



BARRERAS PARA LA TRANSFERENCIA DE CONOCIMIENTOS PETROLEROS AL GEOTÉRMICO: ANÁLISIS NORMATIVO-FISCAL EN BOYACÁ Y META (2005-2025)

Carlos Andrés Arboleda Ramírez¹
Nallely Jacqueline Reyes García²

¹Doctorando en Economía, Universidad Americana de Europa (UNAE). Correo: caarbolero@unal.edu.co

² Profesora- Investigadora, Universidad Americana de Europa (UNAE). Correo: nallely.reyes@unade.edu.mx

RESUMEN

Entre 2005 y 2025, Colombia mantuvo una matriz energética con alta participación hidroeléctrica ($\approx 70\%$) y una economía dependiente de ingresos por hidrocarburos ($\approx 20\%$). Esta configuración generó vulnerabilidad ante fenómenos climáticos y volatilidad de precios internacionales. El estudio analizó la transferencia de conocimientos desde la industria petrolera hacia la energía geotérmica en los departamentos de Boyacá y Meta. El objetivo fue examinar el impacto de las Leyes 1715 de 2014 y 2099 de 2021, junto con el Decreto 1598 de 2024, en dicha transferencia. Se utilizó un enfoque cualitativo con diseño exploratorio-descriptivo, basado en el análisis de 35 fuentes documentales y ocho entrevistas semiestructuradas realizadas en enero de 2026. Los resultados mostraron una implementación parcial de los incentivos normativos. Se identificaron cuatro barreras: ausencia de fondos soberanos para mitigar el riesgo exploratorio, falta de programas de reconversión laboral, mecanismos débiles de captura fiscal, y coordinación interinstitucional fragmentada. Se concluyó que el fortalecimiento de los instrumentos normativos y fiscales constituye un requisito técnico para superar las inercias del modelo extractivo. La transferencia efectiva de capacidades requiere enfoques diferenciados por territorio, dado el mayor dinamismo relativo de Boyacá frente al rezago del Meta.

Palabras clave: Geotermia; Políticas Fiscales; Transferencia De Conocimiento; Transición Energética.

ABSTRACT

Between 2005 and 2025, Colombia maintained an energy matrix with high hydroelectric participation ($\approx 70\%$) and an economy dependent on hydrocarbon revenues ($\approx 20\%$). This configuration generated vulnerability to climate phenomena and international price volatility. The study analyzed the transfer of knowledge from the oil industry to geothermal energy in the departments of Boyacá and Meta. The objective was to examine the impact of Laws 1715 of 2014 and 2099 of 2021, along with Decree 1598 of 2024, on said transfer. A qualitative approach with exploratory-descriptive design was used, based on the analysis of 35 documentary sources and eight semi-structured interviews conducted in January 2026. The results showed partial implementation of existing regulatory incentives. Four barriers were identified: absence of sovereign funds to mitigate exploratory risk, lack of labor retraining programs, weak fiscal capture mechanisms, and fragmented inter-institutional coordination. It is concluded that strengthening regulatory and fiscal instruments constitutes a technical requirement to overcome the inertia of the extractive model. Effective transfer of capabilities requires differentiated territorial approaches, given the greater relative dynamism of Boyacá compared to the lag observed in Meta.

Keywords: Geothermal Energy; Fiscal Policies; Knowledge Transfer; Energy Transition.

INTRODUCCIÓN

Revista de Investigación Multidisciplinaria Iberoamericana, RIMI © 2023 by Elizabeth Sánchez Vázquez is licensed under

La transición energética en Colombia enfrenta tensiones derivadas de una matriz eléctrica dominada por la hidroelectricidad (aproximadamente 70%) y una economía con una dependencia significativa de los ingresos por hidrocarburos (cerca del 20%) (Trejo et al, 2022). Esta configuración genera vulnerabilidades ante eventos climáticos extremos como el fenómeno El Niño y fluctuaciones en los precios internacionales del petróleo. La energía geotérmica ofrece una alternativa de generación base, constante y con bajas emisiones, que podría contribuir a diversificar la matriz y reducir dichas vulnerabilidades.

No obstante, a pesar de los avances normativos (Leyes 1715 de 2014 y 2099 de 2021; Decreto 1598 de 2024), la expansión de la geotermia en Colombia ha sido limitada, especialmente en los departamentos de Boyacá (zona de Paipa-Iza) y Meta (sector de Apiay), donde se concentra parte del potencial identificado. Ambos territorios comparten un alto potencial geotérmico y el Meta una historia reciente de auge y declive en la producción de hidrocarburos. En el Meta, la caída de la producción posterior a 2014 ha generado efectos socioeconómicos como desempleo y reducción de ingresos fiscales. El sector petrolero ha acumulado un capital técnico considerable (perforación profunda, gestión de riesgos exploratorios, caracterización de yacimientos) que, en principio, podría transferirse al desarrollo geotérmico. Aunque, esta transferencia no es automática. La literatura especializada señala que la ausencia de fondos públicos de riesgo para la exploración, la escasa reconversión laboral, los mecanismos fiscales débiles y la fragmentación institucional actúan como barreras persistentes (Climo & Hill, 2022).

