



**PROPUESTA PARA EL DESARROLLO DE UN PROYECTO  
GEOTÉRMICO EN CASCADA EN EL MUNICIPIO DE VILLAMARÍA,  
CALDAS**

**Lucrecia Acosta Ospina**

Pontificia Universidad Javeriana  
Facultad de Estudios Ambientales y Rurales  
Bogotá, Colombia  
2020



**PROPUESTA PARA EL DESARROLLO DE UN PROYECTO  
GEOTÉRMICO EN CASCADA EN EL MUNICIPIO DE VILLAMARÍA,  
CALDAS**

Presentado por: **Lucrecia Acosta Ospina** para optar al grado de magíster en Gestión Ambiental  
por la Pontificia Universidad Javeriana

Director del trabajo:

**PhD Ricardo Quijano Hurtado**

Catedrático del Departamento de Ecología y Territorio

Facultad de Estudios Ambientales y Rurales

Pontificia Universidad Javeriana

BOGOTÁ, 2020

**ARTÍCULO 23, RESOLUCIÓN #13 DE 1946.**

*“La Universidad no se hace responsable por los conceptos emitidos por sus alumnos en sus trabajos de tesis. Sólo velará porque no se publique nada contrario al dogma y a la moral católica y porque las tesis no contengan ataques personales contra persona alguna, antes bien se vean en ellas el anhelo de buscar la verdad y la justicia”*

## Listado de abreviaturas

Al	Aluminio
ANLA	Autoridad Nacional de Licencias Ambientales
As	Arsénico
B	Boro
BID	Banco Interamericano de Desarrollo
BRGM	Bureau de Recherches Géologiques et Minières
C	Centígrado
CAR	Corporación Autónoma Regional
Cd	Cadmio
CELEC	Corporación Eléctrica del Ecuador
CH <sub>4</sub>	Metano
CHEC	Central Hidroeléctrica de Caldas
CK	Ciclo Kalina
CCMO	Cámara de Comercio de Manizales por Caldas
CMGRD	Consejo Municipal para la Gestión del Riesgo de Desastres
CNE	Comisión Nacional de Energía
CO <sub>2</sub>	Dióxido de Carbono
CORPOCALDAS	Corporación Autónoma Regional de Caldas
CREG	Comisión de Regulación de Energía y Gas
CSP	Planta de energía solar por concentración
CVCBCM	Complejo Volcánico Cerro Bravo-Cerro Machín
DANE	Departamento Administrativo Nacional de Estadística
DNP	Departamento Nacional de Planeación
EIA	Energy Information Administration
ENAP	Empresa Nacional del Petróleo
ENFICC	Energía Firme para el Cargo por Confiabilidad
EPA	Environmental Protection Agency
EPM	Empresas Públicas de Medellín
ETSAP	Energy Technology Systems Analysis Program
F	Fahrenheit
Fe	Hierro
GEI	Gases de efecto invernadero
GNC	Gases no condensables
GPS	Global Position System
GW	Gigavatio
H <sub>2</sub> S	Sulfuro de hidrógeno
Ha	Hectáreas
Hg	Mercurio
HTST	Alta temperatura/corto lapso (High Temperature/Short Time)
ICE	Instituto Costarricense de Electricidad
ICEL	Instituto Colombiano de Energía Eléctrica
IEA	International Energy Agency
INECEL	Instituto Ecuatoriano de Electrificación
INGEOMINAS	Instituto Nacional de Investigaciones Geológico Mineras

InSAR	Interferometría radar de apertura sintética
Invermales	Inventario Nacional de Manifestaciones Hidrotermales
IRENA	Agencia Internacional de las Energías Renovables
IVA	Impuesto al valor agregado
km <sup>2</sup>	Kilómetro cuadrado
kW	Kilovatio
kWh	Kilovatio hora
L	Litro
lb	Libra
LCOE	Costo nivelado de energía (Levelized cost of energy)
Li	Litio
LTLT	Baja temperatura/tiempo prolongado (Low Temperature Long Time)
m <sup>2</sup>	Metro cuadrado
MADS	Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible - Colombia
MARN	Ministerio del Medio Ambiente y Recursos Naturales – El Salvador
Mininterior	Ministerio del Interior - Colombia
MME	Ministerio de Minas y Energía- Colombia
Mn	Manganeso
MSNM	Metros sobre el nivel del mar
MW	Megavatio
MWe	Megavatio eléctrico
MWh	Megavatio hora
MWt	Megavatio térmico
N <sub>2</sub> O	Óxido nitroso
ND	No definido
NE-SW	Noreste -suroeste
NH <sub>3</sub>	Amoniaco
NNE-SSW	Nor-noreste – Sur-suroeste
NRC	National Research Council
N-S	Norte-Sur
NW-SE	Noroeste-sureste
OLADE	Organización Latinoamericana de Energía
ORC	Ciclo orgánico de Rankine
Pb	Plomo
PCH	Pequeñas centrales hidroeléctricas
PM	Material Particulado
PPA	Power purchase agreement (Contrato de compra de energía)
SGC	Servicio Geológico Colombiano
SIG	Sistemas de Información Geográfica
SO <sub>2</sub>	Dióxido de azufre
tCO <sub>2</sub>	Toneladas de dióxido de carbono
Tj	Terajulio
TIR	Tasa interna de retorno (TIR)
UPME	Unidad de Planeación Minero Energética
USD	Dólar de los Estados Unidos de Norteamérica (moneda)
Zn	Zinc

## Contenido

<b>1. Introducción</b> .....	12
1.1. Problema .....	12
1.2. Justificación .....	12
1.3. Propósito del proyecto y preguntas de investigación .....	13
<b>2. Objetivos</b> .....	13
2.1. General.....	13
2.2. Específicos .....	14
<b>3. Marco de referencia</b> .....	14
3.1. Marco Conceptual .....	14
3.2. Marco Teórico .....	15
3.3. Marco normativo y legal.....	23
3.4. Antecedentes .....	25
<b>4. Área de estudio</b> .....	27
4.1. Geografía .....	27
4.2. Aspectos socioeconómicos .....	28
4.3. Recursos naturales.....	28
<b>5. Materiales y métodos</b> .....	29
5.1. Tipo de investigación .....	29
5.2. Métodos de Recolección de datos .....	30
5.3. Diagrama de Flujo .....	31
<b>6. Desarrollo de la investigación</b> .....	32
6.1. Estadio descriptivo .....	32
6.2. Estadio analítico .....	32
6.3. Estadio comparativo .....	33
6.4. Estadio explicativo .....	33
6.5. Estadio predictivo.....	35
6.6. Estadio proyectivo.....	37
<b>7. Formulación de la propuesta</b> .....	37
7.1. Identificación del área de estudio y comunidad(es) .....	38
7.2. Elementos básicos necesarios para el desarrollo de un proyecto en cascada .....	39
7.3. Evaluación de resultados .....	45
7.4. Evaluación de impacto.....	46

7.5.Elementos adicionales a ser abordados en otras regiones con potencial geotérmico en Colombia .....	46
<b>8. Resultados</b> .....	49
<b>9. Discusión</b> .....	50
<b>10. Conclusiones y recomendaciones</b> .....	51
<b>11. Referencias Citadas</b> .....	53
<b>12. Anexos</b> .....	64
Anexo A. Planta de vapor directo (Modificado de IRENA, 2017c). .....	64
Anexo B. Planta doble flash (Modificado de IRENA, 2017c). .....	64
Anexo C. Planta binaria (Modificado de IRENA, 2017c).....	65
Anexo D. Planta de ciclo combinado (Modificado de ORMAT, 2017).....	65
Anexo E. Potencial geotérmico en Colombia .....	66

## Lista de Tablas

Tabla 1. Clasificación de los recursos geotérmicos por temperatura.....	15
Tabla 2. Líderes mundiales en el uso directo de energía geotérmica .....	16
Tabla 3. Uso directo de la energía geotérmica en Latinoamérica.....	16
Tabla 4. Tecnologías comúnmente usadas de acuerdo con las características del reservorio.....	18
Tabla 5. Potenciales impactos ambientales de proyectos geotérmicos de uso directo .....	20
Tabla 6. Niveles de emisión por contaminante y fuente de energía. ....	20
Tabla 7. Impactos que se podrían esperar en los proyectos de generación eléctrica .....	21
Tabla 8. Marco legal geotérmico en diferentes países del mundo.....	24
Tabla 9. Áreas geotérmicas con perspectivas de desarrollo en Colombia .....	26
Tabla 10. Aproximaciones del costo en USD/MW y el costo nivelado de energía LCOE.....	35
Tabla 11. Costos indicativos para el desarrollo geotérmico de 50 MW. ....	36
Tabla 12. Zona de interés para la exploración geotérmica en Villamaría, Caldas. ....	39
Tabla 13. Datos de producción de leche pasteurizada .....	44
Tabla 14. Características socioeconómicas de las regiones geotérmicas en Colombia .....	47

## Lista de Figuras

Figura 1. Localización de la zona de estudio.....	29
Figura 2. Diagrama conceptual de la utilización en cascada de la energía geotérmica .....	38
Figura 3. Costo de un proyecto de generación eléctrica y perfil de riesgos en las fases .....	40
Figura 4. Diagrama conceptual de la utilización geotérmica en cascada.....	42
Figura 5. Diagrama de flujo de pasteurización de leche Medo-Bel Creamery.....	45

## Resumen

Los proyectos geotérmicos en cascada se utilizan ampliamente en todo el mundo. Usando el calor geotérmico residual del proceso de generación eléctrica se pueden llevar a cabo proyectos secundarios que, en condiciones normales, emplearían fuentes de energías no renovables y contaminantes para su ejecución. Una de las principales ventajas de los proyectos en cascada es que aumenta la eficiencia de las plantas geotérmicas; además, de que permite una participación más activa de las comunidades, mejorando la calidad de vida, al mismo tiempo de que se promueve y hace uso de fuentes de energía renovable con menores impactos ambientales.

En este trabajo se definen de forma proyectiva, los elementos básicos para la ejecución de un proyecto en cascada en el municipio de Villamaría, Caldas que es donde se localiza el proyecto geotérmico más avanzado del país, aun cuando todavía no existe una planta de generación eléctrica. A partir de los datos bibliográficos y antecedentes de la región se proponen proyectos de uso directo como invernaderos, acuicultura y pasteurización de leche.

Adicionalmente, se identifican las demás regiones del país que podrían reproducir la iniciativa de un proyecto en cascada y también se pone en consideración las complejidades sociales y económicas de estos sectores.

**Palabras clave:** Geotermia, generación eléctrica, uso directo, proyecto en cascada, energías renovables, desarrollo rural, pasteurización, acuicultura, invernadero

## Abstract

Cascade geothermal projects are extensively used worldwide. Using the residual geothermal heat from the electricity generation process, secondary projects can be carried out that, under normal conditions, would use non-renewable and polluting energy sources for their execution. One of the main advantages of cascade projects is that it increases the efficiency of geothermal plants; in addition, it allows a more active participation of the communities, improving the quality of life, at the same time that it promotes and makes use of renewable energy sources with fewer environmental impacts.

In this work, a projection of the basic elements for the execution of a cascade project in the municipality of Villamaría, Caldas, where the most advanced geothermal project in the country is located, are defined, even though there is still no power generation plant. From the bibliographic data and background of the region, projects for direct use such as greenhouses, aquaculture, and milk pasteurization are proposed.

Additionally, the other regions of the country that could reproduce the initiative of a cascade project are described, and the social and economic complexities of these sectors are taken into consideration.

**Key words:** Geothermal energy, electric generation, direct use, cascade project, renewable energy, rural development, pasteurization, aquaculture, greenhouse

## **Agradecimientos y dedicatoria**

Quiero agradecer a mi director de trabajo, Dr. Ricardo Quijano Hurtado profesor de la Facultad de Estudios Ambientales y Rurales por aceptar orientar este trabajo y por su tiempo y disposición para resolver mis preguntas.

A la Pontificia Universidad Javeriana y a su Programa de Becas Ditter Mosquera que me permitió culminar la maestría. Especial agradecimiento a la decana de la Facultad de Estudios Ambientales y Rurales Dr. María Adelaida Farah Quijano y al director de la maestría Dr. Juan David Amaya Espinel ya que gracias a su gestión pude continuar con la maestría en un momento de dificultad.

A Julián López Palacio de CHEC-EPM por dedicar parte de su tiempo en explicarme la dinámica de desarrollo de los proyectos geotérmicos en Colombia y del mercado energético nacional.

A Grupo Dewhurst por su apoyo económico parcial, y al Dr. Warren T. Dewhurst, por haber sido guía en la elección del tema de mi tesis y por brindarme la oportunidad de trabajar en este campo tan fascinante como es la geotermia.

Agradezco a mis compañeros y profesores de la maestría por su apoyo incondicional y aporte desde sus diferentes campos para enriquecer mi trabajo.

*Dedico este trabajo a mi familia por ser base de mi formación como persona y profesional.*

*Gracias por enseñarme a amar lo que hago.*

# **1. Introducción**

## **1.1. Problema**

Durante los últimos 25 años, ha habido una creciente concienciación por parte de las Naciones para hacer frente al sinnúmero de problemáticas ambientales como el calentamiento global, la contaminación del agua, el suelo, y la atmósfera y todos los efectos que éstos tienen sobre las diferentes formas de vida.

Como estrategia, los países han replanteado sus políticas ambientales. Entre las medidas adoptadas se ha incluido el uso estratégico de los recursos, en este caso, de las energías renovables como herramientas clave en la reducción de los gases de efecto invernadero, la disminución de la contaminación, además del papel que juegan en la sostenibilidad y diversificación de la economía de las comunidades en donde existe el recurso.

Colombia ha dado pasos en la gestión y desarrollo de las energías renovables; sin embargo, los estudios para el reconocimiento del potencial de todas estas fuentes, aún son menores en comparación a las fuentes convencionales de energía.

Un ejemplo de esto es la energía geotérmica, que aunque puede ser empleada en muchas actividades, los esfuerzos más sobresalientes se han orientado a la identificación de su potencial como fuente generadora de electricidad mientras el desarrollo de proyectos de uso directo (agricultura, la ganadería, y la acuicultura, etc.) han tenido menos estudios.

Actualmente Colombia cuenta con pequeños proyectos geotérmicos de uso directo mayormente en actividades de turismo; no obstante, es importante reconocer los beneficios de este recurso y su potencial capacidad de brindar nuevas oportunidades de desarrollo especialmente en el sector rural que es donde están la mayor parte de las manifestaciones geotérmicas.

## **1.2. Justificación**

Colombia es un país que cuenta con un significativo potencial geotérmico (Bona y Coviello, 2016) y proyectos eléctricos prometedores a lo largo de la cordillera de los Andes; no obstante, el uso y aprovechamiento del mismo se ha limitado a proyectos de uso directo de pequeña escala que suelen ser propiedad de particulares.

Este trabajo pretende proponer un proyecto en cascada que integre la operación de una central geotérmica donde el calor residual sea empleado en proyectos de uso directo como

invernaderos y procesos de pasteurización de leche. Éstos últimos serán propuestos acorde con la dinámica económica del municipio de Villamaría, Caldas.

En este trabajo se podrán identificar las diferentes modalidades y oportunidades de aprovechamiento del recurso geotérmico a partir de ejemplos alrededor del mundo y las medidas de mitigación de los impactos, además de resaltar el potencial papel que juegan las energías renovables en la diversificación de las economías locales, la reducción de la contaminación y la disminución de gases de efecto invernadero.

Por medio de este tipo de iniciativas se espera promover el desarrollo de proyectos de energía asequible y no contaminante que promuevan el crecimiento económico principalmente de los territorios donde existe el potencial.

### **1.3. Propósito del proyecto y preguntas de investigación**

Este trabajo pretende proponer una idea de proyecto donde se identifiquen los elementos básicos para el uso y aprovechamiento de la energía geotérmica en el municipio de Villamaría, Caldas y que éstos puedan extrapolarse a otras regiones del país en las cuales existe este recurso.

Para el desarrollo de este estudio se plantean las siguientes preguntas:

- ¿Cuáles son las modalidades de uso y aprovechamiento del recurso geotérmico en el mundo y las consideraciones ambientales, sociales y económicas para el desarrollo de este tipo de proyectos?
- ¿Cuáles son los elementos básicos identificados en proyectos internacionales para el desarrollo de este tipo de iniciativas en cualquier modalidad que puedan ser ajustados a las características del proyecto geotérmico en el municipio de Villamaría, Caldas?
- ¿Qué otros elementos deberían ser considerados para el desarrollo de un proyecto geotérmico en las demás regiones del país donde existe el recurso geotérmico?

## **2. Objetivos**

### **2.1. General**

Proponer un proyecto geotérmico en cascada en el municipio de Villamaría, Caldas en el cual se incluya la generación eléctrica y los usos directos del recurso ajustado a los aspectos ambientales, sociales y económicos de la región.

## 2.2. Específicos

- Describir las formas de uso y aprovechamiento del recurso geotérmico en el mundo y Colombia y las consideraciones ambientales, sociales y económicas de los proyectos en las modalidades de generación eléctrica y uso directo.
- Definir los elementos básicos necesarios para el desarrollo de un proyecto geotérmico en cascada ajustado a las características ambientales y socioeconómicas del municipio de Villamaría, Caldas.
- Identificar las características adicionales que deberán abordarse en las otras regiones del país con potencial geotérmico ya sea para proyectos en cascada o en cualquiera de las demás modalidades.

## 3. Marco de referencia

### 3.1. Marco Conceptual

#### **Energía geotérmica**

La energía geotérmica es la energía contenida como calor en el interior de la Tierra (Rasmussen *et al.*, 2018). Este calor se transfiere desde el manto hacia la corteza, manifestándose superficialmente de diferentes formas como volcanes, manantiales calientes, alteraciones hidrotermales, etc.

#### **Recurso geotérmico**

Corresponde al reservorio existente en el interior de la Tierra del cual se puede extraer el calor de forma económica ya sea para la generación eléctrica o cualquier otra actividad industrial, agrícola o para aplicaciones domésticas (Gupta y Roy, 2007).

#### **Clasificación de los recursos geotérmicos**

Los recursos geotérmicos suelen clasificarse de acuerdo con la temperatura (véase Tabla 1); sin embargo, la temperatura o la entalpía por sí solas no pueden definir un recurso geotérmico ya que se requieren de dos propiedades termodinámicas para definir el recurso (Lee, 1996). Los recursos de alta energía son aquellos con capacidad de generar electricidad, y los recursos de media y baja energía son buenos para usos directos.

Tabla 1. Clasificación de los recursos geotérmicos por temperatura (Dickson y Fanelli, 1990). Fuentes: (A) Muffler y Cataldi, 1978. (B) Hochstein, 1990. (C) Benderitter y Cormy, 1990. (D) Haenel, Rybach y Stegena, 1988.

<b>Clasificación</b>	<b>A (°C)</b>	<b>B(°C)</b>	<b>C(°C)</b>	<b>D(°C)</b>
Alta entalpía	>150	>225	>200	>150
Media entalpía	90-150	125-225	100-200	-
Baja entalpía	<90	<125	<100	<150

## **Sistema geotérmico**

Se define como sistema geotérmico a la asociación de tres elementos clave, una fuente de calor, un reservorio y un fluido que transfiere el calor. La fuente de calor está asociada a una fuente magmática o al gradiente térmico natural de la Tierra que aumenta con la profundidad. El reservorio es un volumen de roca permeable que presenta una temperatura considerable que calienta los fluidos circulantes; y el fluido (líquido o gaseoso) que se encarga de transferir el calor a niveles superficiales (Rasmussen *et al.*, 2018).

