

Recomendación de diseño de lechada para cementación primaria en pozos geotérmicos de alta entalpía en Colombia

Emelith Maria Fernanda Cepeda Ortiz

Walter Alberto Ortiz Mantilla

Trabajo de Grado Para Optar al Título de Ingeniero de Petróleos

Director

Wilson Raul Carreño Velasco

M.Sc. Ingeniería de Petróleos

Codirector

Jeimy Alejandra Peña Mateus

M.Sc. Ingeniería de Hidrocarburos

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingeniería Fisicoquímicas

Escuela de Ingeniería de Petróleos

Bucaramanga

2025

Agradecimientos

Primeramente, a Dios, que ha sido mi faro en los momentos oscuros y mi fuerza en los desafíos. Gracias a Su infinita bondad y guía, hoy puedo celebrar el cierre de esta etapa maravillosa. Sé que en Su nombre se abrirán caminos aún más grandes y llenos de esperanza.

A mi querida madre, Fanny Amparo, por creer en mí incluso cuando yo dudaba, por sus palabras de aliento en mis fracasos y por sus silenciosos sacrificios en los momentos más difíciles. Tus desvelos, tu amor incondicional y tu fortaleza me han inspirado para superar cada obstáculo. Eres mi mayor bendición y la razón por la que nunca dejo de soñar. A mi padre, Luis Felipe Cepeda, que me acompaña desde el cielo en cada paso. Tu vida fue un ejemplo de perseverancia, amor y carácter único. Aunque no estés aquí físicamente, siento tu presencia guiándome y recordándome que no hay límites cuando se lucha con el corazón.

A mis hermanos mayores, Mauricio y Felipe, que han sido guías en mi vida. Gracias por impulsarme con sus palabras de sabiduría, por estar a mi lado en todo momento y por enseñarme que el amor de un hermano trasciende todo. A mi tía, Ilda Gómez, por ser ese apoyo incondicional. Tu amabilidad, confianza y palabras de ánimo han sido fundamentales para mantenerme firme en mi camino.

A Milo, mi fiel compañero que llegó en el momento más crítico para traer alegría y esperanza a mi vida. Gracias por enseñarme que el amor más puro no necesita palabras y por ser esa luz que nunca se apaga.

A mis mejores amigas, Carla y Carolina, por estar conmigo en cada paso, por ser mis cómplices en las aventuras y mi refugio en los momentos difíciles. Su amistad ha sido un regalo invaluable que atesoro con todo mi corazón.

Gracias también a mis compañeros de la universidad, mis firmes, por compartir conmigo este viaje lleno de aprendizajes, desafíos y triunfos. Gracias por enriquecer mis días y por ser parte fundamental de esta etapa inolvidable.

A mi compañero de tesis, Walter, por su energía positiva y su apoyo constante. A mis mentores, Alejandra Peña por su paciencia y dedicación durante este proceso; fuiste una guía invaluable. Wilson Carreño, su amor por la profesión y su mentoría fueron una guía a visualizar un futuro lleno de posibilidades y metas claras.

A mi querida Universidad Industrial de Santander, el lugar que siempre soñé y que hoy se convierte en mi alma máter. Gracias por ser un espacio de crecimiento, aprendizaje y transformación, y por permitirme cumplir este sueño tan anhelado.

Por último y no menos importante, a mi novio por su fe en mí, por la convicción de tener su compañía cada día. Tu amor y apoyo han sido un regalo invaluable que llevo en mi corazón con gratitud infinita.

Infinitas gracias a cada persona que contribuyó en este camino. Gracias.

Maria Fernanda Cepeda

Agradecimientos

En primer lugar, quiero dar las gracias a mis padres Doris y Willinton por trabajar fuertemente con el motivo de darme la educación que ellos no pudieron tener, dar gracias por enseñarme la importancia de siempre salir delante de la mano de Dios sin importar el obstáculo que se me ponga en frente. Siempre estaré en deuda con ellos y todos mis logros serán dedicados a ellos.

Agradezco a la profesional Jeimy Alejandra Peña Mateus por tenernos paciencia y siempre brindarnos una parte de su tiempo para aconsejarnos.

Por ultimo y no menos importante quiero reconocer las amistades que conseguí durante este tramo de mi vida, quiero agradecer rotundamente a Valentina Jacome, Ronaldo Granados, Maria Fernanda, Gonzalo Camargo, Nicolas Flórez, Ivan Amado, Bryan Rodríguez y el coste, sin ellos no hubiera sido tan divertido.

Walter Ortiz

Tabla de Contenido

	Pág.
INTRODUCCIÓN	13
1. OBJETIVOS	15
1.1. Objetivo General	15
1.2. Objetivos Específicos.....	15
2. GENERALIDADES	15
2.1. Generalidades de la energía geotérmica	15
2.1.1. Corteza	16
2.1.2. Manto Superior	17
2.1.3. Manto Inferior	17
2.1.4. Núcleo	17
2.2. Gradiente geotérmico	18
2.2.1. Reservorios Geotérmicos	18
2.2.2. Clasificación de los reservorios geotérmicos.....	19
2.3. Cementación de pozos	22
2.4. Cementación primaria.....	22
2.4.1. Propósito de la cementación primaria.....	23
2.5. Cementación de pozos geotérmicos.....	23
2.5.1. Fluidos de perforación para pozos geotérmicos.....	24
2.5.2. Desafíos que se pueden afrontar en zonas geotérmicas	25
2.5.3. Diseño de lechada para pozos geotérmicos	30
2.6. Diseño de lechada	31

2.6.1.	Influencia de la presión y la temperatura del pozo	32
2.6.2.	Tiempo de bombeo	32
2.6.3.	Viscosidad y contenido de agua de las lechadas de cemento	33
2.6.4.	Agua de mezclado.....	34
2.6.5.	Efectos del fluido de perforación y aditivos sobre el cemento	34
2.6.6.	Densidad de la lechada.....	35
2.6.7.	Pérdidas de circulación	35
2.6.8.	Pérdida por filtrado	35
2.6.9.	Calor de hidratación	36
2.7.	Aditivos.....	36
2.7.1.	Aceleradores	36
2.7.2.	Retardadores	37
2.7.3.	Extensores	37
2.7.4.	Densificantes.....	38
2.7.5.	Dispersantes	38
2.7.6.	Controlador de filtrado.....	39
2.7.7.	Controlador de pérdida de circulación.....	39
2.7.8.	Aditivos especiales.....	39
2.8.	Técnicas de cementación	41
2.8.1.	Cementación a dos etapas	41
2.8.2.	Cementación de anillo de cemento (casing cementing).....	44
2.9.	Equipos de laboratorio	45
2.9.1.	Unidad ultrasónica de cemento (UCA).....	46

2.9.2.	Consistómetro atmosférico	46
2.9.3.	Consistómetro presurizado (HP/HT)	47
2.9.4.	Filtro prensa	48
2.9.5.	Reómetro.....	48
2.9.6.	Equipo de pruebas destructivas de cubos.....	49
2.10.	Herramientas de campo.....	50
2.10.1.	Unidad de cementación.....	50
2.10.2.	Unidad de cementación sobre patines.....	50
2.10.3.	Unidades de cementación sobre camiones.....	51
2.10.4.	Unidades de cementación sobre semirremolque.....	52
2.10.5.	Equipo de Flotación	53
2.10.6.	Válvula de bola	54
2.10.7.	Válvula de aleta.....	55
2.10.8.	Válvulas de asiento	56
2.10.9.	Zapata.....	56
2.10.10.	Cuellos o collares.....	57
	BASE DE DATOS DE CASOS DE ESTUDIO A NIVEL MUNDIAL	58
2.11.	Croacia	59
2.12.	Estados Unidos.....	62
2.12.1.	Pozos geotermales The Geysers.....	65
2.12.2.	Técnica de cementación	67
2.13.	México	69
2.13.1.	Cerro Prieto, México.....	69

2.13.2.	Técnica de cementación	72
2.13.3.	Diseño de lechada	73
2.14.	Costa Rica	74
2.14.1.	Pozos geotermales Miravalles.....	76
2.14.2.	Técnica de lechada	77
2.14.3.	Diseño de lechada	78
RECOMENDACIÓN DISEÑO DE LECHADA DE CEMENTO PARA ZONAS GEOTÉRMICAS EN COLOMBIA		82
2.15.	Importancia de la distribución del calor para la energía geotérmica	84
2.15.1.	Zonas geotérmicas de alta actividad	84
2.15.2.	La ubicación estratégica para Colombia	85
2.16.	Factores para considerar sobre la distribución del calor y su aprovechamiento geotérmico	85
2.17.	Complejo volcánico Chiles – Cerro Negro.....	86
2.18.	Volcán Azufral	88
2.19.	Volcán de Paipa	91
CONCLUSIONES		99
RECOMENDACIONES.....		102
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....		103

Lista de tablas

Tabla 1 Clasificación de yacimientos geotérmicos	21
Tabla 2 Diseños de lechada de cemento expuestos por Croacia	60
Tabla 3 Datos recopilados del caso de estudio (Estados Unidos)	66
Tabla 4 Diseños de lechada implementados en pozos geotérmicos de Estados Unidos	68
Tabla 5 Datos recopilados del caso de estudio (Cerro Prieto México)	72
Tabla 6. Diseños de lechada implementados en pozos geotérmicos en México	74
Tabla 7 Datos recopilados del caso de estudio (Costa Rica).....	77
Tabla 8 Diseños de lechada implementados en pozos geotérmicos en Costa Rica.....	78
Tabla 9 Base de datos de los casos de estudio a nivel mundial	79
Tabla 10 Datos recopilados de zonas potencialmente geotérmicas de Colombia.....	93
Tabla 11 Recomendación para el diseño de lechada de cemento para las zonas geotérmicas de Colombia.....	97

Lista de figuras

	Pág.
Figura 1. Estructura interna del planeta tierra.....	16
Figura 2. Clasificación de los recursos geotérmicos por entalpía y temperatura	19
Figura 3. Proceso de cementación en dos etapas	42
Figura 4. Accesorios para técnica de cementación de dos etapas	43
Figura 5. Cementación de pozo geotérmico con la técnica de "Casing Cementing"	45
Figura 6. Unidad ultrasónica de cemento	46
Figura 7. Consistómetro atmosférico	47
Figura 8. Consistómetro presurizado (HP/HT).....	47
Figura 9. Filtro prensa.....	48
Figura 10. Reómetro	49
Figura 11. Equipo de pruebas destructivas	49
Figura 12. Patín de cemento típico y consola de control de la unidad de cementación ...	51
Figura 13. Camión de unidad de cementación típico.....	51
Figura 14. Unidad de Cementación sobre remolque.....	52
Figura 15. Unidad de Cementación de una bomba	53
Figura 16. Sistema de Flotación	54
Figura 17. Válvula de bola.....	55
Figura 18. Válvula de aleta.....	55
Figura 19. Válvula de asiento	56
Figura 20. Zapata Flotadora	57

Figura 21. Equipo de flotación de llenado automático, tipo doble aleta de gran calibre	58
Figura 22. Planta geotérmica en Croacia	59
Figura 23. Planta geotérmica en Estados Unidos	64
Figura 24. Mapa de la planta geotérmica The Geysers	65
Figura 25. Planta geotérmica de México	69
Figura 26. Mapa Estructural de Cerro Prieto	70
Figura 27. Operación de cementación de dos etapas	73
Figura 28. Mapa geográfico de Costa Rica	76
Figura 29. Mapa preliminar gradientes geotérmicos de Colombia	84
Figura 30. Puntos calientes en todo el mundo	86
Figura 31. Ubicación, Complejo volcánico Chile-Cerro Negro	86
Figura 32. Ubicación, Volcán Azufra	89
Figura 33. Volcán Azufra	91
Figura 34. Ubicación, volcán de Paipa	91
Figura 35. Volcán de Paipa	93

Resumen

Título: Recomendación de diseño de lechada para cementación primaria en pozos geotérmicos de alta entalpía en Colombia *

Autores: Emelith Maria Fernanda Cepeda Ortiz, Walter Alberto Ortiz Mantilla **

Palabras Clave: Cementación de pozos, yacimientos geotérmicos, energía renovable

Descripción:

La cementación de pozos es un proceso relevante en la perforación y exploración de pozos geotérmicos, caracterizado por su alta complejidad. Esto se debe a los cambios fisicoquímicos que ocurren en condiciones extremas de temperatura y presión, los cuales pueden generar inestabilidad y reducir la vida útil del pozo. En este estudio se llevó a cabo una revisión de la literatura sobre yacimientos geotérmicos a nivel mundial, con el fin de identificar las variables clave que deben considerarse para el diseño de lechadas y cementación de pozos, tales como temperatura, presión y fluidos del yacimiento. Además, se analizan las técnicas utilizadas para la colocación de lechada, tanto en el laboratorio, para simular el comportamiento de la lechada bajo las condiciones del pozo, como en campo, durante las operaciones de cementación. Todo esto tiene como objetivo recomendar un diseño de lechada teórico para las zonas con potencial geotérmico de alta entalpía en Colombia, basándose en la información recopilada de casos de éxito en los que se ha implementado este tipo de energía renovable en el mundo. Colombia ha aumentado su demanda energética, por lo que necesita alternativas que mitiguen los gases de efecto invernadero y que no dependan de factores externos como el cambio climático. En este contexto, la energía geotérmica se presenta como una opción viable y sostenible para el país.

* Trabajo de Grado

** Facultad de Ingenierías Fisicoquímicas. Escuela de Ingeniería de Petróleos. Ingeniería de Petróleos. Director: Wilson Raul Carreño Velasco. M.Sc. Ingeniería de Petróleos. Codirector: Alejandra Peña Mateus. M.Sc. Ingeniería de Hidrocarburos.

Abstract

Title: Slurry design recommendation for primary cementing in high enthalpy geothermal wells in Colombia *.

Authors: Emelith Maria Fernanda Cepeda Ortiz, Walter Alberto Ortiz Mantilla **

Keywords: Well cementing, geothermal reservoirs, renewable energy

Description:

Well cementing is a relevant process in the drilling and exploration of geothermal wells, characterized by its high complexity. This is due to the physicochemical changes that occur under extreme conditions of temperature and pressure, which can generate instability and reduce the life of the well. In this study, a review of the literature on geothermal reservoirs worldwide was carried out in order to identify the key variables to be considered for slurry design and well cementing, such as temperature, pressure and reservoir fluids. In addition, the techniques used for slurry placement are analyzed, both in the laboratory, to simulate slurry behavior under well conditions, and in the field, during cementing operations. All this aims to recommend a theoretical grout design for areas with high enthalpy geothermal potential in Colombia, based on information gathered from successful cases where this type of renewable energy has been implemented in the world. Colombia has increased its energy demand, so it needs alternatives that mitigate greenhouse gases and do not depend on other external factors such as climate change. In this context, geothermal energy is presented as a viable and sustainable option for the country.

* Degree Work

** Faculty of Physicochemical Engineering. School of Petroleum Engineering. Petroleum Engineering. Director: Wilson Raul Carreño Velasco. M.Sc. Petroleum Engineering. Co-director: Alejandra Peña Mateus. M.Sc. Hydrocarbon Engineering.

Introducción

En la actualidad, Colombia está iniciando exploraciones de alta entalpía con el objetivo de aprovechar la energía proveniente del calor interno de la Tierra, a través de pozos geotérmicos, los cuales se caracterizan por tener temperaturas y presiones elevadas. Estos pozos permiten extraer recursos energéticos del subsuelo, generalmente, en regiones con alta actividad geológica y deben cumplir con ciertos requisitos técnicos debido a las condiciones extremas de temperatura y presión en los yacimientos.

Pese a ello, debido a las condiciones extremas, estos pozos suponen un alto grado de complejidad en cuanto al proceso de cementación y diseño de lechada, puesto que los cambios fisicoquímicos generados a dichas condiciones pueden provocar un deterioro en la cementación primaria y requerir una cementación remedial. Además, una correcta cementación es fundamental para la protección del material de revestimiento y para preservar el estado mecánico del pozo.

En este orden de ideas, el presente proyecto pretende realizar un análisis técnico del diseño de lechada para la cementación primaria en pozos geotérmicos de alta entalpía en Colombia, tomando como base casos de estudio a nivel mundial que se adapten a las condiciones del país teniendo en cuenta condiciones de temperatura, presión y fluidos presentes en el yacimiento, con el objetivo de lograr un buen estado mecánico y una cementación eficiente en este tipo de pozos.

Teniendo en cuenta lo anterior, es posible identificar los materiales, equipos y técnicas que han demostrado su eficacia en la construcción y operación de pozos geotérmicos a nivel

global. Este enfoque para garantizar que las tecnologías utilizadas sean adecuadas para enfrentar las condiciones de alta temperatura y presión.

En Colombia son muy escasos los estudios y exploraciones sobre pozos geotérmicos de alta entalpía. Sin embargo, el Servicio Geológico Colombiano inició estudios que incluyen una descripción geológica de las rocas presentes en las zonas con potencial geotérmico, lo que permite identificar posibles reservorios en estas áreas.

Esta recopilación teórica de la base de datos se puede adaptar a las zonas potencialmente geotérmicas colombianas y maximizar así el aprovechamiento de los recursos geotérmicos del país. Se presentarán los resultados del diseño de lechada y la identificación de herramientas y las técnicas de cementación para este tipo de pozos, con el fin de exponer los últimos avances en esta área que permitan preservar y prolongar el tiempo de vida útil del pozo y su estado mecánico.

En los casos de estudio de Estados Unidos, México y Costa Rica, se evidencia el uso predominante del cemento portland clase G con aditivos como la harina de sílice ya que estos han demostrado gran efectividad en la resistencia a la compresión, ofreciendo una estabilidad térmica y durabilidad del cemento. Esto permite la elección óptima de materiales para el diseño de lechada.

Finalmente, se identifica la necesidad de continuar investigando, de manera que se amplie la base de datos e incluir más casos de estudio de éxito en el mundo, para que sirva de referente a las futuras operaciones de cementación que se lleven a cabo en el país. También es necesario llevar a escala de laboratorio los diseños de lechada recomendados para simular y observar su comportamiento en un entorno controlado antes de aplicarlos en campo.

1. Objetivos

1.1. Objetivo General

Recomendar un diseño de lechada para cementación primaria en pozos geotérmicos de alta entalpia en Colombia basado en casos de estudio a nivel mundial.

1.2. Objetivos Específicos

- ✓ Construir una base de datos de diseños de lechada para pozos geotérmicos de alta entalpía teniendo en cuenta condiciones de presión, temperatura y fluidos geotérmicos.
- ✓ Clasificar las herramientas, técnicas de cementación y diseños de lechada para pozos geotérmicos basados en casos de estudio a nivel mundial.
- ✓ Proponer el diseño de lechada que se adapte a las condiciones de alta entalpía de pozos geotérmicos en Colombia.

