



Programa Regional de Entrenamiento Geotérmico (PREG)

Diplomado de Especialización en Geotermia

Universidad de El Salvador  
Facultad de Ingeniería y Arquitectura  
Unidad de Postgrados

LaGeo



**Proyecto:**

**Propuestas de Diseño para la Perforación de Pozos  
Exploratorios.**

**Tutor:**

Ing. Herbert Mayorga

**Presentado por:**

Luis Fernando Alberto Parada  
Carlos Cajas Maldonado  
Medardo José Orellana Mejía  
Edwin Taco Tenelanda

30 de Octubre del 2015

## Índice

1- Resumen .....	1
2- Introducción.....	2
2.1 Objetivos Del Proyecto .....	3
2.1.1 Objetivo General .....	3
2.1.2 Objetivo Especificos.....	3
3- Marco metodológico de sistemas de perforación .....	4
3.1 Exploración geocientifica.....	4
3.1.1 Metodologías de exploración.....	5
3.1.2 Geología e hidrología .....	5
3.1.3 Geoquímica .....	5
3.1.4 Geofísica .....	6
3.1.5 Interpretación .....	6
3.2 Exploración profunda.....	7
3.2.1 Consideraciones para ubicación de pozo geotérmico exploratorio .....	7
3.2.2 Tipos de pozos geotérmicos exploratorios.....	8
3.2.3 Costos de perforación geotérmica.....	8
3.2.4 equipos de perforación geotérmica .....	9
3.3 Obra civil necesaria .....	11
3.3.1 Adecuación de plataformas .....	11
3.3.2 Trabajos previos para la instalación de equipos.....	12
3.3.3 Campamentos e instalaciones .....	12
3.3.4 Construcción de piscinas de depósito .....	13
3.3.5 Tratamiento de lodos .....	14
3.3.6 Caminos y accesos.....	14
3.4 Medio ambiente.....	14
3.4.1 Estudio de impacto ambiental (EIA) .....	15
3.4.2 Antecedentes en la geotermia .....	15
3.4.3 Determinación del área del proyecto .....	16
3.4.4 Posibles impactos producidos por la energía geotérmica.....	16
4- Diseño de pozos.....	20

4.1	Conceptos básicos .....	20
4.1.1	Planificación de diseño y actividades para la perforación.....	20
4.1.2	Condiciones de zona de estudio.....	25
4.2	Primer caso: pozo de diámetro convencional .....	28
4.2.1	Perfil de pozo y selección de materiales .....	28
4.2.2	Fluidos de perforación.....	32
4.2.3	Cementación.....	36
4.3	Segundo caso: pozo Slim Hole.....	37
4.3.1	Perfil del pozo y selección de materiales .....	37
4.3.2	Fluidos de perforación.....	40
4.3.3	Cementación.....	43
5-	Programación de perforación de pozo convencional exploratorio y Slim Hole.....	45
5.1	Pozo exploratorio convencional. ....	45
5.1.1	Secuencia y descripción del programa de trabajo .....	45
5.2	Pozo exploratorio Slim Hole .....	48
5.2.1	Secuencia Y Descripción Del Programa De Trabajo .....	48
6-	Pruebas y mediciones en pozos exploratorios .....	51
6.1	Pruebas en pozos .....	51
6.1.1	Pruebas dinámicas .....	52
6.1.2	Pruebas de temperatura y presión. ....	52
6.1.3	Pruebas de formación .....	53
6.1.4	Prueba de inyectividad .....	54
6.1.5	Pruebas estáticas.....	54
6.1.6	Pruebas de productividad del pozo .....	54
6.1.7	Muestreo y análisis de los fluidos del reservorio .....	55
7-	Presupuesto para cada una de las propuestas en perforación de pozos exploratorios geotérmicos ....	56
7.1	Costo del servicio del equipo de perforación.....	56
7.2	Costo del servicio de cementación .....	59
7.3	Costos por servicios de registros de pozos .....	62
7.4	Costo de materiales de perforación.....	63
7.4.1	Materiales de perforación para un pozo convencional .....	63
7.4.2	Materiales de perforación para un pozo Slim Hole.....	64

7.5 Resumen de costos de perforación para un pozo exploratorio convencional .....	65
7.6 Resumen costos perforación Slim Hole.....	67
8- Conclusiones y Recomendaciones .....	69
8.1 Conclusiones .....	69
8.2 Recomendaciones.....	70
9- Bibliografía.....	71
10- Anexos .....	72
Anexo A.....	72
A.1 Calculo de cementaciones .....	72
A.1.1 Volumen de lechada para cementación.....	72
A.1.2 Cantidades de agua, cemento, sílice y aditivos .....	76
A.1.3 Cementación segunda propuesta: pozo tipo Slim Hole.....	77
Anexos B.....	79

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Torre de extracción de núcleos continuos. ....	10
Figura 2. Torre de perforación rotatoria, mástil de aproximadamente 55 m de altura. ....	10
Figura 3. Muestra de un área de plataforma. ....	13
Figura 4. Modelo Conceptual para primer caso de Estudio. En esta figura se detalla la geología esperada y la capa sello del Reservorio. El pozo planteado busca encontrar la falla que atraviesa la capa sello del reservorio. ....	26
Figura 5. Perfil esperado de pozo de exploración planteado en el primer caso. Se detallan las etapas empleadas desde el nivel 0 hasta alcanzar los 1550 m de profundidad. ....	29
Figura 6. Perfil esperado de pozo de exploración planteado para el segundo caso. Se detallan las etapas empleadas desde el nivel 0 hasta alcanzar los 1550 m de profundidad. ....	38
Figura 7. Equipo para Registro de Temperatura. ....	53
Figura 8. Silenciador portátil para descarga del pozo. ....	55
Figura 9. Tiempo de Perforación. ....	58
Figura 10. Costos de equipo de perforación. ....	59
Figura 11. Gasto de cemento y sílice. ....	61
Figura 12. Comparación costo servicio de cementación. ....	62
Figura 13. Costo comparativo. ....	65
Figura 14. Perfil de un pozo cementado. ....	73

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Diámetros de Agujero y Tuberías según la profundidad del pozo. Características de la tubería a emplearse.....	29
Tabla 2. Datos de duración y velocidad de avance de barrenas. ....	30
Tabla 3. Diámetro de tuberías seleccionado por etapa, características de la tubería y tipos de junta. ....	31
Tabla 4. Accesorios y materiales requeridos para el completamiento de pozo propuesto.....	31
Tabla 5. Propiedades fisicoquímicas a obtener con el fluido de perforación en la Etapa I .....	33
Tabla 6. Propiedades fisicoquímicas a obtener con el fluido de perforación en la Etapa II. ....	33
Tabla 7. Propiedades fisicoquímicas a obtener con el fluido de perforación en la Etapa III. ....	34
Tabla 8. Volumen estimado para la perforación de la Etapa I. Para el cálculo se considera el diámetro del agujero de 17½” y la profundidad de 100m. ....	34
Tabla 9. Volumen estimado para la perforación de la Etapa II. Para el cálculo se considera el diámetro del agujero de 12¼” y la profundidad de 500m y el volumen contenido por el casing de 13⅜” de la primera etapa. ....	35
Tabla 10. Volumen estimado para la perforación de la Etapa III. Para el cálculo se considera el diámetro del agujero de 8 1/2” y la profundidad de 450m y el volumen contenido por el casing de 9⅝” de la segunda etapa. ....	35
Tabla 11. Cantidades totales de productos en toneladas requeridos para la perforación total del pozo. ....	35
Tabla 12. Materiales y cantidades requeridas para cementación de pozo de diámetro convencional. ....	36
Tabla 13. Diámetros de agujero y tuberías de acuerdo a la profundidad del pozo. Características de la tubería a emplearse. ....	37
Tabla 14. Datos de duración y avances de barrenas. ....	39
Tabla 15. Diámetro de tuberías seleccionado por etapa, características de la tubería y tipos de juntas. ....	39
Tabla 16. Accesorios y materiales requeridos para implementación de pozo propuesto. ....	40
Tabla 17. Propiedades fisicoquímicas a obtener con el fluido de perforación en la Etapa I. ....	41
Tabla 18. Propiedades fisicoquímicas a obtener con el fluido de perforación en la Etapa II. ....	41
Tabla 19. Volumen estimado para perforación de la etapa I.....	42
Tabla 20. Volumen estimado para perforación de la etapa II. ....	42
Tabla 21. Volumen estimado para perforación de la etapa III. ....	42
Tabla 22. Cantidades totales de productos en sacos o barriles requeridos para la perforación total del pozo.....	43
Tabla 23. Materiales y cantidades requeridas para la cementación de un pozo tipo Slim Hole. ....	44
Tabla 24. Descripción de parámetros para perforación de pozo convencional. ....	45
Tabla 25. Programa de perforación de pozo convencional, tiempos de ejecución estimados para cada actividad a desarrollar para perforación de la propuesta de pozo convencional. ....	46
Tabla 26. Descripción de parámetros para perforación de pozo Slim Hole. ....	49
Tabla 27. Programa de perforación de pozo Slim Hole, tiempos de ejecución estimados para cada actividad a desarrollar para perforación de la propuesta de pozo Slim Hole.....	49
Tabla 28. Se puede ver costo de perforación para un pozo convencional a una profundidad de 1550 metros con un diámetro final 5 ½” el equipo de perforación tiene una capacidad de 1200BHP.....	57