## **Uso directo de la energía geotérmica**

El uso directo de la energía geotérmica es una de las formas más antiguas, versátiles y comunes en el mundo (Dickson y Fanelli, 2003). Ésta consiste en utilizar el calor de las fuentes naturales en procesos domésticos e industriales que requieren de temperaturas entre 10°C y 150°C. Entre estas actividades se incluyen bombas de calor geotérmicas, calefacción de espacios, calefacción para invernaderos, acuicultura, secado de productos agrícolas, usos en procedimientos industriales, balnearios, enfriamiento, y derretimiento de nieve (Lund y Boyd, 2015).

## **Generación eléctrica a partir de energía geotérmica**

El fluido geotérmico puede ser extraído del subsuelo a través de pozos; este fluido pasa a través de una turbina que hace girar un generador eléctrico (Kutscher, 2009b) para producir electricidad en un proceso similar al que ocurre en las termoeléctricas. La primera instalación experimental construida para la producción de electricidad comenzó a principios del siglo XX en Larderello, Italia, en 1905.

## **3.2. Marco Teórico**

### **3.2.1. Uso directo de la energía geotérmica en el mundo**

El uso directo de la geotermia es la forma de uso más antigua en el mundo. Éste se refiere al uso del calor de las manifestaciones termales en diferentes actividades como calefacción de

espacios, calefacción de invernaderos, calefacción en acuicultura, secado de cultivos, calor para procesos industriales, derretimiento de nieve, baño y piscinas, crianza de animales, cultivos de espirulina, desalinización y esterilización de botellas, irrigación, protección contra las heladas, y parques turísticos geotérmicos (Lund y Boyd, 2015). En la Tabla 2 se mencionan los países con mayor capacidad instalada y uso anual de energía.

Tabla 2. Líderes mundiales en el uso directo de energía geotérmica (Modificado de Lund y Boyd, 2015).

<i>Capacidad instalada</i>		<i>Uso anual de energía</i>	
<i>País</i>	<i>MWt</i>	<i>País</i>	<i>TJ/año</i>
China	17,870	China	174,352
Estados Unidos	17,416	Estados Unidos	75,862
Suecia	5,600	Suecia	51,920
Turquía	2,937	Turquía	45,892
Alemania	2,849	Islandia	26,717

En Latinoamérica el uso directo de la geotermia ha estado orientado principalmente hacia la recreación y pequeños proyectos relacionados a la agricultura. En la Tabla 3 se puede encontrar mayor detalle de estos proyectos.

Tabla 3. Uso directo de la energía geotérmica en Latinoamérica.

<i>País</i>	<i>Aplicaciones</i>	<i>Capacidad instalada (MWt)</i>	<i>Uso (TJ/año)</i>	<i>Referencia</i>
Costa Rica	Piscinas (Volcanes Rincón de La Vieja, Miravalles, Arenal y Turrialba)	3.36	56	Lund y Boyd, 2015
	Secado de productos agrícolas	0.66	14.9	
México	Secado de frutas	--	10 (kJ)	Van Nguyen, Arason, Gissurarson & Pálsson, 2015
	Piscinas	1.93	45	Henriquez, 2015
	Curado de productos de concreto (Compañía Bioteca)	1.60	40.40	
Guatemala	Spas	0.21	3.96	
	Deshidratación de frutas (Agroindustrias La Laguna a partir del agua extraída de pozos del campo geotérmico de Amatitlán)	0.50	12.10	Merida, 1999
El Salvador	Invernaderos y piscicultura	2.00	40.0	Herrera, Montalvo y Herrera, 2010
Honduras	Procesos industriales, piscinas	1.93	45.0	Lund, Freeston y Boyd, 2011

<i>País</i>	<i>Aplicaciones</i>	<i>Capacidad instalada (MWt)</i>	<i>Uso (TJ/año)</i>	<i>Referencia</i>
Argentina	Complejos terapéuticos y recreacionales	96.00	820.59	Pesce, 2015
	Calefacción de espacios e invernaderos, piscicultura, derretimiento de nieve, ganadería	163.60	1,000.03	Pesce, 2015
Brasil	Baño, recreación, turismo, industria y calefacción, terapéuticos, bebidas y baños	360.10	6,622.4	Vieira <i>et al.</i> , 2015
Chile	Recreación y turismo (edificios o piscinas), bombas de calor (industria, hogar)	19.91	186.12	Lahsen <i>et al.</i> , 2015
Colombia	Baños termales y turismo	18.00	289.88	Alfaro, 2015
Ecuador	Balnearios y piscinas, calefacción de espacios y piscicultura	5.15	102.401	Beate y Urquizo, 2015
Perú	Balneología	3.00	61	Cruz y Vargas, 2015

### 3.2.2. Generación eléctrica a partir de energía geotérmica en el mundo

El primer proyecto fue desarrollado en Larderello, Italia en 1905 con una capacidad de 20 kW que iluminó la ciudad durante aproximadamente 10 años (Parri y Lazzeri, 2016). Desde entonces, se han desarrollado diferentes tecnologías dependiendo de las características del recurso geotérmico; estas tecnologías son, plantas de vapor seco, plantas flash, plantas binarias, y plantas de ciclo combinado o híbridas (Long *et al.*, 2003). En la Tabla 4 se presenta un resumen del tipo de tecnologías que se emplean en la industria geotérmica para la generación de la electricidad de acuerdo con las características del reservorio (Mburu y Kinyanjui, 2012).

Hasta octubre del 2018, la capacidad total instalada en el mundo era de 14,369 MW, y los países con más de 1,000 MW (1GW) de capacidad instalada eran Estados Unidos, Indonesia, Filipinas, Turquía, y Nueva Zelanda. Los países que siguen en potencial instalado son México (963 MW), Italia (944 MW), Kenia (861 MW) Islandia (755 MW), y Japón (601 MW) (ThinkGeonergy, 2020). En Latinoamérica los líderes en producción son México y El Salvador; recientemente en Suramérica se puso en marcha la primera planta geotérmica en Chile, Cerro Pabellón.

Tabla 4. Tecnologías comúnmente usadas de acuerdo con las características del reservorio (Fuente: Mburu y Kinyanjui, 2012).

<i>Temperatura del reservorio</i>	<i>Fluido del reservorio</i>	<i>Uso común</i>	<i>Tecnología comúnmente usada</i>
Alta >220°C	Agua o vapor	Generación eléctrica Uso directo	Vapor flash; Ciclo combinado (Flash y Binario) Uso directo del fluido Bombas de calor
Media 100°C – 220°C	Agua	Generación eléctrica Uso directo	Ciclo binario, uso directo del fluido, intercambiadores de calor, bombas de calor
Baja 30°C – 150°C	Agua	Uso directo	Uso directo del fluido intercambiadores de calor; bombas de calor

### 3.2.2.1 Plantas de vapor seco

Estas plantas están diseñadas para usar directamente el fluido de baja presión y alto volumen. El fluido condensado se reinyecta o se evapora en torres de refrigeración (IEA-ETSAP, 2010) (Ver Anexo A). La temperatura promedio para esta tecnología es de mínimo 150°C o más. El vapor en este tipo de tecnología debe estar por lo menos un 99.995% seco (DiPippo, 2015) para evitar la formación de incrustaciones y/o la erosión de los componentes de las turbinas o las tuberías. Estas plantas pueden tener potenciales de generación entre 8 MW hasta 140 MW (S&P Global Platts, 2016). Ejemplos de su uso se encuentran en Estados Unidos (The Geysers), Italia (Larderello), Indonesia y Japón (Bertani, 2015).

### 3.2.2.2 Plantas flash

Es el tipo de planta más común y es similar a las plantas de vapor seco; sin embargo, para esta tecnología el vapor se obtiene de un proceso de separación llamado *flashing* (Ver Anexo B). Este vapor se dirige a las turbinas y el condensado resultante se reinyecta o es enviado a un nuevo proceso de *flashing* o a una presión más baja (IEA-ETSAP, 2010). Estas plantas funcionan mejor con temperaturas de pozo superiores a 180°C. La fracción de fluido que sale de los separadores, así como el condensado de vapor (excepto el condensado evaporado en un sistema de enfriamiento húmedo), generalmente se reinyectan. La capacidad de estas plantas depende de si son de un solo *flashing* (0.2 - 80 MW), doble (2 - 110 MW) o triple (60 - 150 MW) (S&P Global Platts, 2016). Ejemplos de su uso se encuentran en Estados Unidos, México, Filipinas, Nueva Zelanda, Turquía y Japón, Islandia, El Salvador, China y Francia (Bertani, 2015).

### 3.2.2.3 Plantas binarias

Estas plantas generalmente se emplean en campos geotérmicos de baja o media entalpía entre 100°C y 170°C. Utilizan el fluido de reservorio, a través de intercambiadores de calor, para calentar un fluido de trabajo (encargado de mover la turbina) en un circuito cerrado (IEA-ETSAP, 2010) (Ver Anexo C). Las plantas binarias varían en tamaño desde menos de 1 MW a 50 MW (S&P Global Platts, 2016). Ejemplos se encuentran en Estados Unidos, Nueva Zelanda, Filipinas, Turquía, Costa Rica, Guatemala, Chile (ENAP, 2018), Alemania, Portugal, Indonesia, Etiopía, Japón, El Salvador, Nicaragua, Kenia, China, Italia, Austria y Australia (Bertani, 2015).

### 3.2.2.4 Plantas de ciclo combinado o híbridas

Algunas plantas geotérmicas utilizan dos ciclos para conseguir una eficiencia eléctrica relativamente alta (DiPippo, 1999; Thain, 2009) (Ver Anexo D). Esta combinación con el ciclo orgánico de Rankine (ORC)<sup>1</sup> puede alcanzar desde unos pocos MW hasta 10 MW (Lund, 1999; DiPippo, 1999).

Las plantas de energía geotérmica híbrida combinan una fuente de calor adicional, por ejemplo, el calor de una planta de energía solar por concentración (CSP siglas en inglés). Este calor se emplea para aumentar la temperatura y la potencia de salida. Ejemplo de estas plantas se encuentran en Estados Unidos (Bertani, 2015) e Italia.

### 3.2.3. Impactos del uso y aprovechamiento de la energía geotérmica

Toda actividad que implique la producción de energía tendrá algún impacto en el ambiente; sin embargo, el grado o alcance de este impacto dependerá de la tecnología utilizada. Estos impactos deben ser identificados, cuantificados y, si es necesario, eliminados o abatidos para cumplir con las regulaciones ambientales (Rybach, 2003).

---

<sup>1</sup> El Ciclo Orgánico Rankine (ORC) es un ciclo termodinámico que convierte el calor en trabajo. El calor se suministra a un circuito cerrado, que normalmente utiliza agua como fluido de trabajo. El Ciclo Orgánico Rankine basado en el agua proporciona aproximadamente el 85% de la producción eléctrica mundial. El principio del ciclo orgánico de Rankine se basa en un turbogenerador que funciona como una turbina de vapor convencional para transformar la energía térmica en energía mecánica y, finalmente, en energía eléctrica a través de un generador eléctrico. En lugar de generar vapor a partir de agua, el sistema de ORC vaporiza un fluido orgánico, caracterizado por una masa molecular más alta que la del agua, lo que conduce a una rotación más lenta de la turbina, presiones más bajas y ninguna erosión de las partes metálicas y las aspas. Fuente: Clean Energy Ahead Turboden. (2019). La tecnología ORC. Brescia - Italia. Recuperado de: <https://www.turboden.com/turboden-orc-technology/1062/the-orc-technology>

### 3.2.3.1. Impactos esperados por el uso directo de la energía geotérmica

El uso directo de la energía geotérmica tiene asociados impactos ambientales similares a los de la generación eléctrica; sin embargo, el grado de estos impactos es proporcional a su escala debido al área empleada y al volumen del fluido extraído, los cuales suelen ser menores que en la generación de energía (Rybach, 2003). En la Tabla 5 se resumen los impactos ambientales de los proyectos geotérmicos de uso directo.

Tabla 5. Potenciales impactos ambientales de proyectos geotérmicos de uso directo; probabilidad (Rybach 2003) <sup>b</sup> y severidad (Lumis, 1989) <sup>a</sup>.

<i>Impacto</i>	<i>Probabilidad de ocurrencia</i> <sup>(a)</sup>	<i>Severidad de la consecuencia</i> <sup>(b)</sup>
Contaminación del aire	B	M
Contaminación de agua superficial	M	M
Contaminación subterránea	B	M
Subsidencia	B	B – M
Altos niveles de ruido	A	B – M
Reventones de pozo	B	B – M
Conflictos con características arqueológicas y cultura	B – M	M – A
Problemas socioeconómicos	B	B
Disposición de residuos sólidos	M	M – A

*a: La contaminación puede ser química o térmica*

*b: B: bajo; M: medio; A: alto*

### 3.2.3.2. Impactos esperados en la generación eléctrica a partir de energía geotérmica

En general, los impactos durante el desarrollo de los proyectos de energía geotérmica dependerán de las características fisicoquímicas del reservorio y de la tecnología empleada (Tabla 6).

Tabla 6. Niveles de emisión por contaminante y fuente de energía. (Fuente: Climate Registry, 2012., EIA 2013c., EPA, 2009., NRC, 2010).

<i>lb/MWh</i>	<i>Vapor seco</i>	<i>Flash</i>	<i>Binaria</i>	<i>Gas natural</i>	<i>Carbón</i>
CO <sub>2</sub>	59.82	396.3	-	861.1	2200
CH <sub>4</sub>	0.0000	0.0000	-	0.01668	0.2523
PM <sub>2.5</sub>	-	-	-	0.1100	0.5900
PM <sub>10</sub>	-	-	-	0.1200	0.7200
SO <sub>2</sub>	0.0002	0.3500	-	0.0043	18.75
N <sub>2</sub> O	0.0000	0.0000	-	0.0017	0.0367

En el caso de las centrales geotérmicas binarias debido a su baja eficiencia de conversión, se liberan cantidades relativamente grandes de calor que pueden emplearse en proyectos en

cascada (uso del calor residual en otros proyectos), además de que puede usarse para mejorar la temperatura del fluido geotérmico con el fin de aumentar la producción de energía (Gehring, 2015). Para las plantas binarias las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) son casi nulas durante la generación ya que son un sistema de circuito cerrado; sin embargo, las torres de enfriamiento en plantas binarias pueden producir cantidades mínimas de contaminantes atmosféricos dependiendo del tipo de torre de enfriamiento y la cantidad de enfriamiento necesario (Matek, 2013).

En la Tabla 7 se hace un resumen de los impactos que se podrían esperar del desarrollo de proyectos geotérmicos para la generación eléctrica.

Tabla 7. Impactos que se podrían esperar en los proyectos de generación eléctrica a partir de energía geotérmica.

<b>Impacto</b>	<b>Características</b>	<b>Mitigación</b>	<b>Referencias</b>
Perturbación de la superficie	Por actividades como la perforación y construcción de las instalaciones (plataformas de perforación, estanques) con áreas de entre 200-2500 m <sup>2</sup> .	Reducir en lo posible el área de las plataformas de perforación.	Kristmannsdóttir y Ármannsson, 2003.
Deslizamientos de tierra	Asociados al tipo de litologías que componen la zona de interés. A menudo las rocas están alteradas hidrotermalmente, por lo tanto, la probabilidad de deslizamiento puede ser mayor.	Evaluación del riesgo (fotointerpretación de las áreas, reconocimiento de campo, ingeniería geológica en detalle e inspecciones geotécnicas detalladas).	Kristmannsdóttir y Ármannsson, 2003; Goff y Goff, 1997; Pioquinto y Caranto, 2005.
Cambios en el paisaje	Afectación del paisaje debido a la construcción de obras. Cambios en características naturales (géiseres, manantiales, fumarolas) por la extracción del fluido.	Socialización de los proyectos para su aceptación con las comunidades. Plantas diseñadas inspiradas en la arquitectura local y el paisaje natural. Promoción del turismo tecnológico. Reinyección del líquido.	Kristmannsdóttir y Ármannsson, 2003; Manzella <i>et al.</i> , 2018; Glover <i>et al.</i> , 2000.
Cambios en el clima local	Las descargas de vapor pueden afectar la formación de nubes y cambiar el clima local especialmente en plantas flash donde un porcentaje considerable del fluido es descarga de vapor.	Esta medida dependerá de las características de los fluidos geotérmicos, especialmente los de alta temperatura.	Kristmannsdóttir y Ármannsson, 2003; Hunt, 2001.
Sustancias contaminantes	Dependen de las características del reservorio y su dispersión.	Reinyección de fluidos y la adopción de sistemas de	Manzella <i>et al.</i> , 2018;

<i>Impacto</i>	<i>Características</i>	<i>Mitigación</i>	<i>Referencias</i>
	<p>Los principales contaminantes en la fracción líquida son sulfuro de hidrógeno (H<sub>2</sub>S), arsénico (As), boro (B), mercurio (Hg), plomo (Pb), cadmio (Cd), hierro (Fe), zinc (Zn) y manganeso (Mn).</p> <p>Entre otros contaminantes se tiene litio (Li), amoníaco (NH<sub>3</sub>), aluminio (Al).</p> <p>Gases no condensables (GNC) como el CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>S, NH<sub>3</sub>, N<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, etc.</p>	<p>abatimiento. El riesgo causado por la reinyección de gas aumentaría en plantas binarias en lugar de plantas flash, porque la alta presión aumenta el riesgo de emisiones fugitivas del fluido secundario utilizado, típicamente hidrocarburos y aceites combustibles pesados caracterizados por su alto potencial de calentamiento global.</p> <p>Las mejores tecnologías para abatir estos gases dependen del tipo, tamaño y tiempo de vida estimado de la planta y en la concentración de los contaminantes en el fluido.</p>	<p>Kristmannsdóttir <i>et al.</i>, 2000b; Gökçen y Yildirim, 2008; Ármannsson <i>et al.</i>, 2001; Bertani, 2001; Bayer <i>et al.</i>, 2013.</p>
Ruido	<p>Se puede producir durante la construcción de los pozos de producción, reinyección, tuberías y en general en las actividades de las plantas geotérmicas.</p>	<p>Barreras acústicas y equipos de bajo ruido para pruebas de pozos, torres de enfriamiento.</p>	<p>Manzella <i>et al.</i>, 2018; Enel Greenpower, 2011.</p>
Interferencia de aguas superficiales y subterráneas	<p>Debido a la perforación y fluidos asociados.</p> <p>La descarga o vertimiento de aguas residuales a arroyos, ríos, lagos o aguas subterráneas puede afectar seriamente los ecosistemas.</p>	<p>Reinyección de fluidos. Monitoreo de los suelos y la calidad del agua superficial y subterránea.</p>	<p>Kristmannsdóttir y Ármannsson, 2003; Cappetti <i>et al.</i>, 1995; Kaya <i>et al.</i>, 2011.</p>
Subsidencia	<p>Puede ser el resultado de procesos naturales como movimientos tectónicos y fenómenos volcánicos, o ser inducidos por actividades humanas como la extracción de fluidos del subsuelo. Ejemplo: Wairakei, Nueva Zelanda (15 m en 50 años)</p>	<p>Monitoreo de la deformación de la superficie a través de nivelaciones geométricas, levantamientos GPS (periódicamente), y técnicas de Interferometría radar de apertura sintética (InSAR).</p> <p>La inyección y la reinyección han demostrado ser efectivas para la sostenibilidad de los recursos y el control de la subsidencia.</p>	<p>Narasimhan, 2013; Allis <i>et al.</i>, 2009; Manzella <i>et al.</i>, 2018; Axelsson, 2008; Díaz <i>et al.</i>, 2016</p>

<i>Impacto</i>	<i>Características</i>	<i>Mitigación</i>	<i>Referencias</i>
Sismicidad inducida	Asociado a la extracción y reinyección del fluido. Ejemplo Svartsengi, Islandia. También asociado a estímulos hidráulicos específicos que se requieren para mejorar la permeabilidad de los yacimientos como en el caso de los proyectos de Sistemas Geotérmicos Mejorados.	Monitoreo sismológico.	Brandsdóttir <i>et al.</i> , 2002; Hunt, 2001.
Residuos	Asociados a la perforación y construcción (lechada de cemento, diésel y lubricante, desechos de fluidos de limpieza y salmuera geotérmica, recortes de perforación, tierra y rocas, desechos industriales de diferentes tipos)	La mitigación de estos residuos suele ceñirse al cumplimiento de la normativa nacional (almacenar por separado en contenedores especiales), tratamiento de aguas residuales. La salmuera extraída durante la perforación se reinyecta o deshidrata (como lodo) y se envía a los vertederos.	Manzella <i>et al.</i> , 2018.
Socioeconómico	Los niveles de incertidumbre entre la población generalmente son altos. Muchas veces hay poca participación pública en la política energética, la gestión de la tierra y la asignación de fondos públicos. Los aspectos positivos incluyen la creación de empleo y aumento de los ingresos en campos desarrollados y sin desarrollar.	Más información y actividades educativas para aumentar la conciencia pública sobre la energía geotérmica y reducir la incertidumbre de los ciudadanos y aliviar las preocupaciones públicas.	Ver referencias en Pellizzone <i>et al.</i> , 2015, 2017. Akella <i>et al.</i> , 2009.

