

Prospectiva de la Geotermia en Colombia hacia 2050

Diego Carreño

Isaac Dynner, Enrique Sanint, Andrés Aristizábal

Resumen

La presente investigación tuvo como objetivo analizar la situación actual y futura de la energía geotérmica en Colombia mediante un modelo de dinámica de sistemas. Si bien se estudia la posibilidad de aprovechar pozos existentes de petróleo y gas que ya cuentan con perforaciones profundas estos no están contemplados dentro del modelo desarrollado, el enfoque central de la investigación está puesto en evaluar el potencial geotérmico asociado a sistemas hidrotermales, manifestaciones superficiales como géiseres o cercanía a volcanes. El modelo prospectivo a 2050 permite evaluar integralmente el potencial geotérmico nacional junto a factores técnicos, económicos, regulatorios y sociales que determinan su penetración en la matriz energética. Entre los principales hallazgos se identifica la necesidad de realizar ajustes al actual marco regulatorio, el cual no fomenta suficientemente el desarrollo de proyectos geotérmicos. Asimismo, se requiere la introducción de políticas e incentivos gubernamentales más decisivos para impulsar esta fuente renovable. Otro aspecto clave detectado es la importancia de una adecuada gestión social y ambiental de los proyectos, considerando activamente a las comunidades locales. La dinámica de sistemas permitió modelar las complejas interrelaciones entre las variables que condicionan el futuro de la geotermia en el país. El modelo desarrollado constituye una novedosa herramienta para la prospectiva tecnológica en este campo estratégico. Los resultados permiten identificar obstáculos y oportunidades para materializar el gran potencial geotérmico de Colombia, aportando una visión sistémica sobre este tema clave para la transición energética nacional.

Palabras clave: Dinámica de sistemas, energía geotérmica, Colombia, energía.

Abstract

The objective of this research was to analyze the current and future situation of geothermal energy in Colombia through a system dynamics model. While the possibility of using existing oil and gas wells that already have deep drillings is being studied, these are not contemplated in the model developed. The central focus of the research is to evaluate the geothermal potential associated with hydrothermal systems, surface manifestations such as geysers or proximity to volcanoes. The prospective model up to 2050 allowed the integral evaluation of the national geothermal potential together with technical, economic, regulatory and social factors that determine its penetration into the energy matrix. Among the main findings, the need to make adjustments to the current regulatory framework is identified, which does not sufficiently promote the development of geothermal projects. Likewise, the introduction of more decisive governmental policies and incentives is required to boost this renewable source. Another key aspect detected is the importance of adequate social and environmental management of projects, actively considering local communities. System dynamics made it possible to model the complex interrelationships between the variables that condition the future of geothermal energy in the country. The model developed constitutes an innovative tool for technological foresight in this strategic field. The results make it possible to identify obstacles and opportunities to realize the great geothermal potential of Colombia, providing a systemic vision on this key issue for the national energy transition.

Key Words: System dynamics, geothermal energy, Colombia, energy.

1. Introducción

La transición energética hacia fuentes más limpias y sostenibles se ha convertido en una prioridad global, impulsada por la necesidad de reducir las emisiones de gases de efecto invernadero y mitigar el cambio climático. En este contexto, Colombia, al igual que muchos otros países, ha puesto su mirada en las energías renovables no convencionales como una vía para diversificar su matriz energética y disminuir su dependencia de combustibles fósiles.

Dentro de estas energías renovables no convencionales, la geotermia ha emergido como una opción prometedora y atractiva para el país. Ubicado estratégicamente en el Cinturón de Fuego del Pacífico, Colombia presenta un potencial

geotérmico significativo, con volcanes activos e inactivos que ofrecen oportunidades para la generación de energía geotérmica. Según estudios realizados por el Servicio Geológico de Colombia (SGC), se estima que el país cuenta con una potencia eléctrica total de 1170.20 MW en 21 áreas geotérmicas [1].

Por otro lado, Colombia cuenta con una larga historia de explotación de petróleo y gas, con miles de pozos perforados a grandes profundidades y temperaturas elevadas que podrían aprovecharse para generación geotérmica al final de su vida productiva. En 2021 Parex Resources y la Universidad Nacional iniciaron un innovador proyecto piloto de coproducción en pozos en Casanare, que generaría inicialmente 100kW que busca demostrar la viabilidad de este concepto [2], los beneficios que se esperan de este tipo de geotermia en el contexto colombiano son aprovechar pozos e infraestructura existente, reducir emisiones de gases de efecto invernadero, y llevar energía limpia a zonas apartadas, pero esto conlleva un par de retos dentro de los cuales están los altos costos de adecuar la infraestructura petrolera para uso geotérmico, la incertidumbre sobre el recurso en cada pozo, y la falta de un marco regulatorio claro para esta tecnología [3].

No obstante, a pesar de este potencial, el desarrollo de la energía geotérmica en Colombia ha sido hasta ahora limitado. Aunque se han llevado a cabo estudios de factibilidad y se han realizado algunos planes piloto, aún no se ha concretado un proyecto a gran escala que aproveche plenamente esta fuente de energía renovable. Para avanzar hacia una mayor adopción de la geotermia en la matriz energética nacional, es necesario abordar diversos desafíos, que van desde la regulación y licenciamiento ambiental hasta la integración de esta energía en el mercado energético y la concientización de la comunidad sobre sus beneficios y riesgos.

En este contexto, el presente artículo de investigación tiene como objetivo principal modelar con dinámica de sistemas la energía geotérmica en Colombia, proyectando su potencial desarrollo hasta el año 2050. El aporte importante de este trabajo radica en la utilización de la dinámica de sistemas, una metodología que permite analizar la compleja interacción entre diversos factores técnicos, económicos, ambientales y sociales que determinan la evolución de un sistema energético. A través de esta metodología, se pretende analizar cómo podría evolucionar la integración de esta fuente energética renovable en la matriz eléctrica nacional, considerando sus ventajas ambientales, pero también los desafíos que enfrenta. Además, se plantearán diferentes escenarios prospectivos que consideren distintos niveles de inversión, políticas públicas y niveles de adopción políticos y sociales, para evaluar cómo estos factores podrían afectar la adopción de la energía geotérmica en el país en las próximas décadas. La proyección de escenarios utilizando dinámica de sistemas representa un valioso aporte para la planificación energética.

Los resultados obtenidos permitirán proporcionar una visión integral y fundamentada en un robusto modelo de simulación, para apoyar la toma de decisiones informadas en el ámbito energético por parte de autoridades, empresas y demás actores. Se espera que las proyecciones y análisis presentados sean de gran utilidad para la formulación de políticas públicas y estrategias que favorezcan la transición hacia una matriz energética más sostenible y respetuosa con el medio ambiente en el país. Al considerar la geotermia como una fuente estratégica de energía renovable de base, con múltiples beneficios ambientales, el país podrá aprovechar de mejor manera su alto potencial geotérmico y avanzar con pasos firmes hacia un futuro energético más prometedor, sostenible y alineado con las metas globales de mitigación del cambio climático. Los escenarios modelados también aportarán luces sobre los niveles de inversión e incentivos necesarios para materializar el desarrollo geotérmico en diferentes horizontes de tiempo.

Este artículo se encuentra organizado de manera que posterior a esto se encuentran los antecedentes y revisión de literatura, segundo se tiene la metodología, tercero se encuentra desarrollo de escenarios y modelo, como cuarto punto se presentan los resultados para finalizar con las conclusiones y agradecimientos.

2. Antecedentes y revisión de literatura

La energía geotérmica ha sido históricamente subestimada como recurso energético renovable a pesar de su enorme potencial. Su aprovechamiento a escala industrial se remonta a principios del siglo XX, cuando en 1904 el ingeniero Pietro Ginori Conti construyó en Larderello, Italia, la primera planta geotérmica del mundo destinada a la generación eléctrica, con una capacidad inicial de 250 kW. Si bien este hecho sentó un precedente técnico, no fue sino hasta después de la crisis del petróleo de 1973 cuando ocurrió el verdadero auge y desarrollo de la tecnología geotérmica. Ese año, el embargo petrolero declarado por los países de la OPEP provocó una fuerte alza en el precio del petróleo [4,5,6]. La geotermia comenzó así a beneficiarse de importantes inversiones y políticas favorables para la exploración de reservorios geotérmicos alrededor del mundo. Estados Unidos se destacó al aumentar significativamente la inversión en

investigación y desarrollo geotérmico, respaldado por subsidios y beneficios fiscales federales, consolidando a California como líder mundial en generación geotérmica [7,8]. Indonesia llevó a cabo extensas exploraciones geológicas que identificaron yacimientos viables en Java y Sumatra, resultando en la construcción de centrales geotérmicas de alta capacidad en estas islas [6,9]. Filipinas, mediante estudios geotérmicos, desarrolló con éxito los campos de Tiwi y Tongonan, reduciendo su dependencia de combustibles importados. En Turquía, el gobierno financió prospecciones en Denizli y Aydın, dando lugar a la construcción de plantas de generación en estas áreas de potencial geotérmico. México expandió su programa geotérmico, explorando nuevos yacimientos y estableciendo plantas en Baja California, Michoacán y otros estados [10]. La implementación de legislación y políticas públicas favoreció la expansión de la geotermia, con Estados Unidos otorgando incentivos fiscales, Filipinas y México reformando leyes de electricidad, e Indonesia promulgando leyes para atraer inversión privada [7]. Asimismo, Estados Unidos, Indonesia y México crearon políticas de precios y subsidios preferenciales, estimulando la demanda de electricidad geotérmica, mientras que Filipinas y Turquía establecieron metas renovables y varios países facilitaron el otorgamiento de concesiones geotérmicas [7,9,10]. En términos de investigación y desarrollo, Estados Unidos e Indonesia invirtieron en programas de investigación y desarrollo, y México y Filipinas establecieron alianzas público-privadas para la cooperación tecnológica. Además de estos países pioneros, otros también impulsaron el desarrollo geotérmico en respuesta a la crisis energética [7]. Islandia, con su abundante actividad volcánica, aprovechó aún más sus vastos recursos geotérmicos, generando actualmente alrededor del 30% de su electricidad a partir de la energía geotérmica [6]. Nueva Zelanda también expandió la generación geotérmica gracias a yacimientos como los de Taupo, Wairakei y Kawerau, los cuales abastecen aproximadamente el 15% de la demanda eléctrica del país [11]. En América Central, países como El Salvador, Nicaragua y Costa Rica realizaron importantes inversiones en exploración y perforación de pozos, aumentando sustancialmente su capacidad instalada y convirtiendo a la geotermia en una parte vital de sus matrices energéticas [12].

