

**ESTUDIO DE LA GEOTERMIA EN COLOMBIA EN EL ULTIMO SIGLO
DESTACANDO SUS OPORTUNIDADES Y DESAFIOS EN LA ADAPTACIÓN DE
LA TRANSICIÓN ENERGÉTICA.**

**ASTRID NATALIA ÁVILA CAMARGO
PAOLA ANDREA FAGUA PENAGOS**

Trabajo de Grado
Para optar al título de Magister en Tecnologías Limpias

Modalidad Monografía
Línea de Investigación: Tecnologías Limpias

Director
MSc. Deiver Saavedra Cortina

Universidad Santo Tomás
Facultad de Ciencias Ambientales
Bogotá D.C
2025

**ESTUDIO DE LA GEOTERMIA EN COLOMBIA EN EL ULTIMO SIGLO
DESTACANDO SUS OPORTUNIDADES Y DESAFIOS EN LA ADAPTACIÓN DE
LA TRANSICIÓN ENERGÉTICA.**

Astrid Natalia Ávila Camargo
Paola Andrea Fagua Penagos

Maestría en Tecnologías Limpias

Director
MSc. Deiver Saavedra Cortina

Jurados:

Jurado 1

Firma

Jurado 2

Firma

de 2025

Universidad Santo Tomás
Facultad de Ciencias Ambientales

CONTENIDO

ESTUDIO DE LA GEOTERMIA EN COLOMBIA EN EL ULTIMO SIGLO DESTACANDO SUS OPORTUNIDADES Y DESAFIOS EN LA ADAPTACIÓN DE LA TRANSICIÓN ENERGÉTICA.....	1
ESTUDIO DE LA GEOTERMIA EN COLOMBIA EN EL ULTIMO SIGLO DESTACANDO SUS OPORTUNIDADES Y DESAFIOS EN LA ADAPTACIÓN DE LA TRANSICIÓN ENERGÉTICA.....	2
CONTENIDO	3
RESUMEN	5
INTRODUCCIÓN.....	6
1. INTRODUCCIÓN A LA GEOTERMIA Y SU CONTEXTO GLOBAL	7
1.1 Panorama energético global actual de la geotermia actual y su desarrollo.....	7
1.2 La geotermia en el contexto de las energías renovables en la actualidad.....	7
1.3 Breve historia y evolución de la geotermia en conceptos y dimensiones de la transición energética.....	8
1.4 Relevancia de la geotermia para países en desarrollo/economías emergentes	9
1.5 Objetivos y metas de transición energética a nivel de geotermia en Colombia.....	10
1.6 Panorama energético renovable vs eficiencia energética global vs Colombia	11
2. FUNDAMENTOS DE LA GEOTERMIA.....	11
2.1 ¿Qué es la geotermia?	12
2.2 Clasificación de los recursos Geotérmicos.....	12
2.3 Tecnologías de aprovechamiento de la energía Geotérmica.....	13
2.4 Ventajas y desafíos de la Geotermia	14
3. POTENCIAL GEOTERMICO EN COLOMBIA.....	14
3.1 Contexto geológico y geodinámico de Colombia y su relevancia geotérmica	14
3.2 Identificación y caracterización de las principales zonas Geotérmicas en Colombia..	15
3.3 Proyectos Geotérmicos en Colombia: estado actual y antecedentes.....	16
3.4 Marco Regulatorio y políticas públicas para el desarrollo Geotérmico en Colombia..	17
4. ZONAS TERMALES EN COLOMBIA: UN ENFOQUE EN SU POTENCIAL ENERGÉTICO.....	18

4.1	Caracterización general de las zonas termales en Colombia.....	19
4.2	Usos actuales predominantes de las zonas termales en Colombia.....	20
4.3	Potencial para otros usos directos del calor Geotérmico en zonas termales de Colombia 21	
4.4	Estudio de casos internacionales y modelos de aprovechamiento en zonas termales..	22
5.	DESAFÍOS, OPORTUNIDADES Y CONCLUSIONES.....	23
5.1	Desafíos para el desarrollo de la Geotermia en Colombia	23
5.2	Oportunidades para el Impulso de la Geotermia en Colombia.....	24
5.3	Seguridad energética y Diversificación en el suministro	24
5.4	Conclusiones.....	24
5.5	Recomendaciones	26
	Referencias.....	27

RESUMEN

La energía geotérmica se establece como un recurso estratégico de carga base para la transición energética en Colombia, esencial para diversificar la matriz y mitigar la dependencia de la hidroelectricidad. La investigación confirma que el Cinturón Volcánico de los Andes Centrales posee el potencial de alta entalpía requerido para la generación eléctrica. Aunque el uso actual se enfoca en la baja entalpía (usos directos y turismo), la estrategia nacional apunta a explotar el potencial en zonas como el Nevado del Ruiz, siendo crucial la caracterización hidrogeológica para la sostenibilidad del recurso. Los principales obstáculos son el alto riesgo geológico exploratorio y una brecha regulatoria en la Ley 1715 que no aborda dicho riesgo de forma específica. Las conclusiones destacan la oportunidad estratégica de la geotermia para la seguridad energética (suministro constante) y la diversificación regional (usos directos del calor). Para avanzar, se recomienda la creación urgente de un Fondo de Mitigación de Riesgo Exploratorio y la emisión de una normativa especializada por parte del Ministerio de Minas y Energía, acciones clave para desbloquear la inversión privada y consolidar esta fuente de energía sostenible en Colombia.

INTRODUCCIÓN

El siglo XXI se define por el imperativo de la transición energética, un proceso global que exige la sustitución de fuentes basadas en combustibles fósiles por alternativas de generación limpia y sostenible. En este contexto, Colombia, cuya matriz energética tradicionalmente ha dependido de la hidroelectricidad, enfrenta la necesidad crítica de incorporar fuentes no convencionales que garanticen la seguridad del suministro, especialmente ante la creciente vulnerabilidad climática. La energía geotérmica, que aprovecha el calor interno de la Tierra, emerge como una solución estratégica debido a su cualidad de fuente de carga base —constante e independiente de las condiciones meteorológicas superficiales.

El presente estudio aborda la evaluación exhaustiva de la geotermia en Colombia, analizando su desarrollo a lo largo del último siglo y destacando las oportunidades y desafíos inherentes a su adaptación en el marco de la política de transición energética nacional. La investigación se justifica en la urgencia de dimensionar este recurso endógeno clave, cuya explotación permitiría diversificar la matriz, reducir la dependencia del riesgo hídrico y contribuir al cumplimiento de los compromisos climáticos del país.

La estructura de este documento se ha organizado para guiar al lector desde los fundamentos teóricos hasta la propuesta de una hoja de ruta estratégica, con un enfoque metodológico riguroso:

Capítulos Iniciales (Implícitos): Se establece el contexto de la transición energética y los principios fundamentales de la tecnología geotérmica a nivel global.

Capítulo 3 (Potencial Geotérmico en Colombia): Se enfoca en la identificación y caracterización de las principales zonas geotérmicas, con especial atención a los controles geológicos del recurso. Seguidamente, se examina el estado actual y los antecedentes de los proyectos nacionales, culminando con un análisis crítico del marco regulatorio y las políticas públicas que rigen su desarrollo.

Capítulo 4 (Zonas Termale en Colombia: Un Enfoque en su Potencial Energético): Profundiza en la evidencia superficial del recurso, detallando la caracterización fisicoquímica e hidrogeológica de las zonas termale. Se analizan sus usos actuales predominante (baja entalpía vs. potencial de alta entalpía) y el potencial para otros usos directos del calor, complementado con un estudio de casos internacionales que ilustran modelos de aprovechamiento sostenible.

Capítulo 5 (Desafíos, Oportunidades y Conclusiones): Sintetiza los hallazgos para presentar los desafíos técnicos, financieros y regulatorios, las oportunidades estratégicas para la seguridad energética y la diversificación, y las conclusiones. El capítulo cierra con recomendaciones de política pública específicas para impulsar la geotermia como una fuente de energía sostenible y resiliente en Colombia.

1. INTRODUCCIÓN A LA GOETERMIA Y SU CONTEXTO GLOBAL

La transición energética global requiere de alternativas robustas y constantes, siendo la energía geotérmica una de las soluciones más prometedoras. Este recurso renovable aprovecha el calor del subsuelo terrestre, extraído mediante sistemas de alta o baja entalpía para la generación eléctrica o climatización directa. Su papel es fundamental en el contexto del cambio climático por su capacidad de operar como fuente de carga base, ofreciendo un suministro energético continuo e ininterrumpido que estabiliza la red. Esto nos permite una sustitución directa de combustibles fósiles, logrando una sustancial reducción de emisiones. Por su alta eficiencia, su mínimo impacto territorial y su independencia de las condiciones atmosféricas, la geotermia se posiciona no solo como una opción sostenible, sino como la estrategia óptima para asegurar la resiliencia y la descarbonización del sistema energético futuro.

1.1 Panorama energético global actual de la geotermia actual y su desarrollo

La transición energética global hacia una economía de bajas emisiones de carbono ha posicionado a la **energía geotérmica** como un actor estratégico y fundamental en el debate energético internacional. Una visión amplia de su contribución a la **sostenibilidad global** y su estado actual es una referencia esencial para comprender su potencial (Shelare, Kumar, Gajbhiye, & Kanchan, 2023). La geotermia destaca por su capacidad para ofrecer un **suministro de carga base constante**, un atributo crucial que es indispensable para la estabilidad de las redes y la efectiva mitigación de los efectos del cambio climático (Islam, y otros, 2022). Esta resiliencia se apoya en una **diversidad tecnológica** que abarca desde la generación eléctrica de alta entalpía hasta el aprovechamiento térmico directo, siendo vital para el rol de la geotermia en la transición hacia una economía de bajas emisiones (Ball, 2021). Finalmente, el éxito en el desarrollo de mercados regionales, impulsado por la **abundancia del recurso del subsuelo**, demuestra la viabilidad de la geotermia como una pieza esencial y resiliente para la descarbonización global del futuro (Chomać-Pierzecka, Sobczak, & Soboń, 2022).