### 3.3. Marco normativo y legal

Colombia aún no ha desarrollado una política o ley exclusivamente para la geotermia; sin embargo, ha tomado iniciativa en el desarrollo de energías renovables para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero en un 20% para el 2030 (MADS, 2016).

Dentro de las iniciativas para promover el uso y aprovechamiento de las energías renovables, se lanzó en el 2014 la Ley 1715. Esta ley incluye incentivos indirectos, reducción de impuestos o exenciones a los proyectos de esta naturaleza (Secretaría del Senado, 2014). En la

Tabla 8 se hace un resumen del marco legal de la geotermia en diferentes países del mundo especialmente Latinoamérica.

Tabla 8. Marco legal geotérmico en diferentes países del mundo.

<i>País</i>	<i>Marco legal</i>	<i>Referencias</i>
Islandia	Las autoridades regionales son las encargadas de regular a las empresas de generación. Ley de Promoción del Desarrollo, reglamenta el uso y comercialización de los recursos de energía renovable y otros propósitos. Esta ley establece una clasificación de los sistemas que los identifica bien sea como protegidos, o como aptos para investigación, para desarrollo limitado o para desarrollo.	Haraldsson, 2012.
Estados Unidos	Cada estado tiene sus propias leyes y restricciones. La energía geotérmica a veces se considera como un recurso hídrico o recurso mineral. Es común que sea regulada por criterios de temperatura. Por ejemplo, en el estado de Oregón, si la temperatura del agua es inferior a 121°C esta es regulada por el Departamento de Recursos Hídricos. Pero si la temperatura es superior a 121°C, el Departamento de Geología e Industrias Minerales es el responsable.	Haraldsson, 2012 Haehnlein <i>et al.</i> , 2010.
Chile	La exploración y explotación de recursos geotérmicos en Chile son principalmente reguladas por la Ley sobre Concesiones de Energía Geotérmica del año 2000. La legislación chilena no prevé beneficios fiscales, y tampoco un sistema de tarifas reguladas (feed-in tariff), que incentiven el desarrollo de la generación geotermo-eléctrica. Existe un marco legal general para el fomento de las energías renovables, el cual determina condiciones en el mercado eléctrico que pueden favorecer a la geotermia.	Saldivia, 2018. Bona y Coviello, 2016.
Argentina	No tiene instrumentos legislativos específicos para la exploración y explotación del recurso geotérmico, pero la actividad geotérmica está contemplada en el Código de Minería, y regulada también por los Códigos de Agua provinciales.	Bona y Coviello, 2016.
Bolivia	No existe regulación específica para la geotermia, y el marco legal del sector energético está todavía en fase de reorganización para adaptarse a las modificaciones de la Constitución efectuadas en 2009.	Bona y Coviello, 2016.
Colombia	Colombia no cuenta con una legislación específica para el sector geotérmico. Los recursos naturales renovables son regulados por el Código Nacional de Recursos Naturales Renovables y de Protección del Medio Ambiente. La Ley 1715 de 2014 establece incentivos fiscales para fomentar la investigación, el desarrollo y la inversión en el sector de las fuentes no convencionales.	Bona y Coviello, 2016.
Ecuador	La geotermia hace parte de la constitución del 2008. Las leyes fomentan el uso de energías renovables y promueven el desarrollo de la geotermia, mediante exoneración de impuestos de importación de materiales y equipos no producidos en el país, que son necesarios para la investigación y la producción de energías alternativas.	Bona y Coviello, 2016.
Perú	Ley 26848/1197 o Ley Orgánica de Recursos Geotérmicos es una ley específica para promover el desarrollo de la geotermia e incentivar la intervención privada en el sector. El marco legal existente es atractivo y propicio para la inversión privada, basado en un sistema regulatorio	Bona y Coviello, 2016.

<i>País</i>	<i>Marco legal</i>	<i>Referencias</i>
	estable, bien estructurado y dotado de incentivos para la promoción de inversiones.	
México	La Ley de Energía Geotérmica del 2014 regula el reconocimiento, la exploración y la explotación de recursos geotérmicos para el aprovechamiento de la energía térmica del subsuelo dentro de los límites del territorio nacional para generar energía eléctrica o destinarla a usos diversos.	Cámara de diputados del H. Congreso de la unión, 2014.
Costa Rica	No hay ley exclusiva para la geotermia; sin embargo, mediante la Ley N° 5961, de diciembre de 1976 declara que la investigación, exploración y explotación de los recursos geotérmicos del país, están a cargo exclusivo del Instituto Costarricense de Electricidad (ICE). Igualmente establece que los volcanes, al ser Parques Nacionales con potencial geotérmico desempeñan un papel muy importante dentro del Sistema Nacional de Áreas de Conservación y que el equilibrio entre la protección ambiental y el desarrollo sostenible es un balance delicado y difícil de establecer que debe ser vigilado.	Sistema Costarricense de Información Jurídica, 2019.
El Salvador	Los permisos ambientales son otorgados por el Ministerio del Medio Ambiente y Recursos Naturales -MARN-. Entre los incentivos están la exención fiscal sobre derechos de importación para maquinaria, equipos y líneas de transmisión destinados a tal fin por hasta 20 MW de capacidad instalada, durante 10 años. Exenciones de impuestos de renta por cinco años en proyectos de 10 a 20 MW, y durante diez años para proyectos menores de 10 MW; y, exenciones de IVA aplicables a todos los ingresos generados por la venta de Certificados de reducción de emisiones bajo el mecanismo de desarrollo limpio.	Herrera, Montalvo & Herrera, 2010.
Nicaragua	Cuenta con una ley específica sobre energía geotérmica adoptada en 2002. La Comisión Nacional de Energía -CNE- es la entidad encargada de proponer nuevas áreas para la exploración geotérmica, sujetas a aprobación presidencial. Los proyectos geotérmicos están sujetos a la Ley de Evaluación de impacto ambiental (Decreto 76 a 2006) y las áreas protegidas son objeto de una regulación especial (Decreto 01- 2007). Existen algunos incentivos fiscales como la exención del impuesto sobre la renta durante siete años.	UPME, 2015.

### 3.4. Antecedentes

Se estima que el potencial para Colombia está en el orden de 1 a 2 GW (Haraldsson, 2013; OLADE, 2013). Los baños termales y el turismo son las formas tradicionales en las se ha usado el recurso geotérmico en Colombia, y aunque no existe generación eléctrica a partir de este recurso, desde hace más de 40 años se viene estudiando el potencial del país. Los primeros reconocimientos fueron ejecutados en los años 70 por OLADE, AQUATER, BRGM y Geotérmica Italiana (Marzolf, 2014).

En la Tabla 9 se hace un resumen de las zonas que han sido más estudiadas en el país.

Tabla 9. Áreas geotérmicas con perspectivas de desarrollo en Colombia.

<i>Departamento</i>	<i>Área geotérmica</i>	<i>Nivel de estudio</i>	<i>Potencial estimado (MWe)</i>	<i>Referencia</i>
Proyecto binacional Nariño (Colombia) - Ecuador	Chiles-Tufiño – Cerro Negro	Prefactibilidad	138	Bona y Coviello, 2016
Boyacá	Paipa	Prefactibilidad	N.D.	
	Nevado del Ruiz	Exploración	50	
Caldas	Maar de San Diego	Prefactibilidad temprana	N.D.	
	El Escondido de Florencia	Reconocimiento	N.D.	
Risaralda	Paramillo de Santa Rosa	Reconocimiento	N.D.	
Tolima	Nevado de Santa Isabel, Nevado del Tolima y Cerro Machín	Reconocimiento	N.D.	Rodríguez, Alfaro & González, 2019
Cauca	Puracé (Cadena de volcanes de los Coconucos) y Sotaró	Reconocimiento	N.D.	
Huila	Nevado del Huila	Reconocimiento	N.D.	
Nariño y Putumayo	Doña Juana, Galeras, Cumbal	Reconocimiento	N.D.	
Nariño	Azufra	Prefactibilidad	N.D.	

El proyecto localizado en el Complejo Volcánico Nevado del Ruiz específicamente en el municipio de Villamaría, Caldas es el que cuenta con más estudios en el país; se estima que tiene un potencial de 50 MW (Mejía *et al.*, 2014) y se espera que genere un ahorro de emisiones de GEI de alrededor de 77,394 tCO<sub>2</sub> por año (BID, 2016). En 1997, la CHEC hizo la perforación del primer pozo geotérmico del país llamado “*Pozo Nereidas 1*” que alcanzó una profundidad de 1469 m en el cual se registró una temperatura de hasta 200°C; sin embargo, fueron pozos no productivos (CHEC-EPM, 2019). A pesar de esto, los estudios y licencias para desarrollar el proyecto de una planta de energía geotérmica permanecieron y las intenciones de continuar con éste siguen en pie.

Además de CHEC-EPM, en el 2008 ISAGEN, una empresa privada de generación y comercialización de energía, empieza los estudios de factibilidad en el sector de interés geotérmico para generación de energía, y después de casi diez años de estudios en el 2018, ISAGEN decide enfocarse en otras formas de energía renovable.

## 4. Área de estudio

El área de estudio de este trabajo corresponde al municipio de Villamaría, Caldas. A continuación se hace una descripción de aspectos geográficos, socioeconómicos y de recursos naturales.

### 4.1. Geografía

El área de estudio se encuentra en el flanco occidental de la cordillera central en inmediaciones del Parque Nacional Natural de los Nevados, en el departamento de Caldas.

Villamaría cuenta con un área de 461 km<sup>2</sup> y una población 56,303 habitantes (Alcaldía Municipal de Villamaría en Caldas, 2015). Este municipio se encuentra dividido en 35 veredas de las cuales las de interés para el proyecto son Alto Arroyo, El Páramo, Papayal, La Florida, Laguna Alta, Tejares, Playa Larga, y El Pindo ya que todas estas son atravesadas por la vía que las conecta con el casco urbano de Villamaría; sin embargo, el área donde se han enfocado los estudios geotérmicos corresponde a las veredas Playa Larga y El Páramo (Figura 1).

Geológicamente esta zona se encuentra compuesta por rocas sedimentarias y volcanosedimentarias del Complejo Quebradagrande y rocas metamórficas del Complejo Cajamarca (Maya y González, 1995). Estas unidades están superpuestas por la Ignimbrita de Río Claro entre los ríos Molinos y Río Claro (Grand y Handszer, 1989) que corresponden a una serie de depósitos de flujo piroclástico y antiguas coladas de lava. Por encima de estas unidades se encuentran depósitos Cuaternarios que comprenden flujos piroclásticos, flujos de lodo (lahares), rocas piroclásticas, depósitos glaciares y aluviones recientes.

Estructuralmente la zona de estudio se encuentra influenciada por los sistemas de fallas de dirección N-S a NNE-SSW que coincide con la orientación de los Andes y los sistemas transversales de direcciones NW-SE y E-W a NE-SW.

En cuanto al clima, la cabecera municipal tiene una temperatura media de 18°C y se encuentra ubicada a unos 1920 msnm (metros sobre el nivel del mar). Los periodos lluviosos del año son entre marzo – mayo y septiembre- noviembre; y los periodos secos entre junio – agosto y diciembre – febrero.

La red hídrica de Villamaría puede dividirse en la cuenca del río Chinchiná, abastecida por 13 microcuencas, en la que Los Cuervos y Chupaderos aportan los mayores caudales, y la del Río Claro alimentada por el agua de 8 microcuencas de las cuales Molinos, Nereidas y Juntas son las

de mayores aportes. También se resaltan las fuentes de aguas termales evidenciando la actividad volcánica de la región (CMGRD, 2017).

## **4.2. Aspectos socioeconómicos**

Las actividades económicas principales de las áreas de interés de desarrollo geotérmico en el municipio de Villamaría corresponden a la agricultura, ganadería (carne y leche) y piscicultura (trucha). La producción de café y maderables son los principales productos seguidos de papa, frutales de clima frío (manzanas, feijoa), leguminosas y hortalizas (CMGRD, 2017).

La minería fue una de las primeras actividades de los habitantes en Villamaría. Actualmente se explota oro, plata, plomo, zinc, hierro, caliza, cobre y antimonio.

### **4.2.1. Demanda de energía**

El consumo total de energía eléctrica para el municipio de Villamaría para el 2016 se encontraba en 28047531 kWh y el consumo total de energía eléctrica por habitante de 489 kWh (CCMP, 2017).

## **4.3. Recursos naturales**

En la zona amortiguadora del Parque Nacional Natural de los Nevados se identifican bosque alto andino o de niebla y el piso bioclimático de páramo. El bosque de niebla alberga especies como musgos, líquenes, helechos, orquídeas, etc. (CMGRD, 2017).

En las zonas con bosque secundario, predominan las especies arbóreas de porte medio y rápido crecimiento. Con respecto a la fauna se tiene una gran variedad de especies; los mamíferos más frecuentes son las ardillas, los gurre, las ratas de campo, conejos y zorros. Son escasos y en ocasiones nulos, los registros recientes de osos de anteojos, danta de páramo, puma, nutria y zaino debido a la cacería; así mismo, las poblaciones naturales de venados, guaguas, perezosos y zorros, tienden a disminuir peligrosamente (CMGRD, 2017).

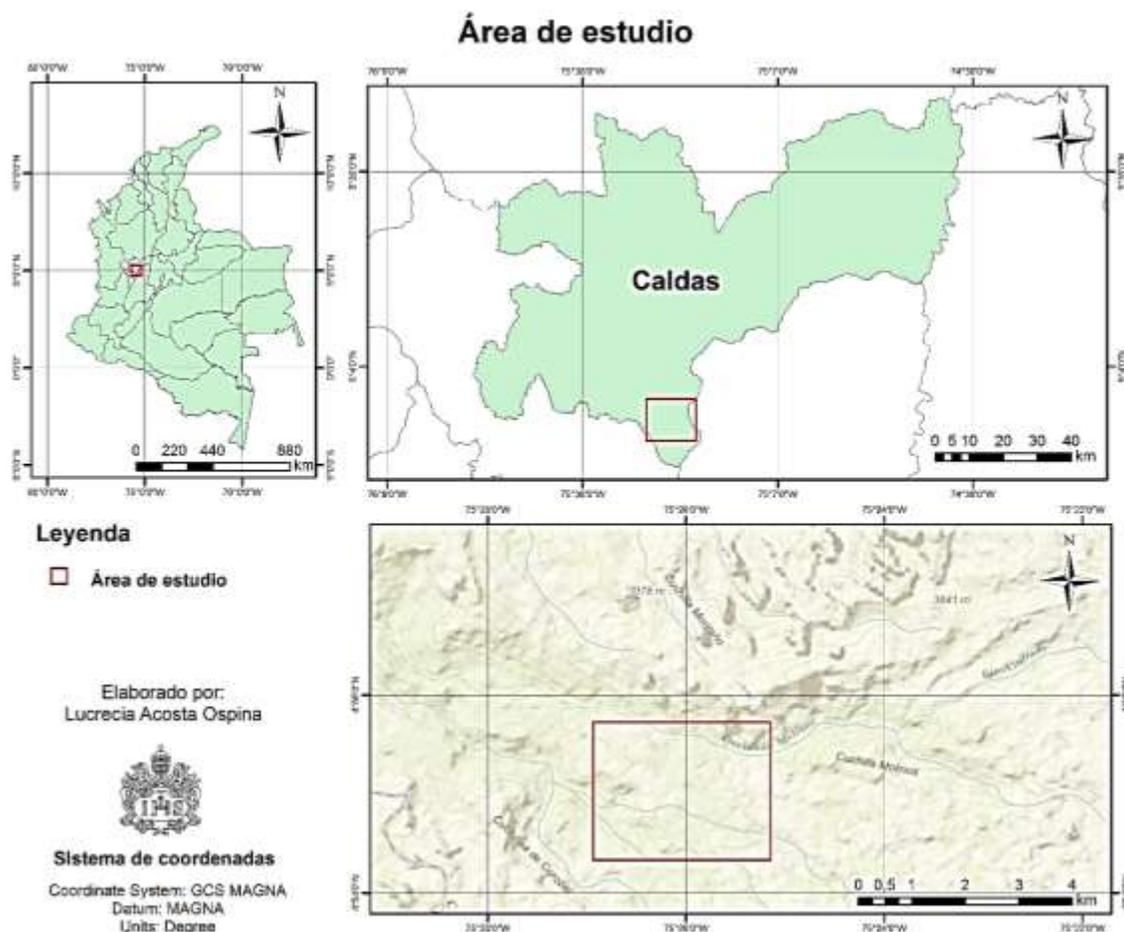


Figura 1. Localización de la zona de estudio.

## 5. Materiales y métodos

### 5.1. Tipo de investigación

Esta investigación es de tipo proyectivo de acuerdo con Hurtado (2010) ya que “*consiste en la elaboración de una propuesta, un plan, un programa, un procedimiento, un aparato, como solución a un problema o necesidad de tipo práctico, ya sea de un grupo social, de una institución o de una región geográfica, en área particular del conocimiento, a partir de un diagnóstico preciso de las necesidades del momento, de los procesos explicativos involucrados y de las tendencias futuras*”

Resulta conveniente que esta investigación sea de tipo proyectivo ya que aunque existen propuestas y planes con respecto al uso y aprovechamiento de la energía geotérmica en Colombia,

aún no existe un proyecto que integre todas las potencialidades de la energía geotérmica que van más allá de la generación de electricidad.

