

POTENCIAL DE ENERGIA GEOTERMICA

**CRITERIOS PARA EVALUAR POTENCIAL DE ENERGÍA GEOTÉRMICA EN  
CAMPOS DE HIDROCARBUROS EN CASO DE COLOMBIA.**

Andres Jimenez Mieles

Gonzalo Andrés Camargo Madrid

Trabajo de grado para optar al titulo de Ingeniero de Petroleos

Director

Wilson Raul Carreño Velasco

M.Sc. Diseño Gestión y Dirección de Proyectos.

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingeniería Fisicoquímicas

Escuela de Ingeniería de Petróleos

Bucaramanga

Año 2024

## POTENCIAL DE ENERGIA GEOTERMICA

### **Dedicatoria**

En primer lugar, deseo expresar mi profunda gratitud a Dios, fuente de toda fortaleza y sabiduría, quien ha guiado cada paso en este camino con su infinita bondad. A mi familia, mi roca y fundamento, les agradezco de corazón por su apoyo incondicional, por el amor que me ha sostenido y la comprensión que me ha dado fuerzas en los momentos de dificultad. A mis padres, nini y juan por enseñarme el valor del esfuerzo, por su constante motivación y por ser el ejemplo vivo de dedicación y perseverancia. A mi pareja, un ser excepcional que ha sido mi refugio y mi sostén en los días más desafiantes, le agradezco por cada palabra de aliento y por su amor inquebrantable que me ha impulsado a seguir adelante. A los profesores, especialmente a mi director de tesis, quienes con su sabiduría y guía invaluable han enriquecido este proyecto, les ofrezco mi más sincero agradecimiento. Su dedicación ha sido un faro en mi camino académico. Finalmente, a cada uno de mis compañeros y a todas las personas que me han acompañado en este proceso, quiero expresarles mi más profundo agradecimiento. Su apoyo y aliento han sido fundamentales para alcanzar este logro, y su presencia ha hecho de este viaje una experiencia inolvidable.

*“Alzaré mis ojos a los montes;  
¿De dónde vendrá mi socorro?  
Mi socorro viene de Jehová,  
Que hizo los cielos y la tierra.  
” Salmos 121  
Reina-Valera 1960*

## POTENCIAL DE ENERGIA GEOTERMICA

### **Dedicatoria**

Quisiera dedicar este trabajo en primer lugar a Dios, quien por su infinita misericordia me ha guiado y es quien me ha fortalecido en momentos que me he sentido abandonado, él es quien ha estado para mí siempre, gracias a él todo se ha hecho.

Mis padres Judith y Gonzalo, quienes son los que me han apoyado desde el principio sus consejos su esfuerzo y en especial todo el amor que me han brindado, gracias por todo no tengo más que palabras de agradecimiento hacia ellos, aunque la Universidad Industrial de Santander me den el título de ingeniero ellos son los que se merecen el reconocimiento.

A mis hermanas Judith Milena y Laura Yesenia, también han sido parte importante de este proceso, han sido mi apoyo en todos los ámbitos de mi vida, son importantes, ellas han estado y espero también estar para ellas en lo que pasa esta vida tan efímera.

A mis maestros, excelentes profesionales y más que nada personas confiables a los cuales les debo nada más que gratitud.

A la Universidad Industrial de Santander nada más que buenos sentimientos tengo hacia la Universidad, un sentimiento de gratitud y también de deuda con la universidad.

*“La autodisciplina es fundamental para el progreso  
y el crecimiento personal y espiritual.”  
Russell M Nelson*

## POTENCIAL DE ENERGIA GEOTERMICA

### **Agradecimiento**

Los autores del presente trabajo quieren agradecer a:

M. Sc Wilson Raul Carreño Velasco, director del proyecto, por su tiempo, paciencia y también por sus consejos que nos pudieron orientar sobre el rumbo de este proyecto, que nos llevó a culminar de buena manera este proyecto.

Dra. Zuly Himelda Calderon, evaluadora y también por su constante orientación durante el proyecto

Al Grupo de Investigación De Estabilidad de Pozos GIEP, por brindarnos un espacio tanto en la universidad como en su grupo para poder terminar este proyecto.

## POTENCIAL DE ENERGIA GEOTERMICA

**Contenidos**

|                                |    |
|--------------------------------|----|
| RESUMEN .....                  | 13 |
| ABSTRACT.....                  | 14 |
| INTRODUCCIÓN .....             | 15 |
| 1. OBJETIVOS .....             | 16 |
| 1.1 objetivo General.....      | 16 |
| 1.2 Objetivos Específicos..... | 16 |
| 2. JUSTIFICACIÓN .....         | 17 |
| 3. MARCO TEÓRICO.....          | 18 |
| 3.1 Energía geotérmica .....   | 18 |
| 3.2 Estudios geoquímicos. .... | 19 |
| 3.3 Tipos de campo .....       | 20 |
| 3.4 Sistema de vapor. ....     | 20 |
| 3.5 Sistema de líquido.....    | 21 |
| 3.6 Sistema geotérmico.....    | 21 |

## POTENCIAL DE ENERGIA GEOTERMICA

|       |                                                                             |    |
|-------|-----------------------------------------------------------------------------|----|
| 3.7   | Geotermia en Colombia. ....                                                 | 23 |
| 3.7.1 | Fuente de Calor: .....                                                      | 24 |
| 3.7.2 | Recarga de agua: .....                                                      | 24 |
| 3.7.3 | Reservorio: .....                                                           | 24 |
| 3.7.4 | Cubierta impermeable: .....                                                 | 24 |
| 3.8   | Estudios para la identificación de un campo geotérmico.....                 | 24 |
| 3.8.1 | Datos Geo científicos .....                                                 | 24 |
| 3.8.2 | Estudios geofísicos.....                                                    | 25 |
| 3.9   | Mapa Preliminar de Gradientes Geotérmicos de Colombia .....                 | 25 |
| 3.10  | Geotermia de alta entalpía .....                                            | 28 |
| 3.11  | Geotermia de baja entalpía.....                                             | 29 |
| 4.    | METODOLOGÍA.....                                                            | 30 |
| 5.    | CAPÍTULO 1 CAPACIDAD DE GRADIENTE GEOTÉRMICO EN CAMPOS<br>COLOMBIANOS. .... | 31 |
| 5.1   | Valle Medio del Magdalena:.....                                             | 36 |
| 5.2   | Llanos Orientales: .....                                                    | 39 |
| 5.3   | Valle Superior del Magdalena: .....                                         | 41 |
| 5.4   | Catatumbo .....                                                             | 42 |

## POTENCIAL DE ENERGIA GEOTERMICA

|       |                                                                                                                 |           |
|-------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 5.5   | Caguán - Putumayo.....                                                                                          | 44        |
| 5.6   | Capacidad de Gradiente geotérmico aparente estimado para Colombia. ....                                         | 46        |
| 5.7   | Gradiente geotérmico en campos.....                                                                             | 47        |
| 6.    | <b>CAPÍTULO 2 PARÁMETROS PARA DESARROLLAR DE MANERA ÓPTIMA<br/>ENERGÍA GEOTÉRMICA EN CAMPOS PETROLEROS.....</b> | <b>49</b> |
| 6.1   | Parámetros técnicos: .....                                                                                      | 51        |
| 6.1.1 | Temperatura del yacimiento. ....                                                                                | 51        |
| 6.1.2 | Cantidad de Fluido Geotérmico Disponible .....                                                                  | 53        |
| 6.1.3 | Permeabilidad del yacimiento.....                                                                               | 54        |
| 6.1.4 | Tipo de recurso geotérmico. ....                                                                                | 56        |
| 6.1.5 | Eficiencia Energética y Sostenibilidad .....                                                                    | 58        |
| 6.1.6 | Reducción de Costos.....                                                                                        | 58        |
| 6.1.7 | Adecuación a las Aplicaciones Específicas .....                                                                 | 59        |
| 6.1.8 | Innovaciones y Desafíos Futuros .....                                                                           | 59        |
| 6.1.9 | capacidad de generación .....                                                                                   | 60        |
| 6.2   | Parámetros ambientales: .....                                                                                   | 62        |
| 6.2.1 | Impacto ambiental.....                                                                                          | 62        |
| 6.2.2 | Contaminantes del fluido geotérmico. ....                                                                       | 63        |
| 6.3   | Parámetros económicos .....                                                                                     | 66        |
| 6.3.2 | Factores que Afectan los Costos de Inversión .....                                                              | 66        |

## POTENCIAL DE ENERGIA GEOTERMICA

|       |                                                                                                                 |    |
|-------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 6.3.3 | Costos Operativos .....                                                                                         | 68 |
| 7.    | CAPÍTULO 3 CAMPO ESTUDIO .....                                                                                  | 70 |
| 7.1   | Características Generales del Campo EIP.....                                                                    | 70 |
| 7.2   | Aplicación de parámetros técnicos .....                                                                         | 71 |
| 7.2.1 | Temperatura del Yacimiento: .....                                                                               | 71 |
| 7.2.2 | Flujo Geotérmico y Tasa de Producción:.....                                                                     | 72 |
| 7.2.3 | Eficiencia de Conversión: .....                                                                                 | 73 |
| 7.2.4 | Permeabilidad del Yacimiento .....                                                                              | 75 |
| 7.2.5 | Tipo de recurso geotérmico .....                                                                                | 76 |
| 7.3   | Aplicación de parámetros ambientales. ....                                                                      | 77 |
| 7.3.1 | Impacto ambiental.....                                                                                          | 77 |
| 7.3.2 | Contaminantes del fluido geotérmico .....                                                                       | 80 |
| 7.4   | Aplicación de Parámetros Económicos .....                                                                       | 82 |
| 7.4.1 | Costos de Mantenimiento .....                                                                                   | 82 |
| 7.4.2 | Consumo de Energía en la Bomba.....                                                                             | 82 |
| 7.4.3 | Inversión Inicial .....                                                                                         | 83 |
| 7.4.4 | Análisis de Costos Operativos en el Campo EIP .....                                                             | 83 |
| 7.5   | Diagrama de flujo de criterios para evaluar el potencial de energía geotérmica en campos de hidrocarburos ..... | 86 |

POTENCIAL DE ENERGIA GEOTERMICA

8. CONCLUSIONES ..... 87

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS..... 89

## POTENCIAL DE ENERGIA GEOTERMICA

### Contenido de Figuras

|                                                                                                          |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1 Mapa geotérmico por la ANH 2023 .....                                                           | 27 |
| Figura 2 mapa de gradientes geotérmicos del valle medio del magdalena con sus profundidades.<br>.....    | 37 |
| Figura 3 mapa de temperaturas de los pozos del valle medio del magdalena con sus profundidades.<br>..... | 38 |
| Figura 4 mapa de gradientes geotérmicos de los llanos orientales con sus profundidades. ....             | 39 |
| Figura 5 mapa de temperatura de los pozos llanos orientales con sus profundidades. ....                  | 40 |
| Figura 6 mapa de gradientes geotérmicos del valle superior del magdalena con sus profundidades.<br>..... | 41 |
| Figura 7 mapa de temperaturas de la cuenca del catatumbo con sus profundidades. ....                     | 44 |
| Figura 8 mapa de gradientes geotérmicos del caguan-putumayo con sus profundidades. ....                  | 45 |
| Figura 9 costos totales instalados de plantas de energía geotérmica. ....                                | 69 |
| Figura 10 Comparación de emisiones de CO2 entre proyectos geotérmicos y petroleros. ....                 | 79 |
| Figura 11 Diagrama de flujo.....                                                                         | 86 |

## POTENCIAL DE ENERGIA GEOTERMICA

### Contenido de Tablas

|                                                                                                                                    |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabla 1 Datos de los gradientes geotérmicos en las cuencas de Colombia por la ANH .....                                            | 34 |
| Tabla 2 Tabla de gradientes geotérmicos con sus respectivas profundidades. ....                                                    | 35 |
| Tabla 3 Tabla de las cuencas seleccionadas de la tabla 2 por su gradiente geotérmico. ....                                         | 36 |
| Tabla 4 Tabla de parámetros típicos para estimación del caudal en plantas geotérmicas .....                                        | 54 |
| Tabla 5 Tablas de datos de producción de los 3 pozos perforados .....                                                              | 71 |
| Tabla 6 Tabla comparativa de los datos suministrados por los pozos EIP y otros datos<br>suministrados por campos en el mundo. .... | 74 |
| Tabla 7 Comparación del impacto en la biodiversidad entre proyectos geotérmicos y petroleros.<br>.....                             | 80 |
| Tabla 8 Evaluación financiera .....                                                                                                | 84 |

## POTENCIAL DE ENERGIA GEOTERMICA

### Lista de símbolos y nomenclatura

|        |                                            |
|--------|--------------------------------------------|
| ORC    | Ciclo orgánico de Rankine                  |
| MW     | Mega Watts                                 |
| PPM    | Partes Por Millon                          |
| kg/s   | Kilogramo sobre Segundo                    |
| kJ/kg  | Kilojules sobre Kilogramo                  |
| mW/°Cm | milivattios sobre grados Celcius por metro |
| EGR    | Enhanced Geothermal Systems                |
| EIP    | Escuela de Ingeniería de Petróleos         |
| EIA    | Estudio de Impacto Ambiental               |

## POTENCIAL DE ENERGIA GEOTERMICA

### Resumen

**Título:** Criterios para evaluar potencial de energía geotérmica en campos de hidrocarburo en caso de Colombia

**Autores:** Gonzalo Andrés Camargo Madrid y Andrés Jiménez Mieles.

**Palabras clave:** Energía Geotérmica, Criterios, Eficiencia energética, Gradiente energético

**Descripción:**

Este trabajo aborda el potencial de aprovechamiento de la energía geotérmica en campos petroleros en Colombia. Inicia con una revisión bibliográfica que busca determinar el gradiente geotérmico promedio en el territorio colombiano, con el objetivo de identificar oportunidades de explotación de energía geotérmica en el país. A partir de esta revisión, se establecen y analizan criterios técnicos, ambientales y económicos necesarios para el desarrollo de energía geotérmica en campos petroleros. Estos criterios son formulados tomando en cuenta referencias bibliográficas y estudios previos, adaptándolos a las condiciones y características específicas del contexto colombiano. El desarrollo de la investigación se enfoca en identificar los parámetros más relevantes, tales como la temperatura del yacimiento, la cantidad de flujo geotérmico y la permeabilidad de los yacimientos, así como las implicaciones ambientales y los costos económicos asociados. Estos parámetros son evaluados en un estudio de caso concreto, el Campo EIP, donde se aplican los criterios desarrollados. La evaluación de este campo específico sirve como base para validar los criterios planteados y para demostrar su aplicabilidad en otros campos petroleros del país. Finalmente, se presenta un diagrama de flujo que sintetiza y ejemplifica los criterios necesarios para la implementación de proyectos geotérmicos en campos petroleros, proporcionando una guía visual clara y estructurada para futuros estudios y desarrollos en este ámbito. El trabajo concluye que, bajo condiciones adecuadas, los campos petroleros en Colombia tienen un potencial significativo para el desarrollo de energía geotérmica, contribuyendo a la diversificación de la matriz energética y al avance hacia una mayor sostenibilidad en la industria energética del país.

## POTENCIAL DE ENERGIA GEOTERMICA

### **Abstract:**

**Title:** Criteria to evaluate geothermal energy potential in hydrocarbon fields in the case of Colombia.

**Authors:** Gonzalo Andrés Camargo Madrid and Andrés Jiménez Mieles.

**Keywords:** Geothermal Energy, Criteria, Energy efficiency, Energy gradient

### **Description:**

This thesis explores the potential for geothermal energy development in oil fields in Colombia. It begins with a bibliographic review aimed at determining the average geothermal gradient in the Colombian territory, with the goal of identifying opportunities for geothermal energy exploitation in the country. Based on this review, the study establishes and analyzes the necessary technical, environmental, and economic criteria for developing geothermal energy in oil fields. These criteria are formulated using bibliographic references and previous studies, adapted to the specific conditions and characteristics of the Colombian context. The research focuses on identifying key parameters, such as reservoir temperature, geothermal flow rate, and reservoir permeability, as well as environmental implications and associated economic costs. These parameters are evaluated in a specific case study, the EIP Field, where the developed criteria are applied. The evaluation of this specific field serves as a basis to validate the proposed criteria and demonstrate their applicability to other oil fields in the country. Finally, a flowchart is presented that synthesizes and exemplifies the necessary criteria for implementing geothermal projects in oil fields, providing a clear and structured visual guide for future studies and developments in this area. The study concludes that, under suitable conditions, oil fields in Colombia have significant potential for geothermal energy development, contributing to the diversification of the energy matrix and promoting greater sustainability in the country's energy industry.

## POTENCIAL DE ENERGIA GEOTERMICA

### **Introducción**

El presente proyecto de grado tiene como objetivo llevar a cabo un análisis descriptivo de los criterios esenciales para facilitar la evaluación del potencial y la explotación adecuada y eficiente de los recursos geotérmicos en campos petroleros de Colombia. Se llevará a cabo un estudio que permitirá determinar la viabilidad de implementar energía geotérmica en áreas del país donde dichos recursos, actualmente poco aprovechados, puedan ser utilizados.

Ante el aumento del precio del petróleo y la necesidad de reconsiderar el uso de los recursos energéticos, es crucial identificar una fuente de energía abundante, renovable y de larga duración. Los avances científicos y tecnológicos han facilitado la implementación efectiva de la energía geotérmica en otros países. La energía geotérmica se presenta como una opción renovable con un gran potencial para la generación eléctrica. Sin embargo, no todas las regiones con actividad geotérmica cuentan con las condiciones ideales para su aprovechamiento. Las zonas que cumplen con los criterios mínimos para un uso comercial representan una oportunidad considerable para el desarrollo de esta energía. Los equipos empleados para la generación de electricidad mediante recursos geotérmicos presentan similitudes con aquellos utilizados en la producción de energía a partir de fuentes tradicionales como el carbón y el petróleo.

La energía geotérmica representa un recurso de gran magnitud y destaca por su carácter sostenible y limpio. En consecuencia, su aprovechamiento se presenta como una alternativa viable tanto para los países que disponen de este recurso, como a nivel global, dado el creciente interés por mitigar el cambio climático, reducir la contaminación ambiental y afrontar el aumento de los costos de los combustibles fósiles.

## POTENCIAL DE ENERGIA GEOTERMICA

### 1. Objetivos

#### 1.1 objetivo General

Establecer los criterios necesarios a fin de evaluar el potencial de energía geotérmica en campos de hidrocarburos colombianos, para el aprovechamiento, desarrollo y generación de fuentes de energía renovables.