Tabla 29. Costo de perforación para un pozo Slim Hole a una profundidad de 1550 metros con un diámetro final 3 ½” el equipo de perforación tiene una capacidad de 800BHP. ....	58
Tabla 30. Costo de servicio de cementación pozo convencional .....	60
Tabla 31. Costo de servicio de cementación pozo Slim Hole. ....	61
Tabla 32. Costo servicio de Registros en pozo convencional. ....	63
Tabla 33. Costo servicio de Registros en pozo Slim Hole. ....	63
Tabla 34. Materiales para perforación de pozo convencional. ....	64
Tabla 35. Materiales para perforación pozo Slim Hole. ....	64
Tabla 36. Presupuesto para perforación diámetro convencional diámetro 5 1/2". ....	66
Tabla 37. Presupuesto para perforación de Slim Hole diámetro 3 1/2". ....	67
Tabla 38. Cálculo de cementación de la Etapa I del primer caso de estudio: Pozo exploratorio de diámetro convencional. ....	74
Tabla 39. Cálculo de cementación de la Etapa II del primer caso de estudio: Pozo exploratorio de diámetro convencional. ....	75
Tabla 40. Cálculo de cementación de la Etapa III del primer caso de estudio: Pozo exploratorio de diámetro convencional. ....	76
Tabla 41. Cálculos de cementación de la Etapa I del segundo caso: pozo tipo Slim Hole. ....	77
Tabla 42. Cálculos de cementación de la Etapa II del segundo caso: pozo tipo Slim Hole. ....	78
Tabla 43. Desglose de costo de materiales de perforación para un pozo convencional. ....	79
Tabla 44. Desglose de costo de materiales de perforación para un pozo Slim Hole. ....	80

## 1- RESUMEN

El proyecto consiste en dos propuestas de diseño de pozos verticales que se pueden realizar en fase de exploración profunda. El pozo de exploración de diámetro convencional con casing de 5 ½" en el fondo, y el segundo un pozo de tipo Slim Hole con un diámetro de casing HQ de 3 ½" en el fondo.

El documento muestra los materiales requeridos para estos pozos como son: tipos de tuberías para revestimiento, tipos de barrenas requeridas, accesorios para perforación; también se presenta las cantidades requeridas de fluidos de perforación, entre materiales y aditivos, y los volúmenes requeridos de cementación para el anclaje y revestimiento del pozo.

Al final del documento, se detalla un programa de perforación, un presupuesto general de perforación y una serie de pruebas que comúnmente son realizadas en esta etapa de exploración dependiendo del pozo y que información se requiere coleccionar.

## 2- INTRODUCCIÓN

La perforación de pozos exploratorios es considerada un punto de inflexión para el Proceso de ejecución de un Proyecto Geotérmico, que el desarrollo del campo geotérmico, está asociado a la confirmación de la información obtenida en los Estudios Geocientíficos; debido a que este suceso marca un incremento de las inversiones necesarias en el Proyecto, y la ejecución del desarrollo del campo geotérmico está asociada al resultado de los pozos exploratorios. En el caso de tener buen suceso y resultados en la perforación exploratoria y conocerse las condiciones del campo geotérmico y a la actualización de modelos geocientíficos; se disminuyen considerablemente los riesgos que conllevan los altos de inversión de la perforación exploratoria.

El nivel de inversión dependerá de la tecnología utilizada para la perforación, debido a que de ésta dependerá el costo de la perforación. Por lo anterior se presentan dos propuestas de diseño de perforación de pozos exploratorios (un pozo de diámetro comercial y uno del tipo Slim Hole). Se ha supuesto que se explorará en un campo geotérmico ubicado en América del Sur en una zona semi remota, con temperaturas del Recurso de 250°C y una profundidad del Recurso esperada entre los 1000-1500 m. Para el mismo sitio de perforación, se han elaborado sus presupuestos, programa y planificación de actividades del mismo, así mismo a través de tablas se muestran los aspectos trascendentales a considerar para el desarrollo de la perforación; y también se ha incluido las pruebas/registros que son aplicables para cada tipo de pozo geotérmico, finalmente se han identificado las fortalezas y debilidades por cada tecnología.

## **2.1 OBJETIVOS DEL PROYECTO**

### **2.1.1 OBJETIVO GENERAL**

Con el desarrollo del presente trabajo se espera lograr:

- Elaborar dos propuestas de diseños para la ejecución de la perforación de pozos con finalidad de exploración profunda en un proyecto en fase de pre o factibilidad geotérmica en un Campo Geotérmico ubicado en América del Sur.

### **2.1.2 OBJETIVO ESPECIFICOS**

Con el desarrollo del presente trabajo se espera lograr:

- Analizar y revisar dos metodologías existentes para perforación exploratoria y los correspondientes tipos de pozos que pueden utilizarse.
- Presentar un diseño de perfil de pozo para cada una de las propuestas.
- Elaborar un plan de actividades a realizar para la perforación y pruebas a realizarse en cada pozo.
- Elaborar un presupuesto de todos los materiales y servicios necesarios para la perforación de cada una de las propuestas.

## **3- MARCO METODOLÓGICO DE SISTEMAS DE PERFORACIÓN**

Este capítulo se encargara de tratar los aspectos teóricos mínimos necesarios a conocer y considerar para generar una propuesta de diseño de perforación exploratoria, identificando las bases para sustentar los datos del mismo, el tipo de perforación a utilizar, las obras civiles y los aspectos medio ambientales a considerar en todo proyecto de perforación geotérmica.

### **3.1 EXPLORACIÓN GEOCIENTIFICA**

En la actualidad, es conocido que el desarrollo de cualquier campo geotérmico debe iniciar con un estudio previo superficial que permita caracterizar el recurso que se pretende obtener. La exploración geocientífica es en este punto el proceso que permitirá, por medio del uso de herramientas científicas, la caracterización del recurso, de tal manera que se incremente la probabilidad de éxito a la hora de decidir en qué punto realizar la perforación de un pozo.

La exploración geocientífica tiene como objetivo principal desarrollar un modelo conceptual del campo en estudio que sea confiable y que facilite la toma de decisiones. Un programa de exploración debería cumplir 5 objetivos (Dippipo, 2012):

- Localizar áreas sustentadas por rocas calientes
- Estimar el volumen del reservorio, la temperatura del fluido del reservorio, y la permeabilidad de la formación
- Predecir el tipo de campo en estudio, vapor dominante, líquido dominante, o fluido bifásico
- Definir la naturaleza química del geofluido.
- Estimar la Potencia eléctrica probable para un mínimo de 20 años de explotación.