La relevancia de este estudio radica en que aborda un vacío analítico en la literatura colombiana sobre transiciones energéticas. Mientras existen numerosos estudios técnicos sobre el potencial geotérmico del país (Jorquera, 2021; Servicio Geológico Colombiano, 2014), se carece de análisis integrados que examinen la transferencia efectiva de capacidades desde el sector petrolero hacia la geotermia a nivel subnacional, particularmente en territorios afectados por el declive de los hidrocarburos. Esta investigación aporta a la disciplina de la economía de la energía un marco para comprender cómo los instrumentos normativos y fiscales inciden en dicha transferencia, ofreciendo elementos para la formulación de políticas diferenciadas por territorio (Cortés & Arango Londoño, 2017).

El objetivo general de este estudio es analizar cómo los marcos normativos y fiscales (Leyes 1715 de 2014, 2099 de 2021 y Decreto 1598 de 2024) han influido en la transferencia de conocimientos del sector petrolero al geotérmico en Boyacá y Meta entre 2005 y 2025. Los objetivos específicos son identificar las brechas estructurales que limitan dicha transferencia; comparar las trayectorias de Boyacá y Meta en términos de implementación normativa y capacidades instaladas; y proponer ajustes a los instrumentos fiscales y de reconversión laboral para superar las barreras identificadas. La pregunta de investigación que guía el trabajo es: ¿De qué manera las restricciones y los incentivos contenidos en los marcos normativo-fiscales vigentes facilitan o limitan la transferencia de capacidades técnicas, operativas e institucionales desde el sector petrolero hacia el desarrollo de la energía geotérmica en los departamentos de Boyacá y Meta?

El estudio se inscribe en el marco de las transiciones energéticas en economías dependientes de hidrocarburos, en línea con experiencias de países como México, Costa Rica, Chile y Rusia, y se estructura en las siguientes secciones, estado del arte, marco teórico, metodología, resultados, discusión y conclusiones.

ESTADO DEL ARTE

La literatura sobre transiciones energéticas reconoce que el reemplazo tecnológico es insuficiente sin considerar las reconfiguraciones económicas, laborales e institucionales (Shortall et al., 2015). En este marco, la energía geotérmica se destaca por su estabilidad y bajas emisiones, aunque su desarrollo

enfrenta barreras técnicas, altos costos iniciales y marcos regulatorios en consolidación (Barbier, 2002). En países como Colombia, donde la hidroelectricidad domina cerca del 70% de la matriz y los hidrocarburos aportan alrededor del 20%, la geotermia representa una opción para diversificar la generación y reducir la exposición a la variabilidad climática (Trejo et al, 2022). La transferencia de conocimientos desde el sector petrolero hacia la geotermia se identifica como una estrategia potencial para amortiguar riesgos, reducir costos iniciales y atender tensiones socioeconómicas en regiones afectadas por el declive extractivo (Rodríguez Ospina et al, 2019).

Transferencia tecnológica y capacidades intersectoriales

Estudios internacionales documentan la viabilidad de transferir competencias desde la industria de hidrocarburos (perforación profunda, caracterización de yacimientos, manejo de pozos, protocolos de seguridad) hacia el desarrollo geotérmico, lo que permite reducir costos y acelerar la madurez del sector (Augustine & Falkenstein, 2023; Alkhasov et al., 2020). En América Latina se registran experiencias de reutilización de infraestructura en campos maduros (Juliusson & Palsson, 2023) y casos de coproducción como el del campo Las Maracas en Colombia. Sin embargo, la atención académica ha sido desigual; mientras abundan los estudios técnicos, escasean aquellos que examinan la transferencia efectiva de capacidades en escenarios posteriores al declive petrolero, particularmente en lo relacionado con la reconversión laboral (Niño et al., 2023). En Colombia, los análisis se han centrado predominantemente en la viabilidad técnica (Jorquera, 2021; Servicio Geológico Colombiano, 2014), con un vacío en el estudio de la dimensión social de la transición en territorios como Boyacá y Meta (Arnórsson & Stefánsson, 2005).

Economía pública e instrumentos para riesgos exploratorios

Desde la economía pública, el alto riesgo exploratorio y los elevados costos de perforación de la geotermia exigen intervención estatal. Instrumentos como fondos soberanos de riesgo, garantías contractuales, esquemas progresivos de regalías y estructuras tarifarias adecuadas demuestran ser determinantes para atraer inversión privada (Hammock & Young, 2022). Las experiencias internacionales ofrecen contrastes relevantes. En México, la Comisión Federal de Electricidad lidera las etapas iniciales de exploración, asumiendo riesgos que el sector privado evita; en Costa Rica, el ICE cumple un rol similar; en Rusia se combinan esquemas de transferencia tecnológica con subsidios estatales (Ortega-Ramirez & Brand-García, 2024). En Colombia, a pesar de los incentivos establecidos en la Ley 1715 de 2014 y el Decreto 1598 de 2024, la literatura señala una brecha entre el diseño normativo y su efectividad para mitigar el riesgo exploratorio (Martínez-Ruiz et al., 2021). A diferencia de los modelos mexicano o costarricense, el caso colombiano carece de evaluaciones críticas que comparen estos instrumentos con experiencias internacionales en contextos de dependencia de hidrocarburos (Palacio-Villa et al, 2020).