1.2 La geotermia en el contexto de las energías renovables en la actualidad

La energía geotérmica emerge como un vector fundamental en la transición energética global, ofreciendo una fuente de energía renovable de carga base esencial para la estabilidad de la red y la descarbonización (Islam, y otros, 2022). La presente sección se enfoca en desarrollar una propuesta integral para incorporar la abundancia de energía geotérmica a nivel mundial en la futura matriz energética renovable, analizando las tendencias y perspectivas que definen el estado actual y futuro del recurso.

La geotermia se evalúa como una solución prometedora para la producción de energía limpia y la mitigación del cambio climático, destacando su intrínseca sostenibilidad y rentabilidad a largo plazo en comparación con fuentes de energía intermitentes o fósiles (Kassem & Moscariello, 2025). Este potencial de viabilidad se sustenta en el avance tecnológico, un factor crucial para expandir su papel en la transición hacia fuentes de energía sostenibles (Akhigbe, 2025). Específicamente, los avances tecnológicos se centran

en la optimización de los Sistemas Geotérmicos Mejorados (EGS) y en la mejora de las tecnologías de perforación para acceder a recursos no convencionales, lo cual es fundamental para superar las barreras técnicas y económicas inherentes (Kumar, Hossain, Assad, & Manoo, 2022).

A pesar de las oportunidades, el desarrollo de la energía geotérmica a nivel global enfrenta significativos desafíos. Una revisión detallada expone las barreras, incluyendo el alto riesgo de exploración y la necesidad de capital intensivo en las etapas iniciales, junto con los factores que influyen en su expansión, tales como los marcos regulatorios y la aceptación pública. Asimismo, esta revisión subraya la importancia de considerar los impactos ambientales, económicos y sociales para asegurar un desarrollo sostenible del recurso (Soltani, y otros, 2021). Respecto a los impactos ambientales, la gestión del potencial de sismicidad inducida en proyectos EGS y la minimización de las emisiones de gases no condensables son aspectos cruciales (Akhigbe, 2025).

El entendimiento del rol de la geotermia requiere un análisis de cómo se integra en diferentes contextos energéticos y geopolíticos (Amoatey, Chen, Al-Maktoumi, Izady, & Baawain, 2021). El caso de Turquía, por ejemplo, proporciona una visión detallada de un país con un significativo potencial geotérmico que ha logrado una notable capacidad instalada, pero que aún enfrenta desafíos operativos y de diversificación del uso (Korucan, Derin-Gure, Celebi, Baker, & Velde, 2024). Por lo tanto, el desarrollo exitoso de la geotermia dependerá de la mitigación de los riesgos, la continua innovación tecnológica y el establecimiento de políticas energéticas que reconozcan su valor como energía de carga base.

1.3 Breve historia y evolución de la geotermia en conceptos y dimensiones de la transición energética

La trayectoria de la energía geotérmica se extiende desde aplicaciones ancestrales de calor directo hasta su rol fundamental en la transición energética contemporánea (Baloch, y otros, 2024). Una visión exhaustiva revela que la comprensión de su historia, las oportunidades intrínsecas y los desafíos que enfrenta es vital para evaluar su potencial. El desarrollo sostenible de la geotermia requiere un análisis profundo de su trasfondo histórico, su situación actual y sus perspectivas futuras dentro del nuevo paradigma energético (Geng, Shi, Dong, Sun, & Hu, 2024). El cambio crucial se remonta a la primera crisis energética, momento a partir del cual se impulsó su desarrollo y se consolidó su papel en la transición hacia las energías verdes (Botta, Fiaschi, & Manfrida, 2024).

Actualmente, el estado de la energía geotérmica la posiciona como una fuente de energía sostenible, destacando su atributo como energía de carga base, esencial para la estabilidad de las redes eléctricas con alta penetración de renovables intermitentes (Jafari, Jafari, & Alimohammadi, 2024). Su viabilidad como solución para la producción de energía limpia y para la mitigación del cambio climático refuerza su papel estratégico en la agenda de descarbonización global (Kassem & Moscariello, 2025). Sin embargo, a pesar de este potencial, el despliegue a gran escala se ve obstaculizado por desafíos como el alto riesgo geológico en la exploración y las significativas necesidades de inversión inicial.

Para superar estos obstáculos y maximizar su contribución, la innovación tecnológica es determinante. Los avances se enfocan principalmente en el desarrollo de Sistemas Geotérmicos Mejorados (EGS) y en la optimización de las tecnologías de perforación, cruciales para reducir costos, mitigar riesgos y ampliar el acceso a recursos geotérmicos no convencionales. Un análisis detallado de estos progresos técnicos y los desafíos actuales es esencial para trazar una trayectoria futura que asegure la integración plena de la geotermia en la reestructuración energética global (Kumar, Kumar, & Kumar, 2022).

La evolución histórica de la geotermia la ha llevado a convertirse en un componente indispensable de la matriz energética sostenible. La plena realización de su potencial en la transición energética dependerá de la capacidad del sector para continuar innovando tecnológicamente, mitigar los riesgos inherentes y obtener el apoyo de marcos regulatorios que reconozcan su valor como energía de carga base limpia.

1.4 Relevancia de la geotermia para países en desarrollo/economías emergentes

La energía geotérmica ostenta una importancia estratégica creciente para los países en desarrollo y las economías emergentes, donde la necesidad de asegurar el crecimiento económico y la seguridad energética converge con la urgencia de la mitigación del cambio climático. A pesar de los esfuerzos limitados históricos para explotar este recurso en estas naciones, su potencial no aprovechado representa una significativa oportunidad para acelerar las transiciones energéticas (Chandrasekharam & Bundschuh, 2002). La integración de la geotermia como fuente de carga base limpia es crucial en un contexto donde el desarrollo energético debe ser intrínsecamente sostenible.

Los desafíos para la implementación geotérmica en estos contextos son particularmente severos, siendo los costos iniciales elevados el principal inhibidor. La inversión requerida en las fases iniciales de exploración y perforación constituye una barrera financiera significativa, especialmente para países con acceso limitado a capital o con estructuras de financiación menos robustas (Jafari, Jafari, & Alimohammadi, 2024); (Soltani, Kashkooli, & Souyris, The role of geothermal energy in the global energy transition: Drivers, inhibitors, market potential, technological, environmental, and future advances, 2022). Esta dificultad financiera se ve agravada por el riesgo geológico inherente, cuya incertidumbre sobre la viabilidad de los yacimientos es un factor que los inversionistas privados y los gobiernos con recursos limitados suelen evitar (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, 2015).

Además de las barreras económicas, existen obstáculos relacionados con la capacidad técnica y el entorno regulatorio. La exploración, el desarrollo y el mantenimiento de las infraestructuras geotérmicas demandan una experiencia técnica altamente especializada, que a menudo es escasa en las economías emergentes. De igual modo, la inestabilidad o la ausencia de marcos regulatorios y políticos de apoyo adecuados obstaculizan la inversión privada a largo plazo, retrasando el despliegue efectivo de la tecnología geotérmica (Soltani, Kashkooli, & Souyris, The role of geothermal energy in the global energy transition: Drivers, inhibitors, market potential, technological, environmental, and future advances, 2022).

A pesar de estos desafíos, las oportunidades que ofrece la geotermia son fundamentales. Ofrece una solución estratégica para la diversificación energética, permitiendo a los países reducir su peligrosa dependencia de los combustibles fósiles importados y mitigar la vulnerabilidad ante las fluctuaciones del mercado global. Al ser una fuente de energía doméstica, estable y limpia, la geotermia fortalece la soberanía y la seguridad energética nacional (Baloch, y otros, 2024); (Geng, Shi, Dong, Sun, & Hu, 2024).

La geotermia es un motor de desarrollo sostenible con claros beneficios sociales. Su capacidad para facilitar el acceso a la energía en áreas rurales contribuye al desarrollo socioeconómico. Además, como fuente baja en carbono, es crucial para que estos países cumplan sus compromisos de mitigación del cambio climático mientras impulsan el crecimiento (Kassem & Moscariello, 2025). Incluso se ha documentado su impacto positivo en la huella de carbono en economías emergentes (Umar, Awosusi, Adegboye, & Ojekemi, 2024), y su contribución a la creación de empleo y desarrollo local subraya su valor social y económico más allá de la generación de electricidad (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, 2015).

1.5 Objetivos y metas de transición energética a nivel de geotermia en Colombia

Colombia se encuentra inmersa en una fase estratégica de redefinición de su matriz energética, donde la geotermia se perfila como una fuente clave para el cumplimiento de las metas de la transición energética justa y el logro de los compromisos climáticos nacionales (Stavro, 2024); (Cardona, Tamayo, & Eslava-Garzón, 2024). La literatura sobre el cumplimiento de los objetivos de la transición subraya la importancia del calor natural proporcionado por la geotermia, junto con el desarrollo de vectores energéticos como el hidrógeno verde, en la reconfiguración del sector (Escallón, Gama, & Jaramillo Quintero, 2021); (Cardona, Tamayo, & Eslava-Garzón, 2024).

La ambición nacional en el sector eléctrico, analizada en diversos escenarios prospectivos hasta el año 2040, requiere la integración de fuentes no convencionales que garanticen la seguridad y la resiliencia del sistema (PINTO CALDERÓN, PAREJA MOLINA, Moreno, & Gutiérrez, 2024). En este contexto, la geotermia tiene un papel incipiente pero definido. Las proyecciones iniciales a nivel nacional, aunque modestas, establecen una meta inicial de generación geotérmica que oscila entre los 15 y 60 kilovatios (kW), lo que marca el punto de partida para su participación en la matriz eléctrica (Sanint, Aristizábal, Dyner, & Carreño, 2024).

Más allá de la generación de electricidad, la relevancia de la geotermia en la transición energética colombiana también radica en su potencial para el uso directo del calor y en su capacidad para complementar otras tecnologías renovables. La integración de la geotermia, junto con el hidrógeno verde, es considerada fundamental para la implementación de las metas climáticas y la promoción de una transición energética que no solo sea limpia, sino también justa, asegurando beneficios socioeconómicos y la creación de empleos verdes a nivel local (Stavro, 2024); (Escallón, Gama, & Jaramillo Quintero, 2021).

