Muchibioy, al sur de la población de Santiago. Buchelli (1986) caracterizó la unidad S (lavas andesíticas afanítica) de edad entre el Paleógeno – Neógeno, en donde se encuentran dos centros eruptivos llamados S1 el más antiguo y S2 el más joven. La presencia de Geoformas bien conservadas y derrames lávicos en abanicos hacen suponer edades recientes (posiblemente holocénicas) (Buchelli, 1986).

Las formaciones geológicas propuestas como posibles reservorios geotérmicos del área del Sibundoy fueron inferidas a partir de cortes geológicos esquemáticos de la plancha 430 Mocoa a escala 1:100.000 (Ficha geología de reservorio, Anexo 1). El reservorio podría estar hospedado en rocas de permeabilidad secundaria ígneas o metamórficas del Monzogranito de Mocoa, o del Complejo Migmatítico La Cocha Rio Tellez

respectivamente. Es posible, además, que se encuentre en rocas volcanosedimentarias de la formación Saldaña o en niveles más someros entre las lavas y piroclastos del área.

Potencial geotérmico: La estimación del potencial energético se basó en la sumatoria para tres grupos de manantiales cuya extensión total es de 7.6 Km² (figura 62). El calor almacenado sumó 3.09 EJ y la potencia de 9.18 MWe (Ficha Potencial Estimado en Anexo 1). La potencia eléctrica más elevada es estimada para el grupo SB-03 conformado por el manantial termal de Sibundoy (9,01 MWe).

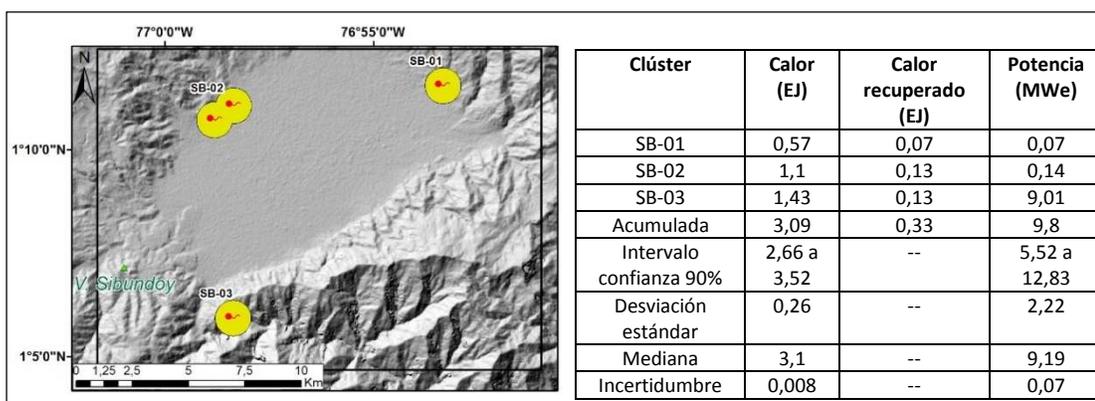


Figura 62. Clústeres tomados como base para el cálculo de potencial y tabla de calor almacenado y potencia eléctrica en el área geotérmica de Sibundoy

Fuente: autores

3.1.19 Área Geotérmica del Volcán Azufral

Localización y generalidades: Esta área geotérmica se encuentra ubicada al sur occidente de Colombia en el departamento de Nariño (figura 63). Cartográficamente, el área, con extensión de 500 Km², hace parte de la zona suroeste de la plancha 428 Túquerres y en menor proporción, a la 447 Ipiales, a escalas 1: 100.000 del IGAC. Esta área geotérmica abarca los municipios de Túquerres, Colimba, Sapuyes, Santander, Mallamues y Guachucal, en los que la temperatura media está entre 5 °C a 15 °C. El área de estudio cubre parte de Páramo Chiles - Cumbal.

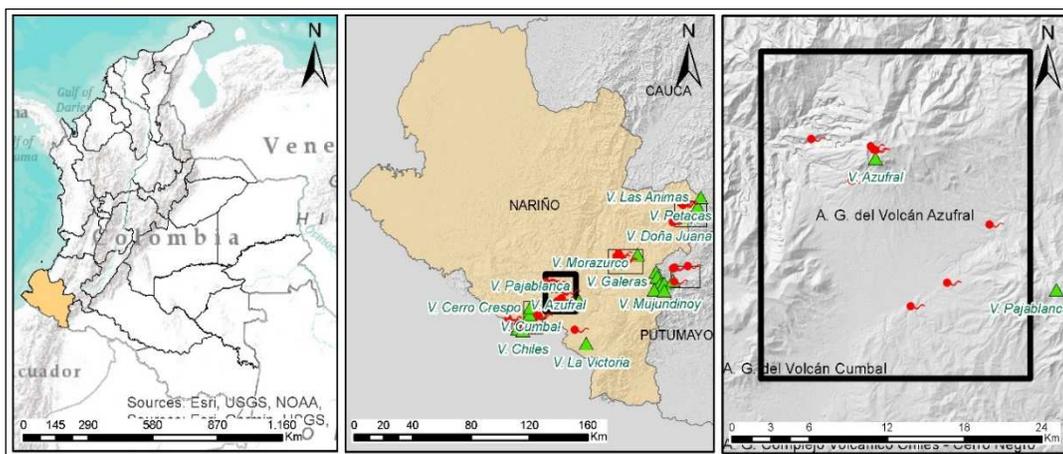


Figura 63. Localización del área geotérmica del Azufral

A) Mapa de Colombia. B) Área geotérmica en el departamento de Nariño. C) Mapa de manantiales termales dentro del área Geotérmica

Fuente: autores

Manantiales termales y geología: El área geotérmica tiene zonas de descargas conformadas por una fumarola y ocho manantiales termales localizados en tres sectores principales. Al interior del cráter, se encuentran la fumarola conocida como la Azufrera; esta es de baja presión y temperatura alrededor de 85 °C (Alfaro *et al.*, 2013), así como tres manantiales conocidos como Laguna Verde, dos de estos manantiales se caracterizan por presentar un pH 2.4 y composición sulfatada sódica cálcica, mientras que uno de ellos es bicarbonatado sódico con pH de 6.8. Los manantiales de Laguna Verde surgen en el borde de la laguna intracaldérica entre cenizas y lavas andesíticas alteradas, relacionadas con el emplazamiento del complejo de domos. Al oeste y sur del edificio volcánico se encuentran los manantiales de Tercán y Chimangual, respectivamente; son aguas con pH de 6.4 a 6.5 y de composición clorurada sódica magnésica, para el manantial de Tercán, y clorurada sódica para el de Chimangual.

La ocurrencia de los manantiales termales Tercán y Chimangual está asociada a las quebradas El Baño y Blanca, respectivamente. La emanación de estos manantiales se da entre depósitos de flujo y oleadas piroclásticas del volcán Azufral, asociada posiblemente a la influencia de la falla Cali - Patía. El tercer sector principal de descarga se encuentra a lo largo del trazo de la falla Guachucal, donde se encuentran los manantiales, de pH entre 6.4 y 6.7, de La Cabaña, San Ramón y el Salado de Malaver, que surgen entre piroclastos no consolidados, de oleadas y de caída. Los manantiales de La Cabaña y San Ramón con una conductividad eléctrica de 209 $\mu\text{S}/\text{cm}$ y 2993 $\mu\text{S}/\text{cm}$, respectivamente, tienen una composición bicarbonatada magnésica sódica y bicarbonatada sódica, respectivamente, mientras que el salado de Malaver es clorurado sódico con una conductividad eléctrica de 8091 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Estudios geoquímicos sugieren que los termales

de Malaber y San Ramón tienen patrones de composición semejantes con mayor dilución en los de San Ramón (Alfaro *et al.*, 2013) (ficha geoquímica, Anexo 1).

En el suroccidente colombiano la Cordillera Occidental está conformada principalmente por rocas cretácicas del Grupo Diabásico, conformado por rocas volcánicas de afinidad oceánica, que presentan intercalaciones locales con las metasedimentitas del Grupo Dagua constituyendo el basamento de los volcanes recientes del área (González *et al.*, 2002). En el departamento del Valle del Cauca han obtenido edades de 94.7 ± 6.4 Ma y 91.7 ± 2.7 Ma y mediante información fosilífera en rocas sedimentarias en este grupo y en el Dagua, se evidenció que la sedimentación ocurrió entre el Tutoniano y el Maastrichtiano (Nivia, 1997 en González *et al.*, 2002). El área geotérmica del Azufral involucra al volcán del mismo nombre, estratovolcán con desarrollo calderico construido sobre antiguos edificios volcánicos, ubicado al norte de la caldera actual (Bechon y Monsalve, 1991; Fontaine, 1994). El volcán Azufral es considerado activo teniendo en cuenta los depósitos de edades recientes entre 17500 a 2800 años AP (Bechon y Monsalve, 1991; Fontaine, 1994), actividad fumarólica y manantiales termales. Este volcán presenta un comportamiento efusivo en sus primeras etapas de actividad y altamente explosivo en las más recientes. La actividad explosiva se relacionaría con el emplazamiento de once cuerpos dómicos, agrupados en cuatro generaciones (Fontaine, 1994). Las primeras erupciones fueron de composición andesítico y las más recientes riodacíticos (Fontaine, 1994). Las lavas en el área se agrupan en antiguas y recientes de composición andesítica. Olade (1982) dató un flujo de lavas antiguas al este del volcán Azufral, obteniendo una edad de 4.2 Ma, interpretada como el inicio de la construcción del edificio volcánico. Las lavas recientes del Azufral, fueron datadas por Bechon y Monsalve (1991) registrando una edad de 0.58 Ma. Fontaine (1994) definió las vulcanitas como depósitos flujo andesíticos y depósitos riodacíticos; los primeros son agrupados por este autor como flujos de lava, lahares y flujos piroclásticos, mientras que los segundos los dividió en once unidades, con edades entre 17970 a 2880 AP.

Las formaciones geológicas propuestas como posibles reservorios geotérmicos del área del volcán Azufral, fueron inferidas a partir de cortes geológicos esquemáticos de la plancha 428 Túquerres a escala 1:100.000 y trabajos detallados con cortes a escalas 1:25.000 (ficha geología de reservorio, Anexo 1). El reservorio podría estar hospedado en rocas de permeabilidad secundaria volcanosedimentarias del Grupo Diabásico, así como en lavas andesíticas por rocas piroclásticas. Olade (1982) propone como potencial reservorio del área geotérmica del Azufral, secuencia de lavas andesíticas o depósitos volcanosedimentarios con alteración propilítica.

Potencial geotérmico: La estimación del potencial energético se basó en la suma resultante de seis (6) grupos de manantiales cuya extensión total es de 12.8 Km^2 (figura 64). El calor almacenado sumó 9.65 EJ y la potencia de 81.91 MWe (Ficha de potencial,

Anexo 1). La potencia eléctrica más elevada es estimada para el grupo AZ-02 conformado por los tres manantiales de la Laguna Verde (20.07 MWe).

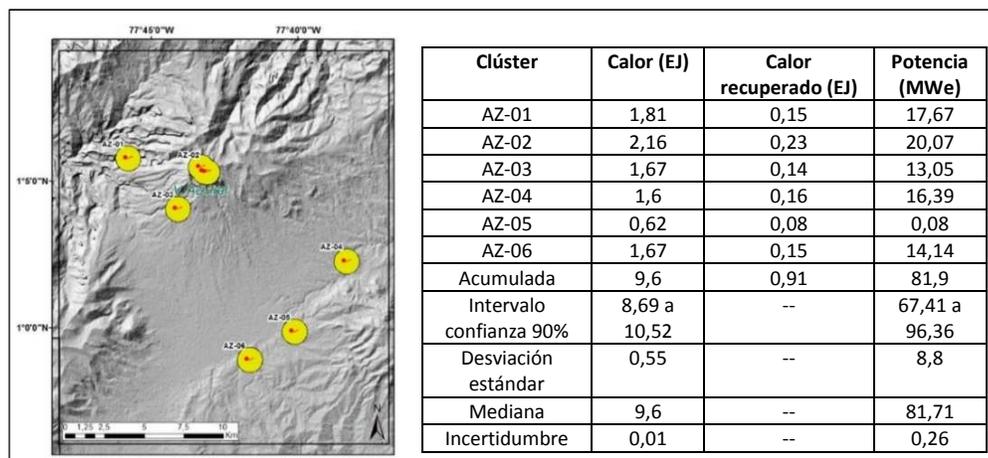


Figura 64. Clústeres tomados como base para el cálculo de potencial y tabla de calor almacenado y potencia eléctrica en el área geotérmica del volcán Azufral
Fuente: autores

3.1.20 Área Geotérmica del Volcán Cumbal

Localización y generalidades: Esta área geotérmica se encuentra ubicada al sur occidente de Colombia en el departamento de Nariño (figura 65). Cartográficamente, hace parte de la zona norte de la plancha 447 Ipiales y en menor proporción a la 428 Túquerres, a escala 1:100.000 del IGAC, con una extensión de 175 Km². La población más cerca es el municipio de Cumbal, con una temperatura media de 11 °C. El área de estudio cubre parte de Páramo Chiles - Cumbal.

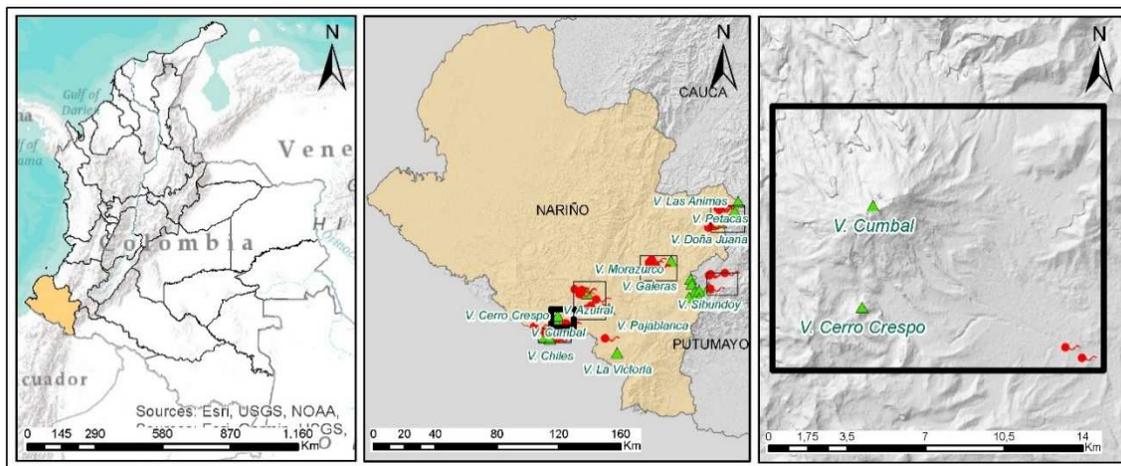


Figura 65. Localización del área geotérmica del volcán Cumbal

A) Mapa de Colombia. B) Área geotérmica en el departamento de Nariño C) Mapa de manantiales termales dentro del área Geotérmica

Fuente: autores

Manantiales termales y geología: Esta área geotérmica hospeda dos manantiales termales, ubicados al sureste del volcán Cumbal (Ficha geoquímica, Anexo 1). La ocurrencia de estos manantiales termales está asociada a los cuerpos de agua del río Blanco. Estos manantiales son de tipo bicarbonatada sulfatada sódica magnésica (manantial Casateja) y sulfatada bicarbonatada sódica magnésica (Piscina Cuetial). Los manantiales de esta área geotérmica se caracterizan por tener pH neutro (entre 6.2 a 6.3), una conductividad eléctrica entre 2450 a 3100 $\mu\text{S}/\text{cm}$ y temperaturas moderadas (entre 27 a 31 $^{\circ}\text{C}$). El manantial de Casateja surge entre depósitos aluviales de gravas, arenas y limos, mientras que el manantial Piscina Cuetial, lo hace entre lavas andesíticas de textura porfídica del Cerro Crespo - Nasate.

Las rocas más antiguas afloran al oeste del área geotérmica y pertenecen a los grupos Dagua y Diabásico, conformados por rocas volcanosedimentarias y por basaltos y diabasas, respectivamente. Las diabasas y basaltos del Grupo Diabásico muestran un estado temprano de la evolución de un arco de isla, formado a partir de una corteza oceánica preexistente (Barrero, 1979 en Velásquez y Parra, 2002). Las edades reportadas se han basado en dataciones paleontológicas ubicando a la unidad en el Coniaciano inferior (Nelson, 1962 en Velásquez y Parra, 2002) y Campaniano-Maastrichtiano en fósiles reportados por Nivia (2001). Las unidades geológicas más recientes corresponden a lavas y depósitos asociados a los focos volcánicos del área. Las lavas de Cumbal Antiguo afloran al oeste del área, son rocas con edad estimada de 4.6 Ma de composición andesítica. Estas lavas forman la estructura de Cumbal Antiguo, que incluye la laguna del Cumbal. Es una estructura con una abertura hacia el occidente y bordes caldericos (Velásquez y Parra, 2002). Al sur oeste del área afloran algunas lavas brechosas

andesíticas de matriz vítrea. La mayor parte del área está cubierta por lavas andesíticas del Cumbal moderno, así como por depósitos de origen glacial que se conservan sobre el eje de los volcanes Chiles – Cumbal (Velásquez y Parra, 2002). El Cumbal moderno se desarrolló en tres etapas; la primera entre 194.000 y 176.000 años A.P., la segunda hace 100.000 hasta 50.000 años y la más reciente tendría una edad entre 25.000 y 15.000 años A. P. (Gorman, 1997 en Velásquez y Parra, 2002). El edificio volcánico principal se destruyó en un evento que ocurrió hace más de 20.000 años, este colapso acompañado de bajas concentraciones de gases formó un depósito de flujo de escombros de tipo volcánico conocido como flujo de escombros de Chiles compuestos por bloques y cantos en matriz arenosa. En el área también hay depósitos de morrenas laterales, terminales y de fondo, así como depósitos fluvio-glaciares en las zonas más bajas (Velásquez y Parra, 2002).

Las formaciones geológicas propuestas como posibles reservorios geotérmicos del área del Cumbal fueron inferidas a partir de cortes geológicos esquemáticos de la plancha 447 Ipiales a escala 1:100.000 (ficha geología del reservorio, Anexo 1). El reservorio podría estar hospedado en rocas de permeabilidad secundaria volcanosedimentarias del Grupo Diabásico. Es posible, además, que se encuentre en lavas andesíticas o en las vulcanitas. Según OLADE (1982) en el área se pueden desarrollar acuíferos relacionados con el reservorio en el interior de la secuencia volcánica o volcanosedimentaria.

Potencial geotérmico: La estimación del potencial energético se basó en el resultante para un grupo de manantiales cuya extensión total es de 3.3 Km² (figura 66). El calor almacenado sumó 2.56 EJ y la potencia de 15.66 MWe (ficha potencial, Anexo 1).

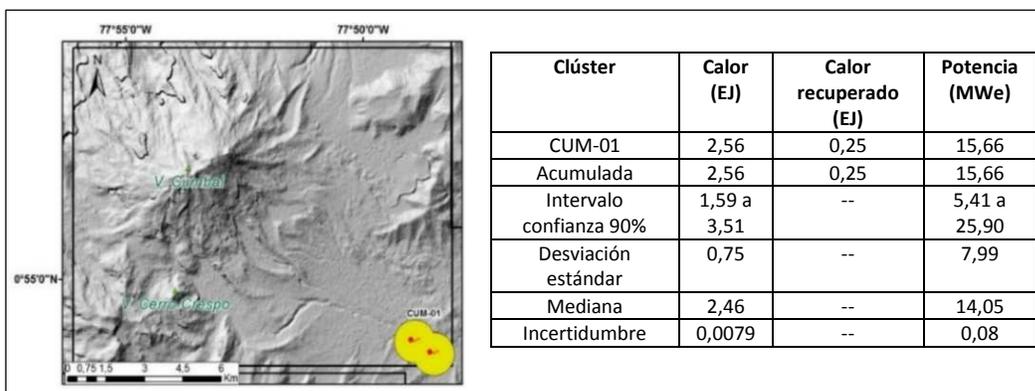


Figura 66. Plústeres tomados como base para el cálculo de potencial y tabla de calor almacenado y potencia eléctrica en el área geotérmica del volcán Cumbal

Fuente: autores

3.1.21 Área Geotérmica del Complejo Volcánico Chiles - Cerro Negro

Localización y generalidades: Esta área geotérmica se encuentra ubicada al sur occidente de Colombia en límites con Ecuador (figura 67). El volcán Chiles Cerro Negro hace parte de la provincia de Carchi (Ecuador) y Nariño (Colombia). Cartográficamente, hace parte de la zona sur de la plancha 447 Ipiales a escala 1: 100.000 del IGAC, con una extensión de 200 Km². La población más cerca es el municipio de Chiles, con una temperatura media de 10 °C. El área de estudio cubre parte de Páramo Chiles Cumbal.

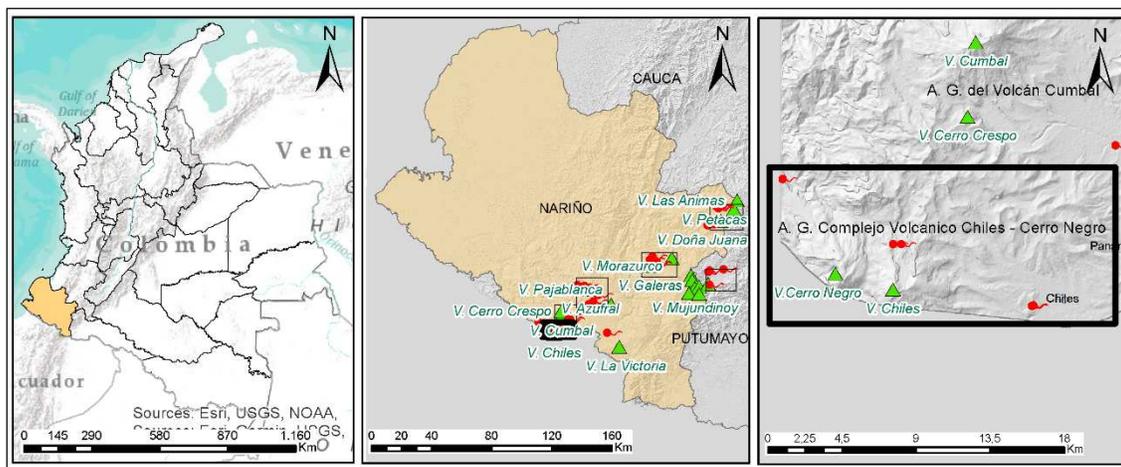


Figura 67. Localización de área geotérmica Chiles- Cerro Negro

A) Mapa de Colombia. B) Área geotérmica en el departamento de Nariño C) Mapa de manantiales
termales dentro del área Geotérmica

Fuente: autores

Manantiales termales y geología: El área geotérmica del Complejo Volcánico Chiles-Cerro Negro hospeda cinco manantiales termales en tres sectores principales alrededor del foco volcánico. La ocurrencia de estos manantiales termales está asociada a los cuerpos de agua de los ríos Blanco y Carchi. En cada uno de estos sectores domina un tipo químico de agua; Bicarbonatada sódica en el termal del río; sulfatada cálcica para los manantiales del rio Blanco; bicarbonatada sódica magnésica y sulfatada sódica magnésica en los manantiales de los Baños de Chiles. Los manantiales de esta área geotérmica se caracterizan por tener pH entre 5.3 y 7, una conductividad eléctrica entre 1117 y 3110 $\mu\text{S}/\text{cm}$ y temperaturas moderadas (entre 20 y 42 °C) (ficha geoquímica. Anexo 1). El Termal del Río surge entre depósitos piroclásticos de obsidiana, pómez y ceniza parcialmente soldados, mientras que los manantiales del Rio Blanco y los Baños de Chiles lo hacen entre los flujos de escombros del Chiles.