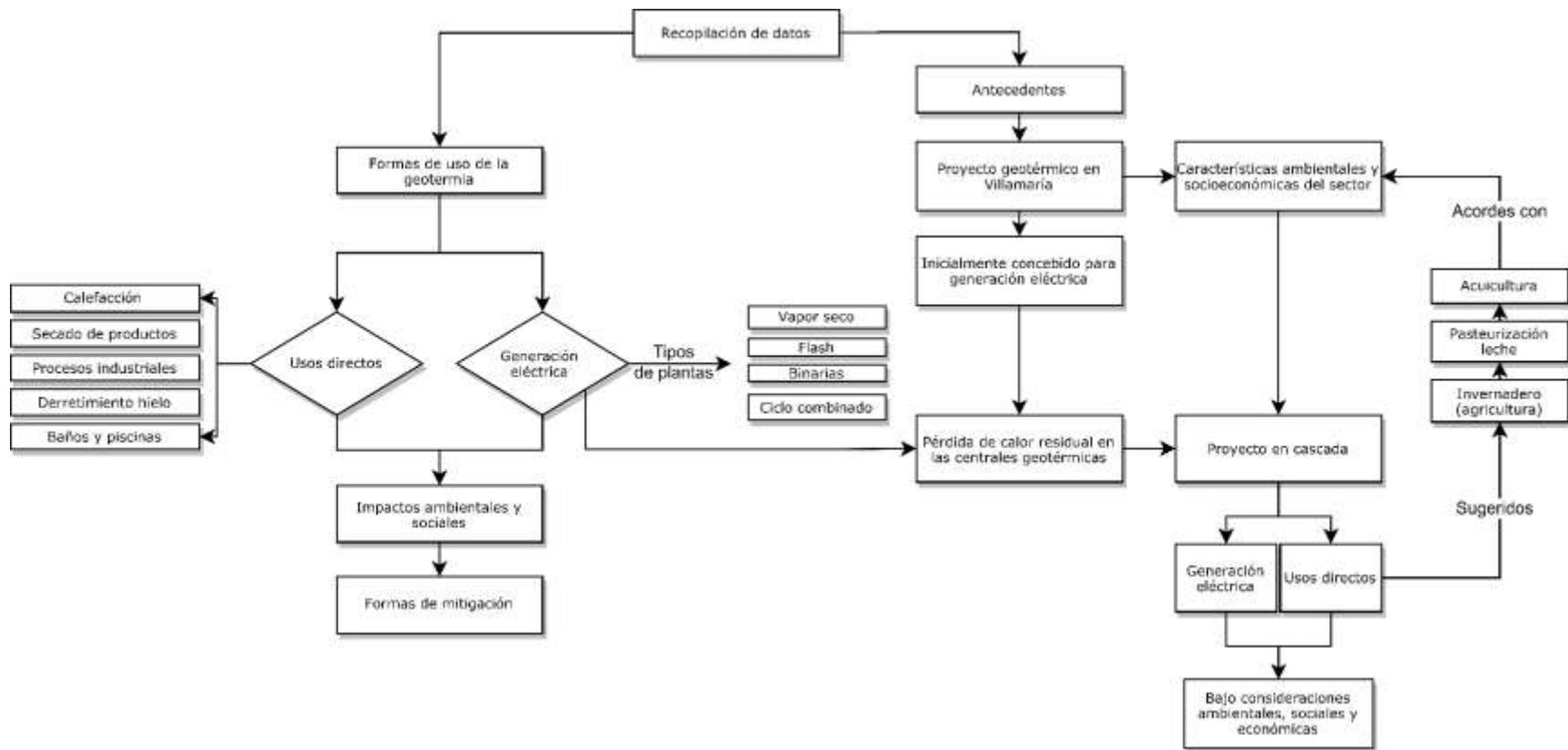
Para lograr los objetivos propuestos en este estudio se proponen las siguientes fases de acuerdo con Hurtado, 2010:

- **Estadio descriptivo:** En esta etapa se estudia el estado de la geotermia en el mundo y Colombia. Aquí se profundiza en la temática y en las potenciales formas de aprovecharlo en diferentes áreas, al igual que la identificación de los impactos y su mitigación.
- **Estadio analítico:** Con la información recolectada se estudia lo que hay en el país y lo que debería ser con respecto al aprovechamiento del recurso geotérmico y su papel como energía renovable de menor impacto ambiental y estrategia para diversificar las economías locales.
- **Estadio comparativo:** A partir de los ejemplos de proyectos mundiales se compara lo existente en Colombia, con el fin de determinar los elementos que pueden ser empleados localmente en futuros proyectos geotérmicos.
- **Estadio explicativo:** En esta fase, se busca entender las causas que llevan a la situación actual de la geotermia en Colombia.
- **Estadio predictivo:** Como paso previo a la propuesta, se identifica anticipadamente los potenciales proyectos y sus limitaciones para obtener soporte en la etapa proyectiva.
- **Estadio proyectivo:** En este estadio se diseña la propuesta a partir de los elementos recolectados y analizados en las fases anteriores.

## 5.2. Métodos de Recolección de datos

La recolección de datos se hace mediante una revisión documental de publicaciones existentes sobre estudios de energía geotérmica en el mundo y en la zona de interés, estos datos son tomados de las bases de datos disponibles y de fuente abierta e información pública.

### 5.3. Diagrama de Flujo



## **6. Desarrollo de la investigación**

### **6.1. Estadio descriptivo**

La demanda de energía en poblaciones que crecen en número tiene inevitables impactos ambientales, es por esto que el uso de las energías renovables se ha convertido en una obligación más que en una opción (IEA, 2016).

Mundialmente los proyectos geotérmicos en todas sus modalidades van en crecimiento y se ha demostrado que estos pueden ser económica y técnicamente posibles logrando buenos resultados en el desarrollo de las comunidades donde existe el recurso. Colombia ha dado pasos en el desarrollo de proyectos de energía eólica y solar; sin embargo, aún queda mucho por hacerse en el campo de la geotermia y su aprovechamiento no solo como fuente de energía asequible y no contaminante de carga base, sino por su capacidad para brindar oportunidades de trabajo, crecimiento económico, sostenibilidad de las comunidades, consumo eficiente y responsable.

Entre las prácticas más llamativas se encuentran los proyectos en cascada; éstos han demostrado ser una propuesta interesante especialmente para el sector rural que es donde la mayor parte de las manifestaciones geotérmicas ocurren. Éstos tienen como objetivo aprovechar al máximo el calor extraído del subsuelo es por esto que el calor residual de la generación eléctrica es empleado en otras actividades agrícolas, acuícolas, ganaderas, etc.

### **6.2. Estadio analítico**

La revisión documental hecha a lo largo de este trabajo tuvo como propósito identificar la base conceptual y teórica de los proyectos de energía geotérmica en mundo y lo que existe en Colombia. Aunque existe el recurso en el país, las formas en las que se ha desarrollado requieren de un enfoque integrado en el que se aborden todas las modalidades de uso para determinar cuál es la que mejor se adapta a las comunidades o a las necesidades de la región en aspectos ambientales y socioeconómicos.

El mayor proyecto geotérmico del país ubicado en Villamaría, Caldas, pretende exclusivamente la generación eléctrica y hasta el momento no establece claramente en qué otras formas se proyecta emplear el calor residual del proceso de generación en otros subproyectos (agrícola, acuícola, etc.). Tomar la iniciativa en un proyecto en cascada no solo aumentaría la eficiencia de la planta sino que también sería un ejemplo a replicar en otras regiones del país.

No obstante puede existir incertidumbre acerca de los impactos de este tipo de proyectos, la adopción de estrategias para la mitigación ha demostrado que los proyectos sí pueden ser viables sin que representen una amenaza para la vida, o el futuro en sí de los proyectos.

### **6.3. Estadio comparativo**

La revisión documental ayuda a identificar cómo se usa la energía geotérmica en el mundo, y lo que se puede esperar localmente durante la ejecución de los proyectos. Desde un punto de vista comparativo se puede identificar que:

- Los proyectos geotérmicos existentes en el país aún no contemplan un desarrollo en cascada. Los desarrolladores se han orientado hacia la generación eléctrica, y poco hacia el uso del recurso en otras actividades que integran la diversidad propia de las comunidades de la zona de impacto.
- Los proyectos mundiales han hecho frente a los impactos ambientales, sociales y económicos que se derivan de esta actividad por medio de la experiencia y las lecciones aprendidas en los proyectos. Por lo tanto, es necesario conocer qué otras variables o situaciones pueden generarse durante el desarrollo de los mismos en Colombia.

### **6.4. Estadio explicativo**

Para comprender la situación actual de la geotermia en Colombia se describe y analiza el estado del desarrollo de los proyectos y sus limitantes (barreras institucionales, económicas, regulatorias y tecnológicas).

La falta de articulación entre las diferentes instituciones encargadas del licenciamiento y demás permisos (ANLA, CAR, UPME, CREG, MME, MADS) ha generado que los procesos sean lentos lo cual genera impactos en el cronograma y presupuestos de los proyectos. Si bien se han desarrollado algunos decretos para la reglamentación de la Ley 1715, es bueno recordar que ésta requiere de un mayor esfuerzo por parte del ente rector de la política energética para impulsar este tipo de proyectos, lo cual facilitaría la mejor coordinación institucional y la rápida expedición de las normas que se requieren (DNP, 2017).

En el ámbito económico sigue habiendo una percepción generalizada de los altos costos de las primeras fases de desarrollo de los proyectos geotérmicos y las relativas bajas probabilidades

de éxito (UPME, 2015). Éstos se elevan al no haber experiencia en estas tecnologías ni mercados locales de soporte, por lo tanto, los costos se elevan.

Otro factor son los esquemas para el cálculo del cargo por confiabilidad o la reglamentación de contratos a largo plazo. A partir de los escenarios planteados por la UPME (2015), en ningún nivel de Energía Firme para el Cargo por Confiabilidad (ENFICC) resulta suficiente para llevar un proyecto geotérmico a rentabilidad, siendo la mayor tasa interna de retorno (TIR) alcanzada con un 90% la de ENFICC, del 6,9%. Para que un proyecto geotérmico sea viable en los esquemas actuales es necesario que éstos sean muy grandes (mayor a 200 MW), lo cual solo ha sido posible en pocos casos en el mundo.

Por otro lado, la infraestructura de transporte (regulado por la CREG) es también una barrera. Esta red debe ampliarse, lo cual podría presentar demoras en su ejecución en casos donde se debe hacer consulta previa. Para el proyecto geotérmico de Villamaría la conexión más cercana sería con la Subestación La Enea (Monsalve, 2018) la cual se encuentra aproximadamente a 10 km, y se estima que, si no hay ampliación de la infraestructura para el 2022, el sistema tendrá pérdidas. En todo caso, dado que los costos de transmisión asociados pueden ser significativos y los asume toda la demanda, debe asegurarse que los beneficios de dichas inversiones sean superiores a sus costos (DNP, 2017).

En Colombia no existe un proceso de licenciamiento y concesión del recurso claramente definido lo cual representa un alto riesgo para el inversionista. Aun cuando se define que el operador puede aplicar para la obtención de una licencia exploratoria, los términos de exclusividad o temporalidad bajo los cuales le puede ser otorgada una concesión para el uso del recurso, no están definidos.

En el mejor de los casos determinar el valor del MWh generado por esta tecnología sería lo ideal; sin embargo, el valor del MWh varía diariamente y se encuentra sujeto a las condiciones de la bolsa de energía y del cómo se encuentren pactados los contratos de venta de energía en el largo plazo.

Para el caso del proyecto geotérmico en Villamaría solo es posible hacer aproximaciones a partir de la revisión bibliográfica debido a que los escenarios pueden variar y los datos existentes son confidenciales. En la Tabla 10 se muestran las aproximaciones del costo en dólares por MW (USD/MW) para una central binaria de 20 MW y para una central flash de 50 MW y el costo

nivelado de energía (LCOE - Levelized cost of energy) nominal correspondiente a ambas centrales (Universidad de Antioquia, 2015).

Tabla 10. Aproximaciones del costo en USD/MW para una central binaria de 20 MW y para una central flash de 50 MW y el costo nivelado de energía (LCOE - Levelized cost of energy) nominal. (Fuente: Universidad de Antioquia, 2015).

<i>Energía</i>	<i>Costos (USD/MW instalado)</i>	<i>LCOE (USD/MWh)</i>
Central binaria de 20 MW	9'287,920	62.91236
Central flash de 50 MW	7'220,487	48.18673

Desde la parte social, CHEC-EPM como desarrollador del proyecto geotérmico en Villamaría ha venido trabajando con comunidades y grupos de interés en sesiones de socialización y atención de inquietudes para informar el estado de avance del proyecto (CHEC, 2019) los cuales han tenido en general una buena percepción. Este trabajo se ha hecho de manera periódica en conjunto con las instituciones contratadas para el desarrollo de los estudios y la autoridad ambiental (Corpocaldas). Las actividades incluyen atención personalizada, talleres de sensibilización ambiental con niños, niñas y jóvenes, talleres comunitarios con adultos y socialización de resultados. Por medio de estas actividades se ha logrado fortalecer las relaciones con las comunidades del área de impacto y se han generado procesos educativos de sensibilización ambiental (CHEC, 2019).

## **6.5. Estadio predictivo**

Como se espera el recurso sea aprovechado en todas sus formas, esta propuesta formula un proyecto en cascada. Éste se deriva del calor residual de los procesos de generación eléctrica en otros proyectos que requieren calor (agricultura, acuicultura, ganadería, etc.).

A continuación se describen los elementos previos que deberían tenerse en cuenta para el planteamiento final.

### **6.5.1. Situación actual de la geotermia en Colombia específicamente en Villamaría, Caldas**

Colombia aún se encuentra en un estado joven en cuanto al desarrollo de proyectos geotérmicos. El proyecto pionero en Colombia se encuentra en el municipio de Villamaría con más de 30 años de estudios; este proyecto tiene como objetivo la puesta en marcha de una central eléctrica, y la información que se ha obtenido hasta el momento son de gran valor. Se espera que

a partir de nuevos datos de pozos se puedan hacer proyecciones sobre las demás utilidades que podría tener este recurso.

### 6.5.2. Aspectos ambientales y estrategias socioeconómicas

Con respecto a las medidas ambientales, éstas deberán ser abordadas a partir de la normativa ambiental nacional y las mejores prácticas ambientales y sociales empleadas en el mundo para la mitigación de impactos derivados del desarrollo de proyectos geotérmicos. Éstos deberán ser capaces no solo de satisfacer los requerimientos nacionales sino también requerimientos internacionales por medio de los cuales se podrán lograr potenciales financiaciones que podrán ser clave en las etapas iniciales de los proyectos que son las de mayor riesgo financiero debido a los costos (Tabla 11).

Tabla 11. Costos indicativos para el desarrollo geotérmico (50 MW fuera de la capacidad del generador), en millones de dólares americanos USD (Fuente: Gehring & Loksha, 2012).

<i>Fase/Actividad</i>	<i>Estimado bajo</i>	<i>Estimado medio</i>	<i>Estimado alto</i>
1 Inspección topográfica preliminar, permisos, análisis de mercado <sup>2</sup>	1	2	5
2 Exploración <sup>3</sup>	2	3	4
3 Perforaciones de prueba, prueba de pozos, evaluación del yacimiento <sup>4</sup>	11	18	30
4 Estudio de factibilidad, planificación del proyecto, financiación, contratos, seguros, etc. <sup>5</sup>	5	7	10
5 Perforaciones (20 orificios de perforación) <sup>6</sup>	45	70	100
6 Construcción (central generadora, enfriamiento, infraestructura, etc.) <sup>7</sup>	65	75	95
Sistema de recolección de vapor y subestación, conexión a la red eléctrica (transmisión) <sup>8</sup>	10	16	22
7 Arranque y puesta en servicio <sup>9</sup>	3	5	8
<b>TOTAL</b>	<b>142</b>	<b>196</b>	<b>274</b>
En USD millones por MW instalado	2.8	3.9	5.5

<sup>2</sup> Los costos de la inspección topográfica dependen en gran parte del tamaño y accesibilidad del área. Los costos del estudio de impacto ambiental dependen de las regulaciones del país.

<sup>3</sup> Dependiendo de los métodos usados y la accesibilidad y el tamaño del área.

<sup>4</sup> Para 3 a 5 perforaciones con profundidades y diámetro variables, desde orificio angosto hasta pozos de producción de tamaño real (más de 8 pulgadas de diámetro).

<sup>5</sup> Estudios y contratos proporcionados por proveedores externos o la propia empresa.

<sup>6</sup> Dependiendo de la profundidad, el diámetro y la química de fluidos, requisitos de la boca del pozo e intubación en términos de presión y material de acero/recubrimiento. También se ve influenciado por factores subterráneos y fracturas (dificultad y tiempo de perforación).

<sup>7</sup> Dependiendo de la distancia desde la planta hasta el punto de acceso de la red eléctrica de transmisión, y de la distancia entre los orificios de perforación y la central eléctrica.

<sup>8</sup> Proceso industrial estándar. La central eléctrica podría necesitar ajustes finos de algunas adaptaciones de tiempo y menores. Para el cálculo estimado alto, se necesitan cambios mayores, reparaciones y mejoras a fin de suministrar energía de acuerdo con PPA.

<sup>9</sup> El término “nivelado” se refiere a los costos promedio descontados a lo largo del ciclo de vida del proyecto, usualmente de 20 a 30 años, incluidos todos los costos.

La identificación de las características de la comunidad es el paso inicial. Es necesario socializar, capacitar y recibir las inquietudes de las comunidades sobre el desarrollo de un proyecto en cascada en donde se resalte además las oportunidades de comercio, innovación en procesos locales, procesos educativos e investigación.

El alcance de las actividades será determinado por el desarrollador del proyecto; sin embargo, el foco de atención se dará en las comunidades asentadas en la zona de impacto.

Acá es donde el proyecto se revisa por todas las partes interesadas para tomar una decisión con respecto a los factores relevantes en aspectos ambientales, sociales, y económicos de la construcción y operación del proyecto propuesto.

### **6.5.3. Herramientas estatales para el apoyo de proyectos de energía geotérmica**

Por medio de la Ley 1715 de 2014 que promueve el desarrollo de las energías renovables, se puede aplicar a la deducción especial del impuesto sobre la renta, depreciación acelerada, exclusión del IVA en la adquisición de bienes y servicios y exclusión del gravamen arancelario por la importación de maquinaria, equipos, materiales e insumos destinados exclusivamente para labores de preinversión y de inversión en este tipo de proyectos (UPME, 2017).

## **6.6. Estadio proyectivo**

A partir del proyecto de generación eléctrica que se encuentra en desarrollo, se propondrán los pasos siguientes para el empleo del calor residual del proceso en actividades acordes con la vocación de las comunidades donde se desarrolla el proyecto. Esta propuesta se presenta a continuación.

## **7. Formulación de la propuesta**

Esta propuesta solo menciona los aspectos mínimos necesarios para un proyecto en cascada. En este tipo de proyectos el calor residual de una central geotérmica, una vez está en funcionamiento, puede usarse de varias formas. A esto se le llama uso múltiple o uso de calor residual o de desecho (Gehring & Loksha, 2012). Existen diferentes ejemplos de proyectos en cascada alrededor del mundo (Ver referencias en Rubio-Maya *et al.*, 2015) y el tipo de tecnologías a emplear dependerán de las características de cada reservorio. En la Figura 2 se muestra un diagrama conceptual de la utilización en cascada de la energía geotérmica.