#### 1.2 Objetivos Específicos

- Interpretar cuál es la capacidad del gradiente geotérmico en los campos de Colombia para generar energía geotérmica.
- Identificar los parámetros necesarios para desarrollar de manera óptima energía geotérmica en campos petroleros.
- Establecer un campo de estudio que cumpla las condiciones, para desarrollar el proceso geotérmico, en campos de hidrocarburos.

## POTENCIAL DE ENERGIA GEOTERMICA

### **2. Justificación**

En la actualidad la necesidad de buscar alternativas que satisfagan las obligaciones energéticas, económicas, ambientales y sociales; se ha convertido en un desafío constante para la industria petróleo a fin de generar e implementar nuevos recursos, impulsando la búsqueda e investigación de alternativas que puedan complacer las necesidades de la industria y del mundo actual, dadas estas circunstancias este proyecto busca establecer criterios para campos de hidrocarburos así facilitando la evaluación de su potencial geotérmico, ampliando el campo de acción de los mismos y abriendo una puerta a la posibilidad de generar energía renovable e ilimitada.

## POTENCIAL DE ENERGIA GEOTERMICA

### 3. Marco teórico

#### 3.1 Energía geotérmica

La energía geotérmica se refiere al calor almacenado en el interior de la Tierra. Este calor proviene de la estructura interna del planeta y de los procesos físicos que ocurren en él. Aunque se considera una fuente prácticamente inagotable en la corteza terrestre, su distribución es desigual, lo que dificulta su explotación en muchas regiones, ya que a menudo se encuentra a grandes profundidades que complican su aprovechamiento industrial (Barbier, 2002).

El planeta Tierra está compuesto por tres capas principales: la corteza, el manto y el núcleo. En el centro de la Tierra, las temperaturas pueden superar los 6,700 °C. Gran parte de esta energía interna se ha conservado desde los primeros años de formación del planeta, aunque parte de ese calor fluye continuamente hacia la superficie, donde eventualmente se disipa en el espacio (Tarbuck & Lutgens, 2005). Este proceso genera un gradiente geotérmico, que es un indicador del potencial geotérmico de un sitio. A nivel global, el valor promedio de este gradiente es de aproximadamente 30 °C por kilómetro, aunque hay zonas donde el gradiente puede ser significativamente mayor. Los recursos geotérmicos se clasifican generalmente en función de la entalpía del yacimiento en recursos de baja, media y alta entalpía. La temperatura es utilizada como parámetro de clasificación debido a su simplicidad; no obstante, esta se mide usualmente en los pozos de exploración o se estima mediante geotermómetros y otras técnicas.

Actualmente, la capacidad geotérmica instalada en todo el mundo alcanza alrededor de 8,500 MW, con países como Estados Unidos (2,700 MW), Filipinas (2,000 MW), Japón (1,000 MW), México (958 MW) e Italia (750 MW) a la cabeza, además de otros países como Francia,

## POTENCIAL DE ENERGIA GEOTERMICA

Nueva Zelanda, Indonesia, Austria, Alemania, Grecia, Portugal y Suecia, entre otros. Para 2007, la capacidad global se estimaba en 9,800 MW, y se proyectó que para el 2010 esta cifra alcanzaría los 12,000 MW. La eficiencia de la generación eléctrica a partir de fluidos geotérmicos es relativamente baja en comparación con las plantas termoeléctricas convencionales, debido a las temperaturas más bajas de los fluidos geotérmicos. Sin embargo, una de sus grandes ventajas radica en la mínima contaminación ambiental, sobre todo en cuanto a las emisiones de gases (Gutierrez, 2009).

### **3.2 Estudios geoquímicos.**

Los estudios geoquímicos comprenden la recolección de muestras de agua y gases provenientes de manifestaciones superficiales, que luego son analizadas para estimar la temperatura en profundidad. Este análisis permite correlacionar la composición química con el potencial geotérmico de la zona. A nivel mundial, se han realizado numerosos estudios geoquímicos e isotópicos en muestras de agua de manantiales y fluidos geotérmicos. Estos estudios han permitido identificar ciertos componentes o la proporción entre ellos como indicadores clave para estimar las temperaturas en yacimientos geotérmicos dominados por líquidos.

Los mejores indicadores son el contenido de sílice y las proporciones de sodio, potasio y calcio. Un contenido de cloruro superior a 50 ppm (partes por millón) en los manantiales sugiere que el sistema es dominado por líquidos, mientras que los manantiales en sistemas dominados por vapor suelen tener menos de 20 ppm de cloruro (Gutierrez, 2009).

## POTENCIAL DE ENERGIA GEOTERMICA

### 3.3 Tipos de campo

Los sistemas geotérmicos se clasifican en dos categorías principales: los sistemas dominados por vapor, también conocidos como campos de vapor seco, y los sistemas dominados por líquidos, o campos de aguas termales.

### 3.4 Sistema de vapor.

Los sistemas dominados por vapor generan vapor que puede estar en estado saturado o ligeramente sobrecalentado, con temperaturas que rondan los 250 °C y presiones que varían entre 3,000 y 3,500 kPa. Estos yacimientos suelen formarse en rocas altamente fracturadas o porosas, y los flujos de los pozos pueden fluctuar desde pequeñas cantidades hasta más de 6.94 kg/s, a profundidades de entre 1,000 y 2,500 metros. El contenido de gases no condensables en el vapor varía de algunas décimas hasta más del 5%. Este contenido puede ser inicialmente alto, pero tiende a disminuir con el tiempo a medida que el recurso es extraído, lo que refleja la acumulación previa de gases en el depósito.

La baja presión hidrostática en estos sistemas indica infiltraciones de agua subterránea selladas. Se cree que estos sistemas surgieron a partir de sistemas dominados por líquidos, cuyos márgenes fríos se sellaron gradualmente debido a la precipitación de minerales disueltos, principalmente sílice. Este proceso permitió la formación de un espacio de vapor por encima de una fase líquida profunda, que probablemente consiste en una salmuera caliente. El vapor se produce debido a una fuente de calor subterránea, posiblemente una intrusión magmática.

Los campos geotérmicos de vapor seco más grandes del mundo se encuentran en Los Géiseres, Estados Unidos, y Larderello, Italia. Otros campos importantes incluyen Matsukawa, en Japón, y Monte Amiata, en Italia. A pesar de las diferencias geográficas, estos depósitos comparten características similares. En Los Géiseres, las rocas del depósito son principalmente volcánicas y

## POTENCIAL DE ENERGIA GEOTERMICA

areniscas graváquicas muy fracturadas. En Larderello, predominan las limonitas y dolomitas permeables, mientras que en Matsukawa, las rocas volcánicas fracturadas son las que forman el depósito (Gutierrez, 2009).

### 3.5 Sistema de líquido.

Los sistemas dominados por líquido se pueden clasificar en dos categorías: aquellos que contienen fluidos de alta entalpía, con valores superiores a 837 kJ/kg, y aquellos que contienen fluidos de baja entalpía, con menos calor. Esta distinción facilita la identificación de fluidos adecuados para la generación de electricidad frente a aquellos más apropiados para otros usos. Los sistemas de alta entalpía incluyen agua con sólidos disueltos en concentraciones que van desde 2,000 ppm hasta 260,000 ppm. Las temperaturas en estos sistemas varían entre los 200 y 388 °C. El cloruro es el anión predominante en los sólidos disueltos, junto con otras cantidades de compuestos (Gutierrez, 2009).

### 3.6 Sistema geotérmico.

Un sistema geotérmico está compuesto por tres elementos principales:

**Fuente de Calor:** Esta fuente de energía puede provenir de intrusiones magmáticas a temperaturas muy elevadas, generalmente superiores a 600 °C, localizadas a profundidades de entre 5 y 10 kilómetros, o de un sistema de baja temperatura, donde predomina el gradiente geotérmico habitual. En ambos casos, el calor interno de la Tierra es aprovechado para extraer energía (Hochstein, 1990).

**Yacimiento:** Un yacimiento geotérmico consiste en un volumen de rocas calientes y permeables, donde los fluidos circulantes extraen el calor acumulado. Estos yacimientos suelen

## POTENCIAL DE ENERGIA GEOTERMICA

estar sellados por capas de rocas impermeables, lo que permite conservar el calor y evitar la pérdida de fluidos. El yacimiento está conectado a una zona de recarga superficial, a través de la cual el agua meteórica puede reponer los fluidos que se pierden por fuentes termales o extracción en pozos (DiPippo, 2012).

**Fluido:** El fluido geotérmico, que es el medio de transferencia de calor, suele ser agua de origen meteórico. Dependiendo de la temperatura y la presión, puede encontrarse en estado líquido o de vapor. Este fluido a menudo contiene elementos químicos disueltos como sulfato, carbonato, sodio, potasio y, en menores proporciones, calcio y magnesio. La presencia de sílice puede llegar hasta los 800 ppm, y compuestos como fluoruro y boro pueden presentar desafíos en la eliminación de fluidos de alta entalpía (Axelsson & Stefansson, 2003). Los pozos en este tipo de yacimiento producen una mezcla de vapor y agua, que puede ser separada a presiones adecuadas para accionar turbinas. El vapor separado suele contener menos del 1% de gases no condensables.

En los sistemas dominados por líquido de baja entalpía, las características del fluido pueden variar más que en los de alta entalpía. En algunos sistemas predomina el anión sulfato, mientras que en otros el carbonato-bicarbonato es el dominante. La salinidad en estos sistemas tiende a ser baja, y algunos de estos fluidos podrían ser considerados potables. El contenido de sílice disuelta es más bajo debido a la menor temperatura, y los elementos tóxicos como el flúor y el boro están presentes en menores concentraciones (Bertani, 2005). Las temperaturas en estos sistemas pueden variar desde unos 10 °C por encima de la temperatura promedio anual, hasta alcanzar los 200 °C.

Ejemplos de sistemas dominados por líquido que actualmente están en explotación incluyen Wairakei (Nueva Zelanda), Cerro Prieto (México), Reikiavik (Islandia), Salton Sea (Estados Unidos), Ahuachapán (El Salvador), Momotombo (Nicaragua), y Otake (Japón), entre otros. De todos estos, el campo de Cerro Prieto, con temperaturas de hasta 380 °C, es el más

## POTENCIAL DE ENERGIA GEOTERMICA

caliente. Una diferencia clave entre los sistemas dominados por líquido y vapor es que los primeros presentan presiones cercanas a las hidrostáticas, en torno a 10 kPa por metro de profundidad. A profundidades entre 1,000 y 2,500 metros, las presiones pueden oscilar entre 10,000 y 25,000 kPa, en contraste con las presiones de entre 3,000 y 3,500 kPa en los sistemas dominados por vapor. Geológicamente, ambos tipos de sistemas suelen ser similares, lo que se demuestra por el hecho de que algunos pozos han producido inicialmente agua caliente y, tras un tiempo, vapor seco (Gutierrez, 2009).

### **3.7 Geotermia en Colombia.**

En Colombia, los estudios relacionados con la geotermia comenzaron con la exploración de los recursos geotérmicos hidrotermales. Con el mismo enfoque, se realizaron investigaciones para el reconocimiento de los recursos geotérmicos del país. En años recientes, se han desarrollado investigaciones orientadas a la creación de un mapa preliminar de gradientes geotérmicos en Colombia, centrado en áreas de interés como el complejo volcánico Cerro, el sistema binacional Tufiño-Chiles-Cerro Negro, el área geotérmica de Paipa y el volcán Azufral. El estudio del flujo de calor terrestre en Colombia ha sido principalmente impulsado por la exploración de hidrocarburos en cuencas sedimentarias específicas.

En 2008, INGEOMINAS y la Agencia Nacional de Hidrocarburos (ANH) trabajaron conjuntamente en la actualización del Mapa Geotérmico de Colombia, complementándolo con nuevos datos y ajustes realizados en 2009. Esta nueva versión del mapa es una etapa intermedia hacia la obtención de un mapa de flujo de calor terrestre, metodología que actualmente está en desarrollo, utilizando como área piloto la Cuenca de Llanos Orientales (Alfaro, 2009).

## POTENCIAL DE ENERGIA GEOTERMICA

Cada sistema geotérmico presenta diferencias respecto a otros, y su formación está condicionada por varios factores fundamentales:

### **3.7.1 Fuente de Calor:**

La fuente de calor suele estar asociada a un cuerpo magmático que alcanza temperaturas de entre 600 y 900 °C. Este cuerpo se encuentra a profundidades menores de 10 kilómetros, desde donde transfiere calor a las rocas circundantes (Castillo & Ramírez, 2018).

### **3.7.2 Recarga de agua:**

El agua proveniente de la superficie, como el agua meteórica, debe infiltrarse en el subsuelo a través de fracturas o rocas permeables, alcanzando una profundidad adecuada para ser calentada (López, 2020).

### **3.7.3 Reservorio:**

El reservorio consiste en un volumen de rocas permeables que se encuentra a una profundidad accesible mediante perforaciones. En este espacio, se almacena agua caliente o vapor, que son los medios a través de los cuales se aprovecha el calor geotérmico (Gómez & Pérez, 2017).

### **3.7.4 Cubierta impermeable:**

Una capa impermeable, como rocas arcillosas o sales provenientes de las fuentes termales, impide el escape de fluidos del sistema geotérmico (Hernández et al., 2019).

## **3.8 Estudios para la identificación de un campo geotérmico**

### **3.8.1 Datos Geo científicos**

La fase inicial para investigar y detectar una zona geotérmica implica la búsqueda de manifestaciones superficiales, tales como manantiales termales, géiseres, fumarolas y pozos de lodo hirviente. Según la magnitud de estas manifestaciones, se realizan estudios geológicos, geofísicos y geoquímicos (Rodríguez, 2021).

## POTENCIAL DE ENERGIA GEOTERMICA

### 3.8.2 Estudios geofísicos.

Los estudios geofísicos incluyen el análisis gravimétrico, magnetométrico, termométrico, sísmico y de resistividad, cuyo objetivo es determinar la estructura de la zona, así como localizar posibles anomalías térmicas y reservorios de agua subterránea (Martínez & Silva, 2022).

### 3.9 Mapa Preliminar de Gradientes Geotérmicos de Colombia

El desarrollo del *Mapa Preliminar de Gradientes Geotérmicos de Colombia* (ver Figura 1) es el resultado de un trabajo conjunto entre el Instituto Colombiano de Geología y Minería (INGEOMINAS) y la Agencia Nacional de Hidrocarburos (ANH). Este proyecto incluyó un exhaustivo análisis y procesamiento de las temperaturas registradas en 4,414 pozos distribuidos a lo largo de las cuencas sedimentarias del país, además del único pozo geotérmico explorado en Colombia, Nereidas-1.

Dado que los flujos de calor terrestre juegan un papel fundamental en la maduración térmica de la materia orgánica, que a su vez da origen a yacimientos de petróleo, gas y carbón, estos flujos están directamente vinculados a los procesos geodinámicos y la composición litológica de la corteza terrestre. Como consecuencia, la elaboración de estudios como este resulta de gran relevancia tanto para la industria petrolera, como para el entendimiento geológico y el crecimiento económico del país (Alfaro, 2009).

Entre los hallazgos más significativos de esta fase del proyecto se incluyen:

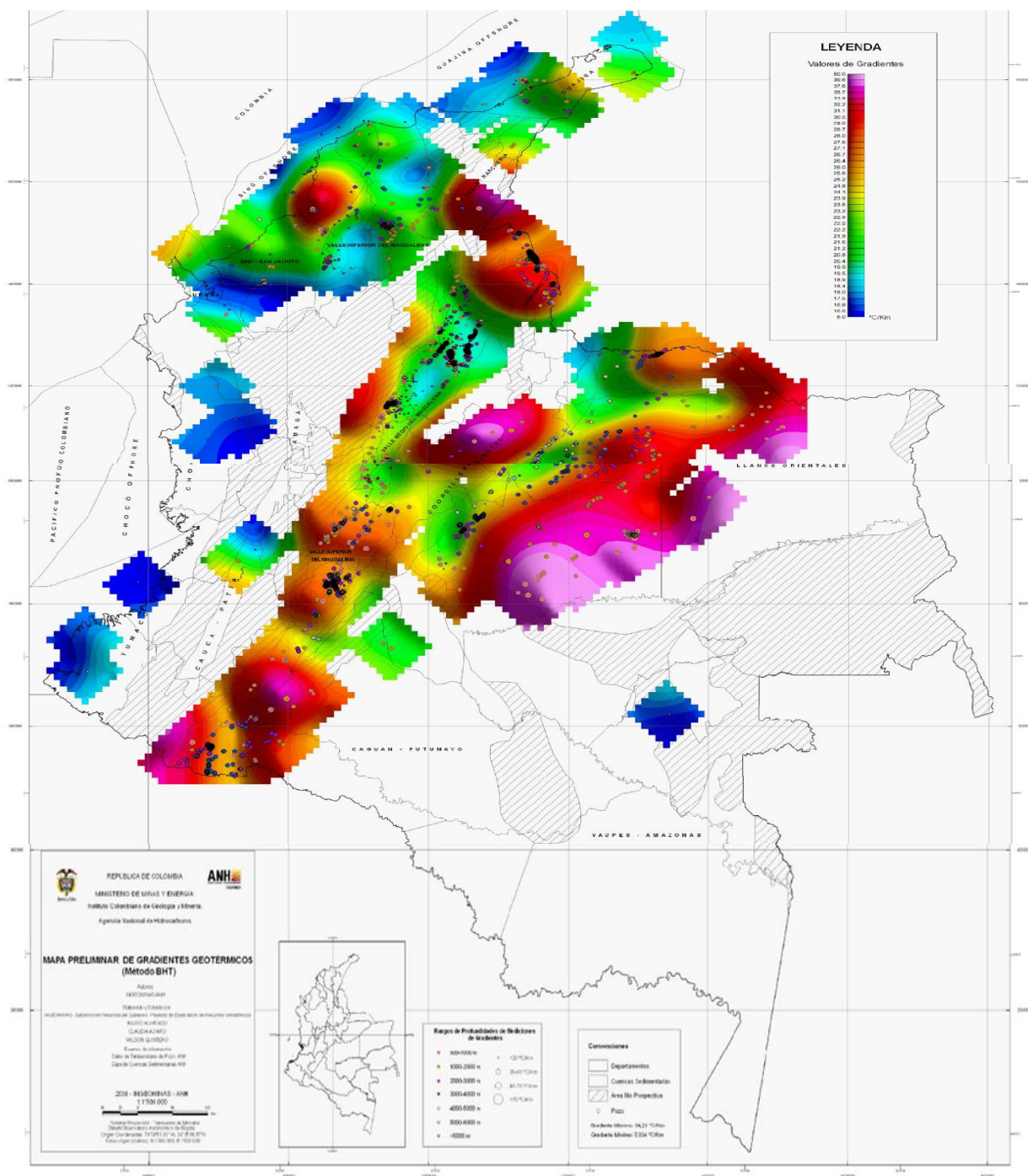
1. La identificación de variaciones verticales en los gradientes geotérmicos en las principales cuencas sedimentarias de Colombia. Se observó que, en términos generales, los valores de los gradientes térmicos y su dispersión tienden a disminuir con la profundidad (Alfaro, 2009).