La continuidad del proyecto depende de los resultados obtenidos durante esta exploración. Existen en gran parte de los campos desarrollados manifestaciones superficiales visuales como fumarolas, aguas termales que permiten inferir la presencia de una fuente de calor y de un posible recurso geotérmico. Así mismo, existen campos sin manifestaciones visuales con gran potencial que requieren de un estudio importante, bien elaborado para determinar o no la presencia del recurso geotérmico.

Al tratarse de estudios superficiales, están sometidos a un riesgo de interpretación de los resultados obtenidos; es así, que una vez se inicie con el proceso de perforación se podrá establecer la veracidad de lo obtenido durante la exploración superficial o se actualizará el modelo conceptual previo con la nueva información obtenida.

### 3.1.1 METODOLOGÍAS DE EXPLORACIÓN

Las metodologías desarrolladas para exploración en Geotermia son la geología e hidrología, geoquímica y geofísica. Dipippo (2012) menciona en su texto 2 metodologías adicionales como son la exploración de literatura y el uso de exploración vía aérea. Sin embargo, la investigación de literatura es una actividad común inherente a cada metodología desarrollada pues siempre se buscará información previamente desarrollada sobre el campo en estudio o similares. La exploración vía aérea (se la realiza en pequeños aviones) en cambio, es una actividad que dependerá de la capacidad solvente de los patrocinadores del proyecto pues se puede tratar de costos elevados en los que no se quiera incurrir y que posiblemente la información aérea se pueda obtener por otros medios como por ejemplo fotografías satelitales.

### 3.1.2 GEOLOGÍA E HIDROLOGÍA

Todo programa de exploración inicia con el estudio de la geología de la zona. Su función básica es identificar la ubicación y la extensión de áreas de interés para su estudio con mayor detalle. En este programa se debe tener la capacidad de determinar el tectonismo y estratigrafía de la zona, los sistemas de fallamiento, y la distribución y datación de las rocas volcánicas.

Al tratarse de una exploración de campo, se espera localizar las manifestaciones termales naturales así como las zonas y rocas alteradas hidrotermalmente; lo que permitirá profundizar en el estudio del campo y de esta manera determinar las actividades de exploración posteriores para una mejor caracterización de la zona.

De esta exploración, se espera la obtención de un mapa geológico y un primer modelo conceptual del sistema. Esto permitirá a las siguientes metodologías escoger las actividades a realizar y en qué zonas serán ejecutadas.

El modelo conceptual muestra la mayor cantidad de características posibles del campo como son la localización de las unidades rocosas, fallas y patrones de flujo de los fluidos, esta información es muy importante pues no es utilizada solamente para el proceso inicial de perforación sino posteriormente en las etapas de producción para establecer nuevos pozos y para la reinyección del fluido geotérmico.

Es normal durante este proceso llevar a cabo también el estudio hidrológico. Este estudio permite determinar los fluidos presentes en el sistema, incluidos su edad, propiedades físicas y químicas, cantidad, patrones de flujo y sus modos de recarga.

### 3.1.3 GEOQUÍMICA

La geoquímica va de la mano con la hidrología, pues es el análisis de las aguas que permitirá identificar el tipo de campo si es de vapor o líquido dominante, se estimará la

temperatura mínima del geofluido, se podrá caracterizar el agua de recarga, su naturaleza y fuentes.

El estudio del recurso en esta etapa logrará predecir problemas en los que se podría incurrir en el futuro. Existen elementos importantes de estudio como son el silicio, calcio, cloruros, que podrían estar indicando futuros problemas de corrosión e incrustaciones en los sistemas.

Existe también un estudio de gases presentes en el sistema como son CO<sub>2</sub>, CO, H<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>S, como los más importantes. Al igual que los elementos determinados en el agua, los gases son empleados para estimar la temperatura del recurso en el reservorio.

Los muestreos de agua y gases se realizan en los manantiales de aguas frías y calientes, en las fumarolas, a través de las fallas en la zona, y son trasladados a un laboratorio para su análisis.

### 3.1.4 GEOFÍSICA

La exploración geofísica es comúnmente llevada a cabo al final de todo el programa de exploración superficial. Para esto se cuenta con los modelos geofísicos de las ramas geológica y geoquímica, de tal manera que se puede escoger las técnicas a emplear para trabajar en una zona específica con alta probabilidad de desarrollo geotérmico.

La geofísica estudia los fenómenos físicos como el electromagnetismo, la propagación de ondas mecánicas en la corteza terrestre y la gravedad. Busca los efectos producidos por rocas y minerales metálicos en áreas anómalas, es decir, desviadas del background.

El mapeo de una anomalía geofísica puede significar el descubrimiento de una formación geológica apta para la explotación industrial. Es así, que en geotermia juega un papel muy importante en la identificación y caracterización de reservorios geotérmicos a través del uso apropiado de estas técnicas, entre las cuales se destacan:

- Gravimetría
- Magnetometría
- Resistividad eléctrica
- Magneto telúrica

Con los resultados obtenidos de esta exploración se procede a desarrollar el modelo conceptual geofísico para el sistema geotérmico en estudio.

### 3.1.5 INTERPRETACIÓN

Finalizado el programa de exploración geocientífica es necesario sintetizar toda la información de las metodologías empleadas para el desarrollo de un modelo conceptual del sistema geotérmico.

En este punto, el objetivo es desarrollar un mapa que permita identificar los mejores puntos para iniciar con la exploración profunda; es decir para iniciar con la perforación de pozos de exploración.

El mapa deberá contener como información mínima resultados de las exploraciones como son, estructuras geológicas, manifestaciones termales, actividad sísmica, contornos gravimétricos, contornos de resistividad eléctrica, así como también vías, accesos, edificios, otras plataformas. Conforme el campo sea desarrollado, la información debe ser actualizada periódicamente para tener mayor conocimiento del campo.

Una vez terminado la exploración y la interpretación, se han seleccionado las mejores ubicaciones para desarrollar el campo, es necesario continuar con el proceso de perforación.

## **3.2 EXPLORACIÓN PROFUNDA**

La exploración profunda se considera como parámetro posterior a estudios geocientíficos para la toma de decisión en estudios de prefactibilidad, debido a que la misma (exploración profunda) es la que genera mayor conocimiento del campo geotérmico en los aspectos geológicos, térmicos y aspectos del reservorio.

### **3.2.1 CONSIDERACIONES PARA UBICACIÓN DE POZO GEOTÉRMICO EXPLORATORIO**

Entre las características principales a considerar para la ubicación de un pozo geotérmico exploratorio son:

- El área del recurso usualmente se encuentra en terrenos accidentados, donde son necesarias la construcción de vías de acceso y una ubicación técnica favorable de plataformas de perforación, los cuales representan costos elevados para el estudio exploratorio profundo. Es recomendable utilizar un área con la menor necesidad de construcción de vías de acceso.
- La perforación debe alcanzar la profundidad suficiente para comprobar la existencia o no de temperaturas económicamente explotables y permeabilidades adecuadas. Esto considera usualmente el transporte de torres de perforación de tamaños medianos a grandes.
- El diseño del pozo debe considerar la intersección de una falla de estructura permeable, ubicándose en zonas de alta alteración hidrotermal y zona de emanación de gases geotérmicos, estos dos aspectos en características adecuadas indican la permeabilidad del sistema.