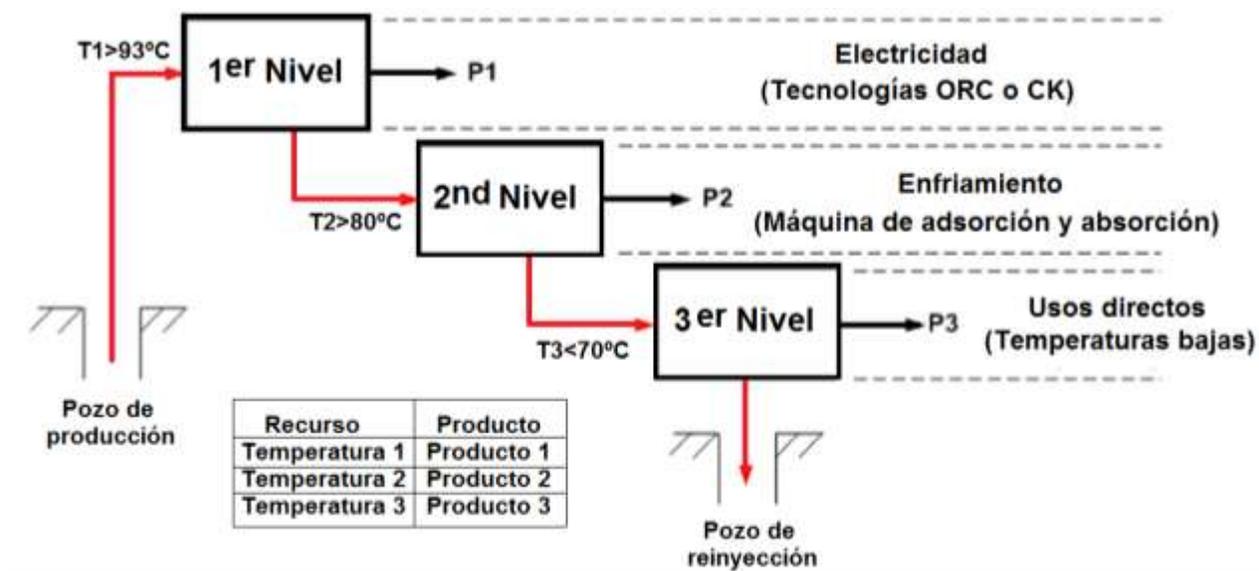


Figura 2. Diagrama conceptual de la utilización en cascada de la energía geotérmica (Modificado de: Rubio-Maya, Martínez & Ambríz-Díaz, 2015).

Esquemáticamente, en el primer nivel de la utilización en cascada se emplean temperaturas mayores a 93°C para la generación de electricidad por medio de tecnologías ORC o Ciclo Kalina<sup>10</sup> (CK). En el segundo nivel, a temperaturas que oscilan entre los 80°C, se pueden ejecutar procesos de enfriamiento en máquinas de adsorción y absorción; y el tercer nivel, a temperaturas menores a los 70°C, se puede emplear en actividades de uso directo. Los aspectos que se deben abordar se mencionan a continuación.

## 7.1. Identificación del área de estudio y comunidad(es)

### 7.1.1. Área de estudio

El área de estudio corresponde, al municipio de Villamaría, Caldas ya que es allí donde se encuentra el proyecto geotérmico con más estudios del país. El polígono de la zona de interés se ubica entre las siguientes coordenadas en grados decimales (Tabla 12).

<sup>10</sup> El Ciclo Kalina es un ciclo termodinámico para convertir energía térmica en energía mecánica. El fluido de trabajo en este ciclo es una mezcla de al menos dos fluidos diferentes (típicamente agua y amoníaco). El amoníaco tiene un punto de ebullición más bajo en comparación con el agua. Por lo tanto, cuando la temperatura de la mezcla aumenta, el amoníaco hervirá primero. Fuente: Dipak K. Sarkar, en Thermal Power Plant, 2015.

Tabla 12. Zona de interés para la exploración geotérmica en Villamaría, Caldas.

<i>Vértice</i>	<i>Norte</i>	<i>Oeste</i>
1	4.939857	-75.476814
2	4.919236	-75.483058
3	4.857263	-75.432304
4	4.914860	-75.388198

### 7.1.2. Comunidad

La comunidad corresponde a las veredas donde se encuentra el proyecto y aquellas cercanas al mismo. A partir de un plan de recolección de datos en el cual se incluyan encuestas, grupos focales etc., se hará una identificación de las necesidades de las comunidades. Por medio de los resultados de este plan de recolección de datos se podrá precisar el tipo de proyectos que las comunidades ven como más atractivos; sin embargo, para este trabajo se anticipan los proyectos que podrían tener más aceptación de las comunidades partiendo de los datos bibliográficos.

## 7.2. Elementos básicos necesarios para el desarrollo de un proyecto en cascada

Acá se aborda tanto la disponibilidad de los recursos existentes, el estado de desarrollo y la tecnología que podría emplearse para este tipo de proyectos en cascada, así como la identificación de los potenciales impactos ambientales y socioeconómicos, además de la obtención de los permisos para llevar a cabo las actividades.

### 7.2.1. Elementos básicos para la puesta en marcha de una planta de generación eléctrica

A partir de los datos preliminares de las fases de exploración superficial del proyecto geotérmico en Villamaría, se estima un potencial de 50 MW. Una vez se haya realizado la perforación de prueba (Fase 3 de acuerdo con Gehringer & Loksha, 2012) se conocerá el potencial verdadero y las características fisicoquímicas del reservorio; con esta información se podrá determinar el tipo de planta y los potenciales impactos ambientales. Posteriormente se ejecutarán las demás fases de desarrollo de un proyecto para generación eléctrica propuestas por Gehringer & Loksha (2012) (Figura 3):

- Revisión y planificación del proyecto (Fase 4),
- Desarrollo de campo (Fase 5),

- Construcción (Fase 6),
- Arranque y puesta en servicio (Fase 7), y
- Operación y mantenimiento (Fase 8).

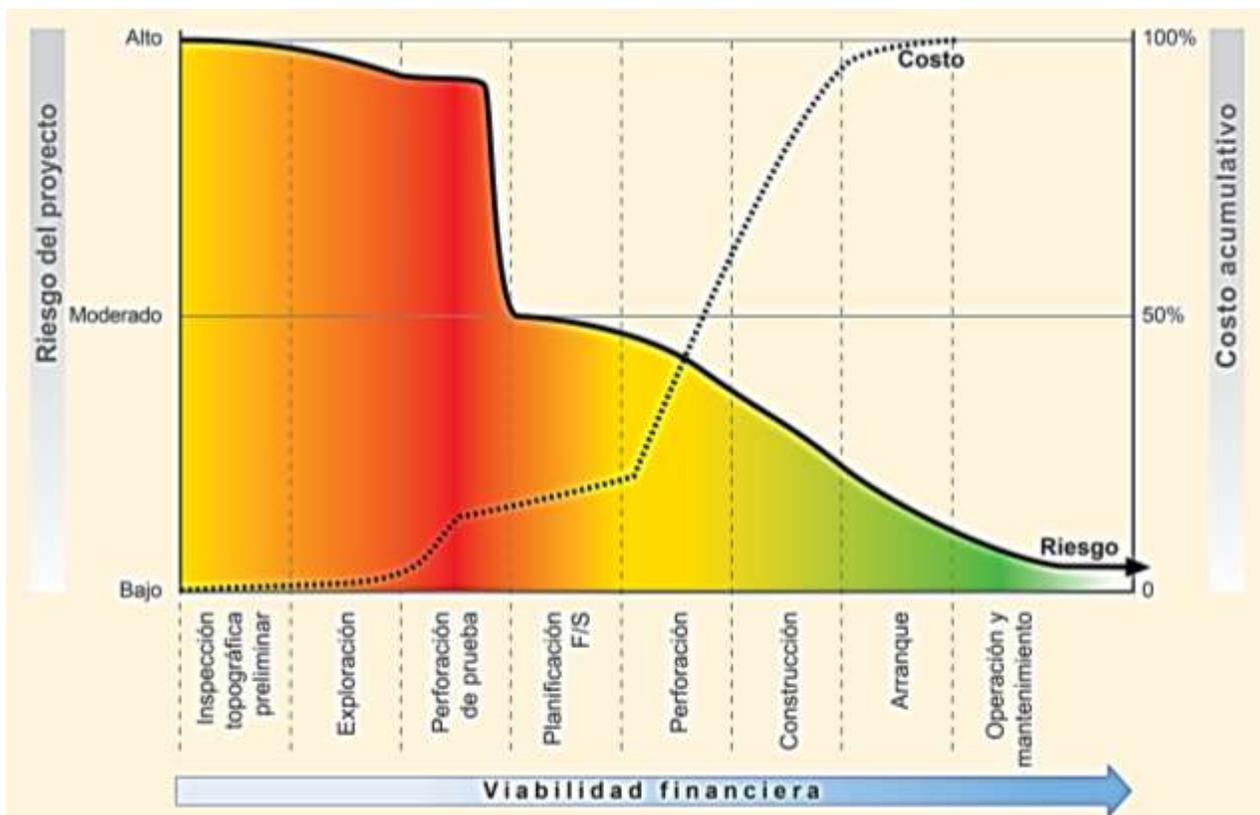


Figura 3. Costo de un proyecto de generación eléctrica y perfil de riesgos en las diversas fases de desarrollo (Fuente: Gehringer & Loksha, 2012).

Tan pronto la central geotérmica esté operando se determinará la infraestructura para soportar el sistema geotérmico en cascada (acuicultura, invernaderos, etc.). Aunque actualmente no existen datos de pozo recientes, en este trabajo se hacen aproximaciones hacia las formas potenciales en las que se podría emplear el calor residual a partir de ejemplos internacionales.

### 7.2.2. Potenciales proyectos de uso directo que podrían emplear el calor residual del proceso de generación

Como esta propuesta está orientada hacia un proyecto en cascada, se asume la existencia de una planta en cuyo proceso existe calor remanente que puede ser empleado en proyectos de uso directo. Estas temperaturas residuales pueden oscilar entre 24°C y 150°C; dependiendo del flujo y

la temperatura podrá emplearse en la operación de una planta binaria o para usos directos (Rubio *et al.*, 2015).

El número de subproyectos que se derivan del proyecto de generación eléctrica dependerá de las características fisicoquímicas del agua geotérmica ya que la disminución de temperatura puede generar la formación de incrustaciones (depósitos de sílice) en las tuberías puede representar altos costos operativos.

A partir de la bibliografía, se anticipa que el calor residual de una central geotérmica en Villamaría podría emplearse en invernaderos (agricultura), pasteurización de leche y acuicultura como opción para diversificar la economía local.

Es importante resaltar que entre los elementos más importantes a tener en cuenta durante el desarrollo de estos proyectos se incluye las tasas de flujo termal, demanda de calor para calefacción y producción, temperaturas de avance y retorno para calefacción, y tipos y dimensiones de las tuberías.

#### **7.2.2.1. Invernaderos y acuicultura**

Los invernaderos son una de las formas en las que se pueden emplear el calor residual de una central geotérmica. Los productos que se han cultivado en el mundo incluyen frijoles, tomates, pimientos, etc., para consumo local y venta.

Este tipo de instalaciones deben considerar pérdidas de calor a través de las paredes y el techo, y pérdidas por infiltración y ventilación es por esto que se requiere de mano de obra especializada. En algunos casos los sistemas de ventilación y deshumidificación pueden ser un reto en los cultivos en los invernaderos. Las instalaciones para calefacción en invernaderos pueden ser relativamente simples; en la actualidad se están agregando instalaciones computarizadas avanzadas para acondicionamiento total del clima interior en el invernadero.

El procedimiento de diseño, incluidos los cálculos de pérdida de calor y la selección del equipo de calefacción, está más allá del alcance de este documento, pero se puede encontrar más detalles en Rafferty y Boyd (1997), Rafferty (1998a), y Dickson, M. H., Fanelli, M., (2003)<sup>11</sup>.

La Figura 4 muestra la propuesta de un proyecto en cascada para cuatro proyectos secuenciales en Maguarichi, México. El primero es secado de chiles, el segundo para invernaderos

---

<sup>11</sup> En estos documentos proporcionan una amplia recopilación de información básica para los desarrolladores de proyectos de acuicultura e invernaderos geotérmicos.

y acuicultura y el tercero para balneología, con inyección posterior. Se parte inicialmente de un proyecto de generación eléctrica de entalpía media usando una planta de ciclo binario ordinario de 300kWe. Para este caso el pozo geotérmico tuvo un flujo de masa de 9.72l/s y una temperatura de 98°C a una profundidad de 300m.

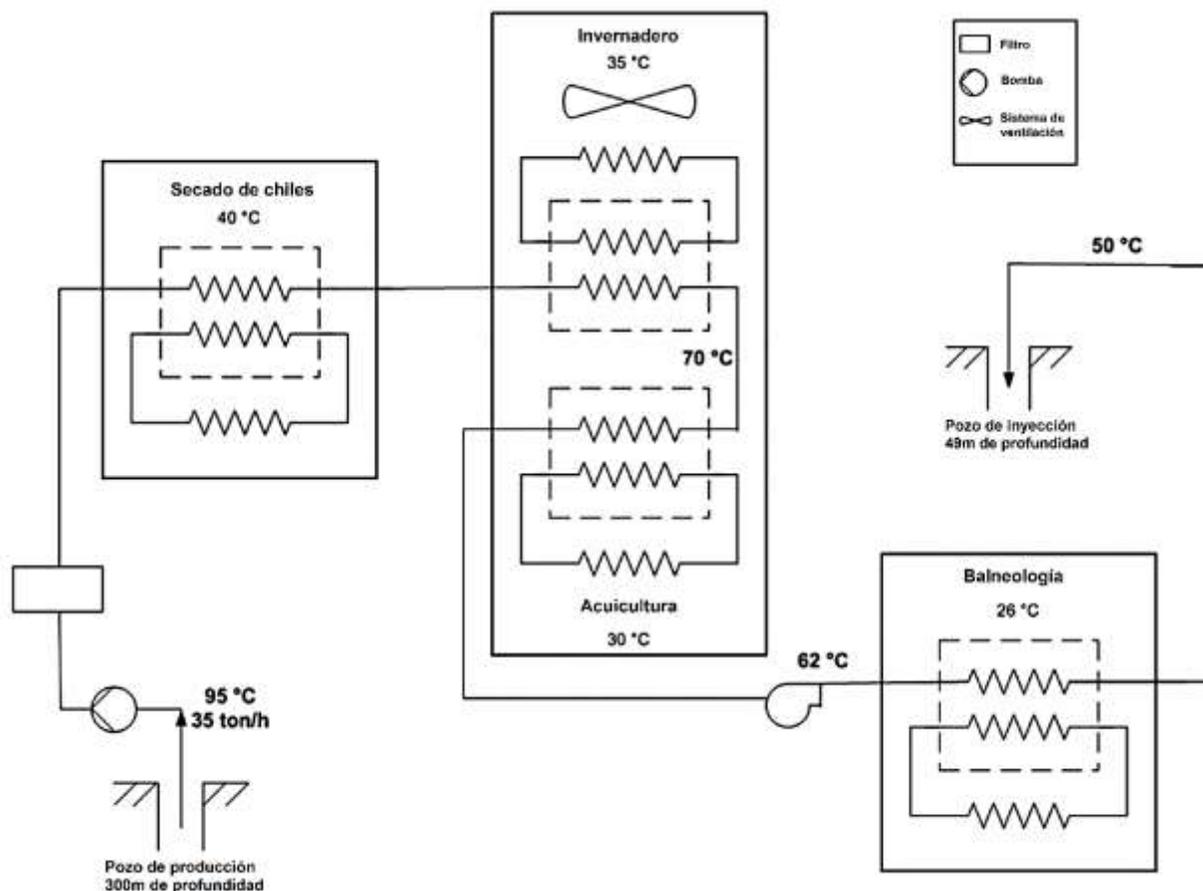


Figura 4. Diagrama conceptual de la utilización geotérmica en cascada en Maguarichi, México (Fuente: Arrubarrena y Pelayo, 2012).

Los proyectos de acuicultura proporcionan un uso de alto valor para el calor residual de bajo grado. Usualmente la operación y diseño de este tipo de actividad requiere de un experto ya que hay desafíos operativos como los altos niveles de nutrientes disueltos y sólidos en suspensión. Por lo tanto, el éxito técnico y financiero de este tipo de actividad depende de la capacidad de gestión en la alimentación, el oxígeno disuelto y la química del agua para optimizar el crecimiento de los peces. Las especies de peces serán determinadas por consideraciones de comercialización, producción y ambiente.

Entre los aspectos fundamentales que el desarrollador deberá considerar para la puesta en marcha de un invernadero geotérmico se incluye (Boyd y Lund, 2000):

1. Los precios del mercado de los cultivos que se siembran en invernaderos. Aquí es necesario incluir los precios nacionales y regionales.
2. Los costos operativos del invernadero. Es preciso determinar los rangos de costos para una operación típica como mano de obra, servicios públicos, inventario de planta, componentes hipotecarios y costos para la construcción de las estructuras.
3. Información sobre los cultivos típicos. En este punto se cubren cuestiones como los requisitos de temperatura, CO<sub>2</sub>, iluminación y potenciales enfermedades.
4. Sistemas de calefacción de invernaderos. Este deberá determinar los equipos más comúnmente usados en los invernaderos geotérmicos y los costos asociados.
5. Información de proveedores de componentes de sistemas geotérmicos y estructuras y equipos para invernaderos.

Para el caso de la acuicultura los aspectos mínimos a ser determinados incluyen (Boyd y Lund, 2000):

1. Información sobre el mercado por especie a nivel nacional y regional. Información sobre la producción nacional y estatal, la superficie del estanque, el tipo de producción y el mercado final servido.
2. Problemas de calidad del agua en la acuicultura y la importancia de los principales parámetros de calidad del agua.
3. Información sobre la cría, el manejo, la alimentación y la cosecha de las especies típicas de tilapia y bagre, y langostinos.
4. Cálculos de pérdida de calor en estanques y canales y cálculo de los requisitos de flujo geotérmico para un proyecto de esta naturaleza.
5. Identificación de los expertos técnicos que pueden ser útiles para el desarrollador de acuicultura.
6. Requisitos de permisos estatales de acuicultura.

### 7.2.2.2. Pasteurización de leche

La pasteurización tiene como objetivo preservar la leche al desacelerar el crecimiento de bacterias calentando la leche hasta que se requiera temperatura. Por medio del calor geotérmico se espera reemplazar el uso de diésel empleado en las calderas<sup>12</sup>.

El proceso de pasteurización puede llevarse a cabo como una operación de baja temperatura, tiempo prolongado (acrónimo del inglés low temperature long time LTLT), o como una operación continua alta temperatura/corto lapso (acrónimo del inglés High Temperature/Short Time, HTST). Actualmente, el método más común de pasteurización es por medio de intercambiadores de calor diseñados para el proceso HTST.

Este proceso implica calentar la leche a una cierta temperatura, manteniéndola a esa temperatura bajo condiciones de flujo turbulento continuo durante un tiempo suficientemente largo para garantizar la destrucción y/o inhibición de cualquier microorganismo peligroso que pueda estar presente. Según las validaciones realizadas en la leche entera, las condiciones mínimas de pasteurización son aquellas que tienen efectos bactericidas equivalentes a calentar cada partícula de la leche a 72°C durante 15 segundos (pasteurización de flujo continuo) o 63°C durante 30 minutos (pasteurización por lotes) (Tabla 13).

Tabla 13. Datos de producción de leche pasteurizada (Fuente: Jubaedah et al, 2015).