## POTENCIAL DE ENERGIA GEOTERMICA

2. La detección de cuatro anomalías positivas en el gradiente geotérmico, con valores superiores a  $40^{\circ}\text{C}/\text{km}$ , que cubren aproximadamente el 55% del territorio evaluado. Estas anomalías se encuentran en las cuencas de los Llanos Orientales, la Cordillera Oriental, Caguán-Putumayo y la Cordillera Central (Alfaro, 2009).
3. La identificación de una anomalía geotérmica en la cuenca de los Llanos Orientales cuya magnitud no es coherente con la presencia de un basamento estable, lo que sugiere la necesidad de un análisis más profundo (Alfaro, 2009).
4. La posible existencia de anomalías negativas del gradiente geotérmico, con valores inferiores a  $20^{\circ}\text{C}/\text{km}$ , en las cuencas sedimentarias de la Guajira, Guajira Marino, Sinú-San Jacinto, Valle Inferior del Magdalena, Urabá, Chocó y Tumaco. Sin embargo, debido a la baja densidad de datos en estas regiones, es necesario realizar estudios adicionales (Alfaro, 2009).
5. El registro del gradiente térmico más alto en Colombia, alcanzando aproximadamente  $140^{\circ}\text{C}/\text{km}$  en el pozo geotérmico Nereidas-1, ubicado en el flanco occidental del Nevado del Ruiz (Alfaro, 2009).

POTENCIAL DE ENERGIA GEOTERMICA

Figura 1 Mapa geotérmico por la ANH 2023



Nota: este mapa representa las anomalías geotérmicas de la región de Colombia datos basados en la ANH Poster\_Central\_PDF-Poster-Mapa\_preliminar\_Geotermia (Alfaro, 2009)

## POTENCIAL DE ENERGIA GEOTERMICA

### **3.10 Geotermia de alta entalpía**

La geotermia de alta entalpía se refiere al aprovechamiento de los yacimientos termales que, debido a las elevadas temperaturas y presiones de los fluidos, son óptimos para la generación de electricidad. Este tipo de energía geotérmica es particularmente relevante en lugares donde el gradiente geotérmico es lo suficientemente elevado como para permitir la extracción de vapor o agua a alta temperatura directamente desde el subsuelo.

Un ejemplo destacado de su implementación es el campo geotérmico de Copahue, ubicado en la provincia de Neuquén, Argentina. En este lugar, el 5 de abril de 1988, se puso en funcionamiento una planta piloto que genera electricidad utilizando vapor de agua geotérmico. Esta planta emplea un ciclo binario en el que se utiliza isopentano como fluido de trabajo intermedio, permitiendo así la transferencia de calor del vapor geotérmico al fluido sin necesidad de contacto directo. La planta tiene un diseño portátil, lo que facilita su desmontaje y reubicación. Actualmente, se encuentra instalada sobre el pozo productor de vapor, a dos kilómetros de la localidad de Copahue, cuya perforación original data de 1976 y fue re perforado en 1981, alcanzando una profundidad de 1,415 metros. El reservorio hidrotermal se encuentra entre los 850 y los 1,000 metros de profundidad, produciendo un flujo de vapor saturado de aproximadamente 6,7 toneladas por hora. La central tiene una capacidad nominal de 670 kW y suministra electricidad a la línea Caviahue-Copahue de 13.2 kV, con una extensión de 10 km. Esta línea está conectada a la línea de 33 kV Caviahue-Loncopué, la cual, a su vez, se integra al sistema interconectado provincial de 132 kV (IRENA, 2019).

Este caso no solo es un ejemplo de la viabilidad de la geotermia de alta entalpía para la producción de energía eléctrica en zonas de gran potencial, sino que también resalta la importancia

## POTENCIAL DE ENERGIA GEOTERMICA

de seguir desarrollando tecnologías portátiles y modulares que permitan aprovechar los recursos geotérmicos de manera más flexible y eficiente (Lund & Boyd, 2016).

### **3.11 Geotermia de baja entalpía**

La geotermia de baja entalpía se refiere a la utilización de campos geotérmicos con temperaturas relativamente bajas, cuyo principal uso está relacionado con la calefacción de viviendas, invernaderos y algunos procesos industriales. Aunque este tipo de energía no es adecuado para la generación de electricidad a gran escala debido a las bajas temperaturas, su aplicación en la climatización y otros usos térmicos tiene un gran potencial, especialmente en áreas con abundantes recursos geotérmicos superficiales.

A diferencia de los campos de alta entalpía, los recursos de baja entalpía suelen encontrarse a profundidades menores, lo que facilita su explotación, pero presenta dificultades para medir de manera precisa su potencia térmica debido a la dispersión de la energía y la variabilidad del flujo de calor. A pesar de estas limitaciones, en los mapas geotérmicos de diferentes regiones se pueden observar las potencias estimadas y las áreas de mayor interés para su aplicación.

En el caso de Argentina, se ha identificado un gran potencial geotérmico, concentrado principalmente en la región andina. Según estimaciones iniciales, los recursos de alta entalpía podrían generar un potencial geo-termoeléctrico de al menos 1,000 MW durante un periodo de 30 a 50 años. Por otro lado, los recursos de media y baja entalpía se consideran superiores a la demanda térmica proyectada para el país, lo que sugiere que el desarrollo de estos recursos puede satisfacer ampliamente las necesidades de calefacción y procesos industriales (IRENA, 2019). La evaluación sistemática de estos recursos, especialmente en el caso de los de alta entalpía, es crucial para determinar su viabilidad en términos de producción de energía a costos competitivos con otras fuentes (García et al., 2018).

## POTENCIAL DE ENERGIA GEOTERMICA

### **4. Metodología**

Mediante la búsqueda, aportes, y estudio de información bibliográfica realizar el análisis de datos instaurados, comparación y evaluación, con el cual se busca Interpretar la capacidad del gradiente geotérmico en Colombia bajo condiciones establecidas previamente empleando parámetros e indicadores utilizados a lo largo del desarrollo de la energía geotérmica en el mundo. Al igual que a través del uso de datos Identificar los parámetros que ya están establecidos, al igual que las capacidades en nuevas tecnológicas y económicas requeridas para desarrollar energía geotérmica en campos petroleros. Bajo aportes teóricos de literatura y con sistemas de simulación se puede implementar un campo de estudio el cual cumpla las condiciones necesarias en el cual se pueda evaluar de manera eficiente las condiciones y se pueda desarrollar el proceso geotérmico en campos de hidrocarburos.

## POTENCIAL DE ENERGIA GEOTERMICA

### **5. Capítulo 1 Capacidad De Gradiente Geotérmico En Campos Colombianos.**

Colombia, como nación, se distingue por poseer una amplia y notable diversidad geológica, la cual abarca cuencas sedimentarias de suma relevancia en el desarrollo de las industrias petrolera y minera. Estas cuencas sedimentarias, caracterizadas por ser depresiones geológicas, han sido progresivamente colmadas por sedimentos a lo largo de millones de años, dando origen a una diversidad considerable de rocas sedimentarias y una notable abundancia de recursos naturales.

En Colombia, se encuentran diversas cuencas sedimentarias de destacada relevancia, tales como la cuenca del Magdalena, la cuenca del Valle Superior del Magdalena, la cuenca del Cesar-Ranchería, la cuenca del Llanos Orientales, la cuenca del Sinú-San Jacinto y la cuenca del Putumayo. Cada una de estas cuencas exhibe atributos geológicos y geográficos singulares que han ejercido influencia en su formación, así como en la cantidad y calidad de los valiosos recursos naturales que albergan.

Estas cuencas se distribuyen a lo largo y ancho del territorio colombiano, abarcando desde la región amazónica hasta la zona costera del Caribe. En su seno residen reservas relevantes de petróleo y gas natural, además de una abundancia de carbón y minerales metálicos. No obstante, también albergan un recurso poco convencional: la energía geotérmica. Esta forma de energía puede ser extraída a través del agua de formación presente en los pozos petrolíferos, mediante una técnica innovadora que ofrece un enfoque eficiente y sostenible para aprovechar los recursos energéticos de los yacimientos petroleros. Dicha técnica se fundamenta en la utilización del agua caliente subterránea como fuente de energía renovable.

## POTENCIAL DE ENERGIA GEOTERMICA

El agua de formación es un recurso subterráneo que se encuentra en los yacimientos petrolíferos y que se forma a partir de la mezcla de agua subterránea con el petróleo. Esta agua tiene una temperatura más alta que la del agua subterránea convencional y, por lo tanto, se puede utilizar para generar energía geotérmica.

Este proceso se ejecuta mediante un sofisticado sistema de intercambio térmico que aprovecha el calor del agua para producir vapor, el cual, a su vez, impulsa una turbina generadora de electricidad. Cabe destacar que este proceso se desarrolla en un ciclo cerrado, en el cual el agua caliente, una vez utilizada para generar energía, es devuelta al subsuelo, asegurando así un uso responsable y sostenible de los recursos geotérmicos.

Esta técnica conlleva diversas ventajas en comparación con otras formas de aprovechamiento de la energía geotérmica. En primer lugar, el agua de formación utilizada se encuentra en los yacimientos petrolíferos que ya están en proceso de explotación, lo cual implica que no se requieren esfuerzos adicionales para extraer el agua. Además, al aprovechar la energía geotérmica a partir del agua de formación, se logra aprovechar un recurso que, de lo contrario, sería descartado como residuo, brindando así una oportunidad valiosa para su utilización y evitando su desperdicio.

Otra ventaja destacada de esta técnica radica en que la energía generada puede ser empleada para alimentar los procesos de producción de petróleo, lo cual conlleva una notable reducción en el consumo de energía eléctrica durante la operación de los yacimientos. Esta sinergia resulta en importantes ahorros tanto en términos energéticos como en costos operativos, generando así un impacto positivo en la eficiencia global de la actividad petrolera.

A pesar de las innegables ventajas, la extracción de energía geotérmica a partir del agua de formación en pozos petroleros también conlleva ciertos desafíos. Uno de los principales desafíos

## POTENCIAL DE ENERGIA GEOTERMICA

consiste en garantizar la seguridad y la integridad de los pozos, dado que la extracción de agua caliente puede afectar la estabilidad de las formaciones geológicas y aumentar el riesgo de actividad sísmica. Asimismo, otro desafío se relaciona con los costos asociados a la instalación y operación de los sistemas de intercambio de calor. Aunque la tecnología se encuentra en un estado de desarrollo avanzado, la implementación y operación de estos sistemas puede resultar costosa y requiere una inversión significativa en estudios y en infraestructura.

Un parámetro esencial para evaluar la viabilidad de la extracción de energía geotérmica a partir de un pozo petrolero es el gradiente geotérmico de la zona en la que se encuentra el pozo. Por lo tanto, resulta crucial identificar las áreas que presenten condiciones propicias para la explotación de este recurso, a fin de tomar decisiones fundamentadas y asegurar un aprovechamiento óptimo.

En Colombia, el territorio se encuentra geológicamente dividido en cuencas sedimentarias, las cuales a su vez se subdividen en campos petrolíferos. El gradiente geotérmico de estas cuencas y campos petrolíferos se puede determinar mediante la recopilación de datos obtenidos a través de pruebas realizadas en los pozos, así como mediante estimaciones basadas en simulaciones que consideran la caracterización geológica y los registros superficiales. Por lo tanto, los datos obtenidos se refieren al gradiente geotérmico aparente, el cual es una medida utilizada para estimar la temperatura del subsuelo a partir de mediciones de temperatura en la superficie.

Es importante tener en cuenta que el gradiente geotérmico aparente es una herramienta valiosa para obtener una visión general de la temperatura del subsuelo en áreas donde no se han realizado perforaciones profundas. Sin embargo, es necesario considerar que la precisión de esta medida puede variar significativamente debido a diversos factores. Por lo tanto, se deben realizar

## POTENCIAL DE ENERGIA GEOTERMICA

evaluaciones adicionales y considerar otros datos geológicos y geofísicos para obtener una comprensión más precisa y detallada del gradiente geotérmico en cada área específica.

En la siguiente tabla se pueden apreciar los datos de Gradientes geotérmicos aparentes estimados para cuencas sedimentarias de Colombia.

*Tabla 1*  
*Datos de los gradientes geotérmicos en las cuencas de Colombia por la ANH*

| <b>Cuenca</b>                | <b>No. de Pozos</b> | <b>Gradiente mínimo (°C/Km)</b> | <b>Gradiente máximo (°C/km)</b> | <b>Gradiente promedio (°C/km)</b> | <b>Gradiente &gt;40°C/Km</b> | <b>Porcentaje (%) &gt;40°C/Km</b> | <b>Rango profundidad (m) para mediciones de temperatura</b> |
|------------------------------|---------------------|---------------------------------|---------------------------------|-----------------------------------|------------------------------|-----------------------------------|-------------------------------------------------------------|
| Valle Medio del Magdalena    | 2329                | 6,9                             | 65,4                            | 22,2                              | 17,0                         | 0,7                               | 500-4816                                                    |
| Llanos Orientales            | 861                 | 8,2                             | 59,4                            | 29,8                              | 59,0                         | 6,9                               | 515-6276                                                    |
| Valle Superior del Magdalena | 479                 | 11,2                            | 59,4                            | 27,4                              | 20,0                         | 4,1                               | 516-4019                                                    |
| Catatumbo                    | 398                 | 14,9                            | 54,0                            | 28,1                              | 9,0                          | 2,3                               | 503-3441                                                    |
| Caguán - Putumayo            | 194                 | 5,0                             | 64,6                            | 29,9                              | 4,0                          | 2,1                               | 530-3702                                                    |
| Valle Inferior del Magdalena | 137                 | 9,5                             | 31,4                            | 22,4                              |                              |                                   | 705-4267                                                    |
| Cordillera Oriental          | 113                 | 13,5                            | 53,2                            | 26,6                              | 6,0                          | 5,3                               | 568-5823                                                    |
| Sinú - San Jacinto           | 54                  | 14,4                            | 60,5                            | 26,9                              | 2,0                          | 3,7                               | 518-3967                                                    |
| Guajira                      | 17                  | 15,2                            | 24,3                            | 20,9                              |                              |                                   | 1212-2961                                                   |
| Area no prospectiva (ANP)    | 7                   | 16,2                            | 139,6                           |                                   |                              |                                   | 759-5239                                                    |
| Cesar Ranchería              | 6                   | 22,7                            | 43,7                            | 28,0                              |                              |                                   | 565-3371                                                    |
| Chocó                        | 4                   | 14,0                            | 18,2                            | 16,6                              |                              |                                   | 1982-4734                                                   |
| Urabá                        | 3                   | 14,4                            | 25,4                            | 18,2                              |                              |                                   | 616-3688                                                    |
| Cauca-Patía                  | 2                   | 15,0                            | 25,0                            |                                   |                              |                                   | 1532-3091                                                   |
| Tumaco                       | 2                   | 15,1                            | 18,4                            |                                   |                              |                                   | 2374-4355                                                   |

*Nota: Esta tabla explica de manera detallada los datos de los gradientes geotérmicos en cada una de las cuencas de la cual se tienen información por la ANH y se tomó esta información del Mapa preliminar de gradientes geotérmicos de Colombia.*

## POTENCIAL DE ENERGIA GEOTERMICA

A través del examen de la tabla 1 provista, se nos brinda la oportunidad de contemplar una serie de datos que nos permite extraer apreciaciones acerca de la capacidad del gradiente geotérmico en las distintas cuencas de Colombia. Será posible clasificar, de manera destacada mediante tonos intensos, aquellas zonas en las que se vislumbra un gradiente de temperatura propicio y aprovechable.

*Tabla 2*  
*Tabla de gradientes geotérmicos con sus respectivas profundidades.*

| <b>Cuenca</b>                            | <b>Gradiente mínimo (°C/Km)</b> | <b>Gradiente máximo (°C/km)</b> | <b>Gradiente promedio (°C/km)</b> | <b>profundidad (m) para mediciones de temperatura</b> |
|------------------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|-----------------------------------|-------------------------------------------------------|
| Valle Medio del Magdalena.               | 6,9                             | 65,4                            | 22,2                              | -4316                                                 |
| Llanos Orientales.                       | 8,2                             | 59,4                            | 29,8                              | -5761                                                 |
| Valle Superior del Magdalena.            | 11,2                            | 59,4                            | 27,4                              | -3503                                                 |
| Catatumbo.                               | 14,9                            | 54,0                            | 28,1                              | -2938                                                 |
| Caguán - Putumayo.                       | 5,0                             | 64,6                            | 29,9                              | -3172                                                 |
| Valle Inferior del Magdalena.            | 9,5                             | 31,4                            | 22,4                              | -3562                                                 |
| Cordillera Oriental.                     | 13,5                            | 53,2                            | 26,6                              | -5255                                                 |
| Sinú - San Jacinto.                      | 14,4                            | 60,5                            | 26,9                              | -3449                                                 |
| Guajira.                                 | 15,2                            | 24,3                            | 20,9                              | -1749                                                 |
| Area no prospectiva (ANP) <sup>(1)</sup> | -                               | -                               |                                   | -4480                                                 |
| Cesar Ranchería.                         | 22,7                            | 43,7                            | 28,0                              | -2806                                                 |
| Chocó.                                   | 14,0                            | 18,2                            | 16,6                              | -2752                                                 |
| Urabá.                                   | 14,4                            | 25,4                            | 18,2                              | -3072                                                 |
| Cauca-Patía.                             | 15,0                            | 25,0                            |                                   | -1559                                                 |
| Tumaco.                                  | 15,1                            | 18,4                            |                                   | -1981                                                 |

*Nota: Tabla adaptada del mapa preliminar de gradientes geotérmicos de Colombia.*

Con el objetivo de realizar una estimación de las zonas con potencial geotérmico, se han considerado los gradientes de temperatura más altos, teniendo en cuenta el número de pozos

## POTENCIAL DE ENERGIA GEOTERMICA

datados y los rangos de profundidad. Bajo estas condiciones, se han seleccionado cinco cuencas que presentan gradientes anómalos superiores a 40°C.

Sin embargo, se han descartado aquellas zonas que se consideran no prospectivas debido a la presencia de anomalías negativas, es decir, gradientes geotérmicos inferiores a 20°C por kilómetro. Estas anomalías negativas se han observado en las cuencas sedimentarias de Guajira, Sinú-San Jacinto, Valle Inferior del Magdalena, Urabá, Chocó y Tumaco.