Las rocas más antiguas de la zona afloran al noroeste del área geotérmica del Complejo Volcánico Chiles- Cerro Negro. Son rocas Cretácicas que pertenecen a los grupos Dagua y Diabásico, conformados por rocas volcanosedimentarias el primero, y por basaltos y diabasas el segundo (Velásquez y Parra, 2002). Las unidades geológicas aflorantes de mayor extensión en el área geotérmica corresponden a lavas y depósitos asociados a los focos volcánicos del área (ver ficha de Geología). Las lavas en el área geotérmica están agrupadas por edades del edificio volcánico; en el edificio Pliocénico se presentan las lavas del Cumbal Antiguo, representadas por las lavas de Tufiño Ecuador. El edificio Pleistocénico Inferior agrupa las lavas de Cerro Canguil y las de Cerro Crespo- Nasate. Finalmente, en el edificio Pleistocénico Superior, están las lavas de Cerro Negro de Mayasquer y las andesitas de Chiles. Las lavas del Cumbal Antiguo definen el límite calderico que bordea la laguna Cumbal, litológicamente son andesitas con fenocristales de plagioclasas y los piroxenos en una matriz compuesta principalmente por vidrio. A estas lavas se les ha asignado una edad de 4.6 Ma (Velásquez y Parra, 2002). Al occidente de la plancha 447 afloran las lavas de Cerro Canguil con espesores hasta de 3 metros. Las lavas más recientes del Cerro Canguil son andesíticas de textura porfirítica con fenocristales de plagioclasa y clinopiroxeno en matriz microporfídica (Velásquez y Parra, 2002). Las lavas de Cerro Crespos son andesíticas con plagioclasa y piroxenos en matriz vítrea. Las andesitas de Chiles son andesitas masivas compuestas por plagioclasas y piroxenos, ocasionalmente olivino (Velásquez y Parra, 2002). Los depósitos en el área de interés son principalmente de colapso, bloques y cantos en matriz arenosa, conocidos como flujo de escombros de Chiles, además de depósitos glaciales como morrenas laterales, terminales y de fondo, así como depósitos fluvio-glaciares en las zonas más bajas (Parra y Velásquez, 2003).

Las formaciones geológicas propuestas como posibles reservorios geotérmicos del área de Chiles Cerro Negro fueron inferidas a partir de cortes geológicos esquemáticos de la plancha 447 Ipiales a escala 1:100.000. El reservorio podría estar hospedado en rocas de permeabilidad secundaria volcanosedimentarias del Grupo Diabásico, así como en lavas andesíticas, o en las vulcanitas (ficha geología del reservorio. Anexo 1). Según OLADE (1982) en el área se pueden desarrollar acuíferos relacionados con el reservorio en el interior de la secuencia volcánica o volcanosedimentaria.

Potencial geotérmico: La estimación del potencial energético se basó en el resultante para tres grupos de manantiales cuya extensión total es de 6.9 Km² (figura 68). El calor almacenado sumó 4.14 EJ y la potencia de 23.77 MWe (Ficha potencial, Anexo 1). La potencia eléctrica más elevada es estimada para el grupo CCN-02 conformado por los termales del Rio Blanco (11.21 MWe).

La estimación del potencial en este trabajo se realizó solo para el área de Colombia. Estudios adelantados por Almeida (1990) estiman un potencial de 138 MWe para el área

geotérmica del lado ecuatoriano basado en datos de superficie (Beate y Urquizo, 2015) mediante el método volumétrico.

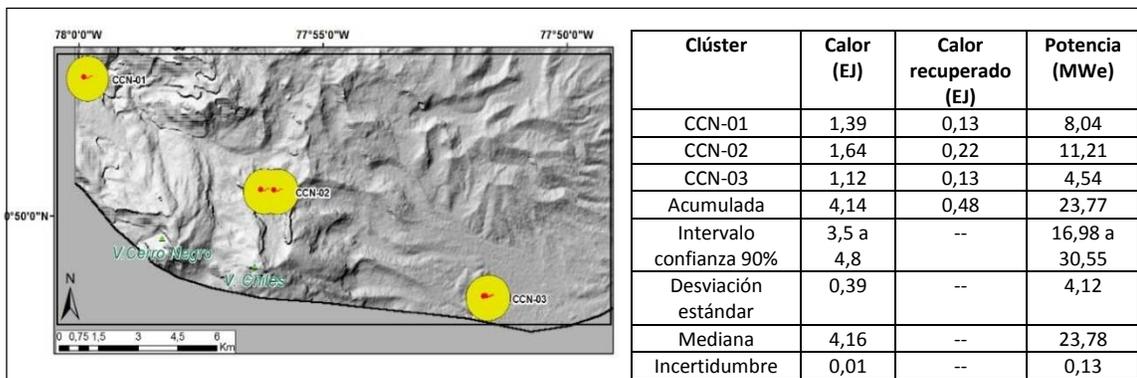


Figura 68. Clústeres tomados como base para el cálculo de potencial y tabla de calor almacenado y potencia eléctrica en el área geotérmica de Chiles- Cerro Negro
Fuente: autores

3.2 Cálculo de potencial por departamentos

El cálculo por departamento se hizo teniendo presente las manifestaciones termales aisladas y como grupos (Clústeres) fuera de las áreas geotérmicas, y que, en principio, no estarían asociados a zonas volcánicas con actividad reciente. Las descripciones geológicas, con pocas excepciones, son tomadas del aplicativo Inventario Nacional de Manifestaciones Hidrotermales (SGC, 2015) y se basan en anotaciones acerca de los sitios de emergencia de los manantiales, sobre planchas geológicas 1:100.000.

3.2.1 Antioquia

Localización y generalidades: El departamento de Antioquia se ubica al noroeste de Colombia, su capital es Medellín y forma parte de las regiones Andinas y Caribe de Colombia. En este departamento se encuentran tres manantiales termales, ubicados en los municipios de Dabeiba, Peque y Santo Domingo (figura 69).

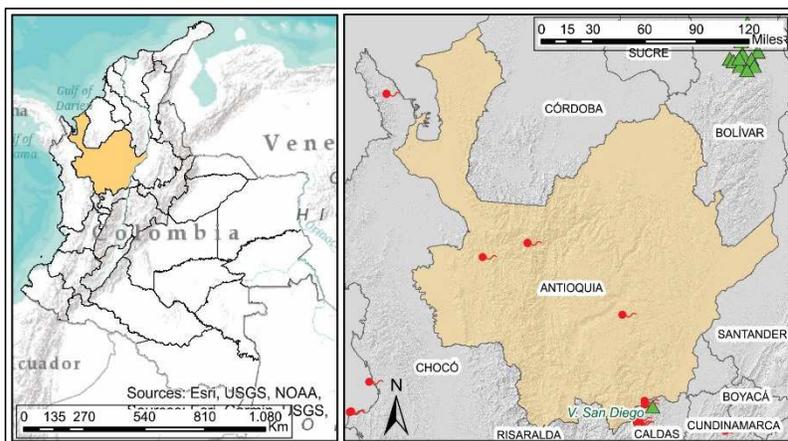


Figura 69. Localización del departamento de Antioquia y sus manantiales termales
Fuente: autores

Manantiales termales y geología: Los manantiales termales están asociados a las fuentes hídricas de los ríos Sucio, Cauca, y San Pedro (ver Ficha Geoquímica en Anexo 2). En cada uno de los sectores de ocurrencia de manantiales, domina un tipo químico de agua; bicarbonatada sódica para los manantiales de Peque y Finca Termiales, y clorurada sódica para el manantial Escuela Mohan. Los manantiales se caracterizan por tener pH entre 7.3 y 9.3, una conductividad eléctrica entre 325 y 17920 $\mu\text{S}/\text{cm}$ y temperaturas moderadas entre 30 y 35°C. En el municipio de Dabeiba se encuentran tres manantiales salados; Chobar, Guineales y Mohan, solo este último es termal y por lo tanto solo fue incluido en el cálculo de potencial geotérmico. La tabla 11 describe la litología y las posibles estructuras en el lugar de surgencia de los manantiales termales del departamento de Antioquia.

Tabla 11. Descripción geológica de los manantiales termales del departamento de Antioquia

Nombre del manantial	I.D Clúster	Municipio	Descripción geológica
Termal de Peque	ANT-01	Peque	Limolitas negras fuertemente fracturadas (Navarro y Salazar, 1989).
Escuela Mohan	ANT-02	Dabeiba	Bloques de areniscas, conglomerados y margas de la formación Guineales. Su ocurrencia está asociado posiblemente a la falla de Chimurro. Ocasionalmente se observan nódulos de Azufre (Rodríguez <i>et al.</i> , 2012).
Finca Termiales	ANT-03	Santo Domingo	Emerge en el batolito Antioqueño de composición granodiorítica a cuarzomonzonítica a lo largo de un lineamiento en dirección noreste (Feininger <i>et al.</i> , 1975).

Fuente: autores

Potencial geotérmico: La estimación del potencial energético se basó en el resultante para tres grupos de manantiales cuya extensión total es de 6 Km² (figura 70). El calor almacenado sumó 2.04 EJ y la potencia de 2.27 MWe (Ficha Potencial Estimado en Anexo

2). La potencia eléctrica más elevada es estimada para el grupo ANT-02 conformado por el manantial de la Finca Termal (2.12 MWe).

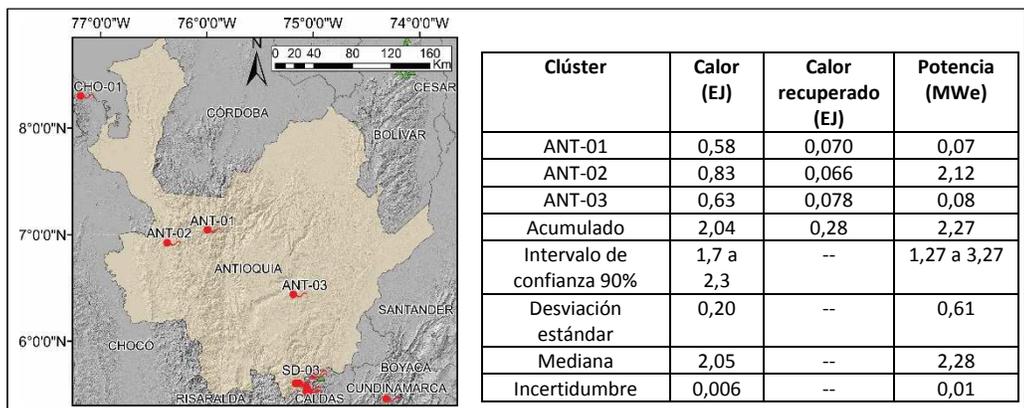


Figura 70. Clústeres tomados como base para el cálculo de potencial y tabla de calor almacenado y potencia eléctrica en el departamento de Antioquia

Fuente: autores

3.2.2 Arauca

Localización y generalidades: El departamento de Arauca se ubica al este de Colombia, su capital es Arauca y forma parte de la región Orinoquía. En este departamento se encuentran un manantial termal, ubicado en el municipio de Tame (figura 71).

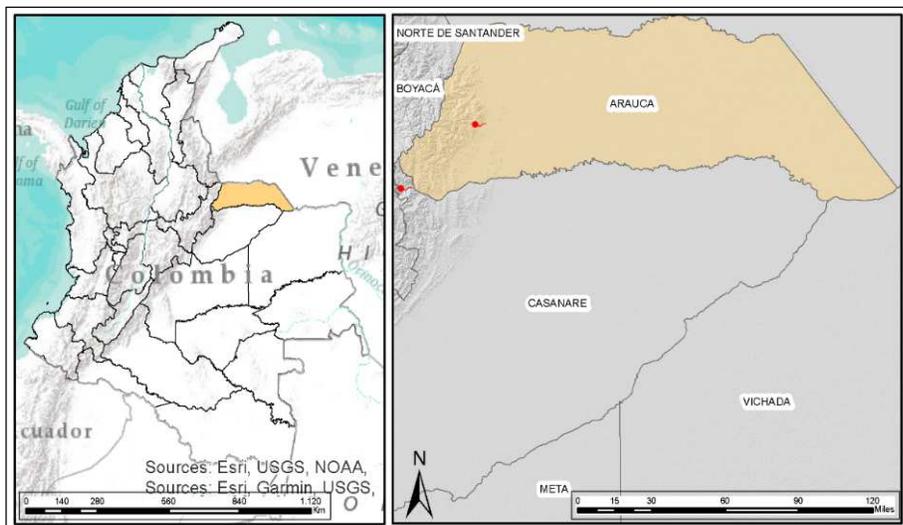


Figura 71. Localización del departamento de Arauca y sus manantiales termal

Fuente: autores

Manantiales termales y geología: El manantial termal ubicado en el departamento de Arauca, se encuentra en los márgenes del río Cravo Norte. Este manantial tiene aguas de tipo bicarbonatada sódica. Su pH es neutro con un valor de 6.6, una conductividad eléctrica de 33 $\mu\text{S}/\text{cm}$ y una temperatura moderada de 33 °C. La tabla 12, describe la litología y las posibles estructuras en el lugar de surgencia del manantial termal del departamento de Arauca.

Tabla 12. Descripción geológica del manantial termal en el departamento de Arauca

Nombre del manantial	I.D Clúster	Municipio	Descripción geológica
Tame	ARA-01	Tame	El manantial de Tame emerge entre cuarzoarenitas de grano fino a grueso; conglomerados y arenitas feldespáticas e intercalaciones de lodolitas oscuras (González <i>et al.</i> , 2015).

Fuente: autores

Potencial geotérmico: La estimación del potencial energético se basó en el resultante para un grupo de manantiales cuya extensión total es de 2 Km² (figura 72). El calor almacenado sumó 0.52 EJ y la potencia de 0.07 MWe (Ficha potencial estimado, Anexo 2).

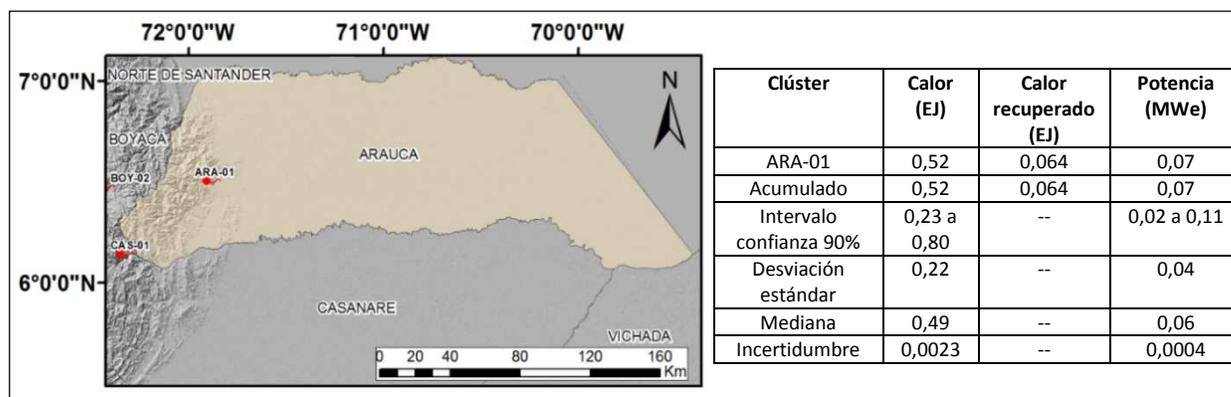


Figura 72. Clústeres tomados como base para el cálculo de potencial y tabla de calor almacenado y potencia eléctrica en el departamento de Arauca

Fuente: autores

3.2.3 Atlántico

Localización y generalidades: El departamento de Atlántico se ubica al norte de Colombia, su capital es Barranquilla y forma parte de la región Caribe de Colombia. En este departamento se encuentra un manantial termal, ubicado en el municipio de Usiacurí (figura 73).

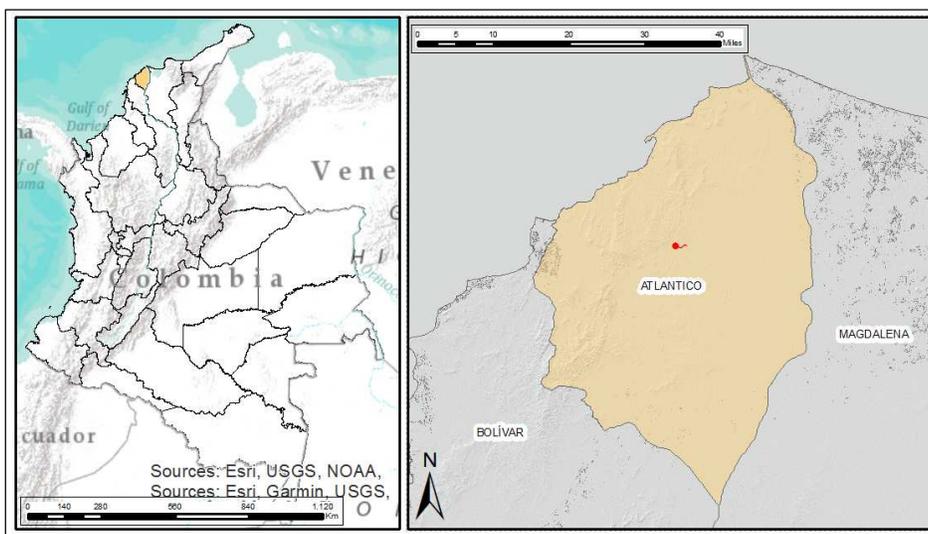


Figura 73. Localización del departamento de Atlántico y sus manantiales termales
Fuente: autores

Manantiales termales y geología: El manantial termal ubicado en el departamento de Atlántico presenta una composición química Bicarbonatada Sódica, temperatura de descarga de 30.7 °C, se considera como de agua tibia, con una concentración de sólidos disueltos totales de 803 mg/L, conductividad eléctrica de 1250 $\mu\text{S}/\text{cm}$ y pH de 8 (Ver Ficha Geoquímica en Anexo N). La tabla 13 describe la litología y las posibles estructuras en el lugar de surgencia del manantial termal del departamento de Atlántico.

Tabla 13. Descripción geológica del manantial termal en el departamento de Atlántico

Nombre del manantial	I.D Clúster	Municipio	Descripción geológica
Pozo Golero	ATL-01	Usiacurí	Emerge sobre la Formación Tubará, areniscas de grano fino, algunas calcáreas, cerca al anticlinal de Sibarco donde se expone la formación Hibácharo, cuyos sedimentos pertenecen a depósitos de un abanico submarino (Reyes y Zapata,1999) , próxima a la Falla Usiacurí, la cual es inversa de bajo ángulo y corta la formación Hibácharo, y en cercanías a los depósitos Coluvio-Aluviales.

Fuente: autores

Potencial geotérmico: La estimación del potencial energético se basó en el cálculo para una manifestación cuya área es aproximadamente de 2 Km² (figura 74). El calor almacenado estimado es de 0.47 EJ y la potencia 0.06 MWe (Ficha de potencial estimado. Anexo 2). Este cálculo no se tiene en cuenta para la estimación total de Colombia.

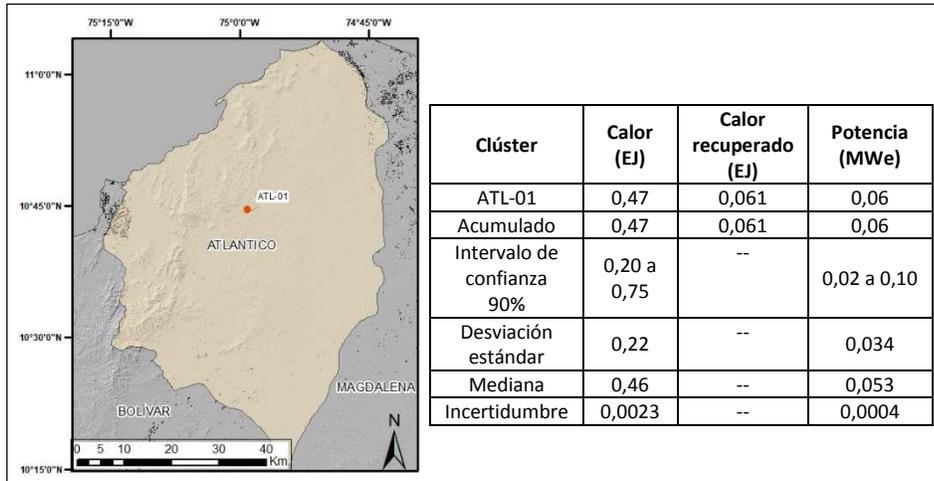


Figura 74. Clústeres tomados como base para el cálculo de potencial y tabla de calor almacenado y potencia eléctrica en el departamento de Atlántico
Fuente: autores

3.2.4 Boyacá

Localización y generalidades: El departamento de Boyacá se ubica hacia el centro de Colombia. Su capital es Tunja y forma parte de la región Andina de Colombia. En este departamento se encuentran 20 manantiales termales, ubicados en los municipios de El Espino, Güicán, San Mateo, Sativanorte, Moniquirá, Tuta, Sáchica, Labranzagrande, Motavita, Rondón, Ramiriquí, Zetaquirá, Ventaquemada, Chinavita, Pachavita, Páez, Santa María, Pesca y Cuítiva (figura 75).

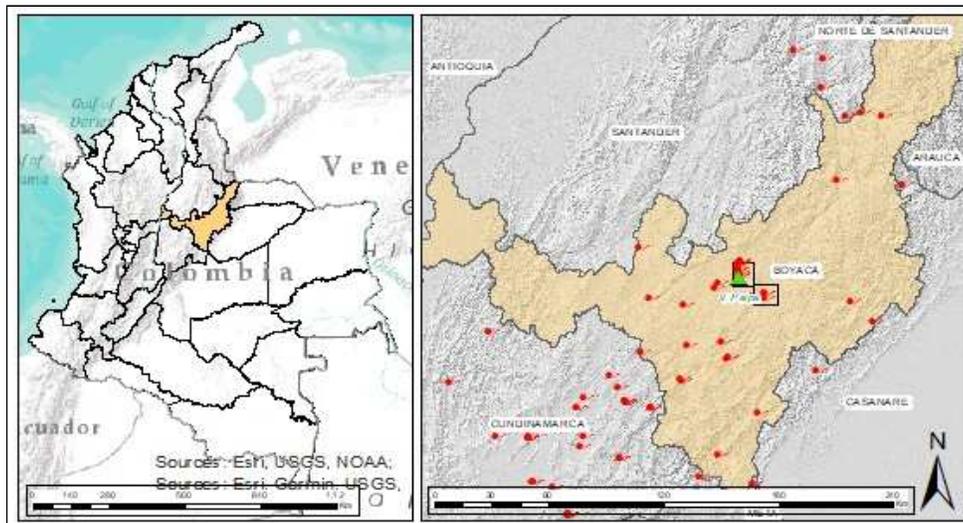


Figura 75. Localización del departamento de Boyacá y sus sus manantiales termales
Fuente: autores

Manantiales termales y geología: Los manantiales termales ubicados en el departamento de Boyacá están asociados a las fuentes hídricas de los ríos Nevado, Chicamocha, Moniquirá, Sáchica, Cravo Sur, Mueche, Tibaná, Upía, Lenguapa y Guavio, y las quebradas La Fucha, Farfaca, La Peña, Única, La Moya y Platanillal (ver Ficha Geoquímica en Anexo 2). En cada uno de los sectores de ocurrencia de manantiales, domina un tipo químico de agua; clorurada sódica para los manantiales de La Salinita. El Salitre y Manantial Paéz; clorurada sódica cálcica en el manantial El Pozo y Aguacaliente (BOY-17 en Santa María); clorurada bicarbonatada sódica en los manantiales de El Chorro y Santa María; clorurada bicarbonatada en Aguascalientes Salinitas (BOY-03 en San Mateo); bicarbonatada en Aguascalientes (BOY-13 en el municipio de Zetaquirá) y Sector Aguascalientes (BOY-14 en Ventaquemada); bicarbonatada sódica en Termales (BOY-04 en Sativanorte). Aguascalientes (BOY-09 en Labranzagrande), Aguacaliente (BOY-12 en Ramiriquí), Cupavita y Termales Aguascaliente (BOY-15 en Pachavita); bicarbonatada sódica cálcica en Aguacaliente (BOY-06 en Tuta) y Termales El Ocho; bicarbonatada cálcica sódica en el manantial Colegio Salesiano y bicarbonatada cálcica magnésica en Aguacaliente (BOY-11 en Rondón). Los manantiales de este departamento se caracterizan por tener pH entre 4.8 y 8.1; conductividad eléctrica entre 103 y 7170 $\mu\text{S}/\text{cm}$, y temperaturas de descarga moderadas entre 22 y 60°C. En la tabla 14 se describe la litología y las posibles estructuras en el lugar de surgencia de los manantiales termales del departamento de Boyacá.