Implementación, coordinación institucional y transición justa

Los proyectos geotérmicos enfrentan desafíos institucionales asociados a la coordinación entre entidades (Ministerio de Minas y Energía, Agencia Nacional de Hidrocarburos, autoridades territoriales), así como a procesos de consulta previa y gestión de conflictos comunitarios. El concepto de transición justa (Zafar & Cutright, 2023; Blanco-Wells, 2019) adquiere relevancia para abordar la reconversión laboral y la equidad territorial. En Colombia, aunque se reconoce el potencial de regiones como Boyacá y Meta, la literatura destaca debilidades persistentes en la coordinación interinstitucional y una limitada integración de programas de reconversión laboral (Bromley & Mongillo, 2024; Lacouture, 2006).

A pesar de que la literatura aborda instrumentos para mitigar el riesgo exploratorio, diseños fiscales para energías renovables y enfoques de transición justa, se carece de análisis integrados que examinen la transferencia de conocimientos del sector petrolero al geotérmico en el contexto colombiano posterior a la caída de la producción desde 2014 (Martínez-Ruiz et al., 2021). Esta ausencia es particularmente visible a nivel subnacional: las diferencias entre Boyacá (mayor avance relativo) y Meta (mayor rezago) permanecen insuficientemente exploradas, al igual que propuestas instrumentales concretas como fondos de riesgo, esquemas de regalías y programas de capacitación con enfoque

territorial (Pacheco et al., 2022). El presente estudio se propone contribuir a llenar este vacío mediante un enfoque interpretativo-crítico que examina los marcos normativos colombianos (Leyes 1715/2014, 2099/2021 y Decreto 1598/2024), identifica las brechas persistentes a pesar de avances recientes (Estrategía Nacional de Geotermia 2025, permiso de exploración en Azufral), y plantea ajustes diferenciados por región (Trejo García et al., 2022).

MARCO TEÓRICO

El marco teórico integra tres corrientes analíticas para examinar la transferencia de conocimientos del sector petrolero al geotérmico; teoría de las transiciones energéticas, teoría de la transferencia intersectorial de capacidades, y economía pública de los instrumentos fiscales, enriquecidas con los enfoques de transición justa y gobernanza institucional desde una perspectiva interpretativa-crítica.

Transiciones energéticas como procesos socio-técnicos

La teoría de las transiciones energéticas propone que el tránsito hacia fuentes renovables no se reduce a un reemplazo tecnológico, sino que constituye un proceso socio-técnico que reconfigura estructuras económicas, laborales e institucionales (Shortall et al., 2015). Esta perspectiva permite analizar las inercias del régimen fósil que obstaculizan la adopción de fuentes renovables como la geotermia. Barbier (2002) señala el valor estabilizador de la geotermia, aunque advierte que su adopción depende de la capacidad de desmontar las estructuras del régimen fósil.

Transferencia intersectorial de conocimientos

La teoría de la transferencia intersectorial de conocimientos postula que el capital técnico acumulado en el sector petrolero puede ser reconfigurado para el desarrollo geotérmico. Alkhasov et al. (2020) y Augustine & Falkenstern (2023) demuestran cómo competencias en perforación profunda, análisis geológico, manejo de pozos y protocolos de seguridad se trasladan con relativa eficacia, reduciendo costos y riesgos iniciales. Esta transferencia opera en tres planos, uno técnico, operativo e institucional. No obstante, Farietta Jiménez (2013) advierte que, sin mecanismos explícitos de reconversión laboral, este potencial se disipa. En Colombia, aunque estudios como los de Jorquera (2021) y el Servicio Geológico Colombiano (2014) confirman el potencial geotérmico en zonas como Paipa-Iza y Apiay, la literatura privilegia el análisis técnico por encima de la articulación con procesos sociales y laborales.

Economía pública del riesgo exploratorio

La economía pública del diseño de instrumentos fiscales aborda el alto riesgo exploratorio de la geotermia, derivado de la incertidumbre geológica y los elevados costos de perforación. Hammock & Young (2022) sostienen que, en estos contextos, la intervención estatal resulta decisiva para compartir riesgos y activar la inversión. Fondos soberanos de riesgo, garantías, regalías progresivas y esquemas tarifarios estables funcionan como mecanismos que convierten la incertidumbre en oportunidad. Los casos de México, Costa Rica y Rusia muestran cómo estos instrumentos generan dinámicas donde el Estado asume el riesgo inicial y el sector privado capitaliza las fases de desarrollo. En contraste, la experiencia colombiana evidencia una brecha persistente; Martínez-Ruiz et al. (2021) señalan que la ausencia de mecanismos robustos limita la viabilidad económica del sector, mientras Farietta Jiménez (2013) indica que la débil captura fiscal prolonga la dependencia de subsidios.

Transición justa y gobernanza institucional

Los enfoques de transición justa y gobernanza institucional introducen una dimensión ética y territorial al análisis. Las transiciones energéticas redistribuyen costos y beneficios. Shortall et al. (2015) y Zafar & Cutright (2023) enfatizan la necesidad de integrar la equidad social, especialmente en regiones donde el declive de las industrias extractivas genera desempleo y fragilidad fiscal. La reconversión laboral constituye un eje central que exige coordinación entre instituciones y participación activa de las comunidades (Blanco-Wells, 2019; Bromley & Mongillo, 2024). Lacouture (2006) añade la importancia de

diseños institucionales sensibles a las particularidades regionales, señalando que Boyacá y Meta no son escenarios intercambiables.

