

Energía Geotérmica: historia, potencial y perspectivas para la transición energética en Colombia

Proyecto Geotérmico Valle de Nereidas

Autores

Julián Andrés Ortiz González

Julián López Palacio

Central Hidroeléctrica de Caldas, CHEC grupo EPM

Área de generación de energía

Equipo de ingeniería y proyectos de generación

Manizales

Caldas

2025

Tabla de contenido

1.	Resumen Ejecutivo	3
2.	Introducción.....	3
3.	Generación de electricidad con energía geotérmica	6
4.	Historia de la generación eléctrica con energía geotérmica en el Mundo	8
	Orígenes pioneros: Italia y el nacimiento de la geotermia eléctrica (1904–1930)	8
	Expansión industrial: Estados Unidos y The Geysers (1960–1987)	8
	Diversificación global: Nueva Zelanda, México, Japón y Filipinas (1950–1990).....	8
	Consolidación tecnológica: reinyección, ciclo binario y sostenibilidad (1990–2010)...	8
	Auge global: Asia, África y América (2000–2020)	9
	América Latina:	9
	Innovación, expansión global y nuevas tecnologías (2020 hacia el futuro):.....	9
5.	Potencial geotérmico para generación de electricidad en Colombia	10
	Primer proyecto de generación de electricidad con geotermia en Colombia:	11
6.	La historia del proyecto geotérmico valle de Nereidas	11
	1968–1985: Exploración Inicial	11
	1992–1997: Reactivación por Crisis Energética	12
	1998–2009: Búsqueda de Financiamiento y Reestructuración	12
	2012–2016: Estudios de Prefactibilidad	12
	2016–2019: Consolidación y Preparación	12
	2020–Presente: Trabajo con aliados y nuevas estrategias de desarrollo	12
7.	El papel de la energía geotérmica en la transición energética.....	13
8.	La firmeza que trae la geotermia a la matriz energética colombiana	14
9.	Huella ambiental de los proyectos geotérmicos	15
10.	Usos directos de la energía geotérmica	17
11.	Discusión	18
12.	Conclusiones.....	19
13.	Referencias	19

1. Resumen Ejecutivo

Este documento presenta una visión integral sobre la evolución, el estado actual y el potencial de la energía geotérmica a nivel mundial y en Colombia. Se destaca cómo esta fuente renovable, limpia y constante ha acompañado a la humanidad desde tiempos ancestrales, pasando de usos tradicionales como baños termales y calefacción, hasta convertirse en una tecnología clave para la generación eléctrica y el desarrollo sostenible.

A nivel global, más de 35 países generan electricidad con geotermia, alcanzando una capacidad instalada superior a 16.800 MWe. Países como Estados Unidos, Indonesia, Filipinas, Turquía, Nueva Zelanda y Kenia lideran este desarrollo. En América Latina, México, Costa Rica y El Salvador han consolidado proyectos exitosos, mientras que Colombia avanza en la exploración de su potencial.

El Servicio Geológico Colombiano (SGC) identificó 21 áreas geotérmicas con un potencial preliminar de hasta 1.170 MWe, distribuidas en cinco bloques geográficos. Este recurso representa una oportunidad estratégica para diversificar la matriz energética nacional, reducir la dependencia de combustibles fósiles y fortalecer la seguridad energética, especialmente en contextos de variabilidad climática.

Además de su uso para generación eléctrica, la geotermia ofrece múltiples aplicaciones directas en sectores como la agricultura, la acuicultura, la industria y el turismo, con beneficios ambientales, sociales y económicos. Su bajo impacto ambiental, alta disponibilidad y capacidad de operación continua la posicionan como una de las fuentes renovables más firmes y sostenibles.

El documento también presenta la historia del proyecto geotérmico Valle de Nereidas, sus avances técnicos, licenciamiento ambiental y alianzas estratégicas, consolidándolo como uno de los proyectos más prometedores del país.

2. Introducción

La energía geotérmica es una fuente no convencional de energía renovable (FNCR) que se define como la energía térmica generada y almacenada en la Tierra, proveniente en un 20% de la formación original del planeta y en un 80% de la desintegración radiactiva de minerales presentes en el subsuelo (Bassam et al., 2013). Esta fuente de energía limpia y constante ha acompañado a la humanidad desde tiempos ancestrales, siendo una de las formas más antiguas, versátiles y sostenibles de aprovechamiento energético.

Su uso directo ha sido documentado durante más de 2,000 años en diversas culturas alrededor del mundo, desde las aguas termales sagradas de los romanos y los japoneses, hasta los sistemas de calefacción distrital en la Europa medieval. Las aguas termales han sido utilizadas para baños terapéuticos, cocción de alimentos, calefacción de viviendas, producción de sal, riego agrícola e incluso como símbolo de poder espiritual y curación. Civilizaciones como la romana, la china, la celta y la otomana desarrollaron complejos sistemas sociales y tecnológicos en torno a estas fuentes naturales de calor. Con el avance de

la ciencia y la tecnología, especialmente desde el siglo XIX, la geotermia evolucionó hacia aplicaciones más sofisticadas, como la generación de electricidad, el uso de bombas de calor geotérmicas y la implementación de sistemas de calefacción urbana. En este sentido, los aprovechamientos de la geotermia se pueden clasificar por profundidad o temperatura del recurso. En la Figura 1 se presenta un diagrama de esta clasificación (Government of Western Australia, 2004).

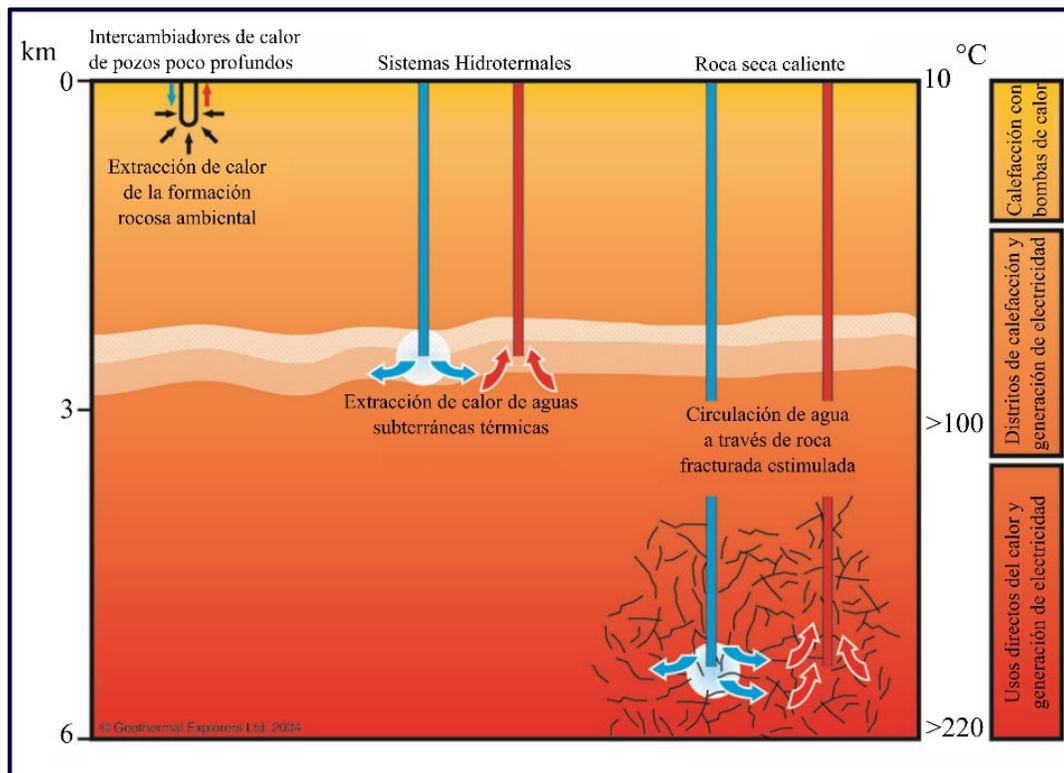


Figura 1: Tipos de tecnologías para el aprovechamiento de la energía geotérmica dependiendo de la profundidad (Fuente: Government of Western Australia, 2004).