*Tabla 3*  
*Tabla de las cuencas seleccionadas de la tabla 2 por su gradiente geotérmico.*

| <b>Cuenca</b>                | <b>Gradiente mínimo (°C/Km)</b> | <b>Gradiente máximo (°C/km)</b> | <b>Gradiente promedio (°C/km)</b> |
|------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|-----------------------------------|
| Valle Medio del Magdalena    | 6,9                             | 65,4                            | 22,2                              |
| Llanos Orientales            | 8,2                             | 59,4                            | 29,8                              |
| Valle Superior del Magdalena | 11,2                            | 59,4                            | 27,4                              |
| Catatumbo                    | 14,9                            | 54,0                            | 28,1                              |
| Caguan - Putumayo            | 5,0                             | 64,6                            | 29,9                              |

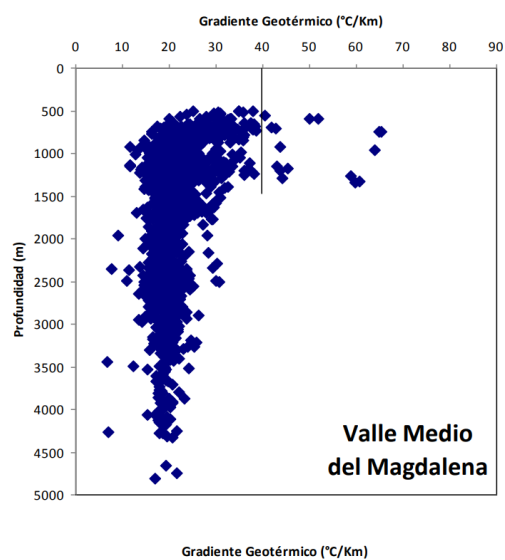
*Nota: adaptado del mapa preliminar de gradientes geotérmicos de Colombia.*

### **5.1 Valle Medio del Magdalena:**

En la cuenca se tomaron datos de temperatura en 2329 pozos, permitiendo una representación en la siguiente gráfica de gráficas de gradiente geotérmico y temperatura evaluado respecto a la profundidad.

## POTENCIAL DE ENERGIA GEOTERMICA

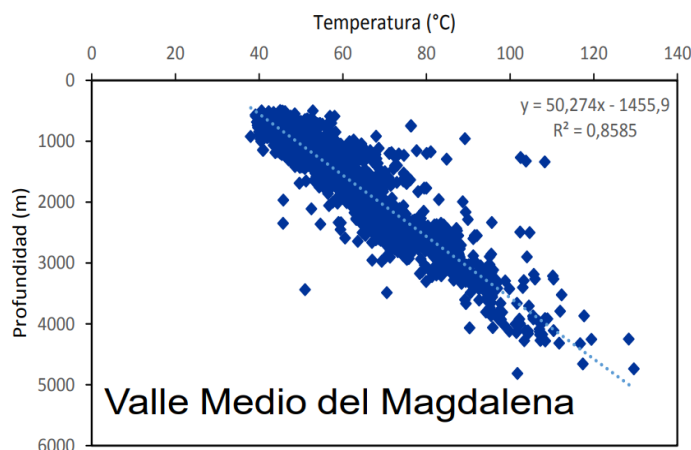
*Figura 2 mapa de gradientes geotérmicos del valle medio del magdalena con sus profundidades.*



*Nota: Mapa de pozos con sus respectivas profundidades y su gradiente geotérmico fuente mapa preliminar de gradientes geotérmicos de Colombia.*

## POTENCIAL DE ENERGIA GEOTERMICA

*Figura 3 mapa de temperaturas de los pozos del valle medio del magdalena con sus profundidades.*



*Nota: Mapa de la temperatura de cada pozo con sus respectivas profundidades fuente mapa preliminar de gradientes geotérmicos de Colombia.*

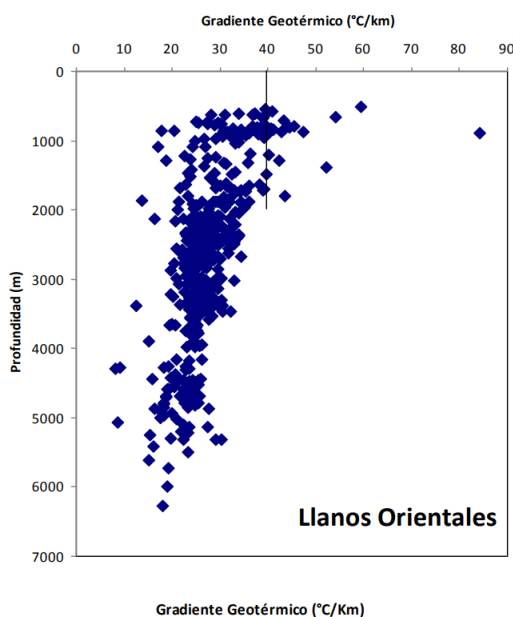
En la esta imagen, se muestra una tendencia clara de disminución en la magnitud del gradiente geotérmico a medida que aumenta la profundidad, lo que indica que los gradientes anómalos se concentran principalmente en niveles más superficiales. Sin embargo, la cuenca registra el valor más alto de gradiente térmico, alcanzando 65.4 °C/km, con un promedio de 22.2 °C/km. La figura 3 ilustra que en profundidades de entre 1,000 y 5,000 metros se presentan temperaturas que podrían ser aprovechadas, lo que convierte a esta cuenca en una de las más prometedoras en términos de gradiente geotérmico. La Cuenca Valle Medio del Magdalena, siendo la más explorada de Colombia, continúa destacando por su productividad, con 51 campos petroleros donde el gradiente geotérmico es adecuado para su utilización.

## POTENCIAL DE ENERGIA GEOTERMICA

### 5.2 Llanos Orientales:

En la cuenca de los llanos se registraron datos de temperatura de 861 pozos de de 1730 que hay perforados aproximadamente, es decir que los datos presentes en las tablas hacen representación de menos del 50% por lo tanto no se puede decir que todos los campos de la cuenca son de alto potencial, sin embargo, cierta cantidad de campos tienen un potencial de gradiente geotérmico favorable para el aprovechamiento, siendo evidente en las siguientes gráficas.

*Figura 4 mapa de gradientes geotérmicos de los llanos orientales con sus profundidades.*



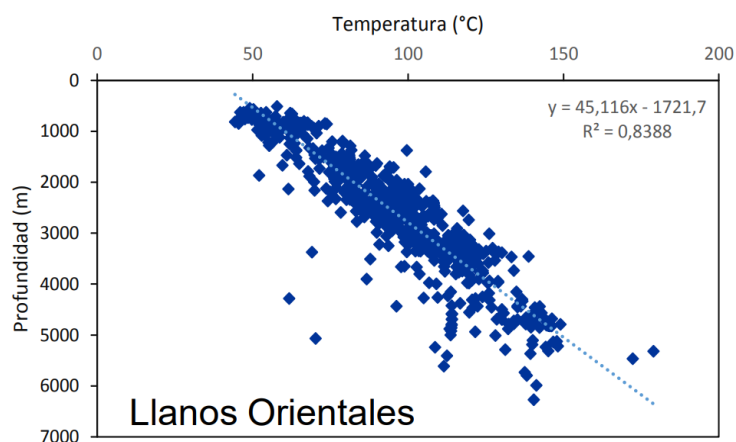
*Nota: Mapa de pozos de los llanos orientales con sus respectivas profundidades y su gradiente geotérmico fuente mapa preliminar de gradientes geotérmicos de Colombia.*

Los datos representados en la figura 4 evidencian una tendencia clara de disminución en la magnitud del gradiente geotérmico conforme aumenta la profundidad. Esto sugiere que las anomalías en los gradientes son más comunes en niveles superficiales, sin embargo la cuenca tiene registros favorables con valores de gradiente geotérmico promedio de 29-30 °c/km ya que El

## POTENCIAL DE ENERGIA GEOTERMICA

gradiente geotérmico necesario para explotar energía geotérmica puede variar dependiendo de varios factores, como la profundidad y la temperatura del yacimiento geotérmico en cuestión, así como las tecnologías disponibles para la explotación no obstante en general, se considera que un gradiente geotérmico de al menos 25 °C por kilómetro es necesario para la explotación comercial de la energía geotérmica.

*Figura 5 mapa de temperatura de los pozos llanos orientales con sus profundidades.*



*Nota: Mapa de la temperatura de cada pozo con sus respectivas profundidades fuente mapa preliminar de gradientes geotérmicos de Colombia.*

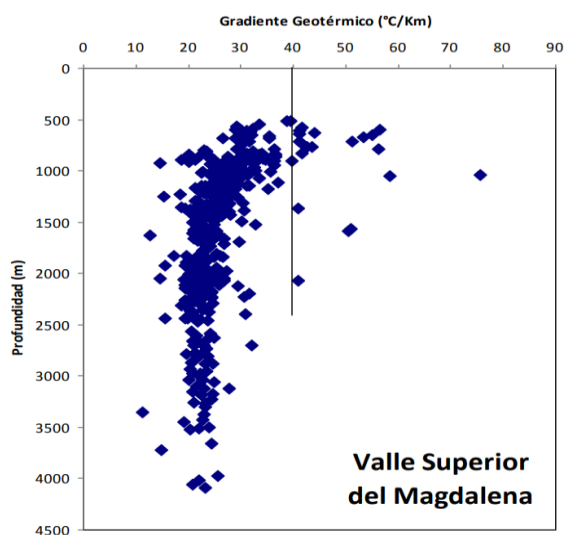
La cuenca de los llanos orientales se llega alcanzar temperaturas de hasta 170°C, convirtiendo los 89 campos petroleros en posibles prospectos para aprovechamiento de aguas de formación en los pozos petrolíferos.

## POTENCIAL DE ENERGIA GEOTERMICA

### 5.3 Valle Superior del Magdalena:

La cuenca alberga un total de 38 yacimientos petrolíferos, los cuales han sido sometidos a pruebas de temperatura en 479 pozos. Dichos análisis han revelado una notable similitud en el gradiente geotérmico con la cuenca de los llanos orientales, evidenciando así la presencia de áreas anómalas en cuanto a los gradientes se refiere.

*Figura 6 mapa de gradientes geotérmicos del valle superior del magdalena con sus profundidades.*

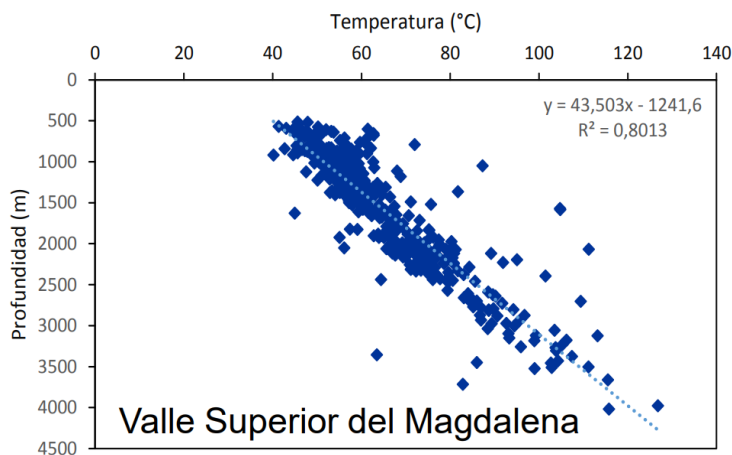


*Nota: Mapa de pozos del valle superior del magdalena con sus respectivas profundidades y su gradiente geotérmico fuente mapa preliminar de gradientes geotérmicos de Colombia.*

En la figura 6 se puede identificar claramente los gradientes anómalos mayores a 40 °C/km esto en zonas someras entre los 500 y 1500 metros.

## POTENCIAL DE ENERGIA GEOTERMICA

**Figura 7** mapa de temperatura de los pozos llanos orientales con sus profundidades.



Nota: Mapa de la temperatura de cada pozo con sus respectivas profundidades fuente mapa preliminar de gradientes geotérmicos de Colombia.

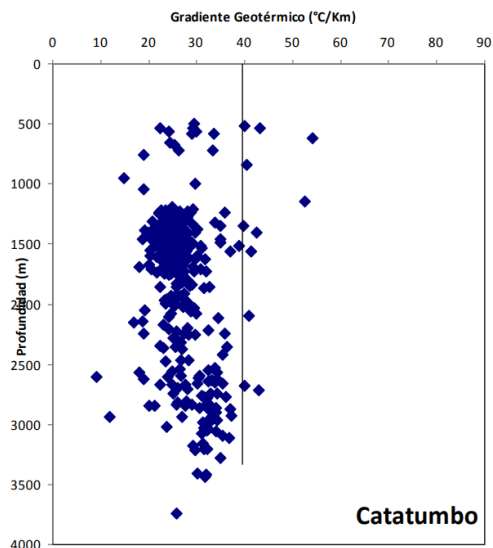
En la figura 7, se aprecia la existencia de elevadas temperaturas en la cuenca, superando el umbral de temperatura óptima a partir de los 1500 metros de profundidad. Al analizar los campos de la región en conjunto, se puede observar una capacidad de gradiente favorable para su aprovechamiento, con un valor máximo registrado de 59,4 °C por kilómetro, igualando la cifra registrada en la cuenca de los llanos orientales. Además, se constata un promedio de gradiente de 27,4 °C por kilómetro.

### 5.4 Catatumbo

La cuenca del Catatumbo alberga diversos campos petrolíferos, como Río de Oro, Socuavó, Carbonera, Sardinata, Río Zulia, Petrolera y Puerto Barco, entre otros. Se realizaron mediciones de temperatura en 398 pozos de esta región con el objetivo de obtener un valor aparente del gradiente geotérmico.

## POTENCIAL DE ENERGIA GEOTERMICA

**Figura 8** Mapa de gradientes geotérmicos del Catatumbo con sus profundidades.

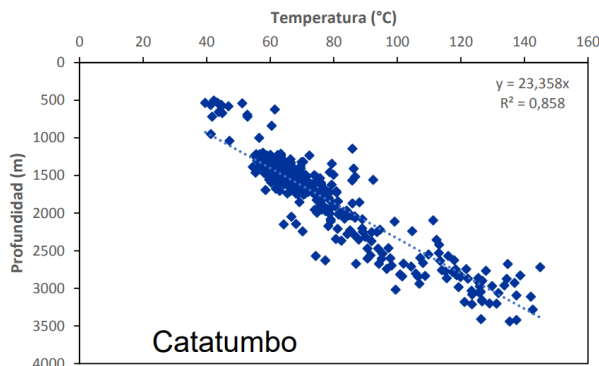


*Nota: Mapa de pozos del valle superior del Magdalena con sus respectivas profundidades y su gradiente geotérmico fuente mapa preliminar de gradientes geotérmicos de Colombia.*

En la figura 8 se puede apreciar una diferencia notable en comparación con las otras cuencas evaluadas. En esta cuenca en particular, se observa una dispersión de valores en profundidades considerables, lo que indica la presencia de gradientes geotérmicos anómalos a partir de la línea vertical que marca los 40°C/km. Estos gradientes anómalos se hacen más evidentes a mayor profundidad en esta cuenca.

## POTENCIAL DE ENERGIA GEOTERMICA

*Figura 7 mapa de temperaturas de la cuenca del catatumbo con sus profundidades.*



Nota: Mapa de la temperatura de cada pozo con sus respectivas profundidades fuente mapa preliminar de gradientes geotérmicos de Colombia.

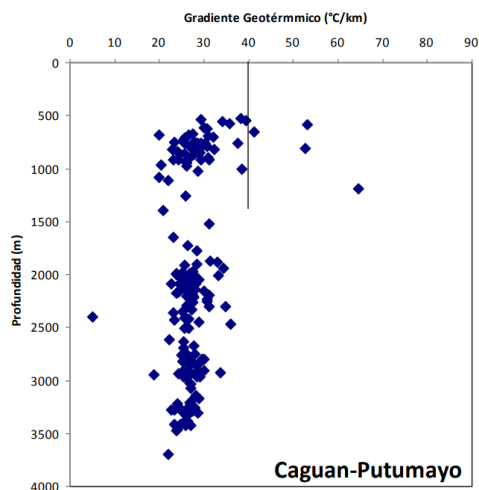
Considerando la información proporcionada en la figura 9, se puede observar que los datos indican la presencia de temperaturas elevadas en relación con la profundidad en la zona del Catatumbo. En consecuencia, se determina que esta región cuenta con gradientes promedio de 28,1 °C por kilómetro.

### 5.5 Caguán - Putumayo

La Cuenca Caguán-Putumayo tiene una extensión de 110304 km<sup>2</sup>, ubicada en el suroeste de Colombia. Esta zona se encuentra directamente vinculada con el potencial aprovechamiento geotérmico debido a su cercanía con áreas de actividad volcánica. Además, la cuenca alberga más de 30 campos petrolíferos que presentan perspectivas favorables para el aprovechamiento geotérmico. En el análisis de esta cuenca, se tuvieron en cuenta los registros de temperatura obtenidos de 194 pozos.

## POTENCIAL DE ENERGIA GEOTERMICA

*Figura 8 mapa de gradientes geotérmicos del caguan-putumayo con sus profundidades.*



*Nota: Mapa de pozos del valle superior del Magdalena con sus respectivas profundidades y su gradiente geotérmico fuente mapa preliminar de gradientes geotérmicos de Colombia.*

La figura muestra claramente una variación en el gradiente geotérmico en relación con la temperatura en las capas poco profundas de la cuenca. Específicamente, se observa que entre los 500 y 1000 metros de profundidad se presentan anomalías significativas en los registros de temperatura. Estos datos revelan un promedio aparente de gradiente geotérmico de 29,9 °C por kilómetro, lo cual es considerablemente alto en comparación con los valores registrados en las otras cuencas analizadas. Esta información indica que en estas zonas someras de la cuenca existe un potencial geotérmico destacado, lo cual puede ser aprovechado.

## POTENCIAL DE ENERGIA GEOTERMICA

### **5.6 Capacidad de Gradiente geotérmico aparente estimado para Colombia.**

Es importante tener en cuenta que la capacidad de gradiente geotérmico puede variar considerablemente de una región a otra, y por lo tanto no se puede establecer una capacidad general exacta para todo el país. En este sentido, se han identificado cinco áreas prospectivas en las cuales se realizarán evaluaciones más detalladas, asumiendo condiciones similares, con el fin de obtener un promedio de gradiente geotérmico aparente más representativo a nivel general. Estas evaluaciones permitirán tener una mejor comprensión de la capacidad de gradiente geotérmico en cada una de estas áreas y determinar su potencial para la generación de energía geotérmica.

Los datos obtenidos corresponden a los registros presentados en la tabla 3, donde se realizaron promedios de los datos de las cinco cuencas evaluadas. Estos cálculos arrojaron una capacidad de gradiente geotérmico mínima de  $9,24\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{km}$ , un gradiente promedio de  $27,5\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{km}$  y un gradiente geotérmico máximo de  $60,6\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{km}$ . Estas cifras representan indicadores significativos de la variabilidad y potencial geotérmico del país.