Las investigaciones existentes revelan un consenso en los elementos clave para el éxito en la exploración y aprovechamiento de recursos geotérmicos. En primer lugar, es necesario identificar zonas con adecuadas condiciones de temperatura, fluidos y permeabilidad de rocas mediante estudios geológicos. Asimismo, múltiples estudios enfatizan la importancia de análisis financieros rigurosos que garanticen la rentabilidad a largo plazo, considerando las cuantiosas inversiones en exploración, perforación y construcción. También coinciden en la necesidad de evaluar y mitigar impactos ambientales potenciales sobre recursos hídricos, biodiversidad y aceptación local. Un claro marco legal y regulatorio resulta clave en aspectos como derechos, tarifas y supervisión ambiental [7,9,13-15].

Por otra parte, la reutilización de pozos petroleros y gasíferos agotados ofrece una opción atractiva para la generación geotérmica, aprovechando infraestructura preexistente de perforaciones profundas que superan comúnmente los 1-2 km y presentan condiciones óptimas de temperatura [16,17]. Estos pozos cuentan con sistemas de tuberías y revestimiento que facilitan un circuito cerrado y seguro desde el fondo hasta la superficie, y se ubican en áreas con accesibilidad y facilidades construidas previamente [17]. Mediante la inyección de agua u otros fluidos no tóxicos que se calientan en las profundidades y regresan como vapor de alta presión, se pueden activar turbinas y generadores en superficie, produciendo electricidad renovable a una fracción del costo de perforaciones nuevas, que bordean los 10 millones de dólares. Las modificaciones requeridas, que incluyen tuberías especiales, cementaciones y sistemas de control, tienen un costo estimado de 1-3 millones de dólares por pozo, representando un ahorro sustancial en comparación con los pozos geotérmicos nuevos [18]. Con una reducción tan significativa de costos y demostrada factibilidad técnica mediante proyectos en Europa y Norteamérica, esta práctica sostenible tiene potencial para expandirse con políticas favorables, reutilizando pozos improductivos. En Bavaria, Alemania, se ha logrado una exitosa reutilización de un antiguo pozo de gas natural de 4.3 km de profundidad para la generación de energía geotérmica, operando de manera efectiva desde 2013 con una capacidad de 3 MW, suficiente para abastecer a cerca de 8,000 hogares [16,17]. Un proyecto similar en 2016 cerca de Williston, Dakota del Norte (EE.UU.) transformó un pozo petrolero en una planta geotérmica de 1 MW que comercializa electricidad a la red [19]. Hungría también ha sido pionera al reconvertir un pozo de gas en 2010, generando 500 kW de capacidad, demostrando tanto éxito que se contempla su expansión. Estos ejemplos, junto con otros proyectos, han validado prácticamente la viabilidad técnica de adaptar la infraestructura de perforaciones profundas en desuso para brindarles un nuevo propósito como fuentes de energía limpia y sustentable. Con más de 3 millones de pozos petroleros y de gas en todo el mundo, existe un enorme potencial para escalar esta solución. Países como Estados Unidos podrían generar hasta 16 gigavatios de capacidad geotérmica al convertir pozos inactivos, equivalente a la capacidad de 16 grandes centrales eléctricas [18,19]. Sin embargo, se necesitan políticas específicas de incentivos económicos y regulaciones para motivar estas conversiones, proporcionando claridad de procesos a las

compañías interesadas. La expansión de la reutilización de pozos no solo generaría energía sin recurrir a nuevas perforaciones, sino que también prolongaría el valor productivo de las millonarias inversiones ya realizadas [20].

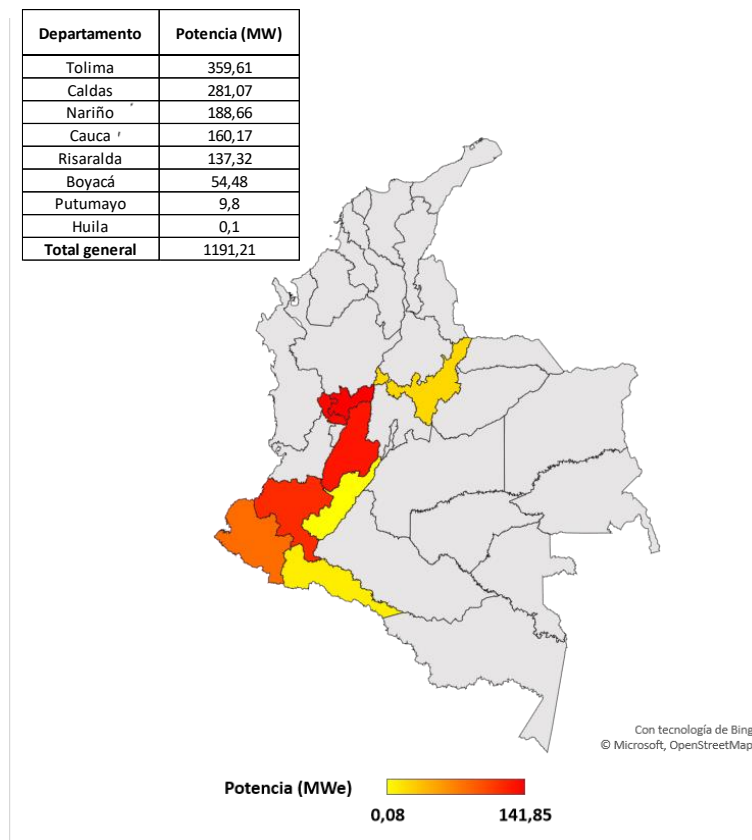
En cuanto a Colombia, este se encuentra en una posición geográfica bastante favorable en cuanto a recursos geotérmicos, pues se encuentra en límites convergentes de placas tectónicas y sobre el anillo de fuego del Pacífico, esto sugiere un buen potencial geotérmico para el desarrollo del país [21]. A pesar de esto, la exploración y explotación de este recurso ha sido muy limitada, lo cual puede deberse a que el país ha experimentado algunas dificultades en aspectos como la evaluación de proyectos, atribuidas a la falta de conocimiento inicial sobre los costos relacionados con la tecnología específica para la explotación de este recurso [21,22]. Adicionalmente, para el país también existen desafíos que podrían relacionarse con limitaciones en las capacidades técnicas y científicas para la exploración y desarrollo de este recurso, así como la resistencia a realizar inversiones importantes debido a los riesgos elevados relacionados con la exploración y la falta de marcos regulatorios adecuados [22]. Si bien Colombia cuenta con un importante potencial geotérmico, su aprovechamiento aún se encuentra en una etapa muy temprana, con algunos proyectos en fase de exploración y desarrollo, pero sin plantas comerciales operativas. Se requiere un mayor impulso institucional y privado para superar los desafíos actuales y lograr un verdadero despegue de esta fuente de energía renovable en el país.

En Colombia a lo largo del tiempo se han realizado estudios y exploraciones en diferentes zonas a lo largo del territorio, donde se ha logrado estimar el potencial con el que cuenta el país como se puede observar en la siguiente tabla.

Table 1
Geothermal potential in Colombian territory

Depto.	Área Geotérmica	Potencia (MW)
Boyacá	Paipa	21,5
Boyacá	Paipa *	20,89
Boyacá	Iza	12,09
Caldas	San diego	141,85
Caldas	Neridas-Botero Londoño	100,72
Caldas	Villamaría - Termales	38,5
Cauca	Caldera del Paletara	117,96
Cauca	Caldera Gabriel López	24,78
Cauca	Volcanes de Sotara- Sucubun	17,43
Huila	Volcán Del Huila	0,1
Nariño	Volcán Azufral	81,9
Nariño	Volcanes doña Juana- Las Animas	37,84
Nariño	Volcanes Galeras- Morasurco	29,49
Nariño	Complejo Volcánico Chiles-Cerro Negro	23,77
Nariño	Volcán Cumbal	15,66
Putumayo	Volcán de Sibundoy	9,8
Risaralda	Volcán de Santa Rosa	137,24
Risaralda	Laguna Otún	0,08
Tolima	Volcán Cerro Machín	129,94
Tolima	Nevado del Tolima	82,7
Tolima	Volcán Cerro Bravo	79,73
Tolima	Hacienda Granates	67,24
TOTAL		1191,21

Fig. 1
Heat map with power in defined geothermal areas in Colombia



Source: table and image created by the author based on data from the Colombian Geological Survey [23].

Como se puede observar Caldas, Risaralda, Tolima y Nariño son los departamentos que cuentan con mayor potencial geotérmico para ser explotado, estos territorios cuentan con características geológicas y geotérmicas excepcionales que los hacen establecerse como áreas estratégicas para la exploración y explotación de este recurso.

Desde 2020, el Servicio Geológico Colombiano (SGC) ha liderado una exhaustiva exploración de recursos geotérmicos en Colombia, centrada en sistemas volcánicos (sistemas hidrotermales) y cuencas sedimentarias (sistemas conductores). Las investigaciones en áreas geotérmicas como Paipa, Santa Rosa, Azufral, Cerro Machín, San Diego y Nereida-Botero Londoño [24] han revelado avances notables, especialmente en esta última zona, donde la colaboración entre CHEC - EPM ha obtenido permisos legales y ambientales para perforaciones exploratorias, consolidando su compromiso con el desarrollo sostenible de recursos geotérmicos en la región. Paralelamente, se lleva a cabo una investigación geotérmica más profunda respaldada por colaboración académica, con el objetivo de explorar y comprender a fondo el potencial de la zona para aplicaciones futuras en generación de energía o usos directos, evidenciando un enfoque integral y a largo plazo en la gestión y aprovechamiento de estos valiosos recursos [25]. En términos legales, destaca la existencia de leyes y regulaciones nacionales que proporcionan un marco transparente para la actividad geotérmica, abordando aspectos clave como exploración, uso y desarrollo, con el propósito de establecer parámetros y requisitos necesarios para la gestión adecuada. Estas normativas buscan fomentar un entorno propicio para la inversión y el desarrollo sostenible de la energía geotérmica, garantizando el cumplimiento de normas ambientales y de seguridad en la ejecución de proyectos en este campo.