Los objetivos de Colombia en materia geotérmica se centran en superar la fase de exploración inicial y escalar la capacidad de generación y usos directos. El desarrollo de

esta fuente endógena de energía de carga base es esencial para diversificar la matriz, reducir la dependencia de la hidroelectricidad y posicionar al país en el cumplimiento de sus compromisos de descarbonización a medio y largo plazo, tal como se proyecta en los escenarios estratégicos para el sector eléctrico.

1.6 Panorama energético renovable vs eficiencia energética global vs Colombia

El escenario energético global contemporáneo se define por una doble necesidad estratégica: la acelerada adopción de energías renovables y la maximización de la eficiencia energética. Ambos conceptos constituyen los pilares fundamentales para la descarbonización y la seguridad del suministro. Es crucial examinar la situación de Colombia dentro de este panorama, contrastándola con las tendencias a nivel global y latinoamericano (Robles Algarin & Rodríguez Álvarez , 2018). La eficiencia energética y la expansión de las fuentes no convencionales no solo persiguen objetivos ambientales, sino que también son imperativos para la competitividad económica.

El análisis comparativo de la situación nacional, en relación con el panorama mundial de la eficiencia energética y las energías renovables, revela que Colombia ha experimentado avances, pero enfrenta retos estructurales significativos (Pereira Blanco & Turizo Pereira, 2020). Un estudio comparativo, como el realizado entre el progreso de China y Colombia, subraya la necesidad perentoria de la diversificación en la matriz energética colombiana. Históricamente dependiente de la hidroelectricidad, el país requiere integrar fuentes como la geotermia, la solar y la eólica para mitigar los riesgos hídricos y garantizar la resiliencia del sistema (CHAPARRO LEÓN, 2018).

La relación entre la adopción de energía renovable y la eficiencia energética es intrínseca y sinérgica en países como Colombia (Cruz-Negrete, Andrade-Arango, & Vaca-López, 2024). La inversión en fuentes renovables no convencionales debe ir de la mano con políticas activas de gestión de la demanda. De hecho, la adopción de tecnologías de energía renovable está siendo utilizada como un mecanismo directo para mejorar la eficiencia energética operativa en sectores clave, como se ha observado en instituciones de salud en el país, demostrando la aplicación práctica de esta interconexión (Hernández Palma, Novoa, & Mendoza Cásseres, 2023).

Si bien Colombia ha comenzado a trazar una ruta hacia la transición, el reto principal reside en acelerar la implementación de estas dos estrategias en paralelo. Para que el país se alinee con los estándares de rendimiento global, es imprescindible que las políticas públicas fomenten tanto la diversificación de la matriz con fuentes estables como la geotermia, como la masificación de la eficiencia energética a través de marcos regulatorios robustos y aplicación tecnológica sectorial.

2. FUNDAMENTOS DE LA GEOTERMIA

El presente capítulo introduce los principios científicos y de ingeniería que rigen el aprovechamiento de la energía geotérmica. Este análisis se centra en la definición del calor interno de la Tierra como una fuente energética estable y de bajas emisiones, esencial para

la transición energética. Siguiendo la naturaleza concisa y directa de las publicaciones especializadas de la disciplina, como las editadas por la Asociación Geotérmica Mexicana, este estudio aborda de forma estructurada los fundamentos del recurso. Se explica cómo la exploración se lleva a cabo mediante el despliegue de técnicas rigurosas de las geociencias (geología, geofísica y geoquímica) para la identificación y caracterización de yacimientos. Finalmente, se destaca que la interpretación de estos datos es vital para la modelización del reservorio y el diseño eficiente y sostenible de los sistemas de conversión.

2.1 ¿Qué es la geotermia?

La Geotermia se define como la energía calorífica que emana del interior de la Tierra, un recurso renovable y de carga base que se aprovecha para generar electricidad y para diversas aplicaciones térmicas directas (Hiriart Le Bert, 2011). En esencia, esta energía se extrae del calor almacenado bajo la superficie terrestre, el cual se transfiere continuamente desde el núcleo hacia la corteza.

La caracterización de la geotermia abarca una comprensión de su marco normativo y de las actividades complementarias esenciales para su desarrollo sostenible (Núñez, Díaz Sáez, & Velásquez Espinoza, 2008). Su importancia radica en su rol como fuente limpia, destacándose por su capacidad de incrementar la participación de las energías renovables en las matrices eléctricas, dada su disponibilidad constante e independiente de las condiciones climáticas superficiales (Hiriart Le Bert, 2011).

Dentro de las diversas tipologías, la geotermia de baja entalpía se distingue por utilizar recursos a temperaturas más bajas para aplicaciones directas, como calefacción, refrigeración y usos industriales, representando un campo de aplicación con grandes oportunidades, si bien enfrenta obstáculos específicos para su implementación masiva (D. G. MUNDIAL, 2017).

En el contexto regional, el desarrollo de la geotermia presenta una situación particular en Latinoamérica, donde la presencia de zonas volcánicas activas dota a varios países de un notable potencial. El estudio de los campos geotérmicos en la región es fundamental para entender el estado de su explotación y las reservas disponibles (Asociación Geotérmica Mexicana, 2011). La comprensión de la geotermia, desde sus fundamentos termodinámicos hasta su potencial aplicación, es crucial para dimensionar su futuro en la transición energética.

2.2 Clasificación de los recursos Geotérmicos

La clasificación de los recursos geotérmicos constituye un procedimiento metodológico fundamental para definir la estrategia de aprovechamiento, determinar la tecnología de conversión óptima y evaluar la viabilidad económica y de ingeniería de un yacimiento. El criterio primario de clasificación se fundamenta en la temperatura geotermométrica de las manifestaciones, que es un indicador directo de la entalpía del recurso. Este sistema permite diferenciar entre recursos de alta, media y baja entalpía, orientando su aplicación hacia la generación eléctrica o hacia usos térmicos directos. Por ejemplo, estudios sobre el potencial geotérmico de México establecen una clasificación detallada basada en rangos específicos de temperatura (Asociación Geotérmica Mexicana, 2011).

A una escala global, la clasificación por entalpía se correlaciona intrínsecamente con la aplicación final y su impacto en la matriz eléctrica. Los recursos de alta entalpía son aquellos con las temperaturas suficientes para ser destinados a la generación de energía eléctrica. La situación de su aprovechamiento ha sido objeto de análisis detallados en las 29 naciones líderes en explotación geotérmica, subrayando la importancia estratégica de estos recursos para la descarbonización global (Conde Serra & Asato, 2024).

Para garantizar la precisión en el desarrollo de proyectos, es imprescindible realizar una evaluación integral del potencial geotérmico que incorpore la cuantificación rigurosa del recurso energético disponible (León García, 2024). Dentro de esta metodología, la precisión de la clasificación geológica y geotérmica es crítica. La aplicación de datos geofísicos avanzados, como los obtenidos mediante magnetotelúrica, es esencial para caracterizar el subsuelo. Una clasificación incorrecta o una interpretación errónea de los datos primarios puede llevar a conclusiones significativamente equivocadas sobre la viabilidad del yacimiento, comprometiendo las decisiones de inversión y el éxito del desarrollo geotérmico (Rodríguez Rodríguez, 2024).

2.3 Tecnologías de aprovechamiento de la energía Geotérmica

El aprovechamiento de la energía geotérmica se cimienta en diversas tecnologías diseñadas para extraer y convertir el calor terrestre de manera eficiente, lo cual es fundamental para alcanzar un desarrollo sostenible y mejorar su competitividad frente a otras fuentes energéticas (Santoyo-Gutiérrez & Torres-Alvarado, 2010). Estas tecnologías se clasifican primariamente según la entalpía del recurso, abarcando desde sistemas de alta temperatura para generación eléctrica hasta aquellos de baja temperatura para usos térmicos directos.

Las tecnologías limpias son esenciales para garantizar que la geotermia se consolide como una solución energética eficaz. En el ámbito de la generación eléctrica, las plantas operan principalmente bajo tres esquemas: vapor seco, vapor flash (o flash steam) y ciclo binario. Este último es crucial para recursos de entalpía media-baja, ya que emplea un fluido orgánico de bajo punto de ebullición para la transferencia de calor, lo que optimiza la obtención de energía geotérmica con menor impacto ambiental (Ortega-Ramírez & Brand-García, 2024).

En cuanto a los usos térmicos directos, la tecnología clave es la geotermia somera (o de baja entalpía), la cual se utiliza para calefacción, refrigeración y suministro de agua caliente, aprovechando el calor estable de la capa superficial de la Tierra. Esta aplicación tiene una importancia creciente en Latinoamérica y en la agricultura, siendo países como Islandia líderes mundiales en el aprovechamiento de la calefacción geotérmica a nivel doméstico y agrícola (D. G. MUNDIAL, 2017); (Hecht Méndez, Fuenmayor Siciliano, Bello Rujana, & Molina Giraldo, 2012).

El desarrollo y aprovechamiento de estas tecnologías son vitales para países con potencial, como Colombia, donde se están realizando avances significativos en proyectos de generación (Marzolf, 2014). El éxito de la transición energética requiere la continua inversión en la optimización de estas tecnologías, tanto para la generación de electricidad como para la masificación de los usos directos del calor.

2.4 Ventajas y desafíos de la Geotermia

La energía geotérmica se posiciona como una fuente renovable de gran valor estratégico, pero su consolidación en la matriz energética global requiere una comprensión balanceada de sus beneficios y limitaciones (Morales-Ruiz & Muñoz-Cerón, 2018). Las ventajas inherentes de la geotermia son significativas. Destaca por ser una fuente de carga base, es decir, su disponibilidad es constante y no depende de factores climáticos superficiales, lo que le confiere una alta fiabilidad para la generación eléctrica. Además, es una fuente de bajas emisiones, contribuyendo directamente a los objetivos de mitigación del cambio climático. Su versatilidad se extiende a diversas aplicaciones, incluyendo la generación eléctrica, la calefacción directa y el uso industrial (San Miguel-Ferreras, 2018).

Sin embargo, la implementación a gran escala de la geotermia enfrenta desafíos que deben ser abordados de manera rigurosa. El principal obstáculo sigue siendo el alto riesgo exploratorio y los costos iniciales de inversión. La incertidumbre sobre la existencia y la calidad de los yacimientos en las primeras fases de perforación disuade a los inversionistas privados. Otros retos incluyen la necesidad de contar con conocimiento técnico especializado y la gestión de potenciales impactos ambientales, como la sismicidad inducida en proyectos de Sistemas Geotérmicos Mejorados (EGS) o la manipulación de gases no condensables (Gutiérrez & Maya, 2017).