Considerando la temperatura óptima requerida para el aprovechamiento geotérmico, que se establece en  $74\text{ }^{\circ}\text{C}$ , y utilizando el gradiente geotérmico promedio de  $27,5\text{ }^{\circ}\text{C}$  por kilómetro como referencia, se puede inferir que en los campos petroleros se podría alcanzar una temperatura adecuada para su aprovechamiento a una profundidad de aproximadamente 2700 metros o 8800 pies.

Sin embargo, en el escenario más favorable, donde se considera el gradiente geotérmico máximo registrado de  $60,6\text{ }^{\circ}\text{C}$  por kilómetro, se podría encontrar una temperatura aprovechable a una profundidad de alrededor de 1200 metros o 4000 pies.

Es importante destacar que estas estimaciones se basan en cálculos teóricos y promedios, y que la variabilidad geológica y las condiciones específicas de cada campo petrolero pueden

## POTENCIAL DE ENERGIA GEOTERMICA

influir en la temperatura real alcanzada en el subsuelo. Por lo tanto, es necesario realizar evaluaciones y mediciones directas en cada sitio para obtener una estimación más precisa de la temperatura aprovechable.

### 5.7 Gradiente geotérmico en campos.

La selección de cuencas sedimentarias con un gradiente geotérmico adecuado para su aprovechamiento no puede considerarse únicamente como un parámetro generalizado, ya que no se pueden obtener las mismas condiciones en todas las zonas de la cuenca. Es necesario llevar a cabo una evaluación directa del gradiente geotérmico en la zona específica que se pretende aprovechar, Resulta indispensable determinar la temperatura de la formación mediante una comparación con el gradiente geotérmico teórico de la cuenca. Esta comparativa permitirá obtener una estimación precisa de la temperatura a la cual se encuentra la formación en cuestión. obtenida bajo la expresión:

$$tf = ((tm - ts/pm) * pf) + ts$$

donde:

tf: Temperatura estimada en la formación geológica en el punto de interés.

tm: Temperatura en el punto de interés.

ts: Temperatura en la superficie.

pm: Profundidad del punto de interés.

pf: Profundidad desde la superficie hasta la formación geológica del punto de interés.

con la temperatura de formación y obteniendo un gradiente geotérmico de la zona con la expresión:

## POTENCIAL DE ENERGIA GEOTERMICA

$$Gg = tm - ts/pm$$

en donde se representa el cálculo del gradiente geotérmico utilizando las variables siguientes:

gg: Gradiente geotérmico.

tm: Temperatura en el punto de interés.

ts: Temperatura en la superficie.

pm: Profundidad del punto de interés.

Una vez recopilados los datos de temperatura, tanto del gradiente geotérmico como de la temperatura de formación, se procede a realizar una comparación con los valores teóricos correspondientes. Esta comparación permitirá evaluar la viabilidad del gradiente geotérmico en el campo en cuestión, determinando si cumple con las condiciones mínimas establecidas para ser considerado como un gradiente geotérmico viable.

## POTENCIAL DE ENERGIA GEOTERMICA

### **6. Capítulo 2 Parámetros Para Desarrollar De Manera Óptima Energía Geotérmica En Campos Petroleros**

La implementación de energía geotérmica en los campos petroleros de Colombia no solo representa una oportunidad para diversificar la matriz energética nacional, sino que también podría ser un paso crucial hacia la reducción de la dependencia del país de los combustibles fósiles. Este enfoque estratégico no solo impulsaría la sostenibilidad ambiental, sino que también podría fortalecer la seguridad energética y fomentar el desarrollo económico a largo plazo. Sin embargo, para llevar a cabo esta transición de manera efectiva y óptima, es imperativo considerar una serie de factores clave que abarcan aspectos técnicos, económicos y ambientales.

Desde una perspectiva técnica, es fundamental realizar un análisis exhaustivo del potencial geotérmico en los campos petroleros específicos. Esto implica la evaluación de la temperatura y la permeabilidad del subsuelo, así como la identificación de posibles reservorios geotérmicos que puedan ser aprovechados de manera eficiente y rentable. Además, se requiere una cuidadosa planificación de la infraestructura necesaria, aprovechando al máximo los activos existentes en los campos petroleros, como pozos de perforación y sistemas de recolección de fluidos.

Desde el punto de vista económico, es crucial realizar un análisis detallado de los costos de inversión y operación asociados con el desarrollo de proyectos geotérmicos. Esto incluye la evaluación de los incentivos gubernamentales disponibles, así como la identificación de posibles fuentes de financiamiento, como préstamos bancarios o inversores privados. Además, se deben

## POTENCIAL DE ENERGIA GEOTERMICA

considerar los costos de mantenimiento a largo plazo y la rentabilidad esperada del proyecto para garantizar su viabilidad económica a largo plazo.

En cuanto al aspecto ambiental, es necesario llevar a cabo una evaluación completa del impacto ambiental del proyecto geotérmico propuesto. Esto implica considerar el posible riesgo de contaminación del agua y del suelo, así como el impacto en la biodiversidad y los ecosistemas locales. Se deben implementar medidas de mitigación adecuadas y cumplir con las regulaciones ambientales vigentes para garantizar que el proyecto se desarrolle de manera sostenible y responsable desde el punto de vista ambiental.

El desarrollo de energía geotérmica en los campos petroleros de Colombia representa una oportunidad emocionante para avanzar hacia una economía más sostenible y diversificada. Sin embargo, para aprovechar plenamente este potencial, es crucial abordar una serie de desafíos técnicos, económicos y ambientales a través de un enfoque integral y colaborativo que involucre a múltiples partes interesadas, incluidos el gobierno, la industria y la sociedad civil. Con una planificación cuidadosa y una ejecución efectiva, Colombia podría convertirse en un líder regional en el desarrollo de energía geotérmica, contribuyendo así a la mitigación del cambio climático y al impulso del crecimiento económico sostenible.

## POTENCIAL DE ENERGIA GEOTERMICA

### **6.1 Parámetros técnicos:**

#### **6.1.1 Temperatura del yacimiento.**

La determinación de los parámetros térmicos en las rocas puede realizarse mediante diversos métodos, ya sea en laboratorio a través de núcleos de perforación o directamente in situ en pozos de sondeo. En el mercado se encuentran disponibles diferentes dispositivos y técnicas para medir la conductividad térmica de rocas y suelos, todos basados en el mismo principio fundamental: la aplicación de un calentamiento local controlado a la muestra, seguido de la medición de la respuesta de temperatura en función del tiempo y el espacio.

Uno de los métodos ampliamente utilizados es el de la fuente lineal transitoria, común en instrumentos de tipo aguja. Este método implica el calentamiento constante de una fuente delgada y larga que entra en contacto con la muestra, mientras se registra la variación temporal de la temperatura en la fuente. La velocidad de aumento de temperatura en la fuente está directamente relacionada con la conductividad térmica del material de la muestra.

Otro método destacado es el empleo de instrumentos de barra dividida, que se encuentran disponibles como dispositivos portátiles electrónicos. Estos instrumentos aplican un gradiente térmico a través de una muestra, junto con una sustancia de conductividad térmica conocida utilizada como estándar de referencia. La conductividad térmica de la muestra se determina comparándola con el estándar, y estos dispositivos ofrecen resultados precisos con una variación mínima.

## POTENCIAL DE ENERGIA GEOTERMICA

Las barras de medición de conductividad térmica cuentan con ajustes de temperatura diferencial, lo que garantiza mediciones precisas en un rango amplio de temperaturas. Además, su portabilidad facilita su uso en exploraciones geotérmicas, incluso en entornos remotos durante operaciones de perforación.

Para medir la capacidad calorífica de las rocas, se recurre al uso de calorímetros en laboratorio. Estos instrumentos varían en diseño y función, pero todos están diseñados para agregar o eliminar una cantidad definida de calor al sistema calorimétrico (muestra más material de inclusión) y monitorear la respuesta de temperatura del proceso.

Finalmente, la densidad de las rocas se determina mediante el principio de Arquímedes. Este método implica la medición de la masa de una muestra primero en aire y luego sumergida en un líquido de densidad conocida, como agua, calculando así el volumen de la muestra y, por ende, su densidad. La densidad de los recortes se mide comúnmente utilizando un picnómetro, un dispositivo simple de laboratorio para medir la densidad de líquidos y sólidos.

La temperatura es un parámetro fundamental en la explotación de un recurso geotérmico debido a su influencia directa en varios aspectos clave del proceso de generación de energía.

**Disponibilidad de Calor:** La temperatura del yacimiento geotérmico determina la cantidad de calor disponible para ser convertido en energía útil. Cuanto más alta sea la temperatura, mayor será la cantidad de energía térmica que se puede extraer del yacimiento. Esta energía térmica se

## POTENCIAL DE ENERGIA GEOTERMICA

utiliza para generar electricidad en plantas geotérmicas o para proporcionar calefacción y refrigeración directamente a edificios en sistemas de calefacción geotérmica.

**Eficiencia de Conversión:** La eficiencia con la que se convierte el calor geotérmico en energía útil está directamente relacionada con la temperatura del yacimiento. En general, las plantas geotérmicas que operan a temperaturas más altas tienen una eficiencia de conversión más alta, lo que significa que pueden generar más electricidad con la misma cantidad de calor. Por lo tanto, la temperatura del yacimiento influye en la rentabilidad y la viabilidad económica de un proyecto geotérmico.

### 6.1.2 Cantidad de Fluido Geotérmico Disponible

El caudal del fluido geotérmico ( $\dot{m}$ ) es esencial para determinar la cantidad de energía que puede ser extraída. El caudal necesario para generar una cantidad específica de energía puede ser calculado con la siguiente ecuación:

$$\dot{m} = P_e / (\eta \cdot c_p \cdot \Delta T)$$

Donde:

- $\dot{m}$  = caudal del fluido geotérmico (kg/s)
- $P_e$  = potencia eléctrica generada (W)
- $\eta$  = eficiencia de conversión

## POTENCIAL DE ENERGIA GEOTERMICA

*Tabla 4*  
*Tabla de parámetros típicos para estimación del caudal en plantas geotérmicas*

| Parámetro                                | Valor Típico                    |
|------------------------------------------|---------------------------------|
| Capacidad Calorífica ( $c_p$ )           | 4200 J/kg·K                     |
| Eficiencia de Conversión ( $\eta$ )      | 10% - 20% (depende del sistema) |
| Diferencia de Temperatura ( $\Delta T$ ) | 50 K - 150 K                    |

*Nota: tabla adaptada de DiPippo, R. (2015). Geothermal Power Plants: Evolution and Performance Assessments. Butterworth-Heinemann.*

### 6.1.3 Permeabilidad del yacimiento

La permeabilidad de un yacimiento geotérmico es un factor determinante en la viabilidad y eficiencia de los proyectos de energía geotérmica. Esta propiedad, que se define como la capacidad de un medio poroso para permitir el flujo de fluidos a través de él, influye directamente en la capacidad del yacimiento para producir calor de manera sostenible y eficiente. Por lo tanto, la evaluación precisa de la permeabilidad es esencial en todas las etapas del desarrollo de un proyecto geotérmico, desde la exploración inicial hasta la operación a largo plazo (Grant & Bixley, 2011).

Existen dos tipos principales de permeabilidad que deben ser considerados: la permeabilidad primaria y la secundaria. La permeabilidad primaria se refiere a la capacidad inherente de la formación rocosa para permitir el flujo de fluidos a través de sus poros interconectados. Los yacimientos con alta permeabilidad primaria permiten un flujo fluido eficiente, lo que facilita la extracción de calor y mejora la eficiencia en la generación de energía

## POTENCIAL DE ENERGIA GEOTERMICA

geotérmica (Axelsson, 2013). Sin embargo, en yacimientos donde la permeabilidad primaria es baja, el flujo de fluidos puede ser insuficiente para sostener una producción rentable, lo que representa un desafío significativo para la explotación del recurso (Bödvarsson & Witherspoon, 1989).

Por otro lado, la permeabilidad secundaria, que resulta de fracturas o fisuras naturales en la formación rocosa, puede jugar un papel crucial en la mejora de la capacidad de producción del yacimiento. Estas fracturas actúan como vías adicionales para el flujo de fluidos, incrementando la permeabilidad efectiva del yacimiento y, en consecuencia, su capacidad para transferir calor. La identificación y caracterización de la permeabilidad secundaria son, por tanto, fundamentales para diseñar estrategias de producción que optimicen el rendimiento del yacimiento, especialmente en aquellos casos donde la permeabilidad primaria es limitada (Grant & Bixley, 2011).

En países como Islandia, Nueva Zelanda y Estados Unidos, la caracterización de la permeabilidad ha desempeñado un papel crucial en la viabilidad técnica y la eficiencia económica de estos proyectos.

En Islandia, uno de los líderes mundiales en el uso de energía geotérmica, la permeabilidad de los yacimientos ha sido un factor determinante en la selección de sitios para el desarrollo de plantas de energía. Los yacimientos con alta permeabilidad en el campo geotérmico de Nesjavellir han facilitado una extracción eficiente de fluidos, lo que ha sido clave para el éxito de la planta geotérmica que suministra electricidad y agua caliente a la región de Reykjavik. Los estudios geológicos detallados y la perforación exploratoria en Islandia se centran en la identificación de zonas de alta permeabilidad que puedan sostener la producción a largo plazo, minimizando así el riesgo de declive en la productividad del yacimiento (Björnsson, 2006).

## POTENCIAL DE ENERGIA GEOTERMICA

En Nueva Zelanda, la permeabilidad ha sido un parámetro esencial en el desarrollo de proyectos geotérmicos, como el campo geotérmico de Wairakei, uno de los más antiguos y grandes del mundo. En este campo, la alta permeabilidad en las formaciones volcánicas ha permitido la operación continua y rentable de la planta durante más de 60 años. Las fracturas naturales y la permeabilidad secundaria en estas formaciones han sido explotadas para maximizar el flujo de fluido, lo que ha mejorado la eficiencia de la planta (Hunt, 2000). El éxito de Wairakei demuestra la importancia de integrar estudios de permeabilidad en las fases iniciales de desarrollo, para asegurar una explotación sostenible del recurso.

En Estados Unidos, particularmente en el campo geotérmico de The Geysers en California, la permeabilidad ha sido un factor clave para mantener la capacidad de producción de energía. The Geysers, el campo geotérmico más grande del mundo, ha logrado su éxito en parte gracias a la identificación de zonas con alta permeabilidad que permiten un flujo continuo de vapor hacia las turbinas. La permeabilidad en este campo ha sido gestionada a través de la inyección de agua en el reservorio, una técnica que ayuda a mantener la presión y prolonga la vida útil del yacimiento (Barker et al., 1992). Esta práctica subraya la importancia de monitorear y gestionar la permeabilidad como parte esencial de la operación diaria del campo.

### **6.1.4 Tipo de recurso geotérmico.**

La identificación precisa del tipo de recurso geotérmico resulta fundamental para el aprovechamiento eficiente y sostenible de la energía geotérmica. Cada tipo de recurso geotérmico posee características únicas que determinan las tecnologías y métodos de explotación más adecuados para maximizar su potencial energético. En este contexto, la geotermia, una fuente de energía renovable que se deriva del calor almacenado en el interior de la Tierra, ofrece un potencial

## POTENCIAL DE ENERGIA GEOTERMICA

significativo para la generación de electricidad, calefacción y refrigeración. No obstante, su explotación óptima depende en gran medida de una comprensión profunda de las propiedades físicas y químicas de los recursos geotérmicos disponibles (DiPippo, 2016).

Los recursos geotérmicos pueden clasificarse principalmente en tres tipos: sistemas hidrotermales, sistemas de roca seca caliente (Hot Dry Rock, HDR) y sistemas geotérmicos mejorados (Enhanced Geothermal Systems, EGS). Los sistemas hidrotermales, que son los más comunes, contienen agua o vapor en estado natural y se encuentran en reservorios permeables. Estos sistemas son relativamente fáciles de explotar mediante tecnologías convencionales, como las plantas de energía geotérmica de ciclo binario o de vapor seco (Glassley, 2014). Por otro lado, los sistemas de roca seca caliente y los sistemas geotérmicos mejorados requieren la inyección de agua y la creación de fracturas en las rocas para liberar el calor almacenado, lo que implica el uso de tecnologías más avanzadas y costosas (Agencia Internacional de Energía [AIE], 2011).

Comprender las características específicas del recurso geotérmico es crucial no solo para seleccionar la tecnología de explotación adecuada, sino también para garantizar la sostenibilidad del recurso a largo plazo. La extracción excesiva de calor sin una adecuada reposición puede llevar al agotamiento del recurso y a la disminución de su capacidad para generar energía (DiPippo, 2016). Además, cada tipo de recurso presenta desafíos únicos en términos de la gestión del fluido geotérmico, la mitigación de los riesgos sísmicos inducidos y el manejo de las emisiones de gases. Esto subraya la importancia de un enfoque integrado en la planificación y desarrollo de proyectos geotérmicos (Glassley, 2014).

La selección del sistema de generación de energía geotérmica adecuado es fundamental para maximizar el aprovechamiento del potencial geotérmico y garantizar la sostenibilidad a largo plazo de un proyecto. Este proceso no solo implica la identificación de la tecnología más eficiente,

## POTENCIAL DE ENERGIA GEOTERMICA

sino también la consideración de aspectos económicos, ambientales y sociales, que son cruciales para el éxito del proyecto en su conjunto.

### **6.1.4.1 Optimización de Recursos Geotérmicos**

Cada yacimiento geotérmico es único, con características específicas que incluyen la temperatura del fluido, la profundidad del reservorio, la permeabilidad de las rocas, y la química del fluido geotérmico. La elección de un sistema de generación que se adapte a estas características es esencial para optimizar la extracción de energía. Por ejemplo, en yacimientos con temperaturas moderadas (entre 100°C y 150°C), los sistemas de ciclo binario son más adecuados, ya que permiten la conversión eficiente del calor en electricidad, utilizando un fluido secundario de bajo punto de ebullición (DiPippo, 2015). En cambio, en yacimientos de alta entalpía, las plantas de vapor seco o de flash simple suelen ser más eficientes (Lund, Freeston & Boyd, 2010).

### **6.1.5 Eficiencia Energética y Sostenibilidad**

La eficiencia energética es un parámetro crucial en la viabilidad de los proyectos geotérmicos. Un sistema bien diseñado no solo debe maximizar la conversión de calor en energía eléctrica, sino también mantener la sostenibilidad del recurso a largo plazo. Esto implica la reinyección de fluidos en el reservorio para mantener la presión y la temperatura, lo que es esencial para evitar el agotamiento del recurso geotérmico (Axelsson, 2012). Adicionalmente, la implementación de tecnologías de recuperación de calor residual y la integración con otras fuentes de energía renovable pueden aumentar significativamente la eficiencia global del sistema (Glassley, 2010).