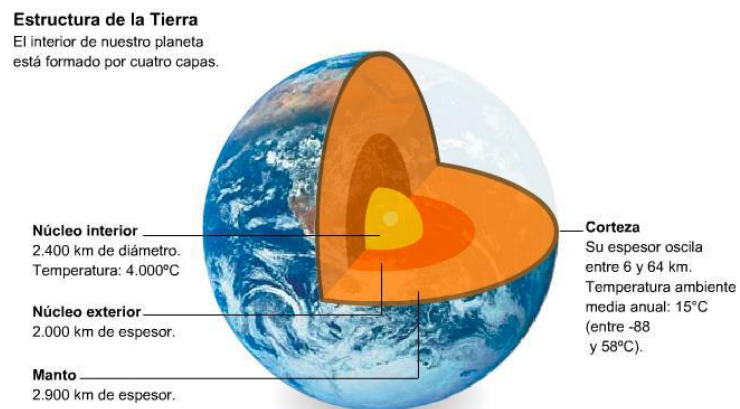
2. Generalidades

2.1. Generalidades de la energía geotérmica

La energía geotérmica se fundamenta en el uso del calor acumulado en el interior de la Tierra. Para comprender por qué este tipo de energía se considerada renovable, es indispensable

entender la estructura y el funcionamiento interno del planeta. La figura a continuación ofrece una panorámica general del sistema interno terrestre donde se evidencia la presencia de diversas capas con distintos espesores y características (Vivas, 2021).

Figura 1. Estructura interna del planeta tierra.



Nota. Imagen sobre la estructura interna de la tierra y su breve descripción. Adaptado de Recursos geotérmicos de Guatemala por Dirección general de energía, 2015, Ministerio de Minas y Energía - Departamento de energías Renovables.

Como se puede observar en la figura 1: la estructura interna de la tierra se compone de cuatro capas, que son las siguientes.

2.1.1. Corteza

La corteza de la tierra es la capa más externa. Esta presenta un gradiente de temperatura de 31.1 °C/km. El promedio de temperatura estimado en la superficie es de 10 °C (50 °F), mientras

que en su parte baja puede llegar cerca de 1100°C (2030 °F) (Vivas, 2021). Pese a que la profundidad media es de 35 km, en áreas montañosas puede llegar a 60 km, y en zona de altitud inferior puede descender a 25 km.

2.1.2. Manto Superior

A continuación, se halla el manto superior con una profundidad media de 400 Km y temperaturas lo bastante elevadas para fundir las rocas que lo conforman (Vivas, 2021).

2.1.3. Manto Inferior

El manto inferior es la tercera capa. Este manto se compone en su mayoría de rocas metálicas abundantes en oxígeno, sílice y magnesio, además de un elevado número de iones de hierro. Su longitud supera los 2200 km, y la densidad se incrementa en su parte baja debido a las elevadas presiones (Vivas, 2021).

2.1.4. Núcleo

El núcleo se encuentra en el centro del planeta y se segmenta en dos secciones: el núcleo interior y el núcleo exterior. El núcleo exterior se encuentra en estado líquido debido a las condiciones extremas de temperatura y presión, lo que permite que únicamente las ondas de cizalla sísmicas se propaguen por él. Por otra parte, el núcleo interno es sólido, donde los materiales están en condición sólida a causa de las fuertes presiones que se encuentran en esta región (Vivas, 2021).

En varias actividades humanas que implican excavaciones a diferentes profundidades, se puede notar un fenómeno intrigante y es el aumento de la temperatura a medida que se descende. Este fenómeno se conoce como gradiente geotérmico y es esencial para entender la distribución del calor en la parte interna de la tierra (Vivas, 2021).

2.2. Gradiente geotérmico

El gradiente geotérmico hace referencia a la velocidad de aumento de la temperatura en comparación con la profundidad. En términos generales, se calcula que la temperatura se incrementa alrededor de 25 °C (77 °F) a 30 °C (86 °F) por cada Kilómetro de profundidad en la corteza terrestre, aunque este incremento puede fluctuar en función de ciertos factores geológicos particulares.

La causa principal del gradiente geotérmico es la emisión de calor proveniente del núcleo de la tierra. Este calor se produce mediante diversos procedimientos y se eleva desde el núcleo hasta las capas superficiales, influyendo en la temperatura de las rocas y los fluidos en su trayecto. La cantidad de calor transferido y la conductividad térmica de las distintas rocas son factores cruciales en el comportamiento del gradiente geotérmico (Vivas, 2021).

2.2.1. Reservorios Geotérmicos

La energía geotérmica hace referencia al calor acumulado dentro de la tierra, mientras que en un reservorio geotérmico se caracteriza como una zona concreta de la corteza terrestre donde se reúne esta energía en forma de calor (Vivas, 2021). Estos reservorios son esenciales para el uso y la explotación de la energía geotérmica, dado que representan los recursos desde los cuales se puede obtener calor para diferentes usos, incluyendo la producción de electricidad y el calentamiento directo.

Los reservorios geotérmicos se ubican a nivel global, sin embargo, su mayor concentración se halla en zonas volcánicas o a lo largo de los bordes de las placas tectónicas. Estas áreas son geológicamente activas y ofrecen condiciones propicias para la acumulación de calor. Por ejemplo, áreas como el cinturón de fuego del Pacífico que abarca países como

Indonesia, Japón y ciertas naciones de América del sur, estas destacan por poseer algunos de los reservorios más potentes del mundo (Vivas, 2021).

Estos generalmente están vinculados con rocas permeables y porosas, las cuales facilitan el almacenamiento y el desplazamiento de los fluidos. Estos fluidos son esenciales, puesto que son los responsables de llevar el calor desde las profundidades hasta la superficie. En estos reservorios, el agua es el líquido más habitual, aunque también se pueden hallar otros líquidos y gases (Vivas, 2021).

La habilidad de un reservorio para retener energía térmica se basa en diversos elementos entre los cuales:

- Porosidad: La cantidad de espacio libre en las rocas que puede albergar fluidos.
- Permeabilidad: La capacidad de las rocas para facilitar el movimiento de los fluidos a través de ellas.
- Temperatura: La temperatura del fluido es un indicador crucial del potencial energético del reservorio.

2.2.2. Clasificación de los reservorios geotérmicos

Figura 2. Clasificación de los recursos geotérmicos por entalpía y temperatura



Nota. Esquema donde se indica la clasificación de los recursos geotérmicos por entalpía (kJ/kg) y temperatura (°C). Adaptado de Glosario de energía geotérmica de roca supercaliente por Graham Banks, Philip Ball, 2018, Clean Air Task Force.

Es importante resaltar que existen varios métodos para categorizar los reservorios geotérmicos, los cuales están detallados en la Tabla 1. Una de las clasificaciones más comunes es la categorización cualitativa, la cual clasifica los reservorios en función de la fase dominante de los fluidos que albergan:

1. Reservorios dominados por vapor: Principalmente poseen vapor de agua.
2. Reservorios de agua caliente: Los líquidos calientes son predominantes.
3. Reservorios de dos fases: Poseen equilibrio entre vapor y agua.

No obstante, esta clasificación puede ser aleatoria ya que un mismo fluido puede modificar su fase a distintas temperaturas en función de la presión y otras características del sistema termodinámico (Vivas, 2021).

De la misma manera la clasificación cualitativa, varios estudios han sugerido clasificaciones fundamentadas en parámetros termodinámicos. Estos métodos emplean características como:

- ✓ Entalpía: Representa la cantidad total de energía en un sistema termodinámico. Los reservorios pueden categorizarse de acuerdo con su entalpía específica, lo cual facilita la identificación de su potencial energético.
- ✓ Energía específica: Relacionada con la cantidad de energía que se almacena por unidad de masa del fluido.

Estas clasificaciones, que también se pueden observar en la Figura 2, permiten definir rangos específicos para identificar el recurso de calor disponible en el subsuelo. Por ejemplo, un reservorio de alta entalpía puede ser más apropiado para la generación de electricidad, mientras que uno con menor entalpía podría ser más beneficioso para usos directos como la calefacción de casas, residencias o edificios.

Tabla 1 Clasificación de yacimientos geotérmicos

Clasificación Reservorios Geotérmicos	
Por temperatura	
Baja Temperatura (LT)	Sistema con temperatura de reservorio a 150°C (302 °F), a 1000 m (3280,8 ft) de profundidad. A menudo caracterizados por manantiales calientes o hirviendo.
Temperatura Media (MT)	Sistema con temperatura de reservorio entre 150 °C (302 °F) y 200 °C (392 °F), generalmente asociado a profundidades moderadas.
Alta Temperatura (HT)	Sistema con temperatura de reservorio a 1000 m (3280,8 ft) de profundidad de 200°C (392 °F). Caracterizado por fumarolas, salidas de vapor, piscina de lodo y suelo altamente alterado
Por Entalpia	
Baja Entalpia	Sistemas geotérmicos con fluidos de reservorio con entalpia menor a 800 kJ/kg, correspondiente a temperaturas menores a 190°C (374°F).
Alta Entalpia	Sistemas geotérmicos con fluidos de reservorio de entalpia mayor a 800 kJ/kg, correspondiente a temperatura mayores a 190 °C (374°F).
Por fases	
Dominados por Líquidos	Reservorios Geotérmicos con temperatura del agua igual o menor al punto de ebullición, a la presión predominante y controles de fase de agua. Puede haber vapor presente en cantidades mínimas.
Dos Fases	Reservorios geotérmicos donde el vapor y el agua coexisten. La temperatura y la presión siguen la curva de punto de ebullición.
Dominados por Vapor	Reservorios geotérmicos donde la temperatura es igual o mayor al punto de ebullición, a la presión predominante y controles de fase de agua. Puede haber agua presente en cantidades mínimas.

Nota. Adaptado de Caracterización de pozos petroleros aprovechables para la producción de energía geotérmica. Fundación Universidad de América. 2021.

2.3. Cementación de pozos

El proceso de cementación consiste en la mezcla de cemento seco y ciertos aditivos con agua, lo que genera una lechada. Esta lechada se bombea al pozo a través de la sarta de revestimiento, y se coloca en el espacio anular entre el hueco abierto y el diámetro externo del revestimiento. El volumen de cemento a ser bombeado se determina previamente, con el fin de alcanzar las zonas críticas. Posteriormente, se deja fraguar y endurecer, formando una barrera permanente e impermeable que evita el paso de los fluidos (Nelson, 1990).

2.4. Cementación primaria

Este proceso consiste en poder mezclar y colocar la lechada de cemento en el espacio anular entre las paredes del hueco abierto y el revestimiento. El objetivo de la cementación primaria es poder asegurar la integridad del hueco abierto, lo cual implica tener presente los siguientes aspectos: aislamiento zonal, sustentación de la tubería de revestimiento, protección de la tubería revestimiento y sustentación del hueco abierto. La cementación primaria se realiza una vez se corre el revestimiento en el hueco abierto. Esto se realiza a presiones suficientes para lograr que la mezcla de cemento pueda desplazarse a través de la zapata y así pueda ascender por el espacio anular hasta cubrir la distancia que se calculó para rellenar de cemento (COMALCALCO, 2020).

2.4.1. Propósito de la cementación primaria

- Sellar la pérdida de la circulación en zonas “ladronas”.
- Fijar la sarta de revestimiento y protegerla contra la corrosión.
- Proteger la sarta durante los trabajos de cañoneo.
- Reforzar la sarta cuando se presenta un aplastamiento ocasionado por fuerzas externas y reforzar la resistencia cuando se presentan presiones de estallido.
- Minimizar el movimiento de fluidos entre las zonas productoras.

2.5. Cementación de pozos geotérmicos

La cementación de pozos geotérmicos se realiza de manera similar a la de los pozos convencionales de petróleo y gas, pero el entorno al que se enfrentan los cementos suele ser mucho más exigente. En estos pozos, las temperaturas en el fondo pueden alcanzar hasta 370 °C (698 °F). Además, es común encontrar zonas de agua corrosiva y formaciones muy débiles. Por ello, es crucial considerar las propiedades químicas y físicas de las formaciones al seleccionar los componentes de la mezcla de cemento. Sin un diseño adecuado de la lechada, el cemento fraguado puede perder resistencia y aumentar su permeabilidad, lo que puede comprometer el aislamiento zonal (Ganó et al, 2015).

La profundidad a la que se debe colocar cada tramo de revestimiento depende de las condiciones geológicas y de la profundidad total del pozo. Los diámetros de los agujeros perforados para la instalación de las tuberías de revestimiento deben permitir un espesor mínimo de 3,81 cm (1 1/2 pulgadas) de cemento alrededor de la tubería. Si el espacio anular es

demasiado amplio, puede dificultar la correcta centralización de la tubería, lo que podría resultar en la canalización del cemento durante su colocación (Nelson, 1990).

La instalación de tuberías de revestimiento y la cementación de pozos geotérmicos requieren el uso de equipos especializados, como flotantes, tapones de cementación, herramientas para cementación por etapas, centralizadores y raspadores. El objetivo es lograr un relleno completo de cemento en el espacio anular, lo que garantiza que las tuberías puedan resistir las condiciones ambientales específicas y permanezcan firmemente ancladas al suelo y entre sí. Es fundamental que al menos un tramo de revestimiento esté cementado hasta la superficie para prevenir su alargamiento debido a la expansión térmica durante la producción del pozo (Nelson, 1990).

Los principales desafíos en la cementación de pozos geotérmicos incluyen las altas temperaturas, las zonas de pérdida de circulación y la contaminación de la lechada de cemento con lodo. La mejor estrategia para abordar estas dificultades es identificarlas y manejarlas conforme surgen, utilizando las técnicas y materiales adecuados.

2.5.1. Fluidos de perforación para pozos geotérmicos

Estos fluidos son los que circulan a través del pozo con el propósito de remover los recortes que producen las brocas al ir perforando al fondo del pozo; este fluido se bombea por la sarta de perforación hasta el fondo y recircula hasta la superficie por el espacio anular que se encuentra entre la sarta de perforación y paredes del pozo. Dentro de las funciones de los fluidos de perforación están: Enfriar y limpiar la broca, lubricar la sarta, limpiar el pozo, proteger la presión de formación y demás (Delgado & Juárez, 2014).

Este tipo de fluidos son muy similares a los fluidos de perforación usados en pozos de petróleo y gas, la diferencia es que no necesitan ser tratados con aditivos químicos en una misma proporción, además de lo anterior deben implementar torres de enfriamiento para recircular los

fluidos debido a que estos regresan a la superficie con temperaturas elevadas (Delgado & Juárez, 2014). Es importante mencionar que existen cuatro tipos de fluidos de perforación que son usados para pozos geotérmicos en la industria.

- ✓ Lodos base agua: Para producir este fluido muchas veces usan el agua de los pozos adyacentes y la mezclan con bentonita y barita, con el propósito de aumentar la viscosidad y densidad del fluido respectivamente. No obstante, en los pozos geotérmicos se perforan con lodos de agua y bentonita, ya que muy poco se usan lodos de alta densidad, solo requieren el control del pH y ciertos dispersantes (Delgado & Juárez, 2014).
- ✓ Salmuera: Es el fluido geotérmico es el más económico, se emplea por lo general al final de la perforación. La salmuera es usada cuando se perforan zonas permeables para no dañar la formación.
- ✓ Espumas: Las espumas son fluidos eficaces para perforar tipo de formaciones secas, de alta temperatura o muy baja, se añade este agente espumante para remover los recortes del pozo.
- ✓ Lodos aireados: Se inyecta el lodo con aire comprimido para disminuir la densidad del fluido; en los pozos geotérmicos se aplica cuando hay complicaciones representativas de pérdida de circulación o donde la presión del yacimiento geotérmico es baja.

2.5.2. *Desafíos que se pueden afrontar en zonas geotérmicas*

2.5.2.1. Distribución geográfica del calor

Importancia de la distribución del calor para la energía geotérmica La distribución geográfica del calor mundial es un factor primordial para el aprovechamiento de la energía

geotérmica, ya que puede determinar la disponibilidad de los recursos geotérmicos presentes en las diferentes regiones del planeta. La energía geotérmica se obtiene aprovechando el calor almacenado en el interior de la tierra, este calor está distribuido de manera desigual debido a la actividad tectónica y volcánica en diversas zonas. Por lo tanto, la capacidad de un país para poder generar energía a partir de fuentes geotérmicas depende en gran medida de su localización en relación con áreas de alta actividad geotérmica (Bergen, Zemberekci, & Duddukuri, 2022).

2.5.2.2. Zonas geotérmicas de alta actividad:

Las regiones con alta actividad tectónica, como son los cinturones volcánicos y zonas de subducción, son ideales para el aprovechamiento de la energía geotérmica. Estas áreas cuentan con una gran cantidad de calor subterráneo debido a actividad volcánica y los movimientos tectónicos, lo que las convierte en lugares propensos para la perforación de pozos geotérmicos. En este contexto, la distribución geográfica del calor influye directamente en la viabilidad de los proyectos geotérmicos, ya que los recursos disponibles son mucho mayores en estas zonas activas (Bergen, Zemberekci, & Duddukuri, 2022).

2.5.2.3. Retroceso de la resistencia

Una de las propiedades para tener en cuenta de los cementos para pozos geotérmicos es la resistencia mecánica, ya que cuando la lechada de cemento se endurece debe contar con suficiente resistencia en edades tempranas para así poder soportar el revestimiento, evitar corrosiones en el equipo y la migración de los fluidos de fondo de pozo a superficie.

Cuando el cemento es expuesto a temperaturas mayores a los 110°C (230 °F), el cemento portland ordinario presenta un cambio de fase de hidrato de silicato de calcio, lo que ocasiona la reducción de la resistencia a la compresión y aumenta la permeabilidad. Mientras que el cemento se hidrata, Durante la hidratación del cemento, las fases silíceas de Clinker $C3S$ ($C - CaO, S -$

SiO_2) y C_2S reaccionan con el agua (H) y forma hidrato de silicato de calcio ($C - S - H$). Esta fase ($C - S - H$) es el producto principal de reacción y la base de resistencia en las lechadas de cemento endurecidas. Esta fase solo se puede mantener estable a 110 °C (230 °F) termodinámicamente, donde se forman cristales ricos en Cal, $\alpha - C - S - H$, que ocasionan una disminución de la resistencia a la compresión y un aumento de la permeabilidad. Este proceso es el que se denomina retroceso de fuerza. Para los cementos de pozos geotérmicos, el aumento de la permeabilidad es particularmente peligroso ya que la salmuera podría filtrarse y ocasionar una mayor degradación en el cemento. Si bien la composición de salmuera en zonas geotérmicas varía levemente según su ubicación, estas se caracterizan particularmente por tener composiciones isotópicas y salinidades altas (Bergen, Zemberekci, & Duddukuri, 2022).