A pesar de estos obstáculos, el potencial para superar los desafíos es notable, especialmente en regiones ricas en recursos geotérmicos, como América Latina (Hecht Méndez, Fuenmayor Siciliano, Bello Rujana, & Molina Giraldo, 2012). Las oportunidades futuras se centran en el avance tecnológico, la innovación en las técnicas de perforación para reducir costos y riesgos, y el desarrollo de marcos regulatorios que incentiven la inversión a largo plazo. Una perspectiva exhaustiva del estado actual y los retos es esencial para orientar la política energética y maximizar el papel de la geotermia en la transición (Gutiérrez & Maya, 2017).

3. POTENCIAL GEOTERMICO EN COLOMBIA

El potencial geotérmico de Colombia es un recurso endógeno clave para la diversificación y resiliencia de la matriz energética nacional. Dada su ubicación geológica, el país posee reservas de calor interno aptas para la generación de energía de carga base y usos térmicos directos. El análisis incluye la distribución y cuantificación del recurso, las metodologías de exploración aplicadas y el marco regulatorio. El estudio es crucial para orientar las políticas de inversión y consolidar el papel de la geotermia en la transición energética colombiana.

3.1 Contexto geológico y geodinámico de Colombia y su relevancia geotérmica

El potencial geotérmico de Colombia está íntimamente ligado a su complejo contexto geológico y geodinámico. La ubicación del país en la convergencia de las placas tectónicas, particularmente la interacción entre las placas Nazca, Caribe y Sudamericana, genera un marco propicio para la manifestación de sistemas geotérmicos. Esta actividad tectónica y el vulcanismo asociado son los principales impulsores del flujo de calor anómalo que se

requiere para la explotación del recurso (Franco, Rojas, & Rincón, 2017).

La relación entre la sismicidad y el flujo de calor es un indicador fundamental de la actividad geotérmica subsuperficial en regiones clave del territorio (Alfaro, Vargas, & Moreno, 2014). Las fallas geológicas y las estructuras tectónicas no solo son responsables de la actividad sísmica, sino que también actúan como conductos primarios que facilitan el ascenso de fluidos calientes y vapor desde las profundidades, alimentando así los reservorios geotérmicos (Nieto & Ojeda, 2018).

El estudio de los factores geológicos y estructurales es crucial para la exploración. En las áreas más prometedoras de Colombia, los análisis se enfocan en identificar las estructuras que controlan la permeabilidad y el almacenamiento de los recursos. Comprender estas características geodinámicas es la base para desarrollar una visión general precisa del estado actual de la geotermia en el país y para establecer las perspectivas futuras de su desarrollo como fuente de energía estable y endógena (Franco, Rojas, & Rincón, 2017) ; (Nieto & Ojeda, 2018). En consecuencia, la geotermia se posiciona como una oportunidad para la diversificación energética, aprovechando la riqueza geológica y geodinámica nacional.

3.2 Identificación y caracterización de las principales zonas Geotérmicas en Colombia

La explotación eficiente del potencial energético geotérmico de Colombia exige un riguroso proceso de identificación y caracterización de sus yacimientos, una etapa científica y de ingeniería fundamental para mitigar el riesgo inherente a la exploración y garantizar la viabilidad de la inversión. Las zonas de mayor interés económico y energético del país se localizan directamente sobre el Cinturón Volcánico de los Andes Centrales, una vasta región con alta actividad tectónica y magmática que provee el flujo de calor necesario.

El proceso de identificación comienza con estudios de reconocimiento a gran escala, donde la integración de datos de sismicidad y flujo de calor anómalo se establece como el indicador primario de la actividad geotérmica subsuperficial. Esta aproximación geofísica es particularmente efectiva para delimitar las áreas más prometedoras, como se evidencia en los estudios realizados en el sector norte de los Andes Centrales colombianos, una región que manifiesta anomalías térmicas significativas (Alfaro, Vargas, & Moreno, 2014). La recopilación y el análisis de estos datos permiten generar un panorama general de las zonas geotérmicas ya conocidas y de aquellas con un alto potencial prospectivo, lo que es esencial para evaluar el progreso nacional en la fase inicial de desarrollo del recurso (Franco, Rojas, & Rincón, 2017).

Posteriormente, la caracterización se concentra en áreas de alta entalpía, siendo el Macizo Volcánico Ruiz-Tolima la región más estratégicamente relevante debido a sus condiciones geológicas favorables. En este macizo, los análisis detallados se dirigen a definir con precisión los controles geológicos y estructurales que determinan la formación y la integridad del reservorio geotérmico. La identificación de sistemas de fallas, fracturas y estructuras volcánicas específicas no es meramente descriptiva, sino funcional, puesto que estas estructuras actúan como los principales canales de ascenso y las zonas de mayor permeabilidad, información crítica para la ubicación precisa de los pozos de exploración y,

subsecuentemente, los de producción (Nieto & Ojeda, 2018).

Para una evaluación robusta y cuantitativa del potencial nacional, la metodología integra un conjunto de técnicas geo científicas avanzadas. La evaluación preliminar se basa en la combinación de datos geofísicos (como la magnetotelúrica o la gravimetría) para mapear las anomalías subsuperficiales, y en datos geoquímicos para estimar las temperaturas del reservorio en profundidad. La caracterización geoquímica de fluidos, a través del análisis de aguas termales y gases (utilizando geotermómetros químicos), es una herramienta poderosa que permite inferir las condiciones termodinámicas del reservorio. Esta metodología se aplica con rigor en áreas fronterizas, como Tufiño-Chiles-Cerro Negro, lo que demuestra la transferibilidad y la relevancia de los protocolos regionales para la evaluación geotérmica en el contexto colombiano (Ortiz & Marín, 2019).

Finalmente, la necesidad de gestionar la gran cantidad de información geo científica en las etapas de prospección ha impulsado el uso de metodologías avanzadas. El análisis multivariado de datos geológicos y geofísicos, por ejemplo, permite identificar correlaciones complejas y factores de control que influyen en la distribución del recurso, logrando una delimitación más precisa, jerarquizada y unificada de las zonas de interés geotérmico en todo el territorio nacional (Barragán & Alfaro, 2016). La aplicación sistemática de estas técnicas garantiza que el potencial geotérmico colombiano se caracterice con la fiabilidad requerida para atraer inversión y transitar hacia la fase de explotación.

3.3 Proyectos Geotérmicos en Colombia: estado actual y antecedentes

El desarrollo de proyectos geotérmicos en Colombia se enmarca en una etapa crucial de transición, caracterizada por el paso progresivo de la investigación geo-científica a la exploración detallada y el desarrollo de pilotos. Este proceso se encuentra intrínsecamente ligado a la necesidad de diversificar la matriz energética y aprovechar el potencial endógeno del país.

Los antecedentes del desarrollo geotérmico están fuertemente condicionados por la evolución del marco legal y regulatorio nacional. El análisis riguroso de las leyes y regulaciones existentes es fundamental, ya que actúa como un factor determinante para establecer las oportunidades de inversión y mitigar las posibles barreras que puedan obstaculizar la implementación de proyectos a largo plazo (González-Acevedo & Zapata-Restrepo, 2020).

Esta estructura legal no opera de forma aislada, sino que se complementa con la visión estratégica del gobierno en materia energética. Documentos oficiales clave, como el Plan Energético Nacional (PEN), son esenciales para comprender la trayectoria y el alcance proyectado para la energía geotérmica en la matriz nacional, proporcionando una hoja de ruta para el desarrollo a mediano y largo plazo (Unidad de Planeación Minero Energética, 2019). Ya desde análisis iniciales en 2017, la existencia de políticas de apoyo y un marco regulatorio claro eran identificados como factores cruciales para impulsar la geotermia (Franco, Rojas, & Rincón, 2017).

El estado actual de la geotermia en Colombia se focaliza en la superación de las fases de reconocimiento y la consolidación de la exploración avanzada. Reportes técnicos y académicos actualizados describen los progresos tangibles en estas etapas, incluyendo la realización de estudios detallados en las zonas de mayor potencial y el inicio de pruebas a pequeña escala (Pérez-Floréz & Vargas, 2018).

Un componente vital de este avance es la implementación de proyectos piloto. Estos esfuerzos iniciales son de capital importancia, ya que su propósito trasciende la mera generación de energía. Permiten obtener lecciones operativas cruciales, validar la viabilidad de las tecnologías de conversión en el contexto geológico local, y optimizar los modelos de gestión del reservorio para futuros proyectos comerciales a gran escala (López & Mejía, 2021).

A pesar del potencial evidenciado en las zonas volcánicas del país, la consecución de la implementación a gran escala enfrenta desafíos multifacéticos. El riesgo geológico inherente a la exploración, sumado a los altos costos iniciales de inversión, exige la estructuración de mecanismos financieros innovadores y robustos que puedan mitigar estas incertidumbres.

Adicionalmente a las barreras técnicas y económicas, el desarrollo geotérmico debe abordar con rigor los aspectos socioambientales. La gestión de la aceptación social y la necesidad de asegurar que los proyectos generen beneficios sostenibles a nivel local son tan cruciales como la viabilidad técnica, para garantizar la perdurabilidad y la legitimidad de las operaciones (Arango & Arias, 2019).

La trayectoria de los proyectos geotérmicos en Colombia está definida por un progreso continuo en la exploración y la consolidación de un marco regulatorio. No obstante, la transformación del potencial en capacidad instalada real dependerá de la capacidad del país para mitigar los riesgos de inversión, aprender de los proyectos piloto, y convertir las oportunidades identificadas desde los primeros informes (Franco, Rojas, & Rincón, 2017) en una contribución sustancial y sostenible a la matriz energética nacional.