### **6.1.6 Reducción de Costos**

La reducción de costos en proyectos geotérmicos no se limita solo a la elección del sistema de generación, sino que también abarca la optimización de la perforación, la gestión de recursos y

## POTENCIAL DE ENERGIA GEOTERMICA

la operación y mantenimiento de la planta. La perforación de pozos geotérmicos representa uno de los mayores costos en el desarrollo de estos proyectos. Sin embargo, innovaciones como la perforación direccional y los sistemas de circulación mejorada (EGR) han demostrado ser efectivas en la reducción de costos y en la mejora del rendimiento del reservorio (Bloomquist, 2003). Además, la automatización y la digitalización de operaciones pueden reducir significativamente los costos de operación y mantenimiento, mejorando la eficiencia y la confiabilidad del sistema (Tester et al., 2006).

### **6.1.7 Adecuación a las Aplicaciones Específicas**

La flexibilidad de la energía geotérmica permite su adaptación a una amplia gama de aplicaciones, desde la generación de electricidad hasta el uso directo en calefacción y refrigeración. En zonas urbanas densamente pobladas, los sistemas de calefacción y refrigeración geotérmica pueden ofrecer soluciones eficientes y sostenibles para reducir la dependencia de combustibles fósiles y disminuir las emisiones de carbono (Lund et al., 2010). En contraste, en regiones con acceso a yacimientos de alta temperatura, las plantas geotérmicas convencionales son ideales para la generación de electricidad a gran escala, ofreciendo una fuente de energía base fiable y continua (DiPippo, 2012).

### **6.1.8 Innovaciones y Desafíos Futuros**

El futuro de la energía geotérmica está marcado por la innovación tecnológica y la expansión a nuevos mercados. Tecnologías emergentes como los sistemas geotérmicos mejorados (EGS), que permiten la explotación de recursos geotérmicos en zonas de baja permeabilidad, están abriendo nuevas posibilidades para la expansión de esta fuente de energía (Tester et al., 2006). Sin embargo, estos avances también presentan desafíos técnicos y financieros significativos, que

## POTENCIAL DE ENERGIA GEOTERMICA

requieren de una inversión continua en investigación y desarrollo, así como de políticas de apoyo gubernamentales que incentiven la adopción de tecnologías limpias y sostenibles.

### **6.1.9 capacidad de generación**

La capacidad de generación de energía geotérmica está influenciada por tres factores fundamentales: la temperatura del yacimiento geotérmico, la cantidad de fluido geotérmico disponible y la eficiencia de conversión del sistema. En primer lugar, la temperatura del yacimiento determina la cantidad de energía térmica que puede extraerse; yacimientos con mayores temperaturas tienen un mayor potencial energético. En segundo lugar, la cantidad de fluido geotérmico disponible, que suele ser agua o vapor, es crucial para el transporte del calor hacia la superficie. (Dickson & Fanelli, 2004).

En cuanto a la temperatura del yacimiento geotérmico es un factor crucial en la generación de energía. Los yacimientos con temperaturas elevadas poseen un mayor potencial para la producción energética. En general, se necesitan temperaturas de al menos 150°C para la generación de electricidad, aunque algunos sistemas pueden funcionar a temperaturas inferiores. A medida que la temperatura del fluido aumenta, se incrementa la cantidad de energía térmica disponible para su conversión en electricidad (Lund & Boyd, 2016).

La importancia de la cantidad de fluido geotérmico disponible, generalmente en forma de agua o vapor, es un factor esencial para la generación de energía. Este fluido actúa como el medio de transporte del calor desde el yacimiento hasta la superficie, donde se convierte en energía eléctrica. Un yacimiento con grandes volúmenes de fluido puede mantener una producción constante de energía, mientras que uno con volúmenes limitados podría restringir la capacidad de generación (DiPippo, 2012).

## POTENCIAL DE ENERGIA GEOTERMICA

La eficiencia de conversión del calor del yacimiento en energía eléctrica es un factor crucial que impacta directamente la capacidad de generación. Esta eficiencia varía según la tecnología empleada, como las plantas de ciclo binario, las de vapor seco y las de vapor flash. Por ejemplo, las plantas de ciclo binario tienden a ser más eficientes en yacimientos con temperaturas más bajas, aunque su eficiencia general suele ser inferior en comparación con las plantas que operan con fluidos a temperaturas más altas (Glassley, 2015).

## POTENCIAL DE ENERGIA GEOTERMICA

### **6.2 Parámetros ambientales:**

#### **6.2.1 Impacto ambiental.**

En el contexto del proyecto de generación de energía geotérmica en campos previamente dedicados a la exploración, perforación, desarrollo y producción de petróleo, se establece un enfoque singular en la evaluación de impacto ambiental. La investigación se centra exclusivamente en los efectos derivados de la implementación y operación de la tecnología geotérmica, obviando deliberadamente consideraciones asociadas con actividades petroleras previas.

El presente estudio adopta una perspectiva rigurosa al respecto, enfocándose en la identificación y análisis de los impactos ambientales específicos generados por la infraestructura y las operaciones inherentes a la generación de energía geotérmica. Se emplearán metodologías reconocidas en el ámbito científico para evaluar los efectos sobre los recursos hídricos, la calidad del aire, la biodiversidad y otros componentes ambientales relevantes.

Es imperativo destacar que la exclusión de los impactos ambientales asociados con la actividad petrolera previa no implica una ignorancia de su existencia, sino que responde a la naturaleza del objetivo del proyecto y su enfoque específico en la generación de energía geotérmica. Esta delimitación conceptual asegura la claridad y la precisión en la evaluación de los efectos ambientales, así como la pertinencia de las medidas de mitigación y gestión propuestas.

Se promueve, por tanto, una evaluación exhaustiva y transparente de los impactos ambientales asociados con la generación de energía geotérmica, con el propósito último de

## POTENCIAL DE ENERGIA GEOTERMICA

informar de manera integral la toma de decisiones y garantizar la sostenibilidad ambiental del proyecto en cuestión.

### **6.2.2 Contaminantes del fluido geotérmico.**

La presencia de contaminantes en el fluido geotérmico es un factor crítico en la evaluación del potencial de energía geotérmica, ya que influye directamente en la eficiencia operativa, el costo de mantenimiento, la durabilidad de los equipos y el impacto ambiental. Este aspecto se ha vuelto cada vez más relevante, especialmente en yacimientos geotérmicos asociados a campos de explotación petrolera, donde la complejidad química del fluido puede variar significativamente.

#### **6.2.2.1 Efectos sobre la Eficiencia y el Rendimiento del Sistema**

La eficiencia de un sistema geotérmico depende en gran medida de la pureza del fluido geotérmico. Contaminantes como los sólidos suspendidos, los metales pesados, y los compuestos orgánicos pueden obstruir los intercambiadores de calor, disminuir la conductividad térmica y, en consecuencia, reducir la eficiencia global del sistema. DiPippo (2015) muestra que la presencia de sólidos suspendidos puede reducir la eficiencia de transferencia de calor en hasta un 20%, aumentando las pérdidas de energía y los costos operativos.

#### **6.2.2.2 Impacto en la Vida Útil de los Equipos**

Los contaminantes también tienen un impacto directo en la durabilidad de los equipos geotérmicos. La corrosión inducida por sulfuros, ácido sulfhídrico (H<sub>2</sub>S) y metales pesados puede acortar la vida útil de componentes críticos como tuberías, turbinas y generadores. Según un informe de la Agencia Internacional de Energía Renovable (IRENA, 2017), la corrosión

## POTENCIAL DE ENERGIA GEOTERMICA

relacionada con H<sub>2</sub>S puede reducir la vida útil de las turbinas en un 30-40%, incrementando significativamente los costos de mantenimiento y reemplazo.

### **6.2.2.3 Consideraciones Ambientales y Reglamentarias**

El manejo de contaminantes en los sistemas geotérmicos no solo es una cuestión técnica, sino también ambiental y regulatoria. La descarga de fluidos geotérmicos contaminados puede causar daños ambientales, como la contaminación de acuíferos, la acidificación de suelos y la liberación de gases tóxicos. La presencia de metales pesados como el mercurio o el plomo en los efluentes geotérmicos es especialmente preocupante debido a su toxicidad y persistencia en el medio ambiente. Estudios como los realizados por Arnórsson (2004) destacan que el manejo inadecuado de estos contaminantes puede llevar a sanciones regulatorias y a la pérdida de licencias de operación.

### **6.2.2.4 Gestión del agua**

La gestión del agua en los campos geotérmicos es un aspecto fundamental que debe ser considerado durante la evaluación del potencial energético de un yacimiento. Este parámetro no solo influye en la viabilidad técnica del proyecto, sino también en su sostenibilidad ambiental y su aceptación social.

### **6.2.2.5 Impacto Ambiental del Vertido de Fluidos Geotérmicos**

Cuando el agua residual o el condensado de un campo geotérmico se descargan en cuerpos de agua superficiales como ríos o arroyos, pueden alterar significativamente la composición química del agua. Este cambio puede afectar negativamente a los ecosistemas acuáticos, dañando tanto la fauna y flora que habitan en estos cuerpos de agua como a las comunidades humanas que dependen de ellos. Los fluidos geotérmicos, a menudo ricos en minerales y otros contaminantes,

## POTENCIAL DE ENERGIA GEOTERMICA

tienden a mezclarse y diluirse con mayor facilidad en aguas calientes. Sin embargo, cuando estos fluidos son liberados en aguas más frías, los contaminantes pueden ser más persistentes y generar un impacto ambiental más pronunciado (Kristmannsdóttir & Ármannsson, 2003).

### **6.2.2.6 Riesgos Asociados a la Reinyección de Fluidos**

Incluso si los fluidos geotérmicos residuales son inyectados en el campo geotérmico, existe el riesgo de que los contaminantes se filtren hacia las aguas superficiales a través de los acuíferos subterráneos. Este riesgo se incrementa durante el proceso de reinyección, especialmente si no se cuenta con sistemas de contención adecuados o si hay fallas en los estanques de retención que contienen los fluidos de perforación. Además, durante la operación de la planta de energía, pueden ocurrir derrames químicos o fugas, lo que podría exacerbar el problema (Barbier, 2002).

### **6.2.2.7 Consideraciones Ambientales en la Evaluación del Potencial Geotérmico**

La gestión del agua y los riesgos asociados a la contaminación subterránea y superficial deben ser considerados cuidadosamente en la evaluación de impacto ambiental (EIA) de proyectos geotérmicos. Esto incluye la implementación de medidas preventivas para mitigar posibles impactos, como el uso de barreras impermeables en los estanques de retención, la vigilancia constante de la calidad del agua, y la adopción de tecnologías avanzadas para la reinyección segura de fluidos geotérmicos. Un manejo inadecuado puede llevar a problemas de contaminación que no solo dañan el medio ambiente, sino que también pueden poner en riesgo la salud de las comunidades locales y generar conflictos sociales que afecten la viabilidad del proyecto a largo plazo (Stefansson, 1997).

## POTENCIAL DE ENERGIA GEOTERMICA

### **6.3 Parámetros económicos**

#### **6.3.1 Costos de inversión**

Los costos de inversión en una planta de energía geotérmica varían significativamente dependiendo de diversos factores, como la capacidad de la planta, la tecnología utilizada, las condiciones geológicas del sitio, los costos laborales y de materiales en la región, y las regulaciones ambientales.

#### **6.3.2 Factores que Afectan los Costos de Inversión**

##### **6.3.2.1 Capacidad de la Planta:**

La capacidad instalada de la planta influye directamente en los costos de inversión. Plantas de mayor tamaño tienden a beneficiarse de economías de escala, reduciendo el costo por megavatio (MW) (DiPippo, 2012).

##### **6.3.2.2 Tecnología Utilizada:**

Las diferentes tecnologías geotérmicas, como los sistemas de ciclo binario, vapor seco y vapor flash, tienen distintos requisitos técnicos y costos asociados (Bertani, 2015).

##### **6.3.2.3 Condiciones Geológicas del Sitio:**

La complejidad geológica del sitio afecta los costos de perforación y la eficiencia de la planta. Zonas con mayores gradientes geotérmicos pueden reducir los costos de operación (Lund et al., 2010).

## POTENCIAL DE ENERGIA GEOTERMICA

### **6.3.2.4 Costos Laborales y de Materiales:**

Los costos varían según la región y la disponibilidad de mano de obra calificada y materiales necesarios para la construcción de la planta (Tester et al., 2006).

### **6.3.2.5 Regulaciones Ambientales:**

El cumplimiento de las normativas ambientales puede incrementar los costos debido a la necesidad de estudios de impacto ambiental y la implementación de medidas de mitigación (Glassley, 2015).

Desglose de Costos

### **6.3.2.6 Exploración y Perforación de Pozos:**

Esta etapa inicial puede representar entre el 20% y el 30% del costo total de la inversión. Incluye la realización de estudios geológicos, la perforación de pozos exploratorios y de producción, y el análisis de los recursos geotérmicos disponibles (DiPippo, 2012).

Rango estimado: US\$ 50 millones a US\$ 75 millones para una planta de 50 MW.

### **6.3.2.7 Construcción de la Planta de Generación:**

Incluye la instalación de turbinas, generadores, intercambiadores de calor, sistemas de enfriamiento, y otros equipos auxiliares necesarios para la operación de la planta (Bertani, 2015).

Rango estimado: US\$ 100 millones a US\$ 200 millones para una planta de 50 MW.

### **6.3.2.8 Otros Costos:**

Comprenden estudios de impacto ambiental, ingeniería, permisos, financiación y seguros, los cuales pueden representar entre el 10% y el 20% del costo total de la inversión (Glassley, 2015).

## POTENCIAL DE ENERGIA GEOTERMICA

Rango estimado: US\$ 20 millones a US\$ 40 millones para una planta de 50 MW.

### **6.3.3 Costos Operativos**

Además de los costos de inversión, es crucial considerar los costos operativos para evaluar la viabilidad económica de una planta de energía geotérmica. Estos costos incluyen mantenimiento, operación, monitoreo y otros gastos recurrentes asociados con la operación continua de la planta.

#### **6.3.3.1 Componentes de los Costos Operativos**

**Mantenimiento y Reparaciones:** El mantenimiento regular de equipos como turbinas, generadores y sistemas de intercambio de calor es esencial para garantizar la eficiencia operativa y prolongar la vida útil de la planta (Kagel, Bates, & Gawell, 2007).

**Operación y Monitoreo:** Incluye los costos asociados con el personal operativo, la supervisión y el monitoreo continuo del rendimiento de la planta y las condiciones geotérmicas (Holm et al., 2012).

#### **6.3.3.2 Costo de Energía Auxiliar:**

Energía necesaria para operar equipos auxiliares, como bombas de agua y sistemas de enfriamiento (Bloomquist, 2003).

**Gestión de Residuos:** Costos asociados con la gestión y disposición de residuos generados durante la operación, así como el tratamiento de fluidos geotérmicos (DiPippo, 2012).

**Seguros y Permisos:** Gastos recurrentes para mantener seguros adecuados y cumplir con las normativas locales y nacionales (IRENA, 2017).

Costos totales instalados.

## POTENCIAL DE ENERGIA GEOTERMICA

*Figura 9 costos totales instalados de plantas de energía geotérmica.*



*Nota: costos totales instalados tomado de Global Trends. Recuperado el 23 de agosto de 2019, de International Renewable Energy Agency: <https://www.irena.org/Statistics/View-Data-byTopic/Costs/Global-Trends>*

## POTENCIAL DE ENERGIA GEOTERMICA

### 7. Capítulo 3 Campo Estudio

En este capítulo se ha seleccionado el campo EIP como el área de estudio principal para el desarrollo de un proceso geotérmico en campos de hidrocarburos. Esta elección se fundamenta en los hallazgos presentados en la tesis titulada "Análisis de viabilidad en la implementación de energía geotérmica en aguas asociadas a la producción de hidrocarburos", donde se evaluaron las condiciones geológicas y técnicas de dicho campo para la integración de tecnologías geotérmicas.

#### 7.1 Características Generales del Campo EIP

El Campo EIP, ubicado en la cuenca de los Llanos Orientales, se caracteriza por su geología favorable para la explotación de energía geotérmica, en paralelo con la producción de hidrocarburos. Este campo opera con un gradiente geotérmico promedio de 31 °C por kilómetro, lo cual es consistente con otras regiones geoméricamente activas en el mundo. El campo presenta temperaturas de yacimiento que oscilan entre 70 °C y 120 °C, lo que lo convierte en un candidato ideal para la generación de energía mediante sistemas geotérmicos de baja entalpía (Lindal, 1973).

El Campo EIP es un yacimiento de black oil con un acuífero activo y un aceite con una gravedad API de 32. Este campo cuenta con tres pozos perforados y actualmente en producción, cuyos principales datos de producción se detallan en la **tabla 5**

## POTENCIAL DE ENERGIA GEOTERMICA

*Tabla 5*  
*Tablas de datos de producción de los 3 pozos perforados*

| <b>Pozo</b>  | <b>Tasa de fluido (bfpd)</b> | <b>Tasa aceite (bfpd)</b> | <b>% BSW</b> | <b>GOR (scf/bopd)</b> | <b>Temperatura (°C)</b> | <b>WHP (psi)</b> |
|--------------|------------------------------|---------------------------|--------------|-----------------------|-------------------------|------------------|
| <b>EIP-1</b> | <b>28482.58</b>              | <b>1252.58</b>            | <b>95.4</b>  | <b>625</b>            | <b>80</b>               | <b>220</b>       |
| <b>EIP-2</b> | <b>22193.82</b>              | <b>413.82</b>             | <b>98.1</b>  | <b>106</b>            | <b>95</b>               | <b>90</b>        |
| <b>EIP-3</b> | <b>16748.5</b>               | <b>408.5</b>              | <b>97.5</b>  | <b>342</b>            | <b>120</b>              | <b>70</b>        |

*Nota: Tabla adaptada de Andrea del Pilar Bohorquez Araque, H. Y. G. R. (2019). Análisis de viabilidad en la implementación de energía geotérmica en aguas asociadas a la producción de hidrocarburos.*

Estas características permiten su consideración como un candidato ideal para la implementación de procesos geotérmicos, los cuales podrían optimizar la eficiencia energética y reducir el impacto ambiental en la producción de hidrocarburos.