Volumen promedio de producción de leche pasteurizada	6000 Litros/ día
Temperatura de entrada de agua caliente al pasteurizador	90°C
Temperatura de salida del agua caliente desde el pasteurizador	80°C
Temperatura de entrada de leche desde el pasteurizador	60°C
Temperatura de salida de la leche desde el pasteurizador	82°C
Consumo medio de combustible para la unidad de caldera	90 Litros/día

Para estas actividades es clave evitar la formación de depósitos de sílice que se origina por la disminución de la temperatura a lo largo de la tubería de distribución; es por este motivo que se sugiere que las instalaciones estén ubicadas cerca a los pozos de reinyección hasta la planta de tratamiento de leche.

<sup>12</sup> Algunos ejemplos se encuentran en Klamath Falls, Oregón, EEUU y Oradea, Rumania (Lund, 1997).

Usualmente hay pérdida de calor, por lo tanto, la tasa de pérdida de calor depende del grosor del aislamiento de la tubería, coeficiente de conductividad del material y la temperatura interior y exterior (Jubaedah *et al.*, 2015).

La Figura 5 muestra el diagrama del proyecto Medo-Bel Creamery, en Klamath Falls, Oregón. En esta actividad se empleó el calor geotérmico en el proceso de pasteurización de la leche (Lund, 1997). Un pozo profundo de 233 m proporcionó 6,3 l/s de fluido geotérmico a 87°C a placas intercambiadoras de calor de tres secciones para el proceso de pasteurización.

La leche se procesó a una velocidad de 0.84 l/s, y un total de 225,000 kg cada mes. A veces este proceso requirió calor adicional con gas natural para obtener la temperatura requerida. El agua caliente geotérmica también se usó para otras actividades como la limpieza y pasteurización de lotes de helados y calefacción de los edificios (2,800 m<sup>3</sup>), lo que significó un ahorro sustancial durante el invierno (Lund, 1997).

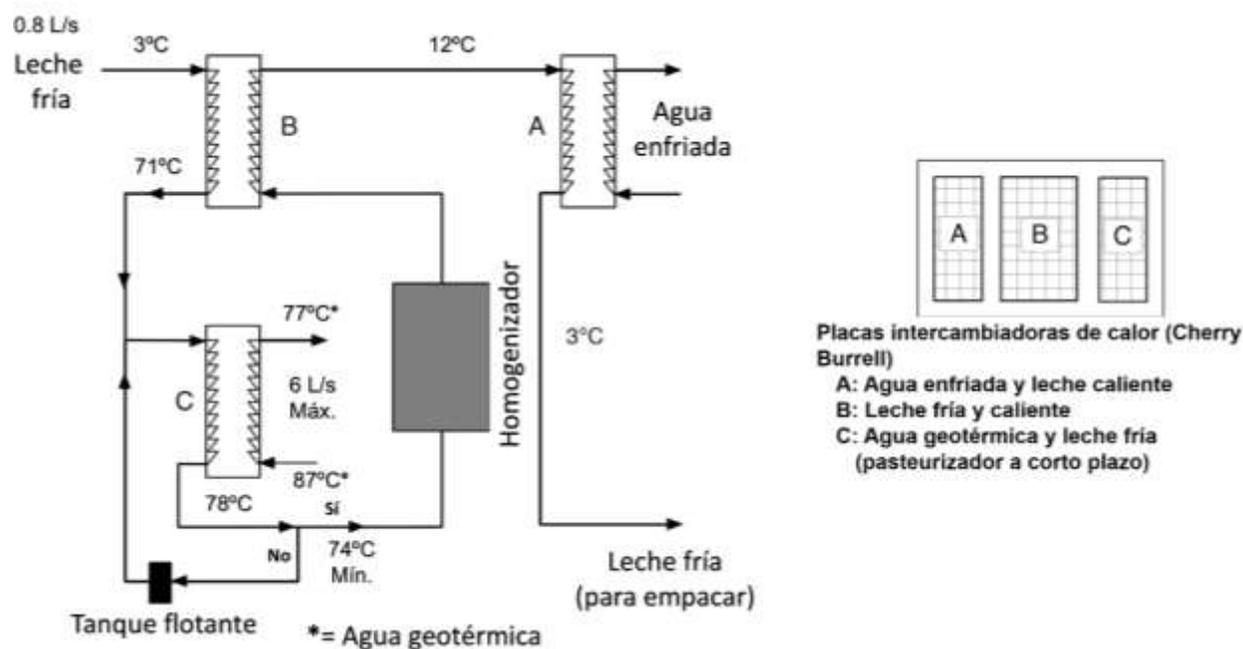


Figura 5. Diagrama de flujo de pasteurización de leche Medo-Bel Creamery (Lund, 1997).

### 7.3. Evaluación de resultados

La evaluación de los resultados realizada por los desarrolladores del proyecto debe abordar aspectos ambientales, educativos, administrativos, organizacional, etc. Este proceso de evaluación debe hacerse en conjunto con las comunidades, de manera que puedan percibir la importancia de

lo realizado, así como la participación en decisiones sobre ajustes y modificaciones que el proceso requiera.

Algunas referencias sobre cómo se puede evaluar el desarrollo y la utilización de los recursos geotérmicos en el contexto de evaluaciones de sostenibilidad se puede encontrar en Shortall *et al.*, 2016.

#### **7.4. Evaluación de impacto**

El proceso de evaluación del impacto plantea preguntas que van desde determinar si lo que se hace ayuda a resolver la situación, si hay beneficios positivos o negativos, y si se justifican los costos del programa y la tasa de retorno (Aedo, 2005). Por medio de esta evaluación se debe ayudar a identificar si los resultados obtenidos corresponden a lo esperado. Es fundamental que su realización se contemple desde la planeación del proyecto, y que los resultados sean compartidos con la comunidad.

#### **7.5. Elementos adicionales a ser abordados en otras regiones con potencial geotérmico en Colombia**

Debido a la gran diversidad ambiental, social y económica del país, existen elementos adicionales que deben ser detallados si se pretenden llevar a cabo un proyecto similar al mencionado anteriormente en otras regiones del país.

Inicialmente es clave identificar cuáles son las regiones del país donde existe el recurso. Existen herramientas en línea como el Inventario Nacional de Manifestaciones Termale de Colombia manejado por el SGC<sup>13</sup> que brinda información acerca de las regiones en el país que tienen manifestaciones termale y sus características fisicoquímicas y regionales. Además de los documentos e información investigativa que el SGC ha publicado sobre geotermia en Colombia.

Para acotar las regiones de interés, en este trabajo se seleccionan las áreas geotérmicas en Colombia que cuentan con más estudios como se presentó en la Tabla 9 y con el fin de reconocer las características sociales y económicas de estos municipios, se extrae información estadística del sistema de estadísticas territoriales TerriData<sup>14</sup> (DNP, 2019) (Tabla 14).

---

<sup>13</sup> Servicio Geológico Colombiano. (2019). Inventario Nacional de Manifestaciones Termale. Recuperado de: <http://hidrotermale.sgc.gov.co/invtermale/>

<sup>14</sup> TerriData: Aplicativo en línea creado por el Departamento Nacional de Planeación (DNP) para difundir y facilitar la visualización de estadísticas e indicadores territoriales.

Tabla 14. Características socioeconómicas de las regiones de Colombia donde se han adelantado estudios para proyectos geotérmicos.

Departamento	Municipio	Fuentes termales (°C) Fuente: Invtermales, SGC - 2019	Población étnica total (%) Fuente: DANE - Censo - 2018	Actividades económicas <sup>15</sup> Fuente: DNP con información del DANE - 2017		
				Primaria (%)	Secundaria (%)	Terciaria (%)
Boyacá	Paipa	48.10	39 (0,14 %)	5.76	13.34	80.90
Caldas	Villamaría	46 - 95	213 (0,47 %)	10.11	10.25	79.64
	Samaná	33 - 37.9	27 (0,15 %)	25.02	9.42	65.56
Risaralda	Santa Rosa de Cabal	21.20 - 82	1230 (1,82 %)	4.50	18.04	67.46
Huila	Rivera	34.50 - 48.8	96 (0,58 %)	36,12	18.73	45.14
	Yaguará	28.50	4 (0,05 %)	25.71	11.50	62.78
	Altamira	32.20	10 (0,28 %)	31.78	14.33	53.90
	Timaná	27.30	363 (1,83 %)	32.12	13.91	53.97
	Colombia	42.70	7 (0,08 %)	45.46	13.73	40.81
	Saladoblanco	25.40 – 30.40	21 (0,20 %)	38.19	13.89	47.92
	Teruel	26.20	119 (1,45 %)	40.41	13.91	45.68
	Tarqui	27.60	118 (0,74 %)	37.36	13.74	48.91
Tolima	Murillo	21.50 - 32	38 (0,77 %)	29.78	13.02	57.20
	Casabianca	60.10	89 (1,31 %)	55.64	11.00	33.36
Putumayo	Colon	39.80 – 51.80	1366 (32,54 %)	8.53	10.52	80.95
	Santiago	78.50	3071 (52,68 %)	26.74	10.52	62.74
	Sibundoy	25.20	3580 (31,05 %)	12.09	10.52	77.40
Nariño	Cumbal	31 - 42	19697 (87,86%)	25.16	10.45	64.39
	Mallama	41	7177 (86,29 %)	29.36	10.27	60.38
	Consacá	22.60	19 (0,19 %)	54.05	10.41	35.53
	La Cruz	39 - 55	36 (0,20 %)	18.58	10.49	70.93
Cauca	Puracé	23.80 – 74.10	11359 (76%)	16.71	10.92	72.36
	Sotará	33.80	5157 (43,1 %)	27.67	10.13	62.20
	Páez	32.40 – 42.10	30652 (81,4%)	28.77	10.43	60.80

De acuerdo con las actividades económicas de los municipios se puede observar que las principales actividades terciarias relacionadas al turismo, transporte, telecomunicaciones, educación, comercio, cuidados de la salud, informática, servicios financieros, investigación, etc.

Para diversificar estas actividades económicas se sugiere iniciar el estudio de la potencial aplicabilidad en estas zonas de proyectos de uso directo de la energía geotérmica en invernaderos, secado de alimentos, acuicultura y pasteurización de la leche como actividades que abastezcan el

<sup>15</sup> Sector primario: se incluyen las actividades basadas en la transformación o explotación de los recursos naturales. Ejemplos: la agricultura, la ganadería y las industrias de extracción de minerales.

Sector secundario: son las actividades con un grado de transformación de los insumos. Estas actividades son de tipo industrial, tales como la fabricación de químicos, cauchos, plásticos, zapatos, textiles, confecciones y aparatos de alta tecnología, entre otros.

Sector terciario: son actividades en las que la producción no es un bien tangible sino un servicio intangible. Entre estas está el turismo, la educación, el transporte y los servicios financieros.

Fuente: Banco de la República de Colombia. (2006). El sistema económico. Departamento de Comunicación Institucional. Recuperado de: [http://www.banrep.gov.co/docum/Lectura\\_finanzas/pdf/guia\\_1\\_el\\_sistema\\_economico.pdf](http://www.banrep.gov.co/docum/Lectura_finanzas/pdf/guia_1_el_sistema_economico.pdf)

mercado local y si es viable, otros mercados. En los casos donde ya existen proyectos geotérmicos como piscinas dedicadas a la hotelería y turismo se sugiere agregar valor a los servicios prestados en actividades como calefacción y aprovechamiento en actividades agrícolas.

Es importante resaltar la presencia de un porcentaje alto de grupos étnicos (DANE, 2018) especialmente en los departamentos de Cauca, Putumayo y Nariño en las zonas donde existe el potencial geotérmico. Por lo tanto, cualquier proyecto en estas regiones deberá contar con estrategias que permitan la participación de estas comunidades, y según la magnitud de las actividades, se deberán abordar aspectos adicionales como el Derecho Fundamental a la Consulta Previa (Mininterior, 2019).

En algunos proyectos geotérmicos internacionales se han encontrado entre los impactos sociales la falta de integración de las comunidades, desplazamiento de los asentamientos para la construcción de las obras o para evitar la exposición a las emisiones de la planta geotérmica (esto dependerá de las tecnologías empleadas), falta de beneficios hacia las comunidades posterior a la construcción de la planta, impacto en el patrimonio cultural y natural. En especial las comunidades étnicas han manifestado sentirse invadidos (profanación de sitios sagrados) por los proyectos en espacios que reconocen fuertemente como parte de su identidad (De Jesus, 2005). Sin embargo, el desarrollo de este tipo de proyectos en cascada con grupos étnicos también ha presentado resultados positivos como creación de escuelas, mejora en el servicio de agua y el transporte terrestre y oportunidad de trabajo especialmente en los proyectos de uso directo.

De aquí la importancia de los procesos educativos y de socialización antes, durante y después de cada fase para hacer partícipes a las comunidades en los mismos. Como ejemplos recientes a nivel nacional se cita las iniciativas de socialización del uso directo de la energía geotérmica con el Cabildo Indígena de Guachicono del municipio de La Vega en el departamento del Cauca en proyectos recreacionales con aprovechamiento de los termales del Chiza (Arteaga y Pabón, 2019).

En el caso del departamento de Boyacá se vienen adelantando estudios para determinar el potencial del recurso en el sector de Paipa; el SGC ha liderado estos esfuerzos y el proceso de licitación para la exploración para determinar el potencial del recurso se encuentra en curso. Igualmente el SGC viene adelantando actividades educativas con las comunidades.

## 8. Resultados

Esta propuesta menciona los elementos básicos para el desarrollo de un proyecto en cascada a partir de la revisión documental la cual provee información parcial de las potenciales características del recurso para proyectar las modalidades en las que se podría emplear el recurso. Entre éstos se tiene el potencial proyectado de generación de 50MW para el recurso geotérmico en Villamaría, y a partir de éste, se compara con otros proyectos en el mundo. Con esta información se identifican las temperaturas y caudales necesarios para desarrollar en forma de cascada actividades de uso directo.

De acuerdo con la información obtenida en las etapas iniciales de exploración geotérmica, se estima que con el potencial de generación identificado en Villamaría (50MW) se podría llevar a cabo un proyecto en cascada; sin embargo, sigue siendo necesario obtener datos del subsuelo.

Tal como se puede ver en la Figura 3, durante las primeras etapas suele haber alto riesgo para el inversionista, por eso desde la experiencia de la autora, es importante que se cumplan no solo con las exigencias ambientales y sociales locales sino internacionales para viabilizar los proyectos hacia potenciales financiadores que ayuden a sobrepasar estas barreras.

Para identificar cuáles serían las actividades de uso directo que se podrían emplear el calor residual de una planta geotérmica, se hizo una revisión bibliográfica en la que se identificó que la actividad económica principal de la zona de interés geotérmico en Villamaría, es la ganadería seguido de la agricultura; Estas dos actividades son las más comunes que se desarrollan en conjunto con la generación eléctrica en los proyectos en cascada.

Con la identificación de los elementos básicos para desarrollar proyectos en estas actividades también se hacen aproximaciones hacia otros tipos de usos como la acuicultura. Esta actividad ha sido relevante en los proyectos geotérmicos en cascada a nivel mundial, además de que podría ser una estrategia para la diversificación de la economía en el sector.

Se resalta la importancia de hacer un estudio detallado de la comunidad, tanto de manera directa como a través de fuentes secundarias, con el fin de que el proyecto geotérmico en cascada se construya a partir de las características, necesidades e intereses de la comunidad abordando los aspectos ambientales y socioeconómicos.

Esta propuesta parte de un proyecto de generación eléctrica del cual se derivan proyectos de uso directo (agricultura, ganadería, acuicultura, etc.). Aunque se espera que esta forma de aprovechamiento sea considerada desde la concepción de los proyectos, es importante resaltar que

la mayor parte de las manifestaciones geotérmicas se encuentran zonas donde hay presencia de grupos étnicos. Cualquier tipo de incitativa que se lleve a cabo en estas zonas requerirá de ir de esfuerzos específicos para hacer viable la entrada de este tipo de proyectos.

## 9. Discusión

Los proyectos geotérmicos en cascada, tal y como se ha mencionado, son una forma efectiva para la explotación del recurso. Los beneficios que se pueden obtener de este tipo de proyectos no solo se limitan al campo económico y social sino ambiental. Su característica de energía renovable y versátil la convierten en una herramienta clave para el desarrollo de los territorios y mejoramiento de las condiciones ambientales al reemplazar los combustibles fósiles.

Para el caso del proyecto geotérmico en el municipio de Villamaría, aunque no se tienen pruebas de pozo para ratificar los supuestos, las etapas de exploración temprana predicen un potencial de aproximadamente 50 MW. Con este potencial y dada la amplia manifestación geotérmica superficial en la zona de interés, se podría considerar que la viabilidad para un proyecto en cascada es alta.

Con respecto a la potencial puesta en marcha de una planta geotérmica y ejecución de proyectos de uso directo en un proyecto en cascada en el municipio de Villamaría surgen preguntas para investigaciones posteriores, como:

- ¿Cómo interactúa el desarrollo de este tipo de proyectos con los aspectos ambientales y de conservación que rodean esta zona aledaña Parque Nacional Natural de Los Nevados? ¿Cuáles son los impactos que podrían esperarse del cambio en el uso del suelo para los proyectos propuestos en este trabajo (invernaderos, pasteurización de leche y acuicultura)?
- ¿Cuáles podrían ser las herramientas de comunicación para que las comunidades reconozcan la naturaleza y potencialidades de este recurso en el desarrollo de los territorios?

Con respecto a las demás zonas del país con potencial geotérmico se plantean preguntas como:

- ¿Qué otras consideraciones deberían ser abordadas con grupos étnicos en zonas de conflicto para el desarrollo de un proyecto geotérmico ya sea para generación eléctrica o uso directo?

Este trabajo permite reconocer los esfuerzos que siguen haciendo falta para poder lograr que las regiones con el potencial geotérmico aprovechen el recurso de forma estratégica especialmente en actividades de uso directo especialmente en el sector rural.

Las debilidades están asociadas a que la aproximación a los potenciales proyectos de uso directo en un proyecto en cascada, serán solo posibles hasta que existan datos de pozo reales (caudal, fisicoquímica) del reservorio.

## **10. Conclusiones y recomendaciones**

Las energías renovables se han convertido en el centro de atención a nivel mundial como alternativas energéticas para la reducción de la contaminación ambiental además de las oportunidades económicas adicionales que brindan a las comunidades que cuentan con el recurso.

En el caso de la energía geotérmica ha sido posible demostrar en proyectos mundiales que es una fuente de energía limpia y útil en diferentes tipos de proyectos que van desde la generación eléctrica hasta proyectos de uso directo; sin embargo, para el caso Colombiano y desde el punto de vista de generación eléctrica, aún no juega un papel significativo debido a los altos riesgos en las etapas iniciales de exploración y a los costos competitivos con otras fuentes tradicionales de energía.

La energía geotérmica sigue siendo una opción llamativa para la diversificación de la matriz energética del país que depende en gran porcentaje de las hidroeléctricas. Los esfuerzos para la puesta en marcha de este tipo de proyectos siguen en pie aun cuando el ritmo al que se ha desarrollado no es tan rápido como las actuales tendencias y políticas de transición energética lo esperarían.

Para el caso particular del proyecto geotérmico en el municipio de Villamaría, el desarrollo de un proyecto en cascada en el que se integran las dos formas de explotación del recurso puede ser clave para la región. En relación al aspecto socioeconómico se espera que haya una mejora en la calidad de vida de las personas mediante la creación de empleo y la diversificación de la economía; y en el aspecto ambiental se espera que haya reducción de gases de efecto invernadero por la disminución en el uso de combustibles fósiles especialmente en las actividades de uso directo (invernaderos, pasteurización de leche y acuicultura).