A través de los años, se ha evidenciado que las mezclas con harina de sílice en proporciones entre el 35 al 40% en peso de cemento interrumpen el retroceso de la resistencia, lo que permite aumentar la resistencia a la compresión del cemento de clase G.

La inclusión de sílice en este rango da como resultado la creación de tobermorita que es termodinámicamente estable a temperaturas de hasta 150 °C. A medida que la temperatura aumenta, la tobermorita se convierte en xonolita o girolita. Al contrario de la transformación de fase que se presenta durante la regresión de la resistencia, la conolita y la girolita no difieren drásticamente en la estructura cristalina de a tobermorita, por lo tanto, lo que resulta es una mínima disminución de la resistencia y permeabilidad (Bergen, Zemberekci, & Duddukuri, 2022).

Durante el desarrollo inicial de cementos para pozos geotérmicos, los investigadores Kalyoncu y Snyder probaron más de 1000 combinaciones de materiales cementantes con diferentes tipos de cemento para pozos petrolíferos y cementos portland con aditivos y materiales

cementantes suplementarios, donde se descubrió que la harina de sílice aumentaba el tiempo de espesamiento.

El tiempo de espesamiento representa el tiempo que tarda una lechada en fraguar en los entornos del pozo y debe optimizarse para que la lechada tenga un periodo de inducción lo suficientemente largo para ser bombeable, lo cual garantiza que la lechada de cemento se endurezca después de ser colocada según el tiempo calculado.

Si bien la harina se agrega normalmente como un producto seco al cemento, el uso de un aditivo líquido ha evidenciado beneficios prometedores, como la reducción del riesgo de inhalación de sílice por parte del personal de trabajo, mejorando también la calidad de mezcla de cemento y el aumento de la resistencia a la compresión. Se destacó que la inclusión de harina de sílice tiene como beneficio adicional mejorar la unión entre la lechada de cemento fraguada y la formación rocosa del pozo geotérmico (Bergen, Zemberekci, & Duddukuri, 2022).

2.5.2.4. Corrosión del cemento

La corrosión del cemento en pozos geotérmicos es un proceso natural en el cual el dióxido de carbono (CO_2) que está presente en el ambiente o en el fluido geotérmico reacciona con los componentes del cemento, cómo principalmente con los hidróxidos de calcio, lo cual forma carbonato de calcio. Este proceso puede presentar implicaciones importantes a la integridad y durabilidad de los materiales que son utilizados en la construcción de los pozos geotérmicos. El cemento utilizado en pozos geotérmicos debe soportar condiciones de temperatura y presión extremas, así como un ambiente químico agresivo que puede incluir agua rica en iones como el cloruro sulfato y (CO_2) (Bergen, Zemberekci, & Duddukuri, 2022).

La carbonatación puede reducir la porosidad del cemento al transformar los hidróxidos de calcio ($Ca(OH)_2$) en carbonato de calcio ($CaCO_3$), esto afecta a la adherencia del cemento a

las superficies rocosas y a las tuberías, lo que puede crear posibles rutas de fuga para los fluidos. Aunque la carbonatación, cuando se encuentran en condiciones normales, resulta beneficiosa al sellar pequeñas fisuras, en ambientes geotérmicos, donde la temperatura es mayor a 150 °C (302 °F), ocasionando que se acelere la descomposición del cemento y provoque la pérdida de la capacidad de aislamiento y de su función estructural (Bergen, Zemberekci, & Duddukuri, 2022).

La formación de carbonatos puede alterar la estructura cristalina del cemento, debilitando su resistencia a la compresión y afectando su capacidad para mantener la integridad. La carbonatación, mezclada con otros factores como la alta temperatura, la presencia de sulfatos y la salinidad de los fluidos geotérmicos, puede contribuir a la degradación de los materiales de cemento, comprometiendo la estanquidad del pozo. Esto es crucial ya que una fuga de fluidos puede afectar la eficiencia de la extracción de calor y también puede contaminar los recursos subterráneos. Además, la carbonatación puede inducir una corrosión acelerada de los revestimientos de acero, que a menudo se integran con el cemento en los pozos para reforzarlo, comprometiendo más la estabilidad estructural (Bergen, Zemberekci, & Duddukuri, 2022).

Las altas temperaturas en los pozos geotérmicos mayores de 180 °C (356 °F) aceleran la reacción de carbonatación. A estas temperaturas, los fluidos geotérmicos contienen niveles elevados de CO_2 lo que contribuye a la mayor formación de carbonatos. Los fluidos con alta concentración de CO_2 o ácidos pueden acelerar la carbonatación, afectando más rápido el cemento. La humedad presente en los fluidos geotérmicos también juega un papel crucial en la carbonatación un entorno con una alta concentración de vapor de agua facilita la disolución de CO_2 , lo que acelera las reacciones de carbonatación (Bergen, Zemberekci, & Duddukuri, 2022).

Uno de los métodos utilizados para contrarrestar la presencia de CO_2 es el secuestro geológico, donde el dióxido de carbono es inyectado en el subsuelo. Los pozos abandonados pueden servir como vías de fuga (Bergen, Zemberekci, & Duddukuri, 2022).

2.5.3. *Diseño de lechada para pozos geotérmicos*

Los pozos geotérmicos suelen presentar las condiciones más extremas para los cementos utilizados en la perforación, lo que hace necesario cumplir con requisitos específicos sobre sus propiedades. Los fallos en pozos de diversos campos geotérmicos han sido atribuidos directamente a problemas con el cemento. Para abordar esta cuestión, se realizan estudios exhaustivos que definen las composiciones de cemento adecuadas para estas condiciones adversas (Xueling, y otros, 2024).

El diseño de una lechada de cemento para un pozo geotérmico es un proceso complejo que implica la selección cuidadosa de cementos, retardadores, aditivos para controlar la pérdida de fluido, dispersantes, harina de sílice y extensores. Es fundamental que la lechada se coloque de manera adecuada en el espacio anular y que el cemento fraguado proporcione un soporte eficiente para la tubería de revestimiento y un aislamiento zonal efectivo durante la vida útil del pozo (Lobo, 2023).

Casi todas las cementaciones en pozos geotérmicos utilizan cemento Portland, principalmente el cemento API Clase G. Sin embargo, las propiedades requeridas del cemento Portland pueden deteriorarse, y su tasa de degradación se ve influenciada por varios factores: la temperatura a la que se expone el cemento fraguado, la relación agua/cemento (w/c) y la cantidad de aditivos reactivos presentes en la lechada.

2.6. Diseño de lechada

De acuerdo con el Ing., L. Jijón en su Manual Weatherford: “Al diseñar la composición de una lechada de cemento deben considerarse varios factores tales como las profundidades de terminación, la temperatura del pozo, las condiciones de este y los problemas que se susciten durante la perforación...” (Jijón. sf. p. 56).

Por consiguiente, al momento de diseñar una lechada de cemento esta se ve afectada por factores tales como:

- La profundidad del pozo.
- La temperatura y presión del pozo.
- La presión hidrostática presente en la columna de lodo.
- La viscosidad y su contenido de agua vigente en la lechada.
- La resistencia que debe presentar el cemento para poder soportar la cañería.
- La calidad del agua de mezclado disponible.
- El tipo de fluido de perforación.
- Los aditivos del fluido.
- Densidad de la lechada.
- El calor de hidratación.
- Permeabilidad del cemento cuando fragua.
- Control de la filtración.
- Resistencia de los posibles asaltos de sales de fondo de pozo.

Se tiene presente que las compañías que prestan su servicio a la industria de hidrocarburos cuentan con equipos de laboratorio y ensayos que les permiten simular las condiciones presentes en el fondo de pozo, para poder facilitar los procedimientos.

2.6.1. Influencia de la presión y la temperatura del pozo

La presión y la temperatura del pozo afectan el tiempo de bombeo de la lechada de cemento y la resistencia a la compresión del cemento fraguado. A medida que la temperatura aumenta la lechada de cemento sufre una deshidratación y ocasiona que pueda fraguar más rápidamente, en ciertas ocasiones provocando que el tiempo de bombeabilidad disminuya. El tiempo de bombeabilidad de una lechada de cemento se establece con las temperaturas de circulación presentes en el fondo de pozo ya que con esto se puede obtener la relación de temperatura estática versus temperatura de circulación del fondo de pozo.

En este sentido, la presión que actúa sobre la lechada es generada por el peso hidrostático de los fluidos presentes en el pozo, lo que también puede reducir el tiempo de bombeo. Los pozos geotérmicos exigen las condiciones más extremas a las que puede estar sometido el cemento de un pozo. Como resultado, las condiciones que afectan su rendimiento suelen ser las más rigurosas. El diseño de los cementos para pozos geotérmicos debe garantizar una resistencia a la compresión mínima de 7,0 MPa y una permeabilidad al agua no superior a 0,1 mD. Además, el cemento fraguado debe ser resistente a la degradación causada por las salmueras salinas (Aza & Mendoza, 2014).

2.6.2. Tiempo de bombeo

El tiempo que se necesita para poder mezclar y bombear la lechada dentro del pozo y en el espacio anular es conocido como el tiempo mínimo de bombeo. Gracias a los equipos que se

encuentran en los laboratorios se puede obtener el tiempo de bombeo de cualquier lechada de cemento bajo las condiciones que ofrece el laboratorio, este procedimiento está especificado en los ensayos recomendados por la API (American Petroleum Institute). En dichos ensayos donde se trabaja el tiempo de bombeo lo que se hace es simular todas las condiciones del pozo. Las recomendaciones específicas que afectan el tiempo de bombeo son el tipo de trabajo, las condiciones del pozo y también el volumen de cemento que se desea bombear. Estas recomendaciones permiten obtener un factor de seguridad adecuado ya que es posible que se presenten cementaciones con un gran volumen que puedan requerir un tiempo mayor a 90 minutos para poder ubicar la lechada (Aza & Mendoza, 2014).

2.6.3. Viscosidad y contenido de agua de las lechadas de cemento

Al realizar una cementación, la lechada de cemento debe tener una viscosidad o consistencia que permita un desplazamiento eficiente del lodo, para que se permita una buena adherencia del cemento con la formación y el revestimiento. La norma API 10B establece las cantidades de agua que el cemento puede admitir.

Para poder lograr estos objetivos, la lechada de cemento es mezclada con cierta cantidad de agua la cual proveerá un volumen de cemento fraguado que es semejante al volumen de la lechada sin que se separe del agua libre. El tamaño de la partícula, el área superficial y los aditivos influirán en la cantidad de agua necesaria para el mezclado con el objetivo de lograr una viscosidad particular de la lechada.

El aumento de contenido de agua nos ayuda obtener mayores tiempos de bombeo y retardo en el fragüe, pero no se debe incrementar el agua en la mezcla a menos que se añadan bentonita u otros materiales con propiedades que puedan retener el agua (Aza & Mendoza, 2014).

2.6.4. Agua de mezclado

El agua que se desea mezclar con el cemento debe ser limpia y libre de productos químicos solubles, materia orgánica, álcalis y otros materiales contaminantes.

El agua que se utiliza en los procesos de cementaciones es el agua del yacimiento, o en su defecto el agua que se encuentra en una pileta abierta cerca del equipo, la misma que ha sido proporcionado de zonas acuíferas que son perforadas a profundidades mínimas. Esta agua facilita el mezclado con el cemento cuando las profundidades de los pozos son menores a 1524 m (5000 ft), particularmente cuando es relativamente clara y cuenta con un contenido de sólidos menor a 500 ppm.

Los materiales inorgánicos como lo son los cloruros, hidróxidos, sulfatos, bicarbonatos y carbonatos logran acelerar el fragüe del cemento, dependiendo de la concentración de cada uno de ellos. Estos materiales cuando se mezclan en pequeñas proporciones con el agua tienen un efecto dañino en los pozos de menor profundidad. Si esta agua es utilizada para pozos profundos con una alta temperatura ocasionará un fragüe prematuro de la lechada de cemento, especialmente si el agua contiene ciertas cantidades de dióxido de carbono. El agua de mar, por su alto contenido de sales (30000 a 40000 ppm), acelera el fragüe del cemento. Sin embargo, estos efectos aceleradores pueden ser contrarrestados mediante el uso de retardadores, lo que permite utilizar agua de zonas con altas temperaturas sin que se vea afectado el proceso de fragüe (Aza & Mendoza, 2014).

2.6.5. Efectos del fluido de perforación y aditivos sobre el cemento

Uno de los problemas comunes en la cementación de pozos es que la lechada se ve afectada durante su desplazamiento por una remoción inefectiva del lodo de perforación. La contaminación y dilución ocasionados por el lodo pueden provocar daños en el sistema de

cementación, así también como los aditivos del lodo y del revoque. Una forma de contrarrestar la contaminación del lodo y los efectos de los aditivos es mediante el uso de tapones de goma en la tubería y entre los fluidos de limpieza antes de la lechada. Estos tapones pueden ser de tipo colchón químico o colchón mecánico (Aza & Mendoza, 2014).

2.6.6. Densidad de la lechada

La densidad de una lechada en los trabajos de cementación de pozos, exceptuando los trabajos de cementación remedial forzada, deben ser lo suficientemente elevados para poder controlar el pozo. Para las bajas densidades, de 10,8 a 15,6 lb/gal (1295 a 1870hg/L) se requieren materiales con mucha cantidad de agua; para las densidades elevadas, de 15,6 a 22 lb/gal son utilizados dispersantes y aditivos densificantes como la baritina, hematita, etc.

En una operación de campo la densidad se puede controlar con una balanza de lodo estándar. Se debe tener en cuenta que, para poder corregir los defectos de medición de densidad, se han fabricado balanzas presurizadas, con las cuales se presurizan la lechada a unos 30 psi (0,21) aproximadamente, adquiriendo una reducción en las burbujas de aire atrapadas en la mezcla a un mínimo espacio (Aza & Mendoza, 2014).

2.6.7. Pérdidas de circulación

Al momento de clasificar los materiales requeridos para controlar una pérdida de circulación se deben tener en cuenta dos factores:

- Los materiales deben poderse manipular por el equipo de bombeo.
- Las aberturas deben ser suficientemente pequeñas para asegurar que tal material taponará y sellará.

2.6.8. Pérdida por filtrado

Un factor importante de la cementación hoy es el control que se lleva en la filtración de las lechadas ya que cuando la lechada de cemento atraviesa las zonas de baja presión y alta permeabilidad, se producen pérdidas de flujo. A medida que disminuye el volumen de la fase acuosa, la densidad de la lechada aumenta, lo que provoca cambios en sus propiedades en comparación con el diseño original. Algunos de los factores que influyen en la pérdida por filtrado son el tiempo, la temperatura, la presión y la permeabilidad. La API establece un ensayo estándar para medir la filtración de la lechada, realizando la prueba durante 30 minutos con presiones de entre 100 (0,69 MPa) y 1000 psi (6,90 MPa), utilizando un equipo llamado filtro prensa (Aza & Mendoza, 2014).

2.6.9. *Calor de hidratación*

Cuando el cemento se mezcla con el agua, se produce una reacción exotérmica que genera una liberación significativa de calor. A medida que aumenta la cantidad de cemento, la evolución de calor también será mayor. El calor de hidratación está influenciado por la finura y la composición química del cemento, los aditivos utilizados y las condiciones ambientales en el fondo del pozo (Aza & Mendoza, 2014).

2.7. Aditivos

2.7.1. *Aceleradores*

Los aditivos aceleradores en el diseño de lechadas de cemento sirven para reducir el tiempo de fraguado, permitiendo que el cemento se endurezca más rápidamente. Esto es especialmente beneficioso en aplicaciones donde se requiere una resistencia temprana, como en pozos poco profundos con temperaturas bajas, donde el proceso de fraguado natural puede ser

demasiado lento. Los aceleradores, como el cloruro de calcio, son comunes en estas aplicaciones y se dosifican generalmente entre el 2% y el 4% del peso del cemento (Aza & Mendoza, 2014).

Su uso beneficia al proceso de cementación al permitir un manejo más eficiente del tiempo de trabajo, lo que puede mejorar la productividad y la calidad del resultado final. Además, facilitan la aplicación en condiciones climáticas adversas, donde un fraguado rápido es crucial para evitar daños por exposición a la intemperie (Nelson, 1990).

2.7.2. Retardadores

Los aditivos retardadores en el diseño de lechadas de cemento sirven para retrasar la velocidad de la reacción química entre el cemento y el agua, lo que prolonga el tiempo de fraguado y permite un manejo más prolongado de la lechada antes de que se endurezca. Esto es especialmente beneficioso en climas cálidos o cuando la lechada debe transportarse a largas distancias, ya que evita la formación de juntas frías y permite una colocación más uniforme. Además, estos aditivos ayudan a mantener la plasticidad de la lechada, mejorando su trabajabilidad y facilitando su aplicación en condiciones desafiantes. En general, los retardadores son esenciales para garantizar que la lechada mantenga sus propiedades durante el tiempo necesario para su colocación y curado adecuados (Aza & Mendoza, 2014).

2.7.3. Extensores

Los aditivos extendedores en el diseño de lechadas de cemento sirven para reducir la densidad de la mezcla y aumentar su rendimiento. Al disminuir la densidad, estos aditivos ayudan a prevenir la pérdida de circulación en formaciones débiles durante la cementación, lo que puede reducir el número de etapas necesarias para completar el proceso. Además, al aumentar el rendimiento, se reduce la cantidad de cemento necesaria para producir un volumen determinado de producto fraguado, lo que resulta en una mayor economía. Los extendedores

comunes incluyen bentonita, puzolanas y tierras diatomeas, que permiten mantener una suspensión homogénea y evitar el desarrollo excesivo de agua libre en la lechada (Aza & Mendoza, 2014).

2.7.4. *Densificantes*

Los aditivos densificantes en el diseño de lechadas de cemento sirven para aumentar la densidad de la mezcla, lo cual es crucial en aplicaciones donde se requiere una mayor estabilidad y resistencia a la presión. Estos aditivos, como la barita (sulfato de bario) y la hematita (óxido de hierro), permiten alcanzar densidades superiores a 18 lb/gal, lo que ayuda a prevenir la deshidratación de la lechada y evita un fragüe prematuro (Aza & Mendoza, 2014). Aunque pueden reducir la resistencia a la compresión y el tiempo de bombeabilidad, su uso es beneficioso en pozos profundos y condiciones de alta presión, donde la estabilidad y el peso de la lechada son fundamentales para asegurar una buena cementación y evitar problemas estructurales (Nelson, 1990).

2.7.5. *Dispersantes*

Los dispersantes de cemento son usados generalmente para obtener las propiedades reológicas deseadas para la lechada. Se dividen en dos categorías; el primero actúa como retardadores fuertes del cemento, empleados en los lodos de perforación, pero igual de eficaces en el cemento y son conocidos como plastificantes (Aza & Mendoza, 2014).

El segundo, conocido como superplastificantes, son muy comunes y rentables, pero no pueden ser utilizados en entornos marinos ya que son altamente tóxicos para las algas, pueden ser usados a temperaturas de hasta 200 °C (392 °F) (Nelson, 1990).