Como se observa en la Figura 1, al clasificar los aprovechamientos geotérmicos por profundidad tenemos tres tipos:

- Someros o de baja profundidad (< 500 m) donde se aprovecha la temperatura estable del subsuelo a través de intercambiadores de calor y bombas de calor.
- Profundidad media (> 1500 m), se buscan formaciones geológicas que alberguen reservorios hidrotermales, con un fluido geotérmico que pueda ser implementado en procesos de producción de electricidad y en usos directos del calor.
- Recursos a gran profundidad (> 4000 m), donde se busca una formación rocosa a alta temperatura que, al ser sometida a un proceso de fractura y estimulación, pueda ser usada para calentar un fluido de trabajo, que alimenta usos directos del calor o procesos de generación de electricidad.

Ejemplos emblemáticos del aprovechamiento de recursos geotérmicos incluyen la planta de Larderello en Italia (la primera en generar electricidad geotérmica en 1904), el sistema de calefacción de Boise en Estados Unidos (1890), y el liderazgo actual de Islandia, donde más del 90% de los hogares se calientan con energía geotérmica (Ingrid Stober, 2021).

Según datos del Congreso Mundial de Geotermia 2020 (WGC2020), 88 países reportaron usos directos de la energía geotérmica entre 2015 y 2019, lo que representa un crecimiento significativo respecto a años anteriores. Esta expansión global demuestra cómo la geotermia ha pasado de ser un recurso local y tradicional, para convertirse en una solución energética moderna, limpia y resiliente, capaz de impulsar el desarrollo sostenible en múltiples regiones del planeta.

Además, 35 países ya utilizan la energía geotérmica para la generación de electricidad, alcanzando una capacidad instalada global de 16,873 MWe al cierre de 2024. Los 10 países líderes —entre ellos Estados Unidos, Indonesia, Filipinas, Turquía, Nueva Zelanda y Kenia— concentran el 93% de esa capacidad instalada, lo que evidencia su papel protagónico en el desarrollo de esta fuente energética (ThinkGeoEnergy, 2025). De esta manera en la Figura 2 se presentan los 10 países con mayor capacidad instalada de generación de electricidad con energía geotérmica a nivel mundial.

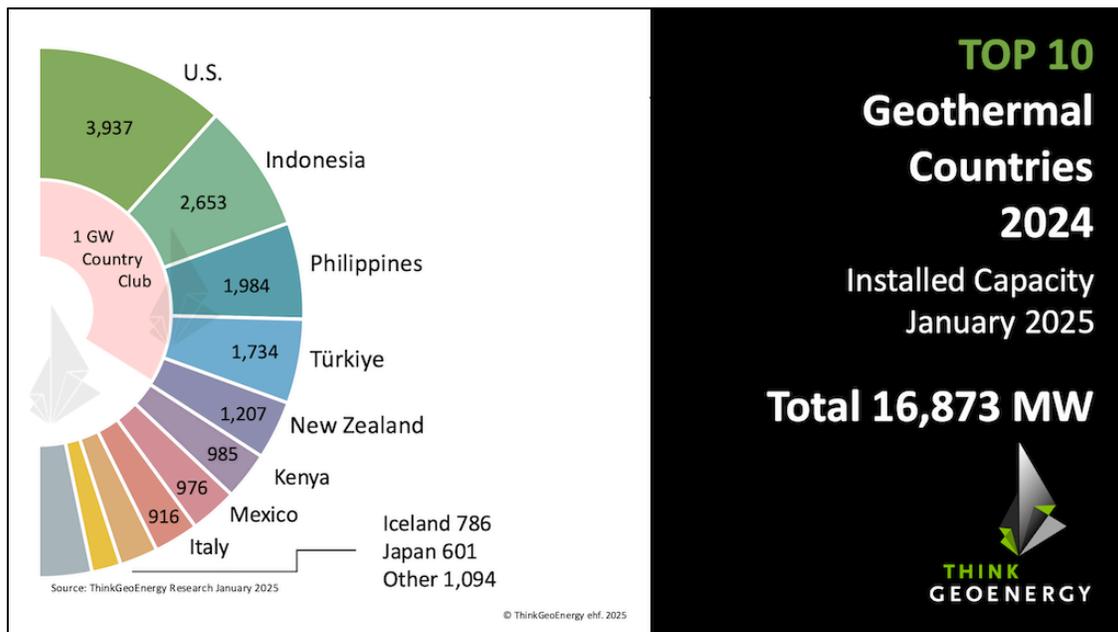


Figura 2: Los 10 países con mayor capacidad instalada de generación de electricidad con energía geotérmica a nivel mundial (Fuente: ThinkGeoEnergy, 2025).

3. Generación de electricidad con energía geotérmica

La generación de electricidad a partir de energía geotérmica es un proceso altamente eficiente y sostenible que aprovecha el calor natural del interior de la Tierra. Para poder implementar la tecnología más utilizada, se debe buscar un yacimiento subterráneo de salmuera caliente (agua con alto contenido de sales), que debe encontrarse a profundidades no mayores a 3,000 metros, contenido por una capa sello impermeable y alimentado por una fuente de calor somera, como una cámara magmática. La siguiente Figura ilustra de manera clara y didáctica, cómo funciona este sistema de generación de electricidad con geotermia tipo Flash Simple:

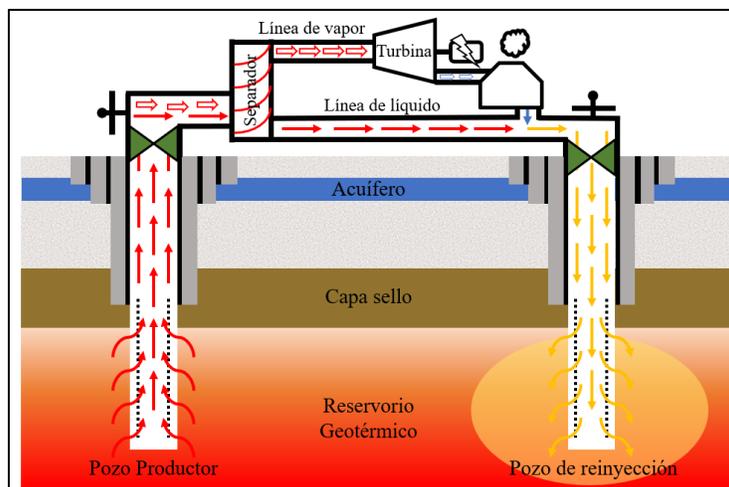


Figura 3: Sistema de generación eléctrica a partir de energía geotérmica con ciclo Flash Simple.