Tabla 14. Descripción geológica de los manantiales termales en el departamento de Boyacá

Nombre del manantial	ID Clúster	Municipio	Descripción geológica
La Salinita	BOY-01	El Espino	El termal tiene ocurrencia en la ribera del río Nevado, sobre depósitos glaciares cuaternarios. Estos sedimentos se encuentran suprayaciendo las lodolitas de la Formación Chipaque o Capacho, según cartografía de Fabre <i>et al.</i> (1985). Su ocurrencia se puede relacionarse al fallamiento y plegamiento NW - SE sobre la cobertera cretácica.
El Chorro	BOY-02	Güicán	Emerge de coluviones cuaternarios que están suprayaciendo discordantemente las lodolitas de la Formación Capacho o Chipaque. Esta zona se encuentra fracturada con tendencias direccionales N-S y NE – SW sobre la cobertera cretácica y cenozoica Fabre <i>et al.</i> (1985).
Aguascalientes Salinitas	BOY-03	San Mateo	Se localiza entre arcillas y areniscas calcáreas de la Formación Capacho y las areniscas cuarcíticas de la Formación Aguardiente. La ocurrencia se puede relacionar a las fallas cartografiadas por Vargas <i>et al.</i> (1984), que marcan un contacto entre el Paleozoico del río Nevado y la Formación Capacho.
Termales	BOY-04	Sativanorte	El manantial se localiza en la ribera del río Chicamocha. Su emergencia ocurre por la Formación Guaduas en una zona densamente fallada. El manantial se puede asociar a fallas profundas entre la falla de Soápaga y la Falla de Socotá, cartografiadas por Vargas <i>et al.</i> (1981).
El Salitre	BOY-05	Moniquirá	Emerge en la llanura de inundación del río Moniquirá. Geológicamente se localiza sobre la Formación Paja/Ritque en cercanías al contacto neto con la Formación Rosa Blanca. con buzamiento al occidente. El manantial se puede asociar al fallamiento profundo con dirección de rumbo NW (Ulloa y Rodríguez, 1984).
Aguacaliente	BOY-06	Tuta	Los manantiales se localizan en la ribera del río Chicamocha Alto, sobre las formaciones geológicas del Grupo Guadalupe y la Formación Tilatá (Renzoni y Rosas, 1998). Sus ocurrencias pueden asociarse a una prolongación norte de la Falla de Chivatá, que junto a la falla de Tunja son estructuras asociadas a la Falla de Boyacá.

Estimación preliminar de potencial geotérmico de Colombia

Nombre del manantial	ID Clúster	Municipio	Descripción geológica
Tuta	BOY-07	Tuta Sáchica	Los manantiales se localizan en la ribera del río Chicamocha Alto, sobre las formaciones geológicas del Grupo Guadalupe y la Formación Tilitá (Renzoni y Rosas, 1998). Sus ocurrencias pueden asociarse a una prolongación norte de la Falla de Chivatá, que junto a la falla de Tunja son estructuras asociadas a la Falla de Boyacá. El termal ocurre en los sedimentos aluviales de la ribera del río Sáchica al suroccidente del núcleo del Anticlinal de Arcabuco (Renzoni y Rosas, 1998).
EL Pozo	BOY-08		
Aguascalientes	BOY-09	Labranzagrande	Emerge sobre la ribera del río Cravosur, en el flanco oriental del anticlinal del Río Suncé. El área se caracteriza por presentar fallas y plegamientos con tendencia direccional NE – SW (Montoya <i>et al.</i> , 2013).
Colegio Salesiano	BOY-10	Motavita	El termal ocurre en las arenitas cuarzosas con intercalaciones de lodolitas de la Formación Bogotá, en el contacto concordante con la Formación Guaduas, de acuerdo con cartografía hecha por Renzoni y Rosas (1998). El manantial se encuentra a cuatro kilómetros al oriente de la prolongación de la Falla de Boyacá, identificada por Velandia (2005).
Aguacaliente	BOY-11	Rondón	Emerge de areniscas de la Formación Socha, en la ribera del río Mueche. El rasgo estructural principal es la Falla de Soápaga (Renzoni y Rosas, 1998), dos kilómetros al occidente del manantial; la falla pone en contacto el miembro arcilloso de la Formación Socha con la Formación Tibasosa.
Aguacaliente	BOY-12	Ramiriquí	El manantial emerge de areniscas cuarzosas con intercalaciones de shales de la Formación Labor y Tierna cerca al contacto con la Formación Plaeners, según cartografía hecha por Renzoni y Rosas (1998). Su ocurrencia puede asociarse a fallamiento NW sobre la cobertera cretácica y a la falla Chivatá, al occidente de la ocurrencia termal.
Sector Aguacaliente	BOY-13	Zetaquirá	Emerge en cercanías al contacto concordante entre la Formación Une y la Formación Fómique, en el flanco occidental del anticlinal de Zetaquirá (Ulloa <i>et al.</i> , 1975). La ocurrencia de los manantiales de Zetaquirá sigue el tren estructural de pliegues que enmarcan los manantiales del Pachavita y Chinavita y su ocurrencia puede asociarse a este sistema de pliegues.
Aguacaliente	BOY-14	Ventaquemada	La ocurrencia del manantial se puede asociar al plegamiento y fracturamiento en el Sinclinal de Albarracín. Emerge sobre arcillolitas grises intercaladas con cuarzo arenitas blancas de la Formación Guaduas (Fúquen y Osorno, 2005).
El Ocho	BOY-14 BOY-15	Zetaquirá	Emerge en cercanías al contacto concordante entre la Formación Une y la Formación Fómique, en el flanco occidental del anticlinal de Zetaquirá (Ulloa <i>et al.</i> , 1975). La ocurrencia de los manantiales sigue el tren estructural de pliegues que enmarcan los manantiales del Pachavita y Chinavita y su ocurrencia puede asociarse a este sistema de pliegues.
Cupavita		Chinavita	Los manantiales emergen en el flanco occidental del Anticlinal de Pachavita, compuesto por las arenitas de la Formación Une (Ulloa <i>et al.</i> , 1975).
Termales Aguacaliente	BOY-15 BOY-16	Pachavita	Los manantiales emergen en el flanco occidental del Anticlinal de Pachavita, compuesto por las arenitas de la Formación Une (Ulloa <i>et al.</i> , 1975).
Páez		Páez	El manantial emerge en la ribera del río Upía, cerca al contacto entre las formaciones Fómique y Las Juntas (Ulloa <i>et al.</i> , 1975). La ocurrencia termal se puede asociar al fallamiento inverso y plegado con tendencia NE – SW del área circundante.
Agua Caliente	BOY-17	Santa María	La emergencia de los manantiales se puede asociar al trazo de las fallas de Tesalia al sur y de Lengupá al norte (Ulloa <i>et al.</i> , 1975), ambas fallas correspondientes al Sistema de Fallas de Santamaría, de tipo inverso e inclinación al oeste, con desplazamientos verticales de gran magnitud que ponen en contacto rocas de formaciones del Paleógeno y Neógeno con rocas Pre-Cretácicas.
Sin nombre	BOY-18	Santa María	La emergencia de los manantiales se puede asociar al trazo de las fallas de Tesalia al sur y de Lengupá al norte (Ulloa <i>et al.</i> , 1975), ambas fallas correspondientes al Sistema de Fallas de Santamaría, de tipo inverso e inclinación al oeste, con desplazamientos verticales de gran magnitud que ponen en contacto rocas de formaciones del Paleógeno y Neógeno con rocas Pre-Cretácicas.

Fuente: autores

Potencial geotérmico: La estimación del potencial energético se basó en el resultante de la suma para 20 grupos de manantiales cuya extensión total es de 39 Km² (figura 76). El calor almacenado sumó 11.16 EJ y la potencia de 1.43 MWe (Ficha de potencial

estimado, Anexo 2). La potencia eléctrica de todos los manantiales oscila entre 0.06 y 0.08 MWe.

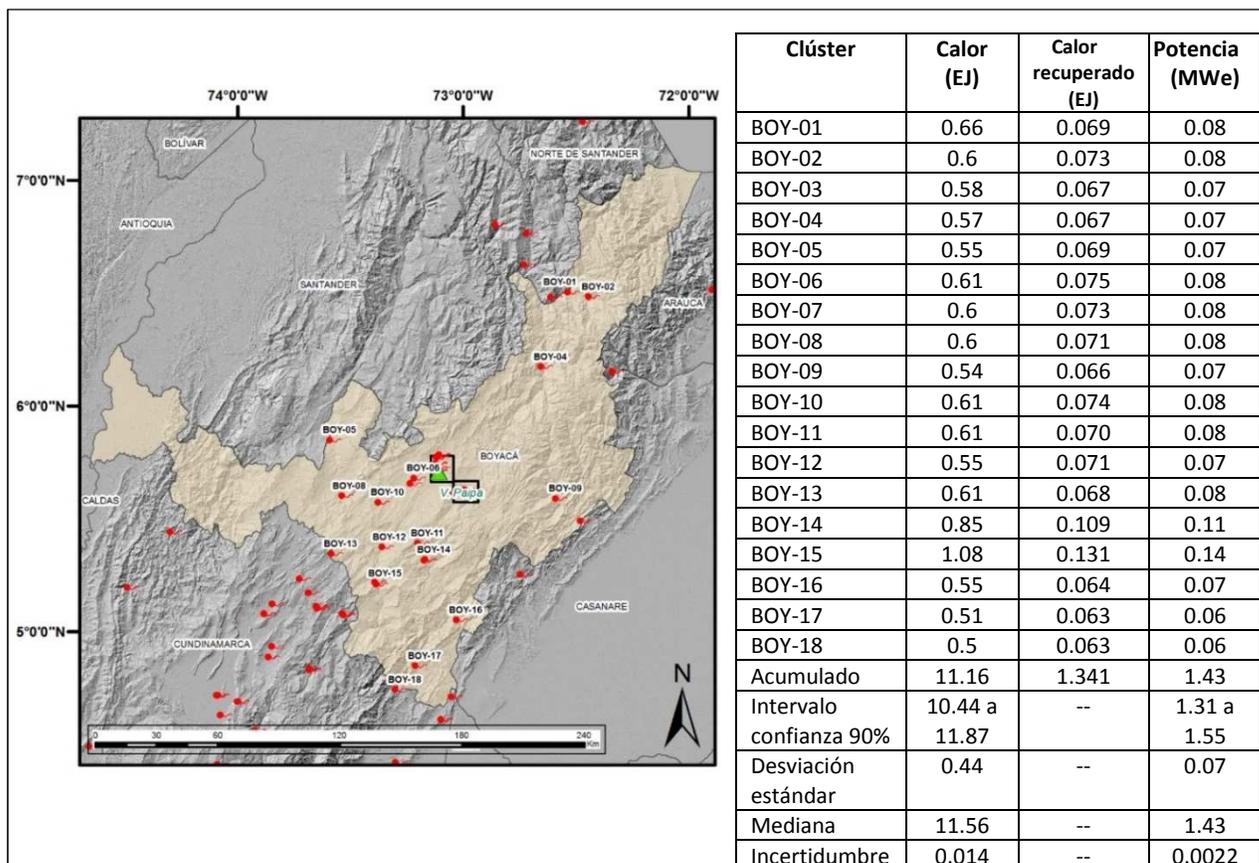


Figura 76. Clústeres tomados como base para el cálculo de potencial y tabla de calor almacenado y potencia eléctrica en el departamento de Boyacá

Fuente: autores

3.2.5 Casanare

Localización y generalidades: El departamento de Casanare se ubica hacia el este de Colombia, su capital es Yopal y forma parte de la región Orinoquía de Colombia. En este departamento se encuentran tres manantiales termales, ubicados en los municipios de La Salina, Yopal y Recetor (figura 77).

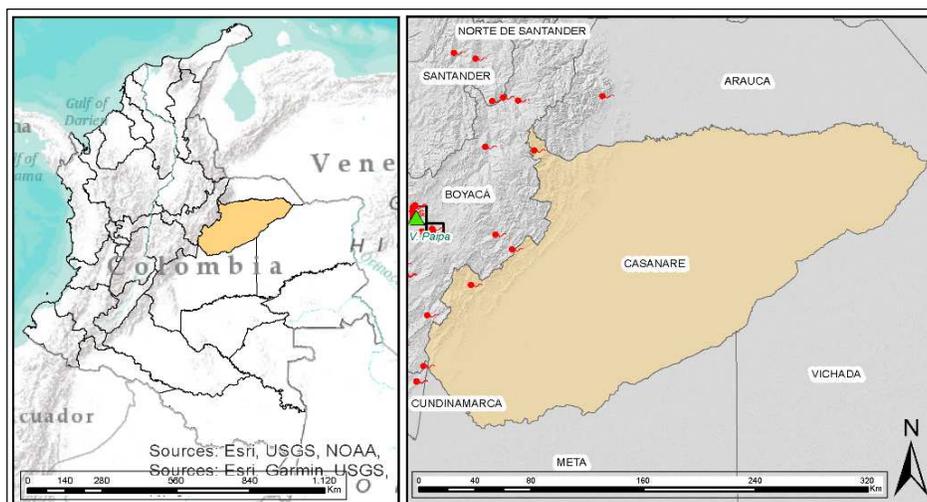


Figura 77. Localización del departamento de Casanare y sus manantiales termales
Fuente: autores

Manantiales termales y geología: Los manantiales termales ubicados en el departamento de Casanare están asociados a las fuentes hídricas de los ríos Casanare, Cravo Sur y quebrada Paloquemado (Río Cusiana) (ver Ficha Geoquímica en Anexo 2). En cada uno de los sectores de ocurrencia de manantiales, domina un tipo químico de agua; clorurada cálcica para los manantiales La Salina (CAS-01) y Virgen de la Peña (CAS-02) y clorurada bicarbonatada cálcica en Recetor (CAS-03). Los manantiales de este departamento se caracterizan por tener pH entre 6.2 y 7.4, conductividad eléctrica entre 399 y 278000 $\mu\text{S}/\text{cm}$, y temperaturas de descarga moderadas entre 35 y 44 $^{\circ}\text{C}$. En la tabla 15 se describe la litología y las posibles estructuras en el lugar de surgencia de los manantiales termales del departamento de Casanare.

Tabla 15. Descripción geológica de los manantiales termales en el departamento de Casanare

Nombre del manantial	ID Clúster	Municipio	Descripción geológica
La Salina	CAS-01	La Salina	El termal tiene ocurrencia en lodolitas fisiles negras con intercalaciones de arenitas cuarzosas de la Formación Lutitas de Macanal (Fabre, 1983).
Virgen de la Peña	CAS-02	Yopal	Emerge en arenitas lodosas color gris a blanco y lodolitas abigarradas de la Formación Arcillolitas del Limbo (Montoya <i>et al.</i> , 2013).
Recetor	CAS-03	Recetor	El manantial emerge en el contacto fallado entre lutitas y limolitas negras con ocasionales intercalaciones de arenitas de la Formación de Lutitas de Macanal y lutitas y limolitas negras con intercalaciones de arenitas y estratos de caliza y carbón de la Formación Chipaque. El contacto fallado corresponde a la Falla inversa de Pajarillo (Ulloa y Rodríguez, 1983).

Fuente: autores

Potencial geotérmico: La estimación del potencial energético se basó en el resultante para tres grupos de manantiales cuya extensión total es de 6 Km² (figura 78). El calor almacenado sumó 1.64 EJ y la potencia de 0.21 MWe (Ficha de potencial estimado en Anexo 2). La potencia eléctrica de cada clúster es de 0.07 MWe.

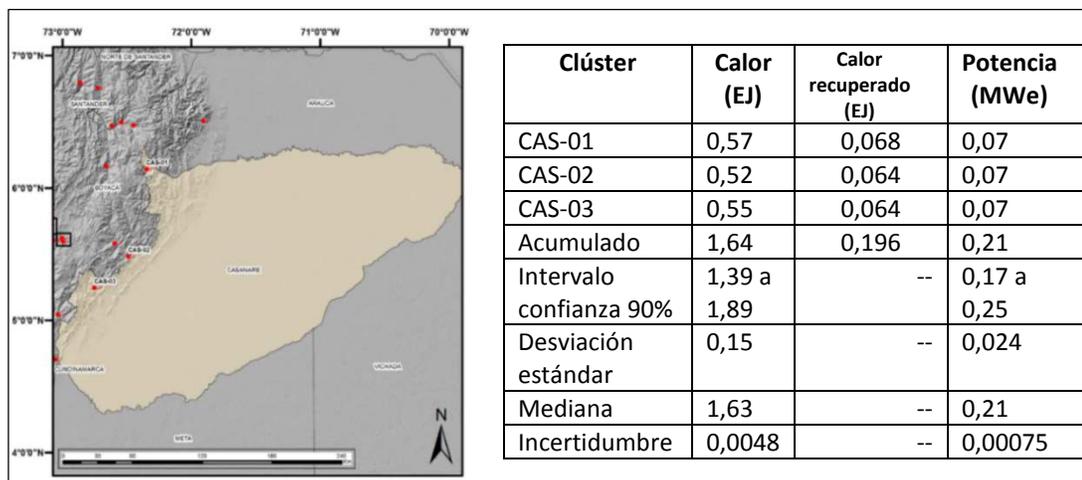


Figura 78. Clústeres tomados como base para el cálculo de potencial y tabla de calor almacenado y potencia eléctrica en el departamento de Casanare

Fuente: autores

3.2.6 Cesar

El departamento del Cesar se ubica al norte de Colombia, su capital es Valledupar y forma parte de la región Caribe de Colombia. En este departamento se encuentra un manantial termal, ubicado en el municipio de Becerril (figura 79).

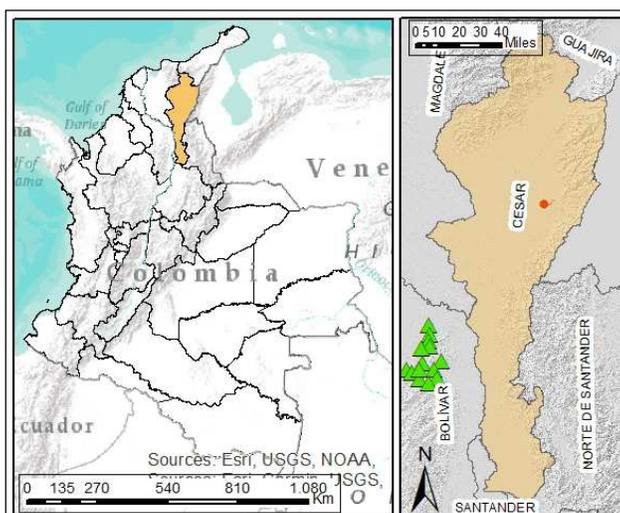


Figura 79. Localización del departamento del Cesar y su manantial termal
Fuente: autores

Manantiales termales y geología: El manantial termal ubicado en el departamento del Cesar presenta composición bicarbonatado-cálcica, presenta una temperatura de descarga de 31.5 °C, conductividad eléctrica de 1125 $\mu\text{S}/\text{cm}$ y pH 7.7. La tabla 16 describe la litología y las posibles estructuras en el lugar de surgencia de los manantiales termales del departamento del Cesar.

Tabla 16. Descripción geológica de los manantiales termales en el departamento del Cesar

Nombre del manantial	I.D Clúster	Municipio	Descripción geológica
El Azufrado	CES-01	Becerril	Este manantial emerge entre bloques de calizas, sobre la formación Llanuras Aluviales, la cual presenta poca profundidad, y de acuerdo el corte que se muestra en la geología del departamento del Cesar (1997). Se encontrarían debajo de está. En el punto de emergencia del manantial la Formación los Cuervos. La Formación Barco y la formación Molino.

Fuente: autores

Potencial geotérmico: La estimación del potencial energético se basó en el resultante para el manantial cuya área es estimada en 2 Km^2 . La figura 80 muestra la estimación para el calor almacenado, el cual es de 0.47 EJ y la potencia 0.06 MWe (Ficha de potencial estimado, Anexo 2).

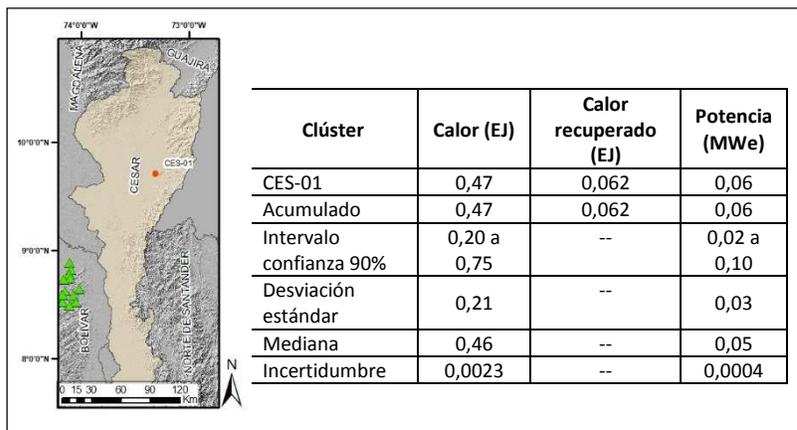


Figura 80. Clústeres tomados como base para el cálculo de potencial y tabla de calor almacenado y potencia eléctrica en el departamento del Cesar

Fuente: autores

3.2.7 Chocó

Localización y generalidades: El departamento de Chocó se ubica en el noroeste de Colombia, su capital es Quibdó y comprende las selvas del Darién y las cuencas de los ríos Atrato y San Juan. En este departamento se encuentran tres manantiales termales, ubicados en los municipios de Nuquí y Unguía (figura 81).