### **7.2 Aplicación de parámetros técnicos**

#### **7.2.1 Temperatura del Yacimiento:**

La temperatura de los tres pozos en el Campo EIP varía significativamente, desde 80 °C en el pozo EIP-1 hasta 120 °C en el pozo EIP-3. Estos valores son adecuados para la conversión de energía térmica en eléctrica utilizando tecnologías de ciclo binario, que han demostrado ser

## POTENCIAL DE ENERGIA GEOTERMICA

efectivas en rangos de temperatura similares, como es el caso de la planta geotérmica en Chena Hot Springs, Alaska (Chena Power, 2006).

### **7.2.2 Flujo Geotérmico y Tasa de Producción:**

La tasa de fluidos en el campo estudio EIP varía entre 16,748.5 y 28,482.58 barriles por día. Este volumen de fluido es suficiente para mantener un flujo constante que podría alimentar una planta de energía geotérmica, siempre que se gestione adecuadamente la reinyección para mantener la presión del yacimiento y la sustentabilidad del recurso.

El caudal del fluido geotérmico (m) es crucial porque determina directamente la cantidad de energía que puede ser extraída del recurso geotérmico. En el caso de los pozos EIP-1, EIP-2 y EIP-3, las tasas de fluido reportadas son 28,482.58 bfpd, 22,193.82 bfpd y 16,748.5 bfpd, respectivamente. Estas tasas de flujo indican la cantidad de fluido que puede ser extraído diariamente, lo cual es un indicativo directo de la energía térmica disponible para el proceso ORC (Ciclo Orgánico de Rankine).

#### **7.2.2.1 Evaluación de la Potencia Generada:**

La potencia generada en cada pozo depende del tipo de fluido de trabajo utilizado en el ORC, así como de las condiciones operativas (temperatura, presión). En este caso, el propano se destacó como el fluido que mayor potencia generó en los tres pozos, con valores de 1530.5 kW en EIP-1, 1563.5 kW en EIP-2, y 1400.7 kW en EIP-3. Estos valores evidencian la capacidad del sistema para aprovechar el caudal de fluido disponible, mostrando que un mayor caudal de fluido está asociado con una mayor generación de potencia, siempre que las demás condiciones sean adecuadas.

## POTENCIAL DE ENERGIA GEOTERMICA

### ***7.2.2.2 Relación entre Caudal y Potencia:***

Al comparar los pozos EIP-1, EIP-2 y EIP-3, se observa que el pozo con el mayor caudal de fluido (EIP-1) también generó una potencia significativa, aunque no la mayor. Esto sugiere que, si bien el caudal es un factor clave, la eficiencia del sistema y las condiciones operativas (como la temperatura) también juegan un papel crucial en la conversión de energía. Por ejemplo, el pozo EIP-2, con un caudal menor que EIP-1 pero con una temperatura más alta, logró generar más potencia. Esto resalta la necesidad de optimizar no solo el caudal, sino también las condiciones de operación del ORC para maximizar la producción de energía.

### **7.2.3 Eficiencia de Conversión:**

La eficiencia de conversión es otra variable fundamental. En sistemas de baja entalpía, como los analizados, la eficiencia suele ser baja, lo que implica que solo una fracción de la energía térmica del fluido se convierte en electricidad. Sin embargo, al utilizar un fluido de trabajo como el propano, que ha demostrado ser eficaz en estos pozos, se puede mejorar la eficiencia y, por ende, la potencia generada. La temperatura del fluido geotérmico también influye en la eficiencia, como se observa en los diferentes resultados de potencia generada en cada pozo.

la tabla que compara los datos del campo EIP con otros campos geotérmicos. Para ello, se han consultado diversas fuentes bibliográficas que incluyen estudios de casos y análisis de sensibilidad en diferentes proyectos geotérmicos alrededor del mundo.

## POTENCIAL DE ENERGIA GEOTERMICA

*Tabla 6*  
*Tabla comparativa de los datos suministrados por los pozos EIP y otros datos suministrados por campos en el mundo.*

| Campo   | Caudal de Fluido (bfpd) | Temperatura (°C) | Potencia Generada (kW) | Eficiencia de Conversión (%) | Proceso ORC | Referencia                                |
|---------|-------------------------|------------------|------------------------|------------------------------|-------------|-------------------------------------------|
| EIP-1   | 28482.58                | 80               | 1530.5                 | 10-12%                       | Propano     | Datos del usuario                         |
| EIP-2   | 22193.82                | 95               | 1563.5                 | 10-12%                       | Propano     | Datos del usuario                         |
| EIP-3   | 16748.5                 | 120              | 1400.7                 | 10-12%                       | Propano     | Datos del usuario                         |
| Campo A | 20000                   | 100              | 1200                   | 8-10%                        | Isobutano   | DiPippo, R. (2015)                        |
| Campo B | 30000                   | 85               | 1400                   | 9-11%                        | Pentano     | Bertani, R. (2016)                        |
| Campo C | 15000                   | 110              | 1000                   | 7-9%                         | R245fa      | Tester, J. W., et al. (2010)              |
| Campo D | 25000                   | 90               | 1300                   | 8-10%                        | Butano      | Fridleifsson, I.B., & Elders, W.A. (2005) |

*Nota: tabla comparativa entre los pozos EIP y también los campos en referencia de DiPippo, Bertani, Tester, Fridleifsson*

## POTENCIAL DE ENERGIA GEOTERMICA

La eficiencia de conversión en los pozos EIP, estimada entre 10-12%, es ligeramente superior a la observada en otros campos geotérmicos, lo cual puede atribuirse al uso de propano en el ORC.

### **7.2.4 Permeabilidad del Yacimiento**

Un estudio realizado en la Cuenca del Alto Rin, Alemania, ha reutilizado pozos de petróleo para la producción de energía geotérmica. En este caso, se reportaron permeabilidades en areniscas triásicas de hasta 500 mD (Baillieux, 2013). Este nivel de permeabilidad ha permitido un desarrollo geotérmico eficiente, aprovechando la infraestructura existente.

En los Llanos Orientales de Colombia, se ha identificado que existen campos petroleros con formaciones que tienen permeabilidades inferiores a 500 mD. Las formaciones de esta región muestran una gran variabilidad en las propiedades del reservorio, incluida la permeabilidad. En algunas áreas, se encuentran reservorios más compactos o arenas más densas, donde la permeabilidad es baja, incluso por debajo de 1,000 mD. Estas formaciones se conocen como reservorios de baja permeabilidad o reservorios apretados (Rueda, 2019). La baja permeabilidad en estos reservorios puede limitar el flujo de fluido, lo que complica su uso para la producción de energía geotérmica.

#### **7.2.4.1 Aplicación en el Campo EIP**

El campo EIP, donde se ha implementado un Ciclo Orgánico de Rankine (ORC) para la extracción de energía, presenta características hidrogeológicas que lo clasifican como un recurso de baja entalpía. La permeabilidad en el campo EIP es suficiente para mantener un flujo constante de fluido geotérmico hacia los pozos EIP-1, EIP-2, y EIP-3, lo que ha sido esencial para la

## POTENCIAL DE ENERGIA GEOTERMICA

viabilidad del proyecto. La presencia de un acuífero activo sugiere que las formaciones subyacentes tienen una permeabilidad que permite la recarga continua del fluido geotérmico, asegurando así la sostenibilidad del proyecto a largo plazo.

Comparado con otros campos mencionados, la permeabilidad en el campo EIP se alinea con los valores observados en formaciones de baja a media permeabilidad, como las encontradas en los Llanos Orientales de Colombia y la Cuenca del Alto Rin en Alemania. Sin embargo, la presencia de un acuífero activo en el campo EIP añade una ventaja significativa, ya que facilita un flujo más constante y sostenido de fluido geotérmico, crucial para la operación eficiente del ORC.

### **7.2.5 Tipo de recurso geotérmico**

El análisis realizado sobre el campo EIP indica que se trata de un recurso geotérmico de baja entalpía, caracterizado por temperaturas moderadas y la presencia de un acuífero activo. Esta clasificación ha sido un factor determinante en la selección del Ciclo Orgánico de Rankine (ORC) como tecnología de conversión energética, con propano como fluido de trabajo. Las temperaturas de los pozos del campo EIP oscilan entre 80°C y 120°C, valores típicos de recursos geotérmicos de baja entalpía. Estos sistemas se encuentran comúnmente asociados con acuíferos activos, que no solo proporcionan una fuente constante de recarga, sino que también ayudan a mantener la estabilidad del sistema geotérmico en el tiempo.

El tipo de recurso geotérmico en el campo EIP ha guiado de manera decisiva las decisiones técnicas y estratégicas para su explotación. La correcta identificación de sus características ha permitido seleccionar y optimizar un ciclo ORC con propano, logrando una explotación eficiente y sostenible del recurso. Estos hallazgos no solo confirman la viabilidad del proyecto en el campo

## POTENCIAL DE ENERGIA GEOTERMICA

EIP, sino que también sirven como referencia técnica para la aplicación de tecnologías similares en otros campos geotérmicos con características comparables.

### **7.3 Aplicación de parámetros ambientales.**

#### **7.3.1 Impacto ambiental**

El campo EIP, un sitio previamente explotado para la producción de petróleo, representa un caso particular en la evaluación del impacto ambiental debido a la transición hacia la explotación de energía geotérmica. La existencia de estudios de impacto ambiental (EIA) previos y la infraestructura industrial establecida son factores que deben considerarse al evaluar los nuevos impactos asociados con la operación geotérmica.

##### **7.3.1.1 Impacto en la Calidad del Agua Subterránea**

El impacto en la calidad del agua subterránea es un parámetro crucial en la explotación geotérmica, especialmente en campos que ya han sido sometidos a actividades extractivas. En el caso del campo EIP, es probable que las formaciones geológicas hayan sido alteradas, lo que podría influir en el comportamiento de los acuíferos. Sin embargo, al haber superado estudios de impacto ambiental previos, se asume que se implementaron medidas para proteger la calidad del agua subterránea.

El seguimiento continuo de la calidad del agua es fundamental para asegurar que la inyección de fluidos geotérmicos no genere contaminación. Estudios como los realizados en otros campos geotérmicos sugieren que la monitorización constante es una práctica eficaz para evitar la degradación de la calidad del agua (DiPippo, 2012). Este enfoque debe ser replicado en el campo EIP para garantizar la sostenibilidad a largo plazo del proyecto.

## POTENCIAL DE ENERGIA GEOTERMICA

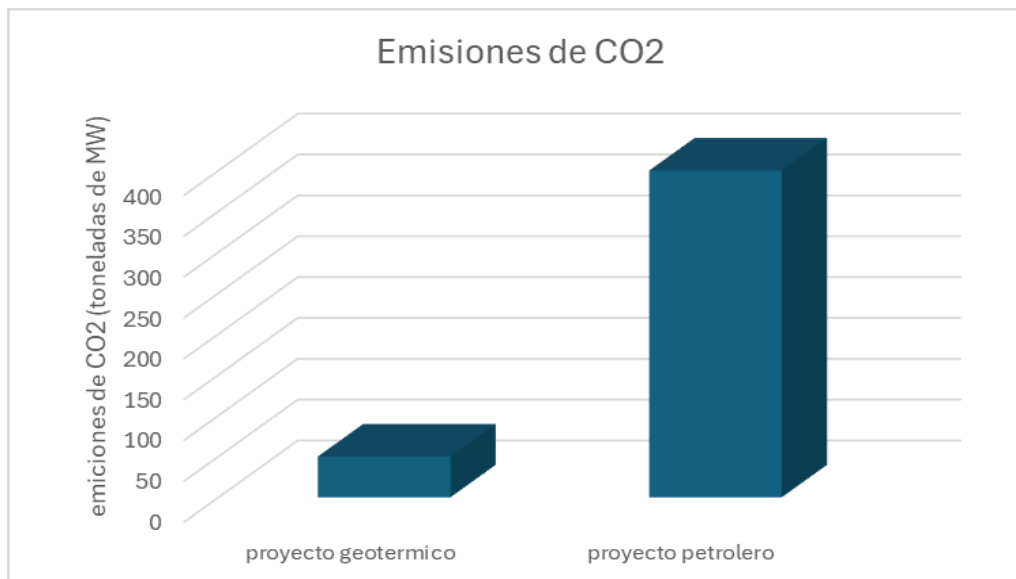
### 7.3.1.2 Emisiones de Gases

La operación del campo EIP ya está equipada para manejar las emisiones de gases asociadas con la producción de petróleo, como el metano y el dióxido de carbono. La transición a la energía geotérmica, y específicamente la implementación de un Ciclo Orgánico de Rankine (ORC), se espera que genere emisiones mínimas en comparación con las operaciones petroleras. Según investigaciones previas, los sistemas geotérmicos de baja entalpía producen cantidades insignificantes de gases de efecto invernadero, lo que podría reducir la huella de carbono global del campo (Fridleifsson, 2001).

La Figura 12 muestra una comparación entre las emisiones de CO<sub>2</sub> estimadas para proyectos geotérmicos y petroleros, destacando la ventaja ambiental de la energía geotérmica.

## POTENCIAL DE ENERGIA GEOTERMICA

*Figura 10 Comparación de emisiones de CO2 entre proyectos geotérmicos y petroleros.*



*Nota: esta figura hace una comparación de las emisiones de CO2 entre proyectos geotérmicos y también de petróleos editado por el autor (Fridleifsson, 2001).*

### 7.3.1.3 Impacto en la Biodiversidad y el Ecosistema Local

El campo EIP ha experimentado una alteración significativa debido a las actividades de extracción de petróleo. Sin embargo, la explotación geotérmica tiende a tener un impacto ambiental menor en términos de biodiversidad y ecosistema. Los estudios indican que los proyectos geotérmicos en sitios ya industrializados suelen tener una huella ecológica reducida, debido a la menor necesidad de nueva infraestructura y a la disminución del ruido y las vibraciones en comparación con las operaciones petroleras (Bromley et al., 2010).

Una evaluación comparativa de impactos en diferentes tipos de proyectos (Tabla 7) evidencia que los proyectos geotérmicos en campos previamente explotados, como el EIP, presentan menores riesgos para la biodiversidad.

## POTENCIAL DE ENERGIA GEOTERMICA

*Tabla 7*  
*Comparación del impacto en la biodiversidad entre proyectos geotérmicos y petroleros.*

| <b>Tipo De Proyecto</b> | <b>Impacto En Biodiversidad</b> | <b>Alteración Del Ecosistema</b> |
|-------------------------|---------------------------------|----------------------------------|
| Petrolero               | Alto                            | Alto                             |
| Geotérmico              | Medio                           | Bajo                             |

Nota: tabla adecuada de aspecto ecológico sobre proyectos petroleros y también proyectos geotérmicos editada por el autor datos de (Bromley et al., 2010).

### **7.3.1.4 Gestión de Residuos y Uso del Suelo**

En cuanto a la gestión de residuos y el uso del suelo, el campo EIP ya cuenta con sistemas establecidos para manejar los desechos generados por la producción de petróleo. La transición hacia la explotación geotérmica no requerirá grandes modificaciones en estos sistemas, ya que la generación de residuos en un proceso ORC es mínima. Los estudios sobre la gestión de residuos en proyectos geotérmicos sugieren que la mayoría de los desechos pueden ser manejados con la infraestructura existente (Özerol et al., 2013).

La reutilización de la infraestructura existente no solo minimiza el impacto ambiental adicional, sino que también optimiza el uso del suelo, reduciendo la necesidad de nuevas instalaciones que podrían perturbar aún más el entorno.

### **7.3.2 Contaminantes del fluido geotérmico**

En la evaluación del potencial de energía geotérmica del campo EIP, se realizaron estudios exhaustivos para determinar su viabilidad técnica, ambiental y económica. Sin embargo, uno de los parámetros cruciales, la presencia de contaminantes en el fluido geotérmico, no fue considerado

## POTENCIAL DE ENERGIA GEOTERMICA

en la evaluación original. Este parámetro es fundamental, ya que los contaminantes pueden tener un impacto significativo en la eficiencia de la planta geotérmica a lo largo del tiempo.

### **7.3.2.1 Impacto de los Contaminantes en la Eficiencia de la Planta Geotérmica**

La presencia de contaminantes en el fluido geotérmico, como sulfuro de hidrógeno, sílice, cloruros y otros minerales, puede afectar negativamente la eficiencia de conversión de energía. Según estudios previos, la eficiencia de una planta geotérmica puede verse reducida entre un 10% y un 20% debido a la acumulación de depósitos minerales en los intercambiadores de calor, la corrosión de los equipos, y la necesidad de realizar mantenimientos más frecuentes (DiPippo, 2012). Esta disminución en la eficiencia puede impactar directamente la viabilidad económica del proyecto, incrementando los costos operativos y reduciendo la producción de energía neta.

### **7.3.2.2 Ausencia del Parámetro en la Evaluación del Campo EIP**

En el caso del campo EIP, la evaluación de su potencial geotérmico se llevó a cabo sin considerar la presencia de contaminantes en el fluido. Esto representa una limitación en los resultados obtenidos, ya que la ausencia de este análisis podría sobreestimar la eficiencia y la rentabilidad del proyecto. Dado que los contaminantes pueden afectar considerablemente la operación de la planta a lo largo del tiempo, es necesario reconocer esta deficiencia en la evaluación original.

Para abordar esta omisión, se debe considerar una reducción potencial de la eficiencia del 10% al 20%, como se ha reportado en otros proyectos geotérmicos donde los contaminantes no fueron inicialmente considerados. Este ajuste permitirá una evaluación más realista de la eficiencia y la viabilidad del proyecto a largo plazo.

## POTENCIAL DE ENERGIA GEOTERMICA

### **7.4 Aplicación de Parámetros Económicos**

El análisis económico de una planta de energía geotérmica requiere una evaluación exhaustiva de los costos relacionados con la instalación, operación y mantenimiento de los módulos ORC en el campo EIP. Debido a que este campo ha sido previamente explotado como yacimiento petrolero, se ha logrado una disminución considerable en los costos iniciales de exploración y perforación. En consecuencia, los costos operativos y de instalación propios del proceso geotérmico adquieren mayor relevancia para garantizar la viabilidad del proyecto a largo plazo.

#### **7.4.1 Costos de Mantenimiento**

En el campo EIP, el mantenimiento regular de equipos como turbinas, generadores y sistemas de intercambio de calor es crucial debido a la naturaleza corrosiva de los fluidos de producción. Se ha estimado un costo anual de mantenimiento de 35,000 USD, lo que subraya la importancia de planificar adecuadamente estos gastos en el presupuesto operativo (Kagel, Bates, & Gawell, 2007).

#### **7.4.2 Consumo de Energía en la Bomba**

El consumo energético de las bombas es otro factor significativo en los costos operativos. En el campo EIP, se ha calculado un requerimiento energético de 401.8 Kwh/día, lo que representa un costo anual de 12,184.18 USD. Es fundamental monitorear este consumo para optimizar los costos (Bloomquist, 2003).