### 3.2.2 TIPOS DE POZOS GEOTÉRMICOS EXPLORATORIOS

A lo largo de la historia se han hecho uso de la perforación de siete tipos de pozos geotérmicos, en la actualidad se ha reducido a cuatro tipos, cada uno de ellos tiene una diferencia en su objetivo, geometría de diseño y en especial costos. A continuación se mencionaran los cuatro tipos y se describirá solamente el tipo de interés para el proyecto (Alvarenga, Amaya, & Sibrian, 2004):

- a) Gradiente,
- b) Testigo continuo,
- c) Exploratorio de múltiple propósito, y
- d) Exploratorio profundo.

Un pozo exploratorio profundo son pozos de diámetros y profundidades grandes (agujero inicial y final respectivamente de 26 y 8 1/2 pulgadas, con 600 a 1500 m de profundidad; como referencia). En el tipo de comportamiento y en los costos prácticamente no difieren de los pozos que se perforan para la utilización de un reservorio. Son los objetivos y alcances investigativos para una identificación y evaluación directa de propiedades de los fluidos y de las rocas hasta esas profundidades las que hacen diferencia. Normalmente perforados en la parte final de una etapa de pre factibilidad (1 a 3 pozos) y mayormente en una factibilidad (5 a 6), son los que tienen como fin principal interceptar un reservorio de calidad comercial.

Estos pozos dan resultados útiles a los fines de una evaluación del potencial energético y de una delimitación de la zona de mayor interés para extraer el recurso; es aquí donde se puede contestar con objetividad la pregunta inicial de dónde perforar.

### 3.2.3 COSTOS DE PERFORACIÓN GEOTÉRMICA

Entre los principales aspectos de forma general que afectan los costos de perforación se encuentran (Finger & Blankenship, 2010):

- 1) Retos técnicos: las condiciones que requieran el uso de herramientas y técnicas especiales para alcanzar el fondo del pozo cuando este tenga formaciones duras,
- 2) Diámetros grandes: debido a los altos valores de flujo y esfuerzos producidos por el fluido productor (agua o vapor de agua), son requeridos diámetros grandes de tubería de revestimiento para lograr alcanzar una profundidad específica; y
- 3) Unicidad: a pesar de utilizarse los mismo materiales que en perforación para extracción de gas natural y petróleo, la perforación geotérmica es diferente a las anteriores.

Las actividades de la perforación que son más significativas en el costo de perforación geotérmica son (Finger & Blankenship, 2010):

- 1) Diseño del pozo: es común utilizar la metodología de localizar primero la zona productora para posterior analizar la profundidad y diámetro del pozo geotérmico, este proceso se convierte en trascendental para el costeo debido a los elevados costos de tubería de revestimiento y cementación,

- 2) Problemas de perforación: Es usual encontrar eventos no planeados durante la perforación, que van desde problemas menores (como perdidas de circulación) hasta problemas catastróficos (atrapamiento de herramientas). Usualmente es muy complejo estimar precisamente que tipo de dificultades podría enfrentarse el proceso de perforación, es por ello que se considera que por lo menos un 10% extra al presupuesto inicial asumiría estos gastos; y
- 3) Tasa de penetración (ROP): uno de los costos de perforación es la dependencia de la profundidad perforada con el tiempo invertido en el mismo (inicialmente por la renta del equipo de perforación y servicios de compañías son caros), es por ello que es beneficioso una velocidad relativamente rápida de perforación, con un agujero estable y sin comprometer la seguridad.

Vida de barrena y herramientas: En muchas ocasiones se utiliza de referencia el ROP, en donde la vida útil de las herramientas se considera como un factor de mucha importancia para obtener profundidades de perforación en tiempos cortos, debido a que entre mayor vida útil de la barrena y herramientas se ahorra tiempo.

### 3.2.4 EQUIPOS DE PERFORACIÓN GEOTÉRMICA

La selección de equipos de perforación se basa fundamentalmente en: diámetro de perforación, profundidad y diseño de tubería de revestimiento. El primer criterio para la planificación de perforación es seleccionar el tipo de agujero: “Slim Hole” o agujero convencional. Los aspectos que afectan la selección del diámetro de agujero a perforar son:

- Registro de herramientas: que las herramientas para registro de presión y temperatura puedan introducirse en el agujero,
- Tamaño del núcleo: si es requerida la recuperación de núcleo para examinar validez de modelo geológico existente, en general esto representa que tipo de herramientas o registros deben hacerse en la zona baja del pozo, determinando el mínimo diámetro que es posible utilizar; y
- Pruebas de flujo: si son planificadas pruebas de flujo posterior a la perforación, presentan dos ventajas para hacer el diámetro con el mayor diámetro posible son: el flujo en diámetros más grandes es más precisos y en combinación de la profundidad, temperatura y presión la habilidad del pozo de producir un flujo por sí mismo se convierte en una función marginal.

Todos estos factores generan una idea si un pozo “Slim Hole” satisface los requerimientos, aminorando costos por dos razones:

- Tuberías de revestimiento más pequeñas, herramientas y volúmenes de cementación menores, y
- La capacidad de perforar con pérdida de circulación completa.

Los dos tipos de plataformas de perforación que se utilizan en geotermia son los presentados a continuación:

- a) Plataforma de extracción de núcleos: se diferencia de la plataforma rotaria esencialmente en la forma que se recupera el núcleo. Se utiliza comúnmente en la industria de exploración minera, el núcleo es cortado por una herramienta y el registro de herramientas se realiza a través de un tubo en la parte baja de la perforación que avanza a medida se va perforando (ver, Figura 1); y
- b) Torre de perforación convencional o rotaria: utilizada usualmente para agujeros con diámetros grandes, es comúnmente la elección básica para agujeros en cualquier perforación, la fuerza motriz para la perforación se transmite a través de la mesa rotatoria, donde una barra cuadrada o hexagonal llamada Kelly aplica el torque hacia la sarta de perforación, este sistema es elevado por un cableado de acero encargado de lo mismo (ver, Figura 2).



Figura 1. Torre de extracción de núcleos  
de continuos.



Figura 2. Torre de perforación rotatoria, mástil de  
aproximadamente 55 m de altura.

Entre algunos aspectos a considerar para la selección de tipo de plataforma de perforación se encuentra:

- Capacidad de la torre de perforación: usualmente se refiere a la capacidad de carga que puede ser suspendida por el sistema de perforación,
- Capacidad de la bomba: las bombas deben tener la suficiente capacidad volumétrica para proporcionar una velocidad adecuada para extraer los recortes de perforación, las bombas deben tener la suficiente capacidad para superar las caídas de presión a lo largo de los tramos perforado y la posibilidad de dar la potencia mínima a un motor de fondo,
- Limpieza de fluidos: este requerimiento puede ser consultado con un ingeniero de lodos, con los sistemas agitadores, desarenadores y desarcilladores centrífugos pueden ser adecuados al trabajo,

- Capacidad a alta temperatura: el hecho de perforación geotérmica indica que las piezas se encuentran expuestas a altas temperaturas, esto es notable en el fluido de perforación cuando retorna, el cual podría estar más caliente que fluidos de otros tipos de perforación, incluso en la mayoría de casos es necesario el uso de sistemas de enfriamiento de lodo para la recirculación del mismo,
- Instrumentos de la torre de perforación: en su mayoría son utilizados para mejorar el rendimiento y seguridad durante la operación de perforación. Los requerimientos de instrumentos en la torre de perforación pueden variar por cada tipo de proyecto, pero usualmente, se utilizan medidores de profundidad perforada, temperatura de fluido de perforación de ingreso y salida, detector de concentración de H<sub>2</sub>S, presión de cabezal, velocidad de la mesa rotaria, peso en la sarta de perforación, torque, peso de barras Kelly. Muchas de estas medidas son usualmente tomadas con medidores digitales, y reportados para intervalos relativamente cortos; y
- Soporte: la mayor parte de problemas complejos en perforación son debido a mal funcionamiento o atrapamiento de herramientas, si el sitio de perforación es extremadamente remoto, es necesario considerarlo como un elemento necesario de soporte para servicio de perforación, en especial para piezas o partes que deben estar en existencia en la plataforma de perforación.