El proceso comienza con la extracción de fluidos geotérmicos (agua y vapor) desde el reservorio subterráneo a través de un pozo productor. Estos fluidos, al alcanzar la superficie, pasan por un separador que divide el vapor del líquido. El vapor se dirige a una turbina de vapor, donde su energía térmica se convierte en energía mecánica. Esta, a su vez, es transformada en electricidad mediante un generador acoplado.

El líquido restante y el vapor condensado se canalizan hacia un pozo de reinyección, donde se devuelven al reservorio para mantener la presión del sistema y permitir que el ciclo continúe de forma sostenible.

Adicionalmente, según el tipo de recurso geotérmico disponible, se emplean diferentes tecnologías de conversión (González et al. 2023).

- Ciclo seco: usa vapor seco directamente desde el reservorio.
- Ciclo Flash (simple o doble): utiliza agua caliente que se vaporiza al reducir la presión.
- Ciclo binario (ORC): transfiere el calor del fluido geotérmico a un fluido secundario con bajo punto de ebullición, ideal para recursos de baja temperatura.

La Figura 3 también destaca componentes clave del sistema subterráneo, como la capa sello, que impide fugas hacia la superficie; los recubrimientos del pozo, que protegen los acuíferos; y el reservorio geotérmico, donde se almacena el calor aprovechado proveniente de la fuente de calor. Esta es una representación clásica, ya que, a nivel mundial, la mayoría de los sistemas utilizados para la generación de electricidad presentan estas características y se clasifican como sistemas hidrotermales, de profundidad media y alta entalpía (ver Figura 1).

Entonces, cuando la geotermia se usa para generación de electricidad, tiene unas ventajas que la hacen destacarse por encima de otras FNCER, como los son la energía solar y la energía eólica. A continuación, se presentan algunas de estas ventajas (Enel Green Power, 2021).

- **Generación continua y confiable:** La geotermia permite producir electricidad de forma constante, las 24 horas del día, los 7 días de la semana. A diferencia de otras fuentes renovables, no depende de la luz solar, el viento ni las condiciones climáticas. En promedio, una planta geotérmica opera alrededor de 8.600 horas al año, frente a unas 2.000 horas en el caso de las plantas solares. Esto la convierte en una fuente firme y predecible, ideal para garantizar la estabilidad del sistema eléctrico.
- **Uso eficiente del suelo:** Las plantas geotérmicas requieren una superficie significativamente menor en comparación con instalaciones solares o eólicas. En instalaciones a gran escala, los principales componentes visibles son las torres de enfriamiento y las turbinas. Además, los diseños modernos han reducido considerablemente su impacto visual.
- **Funcionamiento silencioso:** Durante su operación normal, las plantas geotérmicas generan niveles de ruido muy bajos. Aunque la fase de construcción puede implicar cierto ruido, este disminuye notablemente una vez que la planta entra en funcionamiento.
- **Alta generación de empleo:** Según datos de ENEL, la geotermia genera más empleos indirectos por megavatio instalado que otras fuentes renovables: aproximadamente 34 empleos/MW, frente a 19 en la energía eólica y 12 en la solar fotovoltaica.
- **Mayor producción energética por potencia instalada:** Gracias a su operación continua, la geotermia puede aprovechar al máximo su capacidad instalada. Esto contrasta con otras tecnologías renovables que dependen de factores intermitentes y rara vez operan a plena capacidad.
- **Reciclaje térmico y de componentes:** Las plantas geotérmicas están diseñadas para reutilizar tanto el calor residual como sus componentes al final de su vida útil. Además, el calor no utilizado en la generación eléctrica puede destinarse a usos directos, como calefacción o procesos industriales, mediante un enfoque de aprovechamiento en cascada.
- **Durabilidad, seguridad y confiabilidad:** Las instalaciones geotérmicas tienen una vida útil que puede superar los 40 años, muy por encima de tecnologías convencionales como las calderas. Al no utilizar combustibles, presentan un bajo riesgo de incendio y una alta confiabilidad operativa.

4. Historia de la generación eléctrica con energía geotérmica en el Mundo

La generación de electricidad a partir de energía geotérmica ha evolucionado desde experimentos pioneros a principios del siglo XX hasta convertirse en una fuente renovable clave en varios países. Su desarrollo ha estado condicionado por factores geológicos, avances tecnológicos, políticas energéticas y crisis económicas. A continuación, se presentan algunos de los hitos más relevantes de la generación eléctrica con geotermia a nivel mundial (DiPippo, 2016; Ingrid Stober, 2021).

Orígenes pioneros: Italia y el nacimiento de la geotermia eléctrica (1904–1930)

La historia de la generación eléctrica con energía geotérmica comienza en Larderello, Italia, donde en 1904, el príncipe Piero Ginori Conti logró encender cinco bombillas utilizando vapor natural. Este experimento marcó el inicio de la geotermia moderna. En 1913, se instaló la primera planta comercial de 250 kWe, y durante las siguientes décadas, Larderello se consolidó como el epicentro mundial de la geotermia, combinando la producción de electricidad con la extracción de ácido bórico.

Expansión industrial: Estados Unidos y The Geysers (1960–1987)

Inspirado por el modelo italiano, Estados Unidos desarrolló su primer proyecto comercial en The Geysers, California, en 1960, con una planta de 11 MWe. Durante las décadas de 1970 y 1980, impulsado por la crisis del petróleo y políticas como PURPA, The Geysers creció hasta alcanzar 2.000 MWe en 1989, convirtiéndose en el campo geotérmico más grande del mundo.

Diversificación global: Nueva Zelanda, México, Japón y Filipinas (1950–1990)

- Nueva Zelanda desarrolló Wairakei en 1958, la primera planta geotérmica a gran escala fuera de Italia.
- México inició operaciones en Cerro Prieto en 1973, que se convirtió en uno de los campos más grandes del mundo, seguido por Los Azufres, Los Humeros y Las Tres Vírgenes.
- Japón comenzó a desarrollar sus recursos en los años 60 y 70, alcanzando más de 500 MWe en las décadas siguientes.
- Filipinas: en 1984 alcanzó llegó a una capacidad instalada de 890 MWe de capacidad instalada distribuidos en 4 campos.

Consolidación tecnológica: reinyección, ciclo binario y sostenibilidad (1990–2010)

Durante este periodo, la industria geotérmica adoptó prácticas de gestión sostenible:

- En The Geysers, la reinyección de aguas residuales tratadas estabilizó la producción.
- En Larderello, se abandonó la producción de ácido bórico y se modernizaron las plantas. De esta manera, este campo continúa generando hasta el día de hoy, con más de 110 años de historia desde la entrada en operación de su primera unidad comercial.
- Se avanzó en tecnologías como el ciclo binario para aprovechar recursos de menor temperatura, consiguiendo también ventajas ambientales y de estandarización.

- Se estableció la reinyección como regla en todos los proyectos geotérmicos a nivel mundial.

Auge global: Asia, África y América (2000–2020)

- Indonesia: con un potencial estimado de 29.000 MW, es el líder en este indicador a nivel mundial. con este panorama ha venido creciendo significativamente, ya que en 2015 había desarrollado 1.438 MWe y en 2024 llegó a 2.653 MWe.
- Kenia: su exploración comenzó en 1956 en Olkaria, y la primera planta de 15 MWe se comisionó en 1981. Hoy en día cuenta con 885 MWe de capacidad instalada, lo que representa el 47% de la electricidad generada del país.
- Turquía: en estos años logró instalar más de 1.300 MWe de proyectos geotérmicos, que son la base de los 1.734 MWe que tienen en la actualidad.
- Estados Unidos: en estas dos décadas sumó más de 1.000 MWe de capacidad instalada, superando la barrera de los 3.500 MWe en su parque geotérmico nacional.