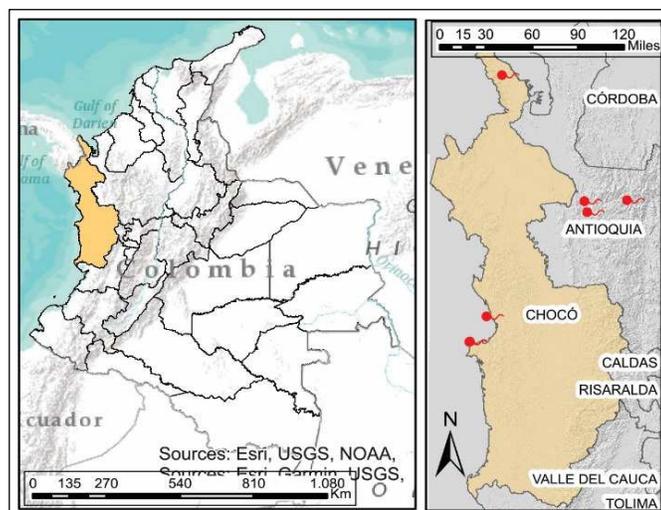


Figura 81. Localización del departamento de Chocó y sus manantiales termales

Fuente: autores

Manantiales termales y geología: Los manantiales termales ubicados en el departamento del Chocó, están asociados a las fuentes hídricas del río Atrato y el océano Pacífico. En cada uno de los sectores de ocurrencia de manantiales, domina un tipo químico de agua; sulfatada cálcica para los manantiales de Balboa; clorurada sódica en los manantiales de Insibes y Agua Caliente de los Anturios, y bicarbonatada clorurada sódica para Termales. Los manantiales de este departamento se caracterizan por tener pH entre 6.1 y 8.9, una conductividad eléctrica entre 665 y 8830 $\mu\text{S}/\text{cm}$ y temperaturas entre 34 y 45°C. La tabla 17, describe la litología y las posibles estructuras en el lugar de surgencia de los manantiales termales del departamento del Chocó.

Tabla 17. Descripción geológica de los manantiales termales en el departamento del Chocó

Nombre del manantial	I.D Clúster	Municipio	Descripción geológica
Manantial de Balboa	CHO-01	Unguía	Depósitos no consolidados de origen aluvial, donde se evidencian bloques de basaltos del Complejo Santa Cecilia la Equis, que corresponde litológicamente a basaltos, basaltos amigdalares, aglomerados y tobas (Zapata, 2003).
Agua caliente de los Anturios	CHO-02	Nuquí	Emerge entre los Basaltos de Baudó. Estructuralmente, se presentan lineamientos fotogeológicos definidos como el lineamiento Quebrada Monduguera presentando una tendencia al Noreste (Zapata, 2003).
Los Insibes	CHO-03		Emerge entre depósitos cuaternarios que suprayacen la formación Uva, cerca de su emanación existe un lineamiento fotogeológico que posiblemente esté relacionado con su ocurrencia (Zapata, 2003).
Termales			Aflora la formación Uva de edad Oligoceno-Mioceno inferior, litológicamente corresponde a areniscas. Limolitas, calizas y margas (Zapata, 2003).

Fuente: autores

Potencial geotérmico: La estimación del potencial energético se basó en el resultante para tres grupos de manantiales cuya extensión total es de 7.8 Km² (figura 82). El calor almacenado sumó 2.30 EJ y la potencia de 3.27 MWe (Ficha de potencial estimado, Anexo 2). La potencia eléctrica más elevada es estimada para el grupo CHO-02 conformado por el manantial Agua Caliente de los Anturios (3.08 MWe).

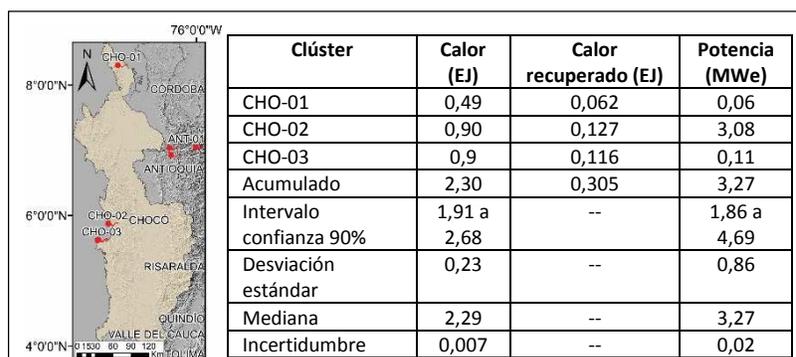


Figura 82. Clústeres tomados como base para el cálculo de potencial y tabla de calor almacenado y potencia eléctrica en el departamento del Chocó

Fuente: autores

3.2.8 Cundinamarca

Localización y generalidades: El departamento de Cundinamarca se ubica en el centro de Colombia, cuya capital es Tunja. Hay localizados un total de 54 manantiales termales, ubicados en los municipios de Yacopí, Suesca, Útica, Chocontá, Nemocón, Tiribita, San Francisco, Tabio, Guatavita, Guasca, Gachetá, Bogotá D.C., La Calera, Paratebuena, Choachí, Tocaima, Medina, Chipaque, Agua de Dios y Ricaurte (figura 83).

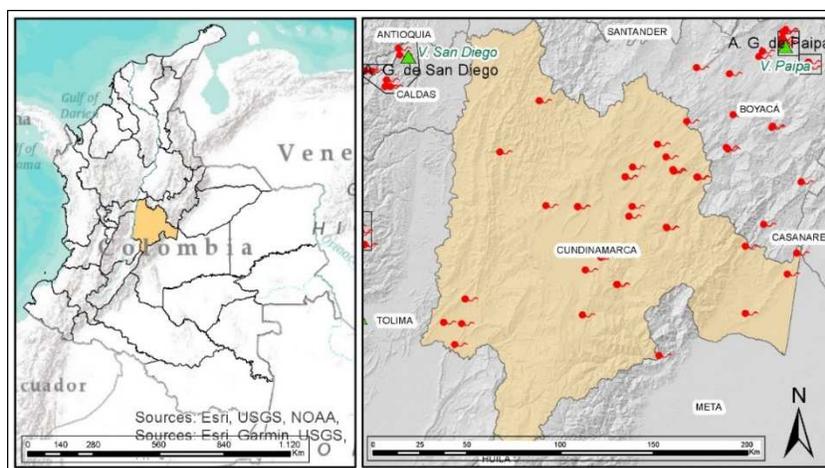


Figura 83. Localización del departamento de Cundinamarca y sus manantiales termales

Fuente: autores

Manantiales termales y geología: En cada uno de los sectores de ocurrencia de manantiales, domina un tipo químico de agua; bicarbonatada sódica y sódica cálcica en los termales de Vereda Peñas, Bavaria, Aguas Claras, Quebrada El Zaque, Santa Monica I y II, La Rivera, Volcanes, Napoles I y II, El Gran Pozo Azufrado, Los Lagartos, Calderitas. Aguas Calientes, Azufrada La Quebrada y Casablanca. Los manantiales de este departamento se caracterizan por tener pH entre 5.63 y 8.11, una conductividad eléctrica con un extremo bajo de entre 8 y 73, valores más altos entre 100 y 28500 $\mu\text{S}/\text{cm}$ y temperaturas moderadas entre 22 y 75 °C. La tabla 18 describe la litología y las posibles estructuras en el lugar de surgencia de los manantiales termales del departamento de Cundinamarca.

Tabla 18. Descripción geológica de los manantiales termales en el departamento de Cundinamarca

Nombre del manantial	I.D Clúster	Municipio	Descripción geológica
El Salitre Y	CUN-01	Yacopí	Emerge de limolitas muy cerca de la intersección de las fallas Íbama y La Victoria
Aguas Claras	CUN-02	Suesca	Ocurre 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, probablemente asociado a fallas transpresionales tipo N-S a NNE sobre la cobertera cretácica (Montoya y Reyes, 2003).
Hotel Abacoa	CUN-03	Útica	Emerge de los depósitos del río Negro sobre las areniscas conglomeráticas de la Formación Útica
Repetidora	CUN-04	Chocontá	Emerge entre depósitos aluviales del Río Bogotá, los cuales cubren sedimentitas de la Formación Tilatá (Montoya y Reyes, 2003).
Hacienda Susatá	CUN-05	Nemocón	Emerge de depósitos de ladera localizados sobre la formación Guaduas cerca a la falla Cucunubá (Montoya y Reyes, 2003).
Los Volcanes	CUN-06	Chocontá	Emergen de los depósitos de ladera sobre la formación Arenisca Tierna cerca a la falla Suralá. Nápoles I y II emerge entre depósitos aluviales localizados en el cauce de la Quebrada Nápoles, cubriendo las areniscas de la Formación Cacho (Montoya y Reyes, 2003).
Los Volcanes II			
Los Volcanes III			
Los Volcanes IV			
Nápoles			
Nápoles II			
Leonilde - Casa	CUN-07	Nemocón	Emergen entre depósitos coluviales y de terraza que cubren la Formación Chipaque (Montoya y Reyes, 2003).
Piscina Municipal			
El paraíso	CUN-08	Tibirita - Manta	Emergen de depósitos aluviales sobre la formación Une (areniscas y shales). El manantial Vereda Peñas emerge de depósitos aluviales sobre la Formación Une cerca de la falla de rumbo distal N-S (Ulloa <i>et al.</i> , 1975).
El paraíso Codecal			
Vereda Peñas			
El paraíso Termal			
paraíso Codecal II			
Agua Caliente	CUN-09	San Francisco	Emerge de un depósito coluvial, el cual yace sobre areniscas de la Formación Arenisca Dura del Grupo Guadalupe (Ulloa <i>et al.</i> , 1998).
El Zipa	CUN-10	Tabio	Emerge de depósitos aluviales que reposan sobre las areniscas del Grupo Guadalupe. Formación Arenisca Dura.
El Zipa 2			

Estimación preliminar de potencial geotérmico de Colombia

Nombre del manantial	I.D Clúster	Municipio	Descripción geológica
Aguas Calientes 1			Los manantiales Aguas Calientes emergen entre depósitos aluviales y terrazas cubriendo una posible zona fracturada, estos depósitos reposan sobre la Formación Arenisca Dura del Grupo Guadalupe (Acosta y Ulloa, 1999).
Aguas Calientes 2			
Aguas Calientes 3			
Montecillo	CUN-11	Guatavita	Emergen 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 (Buitrago y Terraza, 2008).
Aguas Calientes	CUN-12	Guasca	Emerge entre depósitos aluviales del Río Aves los cuales 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 (Buitrago y Terraza, 2008).
Qda. El Zaque	CUN-13	Gachetá	Emergen de terrazas de la quebrada el Zaque localizadas sobre las areniscas y shales de las formaciones Une y Chipaque (Buitrago y Terraza, 2008).
La Rivera			
Gaviotas			
Los Lagartos	CUN-14	Bogotá DC	Emerge sobre depósitos aluviales del río Juan Amarillo, con afectación de la falla Usaquén – Sasaima (Ulloa <i>et al.</i> , 199).
Los Lagartos II			
Soratama	CUN-15	La Calera	Emergen entre depósitos de ladera, los cuales cubren a la Formación Guaduas cerca a la Falla Teusacá (Buitrago y Terraza, 2008).
Spa H. del Mar			
Bavaria	CUN-16	Bogotá DC	Emerge cerca a la falla Bogotá, en medio de depósitos coluviales (Buitrago y Terraza, 2008).
Aguas Calientes-Sauna	CUN-17	Paratebueno	Emerge entre grandes cantos de areniscas de la Formación Areniscas del Del Limbo. El ascenso del fluido se debe posiblemente a la Falla satélite de la Guicaramo (Acosta y Ulloa, 1999).
Aguas Calientes-El Mohán			
Santa Monica	CUN-18	Choachí	Los manantiales de Santa Monica emergen de depósitos de ladera por remoción en masa en la Formación Une (Patino <i>et al.</i> , 2011). Los Manantiales Volcanes emergen de los depósitos de ladera sobre la formación Arenisca Tierna cerca a la falla Suralá (Patino <i>et al.</i> , 2011).
Santa Monica II			
Volcanes			
Volcanes II			
Volcanes III			
Volcanes IV			
Volcanes V			
El Establo			
Santa Inés			
El Gran Pozo Azufrado	CUN-19	Tocaima	Emerge de depósitos aluviales de la quebrada Acuatá, sobre el trazo de la falla Bituima (Acosta <i>et al.</i> , 1999).
Playas Rio Humea	CUN-20	Medina	Emerge cerca de rocas de la Formación Caja compuesta por arcillolitas y limolitas (Duarte <i>et al.</i> , 2010).
Calderitas	CUN-21	Chipaque	Emerge de areniscas cuarzosas del Grupo Guadalupe, el ascenso del fluido esta posiblemente asociado a fallas de cabalgamiento NE como la Falla de Bogotá y la Falla De La Frutica
Azufrada La Quebrada	CUN-22	Agua de Dios	Emerge entre areniscas de grano medio a conglomeráticas, subangulares a subredondeadas, de la Formación Barzalosa. Se encuentra cerca a la traza de la Falla Río Bogotá (Acosta <i>et al.</i> , 1999).
Los Chorros I	CUN-23	Ricaurte	Emergen en conglomerados de la Formación La Tabla cerca a la falla Agua de Dios (Acosta <i>et al.</i> , 1999).
Los Chorros II			
Casablanca	CUN-24	Ricaurte	Emerge en los depósitos aluviales del río Paguey, cerca de la falla Nebraska (Acosta <i>et al.</i> , 1999)

Fuente: autores

Potencial geotérmico: La estimación del potencial energético se basó en el resultante para 24 grupos de manantiales (figura 84). El calor almacenado sumó 15.75 EJ y la potencia de 1.99 MWe (Ficha de potencial estimado Anexo 2).

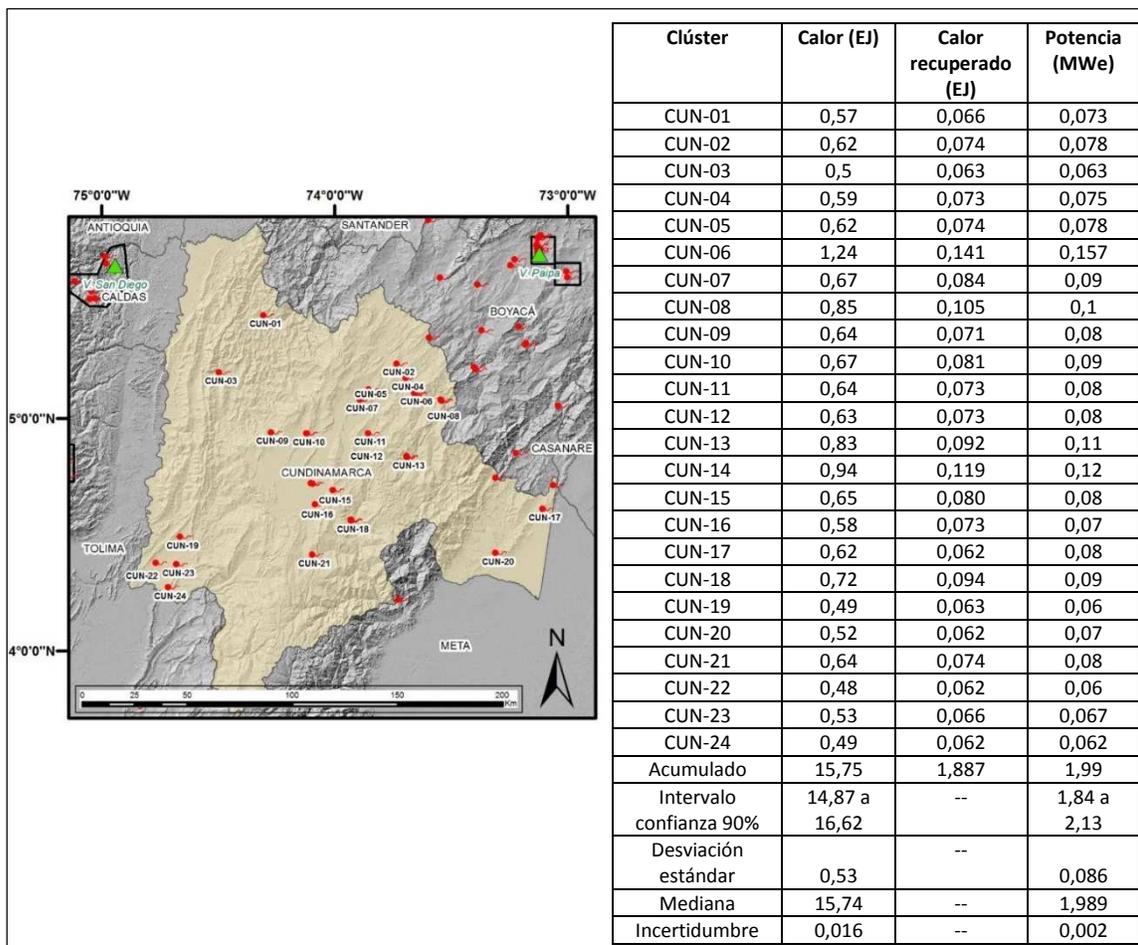


Figura 84. Clústeres tomados como base para el cálculo de potencial y tabla de calor almacenado y potencia eléctrica en el departamento de Cundinamarca
Fuente: autores

3.2.9 Guaviare

Localización y generalidades: El departamento de Guaviare se localiza en la Región Amazónica de Colombia (figura 85). Su capital es San José del Guaviare. En este departamento se registra la ocurrencia de dos manantiales, Termales I y Termales II, en la cuenca del río Guaviare, municipio de Calamar.

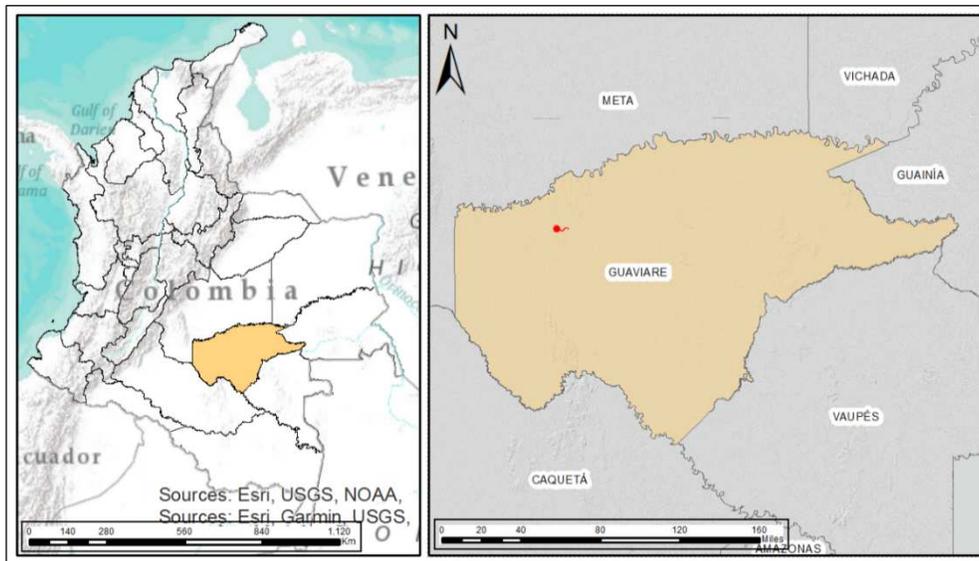


Figura 85. Localización del departamento de Guaviare y sus manantiales termales

Fuente: autores

Manantiales termales y geología: Los manantiales termales de Guaviare, con temperaturas de 43 y 44°C. pH de 7.7 y conductividad eléctrica de 360-364 mS/cm, son del tipo bicarbonatado sódico. Las características geológicas del sitio de emergencia son descritas en la tabla 19.

Tabla 19. Descripción geológica de los manantiales del departamento de Guaviare

Nombre del manantial	ID Clúster	Municipio	Descripción geológica
Termales I y Termales II	GUA-1	Calamar	El manantial se localiza en la plancha geológica 372 en escala 1:100.000 del IGAC. Los manantiales emergen a través de sedimentos del Terciario superior, del grupo Arenoso de Mariñame, cerca de la unidad Granitoide, de edad Paleozoico, compuesta por rocas ígneas intrusivas, granitos, granodioritas y cuarzodioritas de acuerdo con el Instituto Amazónico de Investigaciones Científicas (SINCHI, 2016)

Fuente: autores

Potencial geotérmico: La estimación del potencial energético se basó en dos manantiales termales con un área total de 2 Km² (figura 86). El calor almacenado es de 0.53 EJ y la potencia 0.07 MWe (Ficha Potencial, anexo 2).

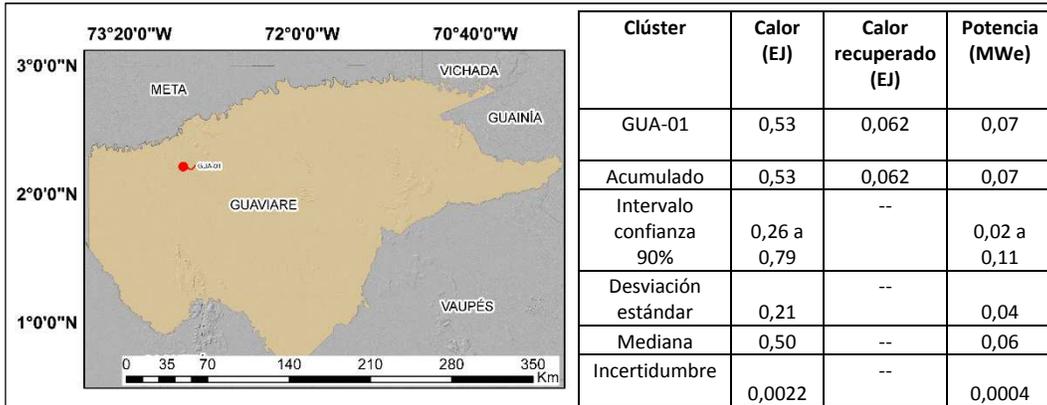


Figura 86. Clústeres tomados como base para el cálculo de potencial y tabla de calor almacenado y potencia eléctrica en el departamento de Guaviare
Fuente: autores

3.2.10 Huila

Localización y generalidades: El departamento del Huila se ubica al suroeste de Colombia, su capital es Neiva y forma parte de la región Andina de Colombia. En este departamento se encuentran 15 manantiales termales, ubicados en los municipios de Timaná, Colombia, Teruel, Yaguará, Rivera, Saladoblanco, La Plata, Tarqui, Altamira y Garzón (figura 87).

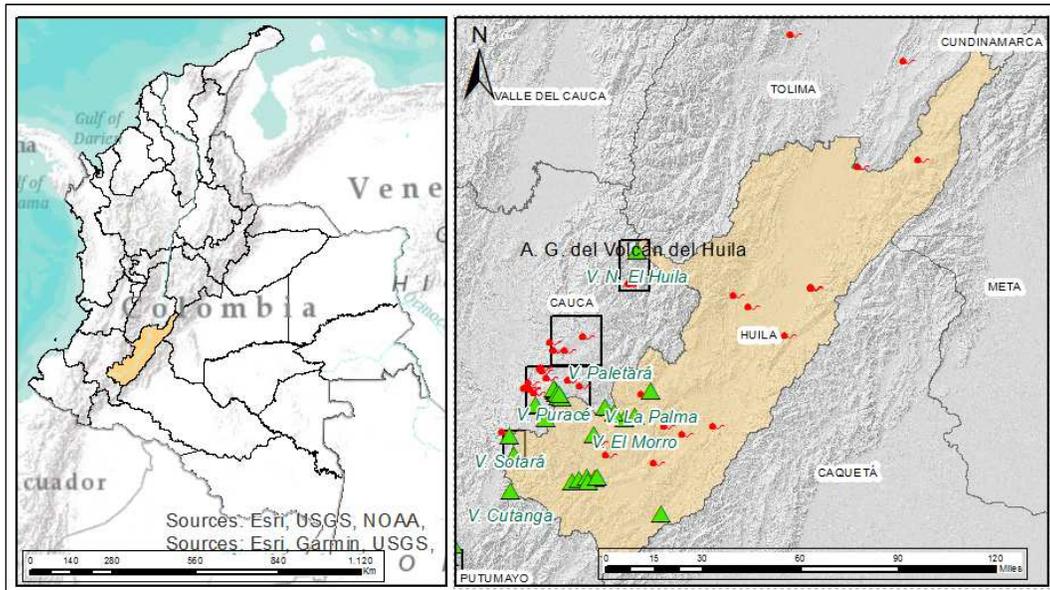


Figura 87. Localización del departamento del Huila y sus manantiales termales
Fuente: autores

Manantiales termales y geología: Los manantiales termales se encuentran ubicados en los municipios de Timaná, Colombia, Terue, Yaguará, Rivera, Saladoblanco, La Plata, Tarqui, Altamira y Garzón. Se encuentran manantiales termales Bicarbonatada Sódica, Clorurados Sódicos, Bicarbonatados Cálcidos, Sulfatados Sódicos. con temperaturas en el rango entre 26.2°C hasta 50.5°C, pH entre 4.3 a 9.8 y conductividades eléctricas entre 69 y 4040 $\mu\text{S}/\text{cm}$. La tabla 20 describe la litología y las posibles estructuras en el lugar de surgencia de los manantiales termales del departamento del Huila.