El marco legal que rige el sector energético y geotérmico se compone de varias leyes y decretos clave. La Ley 697 (2001), conocida como Ley URE (Uso Racional y Eficiente de la Energía), tiene como objetivo fomentar un uso moderado y eficiente de la energía, así como promover el empleo de fuentes no convencionales. La Ley de Energías Renovables 1715 de 2014 impulsa el aprovechamiento de fuentes no convencionales de energía y estimula la inversión, investigación y desarrollo de tecnologías limpias. El decreto 1318 del 27 de julio de 2022 reglamenta las leyes 1715 de 2014 y 2099 de 2021, detallando aspectos necesarios para llevar a cabo proyectos geotérmicos en el país. Asimismo, el Decreto 2811 de 1974, específicamente en su artículo tercero, incluye el manejo de recursos geotérmicos bajo su regulación como recursos naturales renovables. Además, el artículo 176 del mismo decreto establece que la concesión del uso de aguas conlleva la concesión del recurso geotérmico, permitiendo a las autoridades ambientales otorgar el uso y aprovechamiento de este recurso. [26-29].

Por otro lado, se presenta el aprovechamiento de pozos petroleros y gas para la generación de energía geotérmica en Colombia. Este proceso busca aprovechar de manera eficiente los recursos existentes y reducir los costos asociados con la exploración geotérmica tradicional [30]. El proceso implica la conversión de pozos petroleros en pozos geotérmicos de producción o la coproducción de petróleo y calor, permitiendo aprovechar el calor residual presente en los fluidos producidos. Para llevar a cabo esta transformación, se seleccionan pozos petroleros con características propicias para la generación de energía geotérmica, como altas temperaturas y caudales adecuados de fluido [17]. Estos pozos son sometidos a un proceso de conversión que implica la instalación de equipos especializados para la extracción y aprovechamiento del calor geotérmico. En Colombia, se han autorizado proyectos piloto para la generación de energía geotérmica a partir de pozos petroleros, como el proyecto liderado por Parex Resources en el noreste del país. Este proyecto tiene como meta inicial generar entre 15 y 60 kW de energía eléctrica, con potencial de expansión hasta 120 kW [31]. Esta iniciativa no solo busca diversificar la matriz energética del país, sino también contribuir a la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero y fomentar el desarrollo sostenible. El aprovechamiento de pozos petroleros y gas para la generación de energía geotérmica en Colombia representa una oportunidad prometedora para impulsar el uso de fuentes renovables y limpias, así como para optimizar la producción energética a partir de recursos ya existentes en el país [32].

En el contexto latinoamericano, la investigación en la toma de decisiones para la implementación de proyectos de generación eléctrica mediante el uso de recursos geotérmicos ha sido un área de interés creciente. Algunos estudios se basan en revisión bibliográfica para comprender el estado actual de la tecnología, seguido por la utilización de software de dinámica de sistemas para desarrollar modelos que permitan visualizar, documentar, simular, analizar y optimizar diferentes escenarios. Esta metodología facilita la creación de escenarios tanto optimistas como pesimistas, permitiendo compararlos con la situación actual y evaluar su evolución a lo largo del tiempo [33].

Es importante resaltar que, en el ámbito de evaluación y desarrollo de escenarios para la implementación de plantas geotérmicas en la generación eléctrica, la disponibilidad de modelos con dinámica de sistemas es limitada. Esta limitación destaca la necesidad de seguir investigando y desarrollando herramientas y metodologías que permitan una evaluación más precisa y completa de los proyectos geotérmicos en la región latinoamericana. La integración de modelos

con dinámica de sistemas en este campo puede proporcionar una visión más holística y detallada, lo que resulta fundamental para la toma de decisiones informadas y estratégicas en el sector energético.

3. Metodología dinámica de sistemas

El objetivo principal de la dinámica de sistemas es comprender todas las causas estructurales que afectan el comportamiento de un sistema. Para lograr esto, es esencial comprender cada elemento del sistema en detalle, evaluar sus interrelaciones y determinar la sensibilidad de cada tarea a la evolución del sistema. En este contexto, los datos históricos se consideran secundarios en la construcción de modelos. Esto se debe a que se centra en comprender la lógica interna subyacente y las relaciones estructurales de un sistema, que son los fundamentos que revelan la complejidad del funcionamiento del sistema [34,35].

La dinámica de sistemas, como enfoque de modelado, no solo se limita a identificar las conexiones entre los elementos, sino que también se adentra en la comprensión de los comportamientos emergentes del sistema. Esto implica reconocer los bucles de retroalimentación que amplifican o amortiguan los cambios, así como la acumulación de efectos a lo largo del tiempo [36]. Al considerar estos aspectos, se logra una representación más realista y completa de la dinámica subyacente en el sistema. La capacidad de anticipar y abordar los efectos a largo plazo de las decisiones y eventos se potencia mediante la perspectiva de largo plazo que ofrece la dinámica de sistemas [35]. Esta metodología permite modelar y simular escenarios a lo largo de extensos períodos, identificando así tendencias y patrones que podrían pasar desapercibidos en análisis a corto plazo [37]. La perspectiva de largo plazo de la dinámica de sistemas es esencial para la prospectiva de la energía geotérmica en Colombia. Al considerar escalas temporales significativas, se pueden identificar tendencias emergentes, evaluar el impacto a lo largo del tiempo y anticipar posibles escenarios futuros. Esto permite una toma de decisiones informada y estratégica para el desarrollo sostenible de la energía geotérmica en el país, teniendo en cuenta no solo los beneficios inmediatos, sino también las implicaciones a largo plazo en términos económicos, ambientales y sociales [33].

En cuanto a las etapas de desarrollo consta de varias etapas: la definición y delimitación del problema, donde se identifica la naturaleza del problema; la conceptualización, que utiliza un lenguaje sistémico elemental para estudiar el problema; la formalización, que introduce ecuaciones en el diagrama de flujos para modelar el comportamiento futuro; la simulación, que verifica las hipótesis adoptadas y extrae conclusiones sobre el modelo; y el análisis de sensibilidad, que identifica las variables críticas en los resultados y puede requerir una revisión si el problema no está adecuadamente definido.

4. Desarrollo de escenarios y modelo

El enfoque del modelo se centra en analizar el comportamiento de la energía geotérmica a través de la dinámica de sistemas, utilizando la herramienta Vensim para su simulación. Los datos específicos recopilados respaldan la formulación y el análisis en el desarrollo de este modelo. Este estudio considera de manera integral diversos aspectos como factores tecnológicos, económicos, políticos y ambientales para asegurar un reflejo fiel de la complejidad del entorno.

El periodo elegido para el estudio del sistema es 2023-2050. Este período fue seleccionado estratégicamente para analizar detenidamente el comportamiento y desarrollo de la energía geotérmica en horizontes significativos. Al centrarse en este período prolongado, se pueden identificar tendencias a largo plazo y se puede realizar una evaluación integral de cómo la energía geotérmica puede evolucionar en respuesta a factores tecnológicos, económicos, políticos y ambientales.

4.1. Escenarios

La flexibilidad para introducir variaciones en el modelo confiere un dinamismo esencial, transformando nuestro enfoque en un modelo adaptable que puede explorar escenarios optimistas y pesimistas. Esta capacidad de modelado dinámico ofrece la posibilidad de obtener resultados variados y detallados, permitiendo una evaluación integral de diferentes contextos y condiciones. Al presentar escenarios optimistas se pueden identificar oportunidades y condiciones ideales para implementar campos de generación de energía eléctrica a través de la geotermia, mientras que considerar escenarios pesimistas ayuda a anticipar desafíos y potenciales obstáculos.

Los escenarios establecidos para evaluar el modelo son los siguientes:

Table 2.
Scenarios

Incertidumbre	Escenario (+,+)	Escenario (+,-)	Escenario (-,+)	Escenario (-,-)
Nombre	Democracia Verde	Extractivismo Renovable	Greta	Casa en Llamas
Orientación de la política frente a la transición energética	Promueve	Oscila	Frena	Frena
Situación política Colombia	Serie de presidentes que impulsa las iniciativas de mitigación locales	Las políticas hacia la transición oscilan adelante y atrás conforme se alternan los gobiernos	Serie de presidentes que impulsa las iniciativas de mitigación locales	Las políticas hacia la transición oscilan adelante y atrás conforme se alternan los gobiernos
Entrada energía geotérmica	Se diseñan estrategias para incentivar la aparición de proyectos geotérmicos. La curva de aprendizaje es la acelerada.	Los proyectos geotérmicos son dejados a su suerte. La curva de aprendizaje es la lenta.	Se diseñan estrategias para incentivar la aparición de proyectos geotérmicos. La curva de aprendizaje es la acelerada.	Nunca se dan las circunstancias para que entre en igualdad de condiciones

Source: Own elaboration

En el contexto de los escenarios previamente definidos, se lleva a cabo la especificación de variables clave y los valores asignados para evaluar exhaustivamente cada uno de estos escenarios. Esta fase es esencial para el rigor del análisis, ya que la cuidadosa selección de las variables y sus respectivos valores influye directamente en la representación precisa de cada situación proyectada. Al detallar estas variables, se establece una base sólida para la simulación y evaluación de los distintos escenarios, permitiendo una comprensión más profunda de los posibles resultados y sus implicaciones.