Perspectiva interpretativa-crítica aplicada

Desde una perspectiva interpretativa-crítica, este marco permite analizar la distancia entre la norma y su ejecución. Las Leyes 1715 de 2014 y 2099 de 2021, junto con el Decreto 1598 de 2024, configuran un entramado normativo que reconoce la geotermia como fuente no convencional y establece incentivos y procedimientos. Su implementación indica fisuras; mecanismos de riesgo compartido insuficientes, integración limitada de la reconversión laboral y una coordinación institucional fragmentada (Cardona et al, 2024).

El marco teórico integrado propuesto permite analizar cómo los instrumentos normativos y fiscales inciden en la transferencia de capacidades del sector petrolero al geotérmico. La articulación entre conocimiento acumulado y nuevas demandas, entre intervención estatal y participación privada, y entre eficiencia económica y equidad territorial constituye el núcleo analítico de este estudio (González Ríos, 2024).

METODOLOGÍA

Enfoque y diseño

El estudio adoptó un enfoque cualitativo con diseño exploratorio-descriptivo, inscrito en el paradigma interpretativo-crítico. Este enfoque permitió describir la implementación de los marcos normativos e interpretar las tensiones entre la intención legislativa y la realidad empírica en la transferencia de conocimientos del sector petrolero al geotérmico. El diseño fue no experimental, dado que no se manipularon variables ni se establecieron relaciones causales.

Área de estudio

La investigación se desarrolló en los departamentos de Boyacá y Meta, Colombia. En Boyacá, el estudio se concentró en la zona de Paipa-Iza, donde se identifican manifestaciones hidrotermales y proyectos geotérmicos en fase de exploración. En Meta, el estudio se centró en el sector de Apiay, zona con actividad petrolera histórica y potencial geotérmico asociado a campos maduros. Ambos territorios comparten una historia de potencial geotérmico especialmente Boyacá y el Meta resalta por su actividad por décadas en la producción de hidrocarburos.

Población y muestra

La población del estudio estuvo constituida por dos universos; documentos científicos e institucionales relacionados con geotermia, transferencia de conocimientos y políticas fiscales en Colombia y América Latina; y actores importantes con experiencia en los sectores de hidrocarburos y geotermia.

La muestra se conformó mediante muestreo no probabilístico intencional. Para el componente documental, de un universo inicial de 80 documentos, se seleccionaron 35 fuentes, incluyendo las principales normas (Leyes 1715 de 2014 y 2099 de 2021, Decreto 1598 de 2024), informes técnicos del Servicio Geológico Colombiano y reportes sectoriales recientes. Para el componente empírico, se seleccionaron ocho participantes entre funcionarios públicos, consultores, académicos e ingenieros con experiencia en hidrocarburos y proyectos geotérmicos. La selección se guió por la saturación teórica y la relevancia analítica.

Técnicas de recolección de información

Análisis documental. Las búsquedas se realizaron en las bases de datos Scopus y Google Scholar, utilizando combinaciones de términos vinculados con geotermia, sector petrolero, transferencia de conocimientos, finanzas públicas y transición energética, integrados con referencias geográficas específicas (Colombia, Boyacá, Meta, Paipa, Apiay). Se incorporaron también fuentes institucionales del

Ministerio de Minas y Energía, el Departamento Nacional de Planeación, la Agencia Nacional de Hidrocarburos, el Servicio Geológico Colombiano y la Función Pública. El período analizado abarcó de 2005 a diciembre de 2025. Se incluyeron documentos que abordaban directamente la relación entre geotermia, transferencia de capacidades petroleras y dimensiones normativas o fiscales en Colombia o América Latina. Se excluyeron aquellos sin pertinencia temática, anteriores a 2005, duplicados o con calidad académica limitada.

Entrevistas semiestructuradas. Se realizaron ocho entrevistas en enero de 2026, con una duración de 45 a 60 minutos cada una. Todas las entrevistas fueron grabadas con consentimiento informado de los participantes. La guía de entrevistas se centró en las brechas de implementación normativa, la percepción del riesgo exploratorio, la necesidad de instrumentos como fondos soberanos, los avances en reconversión laboral y las diferencias entre Boyacá y Meta.

El análisis se desarrolló mediante un proceso de codificación temática en tres niveles. Primero, la codificación abierta identificó patrones iniciales. Segundo, la codificación axial estableció relaciones entre categorías y subcategorías. Tercero, la codificación selectiva articuló una narrativa interpretativa crítica. Las categorías centrales de análisis fueron, ausencia de fondos de riesgo, debilidades en reconversión laboral, limitaciones en captura fiscal y fallas de coordinación institucional. La saturación teórica se alcanzó cuando las categorías se consolidaron sin aportar nuevos elementos.

Validez y limitaciones

Para fortalecer la validez, se recurrió a la triangulación en dos dimensiones de métodos (análisis temático combinado con interpretación crítica) y de fuentes (académicas, institucionales, entrevistas). Se mantuvo un diario de investigación que registró las decisiones metodológicas y los ajustes analíticos, junto con revisiones iterativas de las categorías, en línea con prácticas cualitativas consolidadas (Grant et al., 2020). Las transcripciones de las entrevistas fueron codificadas e integradas al esquema analítico general, permitiendo contrastar los discursos institucionales con las experiencias prácticas.

El estudio reconoció las siguientes limitaciones; la dependencia predominante de fuentes secundarias pudo arrastrar sesgos institucionales; el muestreo intencional restringió la generalización de los resultados; y el enfoque territorial concentrado en Boyacá y Meta excluyó otras regiones con dinámicas potencialmente distintas.