América Latina:

- México: Con 976 MWe instalados, es el líder regional. Destacan Cerro Prieto, Los Azufres, Los Hornos y Domo San Pedro (el primer campo privado).
- Costa Rica: 247 MWe instalados en Miravalles y Las Pailas. Actualmente se encuentra desarrollando el campo Borinquen con una proyección de 110 MWe de capacidad instalada.
- El Salvador: 209 MWe en Ahuachapán y Berlín, con planes de expansión.
- Nicaragua: 164 MWe en Momotombo y San Jacinto-Tizate, con nuevas concesiones en desarrollo.
- Guatemala: 53 MWe en Zunil y Amatitlán, con potencial en Zunil 2.
- Chile: 81 MWe de capacidad instalada con su planta en Cerro Pabellón.
- Perú, Bolivia y Ecuador: avanzan en exploración, con proyectos piloto, estudios de prefactibilidad y cooperación internacional (JICA, BID, IRENA).

Innovación, expansión global y nuevas tecnologías (2020 hacia el futuro):

- Desde 2020, la energía geotérmica ha entrado en una nueva etapa de desarrollo impulsada por avances tecnológicos, mayor inversión y un renovado interés por parte de gobiernos e industrias. La aparición de tecnologías de próxima generación, como los sistemas geotérmicos mejorados (EGS) y los sistemas de circuito cerrado (AGS o CLGS), ha permitido superar las limitaciones geológicas tradicionales, abriendo la posibilidad de explotar recursos geotérmicos en regiones sin reservorios hidrotermales convencionales.
- La Agencia Internacional de Energía estima que, con reducciones de costos y apoyo político, la geotermia de próxima generación podría alcanzar hasta 800 GW de capacidad instalada para 2050, cubriendo cerca del 8% de la demanda eléctrica global. Además, se proyecta un papel creciente en calefacción distrital, procesos industriales y almacenamiento energético subterráneo, así como en la extracción de minerales críticos como el litio a partir de salmueras geotérmicas (IEA 2024).

5. Potencial geotérmico para generación de electricidad en Colombia

El Servicio Geológico Colombiano (SGC) realizó una evaluación nacional del recurso geotérmico mediante el método volumétrico, con el objetivo de cuantificar el calor almacenado y la potencia eléctrica potencial asociada a sistemas hidrotermales convectivos.

Como resultado de este análisis, se identificaron 21 áreas geotérmicas distribuidas en distintas regiones del país, principalmente asociadas a sistemas volcánicos activos e inactivos. Estas áreas fueron agrupadas en cinco bloques geotérmicos, definidos con base en criterios geológicos, tectónicos y de distribución espacial de los manantiales termales. La Figura 4 presenta la ubicación geográfica de estas áreas geotérmicas (polígonos negros) y su agrupación en bloques (polígonos amarillos), los cuales son:

- Paipa – Iza (Cordillera Oriental)
- San Diego (norte de la Cordillera Central)
- Cerro Bravo – Cerro Machín (centro de la Cordillera Central)
- Huila – Sucubún (sur de la Cordillera Central)
- Las Ánimas – Chiles (flanco oriental de la Cordillera Occidental)

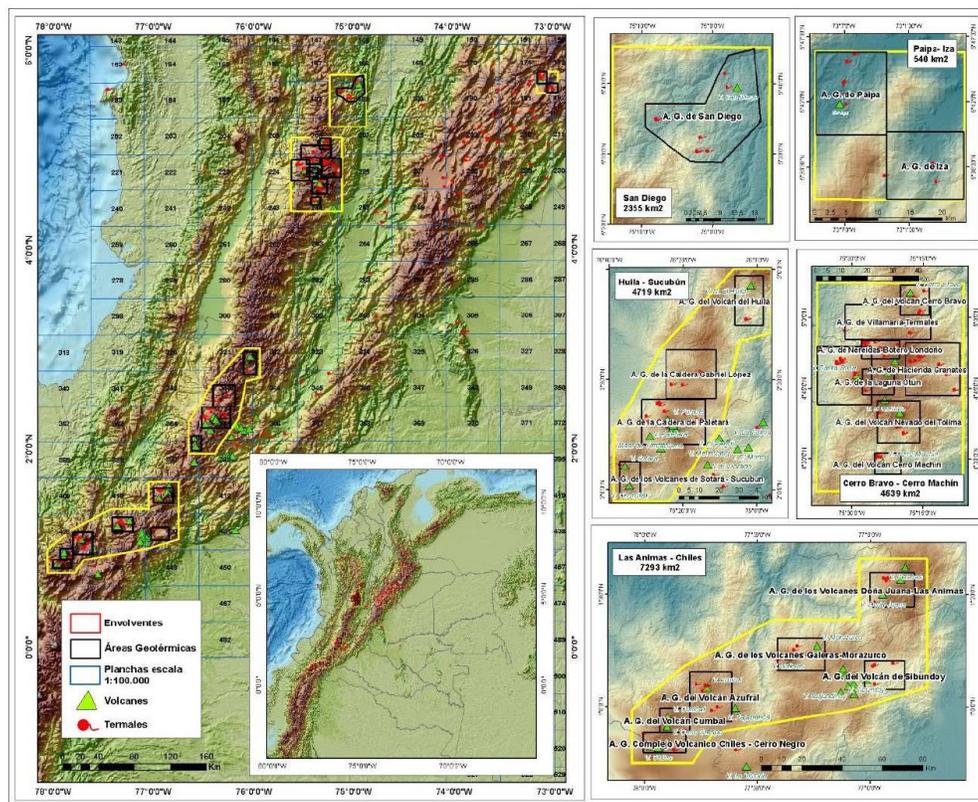


Figura 4: Localización de las áreas geotérmicas (polígonos negros) y bloques geotérmicos (polígonos amarillos), identificados por el Servicio Geológico Colombiano como las de mayor potencial en el país (Fuente: Alfaro et al., 2020).

Estas zonas fueron priorizadas por su potencial energético, evidenciado en la presencia de manifestaciones termales, estructuras volcánicas recientes y condiciones geológicas favorables para el desarrollo de reservorios geotérmicos. La delimitación de estas áreas no solo permite visualizar el potencial geotérmico del país, sino que también constituye una

herramienta clave para orientar futuras campañas de exploración, perforación y desarrollo de proyectos de generación eléctrica a partir de fuentes renovables no convencionales. De esta manera, fue identificando un potencial preliminar de generación eléctrica de hasta 1.170 MW, distribuidos en las 21 zonas (Alfaro et al., 2020).

Al tratarse de un recurso local, su aprovechamiento contribuye al fortalecimiento de la independencia energética nacional, un aspecto especialmente relevante en el contexto actual, marcado por la creciente importación de combustibles fósiles para satisfacer la demanda interna. Este factor también cobra importancia al considerar la implementación de plantas nucleares, ya que, a diferencia de la geotermia, los materiales radiactivos requeridos para su operación tendrían que ser importados.

Primer proyecto de generación de electricidad con geotermia en Colombia:

En marzo de 2021 se inauguró la primera planta de generación de energía geotérmica en Colombia, marcando un hito en la historia energética del país. El proyecto, desarrollado por Parex Resources Inc. consiste en una unidad piloto de 100 kW ubicada en el campo petrolero Las Maracas, en el departamento de Casanare.