Table 3.
Values and description of parameters for each scenario

Escenario	Nivel de Favorabilidad Política y Social	Máxima tasa de crecimiento	Capacidad en construcción	Max. Potencia instalada a 2050	Factor de Eficiencia de Planta Geotérmica	Costo x MW instalado
Democracia Verde	100%	4,5%	100 MW	1170 Mw	85%	5,19 M USD
	La favorabilidad de la orientación política y social frente a la transición energética es 100% favorable	Se asume la máxima tasa de crecimiento de la tecnología [38].	El Gobierno toma la iniciativa e instala los primeros 100 MW para impulsar este tipo de energía	Es la capacidad máxima de generación geotérmica con la que cuenta el país [1].	Se determina por medio de investigaciones, siendo el factor máximo de eficiencia actual [40].	Se determina por medio de investigaciones, siendo los costos mínimos determinados para este escenario [40].
Extractivismo Renovable	75%	3,5%	0 MW	1170 Mw	85%	5,19 M USD - 7,76 MUSD/MW
	A las políticas oscilar no se tiene mucha estabilidad en si es buena o mala la implementación de este tipo de energía	La máxima tasa de crecimiento disminuye a un punto porcentual tomando como valor la tasa de crecimiento anual entre 2000-2018 [38].	El gobierno no arriesga en invertir en ese primer proyecto geotérmico para demostrar que si funciona así retardando la implementación de los mismos.	Se mantiene la misma máxima potencia instalada pues es el potencial que se tiene como país [1].	El factor de eficiencia sigue siendo el mismo pero el desarrollo tecnológico se verá afectado [39].	El costo de MW oscila entre los 7,76 M USD/MW y los 5,19 M USD/MW [40].
Greta	25%	3,5%	50MW	1170 Mw	85%	5,19 M USD - 7,76 MUSD/MW
	Existe favorabilidad por parte de la sociedad, algunos políticos motivan, pero no se tiene un apoyo total por parte de ambas partes	La máxima tasa de crecimiento disminuye a un punto porcentual tomando como valor la tasa de crecimiento anual entre 2000-2018 [38].	Algunos presidentes al incentivar esa aparición de proyectos geotérmicos impulsan los primeros 50 MW	Se mantiene la misma máxima potencia instalada pues es el potencial que se tiene como país [1].	El factor de eficiencia sigue siendo el mismo pero el desarrollo tecnológico se verá afectado [39].	El costo de MW oscila entre los 7,76 M USD/MW y los 5,19 M USD/MW [40].

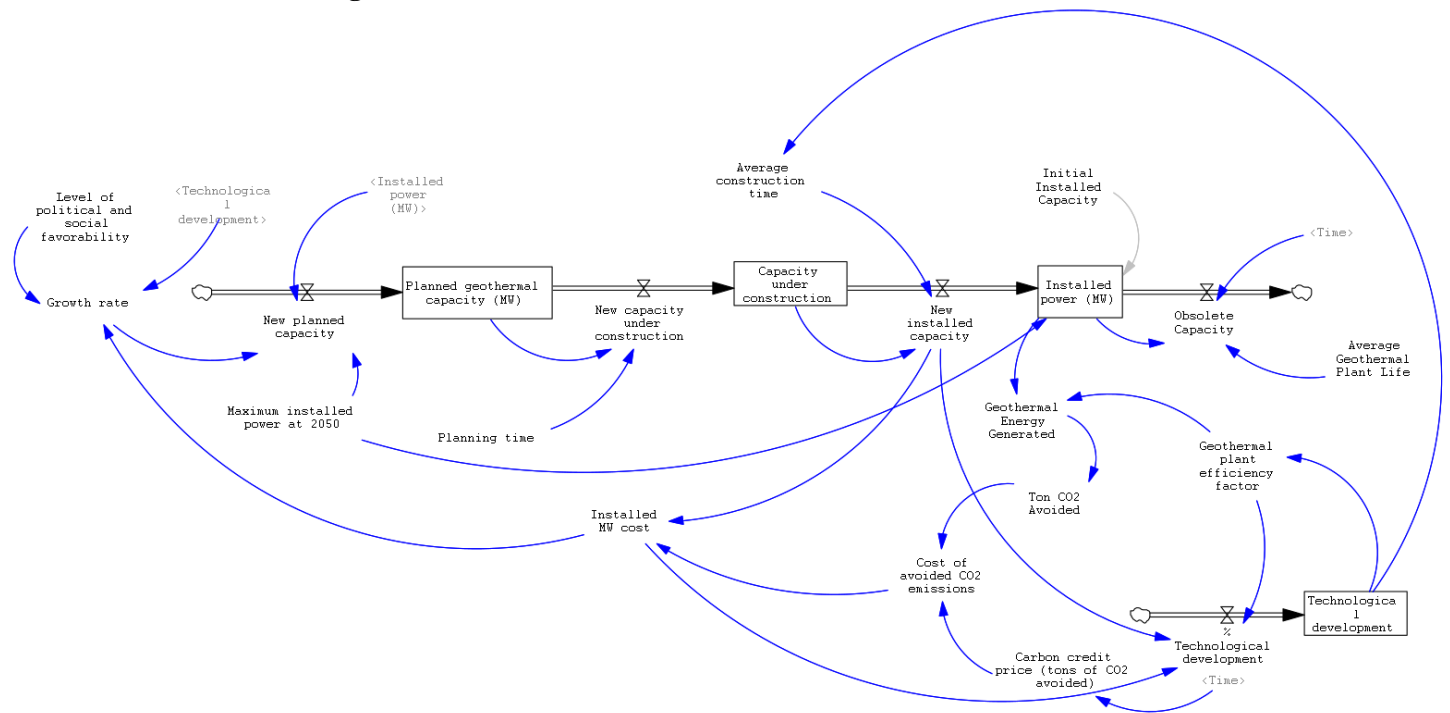
	0%	2.03%	0	585 MW	80%	7,76 M USD / MW - 6,15 M USD / MW
Casa en llamas	La sociedad y el gobierno nunca están de acuerdo con la implementación de plantas geotérmicas a lo largo de país	La tasa de crecimiento se mantiene la más pequeña registrada, datos basados en el crecimiento de México [41].	No se encuentra capacidad en construcción pues no se presentan las condiciones ni circunstancias	La capacidad de construcción se reduce a la mitad pues tampoco se realiza exploración en las diferentes zonas	El factor de eficiencia se reduce al 80% siendo la tecnología más obsoleta	No se logra el costo más bajo pues nunca se dan las condiciones para que esta tecnología sea más económica [40].

Source: Own elaboration [1,38-41].

4.2. Modelo

A continuación, se puede ver el modelo o esquema general de las variables que intervienen en el modelo:

Fig. 2 General scheme of the variables that interact in the model.



Source: Own elaboration in Vensim

4.2.1. Variables que interactúan en el modelo

4.2.1.1. Tasa de crecimiento

Representa un enfoque adaptativo y condicional para modelar la tasa de crecimiento de la energía geotérmica, teniendo en cuenta variables importantes como los costos de instalación, los niveles de aceptación política y social y los desarrollos tecnológicos. Este enfoque refleja la complejidad del entorno en el que operan los proyectos de energía geotérmica y proporciona una imagen dinámica de cómo estos factores interactúan para influir en la expansión y el desarrollo de la energía geotérmica. Cada condición capturada en la ecuación contiene un conjunto específico de condiciones que pueden ajustar la tasa de crecimiento en diferentes escenarios. La relación condicional entre los costos de instalación y las tasas de crecimiento reconoce que la productividad y la adopción de la energía geotérmica están estrechamente relacionadas con consideraciones económicas. Además, la inclusión de factores sociales y políticos resalta la importancia de los aspectos contextuales y técnicos para la expansión sostenible de las fuentes de energía; Estos valores están determinados por un estudio que analiza el tamaño y la cuota de mercado de las tendencias de la energía geotérmica y las previsiones de crecimiento (2023-2028) [38].

4.2.1.2. Promedio de vida de planta geotérmica

La vida útil estimada de una planta geotérmica, ya sea a nivel doméstico o a gran escala, es notablemente extensa. Si bien los valores exactos varían, las bombas de calor suelen tener una vida útil de 15 a 20 años, mientras que las grandes plantas de energía geotérmica generalmente están diseñadas con una vida útil esperada de alrededor de 30 años. Sin embargo, es común que muchas plantas superen los 60 años de funcionamiento, y las construidas recientemente demuestran una extraordinaria longevidad de 80 a 100 años. Esta excepcional vida útil se atribuye tanto a la experiencia acumulada en estas tecnologías como a la ausencia de combustión, que elimina el riesgo de incendios. Además, los sistemas geotérmicos requieren un mantenimiento relativamente bajo y los componentes con una vida útil más corta pueden reemplazarse al final de su vida útil [42] en este caso, el valor máximo que se toma como referencia es de 25 años en el escenario más prometedor.

4.2.1.3. Nueva capacidad planificada

$$\text{Nueva capacidad planificada} = (\text{Max. Pot. inst. a 2050} - \text{Pot. inst. (MW)}) \times \text{Tasa crecimiento}$$

Eq. 1 New planned capacity

Esta ecuación calcula la nueva capacidad planificada esperada. Esta es la diferencia entre la capacidad instalada máxima proyectada en 2050 y la capacidad instalada actual multiplicada por la tasa de crecimiento. Esta fórmula proporciona una estimación de la nueva capacidad que se espera agregar en un período determinado en función de la diferencia entre la capacidad máxima planificada y la capacidad actual y la tasa de crecimiento esperada; esta ecuación no solo cuantifica la expansión planificada en la capacidad de energía geotérmica, pero también integra la dinámica del crecimiento a lo largo del tiempo, permitiendo una planificación más informada y estratégica para el desarrollo continuo de esta fuente de energía renovable.

4.2.1.4. Nueva capacidad bajo construcción

$$\text{Nueva capacidad bajo construcción} = \text{DELAY3} \left(\left(\frac{\text{Cap. geotérmica plan. (MW)}}{\text{Tiemp. plan.}} \right), 2 \right)$$

Eq. 2 New capacity under construction

Una vez planificada la nueva energía geotérmica, transcurre un tiempo de construcción planificado antes de la instalación final. Esta ecuación nos introduce en un concepto crucial en la implementación de proyectos de energía geotérmica: el retraso temporal entre la planificación y la construcción. efectivo de la capacidad proyectada. Este modelo en concreto, que incorpora la función de retardo temporal "DELAY3", nos ofrece una ventana única para comprender y abordar una realidad única en el desarrollo de las infraestructuras geotérmicas. Al adoptar un enfoque de desfase temporal, se captura con precisión este desfase temporal que separa la fase de planificación desde el momento en que se realiza la capacidad geotérmica en la construcción. Es más que una simple fórmula matemática; es una representación modelada de la compleja y a menudo impredecible realidad de los proyectos geotérmicos.