RESULTADOS

El análisis de 35 fuentes documentales y ocho entrevistas semiestructuradas permitió identificar los principales hallazgos del estudio. Colombia desarrolló un marco regulatorio para fomentar la geotermia mediante las Leyes 1715 de 2014 y 2099 de 2021, junto con el Decreto 1598 de 2024. Estas normas reconocen la geotermia como fuente de energía renovable no convencional (FNCER), establecen incentivos fiscales (deducciones en renta de hasta el 50%, exenciones de IVA y aranceles), crean el Registro Geotérmico y estructuran procesos para la asignación de permisos y la consulta previa. Sin embargo, la transferencia de conocimientos desde el sector petrolero hacia el geotérmico no mostró avances proporcionales en Boyacá y Meta durante el período 2005-2025.

El análisis permitió identificar cuatro brechas estructurales recurrentes. En primer lugar, se detectó la ausencia de fondos soberanos de riesgo para la fase exploratoria, caracterizada por altos costos e incertidumbre geológica. En segundo lugar, se evidenció la escasa incorporación de programas de reconversión laboral dentro de las políticas públicas, lo que limitó el aprovechamiento del capital humano proveniente del sector petrolero. En tercer lugar, se identificaron mecanismos débiles de captura fiscal que dificultaron la generación de ingresos estables mediante regalías e impuestos. En cuarto lugar, se observó una coordinación interinstitucional limitada entre el Ministerio de Minas y Energía, la Agencia Nacional de

Hidrocarburos y las entidades territoriales, lo que introdujo demoras y fragmentación en la toma de decisiones (Higgins & Uddin, 2024).

Las entrevistas realizadas en enero de 2026 corroboraron estas brechas. En relación con el riesgo exploratorio, los participantes coincidieron en que la incertidumbre geológica y los costos iniciales continúan siendo un obstáculo decisivo para la inversión privada cuando no existe un respaldo estatal claro. La exploración geotérmica se percibió como una actividad de alto riesgo que requiere un acompañamiento público más activo (Sanabria et al, 2014). En cuanto a la reconversión laboral, los entrevistados señalaron la existencia de un acervo considerable de conocimiento técnico acumulado en el sector petrolero, aunque su incorporación al ámbito geotérmico carece de estructuras formales. Ingenieros, técnicos y operarios con experiencia en perforación y manejo de yacimientos permanecen disponibles, pero sin rutas claras de certificación o programas específicos que canalicen sus capacidades. (Moreno Cuartas & López Menéndez, 2008).

Sobre la coordinación institucional, los testimonios indicaron superposición de funciones, falta de claridad en los roles y escasa articulación entre niveles de gobierno. Esta situación retrasó los procesos y generó incertidumbre en los actores privados, quienes enfrentaron un entorno regulatorio percibido como disperso. La comparación entre Boyacá y Meta introdujo un contraste significativo. Boyacá mostró mayor dinamismo, favorecido por su tradición hidrotermal y una disposición institucional más activa, lo que permitió avances relativos y un mayor interés de actores privados. Meta, en cambio, reflejó con mayor intensidad las consecuencias de la caída de la producción de crudo: desempleo, reducción de ingresos fiscales y una transición productiva aún incipiente (Ballesteros-Ballesteros, 2016).

Los entrevistados plantearon propuestas concretas. La creación de un fondo soberano de riesgo para la etapa exploratoria se proyectó como una prioridad compartida. También surgieron iniciativas de formación y certificación en alianza con universidades y empresas del sector petrolero, junto con el fortalecimiento de alianzas público-privadas para mejorar la coordinación institucional y acelerar la implementación de proyectos.

Para precisar la trazabilidad legal y fiscal se presenta la tabla 1:

Tabla 1
Trazabilidad legal-fiscal y evidencia de implementación (2005-2025)

Norma	Instrumentos y evidencia	Brecha / Limitación
Ley 1715/2014	Instrumentos: Clasificación FNCER, deducciones renta hasta 50%, exenciones IVA y aranceles. Evidencia: Clasificación aplicada en proyectos piloto; incentivos vigentes.	Ausencia de mecanismos explícitos para transferencia tecnológica y reconversión laboral.
Ley 2099/2021	Instrumentos: Registro Geotérmico, registro administrativo, asignación de roles. Evidencia: Registro creado; avances en RENAG 2025.	Implementación lenta; no integra reconversión laboral ni fondos de riesgo.
Decreto 1598/2024	Instrumentos: Procesos competitivos, consulta previa, regulación técnico-administrativa. Evidencia: Aplicado en	Coordinación interinstitucional limitada; ausencia de fondos soberanos de riesgo.

Norma	Instrumentos y evidencia	Brecha / Limitación
	RENAG 2025 y permiso Azufra (Ecopetrol, julio 2025).	

Nota. Elaboración propia con base en el análisis de las normativas, SGC y ANH (2022-2025).

Por consiguiente, los documentos analizados mostraron que, desde la perspectiva de las finanzas públicas, la geotermia involucra alto riesgo exploratorio inicial, necesidad de inversión estratégica en infraestructura, potencial de generación de ingresos fiscales a través de regalías e impuestos, oportunidades de ahorro público por menor dependencia de importaciones, acceso a financiamiento internacional y desarrollo regional. No obstante, estas dimensiones se materializaron de forma parcial en Boyacá y Meta durante el período estudiado.