El rendimiento de un dispersante en la lechada de cemento puede variar y visualizar su influencia por distintos factores físicos y químicos.

2.7.6. Controlador de filtrado

En el momento en el que una lechada se dispone en una formación permeable bajo presión se inicia un proceso de filtración, la fase de la lechada de cemento que es acuosa se dirige hacia la formación dejando atrás partículas de cemento, este proceso es conocido como pérdida de fluido (Aza & Mendoza, 2014).

Cuando un proceso de pérdida de fluido no es controlado puede inducir al fracaso de una operación de cementación, para evitar que esto suceda se incluyen en los diseños de lechada materiales conocidos como agentes de pérdida de fluido o control de filtrado. El primer aditivo usado para este control es la bentonita, pero además de este se encuentra materiales particulados como polvo de carbonato, micro sílice, asfáltenos y resinas termoplásticas (Nelson, 1990).

2.7.7. Controlador de pérdida de circulación

La pérdida de circulación durante la cementación es un grave problema que por lo general requiere de una segunda cementación o conocida también como cementación remedial. Las pérdidas de circulación suelen ocurrir en formaciones fracturadas que llegan a descomponerse por presiones hidrostáticas bajas. Los materiales generalmente usados son aquellos que crean puentes físicos sobre las fracturas y bloquean las zonas débiles, estos materiales aumentan la resistencia a la zona de separación por presión. Estos materiales son inertes químicamente respecto a la hidratación del cemento Portland (Nelson, 1990).

2.7.8. Aditivos especiales

Harina de sílice. Se utiliza en los diseños de lechada principalmente para mejorar las propiedades mecánicas del cemento. Al mezclar con los cementos hidráulicos (clase G), la harina de sílice aumenta la resistencia a la compresión y la durabilidad del material, lo cual es importante cuando se presentan entornos con altas temperaturas y presiones como se presenta en

los pozos geotérmicos. Además, ayuda a reducir la permeabilidad del cemento, lo que es esencial para evitar la contaminación de los acuíferos y lograr un sellado eficiente en el pozo (Lobo, 2023).

Agentes Antiespumantes. Ciertos aditivos pueden provocar que la lechada de cemento forme espuma durante su mezcla, esto tiene consecuencias graves por lo cual es importante la presencia de antiespumantes. Lo que puede ocurrir es que se gelifique la lechada, haya pérdidas de presión hidráulica durante el bombeo o que se incorpore aire y por consecuencia provocar densidades de lechada distintas a las que se habían esperado (Nelson, 1990).

Se conocen dos clases de antiespumantes; éteres polietilenglicol y siliconas, los dos son agentes espumantes. Ambos son agentes eficaces para la operación de cementación. La única restricción del polietilenglicol es que se debe adicionar en el sistema antes de mezclarlo, esto debido a que en campo ha demostrado que si se añade después este agente es ineficiente en la operación (Nelson, 1990).

Agentes fortalecedores. Estos agentes transmiten tensiones a lo largo de la matriz del cemento con el propósito de fortalecerlas al momento de fragüe de la lechada de cemento y así obtener como resultado un aislamiento zonal adecuado. Algunos materiales usados con este fin son las fibras de nailon, con longitudes de una pulgada (Nelson, 1990).

Agentes trazadores radioactivos. Son aplicados comúnmente en cementaciones secundarias o remediales, además de ello se utiliza este tipo de aditivo para encontrar la ubicación de la lechada detrás de la tubería de revestimiento con mayor facilidad (Nelson, 1990).

Descontaminantes de lodos. Diversos lodos de perforación contienen químicos como celulosas, almidones, taninos, etc. Que reaccionan con la lechada de cemento portland específicamente y tiene como resultado retardar el proceso de la lechada es por esto, que se usan

este tipo de sustancias como el paraformaldehído o cromato de sodio para evitar que esto ocurra (Nelson, 1990).

2.8. Técnicas de cementación

2.8.1. *Cementación a dos etapas*

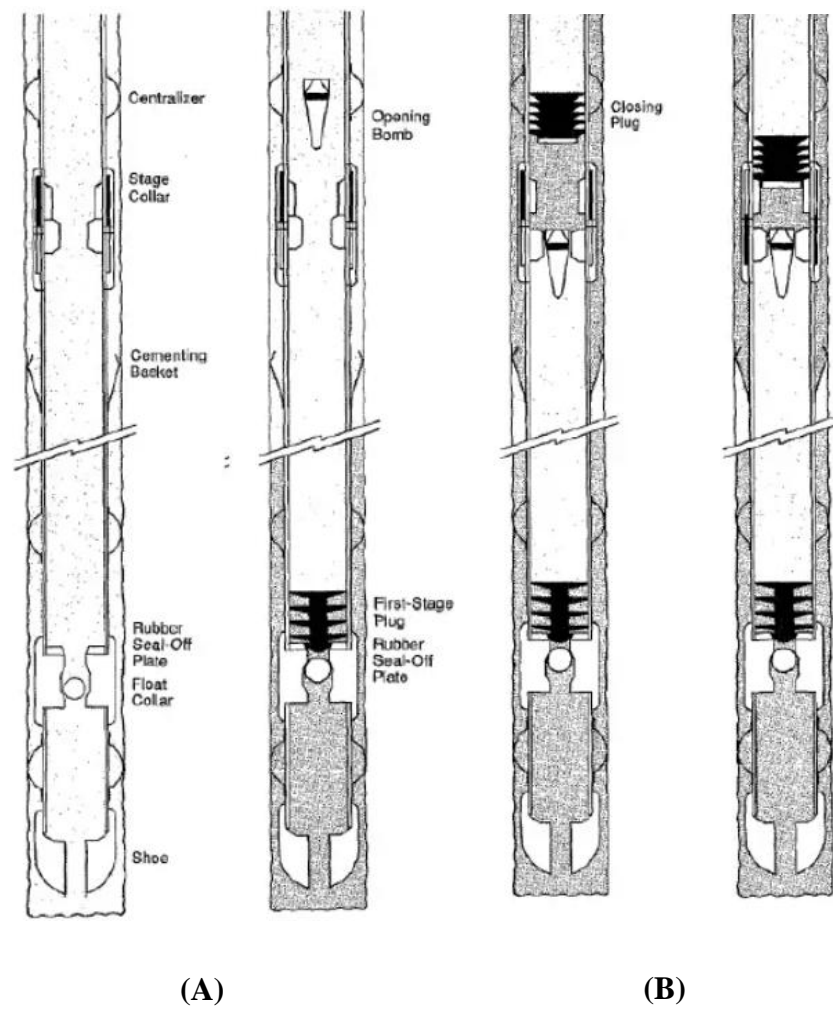
En los pozos donde la tubería de revestimiento es larga y las formaciones son friables, es posible que no soporte la presión hidrostática que genera una columna larga de lechada de cemento por lo que es mejor realizar la operación de cemento en dos etapas (Kiprotich, 2010).

La lechada de cemento en el espacio anular se divide en dos, una que se extiende desde la zapata de revestimiento hasta una altitud determinada por encima de las formaciones potencialmente problemáticas en el fondo del pozo, la segunda lechada cubre de las formaciones problemáticas menos profundas.

Esta técnica se utiliza para reducir el límite de colapso de la carcasa, los largos tiempos de bombeo, las altas presiones de bombeo, y la presión hidrostática excesiva en formaciones friables debido a la alta densidad de la lechada de cemento. En la ilustración 4 se muestran los accesorios de esta técnica (Kiprotich, 2010).

En la primera etapa el procedimiento es similar a la operación de cementación en una sola etapa solo que en esta técnica no se utiliza un tapón inferior. El tapón convencional se reemplaza por uno con hojas flexibles que permita el paso por medio del collar de cementación esto se puede observar en la Figura 3. La altura que determina el intervalo cementado del espacio anular depende del gradiente de fractura de las formaciones expuestas en el espacio anular.

Figura 3. Proceso de cementación en dos etapas



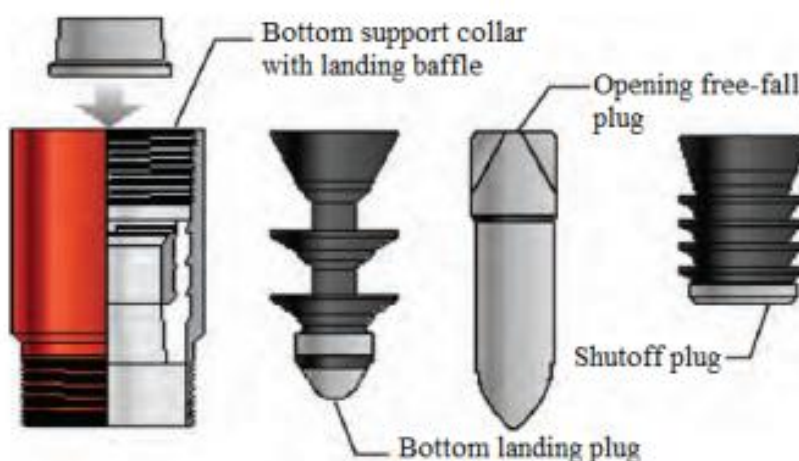
Nota. La Figura muestra el proceso de la técnica de cementación en dos etapas. La parte de la derecha denominada (A) se ilustra la primera etapa y la parte derecha denominada (B) ilustra la segunda etapa de la cementación. Adaptado de: <https://es.scribd.com/presentation/381887090/1-Cementacion-Dos-Etapas>

En la segunda etapa se utiliza un collar que se ubica en la tubería de revestimiento, esta posición depende de la profundidad de la zapata del revestimiento anterior. Los puertos en el

collar se encuentran sellados por el manguito interior el cual se mantiene en el lugar gracias a las válvulas de retención. Ya completado la primera etapa, se desata un dardo desde la superficie que aterriza en el manga interior del collar, el cual se ve el proceso de asentamiento en la Figura 3 (A). En el momento que se aplica una presión de 1000 (6,90 MPa) a 1450 psi (9,99 MPa) a la tubería de revestimiento por encima del dardo por lo que los pasadores de retención del manguito interior se cortan, este se mueve hacia abajo lo que hace que descubra los puertos del mandil exterior es allí donde la circulación se establece a través del collar antes de bombear la lechada de la segunda etapa (Kiprotich, 2010).

El espacio anular se cementa bombeando la lechada a través de los puertos, luego se deja caer el tapón y se desplaza con fluidos de perforación como se ilustra en la parte (B) de la Figura 3, hasta que cae en el collar de la segunda etapa y se prueba la presión con la tubería de revestimiento.

Figura 4. Accesorios para técnica de cementación de dos etapas



Nota. Adaptado de Kiprotich, E. (2010). GEOTHERMAL WELL CEMENTING, MATERIALS AND PLACEMENT TECHNIQUES. Islandia: United Nations University.

La técnica de cementación en dos etapas tiene una desventaja y es que la tubería de revestimiento no se puede mover después de que el cemento de la primera etapa se haya asentado en la parte inferior del espacio anular, por lo que puede aumentar el riesgo de una mala adherencia del cemento.

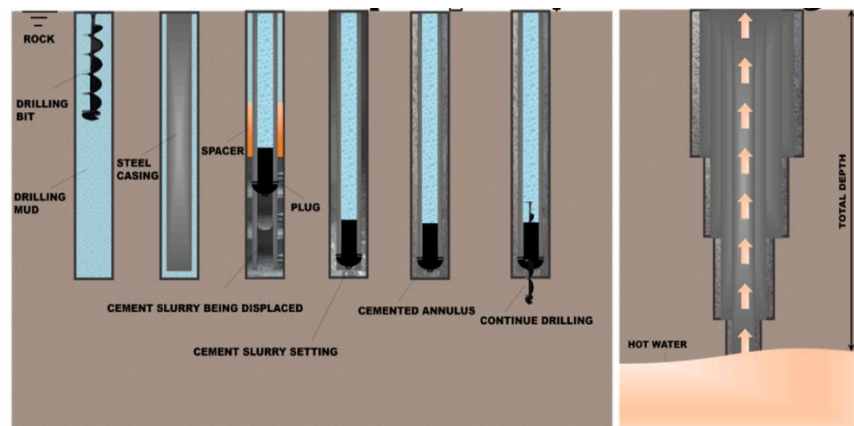
2.8.2. Cementación de anillo de cemento (*casing cementing*)

La cementación de anillo de cemento (Casing Cementing), esta técnica es utilizada en pozos geotérmicos para poder asegurar la integridad estructural y el aislamiento zonal del pozo. Esta técnica consiste en colocar un anillo de cemento alrededor de la tubería de revestimiento, dentro del espacio anular, y posteriormente inyectar cemento para fijarlo en su posición.

El objetivo de esta técnica es mejorar la resistencia del revestimiento frente a altas temperaturas y presiones que se presentan en los ambientes geotérmicos, reduciendo el riesgo de que se presenten fallas mecánicas. Además, se presenta una mejor adherencia entre el revestimiento, el cemento y la formación, lo que optimiza el aislamiento hidráulico y previene fugas de fluidos o gases entre zonas productoras y no productoras (Nelson, 1990).

En la figura 5, se observa el esquema del proceso de cementación. En primer lugar, se perfora un pozo hasta la profundidad deseada utilizando técnicas convencionales de perforación rotaria. A continuación, se posiciona el revestimiento en el pozo y se desplaza un fluido de perforación acompañado de un fluido espaciador para limpiar el pozo. Después, se bombea la lechada de cemento y se deja asentar para formar el anillo cementado antes de continuar con la perforación o realizar otras operaciones (Bergen, Zemberekci, & Duddukuri, 2022).

Figura 5. Cementación de pozo geotérmico con la técnica de "Casing Cementing"



Nota. Esquema del proceso paso a paso de cementación del pozo y diseño del revestimiento. Adaptado. Bergen, Sophia; Zemberekci, Lyn; Duddukuri, Sriramy. (2022). Una revisión de materiales cementantes convencionales y alternativos para pozos geotérmicos.

2.9. Equipos de laboratorio

En las operaciones de cementación de pozo se requiere la medición de distintos parámetros con el fin de asegurar la eficacia de estos.

- Agua de mezcla
- Cemento
- Lechada de cemento
- Caudal de lodo
- Presión
- Fracción de sólidos

- Reología de lodos
- Resistencia a la compresión

2.9.1. Unidad ultrasónica de cemento (UCA)

Este equipo nos permite medir la resistencia a la compresión del cemento de manera no destructiva. Esto se logra a través de la medición del tiempo de tránsito de ondas sónicas a través del cemento, permitiendo evaluar las propiedades mecánicas de la lechada sin dañarla. Este análisis nos garantiza que el cemento pueda soportar las condiciones del pozo, como lo son las altas temperaturas y presiones (Ramos et al, 2014).

Figura 6. Unidad ultrasónica de cemento



Nota. Equipo de laboratorio, unidad ultrasónica de cemento. Fuente: directindustry.

2.9.2. Consistómetro atmosférico

Este dispositivo determina las propiedades reológicas, examinar el contenido de agua libre y evaluar la pérdida de fluido, esto permite asegurar que la lechada de cemento tenga las características adecuadas para su aplicación en pozos (Lobo, 2023).

Figura 7. Consistómetro atmosférico



Nota. Equipo de laboratorio, consistómetro atmosférico. Fuente: directindustry

2.9.3. Consistómetro presurizado (HP/HT)

El consistómetro presurizado nos permite simular las condiciones extremas presentes en fondo de pozo, mediante la evaluación del tiempo de espesamiento de la lechada bajo temperaturas y presiones específicas. Determinando así el tiempo en que la lechada puede ser bombeada, asegurando así la integridad del pozo (Ramos et al, 2014).

Figura 8. Consistómetro presurizado (HP/HT)



Nota. Equipo de laboratorio, consistómetro presurizado (HP/HT). Fuente: directindustry

2.9.4. Filtro prensa

El filtro prensa determina con mayor eficacia las propiedades de pérdida de filtrado y lechada de cemento. Asegurando que la lechada cuente con un comportamiento óptimo durante el trabajo de cementación (Cruz, 2017).

Figura 9. Filtro prensa



Nota. Equipo de laboratorio, filtro prensa. Fuente: directindustry.

2.9.5. Reómetro

Este equipo de laboratorio nos permite saber las propiedades reológicas de la lechada de cemento, como la viscosidad (Gomez & Tarquino, 2018).

Figura 10. Reómetro



Nota. Equipo de laboratorio, Reómetro. Fuente: directindustry

2.9.6. Equipo de pruebas destructivas de cubos

El equipo ayuda en el cálculo y comparación de los tiempos de compresión en diferentes días con los resultados obtenidos de la unidad UCA (Lobo, 2023).

Figura 11. Equipo de pruebas destructivas



Nota. Equipo de laboratorio para realizar las pruebas destructivas para analizar el diseño de lechada. Fuente: aconstructoras.

2.10. Herramientas de campo

2.10.1. Unidad de cementación

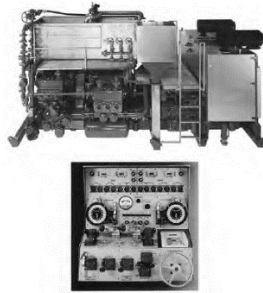
La unidad de cementación es un equipo especializado para las operaciones de cementación, en este equipo se realiza la mezcla, bombeo y colocación del cemento en el pozo perforado.

Como se había mencionado anteriormente, la unidad de cementación mezcla el cemento con agua y los aditivos previamente seleccionados según las propiedades del pozo; en segundo lugar, bombea esta mezcla de cemento controlando la densidad de la lechada, la temperatura y el monitoreo paso a paso de la operación lo cual permite ajustar parámetros en tiempo real según sea necesario. Es de gran importancia este equipo ya que garantiza la calidad del cemento, optimiza el proceso de cementación y reduce el riesgo de fallas (Nelson, 1990).

2.10.2. Unidad de cementación sobre patines

Este tipo de equipo se puede observar en la Figura 12. Es utilizado en plataformas terrestres aisladas, plataformas marinas, buques de cementación en mar abierto y operaciones en lagos y ríos (Nelson, 1990).

Figura 12. Patín de cemento típico y consola de control de la unidad de cementación



Nota. Adaptado de Nelson, E. B. (1990). Well cementing. Nueva York: Elsevier.

Universidad Industrial de Santander.

2.10.3. Unidades de cementación sobre camiones

El equipo puede visualizarse en la Figura 13. Estas unidades de cementación son apropiadas para cualquier operación terrestre, no obstante, la carrocería de los camiones debe adaptarse para el tipo de terreno donde se va a desplazar la unidad (Nelson, 1990).

Figura 13. Camión de unidad de cementación típico



Nota. Adaptado de Nelson, E. B. (1990). Well cementing. Nueva York: Elsevier. Universidad Industrial de Santander.