4.2.1.5. Nueva capacidad instalada

$$\text{Nueva capacidad instalada} = \frac{\text{Cap. en construcción (MW)}}{\text{Tiemp. medio de construc.}}$$

Eq. 3 New installed capacity

Esta ecuación permite calcular la nueva capacidad instalada dividiendo la capacidad actualmente en construcción por el tiempo promedio de construcción. En términos simples, esta fórmula proporciona una estimación de cuánta capacidad nueva se espera agregar al sistema de energía geotérmica en función de la capacidad actualmente en construcción y el tiempo promedio estimado para completar la construcción; en pocas palabras, evalúa cuánta capacidad adicional se espera que se agregue al sistema de energía geotérmica. sistema durante un intervalo de tiempo definido por el tiempo promedio de construcción [39].

4.2.1.6. Energía Geotermal Generada

$$\text{Energía geotermal generada} = \text{Pot. inst. (MW)} \times \text{Fact. eficiencia plant. geotermica}$$

Eq. 4 Geothermal energy generated

Esta ecuación permite estimar el aporte efectivo de la energía geotérmica al sistema, ya que considera tanto la capacidad instalada como la eficiencia, elementos fundamentales para entender la producción real de energía geotérmica.

4.2.1.7. % desarrollo tecnológico

$$\% \text{ desarrollo tecnologico} = \frac{\text{Nueva cap. instalada} \times \text{Fact. eficiencia planta geotermica}}{\text{Costo MW instalado}}$$

Eq. 5 % technological development

El porcentaje de desarrollo tecnológico es fundamental para evaluar la efectividad y eficiencia de la implementación de nuevas capacidades en el sector de la energía geotérmica. Al ajustar la nueva capacidad instalada por la eficiencia de la planta y luego dividir esta cifra por el costo por megavatio instalado, la ecuación proporciona una perspectiva clara de cómo las mejoras tecnológicas están influyendo en la expansión de la capacidad geotérmica. Un mayor porcentaje indica que se está logrando un mayor desarrollo tecnológico en la generación de energía geotérmica, lo que sugiere eficiencia en la implementación y posiblemente una mayor competitividad en el panorama energético.

4.2.1.8. Costo MW instalado

Permite ajustar dinámicamente los costos por megavatio instalado en función de la escala de la nueva capacidad geotérmica implementada. Esta versatilidad permite adaptar los costos a diferentes tamaños de proyectos, reconociendo que las economías de escala y la eficiencia de la implementación pueden variar significativamente. En otras palabras, la ecuación proporciona una herramienta estratégica para evaluar y anticipar los costos asociados a proyectos de energía geotérmica de diferentes magnitudes, ofreciendo una perspectiva precisa y detallada en la planificación y ejecución de iniciativas en este sector [40].

4.2.1.9. Ton CO2/MWh Evitadas

$$\text{Ton CO2} \times \text{MWh evitadas} = (\text{Energía geotermal generada} \times 0,16438) - (\text{Energía geotermal generada} \times 0,091)$$

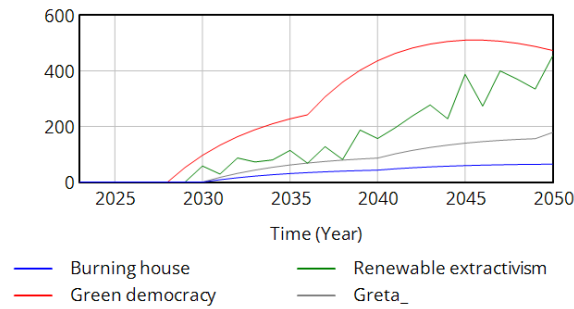
Eq. 6 Ton of CO2/MWh avoided

Permite calcular las toneladas de dióxido de carbono (CO2) evitadas por cada megavatio-hora (MWh) de energía geotérmica generada. Se comienza multiplicando la cantidad de energía geotérmica generada por un factor específico, 0,16438 toneladas de CO2/MWh [43], que representa las emisiones de CO2 que se habrían producido si la electricidad hubiera sido generada por la generación eléctrica del sistema interconectado. Luego, esta cifra se resta del producto de la cantidad de energía geotérmica generada y otro factor, 0,091 toneladas de CO2/MWh [44], que representa las emisiones evitadas al utilizar energía geotérmica en lugar de fuentes convencionales. La resta de estos términos proporciona la cantidad neta de CO2 evitada. En resumen, la ecuación permite cuantificar con precisión el impacto ambiental positivo del uso de energía geotérmica, calculando las emisiones de CO2 evitadas por unidad de energía generada.

5. Resultados

Una vez evaluado el modelo en cada uno de los escenarios, se obtuvieron los resultados que se presentan a continuación, los cuales son fundamentales para comprender la viabilidad y el impacto potencial de la energía geotérmica en diferentes contextos, lo que enriquece la perspectiva de este trabajo.

Fig. 3 Planned geothermal capacity (MW).

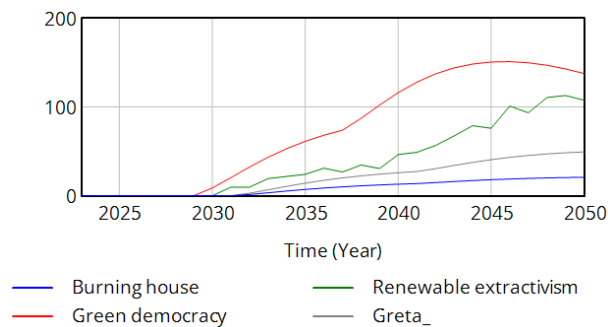


Source: Own elaboration of the model in Vensim

En el proceso de implementación de un campo geotérmico se deben abordar varias etapas, desde la exploración y evaluación del recurso hasta la operación y monitoreo continuo. Para acelerar la puesta en marcha de campos geotérmicos, se pueden adoptar estrategias que incluyan la aplicación de modernas técnicas de exploración geológica, geofísica y de teledetección para una evaluación más rápida y precisa del recurso. Asimismo, emplear tecnologías de perforación eficientes, optimizar el diseño y construcción de la planta geotérmica, implementar estrategias efectivas de gestión de proyectos, contar con un entorno regulatorio favorable, fomentar la participación comunitaria desde el inicio del proyecto y promover la investigación en nuevas tecnologías. La energía geotérmica son aspectos clave para acelerar la implementación, minimizar riesgos y garantizar el éxito en el uso de esta fuente de energía renovable.

La Figura 3 muestra el comportamiento de la capacidad geotérmica planificada en diferentes escenarios, destacando variaciones notables en función de las condiciones externas (políticas, sociales, económicas y tasa de crecimiento). En el escenario más favorable, conocido como “Democracia Verde”, se evidencian resultados óptimos gracias a condiciones políticas, sociales y económicas favorables, junto con una tasa de crecimiento favorable para esta tecnología. La capacidad geotérmica planificada muestra un crecimiento acelerado, alcanzando su punto máximo en 2046 con una capacidad proyectada de 511 MW. En cambio, el escenario menos favorable, denominado "Casa en llamas", revela un desarrollo más limitado, con una potencia máxima prevista de 64 MW que se mantiene constante en el tiempo. Estos contrastes ilustran claramente la influencia crítica de las condiciones externas en la planificación y el desarrollo de la capacidad geotérmica, subrayando la importancia de considerar factores multidisciplinarios en la toma de decisiones estratégicas en el campo energético.

Fig. 4 Capacity under construction (MW).



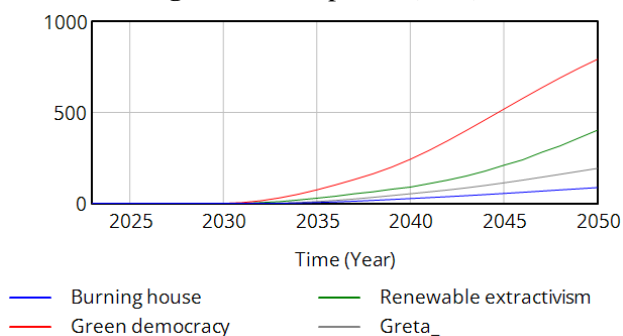
Source: Own elaboration of the model in Vensim

En este caso el resultado obtenido depende mucho de lo evaluado previamente ya que a mayor capacidad planificada significa mayor capacidad en construcción, como se puede observar en la figura 4 donde nuevamente se observa el mismo comportamiento de los escenarios de democracia verde y casa en llamas. pero aquí se presenta un comportamiento diferente para el extractivismo renovable, donde se pueden ver algunas variaciones, alzas y bajas, el hecho de que las curvas del extractivismo renovable muestren cambios abruptos demuestra que la estabilidad política y la continuidad de las políticas gubernamentales son elementos cruciales para el desarrollo y consolidación del Fuentes de energía renovable. La incertidumbre generada por los cambios políticos puede resultar en decisiones inestables respecto de la implementación de tecnologías renovables, lo que subraya la importancia de considerar factores no sólo técnicos, sino también políticos, al planificar la transición hacia un modelo energético más sostenible. Esto es claramente evidente en el caso de la energía geotérmica en Colombia, la falta de continuidad en las políticas y programas gubernamentales ha frenado el avance de esta tecnología. Las iniciativas implementadas en ciertos períodos

han sufrido interrupciones o cambios de rumbo con cambios de gobierno, generando incertidumbre y dificultando la atracción de inversiones a gran escala en proyectos geotérmicos.

La incertidumbre generada por los cambios políticos puede resultar en decisiones inestables respecto de la implementación de tecnologías renovables, lo que subraya la importancia de considerar factores no sólo técnicos, sino también políticos, al planificar la transición hacia un modelo energético más sostenible. Es fundamental que Colombia establezca un marco regulatorio claro y estable que brinde certidumbre a los inversionistas y promueva el desarrollo de la energía geotérmica a través de incentivos, programas de investigación y mecanismos de financiamiento de largo plazo. Sólo con un compromiso político que trascienda los períodos de gobierno se podrá lograr un avance sostenido en la explotación de este valioso recurso energético renovable.