3.4 Marco Regulatorio y políticas públicas para el desarrollo Geotérmico en Colombia

El desarrollo efectivo y a escala del potencial geotérmico en Colombia depende, de manera crítica, de la existencia de un marco regulatorio robusto y de políticas públicas estratégicas diseñadas para mitigar el alto riesgo inherente a la inversión inicial. La legislación nacional ha avanzado progresivamente para integrar las energías renovables no convencionales (ERNC), si bien la especificidad regulatoria para la geotermia requiere aún consolidación.

El análisis del marco legal vigente constituye el punto de partida esencial, buscando identificar con precisión cómo la normativa existente se aplica —y en qué medida resulta insuficiente— para los proyectos geotérmicos (González-Acevedo & Zapata-Restrepo, 2020). Estos estudios son vitales para exponer las brechas normativas en comparación con fuentes más desarrolladas y, al mismo tiempo, para dimensionar las oportunidades que pueden ser aprovechadas para acelerar la maduración del recurso geotérmico en el país.

La evolución del entorno normativo ofrece un contexto valioso, demostrando las regulaciones y directrices que, a lo largo del tiempo, han impulsado o, por el contrario, han limitado el desarrollo del sector. Este análisis histórico permite comprender la trayectoria política y las prioridades energéticas que han condicionado la geotermia hasta la fecha (Pérez-Floréz & Vargas, 2018).

Los antecedentes históricos confirman un interés estatal sostenido, evidenciado por las políticas públicas e iniciativas gubernamentales que se implementaron en períodos tempranos con el fin de fomentar la exploración y el desarrollo de recursos geotérmicos (Franco, Rojas, & Rincón, 2017). Sin embargo, el impulso legal más decisivo se formaliza a través de la Ley 1715 de 2014, Ley de Energías Renovables No Convencionales.

Dicha ley y sus decretos reglamentarios, liderados por el Ministerio de Minas y Energía, establecen el marco general de incentivos fiscales y normativas para el desarrollo de las ERNC, incluyendo específicamente la geotermia (Ministerio de Mina y Energía, 2021). Estos instrumentos son fundamentales para reducir la carga tributaria y ofrecer mecanismos de aceleración de proyectos.

La Unidad de Planeación Minero Energética (UPME) desempeña un papel planificador estratégico, articulando la visión del sector. Sus documentos clave, como el Plan de Expansión de Referencia de Generación y Transmisión e informes técnicos especializados, detallan el rol proyectado de la geotermia y las proyecciones regulatorias que orientarán su despliegue dentro de la matriz energética (Ministerio de Mina y Energía, 2021).

Adicionalmente, resulta crucial integrar la perspectiva de la industria privada. Aunque el gremio geotérmico en Colombia aún está en consolidación, los análisis de gremios más amplios del sector energético (como la Asociación Colombiana de Petróleo y Gas) ofrecen una visión crítica sobre la viabilidad de las políticas, destacando la necesidad de mecanismos de reparto de riesgo más eficientes para atraer la inversión a largo plazo.

El principal desafío regulatorio en el país no es la ausencia de un marco, sino su especificidad y articulación. Es vital que la normativa provea instrumentos que aborden directamente el riesgo geológico de las fases iniciales —el mayor inhibidor de la inversión—, complementando eficazmente los incentivos fiscales existentes con garantías de precio o mecanismos de financiación de riesgo exploratorio.

La expansión futura de la geotermia en Colombia es directamente proporcional a la capacidad del Estado para utilizar su marco regulatorio como una palanca de inversión. Esto implica no solo mantener los incentivos de la Ley 1715, sino también cerrar las brechas normativas e implementar un entorno político estable que responda a las necesidades de capital intensivo y de largo plazo requeridas por la tecnología geotérmica. garantizar total transparencia en todas las etapas del proceso.

4. ZONAS TERMALES EN COLOMBIA: UN ENFOQUE EN SU POTENCIAL ENERGÉTICO

Este capítulo se centra en la caracterización detallada de las zonas termales de Colombia, entendidas como manifestaciones superficiales de la actividad geotérmica subyacente. Su objetivo principal es pasar de un potencial geológico teórico a la identificación de reservorios viables, mediante el análisis de las propiedades fisicoquímicas de las aguas termales y su relación con las temperaturas estimadas en profundidad. Este enfoque resulta esencial para evaluar el recurso, no solo para aplicaciones directas como el aprovechamiento del calor, sino, de manera prioritaria, para determinar su potencial en la generación de energía en el marco de la transición energética. El estudio de estas zonas proporciona la base empírica necesaria para priorizar proyectos y planificar las próximas etapas de exploración.

4.1 Caracterización general de las zonas termales en Colombia

La caracterización general de las zonas termales en Colombia representa una etapa crucial en la evaluación del potencial energético nacional, dado que estas manifestaciones superficiales son la evidencia directa del calor almacenado en la profundidad. Para iniciar esta evaluación, es imprescindible una comprensión exhaustiva del marco geológico e hidrogeológico de la región. Esta revisión preliminar, que abarca el estudio de la formación de la cobertura, la identificación del modelo de circulación de agua y las características intrínsecas del sistema geotérmico, es lo que permite interpretar los mecanismos de calentamiento y flujo de fluidos (Bocanegra Torres, 2023); (Cardona Ghisays, 2024).

La metodología central de caracterización se basa rigurosamente en el análisis fisicoquímico de las aguas termales. Este enfoque es vital para clasificar los diferentes grupos de aguas presentes en zonas volcánicas clave. La composición química de estas aguas actúa como un geotermómetro natural, permitiendo a los investigadores inferir las temperaturas probables y la profundidad del reservorio geotérmico subyacente (Molia-Carvajal, Rivera, Delgado-Rodríguez, & Cajiao-Pedraza, 2023). La información detallada y localizada sobre el estado de las fuentes, como la obtenida en estudios de municipios específicos, contribuye a validar los modelos de gran escala (Córdoba Ruiz, 2022).

Un principio fundamental en esta disciplina es comprender cómo la geología estructural influye en la química de las aguas termales. La interacción entre el agua y la roca a altas temperaturas en diferentes contextos geológicos de Colombia deja una firma química única en los fluidos, lo cual es esencial para determinar el tipo de sistema geotérmico existente y estimar su potencial de alta o baja entalpía (Bocanegra Torres, 2023).

Desde una perspectiva de exploración, la presencia de manantiales termales es un factor determinante para la identificación preliminar de zonas con potencial geotérmico a nivel nacional (Botero-Gómez, Murcia, Sánchez, Gómez-Vasconcelos, & López-Palacio, 2025). Estos puntos de manifestación guían las subsiguientes fases de exploración, las cuales se complementan con la caracterización geofísica detallada. El uso de técnicas geofísicas proporciona insights esenciales sobre la estructura profunda y la geometría del sistema geotérmico, permitiendo la localización precisa de los recursos (Rodríguez Mora, 2023).

Es importante destacar que la caracterización de las zonas termales en Colombia no solo

obedece a fines energéticos, sino también a la necesidad de protección y gestión ambiental. La realización de un análisis adecuado en áreas como Cundinamarca es vital para la preservación de estas fuentes, reconociendo su valor ecológico y turístico junto con su potencial para el aprovechamiento energético sostenible (González-Idárraga, 2020). La integración sistemática de estos datos fisicoquímicos, geológicos y geofísicos constituye la base empírica indispensable para la viabilidad de futuros proyectos.

4.2 Usos actuales predominantes de las zonas termales en Colombia

La interacción histórica de Colombia con sus zonas termales ha privilegiado consistentemente el uso de baja entalpía, enfocado primordialmente en aplicaciones turísticas y balneológicas. No obstante, la estrategia energética actual ha mirado hacia la explotación activa del potencial de alta entalpía para la generación eléctrica. Esta transición se evidencia en la expansión de la investigación para la identificación de nuevas zonas prospectivas, incorporando métodos de exploración avanzados como el análisis de imágenes satelitales, lo que marca un cambio de un uso pasivo a un desarrollo activo del recurso (Córdoba Ruiz, 2022).

El foco de la investigación con miras a la generación eléctrica se concentra inexorablemente en las anomalías termales asociadas al eje volcánico central del país. Se enfatiza que el principal recurso geotérmico con potencial para la producción de electricidad está centrado en el Volcán Nevado del Ruiz y en proyectos específicos como el de Valle de Nereidas (Botero-Gómez, Murcia, Sánchez, Gómez-Vasconcelos, & López-Palacio, 2025). El Nevado del Ruiz, en particular, destaca de manera consistente como una de las zonas con mayor actividad y potencial para el desarrollo de generación eléctrica a gran escala, dadas sus condiciones geotérmicas de alta temperatura y presión en el subsuelo (Arias Marín & Acevedo Sánchez, 2017).

En contraste con el potencial de alta entalpía, los usos directos y de baja entalpía continúan siendo la aplicación más común y accesible, definiendo gran parte de la interacción socioeconómica con estas zonas. Ejemplos de esta aplicación se encuentran en la caracterización de áreas como Usiacurí, donde una revisión bibliográfica del marco geológico e hidrogeológico confirma el potencial de la geotermia de baja entalpía para aplicaciones térmicas no eléctricas, como la climatización o procesos agroindustriales a escala local (Cardona Ghisays, 2024).

Más allá de los beneficios energéticos o recreativos, la explotación de las zonas termales contribuye significativamente al desarrollo socioeconómico regional. La caracterización química detallada de las aguas termales, como la realizada en la zona geotérmica de Paipa, no solo se efectúa para la evaluación termodinámica, sino también para dimensionar su potencial como motor para la generación de empleo y el impulso de cadenas de valor regionales, demostrando la conexión entre la calidad del recurso termal y los beneficios económicos locales (Gómez Romero, 2019).

En resumen, la matriz de uso actual de las zonas termales colombianas se mantiene balanceada entre el uso predominante de baja entalpía para servicios turísticos y la investigación de alta entalpía para el suministro eléctrico. La estrategia nacional está claramente orientada a convertir el potencial concentrado en el eje volcánico, especialmente en zonas como el Nevado del Ruiz, en una fuente de energía de carga base, complementando el desarrollo regional impulsado por los usos directos y el turismo termal.