Cabe resaltar que este proyecto representa un tipo de sistema geotérmico distinto al ilustrado en la Figura 3 y al que se emplea en la mayoría de los proyectos de generación eléctrica a nivel mundial. Mientras que los sistemas convencionales —como los de ciclo Flash o vapor seco— requieren recursos de alta entalpía (temperaturas superiores a 150 °C), el proyecto de Parex opera con un recurso de baja a media entalpía (entre 70 y 100 °C), aprovechando fluidos geotérmicos coproducidos durante la extracción de petróleo (PiensaGeotermia, 2021).

Este sistema utiliza tecnología ORC (Ciclo Orgánico de Rankine), diseñada y suministrada por la empresa española Rank, y permite generar hasta 100 kW de electricidad de forma continua. Este enfoque híbrido no solo reduce el uso de diésel en zonas remotas, sino que también representa un modelo replicable para el aprovechamiento de recursos geotérmicos de baja temperatura en campos petroleros.

6. La historia del proyecto geotérmico valle de Nereidas

El proyecto geotérmico Valle de Nereidas comenzó en 1968 con estudios preliminares realizados por la CHEC (Central Hidroeléctrica de Caldas) y ENEL (Italia). A lo largo de las décadas, el proyecto ha pasado por varias fases de exploración, cooperación internacional y reactivaciones, influenciado por factores técnicos, políticos y naturales.

1968–1985: Exploración Inicial

- Estudios geológicos, geofísicos y geoquímicos, con el apoyo del gobierno italiano.
- Identificación de zonas con alto potencial: Las Nereidas, Laguna del Otún y Volcán Machín.
- En 1985, la erupción del Nevado del Ruiz y factores políticos detuvieron el proyecto.

1992–1997: Reactivación por Crisis Energética

- El fenómeno de El Niño provocó racionamientos eléctricos, reavivando el interés en fuentes renovables como la geotermia.
- CHEC creó Geoenergía Andina S.A. (GESA), para ejecutar el proyecto.
- Con la Resolución 0211 del 2 de agosto de 1994 fue otorgada la licencia ambiental.
- En 1997 se perforó el pozo Nereidas 1, alcanzando 1,356 m verticales, pero se presentaron problemas técnicos que desviaron el pozo.

1998–2009: Búsqueda de Financiamiento y Reestructuración

- Dificultades financieras impidieron continuar con nuevas perforaciones.
- En 2003, EPM adquirió CHEC.
- En 2009 se creó un grupo de trabajo conjunto entre CHEC y EPM para retomar el proyecto.

2012–2016: Estudios de Prefactibilidad

- Nuevos estudios geofísicos y geoquímicos con apoyo de Dewhurst Group y financiamiento de la USTDA.
- Se identificaron tres zonas de interés y cinco nuevos blancos de perforación.
- Se realizaron estudios geológicos junto con la Universidad de Caldas.

2016–2019: Consolidación y Preparación

- LaGeo (El Salvador) confirmó el potencial del campo para alimentar una planta de 65 MWe por 30 años, esto con un 80% de probabilidad.
- Actualización del Estudio de Impacto Ambiental y el plan de manejo.
- Se trabaja en la actualización de la licencia ambiental, teniendo en cuenta todos los trámites necesarios.

2020–Presente: Trabajo con aliados y nuevas estrategias de desarrollo

- Se proponen nuevos enfoques de desarrollo, plantas cabeza de pozo y uso en cascada.
- Con la Resolución 40161 de 2024, el Ministerio de Minas y Energía otorgó el Permiso de Exploración Geotérmica para el proyecto.
- Se tiene un memorando de entendimiento con Ecopetrol y Baker Hughes para estudiar la posibilidad de desarrollar el proyecto en conjunto.

7. El papel de la energía geotérmica en la transición energética

Los proyectos de energía geotérmica desempeñan un papel fundamental en el cumplimiento de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), los cuales constituyen un llamamiento universal a la acción para erradicar la pobreza, proteger el planeta y mejorar la calidad de vida de las personas en todo el mundo. Estos objetivos fueron adoptados por todos los Estados Miembros de las Naciones Unidas, incluido Colombia.

En los lineamientos establecidos por las Naciones Unidas para la mitigación del cambio climático, se destaca de manera clara cómo la energía geotérmica contribuye significativamente a la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero. Además, se reconoce su impacto positivo en al menos seis de los 17 ODS: Salud y bienestar (ODS 3), Energía asequible y no contaminante (ODS 7), Trabajo decente y crecimiento económico (ODS 8), Industria, innovación e infraestructura (ODS 9), Ciudades y comunidades sostenibles (ODS 11) y Acción por el clima (ODS 13) (Shukla et al., 2022).

A nivel nacional, el Plan Nacional de Desarrollo 2022–2026 ubica los proyectos de energía geotérmica dentro del marco de una transición energética justa, segura, confiable y eficiente, basada en el respeto a la naturaleza, la justicia social y la soberanía energética. Esta estrategia busca acelerar la generación de electricidad a partir de fuentes renovables como la geotermia, reconociendo su papel clave en la diversificación de la matriz energética y en la reducción de emisiones contaminantes (Departamento Nacional de Planeación, 2023).

El Plan Estratégico de Diversificación Energética de la UPME (2024-2054) destaca el papel de la geotermia como una fuente clave para avanzar hacia una matriz energética más limpia, resiliente y sostenible en Colombia. Con un potencial estimado de 1.170 MW en zonas como el Eje Cafetero y el suroccidente del país. Destacan como esta fuente ofrece generación constante, alta eficiencia y bajo impacto ambiental. El documento propone una estrategia integral para su desarrollo, que incluye incentivos fiscales, convocatorias públicas, integración con comunidades locales y su incorporación en subastas de energía firme. Además, se reconoce su valor para sectores con demanda térmica difícil de electrificar y su capacidad para aportar estabilidad al sistema eléctrico nacional. El documento muestra, en este contexto, no solo como la geotermia contribuye a la reducción de emisiones y a la seguridad energética, sino que también impulsa el desarrollo regional y la formación de talento técnico especializado (UPME, 2025).

De manera similar, el Ministerio de Minas y Energía, en el Catálogo Tecnológico Colombiano para Tecnologías de Generación y Almacenamiento de Energía (2025), reconoció a la geotermia como una fuente estratégica para la diversificación de la matriz energética del país. Esta tecnología, clasificada como comercial con potencial de mejora, destaca por su alta disponibilidad operativa, su capacidad para generar energía de manera continua y su bajo impacto ambiental. El documento estima un potencial geotérmico principalmente en zonas volcánicas como el Eje Cafetero y el suroccidente colombiano. Además, identifica oportunidades en recursos de baja entalpía para aplicaciones térmicas en regiones como Huila, la Orinoquía y el Caribe. En conjunto, mencionan que la geotermia se perfila como una alternativa firme y sostenible que puede aportar estabilidad al sistema

eléctrico colombiano, reducir emisiones y fortalecer la seguridad energética, especialmente en un contexto de transición hacia fuentes renovables no convencionales (MME et al., 2025).

8. La firmeza que trae la geotermia a la matriz energética colombiana

Para comprender el papel estratégico que está llamada a desempeñar la energía geotérmica, es fundamental analizar el estado actual de la matriz eléctrica colombiana. Según el informe publicado por XM el 31 de mayo de 2025, la Capacidad Efectiva Neta (CEN) del Sistema Interconectado Nacional (SIN) se distribuye de la siguiente manera: 64% corresponde a generación hidráulica, 29% a generación térmica con combustibles fósiles, 6% a generación solar fotovoltaica, y el 1% restante a otras fuentes (XM, 2025).