2.10.4. Unidades de cementación sobre semirremolque

Este tipo de unidad de cementación es muy similar a la anterior, (puede comparar las ilustraciones 13 y 14) solo que tiene como ventaja que puede soportar más peso y tiene mayor capacidad ya que puede ser transportada por tractor de cinco ejes, lo que proporciona una gran ventaja en la parte logística (Nelson, 1990).

Figura 14. Unidad de Cementación sobre remolque



Nota. Esta unidad de cementación es de Europa, aunque ya muchos otros países la están implementando. Adaptado de Nelson, E. B. (1990). Well cementing. Nueva York: Elsevier. Universidad Industrial de Santander.

Generalmente las unidades de cementación contienen dos bombas, esto con el propósito de tener una de “backup” en caso de que una sufra un daño grave durante la operación se tendrá otra completamente funcional y no habrá pérdidas en el pozo. Sin embargo, se diseñó un tipo de unidad de cementación con una sola bomba, como se puede ver en la Figura 15. Este tipo de

unidad es más rentable, pero se utiliza en operaciones de cementación menos críticas y con presiones inferiores (Nelson, 1990).

Figura 15. Unidad de Cementación de una bomba

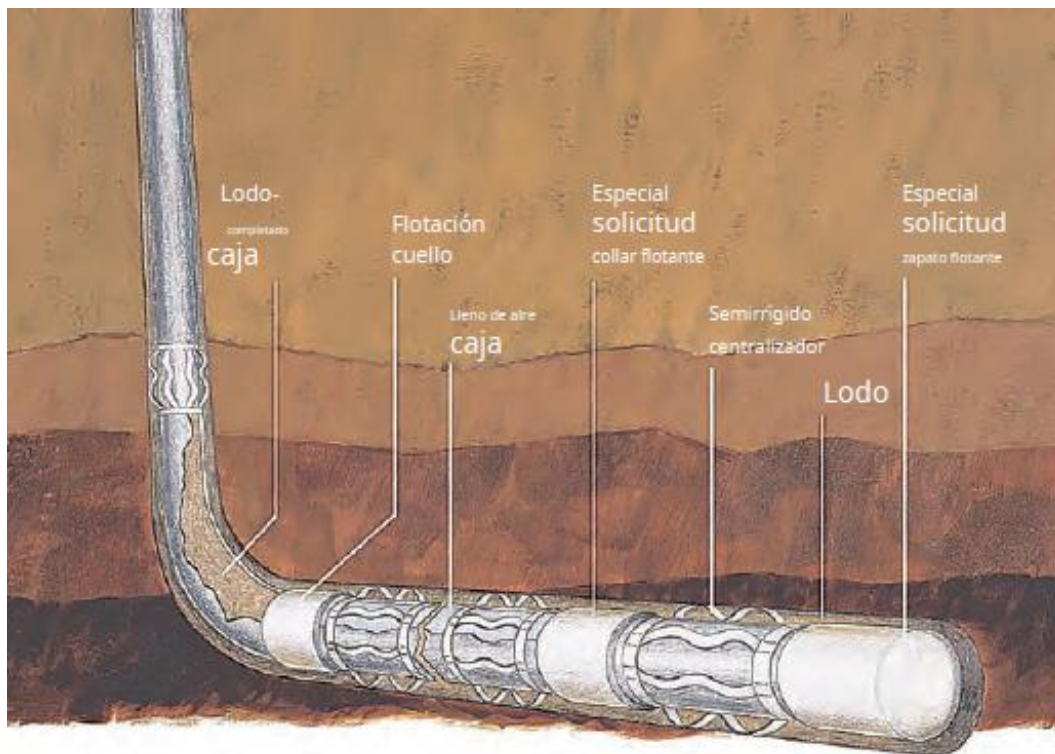


Nota. Adaptado de Nelson, E. B. (1990). Well cementing. Nueva York: Elsevier. Universidad Industrial de Santander.

2.10.5. Equipo de Flotación

El equipo de flotación (Figura 16) se utiliza para controlar la densidad de la lechada de cemento y con esto mantener la estabilidad del pozo durante la operación de cementación. Su objetivo principal es bombear la lechada mediante zapatas y collares de revestimientos especializados con válvulas de retención que mantienen la estabilidad del pozo (Nelson, 1990).

Figura 16. Sistema de Flotación



Nota. Adaptado de Nelson, E. B. (1990). Well cementing. Nueva York: Elsevier. Universidad Industrial de Santander.

2.10.6. Válvula de bola

Hecha de resina fenólica con peso y recubierta de caucho, la jaula está compuesta de plástico o aluminio, materiales que pueden ser estables a temperaturas por encima de los 150 °C (302 °F) hasta los 232 °C (449,6 °F) (Nelson, 1990).

Son usados principalmente para equipos de flotador más pequeños. Se puede ver este tipo de válvula en la figura 17.

Figura 17. Válvula de bola

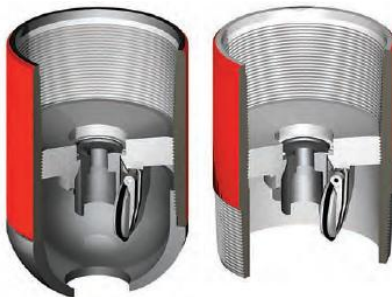


Nota. Adaptado de Nelson, E. B. (1990). Well cementing. Nueva York: Elsevier. Universidad Industrial de Santander.

2.10.7. Válvula de aleta

La válvula aleta o mariposa (figura 18) se abre proporcional a la velocidad que se bombea el fluido y a la fuerza del resorte. La desventaja de esta es que tiende a inducir turbulencia en flujo de fluidos por lo que puede provocar erosión y daños en el sello por lo cual proporciona poca vida útil. Este tipo de válvulas son estables a temperaturas menores a 149 °C (300,2 °F) (Nelson, 1990).

Figura 18. Válvula de aleta



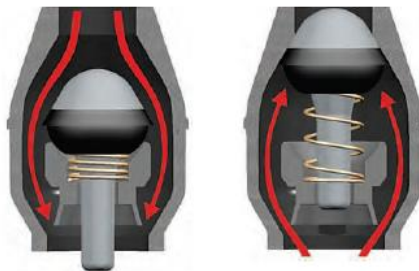
Nota. Adaptado de Nelson, E. B. (1990). Well cementing. Nueva York: Elsevier.

Universidad Industrial de Santander.

2.10.8. Válvulas de asiento

Estas válvulas suelen tener buena resistencia a las presiones y desgaste por lo que es mejor que las dos válvulas anteriormente mencionadas. En cuanto a la temperatura depende del material que se fabrique lo cual especifica el proveedor, en la Figura 19 se puede observar este tipo de válvulas y el funcionamiento de esta (Nelson, 1990).

Figura 19. Válvula de asiento



Nota. Adaptado de Nelson, E. B. (1990). Well cementing. Nueva York: Elsevier. Universidad Industrial de Santander.

2.10.9. Zapata

Esta herramienta que se percibe en la figura 20, es crucial ya que se posiciona en la parte inferior de la tubería de revestimiento, su función principal es guiar la tubería hacia el fondo del pozo y evitar el flujo inverso de la lechada de cemento junto con la válvula de retención. Son esenciales para asegurar un sellado hidráulico efectivo y un correcto anclaje a la tubería (Nelson, 1990).

Figura 20. Zapata Flotadora



Nota. Adaptado de Cementación de Pozos Petroleros por Fabricio Escalera Vincenti, 2011, Universidad Privada de Santa Cruz de la Sierra.

2.10.10. Cuellos o collares

En la cementación de pozos geotérmicos los cuellos o collares son secciones de tubería que se utilizan para conectar diferentes partes del revestimiento. Se puede observar un tipo de collar flotador en la figura 21. Tiene como objetivo principal garantizar el sello adecuado entre la formación y el revestimiento, esto con el fin de evitar que los fluidos toquen zonas productoras, sumado a esto, mantiene la integridad del pozo, contaminación de los acuíferos y ayudan con las cargas durante la perforación y producción (Nelson, 1990).

Figura 21. Equipo de flotación de llenado automático, tipo doble aleta de gran calibre



Nota. Adaptado de Nelson, E. B. (1990). Well cementing. Nueva York: Elsevier.

Universidad Industrial de Santander.

Base de datos de casos de estudio a nivel mundial

Para obtener un diseño y una formulación de lechada adecuada para la cementación de pozos geotérmicos hay que tener en cuenta algunos parámetros fundamentales para tener una estabilidad y eficiencia de los sistemas geotérmicos renovables. En todo el mundo se ha

evidenciado el desarrollo de los tipos de lechada de cemento adaptado a las condiciones geotérmicas locales, tipos de roca y desafíos específicos que presenta cada pozo.

En este punto es importante la inclusión de casos de estudio de distintas naciones ya que proporciona un enfoque comparativo y ofrece una información valiosa sobre la optimización de materiales, la mejora de técnicas y la minimización de operaciones remediales. Por lo que a continuación se presentarán casos de estudios de países que ya han explorado pozos geotérmicos y que desempeñará una guía para Colombia.

2.11. Croacia

Croacia a lo largo de las últimas décadas ha buscado el desarrollo de nuevos proyectos que involucren la energía geotérmica con el fin de aprovechar sus recursos geotérmicos naturales debido a que el país se encuentra ubicado en una zona con alto potencial geotérmico que facilita su investigación y exploración, además de que Croacia ha mostrado interés en el uso esta innovadora energía renovable.

Figura 22. Planta geotérmica en Croacia



Nota. Central geotérmica de Velika Ciglena, Croacia. Fuente: [piensageotermia](http://piensageotermia.com).

La trayectoria de los pozos geotérmicos en Croacia se remonta a los primeros estudios de investigación realizados entre los años 1970 y 1980. Durante este tiempo, Croacia empezó con la identificación de las fuentes termales y recursos geotérmicos con el fin de estimar su potencial en este tipo de energía y tener una transición hacia el aprovechamiento energético, específicamente para la generación de electricidad.

En consecuencia, Croacia inició con la búsqueda de los materiales para el desarrollo y creación necesarios para los diseños de lechada utilizados en pozos geotérmicos con el propósito de tener una buena integridad de pozo. A continuación, se presentará una tabla con los resultados de dicha investigación (Jorquera, 2018).

Tabla 2 Diseños de lechada de cemento expuestos por Croacia

Muestra	Parte por peso kg	Componentes	Densidad del lodo (lb/gal)
1	100	Cemento API clase G ($64,2C_aO$, $21,5SiO_2, 3,9Al_2O_3, 3,8Fe_2O_3$)	15,10
	35	Harina de sílice	
	1	Lingina-azucares	
	54	Agua	
2	100	Cemento API clase J ($37,3C_aO, 54,2SiO_2, 1,1Al_2O_3, 1,0Fe_2O_3$)	15,43
	0,4	Lingina-azucares	
	44	Agua	
3	100	Cemento API clase F	15,10
	40	Harina de sílice	
	0,7	Lingina-azucares	
	63	Agua	
4	30	Cemento API clase J	13,76
	40	Pozzolana	

	30	Escoria de alto horno	
	0,5	carboximetilcelulosa	
	60	Agua	
5	100	Cemento API clase G (64,2C _a O,21,5SiO ₂ ,2,9AL ₂ O ₃ ,3,8Fe ₂ O ₃)	13,51
	35	Harina de sílice	
	8,5	Perlita	
	2	Bentonita	
	1	Lingina-azucars	
	116	Agua	
6	100	Cemento API clase G (64,2C _a O,21,5SiO ₂ ,3,9AL ₂ O ₃ ,3,8Fe ₂ O ₃)	14,02
	35	Harina de sílice	
	10	Diatomaceo	
	1	Lingina-azucars	
	91	Agua	
7	100	Cemento API clase G	15,52
	40	Harina de sílice	
	0,8	Dispersante	
	0,8	Agente de perdida de fluido	
	0,4	Retardador	
	60,3	Agua	
8	100	Cemento API clase G	13,60
	100	Harina de sílice	
	0,3	Retardador	
	85,1	Agua	
9	100	Cemento API clase G	15,43
	80	Harina de sílice	
	0,5	Agente de perdida de fluido	
	0,3	Retardador	
	76,8	Agua	
10	100	Cemento API clase G	15,77
	40	Harina de sílice	
	1	Retardador	
	59,2	Agua	

Nota. Esta tabla explica cuáles fueron los diseños de lechada de cemento para pozos geotérmicos según las investigaciones realizadas por Croacia (Gaurina, Davorin, & Gracijan, 1994).

Croacia en su esfuerzo en el avance del desarrollo de tecnologías geotérmicas, ha basado parte de su investigación sobre el diseño de lechadas para pozos geotérmicos en estudios y casos que han tenido éxito a nivel mundial. Colombia, así mismo como lo ha hecho Croacia tiene que observar y analizar las mejores prácticas y avances que se han presentado en el parámetro mundial, con el objetivo de tener una adaptación a las condiciones geológicas y geotérmicas que se presenten.

Casos de referencia como Estados Unidos, Costa Rica y México, donde se han efectuado y logrado importantes avances en la formulación y optimización de lechadas de cemento para zonas geotérmicas. Al integrar estos conocimientos globales, Colombia no solo debe buscar la mejora en la eficiencia y sostenibilidad de sus propios sistemas geotérmicos, sino que también elaborar un diseño de lechada para pozos geotérmicos, consolidando su presencia en el panorama de la energía geotérmica a nivel mundial (Gaurina, Davorin, & Gracijan, 1994).

2.12. Estados Unidos

La energía geotérmica en Estados Unidos es una fuente significativa de energía renovable. La explotación geotérmica se basa en el aprovechamiento del calor almacenado en el interior de la Tierra a través de pozos y plantas geotérmicos. Estos pozos son perforados para

poder acceder a recursos geotérmicos como agua caliente vapor o gases que se puedan encontrar a profundidades variables y con condiciones físicas particulares.

La presión de los pozos geotérmicos en Estados Unidos está influenciada por la profundidad y las condiciones del reservorio geotérmico (Garman, 2003). En pozos poco profundos la presión es menor mientras que a grandes profundidades puede ser muy alta, especialmente si se trata de reservorios de vapor seco o agua caliente a alta presión. En pozos profundos a más de 2000 m (6561,7 ft) - 3000 m (9842,5 ft) de profundidad, las presiones pueden superar los 435 psi (2,99 MPa), dependiendo de la ubicación y las características del reservorio.

La profundidad que se pueden encontrar en estos pozos geotérmicos puede variar, un ejemplo, es que, en zonas con alta actividad geotérmica, como el Valle de Salton Sea (California), los pozos pueden ser relativamente poco profundos entre 1000 m (328,8 ft) a 2500 m (8202,1 ft), mientras que en otras áreas como la región de The Geysers (California), los pozos suelen tener profundidades de hasta 3000 m (9842,5 ft). Estas profundidades influyen en la temperatura.

En general, los pozos geotérmicos pueden extraer vapor o agua caliente con temperaturas que van desde los 150°C (302 °F) hasta más de 350°C (662 °F) en los reservorios más profundos. Un claro ejemplo es en el Valle de Salton Sea, donde se han reportado temperaturas de entre 230°C (446 °F) a 300°C (572 °F) a profundidades entre 2000 m (6561,7 ft) y 2500 m (8202,7 ft). En la planta geotérmica de The Geysers, las temperaturas pueden superar los 350°C (662 °F) (Zuleta Gean, 2022). Principalmente los fluidos que se extraen de los pozos geotérmicos son agua y vapor, los cuáles en algunos casos, pueden estar acompañado de gases como dióxido de carbono (CO_2), sulfuro de hidrógeno (H_2S), o metano (CH_4), los cuales

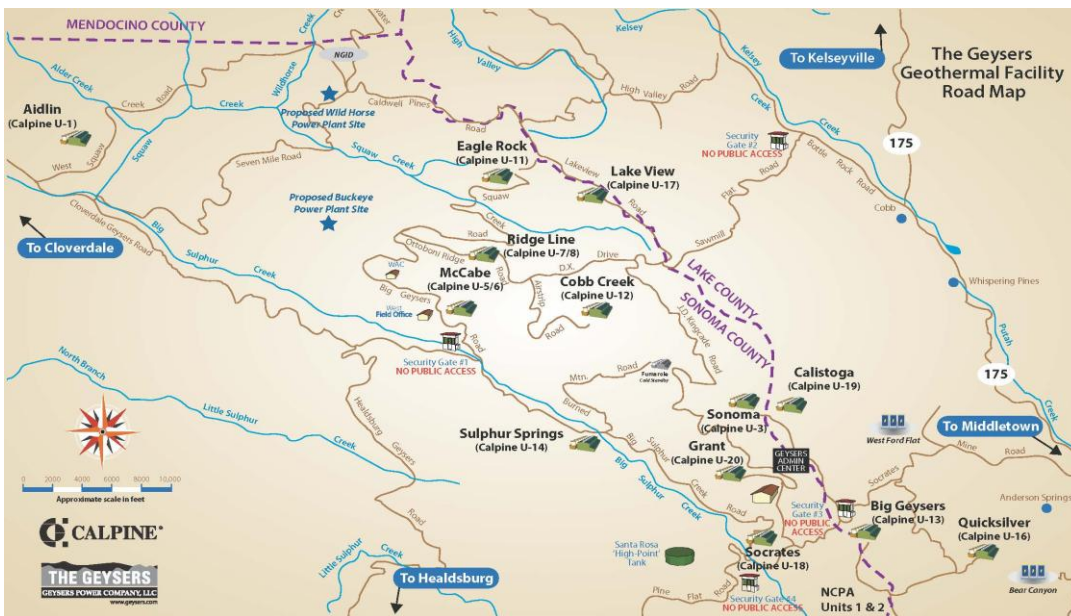
pueden ser capturados y utilizados o también pueden requerir tratamiento antes de su liberación (Bergen, Zemberekci, & Duddukuri, 2022).

Figura 23. Planta geotérmica en Estados Unidos



Nota. Planta geotérmica The Geysers (California) Estados Unidos.

El complejo geotérmico The Geysers se ubica en las montañas Mayacamas, a 121 km al norte de San Francisco, California. Este complejo está formado de 22 plantas de energía lo cual la convierte en la instalación geotérmica más grande a nivel mundial. El complejo cuenta con una capacidad de 1517 MW y una capacidad de producción activa de 900MW. El complejo se encarga de suministrar electricidad a la población de Sonoma, Lake, Mendocino, Marin y los condados de Napa. Se estima que su desarrollo abastece el 60% de la demanda energética de la región costera la cual está comprendida por el Golden Gate y a frontera del Estado de Oregón.

Figura 24. Mapa de la planta geotérmica The Geysers

Nota. Hoja de ruta de la instalación de la planta geotérmica The Geysers. Tomado de Calpine.com

Calpine es la empresa propietaria de un total de 19 plantas. Las instalaciones cubren un área de aproximadamente 78Km², cuya producción del campo geotérmico fue iniciada por Pacific Gas & Electric en 1960 con una primera planta de 11 MW de potencia instalada y alcanzó su punto máximo de la década de 1980.