Tabla 20. Descripción geológica de los manantiales del departamento de Huila

Nombre del manantial	I.D Clúster	Municipio	Descripción geológica
El Lajón	HUI-01	Colombia	Este manantial termal emerge de un conjunto alternante de areniscas de grano fino y color amarillo crema con limolitas y arcillolitas de la Formación Guaduas. El sector de emergencia del manantial se ve afectado por la Falla de Ambicá.
Termales del municipio Inturhuila	HUI-02	Rivera	Estos manantiales termales emergen sobre depósitos cuaternarios que suprayacen el Monzogranito de Algeciras. El ascenso del fluido podría estar relacionado con estructuras en dirección NE.
La Palma. Los Ángeles			
Los Ángeles			
Aguahedionda	HUI-03	Yaguará	Este manantial termal emerge sobre terrazas pumíticas y depósitos aluviales. Estructuralmente podría estar relacionado al Sistema de Fallas de El Agrado-Betania ubicado a 5 km al W de dicho sistema de fallas.
Vilaco	HUI-04	Campoalegre	Este manantial termal emerge sobre el Monzogranito de Algeciras. Estructuralmente podría estar relacionado con la Falla de Algeciras, falla activa y de movimiento rumbo deslizando en sentido lateral derecho (Vergara. 1996); hace parte del llamado Sistema de Fallas Garzón.
Termal de Villalosa	HUI-05	La Plata	Este manantial termal emerge sobre bloques redondeados de hasta 4 metros de Tonalitas pertenecientes al Batolito de Ibagué constituido por rocas de composición intermedias correspondientes a tonalitas y granodioritas y subordinadamente monzogranitos, cuarzdioritas y cuarzomonzonitas. Los bloques de granitos y tonalitas presentan unas fracturas en dos direcciones predominantemente la primera con un azimut de rumbo de 130° y otras con azimut de rumbo de 80°. La zona del manantial está influenciada estructuralmente por la falla La Plata con dirección al SE e inclinación general del plano de falla al NW.
Miraguas	HUI-06	Garzón	Emerge de areniscas conglomeráticas con pequeños niveles de lodolitas.
La Esmeralda Q. El Verde	HUI-07	Tarqui	Este manantial termal emerge de areniscas de grano fino con gran contenido de cuarzo y con una matriz calcárea pertenecientes a la Formación Hígado. Estructuralmente el manantial está asociado a la Falla El Agrado la cual presenta una vergencia al suroriente con inclinación del plano de falla hacia el noroccidente. Se observa que el manantial brota de la base de una ladera de pendiente moderada a través de una fractura abierta de alrededor de 10 cm con un azimut de rumbo de 243°, además de otras fracturas con un azimut de 352°.
Aguasalientes	HUI-08	Altamira	Este manantial termal emerge de depósitos cuaternarios. Brota de la base de una ladera de baja pendiente hacia un drenaje de tercer orden. Podría estar relacionado estructuralmente a la falla de Pitalito - Altamira que corresponde al trazo principal del Sistema de Fallas de Algeciras hacia el sur de Altamira. Su trazado rectilíneo sugiere un alto ángulo de inclinación, aunque presenta fallas satélites asociadas, las cuales tienen menor ángulo y conforman cuñas o lentes a lado y lado de la falla principal.
Piscina de Morelia	HUI-09	Saladoblanco	Este manantial termal emerge sobre el cuerpo ígneo intrusivo cuarzo monzodiorita de Sombrerillo de composición variable entre cuarzomonzodiorita, cuarzomonzonita, granito y granodiorita, con leve predominio de la primera. La emergencia de este manantial podría estar relacionado con la Falla de La Plata; esta presenta una de dirección NE. es de tipo inverso y con vergencia al este.
El Rosal (1)	HUI-09	Saladoblanco Timaná	Este manantial termal emerge sobre el cuerpo ígneo intrusivo cuarzo monzodiorita de Sombrerillo de composición variable entre cuarzomonzodiorita, cuarzomonzonita, granito y granodiorita, con leve predominio de la primera. La emergencia de este manantial podría estar relacionado con la Falla de La Plata; esta presenta una de dirección NE. es de tipo inverso y con vergencia al este.
El Rosal (2)	HUI-10		
Cicana	HUI-11		

Fuente: autores

Potencial geotérmico: La estimación del potencial energético se basó en el resultante para 12 grupos de manantiales cuya extensión total es de aproximadamente 25km² (figura 88). El calor almacenado sumo 7.08 EJ y la potencia 12.09 MWe (Ficha potencial estimado en Anexo 2). La potencia eléctrica más elevada es estimada para el grupo HUI-05 conformado por el manantial termal de Villalosada (11.36MWe).

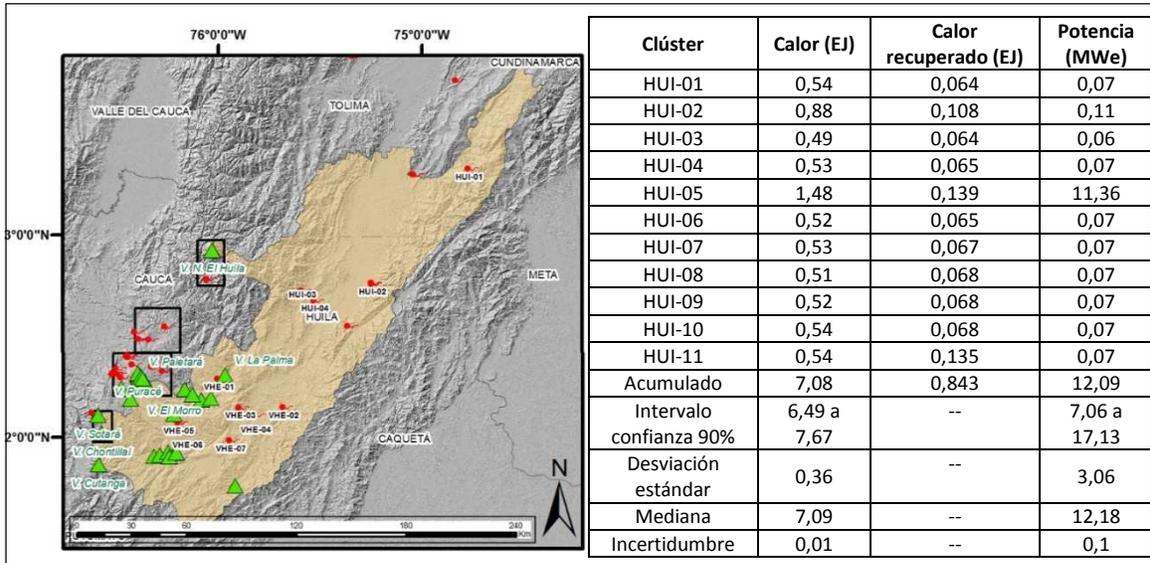


Figura 88. Clústeres tomados como base para el cálculo de potencial y tabla de calor almacenado y potencia eléctrica en el departamento del Huila

Fuente: autores

3.2.11 Magdalena

El departamento del Magdalena se ubica al norte de Colombia, su capital es Santa Marta y forma parte de la región Caribe de Colombia. En este departamento se encuentra un manantial termal ubicado en el municipio de Ciénaga (figura 89).

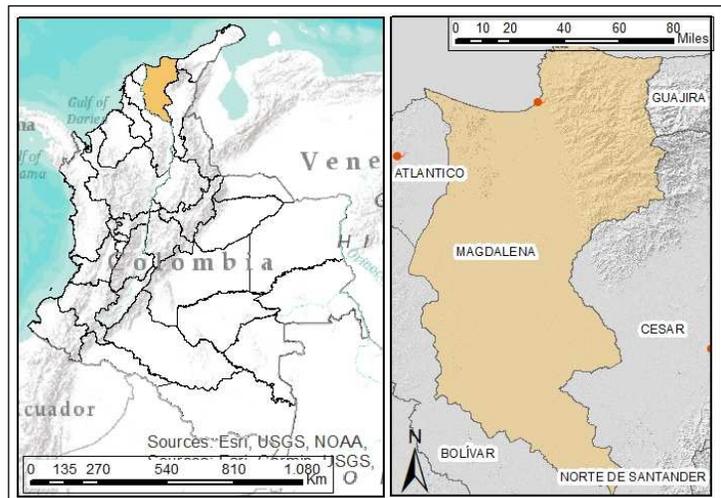


Figura 89. Localización del departamento del Magdalena y su manantial termal
Fuente: autores

Manantiales termales y geología: El manantial termal ubicado en el departamento del Magdalena presenta una composición Clorurada - Sódica Cálcica, temperatura de descarga de 40.8 °C, conductividad eléctrica de 2180 $\mu\text{S}/\text{cm}$ y pH 8. Este manantial termal es usado en baños públicos al que le atribuyen beneficios para la salud. La tabla 21 describe la litología y las posibles estructuras en el lugar de surgencia del manantial termal del departamento de Magdalena.

Tabla 21. Descripción geológica de los manantiales termales en el departamento de Magdalena

Nombre del manantial	I.D Clúster	Municipio	Descripción geológica
Volcán de Ciénaga	MAG-01	Ciénaga	Morfológicamente corresponde a una llanura que no cuenta con afloramientos. Según la plancha 18 a escala 1:100.000, se encuentra en la unidad geológica de Esquistos de Gaira, emerge en cercanías del contacto intrusivo entre rocas plutónicas del batolito de Santa Marta y el Conjunto inferior de la unidad Esquistos de San Lorenz, este contacto incluye una mezcla de ambas litologías o rocas híbridas, además, este emerge sobre el trazo de una Falla inferida de rumbo dextral, en cercanías a la Falla de Santa Marta (INVEMAR-Ingeominas-Ecopetrol-ICP-GEOSEARCH LTDA, 2007).

Fuente: autores

Potencial geotérmico: La estimación del potencial energético se basó en el resultante para el manantial cuya área es estimada en 2 Km^2 (figura 90). El calor almacenado estimado es 0.50 EJ y la potencia 0.06 MWe (Ficha de potencial estimado, Anexo 2).

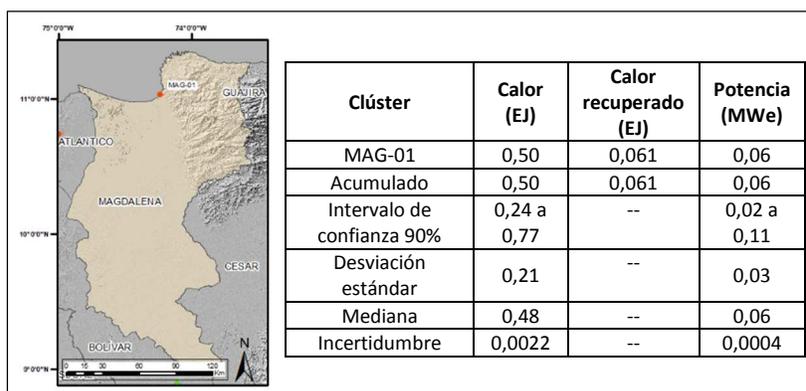


Figura 90. Clústeres tomados como base para el cálculo de potencial y tabla de calor almacenado y potencia eléctrica en el departamento de Magdalena
Fuente: autores

3.2.12 Meta

Localización y generalidades: El departamento de Meta se localiza al este de Colombia, abarcando parte del piedemonte de la Cordillera Oriental y parte de los Llanos Orientales. Su capital es la ciudad de Villavicencio (figura 91). Siete manantiales se localizan en este departamento, distribuidos en los municipios de Villavicencio, Vista Hermosa, Barranca de Upía y San Juan de Arama.

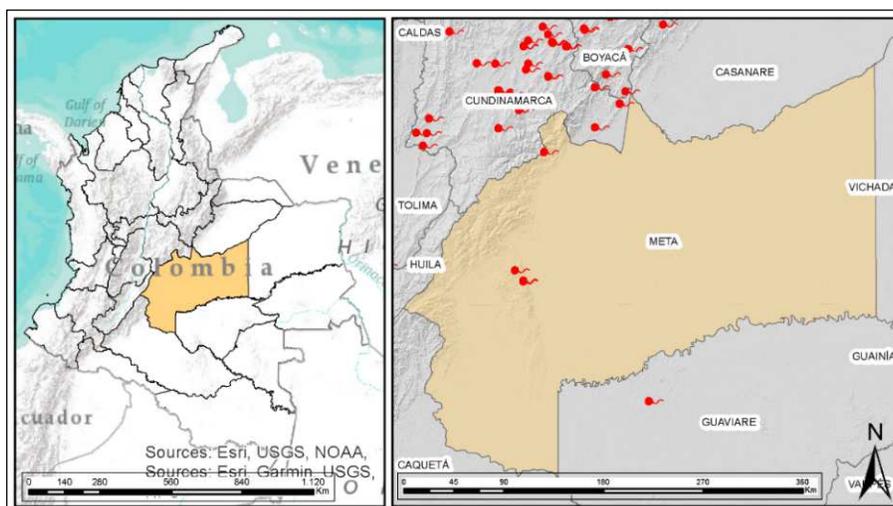


Figura 91. Localización del departamento de Meta y sus manantiales termales
Fuente: autores

Manantiales termales y geología: Los termales Santo Domingo 1 y 2, así como Costa Rica 1 a 3 son del tipo bicarbonatadas sódicas, mientras que Termales y Bosque de Viena, son Cloruradas y sulfatadas, respectivamente. Estos manantiales presentan temperaturas de entre 34 y 49 °C, con pH entre 4.5 y 8.46 y conductividades entre 28 y 1510 $\mu\text{S}/\text{cm}$. La tabla 22 describe la litología y las posibles estructuras en el lugar de surgencia de los manantiales termales.

Tabla 22. Descripción geológica de los manantiales termales en el departamento de Meta

Nombre del manantial	I.D Clúster	Municipio	Descripción geológica
Bosque de Viena	META-01	Villavicencio	El manantial emerge cerca de arcillolitas y limolitas con intercalaciones de caliza de la Formación Pipiral (Pulido <i>et al.</i> , 1998) y los depósitos aluviales de la quebrada Diamante.
Santo Domingo 1 y 2	META-02	San Juan de Arama	Basados en la geología escala 1:100.000 de Unión Temporal G&H (2015), los termales emergen del Grupo Guejar constituido por shales, limolitas y arcillolitas con intercalaciones de areniscas y niveles calcáreos.
Costa Rica 1, 2 y 3	META-03	San Juan de Arama	Emergen sobre depósitos de gravas y clastos de areniscas y rocas metamórficas.
Termales	META-04	Barranca de Upía	Emerge cerca al Río Upía, en la Formación Areniscas del Limbo, conformada por arcillas y limos con intercalaciones de areniscas.

Fuente: autores

Potencial geotérmico: La estimación del potencial energético se basó en la suma de los cuatro grupos de manantiales cuya área total es de 10 Km² (figura 92). El calor almacenado sumó 0.32 EJ y la potencia de 2.54 MWe (Ficha Potencial en anexo 2).

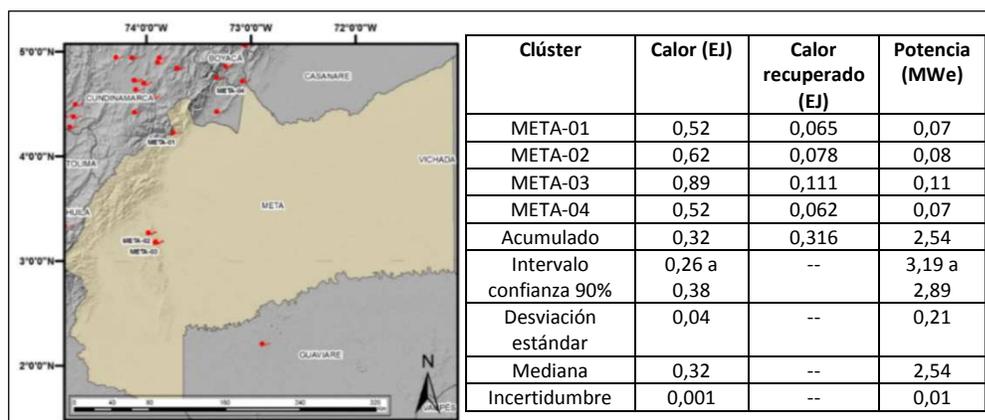


Figura 92. Clústeres tomados como base para el cálculo de potencial y tabla de calor almacenado y potencia eléctrica en el departamento de Meta

Fuente: autores

3.2.13 Nariño

Localización y generalidades: El departamento de Nariño, localizado en la Región Andina, limita al sur con la República de Ecuador (figura 93). Su capital es la ciudad de Pasto. En este departamento se localizan numerosos manantiales termales que forman parte de las áreas geotérmicas de los volcanes Doña Juana- Las Animas, volcán Galeras, volcán Azufral, volcán Cumbal y Complejo volcánico Chiles - Cerro Negro. Aparte de dichos manantiales, solamente uno, el de Las Lajas localizado en el municipio de Ipiales, se encuentra por fuera de los polígonos propuestos como áreas geotérmicas.

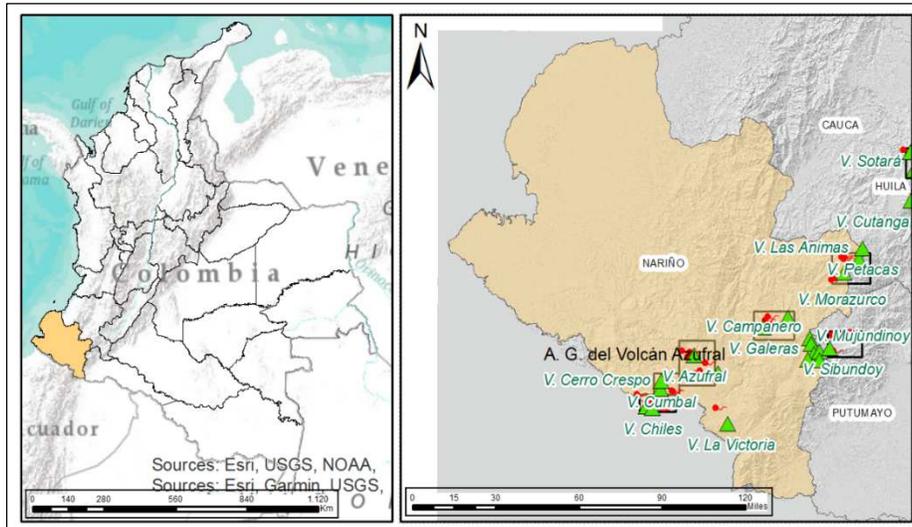


Figura 93. Localización del departamento de Nariño y sus manantiales termales
Fuente: autores

Manantiales termales y geología: El manantial termal de Las Lajas se localiza sobre la margen del río Guaitara. Se trata de un manantial de agua bicarbonatada sódica-magnésica, de 25 °C, pH 7.2 y conductividad eléctrica de 302 mS/cm.

Las principales características geológicas del punto de emergencia del manantial son descritas en la tabla 23.

Tabla 23. Descripción geológica del manantial termal en el departamento de Nariño

Nombre del manantial	ID Clúster	Municipio	Descripción geológica
Las Lajas	NAR-1	Ipiales	El manantial localizado en la plancha geológica 447 en escala 1:100.000 (Parra y Velásquez, 2003), emerge a través de lavas y piroclastos en el escarpe del cañón del río Guáitara.

Fuente: autores

Potencial geotérmico: El potencial energético del manantial de Las Lajas, cuyo clúster tiene una extensión de 2 km², es de 0.59 EJ de calor almacenado y 0.07 MWe de potencia eléctrica, como se indica en la figura 94.

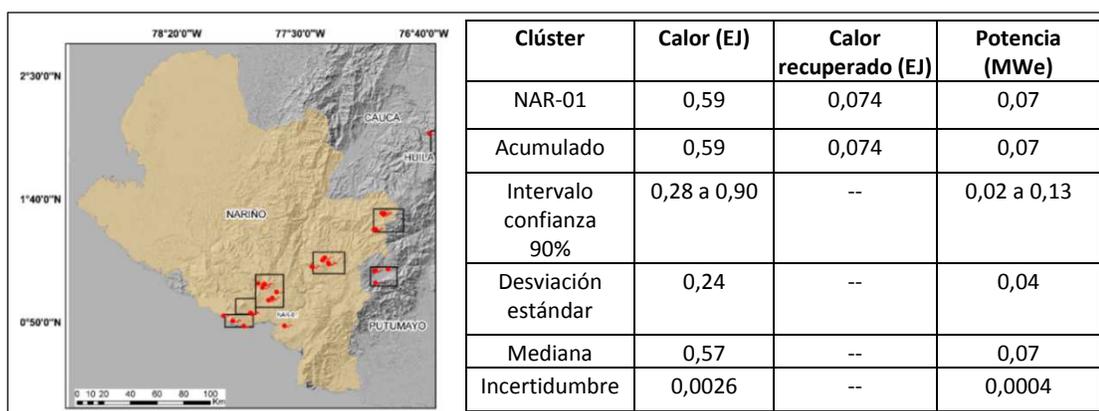


Figura 94. Clústeres tomados como base para el cálculo de potencial y tabla de calor almacenado y potencia eléctrica en el departamento de Nariño

Fuente: autores

3.2.14 Norte de Santander

El departamento de Norte de Santander se ubica al noreste de Colombia, su capital es la ciudad de Cúcuta y forma parte de la región Andina de Colombia. En este departamento se encuentran seis manantiales termales, ubicados en los municipios de Toledo, Bochalema, Labateca, San Cayetano y Cúcuta (figura 95).