DISCUSIÓN

Los resultados de este estudio permiten establecer una relación causal entre la implementación insuficiente de los marcos normativo-fiscales y la limitada transferencia de conocimientos del sector petrolero al geotérmico en Boyacá y Meta. La ausencia de fondos soberanos de riesgo causa una retracción de la inversión privada en la fase exploratoria. La falta de programas de reconversión laboral causa la subutilización del capital humano disponible. La fragmentación institucional causa demoras e incertidumbre en los actores privados. En conjunto, estas tres causas explican el bajo dinamismo del sector geotérmico en los territorios analizados.

La ausencia de fondos soberanos de riesgo para la fase exploratoria coincide con lo planteado por Hammock & Young (2022), quienes señalan que la geotermia, debido a la incertidumbre geológica y los altos costos de perforación, requiere una intervención estatal firme para volverse atractiva para la inversión privada. La evidencia empírica recogida consolida esta idea; sin un respaldo estatal inicial, el riesgo no se reduce, sino que se evita, y la inversión privada se retrae. Esta situación confirma lo señalado por Martínez-Ruiz et al. (2021) sobre la persistente distancia entre el potencial técnico y la viabilidad económica en el caso colombiano. A diferencia de los modelos de México o Costa Rica, donde el Estado asume el riesgo inicial de exploración, el caso colombiano evidencia un diagnóstico claro del problema, pero una resolución aún insuficiente.

En el plano laboral, las regiones analizadas cuentan con capital humano altamente calificado, formado durante décadas en la industria petrolera. No obstante, la falta de programas estructurados de reconversión laboral impide canalizar estas capacidades hacia el sector geotérmico. Jorquera (2021) y Shortall et al. (2015) advirtieron sobre este riesgo, cuando la transición energética no integra a los trabajadores, el conocimiento acumulado se diluye. Las entrevistas realizadas confirman que técnicos e ingenieros permanecen disponibles, pero sin rutas formales que permitan reorientar su experiencia. De allí la relevancia del enfoque de transición justa (Zafar & Cutright, 2023; Blanco-Wells, 2019), que añade una dimensión ética y constituye una condición práctica para la viabilidad del cambio energético.

La coordinación institucional representa otro punto crítico. Las tensiones entre el Ministerio de Minas y Energía, la Agencia Nacional de Hidrocarburos y las entidades territoriales reflejan un problema señalado por la literatura (Lacouture, 2006; Bromley & Mongillo, 2024); las políticas energéticas tienden a fragmentarse en su ejecución, especialmente a nivel subnacional. Los testimonios recogidos describen funciones superpuestas, decisiones ralentizadas y responsabilidades difusas, lo que genera un entorno de incertidumbre para los actores privados.

La comparación entre Boyacá y Meta introduce un contraste significativo. Boyacá presenta un dinamismo relativo, apoyado en su tradición hidrotermal y en una mayor articulación institucional. Meta, en cambio, refleja con mayor intensidad las consecuencias del declive petrolero: desempleo, fragilidad fiscal y una transición productiva aún incipiente. Este contraste confirma la necesidad de enfoques diferenciados por territorio, tal como señalan Gallego-Torres & Ballesteros-Ballesteros (2021) y los postulados de la transición justa. No todos los territorios transitan al mismo ritmo ni enfrentan las mismas condiciones, lo que exige diseños institucionales sensibles a las particularidades regionales.

El estudio presenta limitaciones. La dependencia de fuentes secundarias introduce la posibilidad de sesgos institucionales. El número de entrevistas (ocho), aunque suficiente para alcanzar saturación teórica, restringe la amplitud de perspectivas. De todas formas, la triangulación de métodos y fuentes aporta solidez a los resultados. Futuras investigaciones podrían ampliar el espectro empírico, incorporar enfoques cuantitativos y explorar con mayor detalle los impactos fiscales de los instrumentos existentes, especialmente en el contexto posterior a 2025.

Las brechas identificadas no son accidentales ni aisladas. Responden a una lógica donde el diseño normativo avanza con mayor rapidez que su implementación, y donde la transición energética se debate entre la intención política y la capacidad institucional. El fortalecimiento de los mecanismos de mitigación de riesgo, la integración de la reconversión laboral y la mejora de la coordinación entre actores constituyen condiciones necesarias para que la geotermia se consolide como un motor de desarrollo regional en Colombia (Yajure Ramírez & Guzman (2017).

CONCLUSIONES

El estudio confirma que los marcos normativos colombianos (Leyes 1715 de 2014, 2099 de 2021 y Decreto 1598 de 2024) presentan un impacto limitado en la transferencia de conocimientos del sector petrolero al geotérmico en Boyacá y Meta entre 2005 y 2025. La pregunta de investigación encuentra una respuesta clara como que las restricciones normativo-fiscales vigentes son insuficientes para activar la transferencia de capacidades técnicas, operativas e institucionales.

Se identifican cuatro brechas estructurales. Primero, la ausencia de fondos soberanos de riesgo para la fase exploratoria desincentiva la inversión privada. Segundo, la falta de programas de reconversión laboral mantiene inactivo el capital humano disponible. Tercero, los mecanismos débiles de captura fiscal dificultan la generación de ingresos estables. Cuarto, la coordinación interinstitucional limitada fragmenta la acción pública. Estas limitaciones prolongan vulnerabilidades socioeconómicas, especialmente visibles en el departamento del Meta.