Fig. 5 Installed power (MW).



Source: Own elaboration of the model in Vensim

Esta potencia instalada está muy relacionada con lo que se observa en las figuras 3 y 4, donde a mayor planificación y capacidad instalada, también será la potencia instalada correspondiente. En este contexto, el escenario más prometedor es el de la "democracia verde" con 793 MW de potencia instalada. Sin embargo, para un entendimiento completo de la situación, es fundamental comparar estos resultados con las proyecciones establecidas por la UPME, que introduce la energía geotérmica como una fuente importante con una potencia instalada de 937 MW.

La similitud entre los resultados obtenidos en el escenario de "democracia verde" y las proyecciones de la UPME resalta la robustez y confiabilidad del modelo propuesto [45]. Esta congruencia podría indicar una convergencia de enfoques y estrategias entre el modelo utilizado y las proyecciones del gobierno, proporcionando una base sólida para la toma de decisiones. La proximidad de los resultados obtenidos a las proyecciones de la UPME no solo respalda la efectividad del modelo, sino que también sugiere que la planificación estratégica basada en modelos puede ser una herramienta valiosa para guiar las decisiones de política energética y la inversión en el sector.

Fig. 6 Technological development.

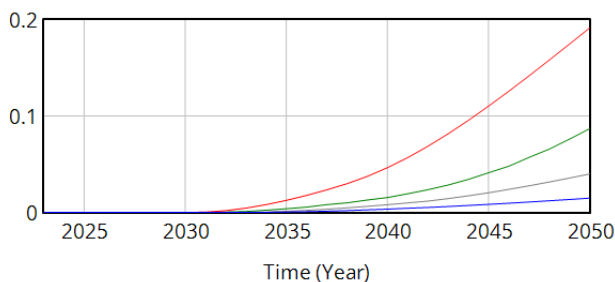
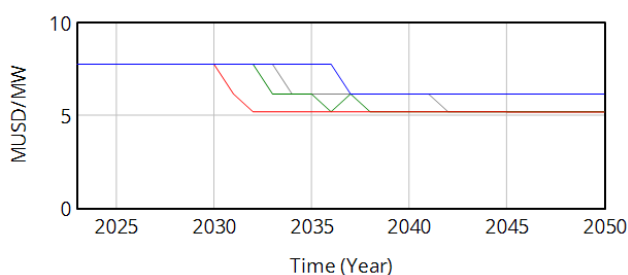


Fig. 7 Installed MW cost (M USD/MW).

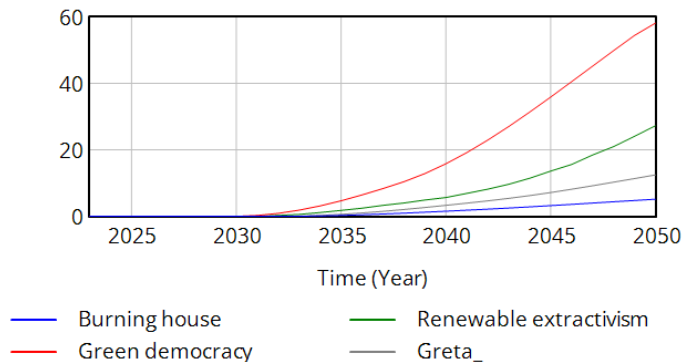


Source: Own elaboration of the model in Vensim

En este caso, el desarrollo tecnológico y el coste de los MW instalados están directamente relacionados. Por un lado, al tener menores costos el sistema responde con un aumento en el desarrollo tecnológico y así mismo al tener mayor desarrollo tecnológico nuestros costos disminuirán. En este caso y como se puede observar en las figuras 6 y 7, el escenario más prometedor en términos de desarrollo y bajos costos es la democracia verde porque, como se mencionó, es el escenario ideal donde es posible sacarle el máximo provecho a esta tecnología. y están dadas todas las condiciones para que así sea, logrando así el costo por MW instalado de 5,16 M USD [40].

Esta relación directa entre desarrollo tecnológico y costos se debe a que las innovaciones y avances en la tecnología permiten optimizar los procesos, mejorando la eficiencia y reduciendo los costos de producción, instalación y mantenimiento. A medida que se invierten más recursos en investigación y desarrollo, se descubren nuevas técnicas y materiales más baratos y duraderos, lo que a su vez impulsa aún más el desarrollo tecnológico al hacer que la tecnología sea más accesible y rentable. Es un círculo virtuoso en el que el progreso tecnológico y la reducción de costos se retroalimentan, creando un entorno propicio para la adopción generalizada de la tecnología en cuestión.

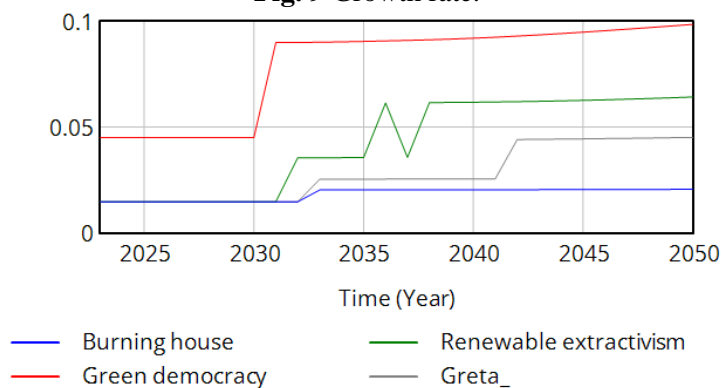
Fig. 8 Ton CO2/MWh avoided



Source: Own elaboration of the model in Vensim

La generación geotérmica en Colombia emerge como un pilar fundamental en la transición hacia un panorama energético más sostenible y amigable con el medio ambiente. La reducción significativa de 58,2 toneladas de CO2 por megavatio-hora en el mejor de los casos subraya su papel crucial en la mitigación de los impactos ambientales asociados con la producción de electricidad. Este valor no sólo demuestra la eficacia de la generación geotérmica en la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero, sino que también pone de relieve su contribución directa a la lucha contra el cambio climático. Al optar por esta fuente renovable, Colombia no solo avanza hacia la descarbonización de su matriz energética, sino que también está dando un ejemplo inspirador para otras naciones que buscan formas más limpias y sostenibles de generar electricidad. Además, la generación geotérmica no sólo destaca por su impacto ambiental positivo, sino que también ofrece una fuente de energía constante y confiable, independiente de las condiciones climáticas. Esta estabilidad en la producción eléctrica contribuye a fortalecer la seguridad energética del país, reduciendo la dependencia de fuentes más variables y volátiles.

Fig. 9 Growth rate.



Source: Own elaboration of the model in Vensim

La tasa de crecimiento, sin duda, constituye la piedra angular del modelo, ya que es la variable determinante que define el avance o estancamiento de esta tecnología. Es fundamental comprender que esta tasa de crecimiento no es simplemente un indicador aislado, sino un reflejo directo de la intersección de varios factores, incluidos los políticos, sociales, económicos y tecnológicos. El gráfico 9 presenta claramente cómo estos elementos convergen para dar forma a la trayectoria de crecimiento, siendo el escenario de “democracia verde” el más destacado en este sentido. En este análisis es fundamental detallar cómo cada uno de estos factores influye en la tasa de crecimiento. Desde un punto de vista político, la estabilidad institucional y políticas gubernamentales consistentes pueden crear un entorno propicio para las inversiones y el desarrollo tecnológico, impulsando así la tasa de crecimiento. Sin embargo, cambios inesperados de política o inestabilidad política podrían generar incertidumbre y desacelerar el crecimiento. Socialmente, la aceptación y adopción de tecnología por parte de la sociedad puede acelerar este crecimiento al crear una demanda sostenida, pero

también podría enfrentar resistencia o escepticismo, lo que podría ralentizar su adopción. Desde una perspectiva económica, la disponibilidad de recursos financieros y la viabilidad económica de la tecnología también afectan directamente la tasa de crecimiento.

Un entorno económico favorable puede atraer inversiones y acelerar la adopción de tecnología, pero una recesión o una crisis financiera podría limitar los recursos disponibles y desacelerar el crecimiento.

Finalmente, el componente tecnológico es clave, ya que avances tecnológicos significativos pueden mejorar la eficiencia y rentabilidad de la tecnología, promoviendo un crecimiento más rápido. Sin embargo, los retrasos en el desarrollo tecnológico, ya sea debido a limitaciones técnicas o a la falta de inversión en investigación y desarrollo, podrían obstaculizar el progreso. En consecuencia, se logra una tasa de crecimiento de aproximadamente el 10% al año 2050 para alcanzar la potencia instalada de 793 MW al año 2050 en el escenario de "democracia verde". Sin embargo, es importante tener en cuenta que este crecimiento puede verse afectado por diversos factores de incertidumbre y posibles retrasos en los ámbitos político, social, económico y tecnológico, que podrían alterar la trayectoria proyectada.

6. Conclusiones

Para lograr, en el mejor escenario posible, una potencia instalada de 793 MW provenientes de energía geotérmica para el año 2050, se plantea la necesidad de impulsar el desarrollo de los recursos geotérmicos en el país. Sin embargo, es importante reconocer la existencia de incertidumbres en este camino hacia la "democracia verde". Se requieren ajustes profundos en el marco regulatorio, pero la implementación efectiva de políticas que fomenten la inversión y la sostenibilidad está sujeta a desafíos y cambios inesperados.

Modificar el marco regulatorio para simplificar procesos de permisos y licencias es una meta, pero la certeza en cuanto a la aceptación y aplicación de estos cambios es variable. Establecer normativas claras y específicas para la energía geotérmica es un paso fundamental, pero la adaptabilidad a futuras circunstancias inciertas es crucial. Promover la transparencia en los procedimientos regulatorios puede crear un entorno propicio, aunque la evolución política y social podría afectar estos esfuerzos.