## POTENCIAL DE ENERGIA GEOTERMICA

### **7.4.3 Inversión Inicial**

La instalación de los módulos ORC en el campo EIP tiene un costo aproximado de 1,900 USD/Kw instalado. Por ejemplo, para el pozo EIP-1, que genera 1,530.5 Kw, el costo total asciende a 2,907,950 USD. Este costo de inversión inicial es esencial para establecer las bases económicas del proyecto.

### **7.4.4 Análisis de Costos Operativos en el Campo EIP**

La operación diaria y el monitoreo constante son esenciales para garantizar la eficiencia y seguridad operativa en el campo EIP. Los costos asociados con la supervisión y monitoreo continuo del rendimiento de la planta, así como las condiciones geotérmicas, se han considerado al estimar la viabilidad económica del proyecto. En este contexto, un equipo operativo especializado se encarga de supervisar los módulos ORC y detectar posibles problemas de manera temprana, asegurando así una operación eficiente (Holm et al., 2012).

El funcionamiento de los equipos auxiliares, como bombas de agua y sistemas de enfriamiento, también requiere una cantidad considerable de energía. El monitoreo y la gestión eficiente de este consumo son cruciales para minimizar los costos operativos y maximizar la rentabilidad (Bloomquist, 2003).

#### **7.4.4.1 Gestión de Residuos y Cumplimiento Normativo**

La gestión adecuada de los residuos generados durante la operación de la planta es crítica para el cumplimiento ambiental y la sostenibilidad del proyecto. En el campo EIP, se han implementado sistemas eficientes de tratamiento de fluidos geotérmicos, lo que ha permitido

## POTENCIAL DE ENERGIA GEOTERMICA

minimizar los costos asociados con la gestión de residuos (DiPippo, 2012). Además, los costos recurrentes de seguros y permisos se han optimizado, dado que el campo ya cuenta con la infraestructura necesaria debido a su anterior explotación como campo petrolero (IRENA, 2017).

### 7.4.4.2 Impacto de los Costos Operativos en la Viabilidad del Proyecto

La combinación de estos costos operativos debe ser analizada detalladamente para determinar su impacto en la rentabilidad global del proyecto. Un análisis de sensibilidad permitirá identificar los factores que podrían afectar significativamente el flujo de caja y, por ende, la viabilidad económica del proyecto en el campo EIP. Según la tesis de Bohórquez Araque y Garavito Reyes (2019), el ahorro en costos de exploración y perforación, junto con los ingresos proyectados por la venta de energía y la posible comercialización de bonos de carbono, sugieren que el proyecto sigue siendo financieramente viable.

*Tabla 8 Evaluación financiera*

| Pozo  | Energía generada neta (Kwh/día) | Energía generada 85.5% (Kwh/día) | días en operación | Costo de venta COP/Kwh (Jun 2019) | Proyección Ganancia (USD/año) |
|-------|---------------------------------|----------------------------------|-------------------|-----------------------------------|-------------------------------|
| EIP-1 | 36732                           | 31405.86                         | 361               | 208.85                            | 691588.44                     |
| EIP-2 | 37524                           | 32083.02                         | 361               | 208.85                            | 706500.18                     |
| EIP-3 | 33617                           | 28742.535                        | 361               | 208.85                            | 632939.36                     |

*Nota : (Bohórquez Araque & Garavito Reyes, 2019).*

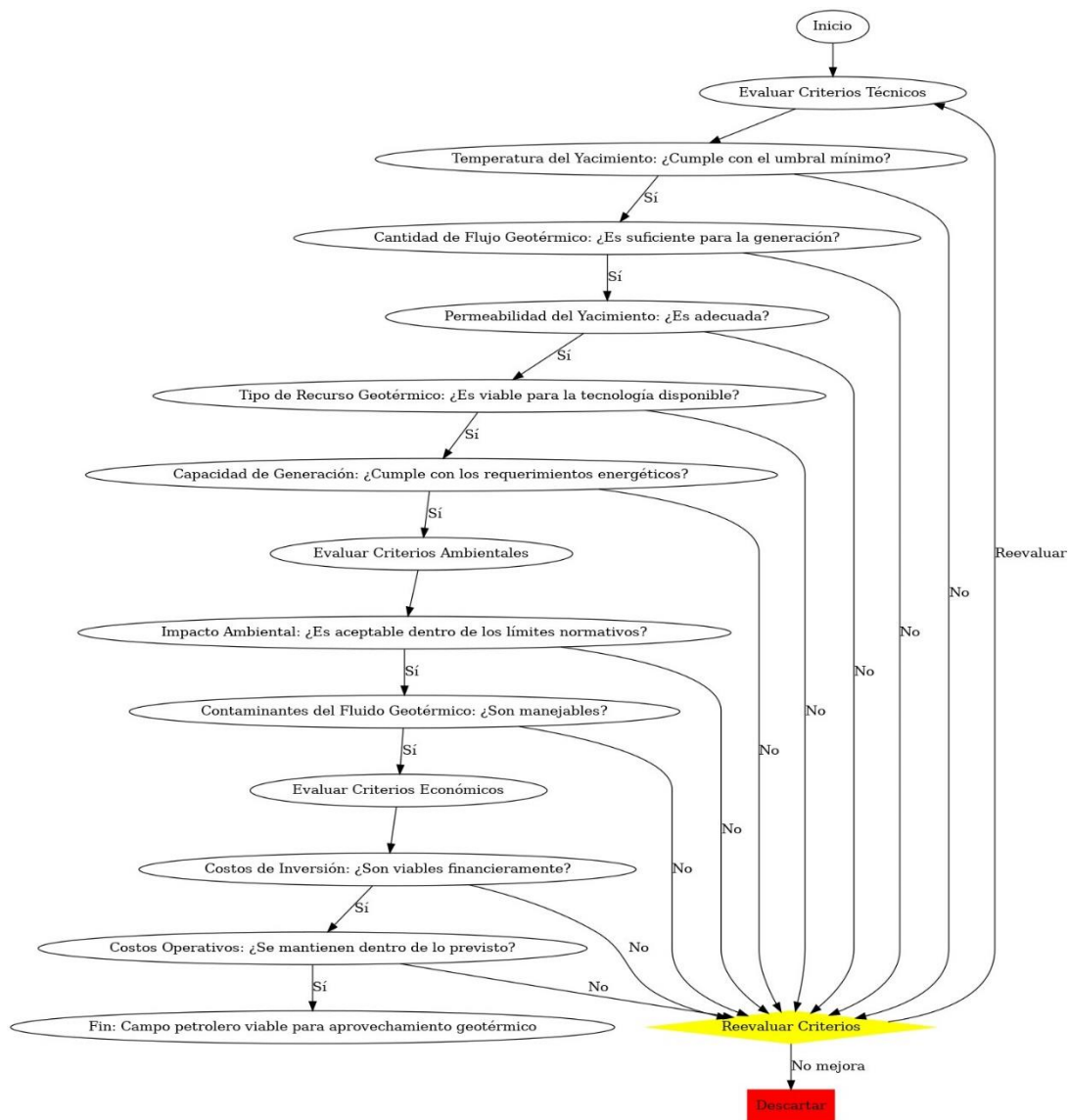
## POTENCIAL DE ENERGIA GEOTERMICA

El análisis de sensibilidad presentado en la tesis permite evaluar el impacto de diversas variables, como las fluctuaciones en los precios de la energía y los costos de operación. Además, se calculan indicadores económicos clave, como la tasa interna de retorno (TIR) y el valor actual neto (VAN), que proporcionan una estimación clara de la viabilidad del proyecto a largo plazo (Bohórquez Araque & Garavito Reyes, 2019).

## POTENCIAL DE ENERGIA GEOTERMICA

### 7.5 Diagrama de flujo de criterios para evaluar el potencial de energía geotérmica en campos de hidrocarburos

Figura 11 Diagrama de flujo



*Nota: el diagrama de flujo lo realizaron los autores con el fin de llevar una ruta específica de los pasos a seguir en un proyecto geotérmico*

## POTENCIAL DE ENERGIA GEOTERMICA

### 8. Conclusiones

La identificación y aplicación de criterios específicos para evaluar el potencial de energía geotérmica en campos petroleros de Colombia resulta fundamental para garantizar la viabilidad, eficiencia y sostenibilidad de dichos proyectos. Estos criterios se consideran esenciales no solo para determinar la factibilidad técnica y económica, sino también para realizar una evaluación integral que contemple las particularidades geológicas, operativas y ambientales propias del contexto colombiano.

la aplicación de estos criterios en el campo de estudio EIP reveló resultados prometedores. El gradiente geotérmico, con un promedio de 31°C por kilómetro, es consistente con otros campos geotérmicos exitosos a nivel mundial, lo que justificó la continuidad del proyecto en este campo específico. Además, el análisis del flujo de fluidos en el campo EIP, con volúmenes que oscilan entre 16,748 y 28,482 barriles diarios, demostró ser suficiente para mantener un suministro constante a una planta geotérmica, reforzando así la viabilidad técnica del proyecto.

No obstante, uno de los desafíos identificados en la operación geotérmica es la presencia de contaminantes en el fluido geotérmico, los cuales pueden afectar significativamente la eficiencia de la planta. Según estudios previos, estos contaminantes pueden reducir la eficiencia entre un 10% y un 20% en un periodo considerable, afectando la rentabilidad y la sostenibilidad del proyecto a largo plazo. Por lo tanto, se considera crucial la implementación de estrategias efectivas de mitigación y tratamiento de estos contaminantes para minimizar su impacto y asegurar la operación óptima de la planta.

## POTENCIAL DE ENERGIA GEOTERMICA

Finalmente, desde una perspectiva ambiental, si bien la generación de energía geotérmica presenta un menor impacto en comparación con la producción de hidrocarburos, resulta imprescindible la realización de estudios de impacto ambiental (EIA) detallados. Estos estudios garantizarán que los proyectos sean ambientalmente sostenibles, minimizando cualquier posible efecto adverso sobre las aguas subterráneas y otros recursos naturales.

## POTENCIAL DE ENERGIA GEOTERMICA

**Referencias Bibliográficas**

- 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).
- Andrea del Pilar Bohorquez Araque, H. Y. G. R. (2019). *Analisis de viabilidad en la implementacion de energia geotermica en aguas asocoadas a la produccion de hidrocarburos*. Universidad industrial de santander.
- Tarbuck, E. J., & Lutgens, F. K. (2005). *Ciencias de la tierra: Una introducción a la geología física*. Pearson Educación.
- Gutiérrez, D., & Orjuela, J. (2009). *Análisis tecnológico para la explotación de energía geotérmica en zonas de alto potencial en Colombia*.
- Hochstein, M. P. (1990). *Classification and assessment of geothermal resources*. *Geothermal Science & Technology*, 3(1-4), 1-13.
- Bertani, R. (2005). *World Geothermal Power Generation in 2005*. Geothermal Energy Association.
- Axelsson, G., & Stefansson, V. (2003). *Sustainable Management of Geothermal Resources*. Proceedings of the International Geothermal Conference.
- Castillo, J., & Ramírez, L. (2018). *Geotermia: Fundamentos y aplicaciones*. Editorial Científica.
- Gómez, A., & Pérez, R. (2017). *Reservorios geotérmicos: Exploración y aprovechamiento*. Ediciones Técnicas.

## POTENCIAL DE ENERGIA GEOTERMICA

- Hernández, M., Castillo, J., & Vargas, P. (2019). Cubiertas geotérmicas y su importancia en la retención de fluidos. Universidad Nacional de Colombia.
- López, C. (2020). Procesos de recarga hídrica en sistemas geotérmicos. *Revista de Energías Renovables*, 15(2), 45-60.
- Martínez, F., & Silva, P. (2022). Métodos geofísicos aplicados a la energía geotérmica. Editorial Universitaria.
- Rodríguez, L. (2021). Investigaciones geocientíficas para la detección de zonas geotérmicas. *Revista de Estudios Geotérmicos*, 28(1), 101-120.
- Alfaro, C., Alvarado, I., Quintero, W., Vargas, C., & Briceño, L. A. (2009). MAPA PRELIMINAR DE GRADIENTES GEOTÉRMICOS DE COLOMBIA. 34.
- IRENA. (2019). Global Trends. Recuperado el 23 de agosto de 2019, de International Renewable Energy Agency
- Lund, J. W., & Boyd, T. L. (2016). Direct utilization of geothermal energy 2015 worldwide review. *Geothermics*, 60, 3-23.
- García, C., Fernández, P., & Ramírez, M. (2018). Geothermal energy in the Andean region: Potential and development prospects. *Energy Reports*, 4, 35-49.
- Cheng, W. L., Li, T. T., Nian, Y. Le, & Wang, C. L. (2013). Studies on geothermal power generation using abandoned oil wells. *Energy*, 59, 248–254. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2013.07.008>
- Barker, B.J. (1991). The Geysers: An Active Geothermal Field. *Geological Society of America Bulletin*, 103(2), 203-212. [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1991\)103<0203>2.3.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1991)103<0203>2.3.CO;2)

## POTENCIAL DE ENERGIA GEOTERMICA

- Huddleston-Holmes, C., Holgate, F., Hore-Lacy, I., & Goldstein, B. (2010). Geothermal Energy Potential in the Cooper Basin. Proceedings World Geothermal Congress 2010, Bali, Indonesia. Retrieved from <https://www.geothermal-energy.org>
- Baillieux, P., Schill, E., Edel, J.B., & Mauri, G. (2013). Permeability distribution in the Upper Rhine Graben geothermal reservoirs. *Geothermal Energy*, 1(1), 4. <https://doi.org/10.1186/2195-9706-1-4>
- Agencia Internacional de Energía (AIE). (2011). Geothermal Technology Roadmap. <https://www.iea.org/reports/geothermal-energy>
- DiPippo, R. (2016). *Geothermal Power Generation: Developments and Innovation*. Woodhead Publishing.
- DiPippo, R. (2012). *Geothermal Power Plants: Principles, Applications, Case Studies and Environmental Impact* (3rd ed.). Butterworth-Heinemann.
- Glassley, W. E. (2014). *Geothermal Energy: Renewable Energy and the Environment*. CRC Press.
- Axelsson, G. (2013). Sustainable geothermal utilization – Case histories, definitions, research issues and modelling. *Geothermics*, 39(3), 283-291. <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2012.12.001>
- Bödvarsson, G. S., & Witherspoon, P. A. (1989). Geothermal reservoir engineering. In *Advances in Heat Transfer* (Vol. 18, pp. 209-232). Academic Press.
- Grant, M. A., & Bixley, P. F. (2011). *Geothermal Reservoir Engineering* (2nd ed.). Academic Press.
- Barker, B. J., Gulati, M., Bryan, M., & Riedel, K. (1992). Geysers reservoir performance. *Geothermal Resources Council Transactions*, 16, 411-418.

## POTENCIAL DE ENERGIA GEOTERMICA

- Björnsson, G. (2006). Reservoir conditions at Nesjavellir in the Hengill geothermal area, SW-Iceland. Proceedings of the 31st Workshop on Geothermal Reservoir Engineering. Stanford University.
- Hunt, T. M. (2000). Five decades of geothermal research and development in New Zealand (1950-2000). *Geothermics*, 29(6), 731-760. [https://doi.org/10.1016/S0375-6505\(00\)00024-9](https://doi.org/10.1016/S0375-6505(00)00024-9)
- Axelsson, G. (2012). Sustainable Management of Geothermal Resources. *Geothermics*, 39(4), 312-320.
- Bertani, R. (2016). Geothermal Power Generation in the World 2010–2014 Update Report. *Geothermics*, 60, 31-43.
- Bloomquist, R. G. (2003). Geothermal District Heating in the United States: A Preliminary Report. Idaho National Engineering and Environmental Laboratory.
- DiPippo, R. (2012). *Geothermal Power Plants: Principles, Applications, Case Studies and Environmental Impact* (3rd ed.). Butterworth-Heinemann.
- DiPippo, R. (2015). *Geothermal Power Plants: Evolution and Performance Assessments*. Butterworth-Heinemann.
- Fridleifsson, I. B., Bertani, R., Huenges, E., Lund, J. W., Ragnarsson, A., & Rybach, L. (2008). The Possible Role and Contribution of Geothermal Energy to the Mitigation of Climate Change. In IPCC Scoping Meeting on Renewable Energy Sources.
- Glassley, W. E. (2010). *Geothermal Energy: Renewable Energy and the Environment*. CRC Press.
- Lund, J. W., Freeston, D. H., & Boyd, T. L. (2010). Direct Utilization of Geothermal Energy 2010 Worldwide Review. *Geothermics*, 39(3), 189-216.

## POTENCIAL DE ENERGIA GEOTERMICA

- Tester, J. W., Anderson, B. J., Batchelor, A. S., Blackwell, D. D., DiPippo, R., Drake, E. M., & Moore, M. C. (2006). *The Future of Geothermal Energy: Impact of Enhanced Geothermal Systems (EGS) on the United States in the 21st Century*. Massachusetts Institute of Technology.
- Armstead, H. C. H. (1983). *Geothermal Energy: Its Past, Present and Future Contributions to the Energy Needs of Man*. E. & F. N. Spon Ltd.
- Muffler, L. J. P., & Cataldi, R. (1978). Methods for regional assessment of geothermal resources. *Geothermics*, 7(2-4), 53-89.
- Dickson, M. H., & Fanelli, M. (2003). *Geothermal Energy: Utilization and Technology*. Earthscan.
- Fridleifsson, I.B. (2001). Geothermal Energy for the Benefit of the People. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 5(3), 299-312.
- Glassley, W. E. (2015). *Geothermal energy: Renewable energy and the environment*. CRC Press.
- Lund, J. W., & Boyd, T. L. (2016). *Direct utilization of geothermal energy 2015 worldwide review*. *Geothermics*, 60, 66-93.
- Dickson, M. H., & Fanelli, M. (2004). *Geothermal energy: Utilization and technology*. Routledge.
- Bloomquist, R. G. (2003). *Geothermal power generation: Developments and innovations*. Geothermal Resources Council.

## POTENCIAL DE ENERGIA GEOTERMICA

- Bohórquez Araque, A. D. P., & Garavito Reyes, H. Y. (2019). Análisis de viabilidad en la implementación de energía geotérmica en aguas asociadas a la producción de hidrocarburos [Tesis de grado, Universidad].
- DiPippo, R. (2012). Geothermal power plants: Principles, applications, case studies and environmental impact (3rd ed.). Butterworth-Heinemann.
- Holm, A., Blodgett, L., Jennejohn, D., & Gawell, K. (2012). Geothermal energy: International market update. Geothermal Energy Association.
- IRENA (2017). Geothermal power: Technology brief. International Renewable Energy Agency.
- Kagel, A., Bates, D., & Gawell, K. (2007). A guide to geothermal energy and the environment. Geothermal Energy Association.