En cuanto a la comparación territorial, Boyacá muestra mayor dinamismo por su tradición hidrotermal, mientras Meta requiere atención prioritaria por las consecuencias del declive petrolero, como el desempleo y la fragilidad fiscal.

Desde una perspectiva teórica, los hallazgos amplían el enfoque interpretativo-crítico de las transiciones energéticas al integrar la economía pública con la transferencia intersectorial de capacidades en escenarios de caída de producción petrolera.

En términos prácticos, se derivan cuatro líneas de acción. Primero, se requiere la creación de un fondo soberano de riesgo que permita al Estado asumir la incertidumbre inicial de la exploración geotérmica, siguiendo los modelos de México o Costa Rica. Segundo, es necesario diseñar programas de reconversión laboral certificados, en alianza con universidades y empresas del sector petrolero. Tercero, se debe fortalecer la coordinación institucional mediante la definición de roles claros entre el Ministerio de Minas y Energía, la Agencia Nacional de Hidrocarburos y las entidades territoriales. Cuarto, las políticas deben adoptar enfoques diferenciados por territorio.

Sin estos ajustes normativos y fiscales, el potencial geotérmico de Colombia continuará subutilizado. Convertir el legado petrolero en un activo para el futuro energético requiere decisión política, coherencia institucional y capacidad de aprendizaje.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Universidad Americana de Europa (UNAE) por la inclusión de este artículo en su revista y por la oportunidad de presentarlo como ponencia en el Congreso Internacional de la institución. Se extiende un especial agradecimiento a la Dra. Nallely Jacqueline Reyes García, coautora y docente del Doctorado, por su valiosa guía y aportes durante el desarrollo del artículo que se ha derivado de uno de los objetivos específicos del trabajo de grado en curso del Doctorado en Economía.

REFERENCIAS

- Alkhasov, A. B., Alkhasova, D. A., & Ramazanov, A. Sh. (2020). Technologies of geothermal resources development in South of Russia. *Geomech. Geophys. Geo-energy. Geo-resour*, 6(1), 7. <https://doi.org/10.1007/s40948-019-00129-w>
- Arnórsson, S., & Stefánsson, A. (2005). Geothermal energy and economic development: Iceland's experience. *Geothermics*, 34(5), 561-582. <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2005.06.002>
- Augustine, C., & Falkenstern, J. (2023). Economic and environmental benefits of geothermal co-production with oil and gas operations: A case study from the U.S. Gulf Coast. *Geothermics*, 107, 102598. <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2022.102598>
- Ballesteros-Ballesteros, V., (2016). Panorama mundial de las energías renovables e importancia de la energía fotovoltaica. *Revista Científica*, 26(),194-203.[fecha de Consulta 6 de Abril de 2025]. ISSN: 0124-2253. Recuperado de: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=504373193019>
- Barbier, E. (2002). Geothermal energy technology and current status: An overview. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 6(1-2), 3-65. [https://doi.org/10.1016/S1364-0321\(02\)00002-3](https://doi.org/10.1016/S1364-0321(02)00002-3)
- Blanco-Wells, G., (2019). La vida social de la energía: apuntes para el estudio territorializado de las transiciones energéticas. *Sociologías*, 20(51),160-185.[fecha de Consulta 6 de Abril de 2025]. ISSN: 1517-4522. Recuperado de: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=86859715007>
- Bromley, C. J., & Mongillo, M. A. (2024). Geothermal energy as a driver of economic resilience: Technical innovations and employment impacts in high-enthalpy regions. *Renewable Energy*, 233, 121145. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2024.121145>
- Cardona, Daniel, Tamayo, Johnny A., & Eslava-Garzón, Johan S.. (2024). Hacia una matriz energética sostenible en Colombia. Una revisión sistemática de la literatura. *Información tecnológica*, 35(5), 1-16. <https://dx.doi.org/10.4067/S0718-07642024000500001>
- Climo, M., & Hill, L. B. (2022). Sustainability and economic competitiveness of geothermal energy in low-enthalpy settings: A techno-economic model from Australia. *Energy Reports*, 8, 456-467. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2022.01.123>
- Cortés, S., & Arango Londoño, A. (2017). Energías renovables en Colombia: una aproximación desde la economía. *Revista Ciencias Estratégicas*, 25(38),375-390.[fecha de Consulta 6 de Abril de 2025]. ISSN: 1794-8347. Recuperado de: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=151354939007>
- Farietta Jiménez, K., (2013). Políticas públicas en Colombia de generación distribuida en nuevas fuentes energéticas: el caso de la geotermia y las zonas no interconectadas. *Via Inveniendi et Iudicandi*, 8(2), 150-182. Recuperado de: <https://revistas.usantotomas.edu.co/index.php/viei/article/view/1164>