2.12.1. Pozos geotermales The Geysers

- 319 pozos de vapor
- 73 pozos de inyección
- Pozo más profundo: 3931,9 m (12900 ft)
- Profundidad media del pozo: 2590,8 m (8500 ft)
- Tiempo de perforación de base actual: 85 días (75 días de perforación + 10 días de montaje/desmontaje de la plataforma)

- Producción promedio de vapor por pozo en 2022: 11938 libras por hora
- Temperatura media del vapor de yacimientos: 180 °C (356 °F)
- Presión media de vapor que fluye: 83,2 Psi (0,57 MPa)

Estados Unidos intensifica esfuerzos para desarrollar un buen diseño de lechada de cemento para la construcción de pozos geotérmicos debido a la creciente necesidad de diversificar sus fuentes de energía y así mismo poder garantizar la sostenibilidad a largo plazo. La geotermia es una de las fuentes de energía renovable más prometedoras, pues permite aprovechar el calor interno de la tierra para generar electricidad de manera continua y sin emisiones de carbono.

Un buen diseño de lechada de cemento para este tipo de pozos es crucial ya que debe cumplir funciones vitales como la protección de las estructuras subterráneas, el aislamiento térmico y la prevención de fugas de fluido. La lechada debe resistir las altas temperaturas y presiones que se presenta en la creación de estos pozos geotérmicos, mantener la integridad del pozo durante su vida útil y mejorar la eficiencia del proceso de generación de energía. Además, un adecuado diseño de lechada contribuye a minimizar el impacto ambiental y a optimizar el rendimiento de los sistemas geotérmicos, lo que a su vez fortalece la sostenibilidad energética del país (Bergen, Zemberekci, & Duddukuri, 2022).

Tabla 3 Datos recopilados del caso de estudio (Estados Unidos)

País	Temperatura °C (°F)	Presión Psi (MPa)	Fluidos

Estados Unidos	180(356) <x	290 (1,99) < x <435 (2,99)	Agua y vapor seco con presencia de gases como CO ₂ , H ₂ S y CH ₄
----------------	-------------	-------------------------------	--

Nota. La tabla presenta los rangos tomados de la Temperatura, presión y fluidos de The Geysers en Estados Unidos.

2.12.2. Técnica de cementación

Es importante mencionar que Estados Unidos y Croacia han aplicado la técnica casing cementing para cementación de pozos geotérmicos, utilizando cementos especializados para condiciones de alta temperatura y corrosión. En Estados Unidos (Bergen, Zemberekci, & Duddukuri, 2022), esta técnica fue implementada en el campo geotérmico The Geysers, el más grande del mundo, mientras que en Croacia se empleó en el campo geotérmico Velika (Lobo, 2023), garantizando la integridad y eficiencia operativa en ambos casos.

La cementación de anillos consiste en bombear cemento en el espacio anular entre la tubería de revestimiento (casing) y la formación. Esta técnica se explica en la sección 3.8.2.

Una parte importante para tener en cuenta y Estados Unidos siempre tiene presente es el tema de los costos, por tal motivo, se centraron en el desarrollo de nuevos materiales cementantes. El objetivo de esta investigación era poder crear y producir materiales cementantes con resistencia al CO₂ y salmera geotérmica acida a temperatura >300°C (572 °F). Entre los años 1998-2006, se realizó con éxito el desarrollo de nuevos cementos: cemento de fosfato de aluminio de calcio (CaP) y un cemento resistente al choque térmico (TSRC) (Bergen, Zemberekci, & Duddukuri, 2022).

Tabla 4. Diseños de lechada implementados en pozos geotérmicos de Estados Unidos

Material	Composición	Área de aplicación recomendada
Cemento de fosfato de calcio (CaP)	Calcio	Resistencia al CO ₂ ácidos (pH ~ 5) y ricos en CO ₂
	Aluminato	
	Cemento	
	Cenizas volantes de tipo F	
	Sodio	
	Fosfato	
Cemento resistente al choque térmico (TSRC)	Calcio	Para uso en entornos con roca seca caliente y frecuentes fluctuaciones de temperatura
	Aluminato	
	Cemento	
	Cenizas volantes de tipo F	
	Sodio	
	Metasilicato	
Escoria activada con silicato de sodio (SSAS)	Escoria	Resistencia a ácidos fuertes para uso en entornos altamente ácidos con bajos niveles de CO ₂
	Silicato de sodio	

Nota. Materiales para el desarrollo de diseños de lechada para pozos geotérmicos realizados por las investigaciones de Estados Unidos. Adaptado. Bergen, Sophia; Zemberekci, Lyn; Duddukuri, Sriramy. (2022) Una revisión de materiales cementantes convencionales y alternativos para pozos geotérmicos.

2.13. México

2.13.1. Cerro Prieto, México

Cerro Prieto es una planta geotérmica ubicada en México tal como se puede observar en la Figura 25. Comenzó su construcción en el año 1958 y finalizó en el año 1973, en este mismo año comenzó el funcionamiento. En ese momento era la segunda central geotérmica más grande del mundo.

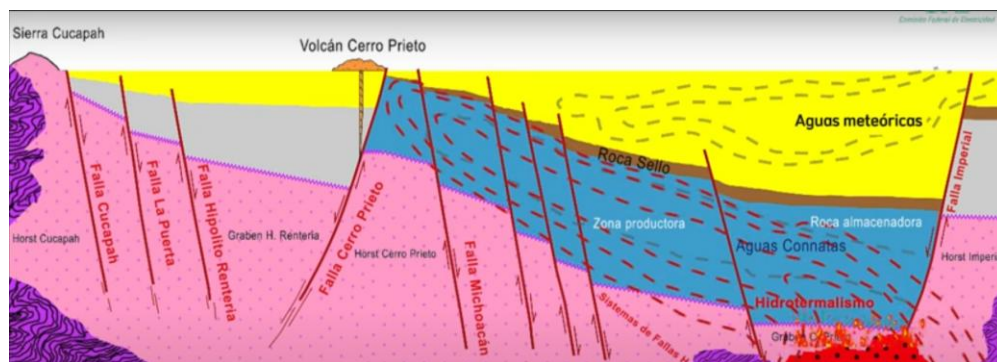
Figura 25. Planta geotérmica de México



Nota. Foto de la planta geotérmica de Cerro Prieto. Adaptado de Comisión Federal de Electricidad, geothermal power plant CERRO PRIETO. Mexicali, BC MEXICO por Saul Saavedra, 2020.

Se encuentra ubicada en el Valle de Mexicali, Baja California, aproximadamente a 30 Km al sureste de la ciudad de Mexicali muy cerca del volcán de Cerro Prieto, por ello recibe este nombre. Los yacimientos de este campo se sitúan en la cuenca tectónica de la Fosa de Salton, limitada por la falla de Cerro Prieto en el este y en el oeste la falla Imperial, como se ve en la Figura 26. Tiene una extensión aproximada de 15Km² en el cual se han perforado más o menos 300 pozos con profundidades aproximadas entre los 1250 m (4101,1 ft) y los 3550 m (11647 ft). En cuanto a yacimientos, se evidencia que en el campo hay dos yacimientos identificados y denominados “Alfa” y “Beta”; el primero se encuentra ubicado en la zona de Cerro Prieto I con profundidades entre los 1000 m (3280,8 ft) y los 1500 m (4921,3 ft), el segundo se encuentra a profundidades mayor a los 1500 m (4921,3 ft) y abarca toda la zona del campo. (Chiaramonte, 2022)

Figura 26. Mapa Estructural de Cerro Prieto



Nota. Figura de las fallas limitantes al Volcán Cerro Prieto, zonas productoras, rocas y demás que la conforman. Adaptado de 50 años de la central geotermoeléctrica Cerro Prieto por Canal Comisión Federal de Electricidad, 2024.

Se perforó el pozo M-53 con una profundidad, aproximada de 2000 m (6561,7 ft), lo que fue un éxito, ya que la producción alcanzó los 150 MW a una temperatura en fondo de 340 °C (644 °F). Por lo tanto, en ese mismo año, 1981, se descubrió e inició la construcción de los yacimientos Cerro Prieto II y Cerro Prieto III. (Morgado, 2009).

El yacimiento geotérmico de Cerro prieto se encuentra ubicado en la formación geológica más antigua, el basamento ígneo metamórfico muestra granitos, gneises y esquistos formando un complejo que aflora en la sierra de Cucapah y Juárez (Morgado, 2009). Del mismo modo, estudios sísmicos realizados evidencian que el basamento cuenta con varias fallas estructurales que descienden al oriente para luego bajar por el este de Cierro Prieto. Paralelo a ello, contiene rocas areniscas y lutitas arcillosas intercaladas con fallas variables del terciario medio-tardío. Esta sección geológica del yacimiento se encuentra en una profundidad más o menos de 400 m (1312,3 ft) en la parte occidental del campo y se extiende a 2900 m (9514,4 ft) hacia el este; está cubierta de grava no consolidada, tiene una base mineralógica de alteración hidrotermal. La parte superior del yacimiento se caracteriza por la mineralización de sílice y epidota (Arellano et al, 2009).

Los pozos producen fluidos del tipo clorurado sódico, con un pH que varía entre los 5 y 8. La temperatura de este yacimiento se evaluó con geotermómetros de fase líquida y con métodos de equilibrio gaseoso lo cual arrojó que el yacimiento tiene temperaturas entre 275 °C (527 °F) y 325 °C (617 °F). Por otra parte, se determinó la distribución del CO_2 en la descarga de los pozos; arroja que los valores más altos se encuentran localizados en el Cerro Prieto IV, es allí donde los valores de entalpía son más altos, lo cual indica que hay una elevada fricción de vapor, por ello es lógico que los pozos que tienen alta entalpía produzcan altos valores de CO_2 . (Arellano et al, 2009).

Tabla 5 Datos recopilados del caso de estudio (Cerro Prieto México)

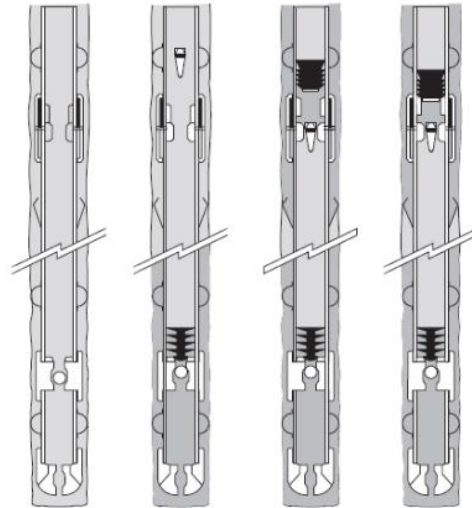
País	Temperatura °C (°F)	Presión Psi (MPa)	Fluidos
México	250 (482) <x	435 (2,99) < x >870 (5,99)	Los fluidos presentan clorurado sódico, con un pH que varía entre los 5 y 8.

Nota. La tabla presenta los rangos tomados de la Temperatura, presión y fluidos de Cerro Prieto, México.

2.13.2. Técnica de cementación

Esta técnica de cementación se puede ver en la figura 27, es empleada generalmente para los pozos geotérmicos de Cerro Prieto. En uno de los pozos de la planta se cementó en dos etapas, la primera etapa de 100 m de longitud aproximadamente con el fin de apoyar la segunda para evitar pérdidas de circulación que pudieran crear una invasión del cemento en las areniscas de la zona productora del yacimiento por lo cual deja el liner colgado y libre. La compañía que realiza la cementación en CPLatina realiza esta operación por medio de la tubería con un tiempo de fraguado de 12 hrs para la primera etapa y 24 hrs para la segunda yendo esta desde donde culmina la primera hasta la superficie (Morgado, 2009); continuando con lo anterior esta compañía utiliza el equipo de cementación de Unidad de cementación sobre remolque, además cuenta con su laboratorio donde realizan las pruebas de rendimiento del cemento a altas temperaturas. La explicación de la técnica se encuentra en la sección 3.8.1.

Figura 27. Operación de cementación de dos etapas



Nota. Adaptado de Nelson, E. B. (1990). Well cementing. Nueva York: Elsevier.

Universidad Industrial de Santander.

2.13.3. Diseño de lechada

En este punto se empleó el cemento Portland clase “G” modificado con aditivos químicos especiales para pozos de alta temperatura, principalmente los aditivos son; 35- 40% harina de sílice, tierra diatomácea, retardadores, reductores de fricción y bentonita. Además de lo anterior esto se utilizó accesorios como zapatas, acoples y demás; especiales para una temperatura alta ya que en pozos anteriores se usaron de tipo convencionales y obtuvieron fallas en la herramienta (Guiza, 1977).

Tabla 6. Diseños de lechada implementados en pozos geotérmicos en México

Material	Composición	Área de aplicación recomendada
Cemento Portland	Harina de Sílice	Para uso en entornos con fluidos que presenten cloruro sódico, con pH entre 5 y 8, zonas geológicas con alto contenido de salmueras.
	Tierra Diatomeas	
	Cemento Portland "G"	
	Retardadores	
	Reductores de Fricción	
	Perlita	

Nota. Diseño de lechada implementadas para los pozos geotérmicos de México.

2.14. Costa Rica

El compromiso de país hacia la sostenibilidad energética y al cuidado ambiental, es la principal razón por la que Costa Rica empezó su investigación en el campo de la geotermia. Costa Rica, conocida por su abundancia de recursos naturales y es su enfoque en energías renovables, logro identificar en el siglo XX que tenía un buen potencial en el aprovechamiento de la geotermia, esto se debe a su ubicación en el Cinturón de Fuego del Pacífico, una región con alta actividad volcánica.

En el año 1960, se desarrollaron los primeros estudios geológicos y geofísicos para evaluar el potencial geotérmico del país, con mayor detalle en la zona del volcán Miravalles, en la provincia de Guanacaste. Dichos estudios contaron con la ayuda y cooperación de organizaciones internacionales. El verdadero punto de inflexión ocurrió en el año 1975, cuando el ICE (Instituto Costarricense de Electricidad) empezó con proyectos piloto en exploración y viabilidad de la energía geotérmica. El ICE asumió el papel de desarrollo en la geotermia de Costa Rica, siendo reconocida como el instituto líder en la gestión de fuentes de energía renovables.

En 1994, Costa Rica inauguró su primera planta geotérmica, Miravalle I. Este proyecto tuvo buen resultado y éxito, convirtiéndose en el motor inicial del desarrollo geotérmico en el país. En los años siguientes, se expandió con la construcción de otras unidades, como Miravalles II, III, IV y V, aumentando considerablemente la capacidad instalada. El éxito de Miravalles motivó a Costa Rica a explotar otros campos geotérmicos, como Las Pailas y el volcán Rincón de la Vieja. En 2011, se inauguró la planta, Las Pailas I, y posteriormente en 2019, entró en operación, Las Pailas II.

Figura 28. Mapa geográfico de Costa Rica

Nota. Ubicación de la planta geotérmica Miravalles en Costa Rica.

2.14.1. Pozos geotermales Miravalles

- Campo geotérmico Miravalles
- Unidades: 6 en operaciones
- Pozos: 33 productores – 14 inyectores
- Profundidad media: 2000 m (6561,7 ft)
- Temperatura: >240 °C (464 °F)
- Presión: >290 psi (1,99 MPa) y <435 psi (2,99 MPa) (dependiendo de su profundidad)
- Fluidos presentes: Se pueden encontrar con la presencia de minerales disueltos, como sales, y gases como CO₂ y H₂S.
- Capacidad instalada: 165 MW
- Capacidad de operaciones: 136 MW

Tabla 7 Datos recopilados del caso de estudio (Costa Rica)

País	Temperatura °C (°F)	Presión Psi (MPa)	Fluidos
Costa Rica	200 (392) <x	290 (1,99) < x <435 (2,99)	Se pueden encontrar con la presencia de minerales disueltos, como sales, y gases como CO ₂ y H ₂ S.

Nota. La tabla presenta los rangos tomados de la Temperatura, presión y fluidos de Miravalles en Costa Rica.

2.14.2. Técnica de lechada

La técnica de lechada que implementan en los pozos geotérmicos del país de Costa Rica es la que fue explicada anteriormente en Cerro Prieto, allí se usa la cementación en dos etapas ya que estos pozos cuentan con un sistema constructivo de cuatro etapas de las cuales se cementan dos. Según lo descrito en estos pozos; la primera etapa desde los 609 m (2263.8 ft) a los 350 m (1148,3 ft), cementando el espacio anular entre la tubería y la formación, desde el fondo hasta superficie.

Por otra parte, la segunda etapa cementa el espacio anular entre tubería y formación y entre tuberías.

Lo que tiene como propósito es aislar las zonas de producción de vapor de los acuíferos y evitar la contaminación, soporte la tubería, conduce el fluido desde el pozo hasta la superficie, dando una buena adherencia y evitando una pérdida de control en el flujo de fluidos.

2.14.3. *Diseño de lechada*

Costa Rica ha investigado la creación de una lechada de cemento liviana para pozos geotérmicos en el campo Miravalles con el fin de minimizar el impacto ambiental en la zona ya que la zona del campo está rodeada por parques nacionales.

En ese orden de ideas, esta investigación busca desarrollar soluciones más sostenibles para la construcción de pozos, reduciendo el uso de materiales pesados y mejorando la eficiencia de la perforación, al mismo tiempo que se protege el ecosistema local, conocido por su rica biodiversidad y recursos naturales. Como resultado de estos estudios, se han propuesto dos diseños de lechada (Lobo, 2023).

Tabla 8 Diseños de lechada implementados en pozos geotérmicos en Costa Rica

Material	Porcentaje %	Peso kg	Material	Porcentaje %	Peso kg
Cemento G	100,00	50,00	Cemento G	100,00	50,00
H. Silica	35,00	17,50	H. Silica	35,00	17,50
Esferilita	15,00	7,50	Esferilita	10,00	5,00
Latex	0,00	0,00	Latex	0,00	0,00
Bentonita	1,00	0,50	Bentonita	1,00	0,50
Static F	0,00	0,00	Static F	0,00	0,00
FP-6L	0,90	0,05	FP-6L	0,09	0,05
ASA-301L	0,75	0,28	ASA-301L	0,55	0,28
Ultra-7	1,50	0,75	Ultra-7	1,43	0,72
CD-32L	0,35	0,18	CD-32L	0,30	0,15
R-21L	0,30	0,15	R-21L	0,25	0,13
Agua	80,00	40,00	Agua	66,00	33,00
Totales		116,90	Totales		107,31

Nota. Diseños de lechadas liviana implementadas para los pozos geotérmicos de Costa Rica, con el motivo de cuidar el medio ambiente. Los aditivos nombrados en la tabla son del tipo control de pérdidas por filtrado, retardadores, dispersantes y antiespumantes. Tomado de Lobo, Marco

(2023). Diseño de lechadas livianas de cemento para pozos geotérmicos. ESCUELA DE INGENIERÍA EN CONSTRUCCIÓN.