Este panorama evidencia uno de los principales retos de la transición energética en Colombia: reemplazar el 29% de generación térmica fósil por fuentes limpias y renovables. Sin embargo, no cualquier fuente puede asumir este rol. Las tecnologías que sustituyan la generación térmica deben garantizar firmeza y confiabilidad, es decir, estar disponibles para generar energía de manera continua, 24 horas al día, 7 días a la semana.

Esto se debe a que tanto la generación hidráulica como la solar están sujetas a la variabilidad climática. En épocas de baja hidrología o durante la noche, estas fuentes no pueden cubrir la demanda, y es entonces cuando las plantas térmicas deben entrar a suplir la energía faltante. Un ejemplo claro de esta situación se vivió durante el fenómeno de El Niño 2023–2024, cuando las plantas térmicas, a pesar de representar solo el 29% de la capacidad instalada, llegaron a generar más del 50% de la electricidad consumida en el país, como se ilustra en la Figura 5.

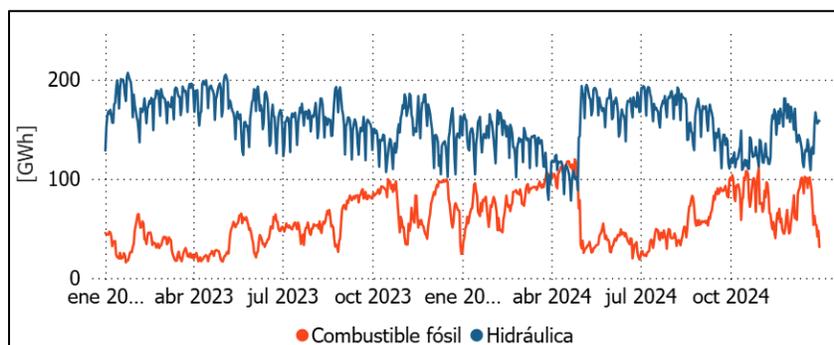


Figura 5: Evolución de la generación real del Sistema Interconectado Nacional (SIN) (Fuente: XM, 2025).

En este contexto, resulta fundamental analizar las fuentes de energía limpia y renovable no solo por su disponibilidad, sino también por su factor de capacidad, entendido como el porcentaje del tiempo en un año en que una fuente genera electricidad a su Capacidad Efectiva Neta (CEN). Este indicador permite evaluar la confiabilidad operativa de cada tecnología dentro del sistema eléctrico.

La energía geotérmica destaca en este análisis por ser la segunda fuente con mayor factor de capacidad a nivel mundial, solo superada por la energía nuclear. Esta característica la

posiciona como una alternativa ideal para reemplazar la generación térmica con combustibles fósiles, ya que puede operar de manera continua e independiente de las condiciones climáticas.

La Figura 6 presenta los factores de capacidad promedio medidos en Estados Unidos para diferentes fuentes de energía, según datos de la Administración de Información Energética (EIA). Como se observa, la geotermia alcanza un factor de capacidad del 70%, superando ampliamente a otras fuentes renovables como la hidroeléctrica (38%), la eólica (34%) y la solar fotovoltaica (25%).

Al analizar la Figura 6 en el contexto de la transición energética en Colombia, se evidencia que la energía geotérmica es una de las pocas fuentes renovables capaces de reemplazar de manera efectiva a las plantas térmicas que utilizan combustibles fósiles o biomasa, las cuales son responsables de gran parte de las emisiones de gases de efecto invernadero. Esta característica se debe a su alto factor de capacidad, que le permite operar de forma continua y confiable durante todo el año.

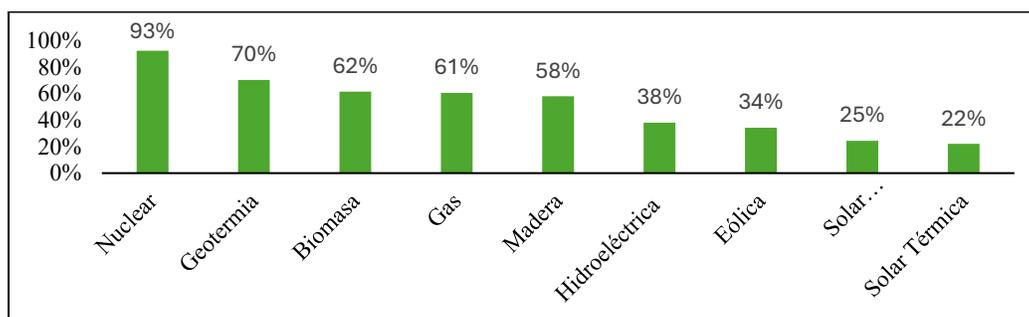


Figura 6: Factores de capacidad promedio reales medidos por tipo de fuente en Estados Unidos de América en 2024, excluyendo la mayoría de los combustibles fósiles (EIA, 2024)

Este atributo resulta especialmente relevante en escenarios de baja hidrología, como los observados durante fenómenos climáticos extremos, donde la generación hidroeléctrica disminuye considerablemente. En tales casos, como se muestra en la Figura 5, la generación térmica ha sido históricamente la encargada de suplir la demanda no cubierta. Por tanto, incorporar energía geotérmica en la matriz eléctrica nacional no solo contribuye a la descarbonización, sino que también fortalece la seguridad y firmeza del sistema eléctrico colombiano, con bajo impacto ambiental.

9. Huella ambiental de los proyectos geotérmicos

Otro de los atributos destacados de la energía geotérmica es su bajo requerimiento de uso del suelo por unidad de electricidad generada. Según datos comparativos, la geotermia utiliza aproximadamente 7.5 km² por cada TWh al año, lo que la posiciona como la segunda fuente de energía con menor intensidad de uso del suelo, solo superada por la energía nuclear (12.4 km²/TWh), como se muestra en la Figura 7. Este bajo impacto territorial la convierte en una opción especialmente atractiva para proyectos energéticos sostenibles, en contextos donde la disponibilidad de tierra es limitada o donde se busca minimizar la alteración del entorno natural.

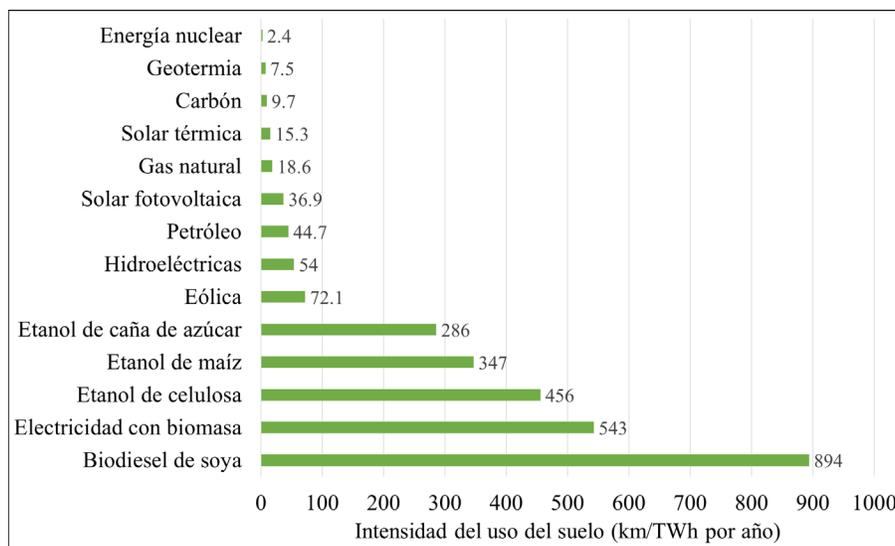


Figura 7: Proyección a 2030 de la intensidad del uso del suelo, para diferentes fuentes de energía (Adaptado de Richter, 2021).