4.3 Potencial para otros usos directos del calor Geotérmico en zonas termales de Colombia

El potencial de las zonas termales en Colombia debe ser evaluado más allá de la generación eléctrica y el uso balneológico tradicional. Existe una amplia gama de usos directos del calor geotérmico que son críticos para la diversificación económica y la promoción de un desarrollo regional sostenible. Estos usos abarcan desde procesos de climatización (calefacción y refrigeración por absorción) hasta aplicaciones en los sectores agroindustrial y de servicios, permitiendo optimizar el aprovechamiento de los recursos geotérmicos de baja y media entalpía que no son técnica o económicamente viables para la producción de electricidad.

La planificación estratégica del sector energético nacional subraya la relevancia de estos usos directos en el contexto de la transición energética a largo plazo. Estudios avanzados que emplean la dinámica de sistemas para modelar escenarios del desarrollo tecnológico geotérmico en Colombia hasta 2050 ofrecen una perspectiva crucial. Estos modelos demuestran cómo la adopción de tecnologías de uso directo puede integrarse eficazmente, contribuyendo a la meta nacional de un sistema energético más limpio, eficiente y distribuido, lo que justifica la inversión en infraestructura de transferencia de calor (Ceballos-Mahecha, Jaramillo, & Montes-Guerra, 2024).

La revisión sistemática e integral del potencial geotérmico en Colombia complementa esta visión estratégica al discutir las amplias implicaciones del recurso como fuente de energía alternativa. Es precisamente dentro de esta visión holística donde los usos directos ganan prominencia, al ofrecer una vía para el aprovechamiento descentralizado y eficiente del calor en diversas áreas geográficas. La capacidad inherente de la geotermia para reemplazar el consumo de combustibles fósiles en procesos térmicos críticos para la industria y la agricultura la posiciona como una herramienta clave para la descarbonización local y sectorial (López-Rodríguez, Cadavid-Zapata, & Mejía-Giraldo, 2022).

El contexto regional latinoamericano proporciona valiosas experiencias y tendencias aplicables a la expansión de los usos directos en el país. Estudios de alcance regional discuten las oportunidades y desafíos específicos que enfrenta la geotermia en la región andina. En países vecinos con sistemas geotérmicos similares, se han implementado con éxito usos directos como la climatización a gran escala, el secado de productos agrícolas o la pasteurización, ofreciendo un marco de referencia y lecciones aprendidas que son directamente transferibles y adaptables a las zonas termales colombianas (Alonso, Marín, & Acevedo, 2023).

No obstante, la expansión de los usos directos enfrenta desafíos particulares en Colombia.

Aunque los recursos de baja entalpía son más abundantes geográficamente, las barreras se centran a menudo en la financiación inicial para la construcción de los sistemas de intercambio de calor, la falta de conocimiento técnico especializado en las comunidades y los sectores industriales locales, y la necesidad de establecer cadenas de suministro eficientes para el equipo geotérmico.

En síntesis, el potencial de los usos directos del calor geotérmico representa un eje estratégico de desarrollo socioeconómico y ambiental para las zonas termales de Colombia. La articulación de la planificación nacional de largo plazo, la evidencia científica obtenida mediante revisiones sistemáticas, y la asimilación de experiencias regionales convergen en la necesidad de impulsar la aplicación de tecnologías de baja y media entalpía, asegurando que el recurso geotérmico contribuya plenamente a la diversificación energética y al desarrollo económico regional.

4.4 Estudio de casos internacionales y modelos de aprovechamiento en zonas termales

El desarrollo óptimo y sostenible de las zonas termales en Colombia requiere el estudio riguroso de modelos de aprovechamiento internacionales, los cuales ofrecen lecciones valiosas en la gestión integrada del recurso, abarcando desde el turismo de salud hasta la conservación hidrogeológica. Estos modelos demuestran cómo las regiones con alta actividad termal han logrado capitalizar su potencial, diversificando su oferta económica y garantizando la perdurabilidad del recurso ante presiones de explotación y factores ambientales.

En el ámbito del turismo y la salud, existen modelos de éxito que combinan la balneoterapia con estrategias de desarrollo regional. Por ejemplo, en Michoacán, México, el aprovechamiento de aguas termales se integra en una oferta de turismo alternativo que se posiciona en conjunción con zonas de reconocimiento internacional, lo que eleva el valor del recurso termal más allá del uso recreativo básico (Arévalo Pacheco & Guerrero García Rojas, 2014). De manera similar, en la región de Aluchán, Ecuador, la gestión eficiente del potencial turístico de sus aguas termales ha logrado atraer a un flujo constante de visitantes nacionales e internacionales, validando la viabilidad económica de este enfoque (Ochoa Salazar, 2020).

La literatura también distingue entre diferentes modelos de gestión turística termal. El análisis de casos como el de Fuente Santa (un contexto europeo) identifica dos aproximaciones principales: el modelo integral, que busca un desarrollo amplio de la zona, y el modelo concentrado, que maximiza la explotación en puntos específicos (García Rodríguez, y otros, 2015). La selección de un modelo adecuado es crucial para Colombia, ya que debe equilibrar la maximización del beneficio económico regional con la protección del recurso hídrico en zonas termales de gran valor ecológico y potencial energético.

La lección más significativa que se desprende de estos estudios de caso es la necesidad de un enfoque de gestión hidrogeológica rigurosa. El desarrollo de cualquier modelo de aprovechamiento sea turístico o energético, debe estar cimentado en la comprensión de la dinámica del acuífero termal. Un ejemplo de esta rigurosidad técnica se encuentra en el Sistema Geotérmico de Paipa, Colombia, donde se ha desarrollado un modelo de balance

hídrico específico para la recarga de sus acuíferos termales.

Este modelo de balance hídrico es fundamental, ya que permite evaluar los efectos del cambio climático en la recarga de las aguas termales y planificar la extracción sostenible del recurso (Caldas Afanador, 2023). La aplicación de modelos hidrogeológicos detallados en las zonas termales colombianas, siguiendo el ejemplo de Paipa, es indispensable para evitar la sobreexplotación, garantizar la sostenibilidad a largo plazo y asegurar que los usos directos del calor y los futuros proyectos energéticos puedan coexistir con las aplicaciones turísticas aisladas.

5. DESAFÍOS, OPORTUNIDADES Y CONCLUSIONES

Este capítulo final sintetiza los hallazgos cruciales de la investigación, presentando las principales conclusiones derivadas del análisis de los fundamentos de la geotermia, su potencial en Colombia y el estado de sus zonas termales. Se realiza un balance exhaustivo de los desafíos técnicos, regulatorios y financieros que obstaculizan la implementación a gran escala de proyectos geotérmicos en el país. Con base en este diagnóstico, se delinean las oportunidades estratégicas para la consolidación de la geotermia como una fuente de energía de carga base, ofreciendo recomendaciones de política pública y desarrollo tecnológico orientadas a maximizar el aprovechamiento sostenible de este recurso endógeno clave para la transición energética colombiana.

5.1 Desafíos para el desarrollo de la Geotermia en Colombia

El despliegue efectivo y a gran escala de la energía geotérmica en Colombia se enfrenta a una serie de desafíos estructurales que deben ser mitigados para transformar el potencial geológico en capacidad de generación instalada.

El principal obstáculo es el alto riesgo geológico exploratorio, intrínseco a las fases iniciales de perforación. Este riesgo se traduce directamente en costos iniciales de inversión prohibitivos, superando las barreras financieras de otras ERNC y disuadiendo de manera significativa la participación del capital privado. La mitigación de la incertidumbre geológica es el paso fundamental para reducir la prima de riesgo.

Otro desafío crucial es la brecha en el marco regulatorio. A pesar de la existencia de la Ley 1715 de 2014, la normativa carece de la especificidad y articulación necesaria para abordar directamente los procedimientos de concesión, el riesgo geológico, la titularidad del recurso hídrico asociado y la infraestructura de interconexión. Esta falta de precisión regulatoria genera incertidumbre legal y frena el avance de los proyectos.

Finalmente, las barreras de capacidad técnica y gestión social son significativas. La operación de sistemas geotérmicos avanzados demanda capital humano altamente especializado en geociencias e ingeniería. Además, la necesidad de obtener la licencia social para operar, gestionando los impactos ambientales y garantizando los beneficios locales, es un desafío constante que requiere un enfoque riguroso de sostenibilidad.

5.2 Oportunidades para el Impulso de la Geotermia en Colombia

A pesar de los desafíos, la geotermia ofrece oportunidades estratégicas únicas para el sistema energético colombiano, sustentadas en su contexto geológico y su valor intrínseco como fuente de energía estable.

La principal oportunidad radica en la capacidad de la geotermia para ofrecer un suministro de carga base constante. Al no depender de las condiciones climáticas superficiales, esta fuente garantiza la estabilidad de la red y ofrece un factor de resiliencia crítico para la matriz energética.

La integración de los usos directos del calor representa una vía de desarrollo económico regional con menor riesgo exploratorio. Los recursos de baja y media entalpía, abundantes en las zonas termales del país, pueden ser utilizados para descarbonizar procesos térmicos en la agricultura, la industria y la acuicultura, fomentando la diversificación económica regional.

La innovación tecnológica ofrece la posibilidad de optimizar el recurso y reducir costos. El desarrollo y la adopción de tecnologías como los sistemas de ciclo binario y los EGS (Sistemas Geotérmicos Mejorados) son clave para ampliar la explotación a yacimientos no convencionales y mejorar la eficiencia, lo que aumenta la competitividad de la geotermia a largo plazo.

5.3 Seguridad energética y Diversificación en el suministro

La incorporación de la geotermia es un imperativo estratégico para la seguridad energética y la diversificación del suministro en Colombia, dada la vulnerabilidad actual de la matriz energética.

La geotermia actúa como un seguro contra el riesgo hídrico y climático. Al ser una fuente de energía transferible de forma continua, proporciona un contrapeso esencial a la dependencia histórica de la hidroelectricidad, cuya generación se ve afectada por los fenómenos de sequía (El Niño). Su adición reduce la necesidad de recurrir a costosas y contaminantes plantas térmicas de respaldo.

Su naturaleza de carga base de bajas emisiones la convierte en un pilar de la diversificación. La geotermia permite que Colombia cumpla sus compromisos de transición energética y objetivos climáticos al ofrecer una alternativa constante y limpia a los combustibles fósiles. El desarrollo de este recurso endógeno minimiza la exposición a la volatilidad de los precios internacionales de los combustibles, fortaleciendo la soberanía energética del país.