- Gallego-Torres, A., & Ballesteros-Ballesteros, V. (2021). Tecnologías de energías renovables (TER) desde el compromiso público. *Revista Científica*, 42(3),368-377.[fecha de Consulta 6 de Abril de 2025]. ISSN: 0124-2253. Recuperado de: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=504371974010>
- González Ríos, I., (2024). La aplicación del derecho de la Unión Europea sobre transición energética por las comunidades autónomas. *Revista de Estudios de la Administración Local y Autonómica*, (21),55-73.[fecha de Consulta 6 de Abril de 2025]. ISSN: . Recuperado de: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=576477621003>
- Grant, M. A., & Garg, S. K. (2020). Economic viability of geothermal energy in high-enthalpy fields: Lessons from New Zealand for emerging markets. *Energy Policy*, 142, 111543. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2020.111543>
- Hammock, R., & Young, K. R. (2022). Geothermal energy in the circular economy: Economic benefits of repurposing industrial infrastructure for sustainable energy production. *Energy Policy*, 170, 113245. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2022.113245>
- Higgins, B., & Uddin, M. (2024). Geothermal energy from abandoned oil wells: Technical feasibility and economic impacts on job creation and decarbonization. *Applied Energy*, 357, 122456. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2023.122456>
- Jorquera, C. (2021). 3 proyectos piloto de energía geotérmica desarrollados en Colombia. *Think GeoEnergy - Geothermal Energy News*. <https://www.piensageotermia.com/3-proyectos-piloto-de-energia-geotermica-desarrollados-en-colombia/>
- Juliusson, E., & Palsson, H. (2023). Techno-economic optimization of geothermal binary cycles: Implications for competitiveness and employment in emerging markets. *Applied Thermal Engineering*, 235, 121345. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2023.121345>
- Lacouture Daníes, H. M., (2006). Administración regional de los recursos naturales renovables. Corporaciones autónomas regionales. *Revista de Derecho*, (26),307-338.[fecha de Consulta 6 de Abril de 2025]. ISSN: 0121-8697. Recuperado de: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=85102611>
- Martínez-Ruiz, Y., Manotas-Duque, D. F., & Ramírez-Malule, H. (2021). Análisis de opciones reales para la valoración financiera de proyectos de energía geotérmica en Colombia. *Revista CEA*, 7(15), . <https://doi.org/10.22430/24223182.1944>
- Moreno Cuartas, B., & López Menéndez, A. J. (2008). Las energías renovables: Perspectivas e impacto sobre el empleo en Asturias. *Revista de Estudios Regionales*, (83),177-195.[fecha de Consulta 6 de Abril de 2025]. ISSN: 0213-7585. Recuperado de: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=75511145006>
- Niño Villamizar, Y. A., Nieves Plata, M. E., & Cortés Jiménez, C. A. (2023). Desafíos de la transición energética sostenible: perspectivas para la investigación y la gestión. *Revista de la Facultad de Ciencias Económicas: Investigación y Reflexión*, XXXI(2),137-158.[fecha de Consulta 6 de Abril de 2025]. ISSN: 0121-6805. Recuperado de: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=90978510009>
- Ortega-Ramirez, A. T. ., & Brand-García, L. C. . (2024). Tecnologías para el aprovechamiento de energía geotérmica en pozos petroleros. *Fuentes, El reventón energético*, 22(1), 47–60. <https://doi.org/10.18273/revfue.v22n1-2024004>
- Pacheco, Jerónimo Carcelén, & Izquierdo Apolo, Carlos. (2022). Energía geotérmica en Ecuador, condiciones actuales y necesidad de una legislación específica. *Iuris Dictio*, (29), 95-110. <https://doi.org/10.18272/iu.v29i29.2527>
- Palacio-Villa, M. A., Blessent, D., López-Sánchez, J., & Moreno, D. (2020). Sistemas geotérmicos mejorados: revisión y análisis de casos de estudio. *Boletín de Geología*, 42(1), 101-118. <https://doi.org/10.18273/revbol.v42n1-2020006>

- Rodríguez Ospina, G., Alfaro Valero, C., & González Idárraga, C. E. (Eds.). (2019). Geotermia en Colombia. Libros del Servicio Geológico Colombiano. <https://libros.sgc.gov.co/index.php/editorial/catalog/book/46>
- Sanabria A., S. E., Pedraza, P. A., & Hurtado A., E. (2014). El emprendimiento como fuente de desarrollo y fortalecimiento de las capacidades endógenas para el aprovechamiento de las energías renovables. *Revista Escuela de Administración de Negocios*, (77),152-167.[fecha de Consulta 6 de Abril de 2025]. ISSN: 0120-8160. Recuperado de: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=20633274011>
- Servicio Geológico Colombiano. (2014). INVERTEMALES - Inventario Nacional de Manifestaciones Hidrotermales. Retrieved from <https://hidrotermales.sgc.gov.co/invertemales/>
- Shortall, R., Davidsdottir, B., & Axelsson, G. (2015). Geothermal energy for sustainable development: A review of sustainability impacts and assessment frameworks. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 44, 391-406. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.12.020>
- Trejo García, José Carlos, García Ríos, Pedro Emmanuel, & Martínez García, Miguel Ángel. (2022). Inversión en energía geotérmica para uso doméstico en México. *Revista mexicana de economía y finanzas*, 17(4), e782. Epub 05 de abril de 2024. <https://doi.org/10.21919/remef.v17i4.782>
- Yajure Ramírez , C. A., & Guzman, Y. A. (2017). Estudio comparativo de técnicas de toma de decisiones multicriterio para la jerarquización de tecnologías de energías renovables a utilizar en la producción de electricidad.. *Scientia Et Technica*, 22(3),273-280.[fecha de Consulta 6 de Abril de 2025]. ISSN: 0122-1701. Recuperado de: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=84954626007>
- Zafar, S. D., & Cutright, B. L. (2023). Geothermal power in hybrid energy systems: Economic competitiveness and employment potential in emerging economies. *Energy Economics*, 126, 106987. <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2023.106987>