En este sentido los proyectos geotérmicos, por su baja necesidad de área, no solo permiten minimizar el impacto ambiental directo, sino también fomentar la conservación y restauración ecológica en las áreas circundantes. Un ejemplo emblemático es el Campo Geotérmico Alfredo Mainieri Protti, ubicado en Miravalles, Costa Rica, el cual cuenta con una capacidad instalada de 165 MW y abarca un área de 1.550 hectáreas. De esta superficie, 1.275 hectáreas están cubiertas por bosque, lo que representa más del 80% del área total del proyecto (Soto-Méndez, 2019).

Gracias a esta iniciativa, se logró la restauración de 978 hectáreas que anteriormente estaban altamente degradadas por actividades ganaderas y agrícolas. Este proceso de recuperación ecológica tomó 25 años y hoy en día constituye un modelo de referencia para otros proyectos geotérmicos en la región (Soto-Méndez, 2019).

Otro aspecto clave en la evaluación ambiental de las fuentes de energía es el análisis de sus emisiones de gases de efecto invernadero a lo largo del ciclo de vida. Este indicador considera todas las etapas del proceso energético, desde la construcción de la infraestructura hasta su operación, mantenimiento y desmantelamiento. Según datos del Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (IPCC), la energía geotérmica emite en promedio 38 gCO₂eq por kWh generado, lo que la posiciona como una de las fuentes renovables con menor huella de carbono, en comparación por ejemplo a la solar fotovoltaica que emite 48 gCO₂eq/kWh. Por otro lado, las fuentes fósiles como el carbón (820 gCO₂eq/kWh) y el gas natural (490 gCO₂eq/kWh) presentan emisiones significativamente más altas. Incluso algunas fuentes consideradas renovables, como la biomasa dedicada, alcanzan un promedio de 230 gCO₂eq/kWh (IPCC, 2014).

Tabla 1: Emisiones equivalentes de carbono en los ciclos de proyecto de generación de electricidad por tipo de fuente (Fuente: IPCC, 2014).

Fuente	Mínimo	Promedio	Máximo
	gCO ₂ eq/kWh		
Carbón	740	820	910
Gas	410	490	650
Biomasa (Dedicada)	130	230	420
Geotermia	6,0	38	79
Hidroeléctrica	1,0	24	2200
Nuclear	3,7	12	110
Solar fotovoltaica	12	48	180
Eólica (en tierra y costa afuera)	7,0	11,5	56

Todo esto ocurre en un contexto en el que las emisiones de gases de efecto invernadero están acelerando el cambio climático, lo que ha llevado a un aumento sostenido de la temperatura global. Este fenómeno está alterando profundamente los ecosistemas, afectando tanto a la biodiversidad como a los servicios ecosistémicos esenciales para la vida humana. Según las Naciones Unidas, más del 75% de las emisiones globales provienen de la quema de combustibles fósiles, lo que ha intensificado el calentamiento global a un ritmo sin precedentes en la historia registrada (Naciones Unidas, 2025).

10. Usos directos de la energía geotérmica

Además de su uso para generación eléctrica, la energía geotérmica tiene una amplia gama de aplicaciones que benefician directamente a las comunidades locales, al proporcionar energía limpia, constante y de bajo costo para múltiples sectores productivos y sociales. Según el informe presentado en el Congreso Mundial de Geotermia 2020, los usos directos de la geotermia se han expandido a 88 países, con una capacidad térmica instalada de 107.727 MWt y un consumo anual de 1.020.887 TJ, lo que representa un crecimiento del 72,3 % respecto a 2015 (Lund et al., 2020). Entre los principales usos directos destacan:

- Bombas de calor geotérmicas, utilizadas para calefacción y refrigeración de viviendas, escuelas, hospitales y edificios públicos.
- Calefacción de espacios y distritos, que permite sustituir combustibles fósiles en zonas urbanas y rurales.
- Balneología, baños termales y recreación, que fomentan el turismo de bienestar y generan empleo local.
- Calefacción de invernaderos, que mejora la productividad agrícola y permite cultivos durante todo el año.
- Acuicultura, utilizada para criar peces como tilapia, trucha y camarones en condiciones térmicas óptimas.
- Procesos industriales, como secado de alimentos, pasteurización, curado de concreto y producción de bebidas.
- Secado agrícola, fusión de nieve y otros usos, que incluyen desde calefacción de caminos hasta usos en ganadería y turismo.

Estos usos no solo reducen las emisiones de gases de efecto invernadero, sino que también fortalecen la economía local, generan empleos sostenibles y mejoran la calidad de vida. De esta manera cualquier necesidad de calor de las comunidades, que se encuentre en el rango de temperatura del recurso, puede ser suplido con geotermia, remplazando fuentes contaminantes como la madera, el carbón, el gas, entre otros (González, 2023).

11. Discusión

Con el fin de facilitar la comprensión, a continuación, se presentan las principales ventajas de la energía geotérmica, integrando los aspectos previamente abordados junto con algunos elementos complementarios (Enel Green Power, 2021).

- Disponibilidad constante: A diferencia de otras fuentes renovables como la solar o la eólica, la geotermia no depende del clima, la hora del día ni las estaciones. Puede generar energía de forma continua, con una disponibilidad promedio de hasta 8.600 horas al año, lo que la hace altamente predecible y confiable.
- Bajo impacto visual y espacial: Las plantas geotérmicas requieren menos espacio que otras tecnologías renovables. La mayoría de sus componentes están enterrados, lo que reduce el impacto visual y permite una mejor integración con el entorno.
- Versatilidad de aplicaciones: Además de la generación eléctrica, la energía geotérmica puede utilizarse para calefacción, refrigeración, procesos industriales, agricultura protegida y balnearios, lo que amplía su utilidad económica y social.
- Escalabilidad: Los sistemas geotérmicos pueden adaptarse a diferentes escalas, desde instalaciones domésticas hasta plantas industriales, lo que permite su implementación en diversos contextos geográficos y económicos.
- Desarrollo económico local: La construcción y operación de plantas geotérmicas genera empleo local y fomenta el desarrollo de capacidades técnicas en las comunidades cercanas.
- Autosuficiencia energética: Al ser una fuente doméstica y renovable, la geotermia reduce la dependencia de combustibles fósiles importados, fortaleciendo la soberanía energética.
- Bajo riesgo operativo: Las plantas geotérmicas modernas son seguras, duraderas y de bajo mantenimiento, lo que reduce los riesgos técnicos y financieros a largo plazo.

Un ejemplo sobre el impacto positivo de la geotermia es el caso de Islandia, un país que ha logrado una transformación energética ejemplar mediante el aprovechamiento de sus recursos geotérmicos. En 2008, se reportó que el 66 % de su suministro energético primario proviene de la geotermia, y más del 89% de los hogares utilizan esta fuente para calefacción (Ragnarsson, 2008). Esta transición ha permitido reducir drásticamente la dependencia de combustibles fósiles, disminuyendo las emisiones de gases de efecto invernadero y mejorando la calidad del aire, especialmente en áreas urbanas como Reikiavik.