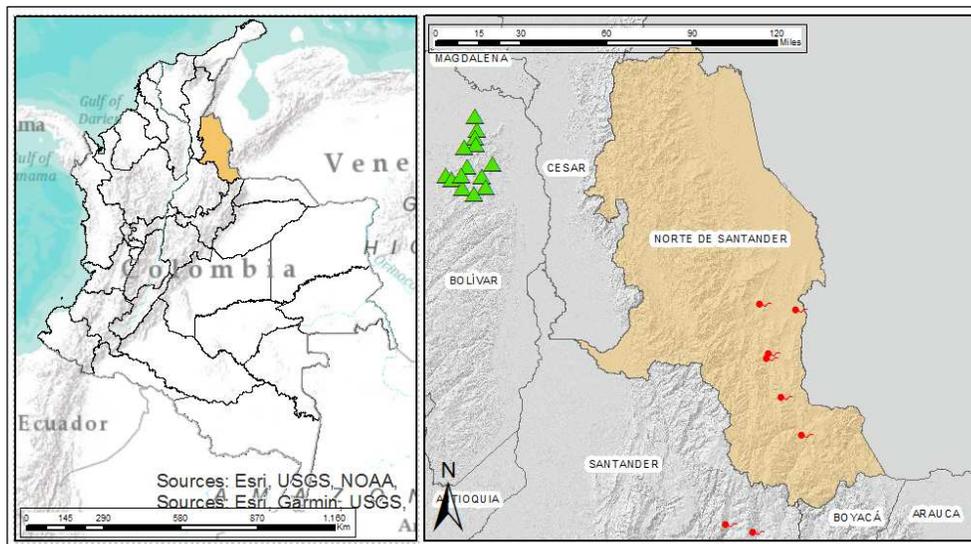


Figura 95. Localización del departamento de Norte de Santander y sus manantiales
 termales
 Fuente: autores

Manantiales termales y geología: Los manantiales termales presentan una clasificación química de las aguas mayormente bicarbonatada sódica para los termales de Toledo, Colegio Seminario Mayor El Raizon y Los termales; sulfatada sódica para el manantial ubicado en Labateca y Clorurada Bicarbonatada Sódica el manantial termal Pozo del Amor. Los manantiales se caracterizan por tener pH entre 3.72 y 7.0, conductividades eléctricas entre 111 y 654 $\mu\text{S}/\text{cm}$ y temperaturas entre 35.1 y 53.8 °C. (Ver Ficha Geoquímica en Anexo 2). La tabla 24 describe la litología y las posibles estructuras en el lugar de surgencia de los manantiales termales del departamento de Norte de Santander.

Tabla 24. Descripción geológica de los manantiales termales en el departamento de Norte de Santander

Nombre del manantial	I.D Clúster	Municipio	Descripción geológica
Pozo del Amor	NSAN-01	San Cayetano	Se localiza sobre la Formación Colón, en cercanías al contacto con la Formación La Luna. El contacto entre estas formaciones cretácicas es concordante. La zona se ve afectada por pliegues anticlinales y sinclinales, así como por fallas menores con tendencia direccional N-S y NNE – SSW, que siguen el direccionamiento de la Falla de Las Mercedes (N – S), al occidente del manantial.
Colegio Seminario Mayor	NSAN-02	Cúcuta	Se encuentra en el flanco noroccidental de anticlinal de Agua Caliente sobre la Formación León, compuesta principalmente por arcillas pizarrosas. En la zona se encuentran pliegues direccionados SW – NE y fallas menores que marcan el despegue de la Falla de Boconó, hacia territorio venezolano.

Estimación preliminar de potencial geotérmico de Colombia

Nombre del manantial	I.D Clúster	Municipio	Descripción geológica
El Raizón	NSAN-03	Bochalema	Se encuentra en las rocas cretácicas de la Formación Uribante en una zona intensamente fallada y plegada. Las rocas de la Formación Uribante aparecen como la litología basal, sobre la cual suprayacen las demás formaciones sedimentarias Cretácicas a recientes. Los termales parecen relacionarse al sistema de fallas Chitagá – Pamplona – Boconó, que comprende las fallas Chitagá, Pamplona, Mercedes, Brahmán, Boconó y Caño Tomas.
Los Termales	NSAN-04		
Toledo	NSAN-05	Toledo	El manantial termal escurre desde un risco al occidente de la quebrada Picapica, en litología cartografiada como Formación Aguardiente y la Formación Capacho. La zona está intensamente plegada y presenta fallas direccionadas N – S y NNW – SSE, relacionables al segmento norte de la Falla de Labateca y la falla Culagá.
Labateca	NSAN-06	Labateca	La ocurrencia termal es en la Formación Carbonera en cercanía al contacto con la Formación Mirador, descritas como lodolitas carbonosas y arenitas. El manantial emerge de arenitas intensamente diaclasadas. La zona de emergencia se encuentra en el flanco oriental del Sinclinal de Culagá. La Falla de Labateca es el rasgo estructural principal en la región. Esta falla es de carácter inverso con dirección N-S a NW – SE e inclinación al occidente y coloca en contacto rocas jurásicas y cretácicas con litologías terciarias.

Fuente: autores

Potencial geotérmico: La estimación del potencial energético se basó en el resultante para seis grupos de manantiales cuya extensión total es de aproximadamente 12 km² (figura 96). El calor almacenado sumo 3.41 EJ y la potencia 0,43 MWe (Ficha potencial. Anexo 2). En general los manantiales del departamento de Norte de Santander tienen aproximadamente igual potencia (≈0.07 MWe).

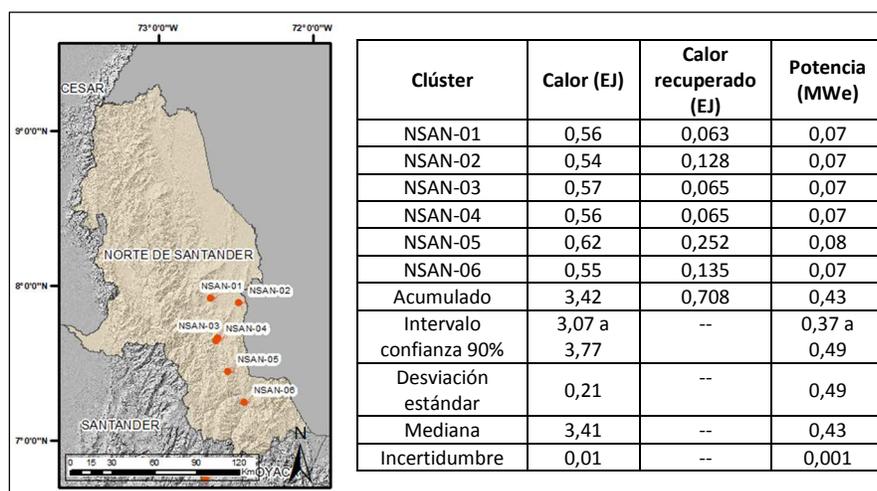


Figura 96. Clústeres tomados como base para el cálculo de potencial y tabla de calor almacenado y potencia eléctrica en el departamento de Norte de Santander

Fuente: autores

3.2.15 Santander

Localización y generalidades: El departamento de Santander se ubica al noreste de Colombia, su capital es Bucaramanga y forma parte de la región Andina. En este departamento se encuentran 3 manantiales termales, ubicados en los municipios de San Andrés, Concepción y San José de Miranda (figura 97).

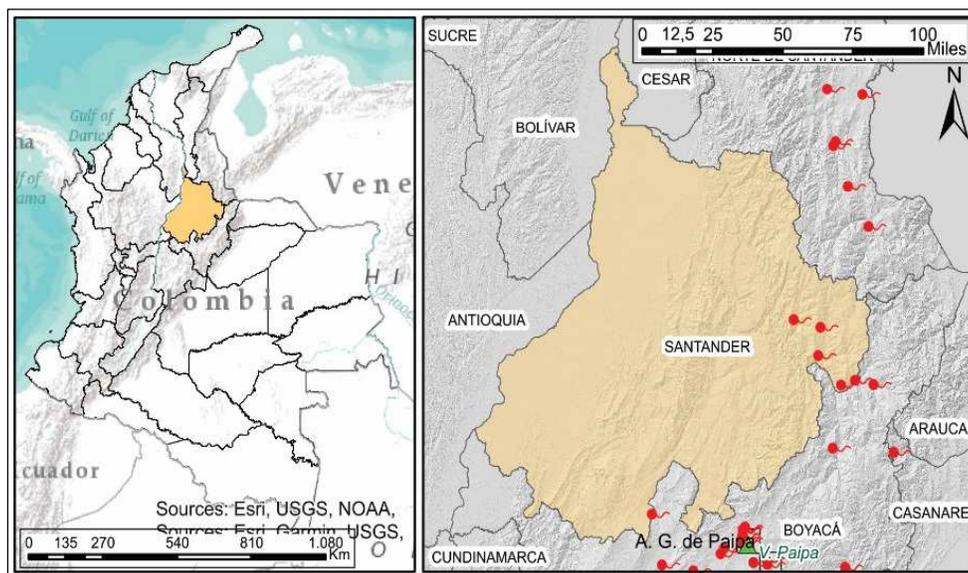


Figura 97. Localización del departamento de Santander y sus manantiales termales

Fuente: autores

Manantiales termales y geología: Los manantiales termales ubicados en el departamento de Santander, están asociados a las fuentes hídricas de los ríos Guacas y Servitá. En cada uno de los sectores de ocurrencia de manantiales, domina un tipo químico de agua; clorurada bicarbonatada sódica para el manantial Aguas de Vichy; bicarbonatada sódica magnésica en el manantial de Aguascalientes, y bicarbonatada clorurada sódica para los Termaltes de San José de Miranda. Los manantiales de este departamento se caracterizan por tener pH neutro entre 6.4 y 6.5, una conductividad eléctrica entre 287 y 2687 $\mu\text{S}/\text{cm}$ y temperaturas moderadas entre 31 y 35 °C. La tabla 25 describe la litología y las posibles estructuras en el lugar de surgencia de los manantiales termales del departamento de Santander.

Tabla 25. Descripción geológica de los manantiales termales en el departamento de Santander

Nombre del manantial	I.D Clúster	Municipio	Descripción geológica
Aguas de Vichy	SAN-01	San Andrés	El manantial Aguas de Vichy, emerge entre depósitos aluviales cerca al contacto con las unidades cretácicas y paleozoicas, a lo largo de estructuras en dirección NNW-SSE (Ward <i>et al.</i> , 1977).
Aguascalientes	SAN-02	Concepción	Emergen entre depósitos aluviales de la cuenca del río Servitá. Estructuralmente, la surgencia de estos manantiales puede estar asociada a la falla de Servitá y otras estructuras en dirección N-S, que afecta la secuencia sedimentaria (Vargas <i>et al.</i> , 1984).
Termales de San José de Miranda	SAN-03	San José de Miranda	

Fuente: autores

Potencial geotérmico: La estimación del potencial energético se basó en el resultante para tres grupos de manantiales cuya extensión total es de 6 Km² (figura 98). El calor almacenado sumó 1.74 EJ y la potencia de 0.21 MWe (Ficha Potencial Estimado en Anexo 2). La potencia eléctrica más elevada es estimada para el grupo SAN-01 conformado por el manantial Aguas de Vichy (0.08 MWe).

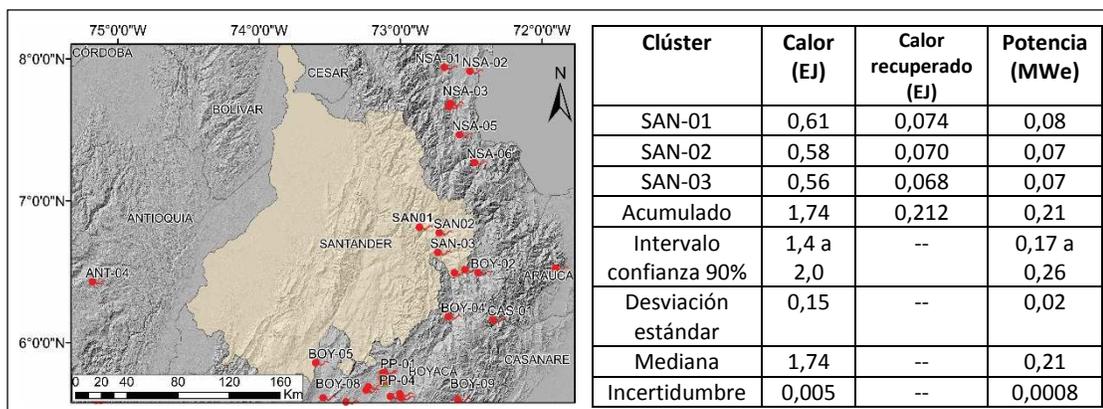


Figura 98. Clústeres tomados como base para el cálculo de potencial y tabla de calor almacenado y potencia eléctrica en el departamento de Santander

Fuente: autores

3.2.16 Tolima

Localización y generalidades: El departamento del Tolima se localiza en la Región Andina, en las Cordilleras Central y Occidental de Colombia (figura 99). Su capital es la ciudad de Ibagué. Además de los múltiples manantiales termales que emergen de su suelo, en las áreas geotérmicas de Cerro Bravo, Villamaría-Termales, Hacienda Granates, Nevado del

Tolima y Cerro Machín, localizadas al NW del departamento, se registran tres manantiales, en el flanco occidental de la Cordillera Oriental, hacia el suroriente de este departamento, en los municipios de Prado (1 manantial) y Alpujarra (2 manantiales).

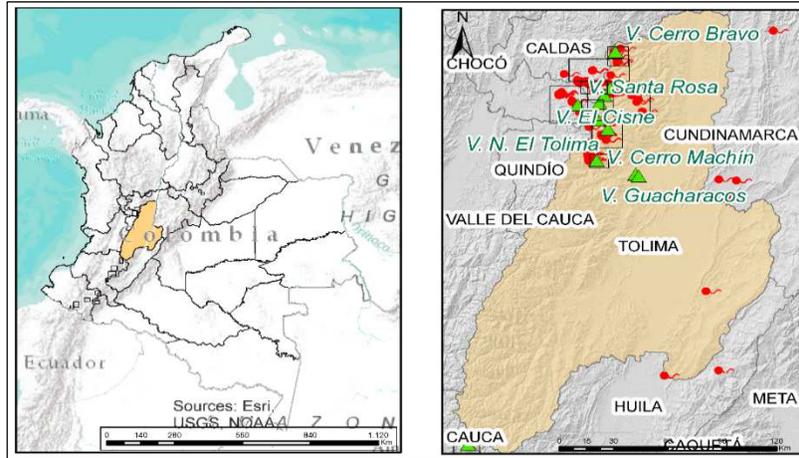


Figura 99. Localización del departamento del Tolima y sus manantiales termales
Fuente: autores

Manantiales termales y geología: El manantial termal de Prado, localizado en la ladera de la represa del río del mismo nombre, es del tipo bicarbonatado cálcico y tiene una temperatura de 31°C, pH de 7.1 y una conductividad eléctrica de 119 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Los manantiales termales de Aguas Calientes I y II, del municipio de Alpujarra, sobre el río Cabrera, son del tipo bicarbonatado sódico, temperatura de 43.5 y 51.5 y conductividad eléctrica de 1157 y 1179 mS/cm . La descripción geológica de los sitios de emergencia de estos manantiales termales es presentada en la tabla 26.

Tabla 26. Descripción geológica de los manantiales termales del departamento del Tolima

Nombre del manantial	ID Clúster	Municipio	Descripción geológica
Prado	TOL-1	Prado	El manantial termal emerge a través de sedimentitas terciarias de la Formación La Seca en la ladera NW de la Cuchilla de Los Cauchos, en alrededores de la zona de convergencia de las fallas La Ruidosa, El Nueve y Los Cauchos (Cossio <i>et al.</i> , 1994).
Aguas Calientes	TOL-02	Alpujarra	Los manantiales, emergen de coluviones cuaternarios que suprayacen sedimentitas Neógenas y Cretácicas. La estructura dominante del área es un cinturón plegado y fallado de tendencia NE-SW que implica al basamento jurásico en fallas invertidas durante el levantamiento de la cordillera oriental y el Valle Superior del Magdalena (Acosta <i>et al.</i> 2002).

Fuente: autores

Potencial geotérmico: La estimación del potencial energético de los manantiales localizados fuera de áreas geotérmicas, en el departamento del Tolima, basada en la sumatoria de la estimación de los dos clústeres cuya extensión total es de 4 Km² (figura 100) es de 1.04 EJ para el calor almacenado y de 0.1 MWe para la potencia eléctrica. (Ficha Potencial en anexo 2).

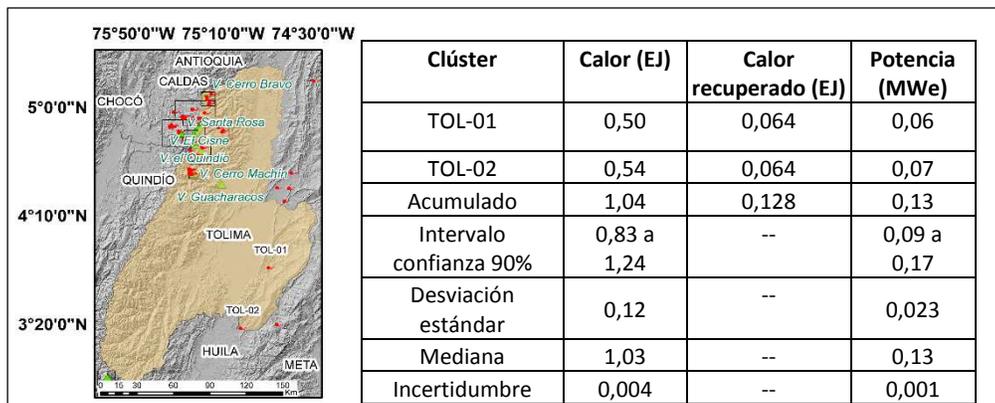


Figura 100. Clústeres tomados como base para el cálculo de potencial y tabla de calor almacenado y potencia eléctrica en el departamento del Tolima

Fuente: autores

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En este trabajo se estimó para Colombia, un calor almacenado de 138.60 EJ y una capacidad eléctrica de 1170.20 MWe, para recursos geotérmicos relacionados con sistemas hidrotermales asociados a sistemas volcánicos.

La mayoría de los recursos hidrotermales de sistemas geotérmicos asociados a volcanes (69.38% = 778 MWe) se concentran en el segmento norte de la Cordillera Central, desde el sistema geotérmico de San Diego hasta el de Cerro Machín.

Los recursos geotérmicos de alta entalpía (> 200°C), que corresponden a Nereidas - Botero Londoño, Cerro Machín, Cerro Bravo, Paramillo de Santa Rosa, San Diego, Caldera del Paletará, Chiles Cerro Negro, Azufral y Paipa, tienen un calor almacenado total de 85.6 EJ y una potencia eléctrica total de 834.6 MWe, que corresponde al 70 % del potencial calculado para todo el territorio.

Para los sistemas geotérmicos no relacionados con volcanes, se calculó un calor almacenado de 49.56 EJ y una potencia eléctrica de 24.95 MWe. Estos sistemas se encuentran en 16 departamentos de las regiones Caribe, Pacífico, Orinoquía y principalmente, en la región Andina. La mayor concentración de calor almacenado y potencia eléctrica corresponde al departamento del Huila, con valores de 7.08 EJ y 12.09 MWe, respectivamente. Estos recursos están relacionados con manantiales termales probablemente controlados por sistemas de fracturas.

Si bien no se cuenta con estudios de exploración suficientes que permitan la identificación de rocas en las que se alojarían los posibles reservorios geotérmicos, la cartografía geológica a escalas 1:100.000 y 1:25.000, sugieren que éstos se alojarían no solo en rocas de permeabilidad primaria como secuencias volcanosedimentarias y piroclásticas, sino que algunos de ellos estarían, al menos parcialmente en lavas, principalmente de composición andesíticas, rocas metamórficas e ígneas de permeabilidad secundaria, como el Complejo Cajamarca en la Cordillera Central y el Grupo Diabásico en la Occidental, así como en batolitos como el del Bosque, Sonsón y La Plata, además de stocks graníticos, como el de Manizales y Florencia, en sistemas de la Cordillera Central.

El potencial geotérmico calculado en este trabajo equivale a cerca del 7% de la capacidad eléctrica instalada estimada en 2018 para Colombia, en 17.720 MWe¹. Recursos

¹ Informe mensual de variables de generación y del mercado eléctrico colombiano – agosto de 2018. UPME. Disponible en http://www.siel.gov.co/portals/0/generacion/2018/Informe_de_variables_Ago_2018.pdf.

relacionados con manantiales termales por fuera de áreas geotérmicas en donde se estimó una baja capacidad instalada, tendrían un potencial geotérmico, al menos aprovechable en usos directos, como contribución a los objetivos de uso racional y eficiente de la energía.

Las estimaciones del potencial energético realizadas en este trabajo son preliminares y serán actualizadas a medida que aumente el conocimiento de las características de los reservorios geotérmicos, a través de estudios de exploración de superficie y de perforaciones. Dado que la estimación se basó en la presencia de manifestaciones superficiales, no se incluyen sistemas geotérmicos ciegos, posibles recursos de roca seca caliente, ni recursos asociados a cuencas sedimentarias.

La capacidad eléctrica estimada en este trabajo es del mismo orden de magnitud que la calculada por Gawell, Reed y Wright (1999), entre 700 y 1370 MWe. Es probable, sin embargo, que el recurso geotérmico alojado en el subsuelo del territorio colombiano sea mayor al de estas estimaciones, teniendo en cuenta que como se dijo en el párrafo anterior, no se incluyen todos los recursos geotérmicos existentes.

La capacidad eléctrica calculada en este estudio, es significativa frente a la meta de gobierno de alcanzar 1500 MWe, que llegó a 2250 MWe² en las subastas de energías renovables realizadas en el año 2019; es decir que la diversificación de las energías renovables podrían incorporar no solo las fuentes eólica, solar (fotovoltaica) y biogás, sino también la geotérmica cuyas ventajas como fuente altamente confiable e independiente de las condiciones climáticas, la hace competitiva frente a las otras fuentes renovables mencionadas.

² Presidencia 2019, Con nueva subasta, Gobierno Nacional supero en más del 50% la meta en energías renovables. Disponible en <https://id.presidencia.gov.co/Paginas/prensa/2019/Con-nueva-subasta-Gobierno-Nacional-supero-en-mas-del-50-la-meta-en-energias-renovables-191022.aspx>

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Acosta, J. y Ulloa, C. (1999). *Geología del Departamento de Cundinamarca. Memoria escala 1:250.000*. Bogotá: Ingeominas.
- Acosta, J., Guatame, R., Torres, O. y Solano, F. (1999). *Geología de la Plancha 245 - Girardot. Mapa Versión digital Escala 1:100.000*. Bogotá: Ingeominas.
- Acosta, J., Caro, P., Fúquen, J. y Osorno, M. (2002). *Geología de la Plancha 303 - Colombia. Mapa y Memoria*. Bogotá: Ingeominas.
- Alfaro, C., Aguirre, A. y Jaramillo, L. (2002). *Inventario de Fuentes Termales en el parque Nacional Natural los Nevados*. Bogotá: Ingeominas.
- Alfaro, C. (2002a). *Geoquímica del sistema geotérmico de Paipa*. Bogotá: Ingeominas.
- Alfaro, C. (2002b). *Estudio isotópico de aguas del área geotérmica de Paipa*. Bogotá: Ingeominas.
- Alfaro, C., y Jaramillo, L. (2002). *Inventario y Geoquímica de las fuentes termales de Santa Rosa de Cabal (Risaralda)*. Bogotá: Ingeominas.
- Alfaro, C., Velandia, F., Cepeda, H., Pardo, N., Vásquez, L. E. y Espinosa, O. (2005). *Modelo conceptual preliminar del sistema geotérmico de Paipa*. Bogotá: Ingeominas.
- Alfaro, C., Alvarado, I., Quintero, W., Vargas, C. y Briceño, L.A. (2009). *Mapa preliminar de Gradientes Geotérmicos de Colombia*. Bogotá: Ingeominas – ANH.
- Alfaro, C., Ponce, P., Ortiz, I., Monsalve, M., Franco, J., Torres, R. y Gómez, D. (2013). *Modelo Geotérmico Conceptual Integrado del Volcán Azufral*. Bogotá: Servicio Geológico Colombiano.
- Alfaro, C., Ponce, P., Monsalve, M.L., Ortiz, I., Franco, J.V., Ortega, A., Torres, R. y Gómez, D. (2015, abril 19-25). *A preliminary Conceptual Model of Azufral Geothermal System. Colombia*. Proceedings World Geothermal Congress. Melbourne, Australia.