### 3.3 OBRA CIVIL NECESARIA

Una vez definido los estudios geocientíficos de prefactibilidad del proyecto y donde se manifiesta la presencia del recurso geotérmico, el siguiente paso es la perforación exploratoria. Esto incluye la perforación de uno o más pozos, hay que establecer un campamento al lado de la plataforma. La fase de perforación exploratoria es temporal y en un sitio específico que puede durar de 2 a 3 meses.

Para perforar pozos geotérmicos de exploración profunda se requerirá de plataformas de perforación las mismas que puedan tener una superficie aproximada de 10.000 m<sup>2</sup>, la cual debe ser compactada y nivelada mecánicamente de manera que pueda instalarse en ella todos los elementos que conforman el equipo de perforación y las instalaciones de contenedores auxiliares de apoyo.

#### 3.3.1 ADECUACIÓN DE PLATAFORMAS

La localización general del emplazamiento de la plataforma del pozo de exploración ha sido definida en función del análisis de información geológica, geofísica, y resultados de campañas de exploración profunda realizadas previamente por el titular del Proyecto, la cual puede variar mínimamente en función de los trabajos topográficos y optimización que se realice en la fase de construcción de obra civil.

Para el desarrollo del proyecto de exploración profunda se requiere la construcción de una plataforma la misma que se realizará por etapas, estas tienen unas dimensiones promedio

de (170\*70) metros. La plataforma se ubicaran de manera estratégica en el terreno para disminuir al máximo los cortes y rellenos de terreno, si se requiere se tratará de realizar cortes y rellenos compensados.

El área de la plataforma se mejorará con material selecto, se nivelara y se compactara con maquinaria de manera que soporte de una forma segura los equipos de perforación e instalaciones auxiliares que se instalaran en ella. La plataforma tendrá en todo su perímetro un canal que permita drenar las aguas pluviales donde el terreno permita la infiltración natural de estas.

### **3.3.2 TRABAJOS PREVIOS PARA LA INSTALACIÓN DE EQUIPOS**

Antes de la etapa de inicio de perforación, la instalación de los equipos se ubicará sobre la plataforma respectiva, y contará con contenedores destinados a oficinas y módulos de descanso para personal de perforación. Además, se habilitarán módulos para bodegas, talleres, cocina, comedor, baños y casilleros.

Se contará con un patio de acopio temporal de materiales y herramientas de perforación, planta de tratamiento de aguas servidas, tanque de almacenamiento de combustible, grupos generadores, entre otras instalaciones de apoyo.

### **3.3.3 CAMPAMENTOS E INSTALACIONES**

Se requiere además la instalación de un campamento provisional, y las construcciones necesarias de obras civiles para la perforación. Estas tareas se iniciarán con la limpieza, nivelación, escarpe y despeje del área, mediante el uso de maquinaria estándar de construcción y mano de obra capacitada.

En la figura 3 se muestra un esquema del área de una plataforma, la misma que se debe ejecutar una serie de trabajos como: excavación, relleno, compactar y nivelar el área, de modo que sea posible montar los elementos del campamento y la instalación de los equipos propiamente como tal, esto es: unidades modulares de varias dimensiones con diversos destinos (oficinas, dormitorios, comedor, baños, talleres, etc.) y demás servicios básicos asociados.



Figura 3. Muestra de un área de plataforma.

### 3.3.4 CONSTRUCCIÓN DE PISCINAS DE DEPÓSITO

El desecho principal proveniente de operaciones de perforación son los lodos producidos durante la misma, así como los recortes. Los lodos de perforación pueden ser de tres tipos: lodo base agua, lodo base aceite, y lodo base sintética. En la mayoría de los casos las áreas para manejo de desechos no están disponibles, y por lo general los lodos que resultan de la perforación deben ser manejados en el sitio para lo cual se requiere la construcción de piscinas.

Cada pozo que se vaya a perforar producirá una cantidad considerable de lodos, por lo que se prevé la construcción de piscinas de almacenamiento, donde se depositarán los lodos producto de la perforación de pozos geotérmicos y los detritos de rocas provenientes de la misma. Dado que los químicos utilizados en la etapa de perforación, son químicos a base de agua, inocuos al medio ambiente y fácilmente degradables, se procederá a depositarlos en esta piscina de forma trapezoidal.

Estas piscinas de lodos se construirán en un terreno estable y estarán compactadas, impermeabilizadas y recubiertas con una lona plastificada en el fondo y las paredes, y debe contar con una profundidad máxima de 3m, la capacidad total es de aproximadamente 2.500m<sup>3</sup> que permite almacenar temporalmente los residuos de la perforación, estas estarán revestidas con una geomembrana impermeable de aproximadamente 1,5 mm de espesor, que evitan tanto la infiltración de lixiviados al subsuelo como la posible contaminación de los mantos acuíferos.

### 3.3.5 TRATAMIENTO DE LODOS

Cada plataforma tendrá su propia piscina, esta será adecuadamente impermeabilizada para retener de forma segura los líquidos de perforación y también para servir como piletas de descarga en el futuro durante las pruebas de pozos.

La impermeabilización se realizará por medio de una lona plastificada impermeable, con resistencia a la ruptura de 30 kgf/cm<sup>2</sup>; así como resistente al ataque químico, a la temperatura del fluido y a las sustancias para las cuales se impermeabiliza.

### 3.3.6 CAMINOS Y ACCESOS

La habilitación de caminos para el ingreso de los equipos de perforación se realizará mediante el método convencional de corte, relleno, nivelación y compactación de la carpeta de rodado.

Adicional a lo largo del camino en los puntos que sean necesarios se construirán obras de ingeniería para la captación y evacuación de las aguas pluviales tales como: cunetas, alcantarillas, estas obras se dimensionarán de acuerdo a la carga pluvial que resulte de los análisis hidráulicos del sector y las pendientes naturales para la adecuada evacuación de estas. Además se ejecutarán obras de saneamiento de los caminos que resulten necesarias y de ser necesario se construirá nuevos caminos de ingreso.

En la mayoría de las plataformas que se construye se requiere de vías de ingreso, el hecho de construir caminos de acceso resulta ser lo más común una causa de impacto ambiental. Estos impactos son el desbosque y desbroce de vegetación, irrupción de corriente de agua, erosión de suelo, e impactos indirectos asociados a la población local.

## 3.4 MEDIO AMBIENTE

El impacto ambiental es una alteración de las características iniciales del medio ambiente provocada por un proyecto, obra o actividad, trayendo consecuencias para la salud humana, el bienestar de la flora y fauna y la disponibilidad futura de los recursos naturales atribuibles a los corrientes de entrada o salida de un sistema.

De acuerdo con la legislaciones vigentes y aplicables, como paso previo al desarrollo de un nuevo proyecto geotérmico se requiere un Instrumento de Gestión Ambiental que valore el impacto al medio ambiente, así como los aspectos sociales de las actividades a desarrollar y proponga las medidas de protección adecuadas, de forma tal que se garantice el desarrollo armónico del proyecto sin alterar significativamente el ecosistema.

Las políticas ambientales se orientan hacia la existencia y desarrollo de proyectos para conciliar la estrategia del crecimiento económico con la debida protección del medio ambiente. La compatibilidad del uso sostenible de los recursos naturales con el desarrollo económico se traduce, en la práctica, en incorporar la dimensión ambiental a la evaluación de procesos y servicios para disminuir al máximo su impacto ambiental.

Para disminuir el impacto ambiental es necesario adoptar políticas de desarrollo sostenible, que es aquel desarrollo económico y social que tiene lugar sin detrimento del medio ambiente ni de los recursos naturales de los cuales dependen las actividades humanas y la mejora, del presente y del futuro.