Además de los beneficios ambientales, el desarrollo geotérmico ha generado impactos económicos y sociales significativos. Ha impulsado la creación de empleos, reducido los costos de calefacción y fortalecido la seguridad energética de Islandia. La geotermia también

se ha integrado en múltiples sectores: calefacción distrital, generación eléctrica, invernaderos, acuicultura, balneoterapia, derretimiento de nieve en vías urbanas e incluso procesos industriales como el secado de algas y pescado (Ragnarsson, 2008). Este enfoque multifuncional ha convertido a Islandia en un referente global en sostenibilidad energética y resiliencia climática.

12. Conclusiones

La energía geotérmica se configura como una fuente renovable de alta disponibilidad y bajo impacto ambiental, con características operativas que la posicionan como una alternativa técnicamente viable para sustituir generación térmica fósil en los sistemas interconectados. Su elevado factor de capacidad (>70%), su capacidad de operación en régimen base y su independencia de variables climáticas la convierten en una tecnología estratégica para fortalecer la confiabilidad y resiliencia del sistema eléctrico colombiano.

El potencial identificado por el Servicio Geológico Colombiano —estimado en hasta 1.170 MW eléctricos distribuidos en 21 áreas geotérmicas— representa una oportunidad concreta para avanzar en la diversificación de la matriz energética, reducir la exposición a eventos hidrológicos extremos y contribuir al cumplimiento de los compromisos climáticos del país. La experiencia acumulada en el proyecto Valle de Nereidas, junto con iniciativas piloto como la planta ORC de Parex Resources, demuestran la factibilidad técnica y operativa de esta fuente en el contexto colombiano.

Desde una perspectiva de planificación energética, la incorporación de geotermia permite no solo mejorar la cobertura y calidad del servicio eléctrico, sino también optimizar el despacho económico del sistema, reducir emisiones de gases de efecto invernadero y fomentar el desarrollo regional mediante encadenamientos productivos y generación de empleo especializado.

En este sentido, se recomienda priorizar el desarrollo de proyectos geotérmicos en los instrumentos de política pública, incluyendo mecanismos de financiamiento, incentivos fiscales, esquemas de contratación diferenciada y fortalecimiento institucional para la exploración y explotación del recurso. La geotermia no solo es una fuente renovable más: es una solución estructural para una transición energética firme, soberana y sostenible.

13. Referencias

Alfaro, C., Rueda Gutiérrez, J., Casallas, Y., Rodríguez, G. Z., & Malo, J. (2020). Estimación preliminar del potencial geotérmico de Colombia. Bogotá: Servicio Geológico Colombiano.

Bassam N. E., Maegaard P., Schlichting M. L. (2013). Chapter Twelve - Geothermal Energy. Distributed Renewable Energies for Off-Grid Communities. Elsevier. 185-192.

Departamento Nacional de Planeación (2023). Plan Nacional de Desarrollo 2022-2026: Colombia, Potencia Mundial de la Vida. Imprenta Nacional de Colombia. ISBN: 978-958-5422-45-2.

DiPippo, R. (Ed.). (2016). Geothermal Power Generation: Developments and Innovation. Woodhead Publishing.

EIA (U.S. Energy Information Administration). (2024). Electric Power Monthly: Table 6.07.B. Capacity Factors for Utility Scale Generators Primarily Using Non-Fossil Fuels. https://www.eia.gov/electricity/monthly/epm_table_grapher.php?t=epmt_6_07_b

IEA (International Energy Agency). (2024). *The Future of Geothermal Energy*. IEA. <https://www.iea.org/reports/the-future-of-geothermal-energ>

Enel Green Power. (2021) All the advantages of geothermal energy. [en línea] <https://www.enelgreenpower.com/learning-hub/renewable-energies/geothermal-energy/advantages>.

Government of Western Australia. (2004) Obtaining a geothermal title. [en línea] <http://www.dmp.wa.gov.au/Petroleum/Obtaining-a-Geothermal-title-4240.aspx>.

González, J. A. O. (2023). Aplicación del enfoque de desarrollo en cascada en el proyecto geotérmico del Macizo Volcánico del Ruiz. *Revista UIS Ingenierías*, 22(2), 109-128.

González, J. A. O., & Palacio, J. L. (2023). Analysis of different electricity generation scenarios in the “Macizo Volcánico del Ruiz” geothermal project. *Renewable Energy Focus*, 46, 313-322.

Ingrid Stober, K. B. Geothermal Energy-From Theoretical Models to Exploration and Development. 2021. *Switzerland: Springer Cham*.

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2014). Annex III: Technology-specific cost and performance parameters. En O. Edenhofer, R. Pichs-Madruga, Y. Sokona, E. Farahani, S. Kadner, K. Seyboth, A. Adler, I. Baum, S. Brunner, P. Eickemeier, B. Kriemann, J. Savolainen, S. Schlömer, C. von Stechow, T. Zwickel & J. C. Minx (Eds.), *Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (pp. 1331–1394). Cambridge University Press.

Lund, J. W., & Toth, A. N. (2021). Direct utilization of geothermal energy 2020 worldwide review. *Geothermics*, 90, 101915.

MME, UPME, DEA & Emergente. (2025). Catálogo Tecnológico Colombiano para Tecnologías de Generación y Almacenamiento de Energía, pp. 142–164.

Naciones Unidas (2025). Causas y efectos del cambio climático. <https://www.un.org/es/climatechange/science/causes-effects-climate-change>.

PiensaGeotermia. (2021). Inaugurada primera planta de energía geotérmica en Colombia. [en línea] <https://www.piensageotermia.com/inaugurada-primer-planta-de-energia-geotermica-en-colombia/>

Ragnarsson, Á. (2008). Utilization of geothermal energy in Iceland. Iceland GeoSurvey (ÍSOR). Presentado en la 14ª Conferencia Internacional “Building Services, Mechanical and Building Industry Days”, Debrecen, Hungría.

Richter, A. (2021). Geothermal energy is least land-use intense source of the renewable energy technologies. ThinkGeoEnergy. <https://www.thinkgeoenergy.com/geothermal-energy-is-least-land-use-intense-source-of-the-renewable-energy-technologies/>

Shukla, P. R., Skea, J., Slade, R., Al Khourdajie, A., van Diemen, R., McCollum, D., ... & Malley, J. (2022). Climate change 2022: Mitigation of climate change. Contribution of working group III to the sixth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, 10, 9781009157926.

Soto-Méndez, M. (2019). Costa Rica: restauran bosque degradado por ganadería y regresan los animales. Mongabay Latam. <https://es.mongabay.com/2019/08/costa-rica-bosque-en-campo-geotermico-restauracion-video/>

ThinkGeoEnergy. (2025). ThinkGeoEnergy’s Top 10 Geothermal Countries 2024 – Power. Retrieved July 15, 2025, from <https://www.thinkgeoenergy.com/thinkgeoenergys-top-10-geothermal-countries-2024-power/>

UPME (2025). Plan Estratégico de Diversificación Energética – Tomo I, Apuesta Estratégica 7, pp. 21–24.

XM (2025). Sinergox: CEN por área geográfica y tipo. [En línea] fuente <https://sinergox.xm.com.co/oferta/Paginas/Informes/CapacidadDpto.aspx>