- Alfaro, C., Matiz, J., Rueda, J., Rodríguez, G. F., González, C., Beltrán, M., Rodríguez, G. Z. y Malo, J. (2017). *Actualización del modelo conceptual del área geotérmica de Paipa*. Bogotá: Servicio Geológico Colombiano.
- Almeida, E. (1990). *Alternativas para el desarrollo geotermoeléctrico en la República del Ecuador*. Quito: INECEL.
- Almeida E., Sandoval. G., Panichi. C., Noto. P. y Beilucci. L. (1992). *Modelo geotérmico preliminar de áreas volcánicas del Ecuador, A partir de estudios químicos e isotópicos de manifestaciones termales*. Proceedings of a final research Coordination Meeting. IAEA. Vienna-Austria.
- Alvarado, I., Alfaro, C. y Quintero, W. (2008). *Mapa preliminar de gradientes geotérmicos (Método BHT)*. Bogotá: Ingeominas – ANH.
- Aquater, (1987). *Proyecto Geotérmico Binacional Tufiño-Chiles-Cerro Negro*. Contrato OLADE, ICEL, INECEL.
- Arango, E., Buitrago, A., Cataldi, R., Ferrara, G.C., Panichi, C. y Villegas, V.J. (1970). Preliminary study on the Ruiz geothermal project (Colombia). *Geothermics*, Spec. Iss., 2(1), 43-56.
- Arias, A. y Morales, C. (1999). *Geología del departamento del Cesar*. Bogotá: Ingeominas.
- Assaoulov, S. (1994). *A conceptual model and reservoir assessment for the Mutnovsky Geothermal Field, Kamchatka, Rusia*. Reykjavik, Iceland: Geothermal Training Programme. United Nations University.
- Banco Interamericano de Desarrollo – BID, (2019). Ayuda Memoria CO-G1007. Misión Exploratoria Geotermia.
- Barrero, D. y Vesga, C. (1976). *Geología de la Plancha 226 Líbano. Escala 1:100.000*. Bogotá. Ingeominas.
- Barrera, A. (1998). *Evaluación preliminar de las posibilidades geotérmicas en la región de Iza (Boyacá)*. (Tesis de grado). Universidad Nacional de Colombia. Bogotá.
- Beate, B. y Urquizo, M. (2015, abril 19-25). *Geothermal Country Update for Ecuador: 2010-2015*. Proceedings World Geothermal Congress 2015. Melbourne, Australia.

- Beate, B. y Salgado, R. (2005, Abril 24-29). *Geothermal Country Update for Ecuador. 2000 – 2005*. Proceedings World Geothermal Congress. Antalya. Turquía.
- Beate, B. y Urquizo, M. (2015, Abril 19-25). *Geothermal Country Update for Ecuador: 2015-2015*. Proceedings World Geothermal Congress. Melbourne. Australia.
- Bechon, F. y Monsalve, M. (1991). *Activité Récente Préhistorique du Volcan Azufral (S-W de la Colombie)*. C.R Acad. Serie II.
- Beltrán, M. A. (2015). *Interpretación de anomalías magnetométricas y gravimétricas en el área geotérmica Paipa-Iza*. Bogotá: Servicio Geológico Colombiano.
- Beltrán, M. A. (2016). *Interpretación datos gravimétricos y magnetométricos área de Azufral (Nariño)*. Bogotá: Servicio Geológico Colombiano.
- Beltrán, M. A. (2017). *Interpretación de anomalías magnetométricas y gravimétricas en el área geotérmica del volcán Nevado del Ruiz*. Bogotá: Servicio Geológico Colombiano.
- Bertrami, R., Camacho, A., De Stefanis, L., Medina, T. y Zuppi, G. (1990). *Geochemical and isotopic exploration of the geothermal area of Paipa. Cordillera Oriental. Colombia*. Geothermal investigations with isotope and geochemical techniques in Latin America OIEA: 169-199. Vienna
- Brook, C. A., Mariner, R. H., Mabey, J. R., Swanson, J. R., Guffanti, M. y Muffler, L. J. P. (1978). *Hydrothermal convection systems with reservoir temperatures > 90°C*. En: Muffler, L. J. P., Editor Circular 790: Assessment of geothermal resources of the United States – 1978, Circular 790, U.S. Geological Survey.
- Botero-Gómez. A., Osorio. P., Murcia. H., Borrero. C. y Grajales. J. (2018). *Campo Volcánico Monogenético Villamaría-Termale. Cordillera Central. Andes colombianos (Parte I): Características morfológicas y relaciones temporales. Boletín de Geología. 40, (3), 85 – 102.*
- Buchelli, F. (1986). *Recent volcanic in the Sibundoy valley (Putumayo-Colombia)*. CIAF, (11), N (1-3).
- Buitrago, J., y Terraza, R. (2008). *Geología de la Plancha 228 - Santafé de Bogotá Noreste*. Escala 1:100.000. Bogotá. Ingeominas.

- Cárdenas, J., Nuñez, A. y Fuquen, J., (2003). *Geología de la plancha 388 Pitalito. Memoria Explicativa*. Bogotá: Ingeominas.
- Cepeda, H. y Pardo, N. (2004). *Vulcanismo de Paipa*. Bogotá: Ingeominas.
- Cepeda, H., Murcia, L.A., Monsalve, M.L. y Nuñez, A. (1995). *Volcán Cerro Machín. Departamento de Tolima. Colombia: Pasado. Presente y Futuro*. Popayán: Ingeominas.
- Chancusig, C. G. (2017). *Caracterización de la secuencia litoestratigráfica y de la mineralogía de alteración hidrotermal del Pozo PGT-1 del Proyecto Geotérmico Tufiño – Chiles. Provincia del Carchi*. (Tesis de Grado). Escuela Politécnica Nacional. Quito, Ecuador.
- CHEC (Central Hidroeléctrica de Caldas), Contecol Ltda., Geotérmica Italiana. (1983). *Investigación Geotérmica Macizo Volcánico del Ruiz. VII volúmenes*. Bogotá.
- Cinti, D., Procesi, M., y Poncia, P. P. (2018). Evaluation of the theoretical geothermal potential of inferred geothermal reservoirs within the Vicano-Cimino and the Sabatini Volcanic Districts (Central Italy) by the application of the Volume Method. *Energies*, 11, 1-12. doi: 10.3390/en11010142.
- Ciriaco, A. E., Zarrouk, S. J., y Zakeri, G. (2018, noviembre 14-16). *Probabilistic resource assessment using experimental design and second order proxy model: Rotorua Geothermal System, New Zealand*. Proceedings 40th New Zealand Geothermal Workshop. Taupo, New Zealand.
- Colombia: Ley 1955 de 2019. Plan Nacional de Desarrollo 2018 – 2022 “Pacto por Colombia, Pacto por la Equidad”. Recuperado, 19/07/2020 de <https://www.alcaldiabogota.gov.co/sisjurMantenimiento/normas/Norma1.jsp?i=8414>.
- Correa, A. M. (2009). *Estudio petrográfico, geoquímico y volcanológico para establecer la evolución magmática del complejo volcánico Nevado del Huila. Colombia*. (Tesis Doctoral). Universidad Complutense de Madrid.
- Cossio, U., Rodríguez, G. y Rodríguez, M., (1994). *Geología de la plancha 283. Purificación. Tolima. Memoria Resumida y Mapa*. Ibagué: Ingeominas.

- Diment, W. H., Urban, T. C., Sass, J. H., Marshall, B. V., Munroe, R. J. y Lachenbruch, A. H. (1975). Temperatures and heat contents based on conductive transport of heat. En D.E White and D.L Williams, Editors (Eds.), *Assessment of Geothermal Resources of the United States, 1975*, (pp. 84- 103). Arlington, Geological Survey Circular 726.
- Doveri, M., Lelli, M., Marini, L. y Raco, B. (2010). Revision, calibration and application of the volume method to evaluate the geothermal potential of some recent volcanic areas of Latium, Italy. *Geothermics*, 39, 260-269.
- Duarte, R., Moreno, M., Morales, C. y Villegas H. (2010). *Geología de la Plancha 248 - Girardot. Mapa Versión digital Escala 1:100.000*. Bogotá: Ingeominas.
- Eslava, J. (1992). Perfil altitudinal de la temperatura media del aire en Colombia. *Geofis. Colomb.* 1,37-52. ISSN 0121-2974
- Fabre, A. (1981). *Geología Regional de la Sierra Nevada del Cocuy - Plancha 137. "El Cocuy" Departamento de Boyacá e Intendencia de Arauca. Informe No. 1877*. Bogotá: Ingeominas.
- Fabre, A., (1983). *Geología de la extremidad sur de la Sierra nevada del Cocuy y los alrededores de La Salina y Sacama plancha 153 Chita. Escala 1:100.000 Memoria Explicativa*. Bogotá: Ingeominas.
- Fabre, A., Osorio, M., Vargas, R. y Etayo, F. (1985). *Geología de la Plancha 137 - Cocuy. Mapa escala 1:100.000*. Bogotá: Ingeominas.
- Feininger, T., Barrero, D., Castro, N., Ramirez, O., Lozano, H. y Vesga, J. (1975). *Geología de la plancha 132 Yolombó. Escala 1: 100.000*. Bogotá: Ingeominas.
- Ferreira, P., y Hernández, G. (1988). *Evaluación Geotérmica en el área de Paipa basada en técnicas isotópicas, geoquímica y aspectos estructurales*. (Tesis de grado). Universidad Nacional de Colombia. Bogotá.
- Fontaine, E. (1994). *Évolution volcanologique et géochimique du volcan Azufra. Colombie*. (Tesis de maestría). Amérique du Sud. Université de Montréal.
- Foumier, R. O. (1977). Chemical geothermometers and mixing models for geothermal systems. *Geothermics*, 5, 41-50.

- Fournier, R. O. y Truesdell, A. H. (1973). An empirical Na- 460 K-Ca geothermometer for natural waters. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 37, 1.255-1.275.
- Fúquen, J. A. y Osorno, J. F., (2005). *Geología Regional de la Plancha 190. Chiquinquirá. Memoria Explicativa*. Bogotá: Ingeominas.
- Gawell, K., Reed, M. y Wright, P.M. (1999). Preliminary Report: Geothermal Energy. the potential for clean power from the Earth. *Geothermal Energy Association*.
- Geocónsul, (1992). *Evaluación Geotérmica del Macizo Volcánico del Ruiz. Colombia. Morelia. México: Geocónsul*.
- Geokeri S.A. de C.V. (2019). *Modelo Volumétrico para Evaluar el Potencial de Yacimientos Geotérmicos*. Material de entrenamiento. Servicio Geológico Colombiano. Bogotá.
- GIANG (Grupo de Investigaciones y Aplicaciones Nucleares) – SGC. (2016). *Reporte de Laboratorio “Edades de huellas de fisión del volcán de Paipa”*. Bogotá: Servicio Geológico Colombiano.
- Giggenbach, W.F., (1982). Geothermal mineral equilibria: Geochimica et Cosmochimica. *Acta*, 45(3), 393–410.
- Giggenbach, W.F. (1988). Geothermal solute equilibria. Derivation of Na-K-Mg-Ca geothermometers. *Geochim. Cosmochim. Acta*. 52, 2749-2765.
- Giggenbach, W.F., García, N., Londoño, A., Rodríguez, V, Rojas, G. y Calvache, M. (1990). The chemistry of fumarolic vapor and thermal-spring discharges from the Nevado Del Ruiz volcanic-magmatic-hydrothermal system. Colombia. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 42, 13-39.
- Goldstein, B., Hill, A.J., Long, A., Budd, A.R., Holgate, F. y Malavazos, M. (2009, Febrero 9-11). *Hot rock geothermal energy plays in Australia*. Proceedings, Thirty-Fourth Workshop on Geothermal Reservoir Engineering. Stanford University, Stanford, California.
- González, H. (2001). *Geología de la plancha 206 Manizales y 225 Nevado del Ruiz*. Escala 1:100.000. Ingeominas.

- González-Idárraga, C. y Rodríguez-Rodríguez, G. F., (2017). *Modelo resistivo del área geotérmica de Paipa a partir de datos magnetotelúricos*. Bogotá: Servicio Geológico Colombiano.
- González, H., Zapata, G. y Montoya, D. (2002). *Geología y Geomorfología de la Plancha 428 Túquerres*. Medellín: Ingeominas.
- González, H., Duque, J., Rincón, J., Peláez, C., Suárez, A. y Vélez, W. (2015). *Mapa Geológico de la plancha 138 Tame*. Bogotá: Geominas-Serviminas-Gemi.
- Handoko, B. T. (2010). *Resource assessment of Tompasso Geothermal Field, Indonesia*. Reykjavik, Iceland: Geothermal Training Programme. United Nations University.
- Hiriart, G. (2011). Evaluación de la energía Geotérmica en México. Informe para el Banco Interamericano de Desarrollo y la Comisión Reguladora de Energía. Comisión Reguladora de energía. *Inter-American Development Bank*, 1-167.
- Hiriart, G., Gutiérrez Negrín, L. C., Quijano León, J. L., Ornelas Celis, A., Espíndola, S. y Hernández, I. (2011). Evaluación de la energía Geotérmica en México. Informe para el Banco Interamericano de Desarrollo y la Comisión Reguladora de Energía. Comisión Reguladora de energía. *Inter-American Development Bank*, 167.
- Hurter, S. y Hänel, R. (2002). Atlas of Geothermal Resources in Europe. Publication N° EUR 17877 of the European Commission. Office for Official Publications of the European Communities, Luxembourg, 1-270.
- Iglesias, E.R., Torres, R.J., Martínez-Estrella, J.I. y Reyes-Picasso, N. (2011). Resumen de la evaluación 2010 de los recursos geotérmicos mexicanos de temperatura intermedia a baja. *Geotermia*, col. 24, (2), 39-48.
- Iglesias, E. y Torres, R. (2009). Primera estimación de las reservas geotérmicas de temperatura intermedia a baja en veinte estados de México. *Geotermia*, 22 54-65.
- Ingeominas. (1995a). *Zonificación para usos del suelo en la cuenca del Río Páez*. Popayán: Convenio Ingeominas - Corporación Nasa-Kiwe. Informe interno.
- INVEMAR-Ingeominas-Ecopetrol-ICP-GEOSEARCH LTDA. (2007). *Geología de la plancha 18*. Escala 1:100.000. Ingeominas.

- Japan Consulting Institute, (1983). Feasibility study report of Geothermal Power Plant for Instituto Colombiano de Energía Eléctrica (Electrificadora de Boyacá).
- Kharaka, Y. y Mariner, R., (1989). Chemical geothermometers and their application to formation waters from sedimentary basins. In: Thermal history of Sedimentary Basins. *Springer-Verlag, New York*, 99-117.
- Kharaka, Y.K., Lico, M.S. y Law, L.M. (1982). Chemical geothermometers applied to formation waters, Gulf of Mexico and California Basins. *Am. Assoc. Petrol. Geol. Bull.*, 66, 538-558.
- Lawless, J. V., Ward, M. y Beardsmore, G. (2010). *The Australian Code for Geothermal Reserves and Resources Reporting: Practical Experience*. World Geothermal Congress. Bali, Indonesia.
- López, S., Cañola E., Toro G., Pulgarín B. y Hermelin, M. (2011). Geología del Miembro Chagartón de la Formación Coconucos. *Boletín de Geología*, 33, (1).
- Lund, J. W., y Toth, A. N. (2020). *Direct utilization of Geothermal Energy 2020 Worldwide Review*. Proceedings World Geothermal Congress. Reykjavik, Iceland.
- Martínez, L., Valencia, L., Ceballos, J., Narváez, B., Correa, A., Navarro, S., Murcía, H., Zuluaga, I., Rueda, J y Pardo, N. (2014). *Geología y estratigrafía del complejo volcánico Nevado del Ruiz. Cartografía 1:25.000*. Bogotá-Manizales-Popayán: Servicio Geológico Colombiano.
- Marquínez, G., Rodríguez, Y. y Fuquen, J. (2003). *Memoria de la plancha 365 Coconuco*. Bogotá: Ingeominas.
- Matiz, C., (2020). *Modelo Geológico 3D constreñido por geofísica de campos potenciales del área geotérmica del Volcán Azufra*. Bogotá: Servicio Geológico Colombiano.
- Maya, M., (1992). Catálogo de las dataciones isotópicas en Colombia. *Boletín Geológico*. Ingeominas. 32.1-3,127-187.
- Ministerio de Comercio, Industria y Turismo (Mincomercio). (2013). *Plan de negocios para el subsector de Turismo de Bienestar en Colombia. Programa de transformación productiva*. Recuperado, 8/07/2020 de <https://www.colombiaproduccion.com/CMSPages/GetFile.aspx?guid=80fca027-7c4e-4585-88f7-a349ed5a1a0b>.

Ministerio de Comercio, Industria y Turismo (Minenergía), s.f. *Plan Integral de Cambio climático*. Recuperado, 26/07/2020 de <https://www.minenergia.gov.co/en/plan-integral-cambio-climatico>.

Ministerio de Comercio, Industria y Turismo (Minenergía). (2018). *Transformación Energética. Eficiente, Confiable y Sostenible*. Recuperado, 2/08/2020 de <https://www.minenergia.gov.co/documents/10192/24090708/Transformaci%C3%B3n+Energética.pdf>

Miyazaki, Y., Tsu, H. y Urai, M. (1990). *Nationwide geothermal assessment in Japan by a volume method*. Geological Survey of Japan. Ministry of International Trade and Industry. Tsukuba, Ibaraki, Japan. Procedure 12th New Zealand Geothermal Workshop.

Monsalve, M. L., Rodríguez, G. I., Méndez, R. y Bernal, N. (1998). Geology of the well Nereidas 1. Nevado Del Ruiz Volcano. *Geothermal Resources Council*. (22), 263-268.

Monsalve, M.L., (2000). *Catálogo de las Volcanitas Neógenas de Colombia*. Bogotá: Ingeominas.

Montoya, D., y Reyes, G. (2003). *Geología de la Plancha 209 – Zipaquirá. Escala 1:100.000. Memoria Explicativa*. Bogotá: Ingeominas.

Montoya, D., Numpaque, A., Martín, C. y Alcarcel, F. (2013). *Geología de la Plancha 193 – Yopal. Escala 1:100.000*. Servicio Geológico Colombiano.

Mosquera, D., Marín, P., Vesga, C. y González, H. (1998). *Geología de la Plancha 206 Manizales. Escala 1:100.000*. Ingeominas.

Mosquera, D., Núñez, A. y Vesga, C. (1982). *Geología de Plancha 244. Ibagué. Escala 1:100.000*. Ingeominas.

Muffler, J. P. y Cataldi, R. (1978). Methods for regional assessment of geothermal resources. *Geothermics*, 7.

Muffler, J. P. y Guffanti, M. (1978). Assessment of Geothermal Resources of the United States-1978. En Muffler, L. J. P. (Eds.), Assessment of geothermal resources of the United States-1978. U.S. Geological Survey Circular 790, 1-7.

- Nathenson, M. (1978). Methodology of determining the uncertainty in the accessible geothermal-resource base of identified hydrothermal convection systems. U. S. Geological Survey. *Open File Report 78-1003*, 1-54.
- Navarro, M., y Salazar, G. (1989). *Geología de la Plancha 114 (Dabeiba) y Parte W de la 115 (Toledo). Memoria explicativa del mapa escala 1:100.000*. Medellín: Ingeominas.
- Nicholson, K. (1993). Geothermal fluids. Chemistry and Exploration techniques. *Springer-Verlag. Berlin*.
- Núñez, A. (2003). *Reconocimiento geológico regional de las planchas 411 La Cruz. 412 San Juan de Villalobos. 430 Mocoa. 431 Piamonte. 448 Monopamba. 449 Orito y 465 Churuyaco*. Bogotá: Ingeominas.
- Núñez, A. (2002). *Geología de la Plancha 411 La Cruz*. Escala 1:100.000. Ingeominas.
- Organización Latinoamericana de Energía (OLADE) y Banco Interamericano de Desarrollo (BID). (1993). *Guía para la evolución del potencial energético en zona geotérmicas durante las etapas previas a la factibilidad*. Recuperado de <http://biblioteca.olade.org/opac-tmpl/Documentos/old0399.pdf>.
- Organización Latinoamericana de Energía (OLADE) y Geotérmica Italiana. (1982). Estudio de Reconocimiento de los Recursos Geotérmicos de la República de Colombia. 7 volúmenes. *Pisa*.
- Organización Latinoamericana de Energía (OLADE). (1983). *Estado actual de la geotermia en América Latina. Síntesis por países y trabajos técnicos*. Seminario latinoamericano sobre exploración geotérmica. Quito Ecuador.
- Organización Latinoamericana de Energía (OLADE) y Comisión Económica Para América Latina (CEPAL). (1981). *Metodología de exploración geotérmica: fase de factibilidad*. Serie Documentos OLADE N° 5.
- Ortiz, A. (2017). *Caso Exitoso en Colombia del aprovechamiento de la geotermia de baja entalpía para climatización*. Memorias. Reunión Nacional de Geotermia. Manizales.

- Osorio, P., Botero-Gómez, L., Murcia, H., Borrero, C. y Grajales, J. (2018). Campo Volcánico Monogenético Villamaría – Termales. Cordillera Central. Andes colombianos (Parte II): Características composicionales. *Boletín de Geología*, 40, (3) 103-123.
- Parra, E., y Velásquez, M. (2003). *Geología de la Plancha 447 Ipiales. 447 Bis Tallambí. Mapa 1:100.000 y Memoria Explicativa*. Bogotá: Ingeominas.
- Pastor, M. S., Fronda, A. D., Lazaro, V. S. y Velásquez, N. B. (2010, abril 25-29). *Resource Assessment of Philippine Geothermal Areas*. Proceedings World Geothermal Congress. Bali, Indonesia.
- Patiño, A., Fuquen, J., Ramos, J., Pedraza, A., Ceballos, L., Pinzón, L., Jerónimo, Y., Álvarez, L. y Torres, A. (2011). *Geología de la Plancha 247. Bogotá Sur Este (Cáqueza)*. Escala 1:100.000. Ingeominas.
- Pulgarín, B. (2000). *Depósitos masivos del Pleistoceno Tardío, asociados al colapso del flanco sur del volcán Nevado del Huila (Colombia)*. (Tesis de Maestría). Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM). Programa de Postgrado en Ciencias de La Tierra. México.
- Pulgarín, B., Tamayo, M., Valencia, J., Correa, A., Cruz, Y. y Méndez, R. (2017). *Geología y estratigrafía del complejo volcánico Paramillo de Santa Rosa. Cartografía 1:25.000. Informe*. Bogotá-Popayán-Manizales: Servicio Geológico Colombiano.
- Pulido, O., Gómez, L. y Marín, R. (1998). *Geología de la plancha 266 Villavicencio*. Escala 1: 100.000. Ingeominas.
- Quinao, J. y Zarrouk, S. (2014, noviembre 24-26). *A review of the volumetric stored-heat resource assessment: One method, different results*. Proceedings 36 th New Zeland Geothermal Workshop. Auckland, New Zealand.
- Renzoni, G. y Rosas, H. (1998). *Geología de la Plancha 191 - Tunja*. Escala 1:100.000. Ingeominas.
- Reyes, G. Zapata, G. (1998). *Geología de la Plancha 24 Sabanalarga*. Escala 1:100.000. Ingeominas.