Para el diseño de lechadas de cemento para pozos geotérmicos, es importante considerar los factores que pueden influir en el desempeño y la durabilidad del cemento bajo condiciones extremas. Estos factores incluyen las condiciones operativas que puede presentar un pozo, como la temperatura, la presión y la composición de los fluidos encontrados. Por este motivo, deben realizarse pruebas de laboratorio que simulen dichas condiciones para poder determinar qué aditivos son los más adecuados para el diseño de lechada.

En la siguiente tabla se presenta la información recopilada como base de datos de los casos de estudio, en la que incluye los datos de temperatura, presión, composición de los fluidos, así como los equipos de laboratorio, herramientas y técnicas de cementación que se recomiendan utilizar en la operación basándose en los casos de estudios de Estados Unidos, México y Costa Rica.

Tabla 9 Base de datos de los casos de estudio a nivel mundial

País	Estados Unidos	México	Costa Rica
Temperatura °C (°F)	180 (356) <x	250 (482) <x	200 (392) <x
Presión Psi (MPa)	290 (1,99) < x <435 (2,99)	435 (2,99) < x <870 (5,99)	290 (1,99) < x <435 (2,99)

Técnica de cementación empleada	Casing cementing	Cementación dos etapas	Cementación dos etapas
Fluidos	Se pueden encontrar con la presencia de minerales disueltos, como sales, y gases como CO ₂ y H ₂ S.	Los fluidos presentan cloruro sódico, con un pH que varía entre los 5 y 8.	Se pueden encontrar con la presencia de minerales disueltos, como sales, y gases como CO ₂ y H ₂ S.
Equipos de Laboratorios	Unidad ultrasónica de cemento (UCA)	Consistómetro atmosférico	Consistómetro presurizado (HP/HT)
	Prensa filtro	Reómetro	Equipo de pruebas destructivas de cubos
Herramientas utilizadas en trabajo de cementación	Unidad de cementación sobre (patines, camiones o semirremolque)	Equipo de flotación	Válvulas
			Zapata
			Cuellos o Collares
Diseño de Lechada	<i>Cemento de fosfato de calcio (CaP)</i> Calcio	Cemento Portland Clase G Harina de Sílice Tierra Diatomea	<i>Lechada de cemento Liviana</i> Cemento G

	Aluminato	Retardadores *	H. Silica
	Cemento	Reductores de	Esferilita
	Cenizas volantes	Fricción*	Latex
	de tipo F	Bentonita	Bentonita
	Sodio		Static F
	Fosfato		
	<i>Cemento resistente al choque termico (TSRC)</i>		FP-6L
	Calcio		ASA-301L
	Aluminato		Ultra-7
	Cemento		CD-32L
	Cenizas volantes		R-21L
	de tipo F		Agua
	Sodio		
	Metasilicato		
	<i>Escoria activada con silicato de sodio (SSAS)</i>		
	Escoria		
	Silicato de sodio		

Nota. En esta tabla se recopilan los datos de Estados Unidos, México y Costa Rica. Fuente: Autores

Recomendación diseño de lechada de cemento para zonas geotérmicas en Colombia

En la actualidad se ha incrementado la demanda energética en todo el mundo, es por esto, que se ha buscado alternativas que ayuden a suplir esta necesidad y que tengan menor impacto ambiental que las fuentes de energía no renovable que se han venido implementando a lo largo de los años. Por lo que se ha buscado alternativas sostenibles que ayuden a mitigar el impacto ambiental y disminuir las huellas de carbono. Una de estas alternativas es la energía geotérmica ya que es una fuente renovable y sostenible que no emite gases de efecto invernadero reduciendo las afectaciones del medio ambiente (Vivas, 2021).

Colombia no se ha quedado atrás con el aumento de la demanda energética, sin embargo, este país ha optado a lo largo de los años por la disminución de impactos que afecten el medio ambiente ya que es un país que ha dependido históricamente de fuentes de energía renovables como lo es las hidroeléctricas, ya que esta representa una parte significativa en la matriz energética del país. No obstante, el cambio de clima constante y fenómenos ya conocidos comúnmente como el fenómeno de “El niño” se ha visto afectado el nivel de capacidad de generación de esta fuente de energía, lo que da como resultado a que aumente la dependencia de otras fuentes como lo es el carbón y el gas natural.

Optando por otra posibilidad de fuente de energía renovable es la energía geotérmica ya que como se ha explicado anteriormente es una energía que se obtiene del aprovechamiento del calor natural que está presente en el interior de la tierra. Este tipo de energía es considerada una energía inagotable a escala humana ya que el calor de la tierra se va renovando constantemente y

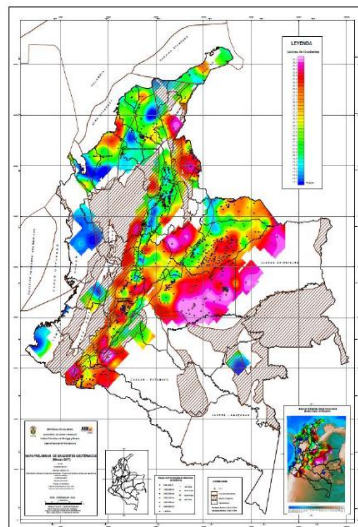
no depende de ningún otro factor, al contrario de otras fuentes de energía que, si dependen del clima, la geotérmica si puede producirse de manera continua.

Colombia tiene grandes potenciales geotérmicos que a lo largo de los años se han venido estudiando. Esto se remonta más o menos en los años 70 donde se realizaron los primeros estudios obteniendo dichos potenciales en el país y su ubicación para un óptimo desarrollo del recurso. Como resultado la Unidad de Planeación Minero Energética (UPME) presentó las distintas aplicaciones que podrían implementar Colombia y las tres zonas de interés.

Cabe aclarar que actualmente en Colombia se han llevado a cabo proyectos piloto como exploración de esta energía geotérmica para lo cual se ha incentivado el estudio e implementación de nuevas tecnologías para aplicar en el país y el desarrollo de esta energía en Colombia (Vivas, 2021).

Las tres zonas de interés son; Azufral, Cerro Negro y Tufiño, Paipa. El mapa preliminar dado por la ANH con estos potenciales geotérmicos se puede observar en la figura 29.

Figura 29. Mapa preliminar gradientes geotérmicos de Colombia



Nota. Alfaro, C., Jesus, R., Casallas, Y., Rodríguez, G., & Malo, J. (2020). ESTIMACIÓN PRELIMINAR DEL POTENCIAL GEOTÉRMICO DE COLOMBIA. Colombia: Servicio Geológico colombiano.

2.15. Importancia de la distribución del calor para la energía geotérmica

2.15.1. Zonas geotérmicas de alta actividad

Las regiones con alta actividad tectónica, como son los cinturones volcánicos y zonas de subducción, son ideales para el aprovechamiento de la energía geotérmica. Estas áreas cuentan con una gran cantidad de calor subterráneo debido a actividad volcánica y los movimientos tectónicos, lo que las convierte en lugares propensos para la perforación de pozos geotérmicos.

En este contexto, la distribución geográfica del calor influye directamente en la viabilidad de los proyectos geotérmicos, ya que los recursos disponibles son mucho mayores en estas zonas activas.

2.15.2. *La ubicación estratégica para Colombia*

Colombia, ubicada en el Cinturón de Fuego del Pacífico, está geográficamente bien posicionada para aprovechar los recursos geotérmicos debido a la alta actividad volcánica y tectónica en varias regiones del país. El país cuenta con una gran cantidad de volcanes, como, Complejo volcánico Chile-Cerro Negro, Volcán Azufral, Volcán Paipa, que forman parte de un sistema geotérmico que ofrece un gran potencial para el desarrollo de energía geotérmica.

En particular, Colombia cuenta con zonas al sur del país, donde se concentran fuentes termales y actividad volcánica, que podrían convertirse en importantes fuentes de energía. La distribución de calor en Colombia, especialmente en estas áreas geotérmicas activas, es un factor clave para el aprovechamiento eficiente de esta fuente de energía renovable.

2.16. Factores para considerar sobre la distribución del calor y su aprovechamiento geotérmico

En función de la distribución geográfica del calor, los países que se encuentran cerca de zonas de alta actividad tectónica tienden a tener una mayor disponibilidad del calor subterráneo. Esta capacidad geotérmica puede ser utilizada de manera sostenible para generar electricidad y calefacción, lo que resulta especialmente beneficioso en regiones con alta demanda energética.

La distribución de calor no solo afecta la cantidad de energía disponible, sino también la sostenibilidad a largo plazo de la fuente, las zonas con una distribución geotérmica estable y continua, como las zonas volcánicas activas, ofrecen un suministro constante de calor, lo que permite que la energía geotérmica sea una fuente de energía renovable confiable. Colombia, al estar en una zona de alta actividad volcánica, tiene un suministro potencial constante de energía, lo que la convierte en un recurso valioso para la matriz energética del país.

Figura 30. Puntos calientes en todo el mundo



Nota. En la imagen se puede observar que Colombia cuenta con gran cantidad de puntos calientes en los cuales se puede beneficiar de la energía geotérmica. Fuente: energyeducation.

2.17. Complejo volcánico Chiles – Cerro Negro

Figura 31. Ubicación, Complejo volcánico Chile-Cerro Negro



Nota. Ubicación en Colombia del complejo volcánico Chiles-Cerro Negro. Adaptado de Alfaro, Claudia; Rueda, Jesús; Casallas, Yenny; Rodríguez, Gina; Malo, Jaison. (2020) Estimación preliminar del potencial geotérmico de Colombia.

El Complejo Volcánico Chiles-Cerro Negro se ubica cerca al Municipio de Cumbal (Departamento de Nariño), en la frontera con Ecuador a 80 km al SW de San Juan de Pasto en las coordenadas 0,82°N y 77,93°W (volcán Chiles, VC) y 0,82°N – 77,95°W (Volcán Cerro Negro, VCN). El sistema geotérmico Tufiño-Chiles-Cerro Negro, es compartido con el vecino país Ecuador y reviste especial interés, entre otros aspectos, por el promisorio potencial de energía eléctrica en una planta planeada con capacidad instalada en exceso de 130 MW, que haría parte de colaboración entre las dos naciones en el marco del Proyecto Geotérmico Binacional Tufiño-Chiles-Cerro Negro (Alfaro et al, 2020).

Esta área geotérmica se identificó como propicia para la presencia de campos geotérmicos industriales, basándose en evidencias geológicas donde se destaca su avanzada evolución magmática, su reciente edad y la persistencia de actividad volcánica durante un largo periodo. También se destacan las importantes manifestaciones termales como manantiales, un cráter de explosión freática, y la presencia de un substrato de vulcanitas terciarias de gran espesor (Alfaro et al, 2020).

Durante el marco del Proyecto geotérmico Binacional Tufiño-Chiles-Cerro Negro, se llevó a cabo un estudio de prefactibilidad del área de 1800 km² (entre Ecuador y Colombia), los resultados de dicho estudio, desarrollo un modelo conceptual preliminar sugiriendo:

- Una anomalía térmica regional vinculada a un gradiente geotérmico de entre 36 y 50 °C/km.
- Intrusiones magmáticas superficiales que sirven como fuente de calor a profundidades de entre 3000 m (9842.5 ft) y 7000 m (22966 ft), relacionadas con los volcanes y estructuras del Valle Interandino.

- Una capa sello compuesta por productos volcánicos con alteración hidrotermal argílica intensa.
- Un reservorio geotérmico profundo con permeabilidad secundaria, a más de 1300 m de profundidad y temperatura estimada de 220 °C (428 °F) - 230 °C (446 °F) cerca del volcán Chiles.
- Un reservorio superficial a menos de 1000 m (3280,8 ft) de profundidad, con temperaturas alrededor de los 100 °C (212 °F).

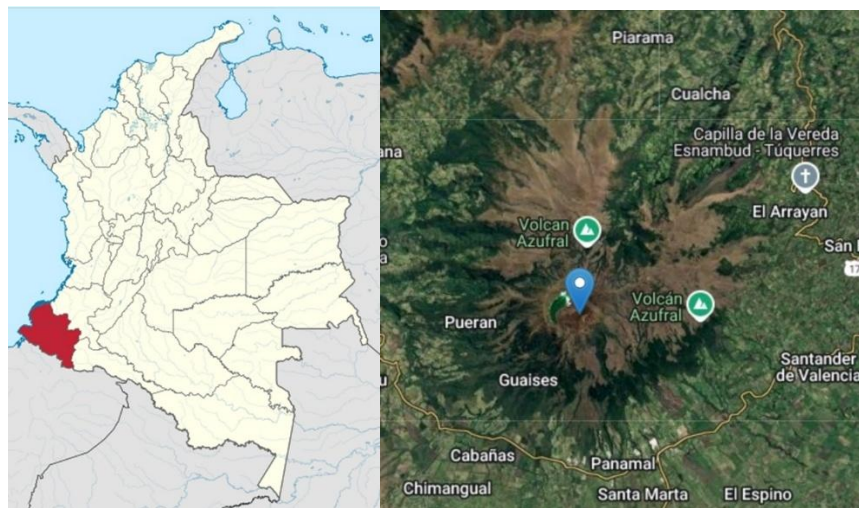
Figura 1 Complejo volcánico Chile-Cerro Negro



Nota. Complejo volcánico Chiles-Cerro Negro. Adaptado de Alfaro, Claudia; Rueda, Jesús; Casallas, Yenny; Rodriguez, Gina; Malo, Jaison. (2020) Estimación preliminar del potencial geotérmico de Colombia.

2.18. Volcán Azufral

Figura 32. Ubicación, Volcán Azufra



Nota. Ubicación en Colombia del volcán Azufra. Adaptado de Alfaro, Claudia; Rueda, Jesús; Casallas, Yenny; Rodríguez, Gina; Malo, Jaison. (2020) Estimación preliminar del potencial geotérmico de Colombia

El Volcán Azufra, anteriormente conocido como Chaitán, vecino a la población de Túquerres, se localiza al sur de la cadena volcánica en el sector suroriental del Departamento de Nariño a $1^{\circ} 05' N$ y $77^{\circ} 43' W$ y con una elevación de 4070 msnm. A este volcán se puede acceder por su parte baja por la carretera que conduce desde Túquerres hacia Samaniego; a unos 7 km de la primera ciudad se toma el desvío a mano izquierda y de ahí en adelante se continúa por la carretera hasta la cabaña de Corponariño (Alfaro et al, 2020).

El área geotérmica del volcán de Azufra también fue reconocida como propicia para el desarrollo de campos geotérmicos industriales, según estudios de exploración. Los elementos geológicos que respaldan esta identificación incluyen su reciente edad, la prolongada actividad

volcánica, la evolución, magmática completa, la presencia de cráteres formados por exposiciones freáticas dentro de la caldera, actividad fumarólica activa y diversas manifestaciones hidrotermales, así como un sustrato compuesto por vulcanitas terciarias y la evidencia de un acuífero de alta temperatura. Además, se identificaron importantes características de interés geotérmico a través de la caracterización de la alteración hidrotermal en esta área, que sirvieron como base para desarrollar el primer modelo conceptual del sistema geotérmico de alta entalpia, sugiriendo un reservorio potencial de alrededor de 250°C (482 °F), situado entre la zona fílica-propilitica y una capa sello formada por las zonas hidrotermales fílica y argílica (Alfaro et al2020).

El Servicio Geológico Colombiano realizó estudios en el área geotérmica, de prefactibilidad en etapa temprana, permitiendo formular un modelo conceptual preliminar, basados en trabajos de exploración geológica, geofísica y geoquímica de fluidos. Proponiendo:

- ✓ Una fuente de calor por debajo de 4000 m (13123,4 ft).
- ✓ Un reservorio con temperatura entre 250 °C (482 °F) y 280 °C (536 °F) a unos 2000 m (6561,7 ft) de profundidad, posiblemente hospedado en ignimbritas o lavas.
- ✓ Una capa sello conformada por depósitos de flujos piroclásticos y oleadas alterados hidrotermalmente.

Figura 33. Volcán Azufral



Nota. Volcán Azufral. Adaptado de Alfaro, Claudia; Rueda, Jesús; Casallas, Genny; Rodríguez, Gina; Malo, Jaison. (2020) Estimación preliminar del potencial geotérmico de Colombia.

2.19. Volcán de Paipa

Figura 34. Ubicación, volcán de Paipa



Nota. Ubicación en Colombia del volcán de Paipa. Adaptado de Alfaro, Claudia; Rueda, Jesús; Casallas, Yenny; Rodríguez, Gina; Malo, Jaison. (2020) Estimación preliminar del potencial geotérmico de Colombia

El sistema geotérmico de Paipa se localiza en el Departamento de Boyacá, al sur del municipio de Paipa, cubriendo un área de aproximadamente 110 km². Geográficamente, este sistema se encuentra en la Cordillera Oriental limitada al sur por el anticlinal Tibasosa-Toledo, al norte por el río Chicamocha, al este por la elevación de Alto de los Godos y el Pantano de Vargas, y al oeste por el Alto Los Volcanes (Alfaro et al, 2020).

Se han propuestos diversos modelos conceptuales para esta área geotérmica, basada en estudios de exploración parciales, principalmente geológicos y geoquímicos. Según el modelo conceptual descriptivo más reciente, en el cual integra los estudios de exploración tanto de superficie como de subsuperficie (geología, geofísica de campos potenciales, magnetoteléfrica y geoquímica) realizados por el Servicio Geológico Colombiano, el sistema geotérmico de Paipa, situado en el entorno sedimentario de la Cordillera Oriental (Alfaro et al, 2020), pero vinculado a un volcán del mismo nombre, se definieron los siguientes rasgos:

- Un reservorio con temperatura alrededor de 230°C (446 °F), hospedado en rocas del basamento y otro más somero en rocas sedimentarias de la formación Une.
- Una fuente de calor magmática probablemente asociada a intrusiones como las que subyacen dos complejos de domos riolíticos, algunas de ellas posiblemente con desgasificación actual.
- Capa sello conformada por niveles arcillosos presentes en la secuencia sedimentaria y dos zonas de descarga en los sectores llamados ITP-Lanceros y El Batán.

- El fluido geotérmico experimenta mezclas que enmascaran su composición, en particular con un circuito de agua salada (sulfatada sódica) que cambia completamente la firma química del agua del reservorio.