La introducción de políticas gubernamentales que ofrezcan incentivos fiscales específicos para proyectos geotérmicos y tarifas preferenciales es una estrategia, pero su continuidad y efectividad dependen de factores políticos y económicos variables. Establecer metas y objetivos claros en las políticas energéticas nacionales es fundamental, aunque la implementación puede verse afectada por cambios en la administración y en la opinión pública.

En el ámbito social, la consideración del impacto en las comunidades locales es esencial, pero la respuesta y participación ciudadana pueden ser impredecibles. Implementar políticas que fomenten la participación y consulta ciudadana es un objetivo, pero la dinámica social puede cambiar a lo largo del tiempo. Invertir en programas de educación y divulgación para las comunidades locales es valioso, pero la receptividad a estos esfuerzos puede variar.

El aspecto de estabilidad inherente de la energía geotérmica es un punto fuerte, pero las condiciones geológicas pueden presentar desafíos imprevistos. La capacitación del personal no solo debe centrarse en habilidades técnicas, sino también en aspectos sociales y regulatorios, aunque la rápida evolución de estas dimensiones puede plantear desafíos.

En conjunto, un marco regulatorio claro y favorable, políticas gubernamentales estratégicas, atención cuidadosa a las dinámicas sociales y la estabilidad de la energía geotérmica son elementos cruciales para fomentar el desarrollo sostenible. Sin embargo, es fundamental reconocer la incertidumbre inherente en el proceso y estar preparados para adaptarse a cambios inesperados en el camino hacia el objetivo deseado. Este enfoque integral no solo impulsa el crecimiento del sector, sino que también busca gestionar las incertidumbres para asegurar beneficios económicos, ambientales y sociales para el país y sus comunidades.

Un punto por abordar y que puede impulsar mucho más este tipo de energía es el aprovechamiento de la infraestructura existente de pozos petroleros y de gas, los pozos petroleros y de gas existentes ya han sido perforados, lo que representa una parte significativa de los costos totales de un proyecto geotérmico. Reutilizar estos pozos evita los gastos asociados con nuevas perforaciones profundas, que suelen ser muy costosas. Los pozos existentes cuentan con caminos de acceso, instalaciones de superficie y otras obras civiles necesarias para las operaciones. Aprovechar esta infraestructura existente reduce los costos de construcción y logística asociados al desarrollo de nuevos proyectos desde cero. Otro aspecto importante es la información geológica y de subsuelo recopilada durante la exploración y extracción de petróleo y gas es valiosa para evaluar el potencial geotérmico de la zona. Esto puede reducir los costos y riesgos asociados con la exploración geotérmica inicial. Por otro lado aunque se requieren ajustes, el marco regulatorio ya establecido para la industria de hidrocarburos puede servir como base para el desarrollo de regulaciones específicas para la energía

geotérmica, lo que puede agilizar el proceso y reducir los costos asociados con la creación de un marco legal completamente nuevo.

7. Agradecimientos

Los agradecimientos se dirigen al proyecto “Subvenciones de la European Climate Foundation” en colaboración con la Universidad Jorge Tadeo Lozano, por su generoso respaldo financiero que hizo posible llevar a cabo esta investigación. Asimismo, quiero expresar mi profundo agradecimiento a los ingenieros Julian Ariztizabal, Isaac Dyner y Enrique Sanint, cuya invaluable orientación y asesoramiento fueron fundamentales en cada etapa del proceso investigativo, contribuyendo significativamente al logro de los objetivos planteados

8. Referencias

- [1] Jorquera, C. (2021, 7 de octubre). Potencial geotérmico colombiano estimado en 1.170 MW. Think GeoEnergy - Noticias de energía geotérmica; Piensa en Geotermia - Actualidad Geotermia. <https://www.piensageotermia.com/potencial-geotermico-colombiano-estimado-en-1170-mw/>
- [2] Parex Resources desarrolla proyecto pionero en el país de coproducción de hidrocarburos y energía eléctrica a partir de la geotermia. (s/f). ACP. Recuperado el 25 de enero de 2024, de <https://acp.com.co/web2017/es/sala-de-prensa/hechos-de-sostenibilidad/1506-parex-resources-y-el-ministerio-de-minas-y-energia-inauguran-proyecto-pionero-en-el-pais-de-coproduccion-de-hidrocarburos-y-energia-electrica-a-partir-de-la-geotermia>
- [3] Omar Pinto, Pablo Aguilera, Oscar Cideos and Jose L. Henríquez. (2021 4). *Towards the Use of Geothermal Resources Available in Oil and Gas Sedimentary Basins in Colombia*. <https://www.geothermal-energy.org/pdf/IGAstandard/WGC/2020/41004.pdf>
- [4] Santoyo Martínez, M. (2023). Análisis comparativo de las crisis energéticas de 1973 y 2021: causas y consecuencias económicas, sociales y políticas.
- [5] Instituto Geológico y Minero de España. (s/f). Igme.es. Recuperado el 27 de enero de 2024, de <https://www.igme.es/geotermia/la%20geotermia%20en%20el%20mundo.htm>
- [6] Sánchez Alvarado, E. J., León Gómez, S. T., & Vargas Soto, C. A. (2021). Análisis del caso de éxito del proyecto de transformación energética de Islandia. *Especialización en Gerencia de Proyectos -Virtual*.
- [7] Lund, J. W., Hutterer, G. W., & Toth, A. N. (2022). Characteristics and trends in geothermal development and use, 1995 to 2020. *Geothermics*, 105(102522), 102522. <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2022.102522>
- [8] Coskun Avci, A., Kaygusuz, O., & Kaygusuz, K. (2020). Geothermal energy for sustainable development. *Journal of Engineering Research and Applied Science*, 9(1), 1414–1426. <https://journaleras.com/index.php/jeras/article/view/199>
- [9] Pambudi, N. A., & Ulfa, D. K. (2024). The geothermal energy landscape in Indonesia: A comprehensive 2023 update on power generation, policies, risks, phase and the role of education. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 189(114008), 114008. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.114008>
- [10] Aryanfar, Y., García Alcaraz, J. L., Blanco Fernandez, J., Köten, H., & Awad, M. M. (2023). Comprehensive investigation on the geothermal energy sector in México. *CT&F*, 13(1), 43–55. <https://doi.org/10.29047/01225383.665>
- [11] Shortall, R., Davidsdottir, B., & Axelsson, G. (2015). A sustainability assessment framework for geothermal energy projects: Development in Iceland, New Zealand and Kenya. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 50, 372–407. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.04.175>
- [12] Oyewo, A. S., Aghahosseini, A., Movsessian, M. M., & Breyer, C. (2024). A novel geothermal-PV led energy system analysis on the case of the central American countries Guatemala, Honduras, and Costa Rica. *Renewable Energy*, 221(119859), 119859. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2023.119859>
- [13] Taghizadeh-Hesary, F., Mortha, A., Farabi-Asl, H., Sarker, T., Chapman, A., Shigetomi, Y., & Fraser, T. (2020). Role of energy finance in geothermal power development in Japan. *International Review of Economics & Finance*, 70, 398–412. <https://doi.org/10.1016/j.iref.2020.06.011>
- [14] Komori, Y., Kioka, A., & Nakagawa, M. (2023). Predictive model for history matching of social acceptance in geothermal energy projects. *Renewable Energy Focus*, 45, 192–200. <https://doi.org/10.1016/j.ref.2023.04.003>
- [15] Jones, J. M. R., & Kretzschmar, T. G. (2017). The Mexican center of innovation in geothermal energy, CeMIE-Geo: Challenges and opportunities. *Procedia Earth and Planetary Science*, 17, 905–908. <https://doi.org/10.1016/j.proeps.2017.01.013>
- [16] Archer, R. (2020). 20 - Geothermal Energy. *Energía del futuro (tercera edición)*, 431–445. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102886-5.00020-7>
- [17] Ashena, R. (2023). Analysis of some case studies and a recommended idea for geothermal energy production from retrofitted abandoned oil and gas wells. *Geothermics*, 108(102634), 102634. <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2022.102634>
- [18] Santos, L., Dahi Taleghani, A., & Elsworth, D. (2022). Repurposing abandoned wells for geothermal energy: Current status and future prospects. *Renewable Energy*, 194, 1288–1302. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2022.05.138>