### **3.4.1 ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL (EIA)**

El Estudio de Impacto Ambiental (EIA) es un instrumento que identifica, describe y valora los efectos previsibles que la realización de un proyecto producirá sobre los diferentes aspectos ambientales. Este es importante porque sirve para decidir sobre la mejor alternativa de ejecución, considerando que el proyecto que está siendo planificado sea compatible con el medio ambiente.

### **3.4.2 ANTECEDENTES EN LA GEOTERMIA**

Las regulaciones ambientales de diferentes países que conciernen al desarrollo de la energía geotérmica pueden ser consideradas similares. Todas tienen regulaciones que requieren un análisis ambiental para un proyecto propuesto, así como regulaciones específicas que definen las cantidades de contaminantes que pueden ser emitidos a la atmósfera o descargados a la tierra o al agua. Por ejemplo, la Comunidad Económica Europea (C.E.E.) con sede en Italia, la Ley Nacional de Medio Ambiente en los Estados Unidos, la Ley de Manejo de Recursos en Nueva Zelanda, etc. son las bases legales para los proyectos geotérmicos e incluyen la realización de los EIA.

La mayoría de los países han desarrollado o adoptado criterios y guías para proteger su propio Medio Ambiente. En algunos casos se han tomado medidas para proteger especies locales o ecosistemas. Las guías disponibles a través del mundo incluyen:

- “Criterio de calidad para el agua” de la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos,
- “Guía para la Región Europea” de la Organización Mundial de la Salud,
- “Guía para la calidad del agua” del consejo canadiense de recursos y el ministerio del medio ambiente; y
- “Estándar de la calidad del agua del Reino Unido” del consejo de investigación del agua de la comunidad económica europea.

En un Estudio de Impacto Ambiental debe de incluir como mínimo los siguientes aspectos:

- Un resumen ejecutivo del estudio a fin de resaltar los aspectos más importantes que aporten información como ¿en qué consiste el proyecto?, ¿cuáles son los impactos?, ¿cuáles son las medidas de mitigación sobre los impactos identificados?,

- Descripción del proyecto, desde la etapa de preparación del sitio, construcción, incluso contemplando el cierre,
- Marco legal aplicable,
- Descripción del entorno,
- Identificación, priorización y cuantificación de los impactos ambientales,
- Interpretación de resultados,
- Determinación de las medidas de mitigación; y
- Programa de manejo ambiental, control y monitoreo.

### 3.4.3 DETERMINACIÓN DEL ÁREA DEL PROYECTO

El área de influencia del proyecto considera principalmente la distribución espacial de la perforación de los pozos, área donde se producen las interacciones de las actividades del proyecto con los diferentes componentes del ambiente: física, biológica, y social-cultural.

La determinación del área de influencia del proyecto implica definir el alcance geográfico que pueden tener las actividades del proyecto, principalmente en estos tres componentes del entorno, tanto en forma directa (como la locación donde se instalarían las plataformas de perforación) como indirecta (como las rutas de tránsito para acceder a estas locaciones).

### 3.4.4 POSIBLES IMPACTOS PRODUCIDOS POR LA ENERGÍA GEOTÉRMICA

La energía geotérmica es considerada una de las energías más limpias utilizadas en el ámbito mundial y su explotación se está volviendo cada vez más necesaria para los países que cuentan con este recurso.

El recurso geotérmico en si no crea impacto, son las tecnologías desarrolladas y un mal manejo del recurso los que pueden causar impactos irreversibles en el ambiente y las comunidades humanas. Si un proyecto geotérmico no está sujeto al proceso del EIA y a un programa de monitoreo, las consecuencias pueden ser negativas, ya que cuando estos recursos son explotados con el propósito de generar energía, el manejo superficial puede causar un impacto en el ambiente físico.

Los impactos ambientales por la explotación geotérmica variaran según las diferentes fases de explotación, las cuales se describen por lo general como: la exploración preliminar, pozos exploratorios profundos y la fase de producción.

a) Exploración preliminar.

Los efectos ambientales son usualmente pequeños porque solo están involucrados estudios geológicos, muestreos y perforaciones pequeñas.

b) Exploración profunda.

Los aspectos ambientales relacionados a la exploración profunda de un reservorio geotérmico incluyen: disturbios superficiales por las plataformas y los caminos, emisiones al aire, descarga de lodo de perforación, recortes, fluidos geotérmicos, ruido

por el trabajo de construcción durante la perforación, posibles disturbios a la vegetación y la vida silvestre, potenciales efectos a la salud para los trabajadores del proyecto por exposición a fluidos geotérmicos y posibles emisiones de H<sub>2</sub>S y efectos potenciales sobre residencias cercanas, áreas recreativas, etc.

c) Fase de producción

Probablemente esta fase tiene el mayor impacto sobre el ambiente. Los principales impactos sobre el ambiente durante el transcurso de esta fase son los siguientes:

- **Disturbios superficiales:**

Pozos y tuberías son probablemente los signos más específicos de la producción de energía geotérmica. Una plataforma de perforación tiene usualmente entre 200 y 2500 m<sup>2</sup> de área.

Los pozos y las piletas son aspectos prominentes durante la perforación. El impacto visual necesita atención debido a que las manifestaciones geotérmicas naturales están frecuentemente localizadas en áreas de belleza natural, pudiendo ser de interés histórico o atracciones turísticas.

- **Ruido:**

En el caso específico de la explotación geotérmica existen ruidos asociados a la perforación que raramente exceden los 90 dB y el ruido por la descarga de los pozos que puede exceder los 120 dB. La descarga de vapor seco de los pozos tiende a ser más difícil de silenciar. Los trabajadores deben usar protectores en los oídos tanto durante la perforación como en las pruebas de descarga.

- **Efectos económicos y sociales:**

Debido a su naturaleza, la energía geotérmica es frecuentemente explotada en lugares relativamente remotos. Un incremento temporal en el empleo y la importación de fuerza de trabajo externa atraen servicios varios, pueden causar daños en la forma tradicional de vida y dejar marcas cuando el trabajo de construcción sea finalizado. La construcción de caminos abrirá el área y probablemente la hará atractiva a turistas, creando así una nueva industria.

### 3.4.4.1 Caso: programa de Manejo Ambiental Chinameca

Se presenta a continuación un ejemplo de manejo de impactos en el proyecto de Chinameca, El Salvador, por la perforación de 4 pozos.

En la perforación de los 4 pozos produjo algunos cambios significantes al medio ambiente como los siguientes según el estudio de impacto ambiental:

a) Modificación de microclima.

Cambios microclimáticos como incremento de la temperatura en las áreas de influencia directamente afectadas en las que se va a retirar la cobertura vegetal.

b) Perturbación de la fauna silvestre

Debido al impacto de la eliminación de la cobertura vegetal y la remoción del suelo orgánico que destruye el hábitat natural. Producto de las actividades de perforación se genera ruidos, olores y polvo que ahuyentan la fauna residente como la afectación hacia hábitats inmediatos.

c) Fragmentación del hábitat

La fragmentación del hábitat se dará en los sitios donde se construirán las plataformas y accesos. Este impacto reduce la continuidad del medio para la libre movilidad de las especies silvestres.

d) Modificación del paisaje

Transformación de manera temporal y permanente de la armonía visual por la instalación de los equipos de perforación y pruebas de pozo y la eliminación de la flora de forma permanente por la construcción de plataformas.

El Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales, como ente regulador, emite 24 medidas ambientales que deberán formar parte del Programa de Manejo Ambiental. Estas medidas son:

1. Construcción de 3 tanques de captación de agua en fuentes,
2. Construcción de zanjas y pozos de absorción,
3. Monitoreo Calidad y Cantidad de Agua,
4. Plan de Sostenibilidad del proyecto,
5. Instalación de 50 ecoestufas ahorradoras de leña,
6. Plan de reforestación,
7. Siembra de cercas vivas,
8. Siembra de zacate Vetiver en taludes,
9. Diseño plan de conservación de vida silvestre,
10. Acopio de material de desbroce y suelo orgánico para reutilización,
11. Plan de Educación Ambiental,
12. Uso de silenciadores metálicos portátiles,
13. Instalación de mamparas fonoaislantes,
14. Riego en plataformas y accesos durante la construcción,
15. Capacitación en seguridad vial, ocupacional y riesgos,
16. Programa de mantenimiento de motores de los equipos de perforación,
17. Señalización vial y conservación de la vida silvestre,
18. Construcción de obras de protección y drenaje,
19. Plan de mantenimiento de los accesos,
20. Absorción de H<sub>2</sub>S por inyección de agua,
21. Construcción de obras para el control de derrames,
22. Adecuación de sitios para la disposición final de terracería,
23. Traslado y disposición final de los lodos residuales tratados a piletas; y
24. Manejo Integral de Desechos y Residuos generados por el proyecto

Cada país cuenta con un ente regulador en medio ambiente que será el encargado de emitir un informe y las medidas a tomar para reducir o eliminar los impactos generados por el proyecto en cuestión.

Las medidas mencionadas son específicas para el proyecto de Obras Civiles de Pozos Geotérmicos en 4 plataformas del Campo Geotérmico de Chinameca, El Salvador. Aunque algunas de ellas pueden ser generalizadas a cualquier proyecto similar, el resto dependerá de la zona donde se ejecute el proyecto, las condiciones en ella, la flora y la fauna, la población, etc.

## 4- DISEÑO DE POZOS

El diseño de pozos se basa en la selección primeramente del campo geotérmico, así como el punto de perforación idóneo en función de características como acceso al lugar y resultados de estudios geocientíficos plasmados en el modelo conceptual.

La actividad de diseño del pozo se encarga además de selección de la ubicación idónea de la selección de los diámetros en función de los objetivos del pozo a perforar, selección de materiales y accesorios básicos, selección y cálculo de volúmenes de fluido de perforación y diseño de lechadas para cementación de tuberías casing.

El presente capítulo se encargara de dar a conocer los aspectos básicos en los que se fundamentan los diseños de pozos de diámetro convencional pequeño y Slim Hole como propuestas de perforación exploratoria de un campo geotérmico.

### 4.1 CONCEPTOS BÁSICOS

Los conceptos básicos son las variables fundamentales para el desarrollo del diseño de cada propuesta de un diseño de pozo geotérmico de diámetro convencional y tipo Slim Hole, estos aspectos incluyen la descripción de cada rubro general que se verán involucrados en la perforación, los cuales se describen a continuación:

#### 4.1.1 PLANIFICACIÓN DE DISEÑO Y ACTIVIDADES PARA LA PERFORACIÓN

El diseño de un pozo sea este de exploración o producción, es un proceso sistemático y ordenado. Las etapas a seguir durante el diseño de pozo están bien identificadas y son las siguientes:

- Recopilación de la información disponible,
- Predicción de la presión de formación y fractura,
- Determinación de la profundidad para la ubicación de la tubería de revestimiento,
- Selección de la geometría y trayectoria del pozo,
- Un programa de fluidos de perforación,
- Programa de utilización de brocas,
- Diseño de las tuberías de revestimiento y programa de cementación,
- Diseño sartas de perforación,
- Selección del equipo de perforación,
- Tiempos estimados de perforación; y
- Costos de la perforación

Estos procesos son generales por lo que se puede aplicar a cualquier tipo de pozos, todo depende de aplicar la tecnología adecuada en cada etapa a la cual fue diseñado. La

planeación de la perforación requiere de la integración de varios factores tales como: la ingeniería, seguridad, ecología, costos.

#### **4.1.1.1 TUBERÍAS DE REVESTIMIENTO**

La tubería de revestimiento es una parte esencial de la perforación y terminación del pozo. El mismo que consiste en tramos de tuberías de acero para formar un solo conducto desde la profundidad deseada hasta la superficie. Los diseños más comunes contemplan las siguientes tuberías de revestimiento:

- Tubería de revestimiento superficial,
- Tubería de revestimiento intermedia; y
- Tubería de revestimiento de explotación.

Esta última tubería está diseñada para soportar la máxima presión del fondo de la formación, además debe soportar condiciones de alta temperatura y presiones para aumentar la productividad del pozo. En el diseño del pozo fue considerada desde la superficie hasta la zona productora, para evitar derrumbes y mantener limpio el agujero.

El diámetro de la tubería de explotación está en función de los requerimientos y características del reservorio primordialmente, aunque puede verse afectado por efectos de la profundidad de la formación, los fluidos de control, esfuerzos a que está sometida, es decir se debe diseñar de acuerdo a los requerimientos de producción, estimulación y reparación del pozo.

#### **4.1.1.2 BARRENAS**

Las barrenas deben ser seleccionadas adecuadamente según la profundidad que deba trabajarse. Los diámetros de agujeros seleccionados para el pozo indican el diámetro de barrena requerido.

En todo proceso de perforación es necesario contar con cierta cantidad de barrenas en stock, con la finalidad, de garantizar la continuidad de los trabajos en caso de que se deteriore alguna durante su uso. La cantidad de barrenas dependerá del tipo de formación en la que se trabajará y la profundidad que se requiera alcanzar. Estos parámetros influyen sobre el desgaste de la barrena. Existen varios tipos de barrenas. Para el presente estudio se emplearán las tricónicas y las coronas.

#### **4.1.1.3 PERFORACIÓN DE NÚCLEOS TESTIGOS**

Las operaciones que están contempladas de corte de núcleo en un pozo, proporcionan muestras intactas de formación. Es el único método para realizar mediciones directas de las formaciones de las propiedades de la roca y de los fluidos contenidos en ella.

A partir del análisis de los núcleos se obtiene un conjunto de datos muy valiosos para los diferentes especialistas relacionados con la ingeniería de yacimientos, perforación y geólogos. La información que se obtiene a partir de ellas son:

- Litología,
- Porosidad,
- Permeabilidad,
- Saturación de agua, gase; y
- Interfaces agua gases

La profundidad donde cortar un núcleo depende de varios factores entre ellos:

- Tipo de pozos (exploratorio o de desarrollo); y
- Tipo de información requerida (geológica, yacimientos, perforación)

#### **4.1.1.3.1 Factores que afectan a los núcleos**

Existen dos factores básicos que afectan a los núcleos, estos son: el lavado de la roca por medio de los fluidos de perforación que penetran durante la perforación y los cambios de presión y temperatura instantáneos a los que son expuestos.

En el primer caso durante la perforación, existe el problema dado por la penetración en la roca, ello provoca un desplazamiento de los fluidos originales lo que afecta agregando otros fluidos diferentes por el fluido que se usa en perforación.

En el segundo caso, la presión y temperatura son cambiadas bruscamente provocando un efecto durante la medición de la permeabilidad, porosidad y resistividad, las cuales comúnmente son usadas para definir el factor de resistividad de la formación.

#### **4.1.1.4 FLUIDOS DE PERFORACIÓN**

Los fluidos de perforación son utilizados para garantizar la limpieza del fondo del pozo y evitar el atascamiento de la barrena, transportando los recortes de la formación hacia la superficie. Existen 4 tipos de fluidos para este objetivo y son:

- Lodo a base de agua (bentonita y polímeros),
- Agua,
- Lodo o agua aireado; y
- Aire y espuma

En el presente estudio se tratará solamente los dos primeros por ser los de interés y los utilizados comúnmente. A diferencia del sector petrolero, en geotermia los fluidos de perforación no requieren ser de alta densidad y se puede utilizar un lodo simple o liviano; esto se debe a que en geotermia la perforación se la realiza en rocas duras (p.ej. rocas volcánicas) donde no existen problemas de sobrepresiones.