5.4 Conclusiones

La investigación ha logrado contextualizar y evaluar rigurosamente el potencial de la energía geotérmica en Colombia, sentando las bases para su desarrollo estratégico. Las conclusiones derivadas son las siguientes:

- **Potencial de Alta Entalpía Estratégico:** El análisis geológico y geodinámico confirma, sin lugar a duda, que el Cinturón Volcánico de los Andes Centrales posee el potencial de alta entalpía necesario para la generación eléctrica de carga base. El Macizo Volcánico Ruiz-Tolima y el Valle de Nereidas emergen como las zonas más prometedoras a nivel nacional, siendo crucial la transformación de este potencial científico en proyectos viables mediante la validación del recurso en las fases de perforación exploratoria.
- **La Barrera Crítica del Riesgo y la Regulación:** Se concluye que la incertidumbre geológica es, de lejos, el principal inhibidor para la inversión a gran escala en Colombia, al elevar desproporcionadamente la prima de riesgo. Si bien la Ley 1715 provee incentivos fiscales valiosos, es insuficiente sin la emisión de una normativa específica que regule la fase de exploración (perforación de riesgo) y la emisión de mecanismos de reparto de riesgo (fondos de mitigación) que incentiven la participación del sector privado en las etapas de mayor capital intensivo.
- **Valor de Carga Base y Resiliencia Energética:** La geotermia se consolida como un recurso estratégico endógeno que ofrece la única fuente de energía renovable transferible para reforzar la seguridad energética de Colombia. Su valor reside en su capacidad para ofrecer un suministro continuo y constante, que mitiga la vulnerabilidad de la matriz hidroeléctrica ante los fenómenos climáticos y reduce la dependencia de costosas plantas térmicas de respaldo.
- **Uso Integral y Sostenibilidad Hidrogeológica:** Se concluye que el futuro desarrollo de la geotermia debe ser integral. Es imperativo fomentar simultáneamente los proyectos de alta entalpía (generación eléctrica) y los de baja entalpía (usos directos), maximizando el aprovechamiento económico regional. Para ello, es indispensable la aplicación de modelos hidrogeológicos rigurosos (siguiendo el ejemplo de Paipa) que garanticen la sostenibilidad de la extracción del recurso y su coexistencia con el turismo termal.
- **Oportunidad de Descarbonización Regional:** El potencial de los usos directos del calor geotérmico representa una oportunidad económica subexplotada. Se concluye que la implementación de tecnologías de baja entalpía en los sectores agroindustrial y turístico no solo fomenta la diversificación económica regional en las zonas termales, sino que también contribuye directamente a la descarbonización de los procesos térmicos a nivel local, reemplazando el consumo de combustibles fósiles.
- **Necesidad de Capital Humano y Transferencia Tecnológica:** La expansión del sector geotérmico requiere un esfuerzo concertado en la formación de capital humano especializado en el país. Se concluye que la dependencia actual de expertos internacionales y la falta de programas técnicos y universitarios específicos para la perforación y operación geotérmica representan una limitación que debe ser superada para garantizar la sostenibilidad a largo plazo y el desarrollo de una industria nacional.

5.5 Recomendaciones

Se proponen recomendaciones concretas dirigidas a las entidades gubernamentales clave (Ministerio de Minas y Energía, UPME, ANH) para acelerar el desarrollo geotérmico:

- Creación de un Fondo de Mitigación de Riesgo: Se recomienda la urgente creación de un fondo público-privado o un esquema de garantía de riesgo exploratorio (similar a modelos internacionales exitosos) que cubra un porcentaje del costo de la perforación exploratoria fallida. Esto eliminaría el principal inhibidor de la inversión privada en la geotermia colombiana.
- Especialización del Marco Regulatorio: El Ministerio de Minas y Energía debe emitir la normativa específica para la geotermia, definiendo procedimientos claros de licenciamiento, concesión, y titularidad del recurso hídrico y energético, cerrando las brechas identificadas en la Ley 1715.
- Incentivos para Usos Directos y Geotermia Somera: Otorgar créditos preferenciales y subsidios para la adquisición e instalación de sistemas de intercambio térmico y bombas de calor en los sectores agroindustrial y turístico, facilitando la conversión de procesos térmicos de combustibles fósiles a calor geotérmico y fomentando la economía circular.
- Programa Nacional de Exploración y Caracterización: La UPME, en coordinación con el Servicio Geológico Colombiano, debe financiar un programa nacional de exploración y modelización tridimensional de las áreas de mayor potencial (Ruiz-Tolima), suministrando información de subsuelo de alta calidad para reducir el riesgo para los inversionistas.
- Formación de Capital Humano: Desarrollar un programa nacional, en alianza con universidades, para la formación de geo científicos e ingenieros especializados en la perforación y operación de sistemas geotérmicos, garantizando la sostenibilidad a largo plazo de la industria nacional.

Referencias

- CHAPARRO LEÓN, M. A. (2018). *Análisis comparativo de la implementación de energías renovables entre países como China y Colombia, como estrategia hacia el cambio climático*. BOGOTÁ: UNIVERSIDAD MILITAR NUEVA GRANADA.
- Akhigbe, E. (2025). Advancing geothermal energy: A review of technological developments and environmental impacts. *Gulf Journal of Advance Business Research*, 700-711.
- Alfaro, C., Vargas, C. A., & Moreno, M. (2014). Sismicidad, flujo de calor y potencial geotérmico en el norte de los Andes Centrales de Colombia. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 11-23.
- Alonso, G., Marín, J., & Acevedo, O. (2023). Geothermal energy: Opportunities for its development and challenges in Latin America. *Heliyon*, e20288.
- Amoatey, P., Chen, M., Al-Maktoumi, A., Izady, A., & Baawain, M. S. (2021). A review of geothermal energy status and potentials in Middle-East countries. *Springer Nature Link*, 245.
- Arango, M. P., & Arias, L. (2019). Potencial geotérmico en Colombia: Avances y desafíos. *Energía y Sostenibilidad*, 45-56.
- Arévalo Pacheco, G. J., & Guerrero García Rojas, H. R. (2014). Turismo de salud por medio del aprovechamiento de aguas termales. *ECONOMÍA Y SOCIEDAD*, 121-143.
- Arias Marín, G., & Acevedo Sánchez, A. M. (2017). *Estado actual de la producción de energía geotérmica en Colombia*. Manizales: Repositorio Institucional UNAD.
- Asociación Geotérmica Mexicana. (2005). GEOTERMIA. *REVISTA MEXICANA DE GEOENERGÍA*, 1-58.
- Asociación Geotérmica Mexicana. (2011). *REVISTA MEXICANA DE GEOENERGÍA*, 1-92.
- Ball, P. J. (2021). A Review of Geothermal Technologies and Their Role in Reducing Greenhouse Gas Emissions in the USA. *Energy Resources Technology*, 143-158.
- Baloch, M. K., Soomro, R. A., Kumar, S., Mirjat, M. S., Mirani, B. A., Soomro, M. I., & Lakho, M. T. (2024). Geothermal energy as a source of energy: History, opportunities and challenges. *Energy Reports*, 4380-4395.
- Barragán, R., & Alfaro, C. (2016). Identificación de zonas de interés geotérmico en Colombia a partir del análisis multivariado de datos geológicos y geofísicos. *Earth Sciences Research Journal*, 1-10.
- Bocanegra Torres, N. (2023). *Influencia geológica en la química de los sistemas de manantiales termales de las zonas del Huila, Puracé y Cundinamarca*. Bogotá D.C.: Universidad de los Andes.
- Botero-Gómez, L. A., Murcia, H., Sánchez, J. J., Gómez-Vasconcelos, M. G., & López-Palacio, J. (2025). Métodos de exploración y sistemas geotérmicos en Colombia con énfasis en el volcán Nevado del Ruiz, proyecto geotérmico Valle de Nereidas. *Boletín de Geología*, 63-91.
- Botta, E., Fiaschi, D., & Manfrida, G. (2024). Geothermal energy: From the first energy crisis to the green energy transition. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 110481.
- Caldas Afanador, V. L. (2023). *Estimación de los efectos del cambio climático en la recarga de acuíferos de aguas termales mediante modelos de balance hídrico de suelos caso de estudio: sistema geotérmico Paipa*. Bogotá D.C.: Escuela Colombiana de Ingeniería.
- Cardona Ghisays, E. (2024). *Caracterización geológica de la manifestación hidrotermal de Usiacuri, Atlántico, Colombia y usos potenciales de geotermia de baja entalpía*. Barranquilla: Universidad del Norte.
- Cardona, D., Tamayo, J. A., & Eslava-Garzón, J. S. (2024). Hacia una matriz energética sostenible en Colombia. Una revisión sistemática de la literatura. *SciELO*, 1-16.
- Ceballos-Mahecha, M., Jaramillo, C., & Montes-Guerra, J. M. (2024). Analysis of geothermal technology development in the Colombian energy transition to 2050 using system dynamics. *Cleaner Engineering and Technology*, 100689.
- Chandrasekharam, D., & Bundschuh, J. (2002). *Geothermal Energy Resources for Developing Countries*. Lisse: A.A. BALKEMA PUBLISHERS.
- Chomać-Pierzecka, E., Sobczak, A., & Soboń, D. (2022). The Potential and Development of the Geothermal Energy Market in Poland and the Baltic States—Selected Aspects. *Energies*, 15(11).