Si bien este trabajo define los elementos básicos para el desarrollo de un proyecto en cascada, el campo del uso directo de la energía geotérmica podría servir como puerta de entrada a

proyectos de gran escala como los de generación eléctrica en zonas donde aún no se estima el desarrollo de este tipo de proyectos.

Con respecto a las demás regiones del país que cuentan con el recurso, es necesario que se realice un estudio previo detallado del mercado local especialmente en aquellos sectores donde los grupos étnicos tienen una participación significativa.

Las aproximaciones o supuestos hechos en este trabajo pueden servir como guía previa para el desarrollo de un proyecto en cascada; no obstante, es importante resaltar que para lograr un rápido desarrollo de este campo es necesario que se fortalezca el marco normativo de la geotermia en el país, que se aborden los temas concernientes a la mitigación de los riesgos del desarrollo del recurso además de distinguir entre las escalas de trabajo, en aspectos técnico-económicos tanto para un proyecto de uso directo como para uno de generación eléctrica.

Se sugiere a las entidades encargadas del licenciamiento una mejor articulación para así mejorar la eficiencia de los procesos. Igualmente se requieren de mayor esfuerzo gubernamental para promover las energías renovables no convencionales de forma tal que la preparación no solo se limite al campo investigativo sino al personal operativo y ejecutivo de las empresas, y de los funcionarios de las distintas entidades públicas con competencias en el tema, y que en últimas son los responsables del desarrollo de proyectos y la implementación de las políticas y estrategias en esta área.

Es importante prestar atención al proceso educativo y de capacitación de forma tal que se genere un proceso de apropiación por parte de las comunidades. Con estos se pretende lograr la aceptación social en las regiones donde se han identificado conflictividad por la tenencia de tierras.

Aun cuando el desarrollo de un proyecto geotérmico para generación eléctrica pueda ser lento bajo las condiciones actuales, queda abierto un amplio camino para la puesta en marcha de proyectos de uso directo. El uso adecuado de los recursos geotérmicos puede contribuir al desarrollo de energía sostenible en todas las dimensiones ya que el desarrollo de la energía geotérmica está íntimamente relacionado con la sostenibilidad no solo a nivel local sino regional y global.

## 11. Referencias Citadas

- Aedo, C.,** (2005). Evaluación del impacto. Santiago de Chile (Chile): CEPAL. 78 p. ISBN: 92-1-322823-6
- Akella, A.K., Saini, R.P., Sharma, M.P.,** (2009). Social, economical and environmental impacts of renewable energy systems. *Renewable Energy, Elsevier*, vol. 34(2), pages 390-396.
- Alcaldía Municipal de Villamaría en Caldas,** (2015). Población. Recuperado de <http://www.villamaria-caldas.gov.co/municipio/poblacion>
- Alfaro, C.,** (2015). Improvement of perception of the geothermal energy as a potential source of electrical energy in Colombia, country update. Proceedings, World Geothermal Congress 2015, Melbourne, Australia International Geothermal Association, 15 p
- Allis, R., Bromley, C., Currie, S.,** (2009). Update on subsidence at the Wairakei–Tauhara geothermal system, New Zealand. *Geothermics* 38, 169–180.
- Ármansson, H., Kristmannsdóttir, H., Hallsdóttir, B.,** (2001). Gas emissions from geothermal fields (In Icelandic). Orkuning 2001, Gunnarsdóttir M. J. (Ed.), Reykjavík, pp. 324–330.
- Arrubarrena, M., Pelayo, L.** (2012). Potential development zones for geothermal direct uses in Mexico with a specific site recommendation. *GHC Bulletin*, 5-8. Web:<http://geoheat.oit.edu/bulletin/bull31-2/art2.pdf>.
- Arteaga, A.M., Pabón, M.N.** (2019). Investigación del potencial geotérmico recreacional de una fuente termal en el Cauca- resguardo indígena de Guachicono –fase pre-factibilidad. Trabajo de grado. Facultad de Ingeniería Civil. Universidad del Cauca.
- Axelsson, G.,** (2008). Importance of geothermal reinjection. En: Workshop for Decision Makers on Direct Heating Use of Geothermal Resources in Asia. Organized by UNUGTP, TBLRREM and TBGMED, Tianjin, China. pp. 11–18.
- Banco de la República de Colombia.** (2006). El sistema económico. Departamento de Comunicación Institucional. Bogotá, Colombia. Recuperado de: [http://www.banrep.gov.co/docum/Lectura\\_finanzas/pdf/guia\\_1\\_el\\_sistema\\_economico.pdf](http://www.banrep.gov.co/docum/Lectura_finanzas/pdf/guia_1_el_sistema_economico.pdf)
- Banco Interamericano de Desarrollo (BID).** (2016). Investment Grant for the Financing and Risk Transfer Program for Geothermal Power (Co-G1007). Proposal for Operation Development. Recuperado de:

[https://www.climateinvestmentfunds.org/sites/cif\\_enc/files/meeting-documents/utility-scale\\_geothermal-colombia-project\\_document.pdf](https://www.climateinvestmentfunds.org/sites/cif_enc/files/meeting-documents/utility-scale_geothermal-colombia-project_document.pdf)

- Bayer, P., Rybach, L., Blum, P., Brauchler, R.** (2013). Review on life cycle environmental effects of geothermal power generation, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volume 26, Pages 446-463. ISSN 1364-0321, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.05.039>.
- Beate, B., Urquizo, M.**, (2015). Geothermal country update for Ecuador: 2010 - 2015. Proceedings, World Geothermal Congress 2015, Melbourne, Australia International Geothermal Association, 14 p.
- Benderitter, Y., Cormy, G.**, (1990). "Possible approach to geothermal research and relative cost estimate." In: Dickson MH and Fanelli M (eds) Small geothermal resources, UNITARRJNDP Centre for Small Energy Resources, Rome, Italy, 61-71
- Bertani, R.** (2015). Geothermal Power Generation in the World 2010-2014 Update Report Enel Green Power. Proceedings World Geothermal Congress 2015 Melbourne, Australia, 19-25 April 2015. <https://www.geothermal-energy.org/pdf/IGAstandard/WGC/2015/01001.pdf>
- Bertani, R.**, (2001). IGA activities. Highlights of the 28th IGA Board Meeting. IGA Quarterly 44, 1-2
- Bona, P., Coviello, M.F.**, (2016). Valoración y gobernanza de los proyectos geotérmicos en América del Sur Una propuesta metodológica. Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL).
- Boyd, T.L., Lund, J. W.**, (2000). Geothermal Heating of Greenhouses and Aquaculture Facilities. Geothermal Resources Council *Transactions*, Vol. 24, September 24-27.
- Brandsdóttir, B., Franzson, H., Einarsson, P., Árnason, K., Kristmannsdóttir, H.**, (2002). Seismic monitoring during an injection experiment in the Svartsengi geothermal field, Iceland. *Jokull* 51, 43-52.
- Cámara de Comercio de Manizales por Caldas (CCMP).** (2017). Ficha Municipal – VILLAMARÍA. Región Centro Sur de Caldas. Recuperado de: [http://www.ccmpe.org.co/ccm/contenidos/298/Ficha\\_municipal\\_Villamaria.pdf](http://www.ccmpe.org.co/ccm/contenidos/298/Ficha_municipal_Villamaria.pdf)
- Cámara de diputados del H. Congreso de la unión.** (2014). Ley de Energía Geotérmica. Recuperado de: [http://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/LEG\\_110814.pdf](http://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/LEG_110814.pdf)

- Cappetti, G., Parisi, L., Ridolfi, A., Stefani, G.,** (1995). Fifteen years of reinjection in the Larderello-Valle Secolo area: analysis of the production data. In: World Geothermal Congress 1995. Florencia, Italia, 1997–2000.
- Central Hidroeléctrica de Caldas (CHEC) - Empresas Públicas de Medellín (EPM).** (2019). Gestión Proyecto Geotérmico Valle de Nereidas. Recuperado de: <http://www.sostenibilidadchec.com/energias-renovables-no-convencionales/#>
- Central Hidroeléctrica de Caldas (CHEC) - Empresas Públicas de Medellín (EPM).** (2019). Extracto del Informe de sostenibilidad del Proyecto Geotérmico Valle de Nereidas. Recuperado de: [https://www.sostenibilidadchec.com/Informe\\_de\\_sostenibilidad\\_2019.pdf](https://www.sostenibilidadchec.com/Informe_de_sostenibilidad_2019.pdf)
- Clean Energy Ahead Turboden.** (2019). La tecnología ORC. Brescia - Italia. Recuperado de: <https://www.turboden.com/turboden-orc-technology/1062/the-orc-technology>
- Climate Registry** (2012). “U.S. Default Factors for Calculating CO2 Emissions from Fossil Fuel and Biomass Combustion.” <http://www.theclimateregistry.org/downloads/2012/01/2012-ClimateRegistry-Default-Emissions-Factors.pdf>
- Consejo Municipal para la Gestión del Riesgo de Desastres (CMGRD)** (2017). Plan Municipal de Gestión del Riesgo de Desastres. Municipio de Villamaría, Caldas. Recuperado de: [https://caldas.gov.co/index.php/component/easyfolderlistingpro/?view=download&format=raw&data=eNpFT8tugzAQ\\_BXLP1wwbquk2ZxQsKJEECryuEZuWYglE5DttKmqHvp\\_\\_ajaGNSTPTM7uzMCGIMvAzOgdacq1HRpgD0CbbGSXCLa8pSveTmQDOjNoA5jZqCAxpPU3NDY\\_xVzoOfzwHn0HKxX0aKHMVD\\_zAIrK7qUEAeTRtULe\\_Hy0wJotCp2-2N2SEharI453x2KPXnJ12VKPgnPS04eYraITpssS\\_Kk3CTjtVoqnK4xh4PIJJUSrdDy90d4xdXEux1\\_fVWPwfHeS41mSsVcXFxcYa14u7R4ddOvA-vC9RrfJX6Ewq5M03WNclwnv\\_9cMPdkaEY](https://caldas.gov.co/index.php/component/easyfolderlistingpro/?view=download&format=raw&data=eNpFT8tugzAQ_BXLP1wwbquk2ZxQsKJEECryuEZuWYglE5DttKmqHvp__ajaGNSTPTM7uzMCGIMvAzOgdacq1HRpgD0CbbGSXCLa8pSveTmQDOjNoA5jZqCAxpPU3NDY_xVzoOfzwHn0HKxX0aKHMVD_zAIrK7qUEAeTRtULe_Hy0wJotCp2-2N2SEharI453x2KPXnJ12VKPgnPS04eYraITpssS_Kk3CTjtVoqnK4xh4PIJJUSrdDy90d4xdXEux1_fVWPwfHeS41mSsVcXFxcYa14u7R4ddOvA-vC9RrfJX6Ewq5M03WNclwnv_9cMPdkaEY)
- Cruz, V., Vargas, V.,** (2015). Geothermal country update for Peru, 2010–2014. Proceeding, World Geothermal Congress 2015, Melbourne Australia, International Geothermal Association, 9 p.
- De Jesus, A.C.** (2005). Social Issues Raised and Measures Adopted in Philippine Geothermal Projects. Proceedings World Geothermal Congress 2005. Antalya, Turkey, 24-29 April.
- Departamento Nacional de Planeación (DNP).** (2019). Sistema de Estadísticas Territoriales TerriData. Recuperado de: <https://terridata.dnp.gov.co/>

- Departamento Nacional de Planeación, ENERSINC.** (2017). Energy Supply Situation in Colombia. Recuperado de: <https://www.dnp.gov.co/Crecimiento-Verde/Documents/ejes-tematicos/Energia/MCV%20-%20Energy%20Supply%20Situation%20vf.pdf>
- Díaz, A., Kaya, E., Zarrouk, S.** (2016). Reinjection in geothermal fields - A worldwide review update. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 53. 105-162.
- Dickson, M. H., Fanelli, M.,** (2003). *Geothermal energy: utilization and technology*. ISBN: 978-92-3-103915-7, 92-3-103915-6, 205p.
- Dickson, M.H., Fanelli, M. (eds).** (1990). “Small geothermal resources,” UNITAR/UNDP Centre for Small Energy Resources, Rome, Italy, 1-29.
- DiPippo, R.** (1999). Small Geothermal Power Plants: Design, Performance and Economics. *GHC Bulletin*, June 1999, pp. 1-8, <http://geothermalcommunities.eu/assets/elearning/7.10.art1.pdf>
- DiPippo, R.** (2015). “Geothermal Power Plants: Principles, Applications, Case Studies and Environmental Impact”, Elsevier, Amsterdam, [www.sciencedirect.com/science/book/9780081008799](http://www.sciencedirect.com/science/book/9780081008799) (accessed 30 May 2017).
- Empresa Nacional del Petróleo (ENAP)** (2018). *Proyectos: Cerro Pabellón*. Recuperado de [https://www.enap.cl/pag/683/1831/cerro\\_pabellon](https://www.enap.cl/pag/683/1831/cerro_pabellon)
- Enel Green Power** (2011). *Concessione di Coltivazione per risorse geotermiche “Milia” Studio di Impatto Ambientale*. Recuperado de: <http://www.regione.toscana.it/documents/10180/317162/siamiliatomo4sintecinontecnica.pdf/29574fdf-0807-4a01-bc07-3dff79838179> (en italiano)
- Energy Information Administration (EIA).** (2013c). “Electric Power Annual: Sulfur Dioxide Uncontrolled Emissions Factors.” Washington DC: EIA. Accessed March 2<sup>nd</sup>, 2013. <http://www.eia.gov/forecasts/aeo/er/index.cfm>
- Environmental Protection Agency (EPA).** (2009). “Mandatory Green House Gas Reporting.” Washington DC: EPA. Accessed March 2<sup>nd</sup>, 2013. <http://www.epa.gov/ghgreporting/documents/pdf/2009/GHG-MRR-FinalRule.pdf>
- Gehringer, M.,** (2015). Use of Waste Heat from Geothermal Power Plants Focusing on Improving Agriculture in Developing Countries. *GRC Transactions*, Vol. 39, pags. 125 - 132, Washington DC.

- Gehringer, M., & Loksha, V.** (2012). Manual de Geoterminia: Cómo planificar y financiar la generación de electricidad. Informe Técnico 002/12. Washington D.C.: Banco Internacional para la Reconstrucción y el Desarrollo - Programa de Asistencia para la Gestión del Sector Energético (ESMAP). Recuperado de: [https://www.esmap.org/sites/default/files/esmap-files/ESMAP\\_GEOTHERMAL\\_Spanish\\_book\\_Optimized.pdf](https://www.esmap.org/sites/default/files/esmap-files/ESMAP_GEOTHERMAL_Spanish_book_Optimized.pdf)
- Glover, R.B., Hunt, T.M., Severne, C.M.,** (2000). Impacts of development on a natural thermal feature and their mitigation—Ohaaki Pool, New Zealand. *Geothermics* 29, 509–523
- Goff, S., Goff, F.,** (1997). Environmental impacts during development: Some examples from Central America. Proceedings of the NEDO International Geothermal Symposium, Sendai, pp. 242–250
- Gökçen Akkurt, G., Yildirim, N.,** (2008). Effect of Non-Condensable Gases on geothermal power plant performance. Case study: Kizildere Geothermal Power Plant-Turkey. *International Journal of Exergy - INT J EXERGY*. 5. 10.1504/IJEX.2008.020832.
- Grand, M. y Handszer, A.,** (1989). Naturaleza y dinámica de un flujo piroclástico en la zona de Nereidas, Departamento de Caldas. Tesis de grado. Universidad de Caldas, Facultad de Geología y Minas. 193 p.
- Gupta, H., Sukanta, R.,** (2007). Geothermal Energy: An alternative resource for the 21<sup>st</sup> century. *Elsevier*.
- Haehnlein, S., Bayer, P., Blum, P.,** (2010). International legal status of the use of shallow geothermal energy. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 14 (2010) 2611–2625.
- Haenel, R., Rybach, L., Stegena, L.** (eds). (1988). “Handbook of Terrestrial Heat-Flow Density Determination,” Kluwer Academic, Dordrecht, Netherlands, 9-57.
- Haraldsson, I.G.** (2013). Legal and Regulatory Framework – Barrier or Motivation for Geothermal Development? United Nations University Geothermal Training Programme. Disponible en: <https://orkustofnun.is/gogn/unu-gtp-sc/UNU-GTP-SC-14-17.pdf>
- Haraldsson, I.G.** (2012). Geothermal activity in South America: Bolivia, Chile, Colombia, Ecuador, and Peru. United Nations University Geothermal Training Programme. Disponible en: <http://www.os.is/gogn/unu-gtp-sc/UNUGTP-SC-16-04.pdf>

- Henriquez, W.A.**, (2015). Geothermal development in Honduras. Proceedings, World Geothermal Congress 2015, Melbourne, Australia International Geothermal Association, 7 p.
- Herrera, R., Montalvo, F. & Herrera, A.** (2010). El Salvador country update. In Proceedings of the 2010 World Geothermal Congress, 25–29 April 2010, Bali, Indonesia, Paper No. 0141.
- Hochstein, M.P.**, (1990). Classification and assessment of geothermal resources.” In: Dickson MH and Fanelli M (eds) Small geothermal resources, UNITAR/UNDP Centre for Small Energy Resources, Rome, Italy, 31-59.
- Hunt, T.**, (2001). Five lectures on environmental effects on geothermal energy utilization. United Nations University Geothermal Training Programme 2000, Report 1, Reykjavík, Iceland, pp. 109
- Hurtado de Barrera, J.**, (2010). Metodología de la investigación: guía para una comprensión holística de la ciencia. 4 ed. Caracas (Venezuela): Quirón Ediciones. 1327 p. ISBN: 978-980-6306-66-0.
- International Energy Agency (IEA), Energy, Climate Change and Environment** (2016). Insights, p. 133, <https://doi.org/10.1787/9789264266834-en>
- International Energy Agency - Energy Technology Systems Analysis Programme IEA-ETSAP.** (2010). Technology Brief E07 Geothermal Heat and Power, IEA ETSAP, [https://iea-etsap.org/E-TechDS/PDF/E07-geoth\\_energy-GS-gct\\_ADfinal\\_gs.pdf](https://iea-etsap.org/E-TechDS/PDF/E07-geoth_energy-GS-gct_ADfinal_gs.pdf).
- IRENA** (International Renewable Energy Agency). (2017). Geothermal Power: Technology Brief, International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi.
- IRENA** (International Renewable Energy Agency). (2017c). Project Navigator: Technical Concept Guidelines for Geothermal Projects 2017. IRENA, <https://navigator.irena.org/index.html>.
- Jubaedah, E., Bambang T.P., Abdurrachim.** (2015). Study of Geothermal Utilization for Milk Pasteurization in Pangalengen, Indonesia. *Proceedings World Geothermal Congress 2015 Melbourne, Australia*, 19-25 April.
- Kaya, E., Zarrouk, S.J., O’Sullivan, M.J.**, (2011). Reinjection in Geothermal Fields: A Review of Worldwide Experience. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 15, 47-68.
- Kristmannsdóttir, H., Ármannsson, H.**, (2003). Environmental aspects of geothermal energy utilization. *Geothermics*, Volume 32, Issues 4–6, Pages 451-461, ISSN 0375-6505,

[https://doi.org/10.1016/S0375-6505\(03\)00052-X](https://doi.org/10.1016/S0375-6505(03)00052-X).