- Rincón, M., y Romero, F. (1990). *Evaluación geovulcanológica en el área de interés geotérmico de Iza (Boyacá)*. (Tesis de grado). Departamento de Geociencias. Universidad Nacional de Colombia. Bogotá.
- Robertson, K., Flórez, A., y Ceballos, J. L. (2002.) Geomorfología volcánica, actividad reciente y clasificación en Colombia. *Cuadernos de geografía, XI(1-2)*.
- Rodríguez, M. (2011). *Colombia avanza en la explotación de la energía de la tierra*. Recuperado, 8/03/2020 de <https://blogs.iadb.org/sostenibilidad/es/colombia-avanza-en-la-explotacion-de-la-energia-de-la-tierra/>.
- Rodríguez, G., Zapata, G. y Gómez, J. (2012). *Geología de la plancha 114 Dabeiba*. Escala 1: 100.000. Ingeominas.
- Rojas, N., Monsalve, M. L., Velandia, F., Pintor, I. y Martínez, L. (2009). *Geología del Domo Volcánico de Iza y sus alrededores. Sector Pesca e Iza. Memoria Explicativa*. Bogotá: Ingeominas.
- Rodríguez-Rodríguez, G. F. (2018). *Modelos 1D, 2D y 3D de la estructura resistiva del subsuelo a partir de registros magnetoteléuricos para el área geotérmica del volcán Azufra*. Bogotá: Servicio Geológico Colombiano.
- Rueda, H. (2005). *Erupciones plinianas del Holoceno en el volcán Cerro Machín. Colombia. Estratigrafía, petrografía y dinámica eruptiva*. (Tesis de maestría). Universidad Nacional Autónoma de México. México D.F.
- Rueda-Gutiérrez, J., Rodríguez, G. (2016). *Geología del área geotérmica de San Diego*. Bogotá: Servicio Geológico Colombiano.
- Rueda, J. (2017). *Cartografía de los cuerpos dómicos del área geotérmica de Paipa*. Bogotá: Servicio Geológico Colombiano.
- Sanyal, S. K., Hennerberg, R. C., Kelin, C.W. y Decker, R. W. (2002). A methodology for assessment of geothermal energy reserves associated with volcanic systems. *Geothermal Resources Council Transactions, 26, 22-25*.
- Sass, J. H. y Lachenbruch, A. H. (1978). Heat flow and conduction-dominated thermal regimens. En Muffler, L. J. P. (Eds.), *Assessment of geothermal resources of the United States-1978*. U.S. Geological Survey Circular 790. 8-11.

- Servicio Geológico Colombiano (SGC). (2013). *Plan estratégico del Conocimiento Geológico del Territorio Colombiano. 2013-2023*. Bogotá: Servicio Geológico Colombiano.
- Servicio Geológico Colombiano (SGC). (2015). *Inventario Nacional de Manifestaciones Hidrotermales*. Recuperado, 25/07/2020 de <http://hidrotermales.sgc.gov.co/inventermales/>.
- Servicio Geológico Colombiano (SGC). (2018). *Informe técnico-operativo de la actividad volcánica del segmento volcánico norte de Colombia. Dirección de Geoamenazas*. Manizales.
- Servicio Geológico Colombiano (SGC). (2020). Generalidades Volcán Machín. Recuperado, 15/07/2020 de <https://www2.sgc.gov.co/sgc/volcanes/VolcanCerroMachin/Paginas/generalidades-volcan-cerro-machin.aspx>.
- Silverio, G. (2002). *Geología de la plancha 343 Silvia*. Escala 1:100.000. Ingeominas.
- Sinclair Knight Merz Limited. (2002). Resource capacity estimates for high temperature geothermal systems in the Waikato Region. *Environment Waikato.788454*. ISSN: 1172-4005.
- Sinchi, (2016). *Zonificación ambiental y ordenamiento de la reserva forestal de la Amazonía, creada mediante la Ley 2ª de 1959, en el departamento de Guaviare. Informe final. Versión 2.0. del convenio 047 de 2009*. Bogotá: Instituto Amazónico de Investigaciones Científicas SINCHI. Grupo de Gestión de Información Ambiental y Zonificación del Territorio: Amazonia Colombiana - GIAZT.
- Smith, R. L, Shaw, H. R., Luedke, R. G. y Russell, S. L. (1978). Comprehensive tables giving physical data and thermal energy estimates for young igneous systems of the United States U. S. Geological Survey. Open-File Report 78-925.
- Smith, R. L. y Shaw, H. R. (1975). Igneous-related geothermal systems. En White. D.E., and Williams. D. L. (Eds.), *Assessment of geothermal resources of the United States-1975: U. S. Geological Survey Circular 726*.
- Smith, R. L. y Shaw, H. R. (1978). Igneous-related geothermal systems. En Muffler. L. J. P. (Eds.), *Assessment of geothermal resources of the United States-1978: U. S. Geological Survey Circular 729*.

- Terraza, R., Moreno, G., Buitrago, A. y Montoya, D. M. (2010). *Geología de la Plancha 210 Guateque*. Escala 1:100.000. Ingeominas.
- Thouret, J., Murcia A., Salinas, R. y Perignon, V. (1985). *Aspectos volcano-estructurales y dinamismo eruptivo reciente de los volcanes Cerro Bravo y Nevado del Tolima, Cordillera Central de Colombia*. Medellín: Ingeominas.
- Thouret, J., Cantagrel, J., Robin, C., Murcia, A., Salinas, R. y Cepeda, H. (1995). Quaternary eruptive history and hazard-zone model at Nevado del Tolima and Cerro Machin Volcanoes. Colombia. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*. 66. 397-426.
- Torres, M. (1997). Aportes al conocimiento de la Geología y la estratigrafía de la Formación Popayán, Departamento del Cauca. *Revista Novedades Colombianas. Museo de Historia Natural, Universidad de Cauca. Vol 7*.
- Ulloa, C., Camacho, R., y Escobar, R. (1975). *Geología de la Plancha 210 - Guateque*. Escala 1:100.000. Ingeominas.
- Ulloa, C., Rodríguez, E., Acosta, J. y Martínez, J. (1998). *Geología de la Plancha 227 - La Mesa*. Escala 1:100.000. Ingeominas.
- Ulloa, C., Rodríguez, E. y Rodríguez, G. (2003). *Geología de la Plancha 172 Paz de Río*. Escala 1:100.000. Ingeominas.
- Ulloa, C. y Rodríguez, E. (1983). *Geología de la plancha 211 Tauramena*. Ingeominas.
- Ulloa, C., Camacho, G., y Escobar, R. (1975). *Cuadrángulo K-12 Guateque: Geología de las planchas 210 Guateque y plancha 229 Gachalá. Escala 1:100.000. Memoria explicativa*. Bogotá: Ingeominas.
- Ulloa, C., Rodríguez, E., y Renzoni, G. (1976). Geología de las Plancha 171 Duitama. 191 Tunja. 211 Tauramena y 230 Monterrey. Escala 1:100.000. Bogotá: Ingeominas.
- Ulloa, C., y Rodríguez, E. (1978). *Reseña Explicativa del Mapa Geológico Preliminar Plancha 170 Vélez*. Bogotá: Ingeominas.
- Ulloa, C. y Rodríguez, E. (1984). *Geología de la Plancha 170 – Vélez*. Escala 1:100.000. Ingeominas.

- Unión Temporal G y H. (2015). *Mapa geológico de la plancha 304. San Juan de Arama*. Escala 1: 100.000.
- Van Vees, J. D., Boxem, T., Angelino, L., y Duma, P. (2013). *A prospective study on the geothermal potential in the EU*. Geoelec. European Union. Zenedo.
- Vargas, R., Arias, A., Jaramillo, L. y Téllez, N. (1981). *Geología del Cuadrángulo I – 13 Málaga. Geología Plancha 152 Soatá. Escala 1:100.000. Memoria Explicativa*. Bogotá: Ingeominas.
- Vargas, R., Arias, A., Jaramillo, L., y Téllez, N. (1987). *Geología de la Plancha 152 - Soata*. Escala 1:100.000. Ingeominas.
- Vargas, R., Arias, A., Jaramillo, L., y Tellez, N. (1984). *Geología de la Plancha 136 Málaga*. Escala 1:100.000. Ingeominas.
- Velandia, F. (2005). *Interpretación de Transcurrencia de las Fallas Soápaga y Boyacá a partir de Imágenes Landsat Tm*. Bogotá: Ingeominas.
- Velandia, F. (2003). *Cartografía Geológica y Estructural Sector sur del Municipio de Paipa*. Bogotá: Ingeominas.
- Velandia, F., y Cepeda, H., (2004). *Geología Sector Sur del Municipio de Paipa (Boyacá). Planchas 171 y 191. 1:25.000*. Bogotá: Ingeominas.
- Velásquez, M., y Parra, E. (2002). *Geología de la plancha 447 Ipiales y 447 bis- Tallambí*. Escala 1: 100.000. Ingeominas.
- Ward, D.E., Goldsmith, R., U.S. Geological Survey., Cruz, J., Jaramillo, L., y Vargas, R. (1977). *Geología de la Plancha 121 Cerrito*. Escala 1:100.000. Ingeominas.
- Whit, D.E., y Williams, D. L., (1975). Assessment of geothermal resources of the United States-1975. En White. D. E., and Williams. D. L. (Eds.), U. S. Geological Survey Circular 726.
- Williams, C.F. (2014). Evaluating the volume method in the assessment of identified geothermal resources. *GRC Transactions*, 38, 967-974.

- Williams, C.F., Reed, M.J. y Mariner, R.H. (2008). A review of methods applied by the U.S. Geological Survey in the assessment of identified geothermal resources. U. S. *Geological Survey. Open File Report 2008-1296, 1-30.*
- Williams, C.F., Reed, M.J., Mariner, R.H., De Angelo, J. y Galanis, S.P., Jr. (2008b). Assessment of moderate- and high-temperature geothermal resources of the United States. U.S. *Geological Survey Fact Sheet 2008- 3082. 4.*
- Zapata, G. (2003). *Geología De Las Planchas 163 Nuquí. 164 Quibdó. 183 Coquí y 184 Lloró Departamento Del Chocó. Memoria Explicativa.* Bogotá: Ingeominas.
- Zapata, H. J. (2015). Propuesta de una hoja de ruta para el fomento del desarrollo de proyectos Geotérmicos”. Programa Regional de Entrenamiento Geotérmico (PREG). Universidad de El Salvador.
- Zuluaga, C. A. (2012). *Modelo conceptual del Sistema hidrotermal – magmático del Nevado del Ruiz. Programa estratégico para la investigación y modelamiento del Sistema hidrotermal-magmático en áreas con potencial geotérmico localizadas en el flanco noroccidental del Volcán Nevado del Ruiz. Colombia.* Bogotá: Colciencias. Isagen. Ingeominas. Universidad Nacional de Colombia.

ANEXOS

Anexo 1. Fichas de las Áreas Geotérmicas (Digital)

Ficha geoquímica, geológica y potencia, para cada una de las 21 áreas geotérmicas

Anexo 2. Fichas de los Departamentos (Digital)

Ficha geoquímica y potencia, para cada uno de los 16 departamentos.

Anexo 3. Mapa preliminar de potencia y calor geotérmico de Colombia

Mapa de Colombia representando los valores de potencia y calor de las 21 áreas geotérmicas y los 16 departamentos con presencia de manantiales termales.

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Complejo volcánico Chiles – Cerro Negro	10
Figura 2. Volcán Azufral	12
Figura 3. Complejo de domos Alto Los Godos. Volcán de Paipa	13
Figura 4. Cráter Arenas. Volcán Nevado del Ruiz	15
Figura 5. Paramillo de Santa Rosa	18
Figura 6. Volcán Cerro Machín	19
Figura 7. Volcán Maar de San Diego	20
Figura 8. Volcán Nevado del Tolima	22
Figura 9. Volcán Cerro Bravo	23
Figura 10. Área Geotérmica Villamaria – Termales	24
Figura 11. Laguna del Otún	25
Figura 12. Volcanes Doña Juana, Sotará y Puracé	26
Figura 13. Volcanes Cumbal y Galeras	28
Figura 14. Nevado del Huila	28
Figura 15. Criptodomo de Iza	29
Figura 16. Mapa preliminar de gradientes geotérmicos	31
Figura 17. Ejemplo de densidad de probabilidad para la variable temperatura	34
Figura 18. Flujograma de trabajo para estimación de calor almacenado y potencia eléctrica	45
Figura 19. Estimación de áreas para calculo del calor almacenado dependiendo del número de manantiales contenidos en los Clústeres	47
Figura 20. Ilustración del volumen asumido para el reservorio a partir manantiales individuales o clústeres de manantiales	48
Figura 21. Diagrama de flujo metodología utilizada para selección de temperaturas de manantiales o clústeres de manantiales	50
Figura 22. Ficha Geoquímica	52
Figura 23. Ficha Geológica	53
Figura 24. Ficha Potencial	54
Figura 25. Localización de las áreas geotérmicas (polígonos negros) y bloques geotérmicos (polígonos amarillos)	56
Figura 26. Localización del área geotérmica del Paipa	60
Figura 27. Clústeres tomados como base para el cálculo de potencial y tabla de calor almacenado y potencia electrica en el área geotérmica de Paipa	62
Figura 28. Reservorio en Paipa	62
Figura 29. Localización del área geotérmica de Iza	63
Figura 30. Clústeres tomados como base para el cálculo de potencial y tabla de calor almacenado y potencia eléctrica en el área geotérmica de Iza	65
Figura 31. Localización del área geotérmica de San Diego	66

Figura 32. Clústeres tomados como base para el cálculo de potencial y tabla de calor almacenado y potencia eléctrica en el área geotérmica de San Diego	68
Figura 33. Localización del área geotérmica del Cerro Bravo	69
Figura 34. Clústeres tomados como base para el cálculo de potencial y tabla de calor almacenado y potencia eléctrica en el área geotérmica del volcán Cerro Bravo	70
Figura 35. Localización área geotérmica Villamaría Termales	71
Figura 36. Clústeres tomados como base para el cálculo de potencial y tabla de calor almacenado y potencia eléctrica en el área geotérmica de Villamaría – Termales	72
Figura 37. Localización área geotérmica Nereidas-Botero Londoño	73
Figura 38. Clústeres tomados como base para el cálculo de potencial y tabla de calor almacenado y potencia eléctrica en el área geotérmica de Nereidas – Botero Londoño	75
Figura 39. Localización área geotérmica Hacienda Granates	75
Figura 40. Clústeres tomados como base para el cálculo de potencial y tabla de calor almacenado y potencia eléctrica en el área geotérmica Hacienda Granates	77
Figura 41. Localización área geotérmica Santa Rosa	78
Figura 42. Clústeres tomados como base para el cálculo de potencial y tabla de calor almacenado y potencia eléctrica en el área geotérmica de Santa Rosa	79
Figura 43. Localización del área geotérmica Laguna Otún	80
Figura 44. Clústeres tomados como base para el cálculo de potencial y tabla de calor almacenado y potencia eléctrica en el área geotérmica de la Laguna de Otún	81
Figura 45. Localización del área geotérmica del volcán Nevado del Tolima	82
Figura 46. Clústeres tomados como base para el cálculo de potencial y tabla de calor almacenado y potencia eléctrica en el área geotérmica del volcán Nevado del Tolima	84
Figura 47. Localización del área geotérmica del volcán Cerro Machín	84
Figura 48. Clústeres tomados como base para el cálculo de potencial y tabla de calor almacenado y potencia eléctrica en el área geotérmica del volcán Cerro Machín	86
Figura 49. Localización del área geotérmica del volcán del Huila	86
Figura 50. Clústeres tomados como base para el cálculo de potencial y tabla de calor almacenado y potencia eléctrica en el área geotérmica del volcán Nevado del Huila	88
Figura 51. Localización del área geotérmica de la Caldera Gabriel López	89
Figura 52. Clústeres tomados como base para el cálculo de potencial y tabla de calor almacenado y potencia eléctrica en el área geotérmica de la Caldera Grabriel López	90

Figura 53. Localización del área geotérmica de la Caldera del Paletará	91
Figura 54. Clústeres tomados como base para el cálculo de potencial y tabla de calor almacenado y potencia eléctrica en el área geotérmica de la Caldera del Paletará	92
Figura 55. Localización del área geotérmica Sotará – Sucubún	93
Figura 56. Clústeres tomados como base para el cálculo de potencial y tabla de calor almacenado y potencia eléctrica en el área geotérmica Sotará – Sucubún	94
Figura 57. Localización del área geotérmica Doña Juana – Las Animas	95
Figura 58. Clústeres tomados como base para el cálculo de potencial y tabla de calor almacenado y potencia eléctrica en el área geotérmica Doña Juana – Las Animas	97
Figura 59. Localización del área geotérmica Galeras – Morasurco	97
Figura 60. Clústeres tomados como base para el cálculo de potencial y tabla de calor almacenado y potencia eléctrica en el área geotérmica Galeras – Morasurco	99
Figura 61. Localización del área geotérmica del volcán Sibundoy	100
Figura 62. Clústeres tomados como base para el cálculo de potencial y tabla de calor almacenado y potencia eléctrica en el área geotérmica de Sibundoy	102
Figura 63. Localización del área geotérmica del Azufral	103
Figura 64. Clústeres tomados como base para el cálculo de potencial y tabla de calor almacenado y potencia eléctrica en el área geotérmica del volcán Azufral	105
Figura 65. Localización del área geotérmica del volcán Cumbal	106
Figura 66. Clústeres tomados como base para el cálculo de potencial y tabla de calor almacenado y potencia eléctrica en el área geotérmica del volcán Cumbal	107
Figura 67. Localización de área geotérmica Chiles- Cerro Negro	108
Figura 68. Clústeres tomados como base para el cálculo de potencial y tabla de calor almacenado y potencia eléctrica en el área geotérmica de Chiles- Cerro Negro	110
Figura 69. Localización del departamento de Antioquia y sus manantiales termales	111
Figura 70. Clústeres tomados como base para el cálculo de potencial y tabla de calor almacenado y potencia eléctrica en el departamento de Antioquia	112
Figura 71. Localización del departamento de Arauca y sus manantiales termales	112
Figura 72. Clústeres tomados como base para el cálculo de potencial y tabla de calor almacenado y potencia eléctrica en el departamento de Arauca	113
Figura 73. Localización del departamento de Atlántico y sus manantiales termales	114
Figura 74. Clústeres tomados como base para el cálculo de potencial y tabla de calor almacenado y potencia eléctrica en el departamento de Atlántico	115
Figura 75. Localización del departamento de Boyacá y sus manantiales termales	115

Figura 76. Clústeres tomados como base para el cálculo de potencial y tabla de calor almacenado y potencia eléctrica en el departamento de Boyacá	118
Figura 77. Localización del departamento de Casanare y sus manantiales termales	119
Figura 78. Clústeres tomados como base para el cálculo de potencial y tabla de calor almacenado y potencia eléctrica en el departamento de Casanare	120
Figura 79. Localización del departamento del Cesar y su manantial termal	121
Figura 80. Clústeres tomados como base para el cálculo de potencial y tabla de calor almacenado y potencia eléctrica en el departamento del Cesar	122
Figura 81. Localización del departamento de Chocó y sus manantiales termales	122
Figura 82. Clústeres tomados como base para el cálculo de potencial y tabla de calor almacenado y potencia eléctrica en el departamento del Chocó	124
Figura 83. Localización del departamento de Cundinamarca y sus manantiales termales	124
Figura 84. Clústeres tomados como base para el cálculo de potencial y tabla de calor almacenado y potencia eléctrica en el departamento de Cundinamarca	127
Figura 85. Localización del departamento Guaviare y sus manantiales termales	128
Figura 86. Clústeres tomados como base para el cálculo de potencial y tabla de calor almacenado y potencia eléctrica en el departamento de Guaviare	129
Figura 87. Localización del departamento del Huila y sus manantiales termales	129
Figura 88. Clústeres tomados como base para el cálculo de potencial y tabla de calor almacenado y potencia eléctrica en el departamento del Huila	131
Figura 89. Localización del departamento del Magdalena y su manantial termal	132
Figura 90. Clústeres tomados como base para el cálculo de potencial y tabla de calor almacenado y potencia eléctrica en el departamento de Magdalena	133
Figura 91. Localización del departamento de Meta y sus manantiales termales	133
Figura 92. Clústeres tomados como base para el cálculo de potencial y tabla de calor almacenado y potencia eléctrica en el departamento de Meta	134
Figura 93. Localización del departamento de Nariño y sus manantiales termales	135
Figura 94. Clústeres tomados como base para el cálculo de potencial y tabla de calor almacenado y potencia eléctrica en el departamento de Nariño	136
Figura 95. Localización del departamento de Norte de Santander y sus manantiales termales	137
Figura 96. Clústeres tomados como base para cálculo de potencial y tabla de calor almacenado y potencia eléctrica en el departamento de Norte de Santander	138
Figura 97. Localización del departamento de Santander y sus manantiales termales	139
Figura 98. Clústeres tomados como base para el cálculo de potencial y tabla de calor almacenado y potencia eléctrica en el departamento de Santander	140

Figura 99. Localización del departamento del Tolima y sus manantiales termales	141
Figura 100. Clústeres tomados como base para el cálculo de potencial y tabla de calor almacenado y potencia eléctrica en el departamento del Tolima	142

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Áreas con recursos geotérmicos hidrotermales identificadas en Colombia	10
Tabla 2. Valores de las variables aleatorias utilizadas para estimar calor almacenado y potencia eléctrica en referencias citadas	41
Tabla 3. Estimaciones de Potencial geotérmico para los años 2020, 2030 y 2050 en los países de la UE e Islandia, Turquía y Suiza	43
Tabla 4. Valores usados para la estimación del calor almacenado	46
Tabla 6. Valores usados para la estimación de la potencia eléctrica	51
Tabla 7. Eficiencia de conversión en función de la temperatura del fluido geotérmico	51
Tabla 8. Áreas y bloques geotérmicos	57
Tabla 9. Calor almacenado y potencia eléctrica en áreas geotérmicas definidas	58
Tabla 10. Calor almacenado y potencia eléctrica en departamentos con presencia de manantiales termales	59
Tabla 11. Descripción geológica de los manantiales termales del departamento de Antioquia	111
Tabla 12. Descripción geológica del manantial termal en el departamento de Arauca	113
Tabla 13. Descripción geológica del manantial termal en el departamento de Atlántico	114
Tabla 14. Descripción geológica de los manantiales termales en el departamento de Boyacá	116
Tabla 15. Descripción geológica de los manantiales termales en el departamento de Casanare	119
Tabla 16. Descripción geológica de los manantiales termales en el departamento del Cesar	121
Tabla 17. Descripción geológica de los manantiales termales en el departamento del Chocó	123
Tabla 18. Descripción geológica de los manantiales termales en el departamento de Cundinamarca	125
Tabla 19. Descripción geológica de los manantiales del departamento de Guaviare	128
Tabla 20. Descripción geológica de los manantiales del departamento de Huila	130
Tabla 21. Descripción geológica de los manantiales termales en el departamento de Magdalena	132
Tabla 22. Descripción geológica de los manantiales termales en el departamento de Meta	134

Tabla 23. Descripción geológica del manantial termal en el departamento de Nariño	136
Tabla 24. Descripción geológica de los manantiales termales en el departamento de Norte de Santander	137
Tabla 25. Descripción geológica de los manantiales termales en el departamento de Santander	140
Tabla 26. Descripción geológica de los manantiales termales del departamento del Tolima	141

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1. Fichas de las Áreas Geotérmicas (Digital)	162
Anexo 2. Fichas de los Departamentos (Digital)	163
Anexo 3. Mapa preliminar de potencia y calor geotérmico de Colombia	164