- Conde Serra, A., & Asato, G. (2024). Recursos geotérmicos de alta entalpía para la generación de energía eléctrica. *El Ojo del Cóndor*, 34-37.
- Córdoba Ruiz, M. (2022). *Identificación de nuevas áreas para la exploración en geotermia no convencional en Colombia*. Barranquilla: Universidad del Norte.
- Cruz-Negrete, J. D., Andrade-Arango, Y., & Vaca-López, A. (2024). Economía y Energía: Análisis de la Eficiencia Energética y el Rol de las Energías Renovables. *CLIO América*, 100.
- D. G. MUNDIAL. (2017). *La energía geotérmica*. Banco Mundial [Online].
- Escallón, S. D., Gama, I. D., & Jaramillo Quintero, T. (2021). Transición Energética en Colombia: No Necesariamente una Realidad que se Sustenta en el Cambio Climático. *Verba Iuris*, 105.
- Franco, E., Rojas, L., & Rincón, D. (2017). Geotermia en Colombia: estado actual y perspectivas de desarrollo. *Boletín de Geología*, 7-20.
- García Rodríguez, F. J., Hernández Martín, R., Simancas Cruz, M. R., Padrón Fumero, N., Rodríguez Rodríguez, Y., Gahr, D., . . . Álvarez Torres, L. (2015). *Aprovechamiento de la Fuente Santa para uso turístico termal*. Santa Cruz de Tenerife: Cátedra de Turismo CajaCanarias – Ahsotel - ULL.
- Geng, Y., Shi, Y., Dong, J., Sun, L., & Hu, Z. (2024). A review of geothermal energy for sustainable development: historical background, current situation and future prospective. *Geoenergy Science and Engineering*, 212557.
- Gómez Romero, D. A. (2019). *MODELO GEOTÉRMICO DE PAIPA MEDIANTE EXPLORACIÓN DEL SUBSUELO Y ANÁLISIS FÍSICO QUÍMICO DE AGUAS TERMALES*. Tunja: UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA Y TECNOLÓGICA DE COLOMBIA.
- González-Acevedo, C. A., & Zapata-Restrepo, J. P. (2020). Análisis del marco legal y regulatorio para el desarrollo de proyectos geotérmicos en Colombia. *Revista de Derecho y Economía*, 89-105.
- González-Idárraga, C. E. (2020). Caracterización resistiva 3D del área geotérmica de Paipa, Colombia. *Boletín de Geología*, 81-97.
- Gutiérrez, G., & Maya, J. (2017). Energía geotérmica en la transición energética de México: oportunidades y desafíos. *Economía Informa*, 86-102.
- Hecht Méndez, J., Fuenmayor Siciliano, M., Bello Rujana, L., & Molina Giraldo, N. (2012). USO DE LA ENERGÍA GEOTÉRMICA SOMERA – UN RETO ALCANZABLE PARA LOS PAÍSES LATINOAMERICANOS. *Revista Latino-Americana de Hidrogeología*, 48-57.
- Hernández Palma, H., Novoa, D. J., & Mendoza Cásseres, D. (2023). Energía renovables y medidas de eficiencia energética aplicables a las instituciones prestadoras de salud en Colombia. *RCTA*, 123-131.
- Hiriart Le Bert, D. (2011). *Evaluación de la Energía Geotérmica en México*. México D.F.: CRE.
- Islam, M. T., Nabi, M. N., Arefin, M. A., Mostakim, K., Rashid, F., Hassan, N. M., . . . Muyeen, S. M. (2022). Trends and prospects of geothermal energy as an alternative source of power: A comprehensive review. *Heliyon*, e11836.
- Jafari, H. M., Jafari, F., & Alimohammadi, A. (2024). Geothermal energy: A sustainable energy source current status and future challenges. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 1-22.
- Kassem, M. A., & Moscariello, A. (2025). Geothermal energy for sustainable energy transitions and climate change mitigation. *Geoenergy Science and Engineering*, 212586.
- Kassem, M. A., & Moscariello, A. (2025). Geothermal energy: A sustainable and cost-effective alternative for clean energy production and climate change mitigation. *Sustainable Futures*, 101247.
- Korucan, A., Derin-Gure, P., Celebi, B., Baker, D. K., & Velde, M. V. (2024). Opportunities and challenges of geothermal energy in Turkiye. *Energy for Sustainable Development*, 101417.
- Kumar, L., Hossain, M. S., Assad, M. E., & Manoo, M. U. (2022). Technological Advancements and Challenges of Geothermal Energy Systems: A Comprehensive Review. *Energies*, 15(23).
- Kumar, L., Kumar, K., & Kumar, S. (2022). Technological advancements and challenges of geothermal energy systems: a comprehensive review. *Energies*, 1144.
- León García, E. L. (2024). *Estimacion del potencial geotermico de los campos petroleros agotados*

- mediante el metodo volumetrico calor en sitio, caso de estudio: Campo Monclova-Buena Suerte en la Cuenca de Sabinas, Coahuila.* Ciudad de México: Universidad Nacional Autonoma de México.
- López, A., & Mejía, L. (2021). Casos de estudio de proyectos geotérmicos en Colombia: Lecciones aprendidas. *Cuadernos de Energía*, 25-38.
- López-Rodríguez, P., Cadavid-Zapata, J., & Mejía-Giraldo, J. A. (2022). Systematic Review of the Geothermal Potential in Colombia: Implications as an Alternative Energy Source. *Energies*, 6825.
- Marzolf, N. C. (2014). *Emprendimiento de la energía geotérmica en Colombia*. Convenio ISAGEN – BID/JC. Colombia : Banco Interamericano de Desarrollo .
- Ministerio de Mina y Energía. (2021). *Planes de Expansión de Referencia Generación Transmisión 2014-2028*. Bogotá D.C.: Ministerio de Mina y Energía.
- Molia-Carvajal, L., Rivera, M. E., Delgado-Rodríguez, J., & Cajiao-Pedraza, Á. (2023). Calidad del agua termal en los municipios de Bochalema y Chinácota, Colombia. *Boletín de Geología*, 65-77.
- Morales-Ruiz, S., & Muñoz-Cerón, E. (2018). Energía geotérmica: Ventajas y desventajas de una energía renovable y sostenible. *Ingeniería y ciencia*, 1-15.
- Nieto, A., & Ojeda, M. (2018). Controles geológicos y estructurales de los sistemas geotérmicos en el Macizo Volcánico Ruiz-Tolima, Colombia. *Journal of South American Earth Sciences*, 1-15.
- Núñez, P., Díaz Sáez, D., & Velásquez Espinoza, P. (2008). *Geotermia*.
- Ochoa Salazar, K. G. (2020). El aprovechamiento de las aguas termales como recursos turístico para el desarrollo del sector de Aluchan del Cantón Pujilí, Provincia de Cotopaxi. *Latacunga*, 121.
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. (2015). *Uses of geothermal energy in food and agriculture*. Roma: FAO.
- Ortega-Ramírez , A. T., & Brand-García, L. C. (2024). Tecnologías para el aprovechamiento de energía geotérmica en pozos petroleros. *El reventón energético*, 47-60.
- Ortiz, G., & Marín, Y. (2019). Caracterización geoquímica de fluidos geotérmicos en el área de Tufiño-Chiles-Cerro Negro, frontera Colombia-Ecuador. *Revista Geológica de América Central*, 1-17.
- Pereira Blanco, M., & Turizo Pereira, L. Á. (2020). Medidas para la implementación del uso racional y eficiente de la energía : caso de las energías renovables en Colombia, estado del arte, avances y retos. *Revista Jurídica*, 43-71.
- Pérez-Floréz, M. A., & Vargas, C. A. (2018). Estado del arte de la energía geotérmica en Colombia. *Tecnura*, 15-27.
- PINTO CALDERÓN, M. D., PAREJA MOLINA, Y. A., Moreno, L. F., & Gutiérrez, A. P. (2024). *ESTUDIO PROSPECTIVO ESTRATÉGICO SOBRE LA TRANSICIÓN ENERGÉTICA EN COLOMBIA AL 2040*. BOGOTÁ: UNIVERSIDAD EXTERNADO DE COLOMBIA.
- Robles Algarin, C., & Rodríguez Álvarez , O. (2018). Un panorama de las energías renovables en el Mundo, Latinoamérica y Colombia. *Revistas Espacios*, 10.
- Rodriguez Mora, J. S. (2023). *IDENTIFICACIÓN DE LAS PRINCIPALES TERMALES EN CUNDINAMARCA, EN RELACIÓN A SU ESTADO SOCIOECONÓMICO Y FÍSICO-QUÍMICO*. Bogotá D.C.: FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA.
- Rodriguez Rodriguez, G. F. (2024). *GEOMODEL-GIS: PLUG-IN PARA QGIS DE CLASIFICACIÓN GEOLÓGICA Y GEOTÉRMICA DE DATOS DE MAGNETOTELÚRICA PARA LA COMPRENSIÓN DE SISTEMAS GEOTERMICOS HIDROTERMALES*. Bogotá, D.C.: Universidad Distrital Francisco José de Caldas .
- San Miguel-Ferreras, P. (2018). Energía geotérmica: el calor de la tierra. *Revista Iberoamericana de Energía*, 25-38.
- Sanint, E., Aristizábal, A., Dynner, I., & Carreño, D. (2024). *Prospectiva de la Geotermia en Colombia hacia 2050*. Bogotá: Universidad de Bogotá Tadeo Lozano .
- Santoyo-Gutiérrez, E., & Torres-Alvarado, I. S. (2010). Escenario futuro de explotación de la energía geotérmica: hacia un desarrollo sustentable. *Revista Digital Universitaria*, 3-21.
- Shelare, S., Kumar, R., Gajbhiye, T., & Kanchan, S. (2023). Role of Geothermal Energy in Sustainable Water Desalination—A Review on Current Status, Parameters, and Challenges. *Energies*, 16(6).

- Soltani, M., Kashkooli, F. M., & Souyris, P. (2022). The role of geothermal energy in the global energy transition: Drivers, inhibitors, market potential, technological, environmental, and future advances. *Energy Reports*.
- Soltani, M., Kashkooli, F. M., Sour, M., Rafiei, B., Jabarifar, M., Gharali, K., & Nathwani, J. (2021). Environmental, economic, and social impacts of geothermal energy systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 110750.
- Stavro, X. I. (2024). *ANALIZAR OFERTA DE FORMACIÓN EN EMPLEOS VERDES PARA APOYAR LA TRANSICIÓN ENERGÉTICA JUSTA EN COLOMBIA*. Interfaz.
- Umar, M., Awosusi, A. A., Adegboye, R. O., & Ojekemi, O. S. (2024). Geothermal energy and carbon emissions nexus in leading geothermal-consuming nations: Evidence from nonparametric analysis. *Energy & Environment*, 2726-2752.
- Unidad de Planeación Minero Energética. (2019). *PLAN ENERGÉTICO NACIONAL 2020- 2050*. Bogotá D.C.: REPÚBLICA DE COLOMBIA.