- [19] Wang, K., Liu, J., & Wu, X. (2018). Downhole geothermal power generation in oil and gas wells. *Geothermics*, 76, 141–148. <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2018.07.005>
- [20] Nadkarni, K., Lefsrud, L. M., Schiffner, D., & Banks, J. (2022). Converting oil wells to geothermal resources: Roadmaps and roadblocks for energy transformation. *Energy Policy*, 161(112705), 112705. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2021.112705>
- [21] Gómez Díaz, E., & Mariño Arias, O. M. (2020). Structural assessment and geochemistry of thermal waters at the Cerro Machin Volcano (Colombia): An approach to understanding the geothermal system. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 400(106910), 106910. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2020.106910>
- [22] Díaz, EG (s/f). Energía geotérmica en Colombia: Más allá del suministro eléctrico; Una visión para el desarrollo sostenible. *Geothermal-energy.org*. Recuperado el 01 de diciembre de 2023, de <https://www.geothermal-energy.org/pdf/IGAstandard/WGC/2020/05029.pdf>
- [23] Claudia María Alfaro Valero Jesús Bernardo Rueda Gutiérrez Yenny Paola Casallas Veloza Gina Z. Rodríguez Ospina Jaison E. Malo Lázaro. (2020). ESTIMACIÓN PRELIMINAR DEL POTENCIAL GEOTÉRMICO DE COLOMBIA. https://recordcenter.sgc.gov.co/B22/742_2021EstiPrePotGeotColombia/Documento/Pdf/EstiPrePotenGeoterColom.pdf
- [24] Yenny P. Casallas-Veloza and J. Camilo Matiz-León. (2023, primavera 4). Development of the Electrical Power Generation and Geothermal Exploration in Colombia: Country Update.
- [25] Olvera-García, E., Ayling, B. F., Rueda-Gutiérrez, J. B., Rivera, A. M. M., Rodríguez-Rodríguez, G. F., Malo, J., Sánchez, J., Rodríguez-Molina, Y., Pardo, Y., Casallas-Veloza, Y. P., Matiz-León, J. C., Rodríguez-Ospina, G., Alva, M. R., Aguirre-Corrales, A., & Alfaro-Valero, C. M. (2023). Expert-driven play Fairway Analysis applied to the Azufral Volcano Geothermal Area in southwestern Colombia. *Geothermics*, 115(102827), 102827. <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2023.102827>
- [26] La geotermia: Alternativa energética renovable y amigable. (s/f). Eje21. Recuperado el 2 de diciembre de 2023, de <https://www.eje21.com.co/2022/02/la-geotermia-alternativa-energetica-renovable-y-amigable/>
- [27] Ley 697 de 2001 - Gestor Normativo. (s/f). Gov.co. Recuperado el 9 de noviembre de 2023, de <https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=4449>
- [28] Ley 1715 de 2014 - Gestor Normativo. (s/f). Gov.co. Recuperado el 16 de noviembre de 2023, de <https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=57353>.
- [29] Decreto 1318 de 2022 - Gestor Normativo. (s/f). Gov.co. Recuperado el 30 de octubre de 2023, de <https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=191066>
- [30] Análisis técnico y recomendaciones para el aprovechamiento del recurso geotérmico disponible en campos de petróleo. (s/f). Ageocol.org. Recuperado el 11 de febrero de 2024, de <https://www.ageocol.org/download/analisis-tecnico-y-recomendaciones-para-el-aprovechamiento-del-recurso-geotermico-disponible-en-campos-de-petroleo>
- [31] Energías, M. E. N. (s/f). *GEOTERMIA DE BAJA ENTALPÍA A PARTIR DE AGUAS ASOCIADA A LA DE PRODUCCIÓN CRUDO DE UN CAMPO PETROLERO EN LA CUENCA COLOMBIANA DE LOS LLANOS ORIENTALES*. Edu.co. Recuperado el 11 de febrero de 2024, de <https://repository.urosario.edu.co/server/api/core/bitstreams/5b18c215-dd2e-40df-83e1-d4a0fe089029/content#:~:text=En%20Colombia%2C%20en%20el%20a%C3%B1o,departamento%20del%20Casanare%20%5B6%5D>.
- [32] Energías, M. E. N. (s/f). *GEOTERMIA DE BAJA ENTALPÍA A PARTIR DE AGUAS ASOCIADA A LA DE PRODUCCIÓN CRUDO DE UN CAMPO PETROLERO EN LA CUENCA COLOMBIANA DE LOS LLANOS ORIENTALES*. Edu.co. Recuperado el 11 de marzo de 2024, de <https://repository.urosario.edu.co/server/api/core/bitstreams/5b18c215-dd2e-40df-83e1-d4a0fe089029/content#:~:text=En%20Colombia%2C%20en%20el%20a%C3%B1o,departamento%20del%20Casanare%20%5B6%5D>.
- [33] De, C., & Mecánica, I. (s/f). *UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA SEDE CUENCA*. Edu.ec. Recuperado el 28 de octubre de 2023, de <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/12755/1/UPS-CT006620.pdf>
- [34] de Sistemas. Ángel A. Sarabia., 2. La Teoría General. (s/f). *DINÁMICA DE SISTEMAS*. Utp.ac.pa. Recuperado el 12 de febrero de 2024, de https://www.academia.uto.ac.pa/sites/default/files/docente/51/dinsist-dinamica_sistemas.pdf
- [35] González, M., & Javier, L. (2013). *Dinámica de Sistemas Complejos. Tema 3. Modelado con dinámica de sistemas*. <https://uvadoc.uva.es/handle/10324/16587>
- [36] J. D. Sterman, *Business Dynamics Systems Thinking and Modeling for a Complex World*, Massachusetts Institute of Technology (MIT): McGrawHill, 2001 Massachusetts.
- [37] Libro - *Dinámica de Sistemas - FIS UNCP*. (s/f). Scribd. Recuperado el 12 de enero de 2024, de <https://es.scribd.com/document/269523378/Libro-Dinamica-de-Sistemas-FIS-UNCP>
- [38] *Tamaño del mercado de energía geotérmica y análisis de acciones - Informe de investigación de la industria - Tendencias de crecimiento*. (s/f). Mordorintelligence.com. Recuperado el 30 de octubre de 2023, de <https://www.mordorintelligence.com/es/industry-reports/geothermal-energy-market>
- [39] Street, B. M. (s/f). *Manual de geotermia*: Esmap.org. Recuperado el 4 de noviembre de 2023, de https://www.esmap.org/sites/default/files/esmap-files/ESMAP_GEOTHERMAL_Spanish_book_Optimized.pdf

- [40] Aguilera, P., & Luis, J. (s/f-b). Financial feasibility assessment of a wellhead geothermal plant at Nevado del Ruiz volcano in Colombia. Geothermal-energy.org. Recuperado el 30 de octubre de 2023, de <https://www.geothermal-energy.org/pdf/IGAstandard/WGC/2020/04010.pdf>
- [41] Geothermal power database. (2018, septiembre 2). International Geothermal Association. <https://www.lovegeothermal.org/explore/our-databases/geothermal-power-database/>
- [42] Preguntas frecuentes sobre la energía geotérmica. (2022, marzo 10). Enelgreenpower.com; Enel Green Power. <https://www.enelgreenpower.com/es/learning-hub/energias-renovables/energia-geotermica/faq>
- [43] González, X. (s/f). En Colombia el factor de emisión de CO₂ por generación eléctrica es de 164,38 gramos por kWh. Diario La República. Recuperado el 12 de enero de 2024, de <https://www.larepublica.co/especiales/colombia-potencia-energetica/en-colombia-el-factor-de-emision-de-co2-por-generacion-electrica-es-de-164-38-gramos-por-kwh-2966236>
- [44] Jorquera, C. (2022, abril 26). Las plantas de energía geotérmica tienen un impacto cero en las emisiones de GEI, afirma un estudio. Think GeoEnergy - Geothermal Energy News; Piensa en Geotermia - Geothermal Energy News. <https://www.piensageotermia.com/las-plantas-de-energia-geotermica-tienen-un-impacto-cero-en-las-emisiones-de-gei-afirma-un-estudio/>
- [45] Mojica, I. Q. (s/f). Actualización plan energético nacional (PEN) 2022-2052. Ministerio de mina y energía. Recuperado el 7 de julio de 2023, de https://www1.upme.gov.co/DemandayEficiencia/Documents/PEN_2020_2050/Actualizacion_PEN_2022-2052_VF.pdf
- [46] Romero, J. O. (s/f). Contributions to the preliminary characterization of the geothermal potential in the area. Geothermal-energy.org. Recuperado el 4 de octubre de 2023, de <https://www.geothermal-energy.org/pdf/IGAstandard/WGC/2020/16058.pdf>
- [47] Alfaro, C. (s/f). Improvement of perception of the geothermal energy as a potential source of electrical energy in Colombia, country update. Geothermal-energy.org. Recuperado el 12 de noviembre de 2023, de <https://www.geothermal-energy.org/pdf/IGAstandard/WGC/2015/01005.pdf>
- [48] Aguilera, P., Alfaro, C., Arcila-Rivera, A., Blessent, D., Rueda, J., & Llamosa, O. (s/f). Colombia – a geothermal opportunity. Geothermal-energy.org. Recuperado el 17 de noviembre de 2023, de <https://www.geothermal-energy.org/pdf/IGAstandard/NZGW/2019/047.pdf>
- [49] Paredes Zapata, O., María, C., Valero, A., Ospina, G. R., Alfaro, C., Carlos, V., & González Idárraga, E. (s/f). SERVICIO GEOLÓGICO COLOMBIANO. Gov.co. Recuperado el 20 de noviembre de 2023, de <https://www2.sgc.gov.co/Publicaciones/Cientificas/NoSeriadadas/Documents/geotermia-en-colombia.pdf>
- [50] García Jiménez, r. D., Gutiérrez Yermanos, s. L., r. Pareja Pérez, E., t. Pusquin Ospina, L., Dewhurst, W. t., & López, J. P. (2013). *Within Nereidas Valley, Nevado Del ruiz Volcano, colombia*. Mygeoenergynow.org. <https://publications.mygeoenergynow.org/grc/1030685.pdf>
- [51] Dewhurst Chief Social Scientist, K., & Dewhurst Group. (s/f). *Social and political consequences of geothermal*: Mygeoenergynow.org. Recuperado el 1 de diciembre de 2023, de <https://publications.mygeoenergynow.org/grc/1033631.pdf>
- [52] Alfaro, C., Bernal, N., Ramírez, G., & Escovar, R. (s/f). *COLOMBIA, COUNTRY UPDATE*. Geothermal-energy.org. Recuperado el 1 de diciembre de 2023, de <https://www.geothermal-energy.org/pdf/IGAstandard/WGC/2000/R0512.PDF>
- [53] Prieto, A., van Campen, B., Carvajal, P., Pinta, D. M., & Akamine, A. (s/f). Opening new frontiers for geothermal generation in Colombia, Peru and Ecuador: Resource, regulation & capacity building. Geothermal-energy.org. Recuperado el 4 de diciembre de 2023, de https://www.geothermal-energy.org/pdf/IGAstandard/NZGW/2016/068_VanCampen_Final.pdf
- [54] Aguirre, A., & Barragán R., R. M. (s/f). Geochemical data interpretation of thermal springs in Colombia. Stanford.edu. Recuperado el 4 de diciembre de 2023, de <https://pangea.stanford.edu/ERE/pdf/IGAstandard/SGW/2006/aguirre.pdf>
- [55] Alfaro, C., Alvarado, I., & Manrique, A. (s/f). Proceedings world geothermal congress 201. Geothermal-energy.org. Recuperado el 4 de diciembre de 2023, de <https://www.geothermal-energy.org/pdf/IGAstandard/WGC/2015/13035.pdf>
- [56] Clauser, C. (1997). Geothermal energy use in Germany— status and potential. *Geothermics*, 26(2), 203–220. [https://doi.org/10.1016/s0375-6505\(96\)00040-5](https://doi.org/10.1016/s0375-6505(96)00040-5)