Figura 35. Volcán de Paipa



Nota. Volcán de Paipa. Adaptado de Alfaro, Claudia; Rueda, Jesús; Casallas, Yenny; Rodríguez, Gina; Malo, Jaison. (2020) Estimación preliminar del potencial geotérmico de Colombia

Tabla 10 Datos recopilados de zonas potencialmente geotérmicas de Colombia

Volcán	Temperatura Estimada °C (°F)	Profundidad Estimada m (fts)	Composición de los manantiales termales de la zona	Clasificación de reservorios geotérmicos (Por Entalpía)
Complejo volcánico Chiles – Cerro Negro	220 (428) - 230 (446)	>1300 (4265)	Aguas Hediondas con temperatura de descarga de 55 °C, pH ácido y fuerte descarga de H ₂ S	Alta Entalpía
Azufral	250 (482)- 280 (536)	>2000 (6561,7)	Hidrotermales con descarga de fluidos de pH ácido y alteración hidrotermal argílica avanzada	Alta Entalpía
Paipa	230 (446)	>2000 (6561,7)	El fluido presenta un circuito de agua salada (sulfatada sódica) que cambia	Alta Entalpía

			completamente la firma química del agua del reservorio	
--	--	--	--	--

Nota. En esta tabla se describe datos recopilados de las zonas potencialmente geotérmicas de Colombia; Fuente: Autores

Teniendo en cuenta los casos de estudios a nivel mundial descritos anteriormente y la información consolidada de los potenciales geotérmicos de Colombia, se recomendará un diseño de lechada general ya que estos diseños deben ser específicos para cada formación. A continuación, se evidenciará en una tabla todos los datos para tener en cuenta de cada país seleccionado como casos de estudio, su técnica de lechada, datos principales e importantes como profundidades, presión, temperaturas y diseños de lechadas.

A manera general se deben tener en cuenta aspectos al momento de diseñar la lechada de cemento para cada uno de los pozos. Los pozos geotérmicos en Colombia confrontan temperaturas altas y fluidos que están presente en el yacimiento por lo cual es importante contar con propiedades resistentes a la corrosión.

Otro factor crucial son los aditivos ya que se deben aplicar aditivos que incremente la estabilidad química y la viscosidad. Algunos de ellos son los retardarles de fraguado, agentes de pérdidas de filtrado y demás. La densidad de la lechada para pozos geotérmicos es crucial puesto que se debe asegurar una cementación uniforme del espacio anular.

Para el diseño de lechada de cemento para la zona geotérmica de complejo volcánico Chile-Cerro Negro es importante considerar la características mecánicas y térmicas adecuadas. Por lo cual se recomienda el uso de lechadas de baja densidad (lechada liviana, caso de estudio

Costa Rica), con densidades que logren alcanzar resistencia a la compresión, agentes controladores de filtrado para controlar el riesgo de pérdida de circulación, la harina de sílice que evita el retroceso a la resistencia en temperaturas altas y mejorar la resistencia térmica.

Para la zona geotérmica de Azufral es recomendable utilizar el cemento de fosfato de calcio (*CaP*) ya que es utilizado principalmente en zonas de alta temperatura y también cuando se requiere tener una alta resistencia inicial o una resistencia moderada a los ácidos. El cemento *CaP* está diseñado para ambientes ligeramente ácidos ($pH - 5$) y con ambientes ricos en CO_2 . Además, tiene un rendimiento eficaz en este entorno específico, el cemento *CaP* puede aumentar la aplicabilidad en los campos al mejorar propiedades como la capacidad de bombeo, densidad, durabilidad de la unión, y temas de costo.

Se propone el diseño de lechada para el Volcán de Paipa, el diseño del caso de estudio México ya que tienen una composición geológica similar donde los reservorios presentan fases mixtas junto con salmueras. La incorporación de la harina sílice puede proteger el centro de la corrosión de la salmuera. Además, el uso de extensores (perlita, tierra diatomeas) y aditivos de pérdida de circulación reduce el riesgo de fracturas durante la cementación manteniendo la estabilidad del pozo y reduciendo costos ya que no se necesitaría una cementación remedial.

Es importante mencionar que todos los equipos de cementación utilizados en pozos geotérmicos y pozos convencionales tienen principios básicos, es decir, que el diseño y el funcionamiento son similares. La diferencia está en los desafíos que enfrentan los pozos geotérmicos ya que las condiciones extremas requieren adaptaciones. Este tipo de condiciones (temperaturas, presiones altas y la presencia de fluidos corrosivos) exigen materiales y tecnologías avanzadas, como aleaciones resistentes a la corrosión y recubrimientos especiales. Además, diseños óptimos que aseguren la integridad estructural del pozo (Nelson, 1990)

Tabla 11 Recomendación para el diseño de lechada de cemento para las zonas geotérmicas de Colombia

Volcán	Complejo volcánico Chiles -Cerro Negro	Azufral	Paipa
Temperatura Estimada °C (°F)	220 (428)–230 (446)	250 (482)–280 (536)	220 (428)–230 (446)
Profundidad Estimada m (ft)	>1300 (4265)	>2000 (6561,7)	>2000 (6561,7)
Composición de los manantiales termales de la zona	Aguas Hediondas con temperatura de descarga de 55 °C (131 °F), pH ácido y fuerte descarga de H ₂ S	Hidrotermales con descarga de fluidos de pH ácido y alteración hidrotermal argílica avanzada	El fluido presenta un circuito de agua salada (sulfatada sódica) que cambia completamente la firma química del agua del reservorio
Técnica de cementación recomendable	Casing cementing	Casing cementing	Casing cementing

Diseño de lechada recomendable	Cemento clase G	Cemento de fosfato	Cemento Portland
	Harina de Sílice	de calcio	Clase G
	Esferilita	Calcio	Harina de sílice
	Latex	Aluminato	Tierra Diatomeas
	Bentonita	Cemento	Bentonita
	Retardadores	Cenizas volantes de tipo	Retardadores
	Dispersantes	F	Reductores de fricción
	Control perdida de filtrado	Sodio	
	Antiespumantes	Fosfato	

Nota. En esta tabla recomendamos los materiales para el diseño de lechada en las zonas potencialmente geotérmicas de Colombia.

Conclusiones

- ✓ El desarrollo de este trabajo ha dado lugar a la investigación de casos de éxito en todo el mundo. La creación de la base de datos de diseños de lechada para pozos geotérmicos permite identificar los principales parámetros que afectan al diseño de lechadas de cementación. Factores críticos como lo son la presión, la temperatura y la composición de los fluidos geotérmicos, los cuales se resumen en la tabla 9 (Base de datos de los casos de estudio a nivel mundial) son clave en la selección de materiales y técnicas de cementación bajo las diversas condiciones que presentan estos pozos para garantizar la estabilidad de las lechadas y la vida útil de los pozos geotérmicos.
- ✓ En los casos de estudio de Estados Unidos, México y Costa Rica, el uso predominante del cemento portland clase G con aditivos como la harina de sílice, perlita, cenizas volantes, escoria de alto horno ha demostrado gran efectividad en la resistencia a la compresión, ofreciendo una estabilidad térmica y durabilidad del cemento. Esto ayuda a la elección óptima de materiales para el diseño de lechada.
- ✓ Es clave la selección adecuada de herramientas y técnicas de cementación para asegurar la integridad de los pozos geotérmicos de alta entalpía. La descripción a detalle de las herramientas aplicadas en campo y los equipos de laboratorio que simulan el comportamiento de la lechada en condiciones del pozo, proporciona un marco práctico para la aplicación en Colombia. A nivel mundial, destacan los métodos descritos en la sección 3.8 sobre técnicas de cementación, como la cementación en dos etapas, puesto que ha demostrado ser efectiva. Sin embargo, la técnica de cementación de casing cementing ofrece ventajas operativas y económicas,

especialmente en pozos con condiciones geotérmicas complejas. Este tipo de técnicas se pueden adaptar a las condiciones locales, donde pueden aportar eficiencia y reducir el riesgo de fallos.

- ✓ El diseño de lechada para pozos geotérmicos debe basarse en una combinación estratégica de las mejores prácticas internacionales para los pozos geotérmicos colombianos. En consecuencia, la base de datos de casos de estudio de países como Estados Unidos, México y Costa Rica ofrecen una información valiosa en cuanto a la elección de los materiales y aditivos para la lechada del cemento. Las proporciones de agua y aditivos deben adaptarse según las características específicas de cada zona potencialmente geotérmica ya que hay que tener en cuenta factores importantes como la salinidad y condiciones locales de temperatura y presión del reservorio.
- ✓ El diseño de lechada para pozos geotérmicos de alta entalpía en Colombia debe basarse en las condiciones operacionales específicas de cada yacimiento, teniendo en cuenta, como se ha mencionado anteriormente la alta temperatura, presión y el tipo de fluido. El diseño de Costa Rica y Estados Unidos está optimizado para soportar las condiciones extremas de alta temperatura y presión de los complejos volcánicos como Chile- Cerro Negro y el Volcán Azufraal puesto que aplican para las condiciones estimadas de alta temperatura y reservorios profundos. Por otro lado, el diseño de México puede ser aplicado para el Volcán de Paipa donde se espera encontrar reservorios mixtos con vapor y agua, esto con el fin de mejorar la resistencia química frente a los fluidos corrosivos y mantener una estabilidad térmica, lo anterior se encuentra descrito en la tabla 11. Se recomienda el uso de cemento Portland clase G con aditivos anticorrosivos y estabilizantes térmicos como lo es la harina de sílice,

cenizas volantes para garantizar un aislamiento zonal efectivo, una mayor vida útil de los pozos y una minimización de operaciones remediales.

Recomendaciones

Al momento de seleccionar los aditivos a utilizar en el diseño de lechada, se debe certificar que estos cuiden el entorno ambiental de las zonas cercanas minimizando cualquier posible efecto adverso sobre las aguas subterráneas y otros recursos naturales.

Se recomienda ampliar la base de datos de diseños de lechada para pozos geotérmicos de alta entalpía por medio de la inclusión de otros casos de estudio exitosos a nivel mundial. Esto permitirá obtener una mayor variedad de enfoques y soluciones aplicadas en diferentes condiciones geotérmicas, lo cual ofrecerá una base de datos más sólida y diversificada para diseñar lechadas adaptadas a las particularidades de los yacimientos geotérmicos en Colombia.

Se recomienda la ejecución de pruebas de las lechadas seleccionadas a escala de laboratorio en condiciones simuladas de alta temperatura y presión que reflejen con mayor precisión las características de las zonas potencialmente geotérmicas de Colombia. Estas pruebas permitirán evaluar la durabilidad de las lechadas en un entorno controlado, identificando posibles problemas antes de la aplicación en campo.

Referencias Bibliográficas

- Alfaro, C., Jesus, R., Casallas, Y., Rodriguez, G., & Malo, J. (2020). *ESTIMACIÓN PRELIMINAR DEL POTENCIAL GEOTÉRMICO DE COLOMBIA*. Colombia: Servicio Geologico colombiano.
- Anaya Durán, G., & Sánchez Bermúdez, J. A. (2024). *Tecnologías y configuraciones de completamiento de pozos usados en yacimientos geotérmicos* [Tesis de Pregrado, Universidad Industrial de Santander].
<https://noesis.uis.edu.co/server/api/core/bitstreams/1f026752-48aa-468d-933a-01cf189738c9/content>
- Arellano, V., Barragan, R., Aragon, A., Izquierdo, G., Portugal, E., Rodriguez, M., & Perez, A. (2009). *Características y principales procesos en el area Cerro Prieto 4*. México: Instituto de Investigaciones Eléctricas, Comisión Federal de Electricidad.
- Aza, J., & Mendoza, M. (2014). *ANÁLISIS TÉCNICO DE LA CEMENTACIÓN DEL REVESTIDOR SUPERFICIAL DE POZOS PETROLEROS DEL CENTRO ORIENTE, SEPTIEMBRE 2013*. Ecuador: Universidad Central del Ecuador.
- Barajas Paredes, S. F., & Otero Anaya, D. J. (2022). *Efecto de la temperatura en la adherencia y resistencia a la compresión del cemento de pozo geotérmico* [Tesis de Pregrado, Universidad Industrial de Santander].
<https://noesis.uis.edu.co/server/api/core/bitstreams/7339198e-b4ab-4071-8ab3-99f28578de2d/content>

- Bergen, S., Zemberekci, L., & Duddukuri, S. (2022). A review of conventional and alternative cementitious materials for geothermal wells. *ELSEVIER*.
- Cancino, O. P. (15 de 09 de 2019). Conferencia para el planteamiento del tema y plan de trabajos de grado en ingenierías. Bucaramanga.
- Cebreros, M., Perez, F., & Pelayo, A. (2017). Degradación de cemento en el campo geotérmico de Cerro Prieto. *Revista Geotermia*, Vol. 30(1).
<https://www.geotermia.org.mx/app/assets/media/2017/11/Geotermia-Vol30-1.pdf#page=6>
- CEMENTACIONES*. (2020, 19 marzo). [Diapositivas; Digital].
<https://chontalpa.tecnm.mx/Cementaciones2021.pdf>
- Chiaramonte, L. (2022). *Cerro Prieto Geothermal Field*. Estados Unidos: Ciencia Geotérmica, Inc. EGS Consulting, Inc.
- COMALCALCO. (2020). *CEMENTACIONES*. Tabasco.
- Comisión Federal de Electricidad. (s. f.). *50 años de la central geotermoeléctrica Cerro Prieto* [Vídeo]. YouTube. https://www.youtube.com/watch?v=BbjhHYN_-AE
- Cruz, F. (2017). *Evaluación de desempeño de dos diseños de lechadas de cemento para sistemas de recuperación térmica en el Campo Chichimene ubicado en la cuenca de los Llanos Orientales*. México: Instituto Politécnico Nacional.
- Delgado, D., & Juárez, R. (2014). *Procesos de perforacion y terminacion de pozos geotermicos*. México: Universidad Nacional Autónoma de México.
- Dominguez Aguirre, B., Sanchez Garcia, G., & Comisión Federal de Electricidad de México. (s. f.). Geothermal drilling in Cerro Prieto. En *OSTI*.
<https://www.osti.gov/servlets/purl/886089>

- Ganó, J., Lee, D., Na, K., Lee, I.-M., & Choi, H. (2015). Propiedades físicas del cemento clase G para la cementación de pozos geotérmicos en Corea del Sur. *ELSEVIER*, 123-131.
- Garman, D. (2003). *La energía geotérmica en la actualidad*. U.S Department of Energy.
- Gaurina, N., Davorin, M., & Gracijan, K. (1994). *CEMENT SLURRIES FOR GEOTHERMAL WELLS CEMENTING*. Croacia: Rudarsko-geološko-naftni zbornik .
- Google Books. (s. f.).
<https://www.google.com.co/books/edition/Proceedings/zMdaivVx94C?hl=es-419&gbpv=1&dq=perforaci%C3%B3n+y+cementaci%C3%B3n+de+cerro+prieto&pg=PA1485&printsec=frontcover>
- Gomez, L., & Tarquino, K. (2018). *DISEÑO DE UNA LECHADA DE CEMENTO ESPUMADO, COMO BASE PARA UNA CEMENTACIÓN PRIMARIA, PARA YACIMIENTOS CON BAJOS GRADIENTES DE FRACTURA*. Colombia: FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA FACULTAD DE INGENIERÍAS PROGRAMA DE INGENIERÍA DE PETRÓLEOS.
- Guiza, J. (1977). *Problemas en la operación de los pozos geotérmicos de Cerro Prieto*. México: Organización Latinoamericana de Energía.
- Jorquera, C. (2018). *La central geotérmica Velika Ciglena de 17,5 MW comienza a funcionar en Croacia*. Croacia: PIENSA EN GEOTERMIA .
- Kiprotich, E. (2010). *GEOTHERMAL WELL CEMENTING, MATERIALS AND PLACEMENT TECHNIQUES*. Islandia: United Nations University.
- Krause, R. F. (s. f.). Durability of various cements in a well of the Cerro Prieto geothermal field. En *OTIS*. <https://www.osti.gov/biblio/890508>

- Kruszewski, M., & Wittig, V. (2018). Review of failure modes in supercritical geothermal drilling projects. *Geothermal Energy*. <https://doi.org/10.1186/s40517-018-0113-4>
- Lobo, M. (2023). *Diseño de lechadas livianas de cemento para pozos geotérmicos*. Costa Rica: ESCUELA DE INGENIERÍA EN CONSTRUCCIÓN.
- Mathew, S., Janice, L., Peters, B., Spielman, P., Jonhl, A., & Nguyen, H. (2019). *Successful Well Design and Remedial Cementing By Top Squeeze Method at Steamboat, NV, USA*. Estados Unidos : Halliburton, Bakersfield CA.
- Morgado, P. (2009). *Construcción y perforación de pozos geotérmicos en el área de Cerro Prieto Mexicali (Baja California)*. México: Intituto Politecnico Nacional, Escuela Superior de Ingenieria y Arquitectura .
- Nelson, E. B. (1990). *Well cementing*. Nueva York: Elsevier.
- Pyatina, T., & Sugama, T. (2020). Cements with supplementary cementitious materials for hightemperature geothermal wells. *Geothermics*, 86, 101840. <https://doi.org/10.1016/J.GEOTHERMICS.2020.101840>
- Ramos, J., Jimenez, P., Palencia, D., & Polanco, L. (2014). *Evaluación de desempeño de dos diseños de lechadas de cemento para sistemas de recuperación térmica en el Campo Chichimene ubicado en la cuenca de los Llanos Orientales*. Colombia: Fundacion Universidad de América.
- S. Moeck, I. S. M. (2014). Catalog of geothermal play types based on geologic controls. *ScienceDirect*, 2014. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032114003578?via%3Dihub>

- Salim, P., & Amani, M. (2013). Principal Points in Cementing Geothermal Wells. *Advances In Petroleum Exploration And Development*, 5(1), 77-91.
<https://doi.org/10.3968/j.aped.1925543820130501.1145>
- Soto Sanchez, C. (1992). *Técnicas para el manejo, control y solución de las pérdidas de circulación durante la perforación de pozos geotérmicos* [Tesis de Pregrado, Universidad Nacional Autónoma de México].
<https://ru.dgb.unam.mx/bitstream/20.500.14330/TES01000184094/3/0184094.pdf>
- Universidad Industrial de Santander. (05 de 06 de 2020). www.uis.edu.co. Obtenido de http://tangara.uis.edu.co/biblioweb/pags/pub/informacion/info_enlaces.jsp?cod_subgrupo=97
- Vivas, C. (2021). *Caracterización de pozos petroleros aprovechables para la producción de energía geotérmica*. Colombia: Fundacion Universidad de America.
- Xueling, Z., Xueqi, W., Feng, Z., Jia, W., Dan, L., & Anlin, G. (2024). *Sistema de lechada de cemento de cementación de pozos de alta conductividad térmica resistente a la temperatura adecuado para pozos geotérmicos y métodos de preparación del sistema de lechada de cemento de cementación de pozos*. China: Espacenet.
- Zuleta Gean, V. J. (2022). *Evaluación de yacimientos prospectos para la producción de energía geotérmica*. UIS, Escuela de Ingenieria de Petroleos.