<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S037565050300052X>)

- Kristmannsdóttir, H., Sigurgeirsson, M., Ármannsson, H., Hjartarson, H., Ólafsson, M.,** (2000b). Sulfur gas emissions from geothermal power plants in Iceland. *Geothermics* 29, 525–538.
- Kutscher, C.,** (2009b). Can geothermal power replace coal? *Solar Today*, September/October. American Solar Energy Society (ASES).
- Lahsen, A., Rojas, J., Morata, D., Aravena, D.,** (2015). Geothermal exploration in Chile: country update. Proceedings, World Geothermal Congress 2015, Melbourne, Australia International Geothermal Association, 7 p.
- Lee, K.C.,** (1996). Classification of Geothermal Resources - An Engineering Approach. Proceedings, Twenty-First Workshop on Geothermal Reservoir Engineering Stanford University, Stanford, California, January 22-24, 1996 SGP-TR- 151 pp 85-92.
- Long, M., Lewis, B., Ralph, M.** (2003). “Geothermal Power Production: Steam for Free”. POWER Engineers, Idaho, US, <https://www.powereng.com/wp-content/uploads/2012/08/Power-Gen-Geothermal.pdf>.
- Lund, J. W.** (1999). Small geothermal power project examples. *GHC Bulletin*, June 1999. Recuperado de: <http://www.oit.edu/docs/default-source/geoheat-center-documents/quarterly-bulletin/vol-20/20-2/20-2-art2.pdf?sfvrsn=4>.
- Lund, J. W.** (1997). Milk Pasteurization with Geothermal Energy, *Quarterly Bulletin*, Vol. 18, No. 3 (August), Geo-Heat Center, Klamath Falls, OR, pp. 13 - 15.
- Lund, J.W., Freeston, D.H. & Boyd, T.L.** (2011). Direct utilization of geothermal energy 2010 worldwide review. *Geothermics*, 40(13): 159–180.
- Lund, J., Boyd, T.L.,** (2015). Direct utilization of geothermal energy 2015 worldwide review. *Geothermics* 60 (2016) 66–93. Proceedings of the World Geothermal Conference 2015. Melbourne, Australia. Bochum: Intl. Geothermal Assn.
- Lunis, B.,** (1989). Environmental considerations. In: Lienau, P., Lunis, B. (Eds.), *Geothermal Direct Use. Engineering and Design Guidebook*. Geo-heat Center Klamath Falls, Oregon, USA, pp. 293–401.
- Manzella, A., Bonciani, R., Allansdottir, A., Botteghi, S., Donato, A., Giamberini, S., Lenzi, A., Paci, M., Pellizzone, A., Scrocca, D.,** (2018). Environmental and social aspects of

- geothermal energy in Italy, *Geothermics*, Volume 72, Pages 232-248, ISSN 0375-6505, <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2017.11.015>.  
(<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S037565051730161X>)
- Marzolf, N.C.** (2014). Emprendimiento de la energía geotérmica en Colombia / Natacha C. Marzolf. p. cm. — (Monografía del BID; 215).
- Matek, B.**, (2013). Promoting Geothermal Energy: Air Emissions Comparison and Externality Analysis. April 2013 Geothermal Energy Association 209 Pennsylvania Ave. SE Washington, DC 20003, USA.
- Maya, M., y González, H.**, (1995). Unidades litodémicas en la Cordillera Central de Colombia. *Boletín Geológico*, 35(2-3), 43-57. INGEOMINAS.
- Mburu, M., Kinyanjui, S.** (2012). Cascaded use of geothermal energy: Eburru case study. *GHC Bulletin*, February, 21-26.
- Mejía, E., Rayo, L., Méndez, J., and Echeverri, J.** (2014). Geothermal development in Colombia. Short Course VI on Utilization of Low-and Medium-Enthalpy Geothermal Resources and Financial Aspects of Utilization, organized by UNU-GTP and LaGeo, in Santa Tecla, El Salvador. Recuperado de: <http://www.os.is/gogn/unu-gtp-sc/UNU-GTP-SC-18-07.pdf>.
- Merida, L.**, (1999). Curing blocks and drying fruit in Guatemala, *Geo-Heat Center Quarterly Bulletin* 20 (4), Klamath Falls, OR, pp. 19–22.
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible de Colombia (MADS).** (2016). Colombia se propone aumentar a 30% la meta de reducción de emisiones de GEI para 2030. Recuperado de: <http://www.minambiente.gov.co/index.php/noticias-minambiente/2480-colombia-se-propone-aumentar-a-30-la-meta-de-reduccion-de-emisiones-de-gei-para-2030>
- Ministerio del Interior de Colombia (Mininterior).** (2019). Consulta Previa Grupos Étnicos. Recuperado de: <https://www.mininterior.gov.co/areas-misionales/direccion-de-consulta-previa/consulta-previa-grupos-etnicos>
- Monsalve, M.** (2018). Análisis de flujos de carga del sistema CHEC ante la incorporación masiva de fuentes de generación. Universidad Nacional de Colombia Facultad de Ingeniería y Arquitectura Manizales, Colombia.
- Muffler, P., Cataldi, R.** (1978). “Methods for regional assessment of geothermal resources” *Geothermics*, 7, 53-89.

- Narasimhan, T.N.**, (2013). Subsidence Due to Geothermal Fluid Withdrawal. Reviews in Engineering Geology. Lawrence Berkeley National Laboratory (LBNL). Paper LBL-10967. Recuperado de: <http://escholarship.org/uc/item/8zz4q56x>.
- National Research Council (NRC)**. (2010). "Hidden Costs of Energy: Unpriced Consequences of Energy Production and Use." Washington, DC. *The National Academies Press*. Accessed March 2<sup>nd</sup>, 2013. [http://www.nap.edu/catalog.php?record\\_id=12794](http://www.nap.edu/catalog.php?record_id=12794)
- OLADE** (2013). Geothermal energy in Andean countries. Dr. Eng. Gabriel Salazar Y. Director of Studies and Projects, Lima, Perú. Disponible en: [http://www.irena.org/DocumentDownloads/events/2013/November/OLADE/1\\_Salazar.pdf](http://www.irena.org/DocumentDownloads/events/2013/November/OLADE/1_Salazar.pdf)
- ORMAT** (2017). "Combined Cycle Units Geothermal Power Plants", ORMAT, Recuperado de: [http://www.ormat.com/solutions/Geothermal\\_Combined\\_Cycle\\_Units](http://www.ormat.com/solutions/Geothermal_Combined_Cycle_Units).
- Parri, R., y Lazzeri, F.**, (2016). 19 - Larderello: 100years of geothermal power plant evolution in Italy. Editor(s): Ronald DiPippo, Geothermal Power Generation, Woodhead Publishing, 2016, Pages 537-590, ISBN 9780081003374, <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100337-4.00019-X>. (<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B978008100337400019X>)
- Pellizzone, A., Allansdottir, A., De Franco, R., Manzella, A., Muttoni, G.**, (2015). Exploring public engagement with geothermal energy in southern Italy: a case study. *Energy Policy* 85, 1–11.
- Pellizzone, A., Allansdottir, A., De Franco, R., Manzella, A., Muttoni, G.**, (2017). Geothermal energy and the public: a case study on deliberative citizens' engagement in central Italy. *Energy Policy* 101, 561–570.
- Pesce, A.H.**, (2015). Argentina country update. Proceedings, World Geothermal Congress 2015 International Geothermal Association, 212 p.
- Pioquinto, W.P.C y Caranto, J.A.**, (2005). Mitigating the Impact of Landslide Hazards in PNO-EDC Geothermal Fields. Proceedings World Geothermal Congress 2005 Antalya, Turkey, 24-29 April 2005 pp 1-9
- Rafferty, K.** (1998a). Greenhouses, Geothermal Direct-Use Engineering and Design Guidebook, Chapter 14. Lund, Lienau and Lunis (Eds.). Geo-Heat Center, Klamath Falls, OR, pp. 307-326.

- Rafferty, K., Boyd, T. L.** (1997). Geothermal Greenhouse Information Package, Geo-Heat Center, Klamath Falls, OR, 80 p.
- Rasmussen, W. O., & Bengtson, H. H.** (2018). Geothermal and hydrothermal energy. Salem Press Encyclopedia of Science. Retrieved from <http://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&site=eds-live&db=ers&AN=89474692&custid=ns211803&authtype=ip,athens>
- Rodríguez, G., Alfaro, C., González, C.E.,** (2019). Geotermia en Colombia. Servicio Geológico Colombiano. Bogotá, Colombia.
- Rubio-Maya, C., Martínez, E., & Ambriz-Díaz, V.,** (2015). Cascade utilization of low and medium enthalpy geothermal resources – A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 52. 689–716. 10.1016/j.rser.2015.07.162.
- Rybach, L.,** (2003). Geothermal energy: sustainability and the environment. *Geothermics*, Volume 32, Issues 4–6. Pages 463-470, ISSN 0375-6505, [https://doi.org/10.1016/S0375-6505\(03\)00057-9](https://doi.org/10.1016/S0375-6505(03)00057-9). (<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0375650503000579>)
- Saldivia, M.,** (2018). Análisis de Legislación Comparada Sobre Energía Geotérmica. Centro de Excelencia en Geotermia de los Andes CEGA. Chile. pp. 4.
- Sarkar, D.** (2015). Chapter 1 - Steam Power Plant Cycles. *Thermal Power Plant*, Elsevier. Pages 1-37, ISBN 9780128015759, <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-801575-9.00001-9>.
- Secretaría General del Senado, Colombia** (2014). Ley 1715 de 2014. Recuperado de: [http://www.secretariasenado.gov.co/senado/basedoc/ley\\_1715\\_2014.html](http://www.secretariasenado.gov.co/senado/basedoc/ley_1715_2014.html)
- Servicio Geológico Colombiano** (2019). Inventario Nacional de Manifestaciones Hidrotermales. Recuperado de: <http://hidrotermales.sgc.gov.co/invtermales/>
- Shortall, R., Davídsdóttir, B., Axelsson, G.** (2016). A Sustainability Assessment Framework for Geothermal Energy Projects. Short Course I on Sustainability and Environmental Management of Geothermal Resource Utilization and the Role of Geothermal in Combating Climate Change”, organized by UNU-GTP and LaGeo, in Santa Tecla, El Salvador, September 4-10, 2016
- Sistema Costarricense de Información Jurídica** (2019). Declara de interés público las actividades de investigación científica, ambiental, social, turística y económica en el Parque Nacional Volcán Rincón de la Vieja Recuperado de:

[http://www.pgrweb.go.cr/scij/Busqueda/Normativa/Normas/nrm\\_texto\\_completo.aspx?param1=NRTC&nValor1=1&nValor2=73824&nValor3=90753&strTipM=TC](http://www.pgrweb.go.cr/scij/Busqueda/Normativa/Normas/nrm_texto_completo.aspx?param1=NRTC&nValor1=1&nValor2=73824&nValor3=90753&strTipM=TC)

**S&P Global Platts** (2016). “UDI World Electric Power Plants Data Base”, <https://www.platts.com/products/world-electric-power-plants-database>.

**Thain, I.** (2009). “Review of Carbon Emission Factors in Draft Stationary Engine and Industrial Process Regulations: Using Geothermal Fluid”, Geothermal & Energy Technical Services Ltd, Taupo, New Zealand, 12 May 2009, <http://www.climatechange.govt.nz/consultation/draft-regulations-seip/review-carbon-emission-factors.pdf>

**ThinkGeoEnergy** (2020). The Top 10 Geothermal Countries 2019 – based on installed generation capacity (MWe). Recuperado de: <https://www.thinkgeoenergy.com/the-top-10-geothermal-countries-2019-based-on-installed-generation-capacity-mwe/>

**Unidad de Planeación Minero Energética – UPME.** (2017). Guía práctica para la aplicación de los incentivos tributarios de la Ley 1715 de 2014. Recuperado de: [https://www1.upme.gov.co/Documents/Cartilla\\_IGE\\_Incentivos\\_Tributarios\\_Ley1715.pdf](https://www1.upme.gov.co/Documents/Cartilla_IGE_Incentivos_Tributarios_Ley1715.pdf)

**Unidad de Planeación Minero Energética – UPME.** (2015). Integración de las energías renovables no convencionales en Colombia. Recuperado de: <http://www1.upme.gov.co/Paginas/Estudio-Integraci%C3%B3n-de-las-energ%C3%ADas-renovables-no-convencionales-en-Colombia.aspx>

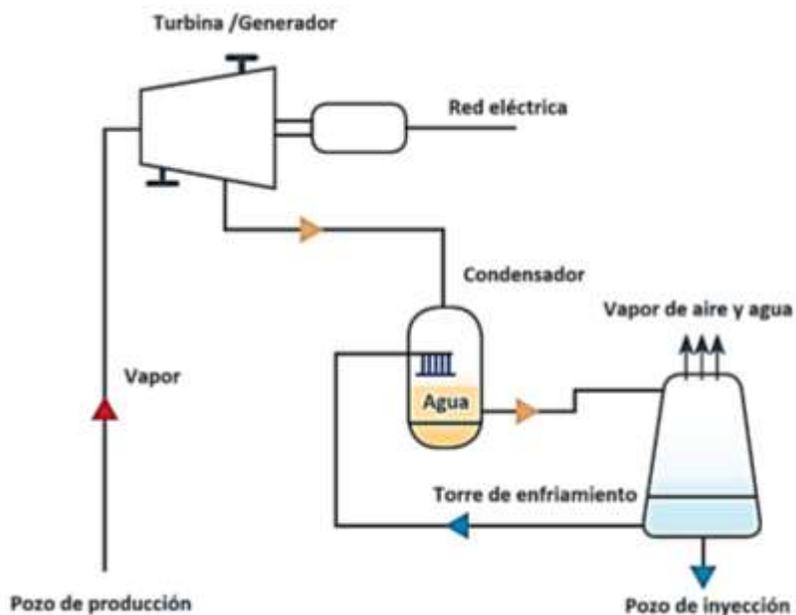
**Universidad de Antioquia.** (2015). Costos nivelados de generación de electricidad en Colombia – Geotérmica. Grupo de manejo eficiente de la energía GIMEL - Grupo de microeconomía aplicada Medellín.

**Van Nguyen, M., Arason, S., Gissurarson M. and Pálsson, P.G.** (2015). Uses of geothermal energy in food and agriculture – Opportunities for developing countries. Rome, FAO.

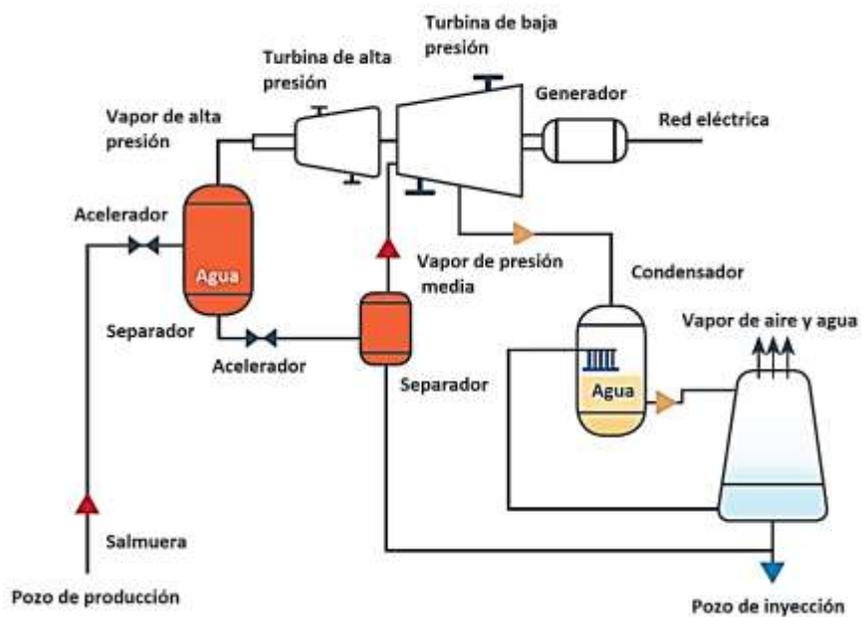
**Vieira, F.P., Guimarães, S.N.P., Hamza, V.M.,** (2015). Updated assessment of geothermal resources in Brazil. Proceedings, World Geothermal Congress2015, Melbourne, Australia, International Geothermal Association, 11 p.

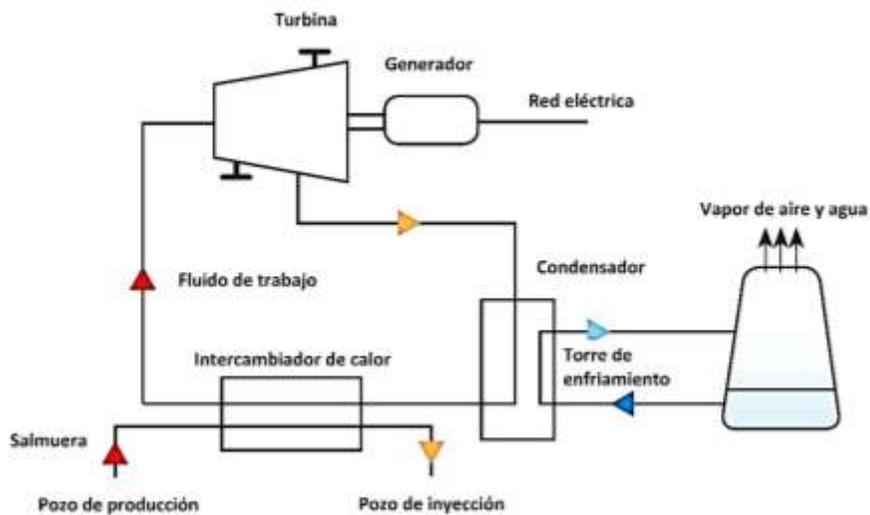
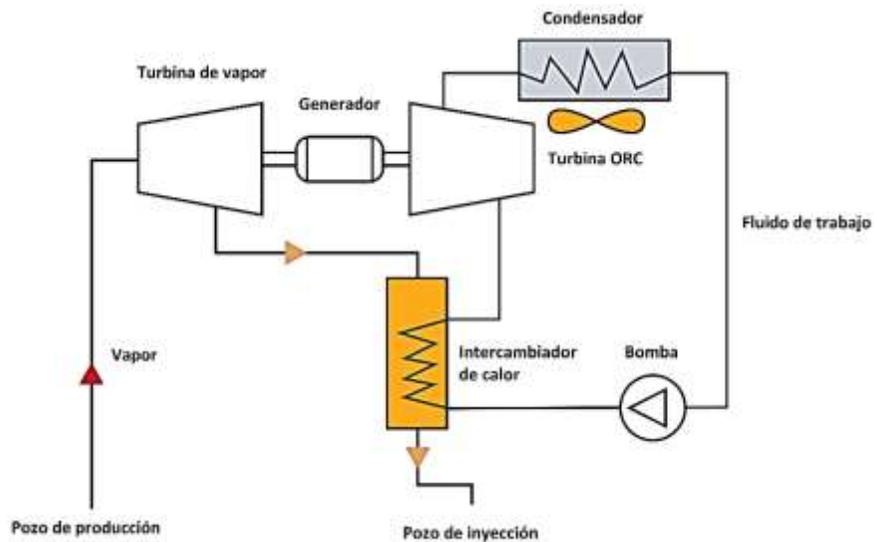
## 12. Anexos

### Anexo A. Planta de vapor directo (Modificado de IRENA, 2017c).



### Anexo B. Planta doble flash (Modificado de IRENA, 2017c).



**Anexo C. Planta binaria (Modificado de IRENA, 2017c).****Anexo D. Planta de ciclo combinado (Modificado de ORMAT, 2017).**

## Anexo E. Potencial geotérmico en Colombia



Fuente: Mejía *et al*, 2014.