#### 4.1.1.4.1 Lodo a base de agua

Para este tipo de lodos se utiliza agua fresca como base o se puede utilizar también agua geotérmica proveniente de algún otro campo en explotación o planta. Estos lodos son recirculados a través del sistema de circulación de lodos y puede alcanzar velocidades en el agujero superficial de 0.2-0.7 m/s (Chepkech, 2011). El sistema de circulación, a diferencia del sector petrolero, cuenta con una torre de enfriamiento para enfriar al fluido que ha sido calentado, durante su paso al interior del pozo, debido a la fricción de la barrena con la formación durante la trituración, lo cual genera calor; y también debido a la temperatura al interior del pozo por tratarse de un recurso geotérmico.

Este tipo de fluidos es mezclado con arcillas o con ciertos polímeros para alcanzar las propiedades necesarias para la perforación. La arcilla más empleada es la Bentonita.

La mezcla de agua más bentonita incrementa la viscosidad del fluido por encima de la del agua sola, 1.05 g/cm<sup>3</sup> o un 5% mayor que el agua fría (Chepkech, 2011). Esto genera otras funciones en el fluido que son la habilidad de suspender partículas relativamente gruesas y pesadas de la formación para transportarlas hacia la superficie, y la formación de una capa pastosa delgada impermeable en las paredes del pozo para evitar la pérdida de fluido y para dar estabilidad a la formación. Además, los recortes en el fluido deben permanecer suspendidos si se deja de bombear el lodo. Esto evita el descenso de los recortes hacia el fondo y que se pueda producir un atascamiento de la barrena.

Este tipo de fluidos es utilizado hasta el techo del reservorio, debido a que una vez que se ingresa en este no se puede contaminar la formación y el fluido geotérmico. La capa pastosa impermeable no se puede formar en las paredes del reservorio porque bloquearía la salida del recurso.

#### 4.1.1.4.2 Agua

El agua fresca y sola es muy utilizada como fluido de perforación, sobre todo al ingresar en la zona del reservorio y en zonas de pérdidas de circulación que no pueden ser selladas. Esto obliga a mantener un gran recurso de agua para ser utilizado pues este no puede ser recirculado.

El uso de agua produce un incremento en la velocidad de circulación a través del espacio anular de 0.5-1 m/s (Chepkech, 2011); esto incrementa el riesgo de atascamiento por pérdida de agua en la formación.

Con el uso de agua se deja de recibir recortes en superficie debido a que el fluido se pierde totalmente en la formación.

#### **4.1.1.5 CEMENTACIÓN**

La cementación es un proceso importante para la perforación que se basa en el mezclado y bombeo de un producto denominado lechada. La lechada está compuesta de cemento, agua y aditivos que su mezcla produce características específicas para el pozo en ejecución. Las tuberías de revestimiento son fijadas en el pozo mediante la cementación, de esta manera, se consigue aislar acuíferos superficiales en la formación, se da estabilidad a las paredes del pozo y se aísla a las tuberías de revestimiento de cualquier fluido corrosivo presente en la formación.

El objetivo de la cementación es realizar el llenado del espacio anular entre agujero-casing y entre casing-casing.

Durante la planificación de la cementación es importante no pasar por alto y considerar las condiciones hostiles a las que estará sometido el pozo y así garantizar su integridad.

##### **4.1.1.5.1 CONDICIONES EN EL POZO**

El lodo al interior del pozo debe ser retirado siempre que se ha concluido una etapa de perforación y se requiere cementar. Este lodo forma una capa sellante sobre las paredes y debe ser removido en un 100% para que la lechada no sea contaminada.

Al introducir el casing, este debe ser centralizado para garantizar la uniformidad de la cementación alrededor del mismo entre el agujero y entre el casing anterior.

La temperatura de fondo del pozo influirá en el desempeño de la lechada por lo tanto es importante conocerla. El desempeño de la lechada dependerá de la mezcla de cementos y aditivos que se realice.

Al tratarse de un pozo exploratorio, se busca los más bajos costos durante la obtención del mismo. El control en la condición final de la cementación es mínimo. Esto se debe básicamente a que con este tipo de pozos se busca información geológica y termodinámica de la zona en estudio; pero no es finalidad que este pozo sea productor, o que el recurso fluya a través del mismo.

Caso contrario en pozos de producción, en este punto, se realiza un registro de calibración para que el volumen de lechada sea lo más preciso posible y de una alta calidad.

##### **4.1.1.5.2 DISEÑO DE LECHADA**

El diseño de la lechada debe ser específico para cada pozo pues estos tienden a comportarse de distintas maneras en un mismo campo. Por esta razón, es muy importante conocer las condiciones de temperatura del pozo.

Es común, en el campo geotérmico, que la lechada presente un 35 - 40% de polvo de sílice (Evans, 2010) con la finalidad de incrementar su resistencia al calor.

Otros aditivos utilizados para mejorar las propiedades de la lechada son los siguientes:

- Retardadores: Estos son empleados para incrementar el tiempo de fraguado de tal manera que la lechada se mantenga bombeable hasta que se haya ocupado todo el espacio anular a cementar,
- Bentonita: Permite trabajar sobre la densidad de la lechada dependiendo de las condiciones de resistencia a la fractura de la formación,
- Reductores de fricción: Estos facilitan la movilidad del fluido a lo largo del pozo disminuyendo la fricción generada a su paso. Ayudan a lograr un flujo turbulento durante el bombeo,
- Aditivos de control de pérdidas de fluido: Estos aditivos buscan evitar la pérdida de agua de la lechada hacia la formación,
- Aditivos para pérdidas de circulación: estos aditivos evitan que la lechada se pierda en la formación,
- Antiespumantes: Buscan eliminar la presencia de aire, evitar una baja estimación de densidad y evitar la cavitación en los equipos de mezclado y bombeo para garantizar la mezcla; y
- Aceleradores: Son utilizados en superficie donde existen bajas temperaturas y en zonas de pérdida de circulación para disminuir el tiempo de fraguado.

Previo a iniciar el proceso de cementación es necesario tener pleno conocimiento de las condiciones del pozo, diseño, materiales, zonas de pérdidas de circulación.

#### **4.1.2 CONDICIONES DE ZONA DE ESTUDIO**

El caso de estudio propuesto asume condiciones de alta montaña en América del sur. Estas condiciones se mantienen sobre todo en el margen pacifico de América del sur debido a la convergencia de las placas de Nazca y Sudamericana que levantó la cordillera de los andes a estas latitudes.

La zona escogida se ubica a 3500 m.s.n.m., está caracterizada por un relieve fuertemente irregular y sus accesos son de ripio, por donde circulan vehículos medianos y pequeños.

Los estudios de exploración superficial (geológico-estructurales, geoquímicos y geofísicos) definieron una zona donde temperaturas entre 235 °C y 265°C se alcanzan a una profundidad de 1500 m, lo que define un potencial recurso geotérmico de alta entalpía. La zona se destaca por sus manantiales de aguas calientes, emanaciones de gases a lo largo de diversos sistemas de fallas y la ausencia de fumarolas. Se asume que este campo no ha sido explotado previamente.

##### **4.1.2.1 MODELO CONCEPTUAL**

El modelo conceptual está representado en la figura 4. Consta de un reservorio profundo, dos capas sello definidas por geofísica y distintas estructuras vinculantes. La capa sello más superficial se desarrolló sobre las rocas del basamento cretácico, está compuesta por arcillas ricas en esmécticas, subyace a las rocas volcánicas terciarias y cuaternarias y conforma el techo de un acuífero confinado con aguas de baja temperatura. La constitución de esta capa impermeable está asociada a la condensación de vapor y gas que resulta en la alteración de las rocas.

La capa sello más profunda constituye el techo del reservorio. La existencia de esta capa no fue corroborada con los resultados geofísicos, aunque se infiere que su formación fue favorecida por a) su correspondencia con un nivel de ebullición del fluido b) una unidad litológica de baja permeabilidad y c) por procesos de precipitación mineral (p.ej. calcita y cuarzo) en zonas permeables que actuaron previamente como canales de ascenso del fluido.

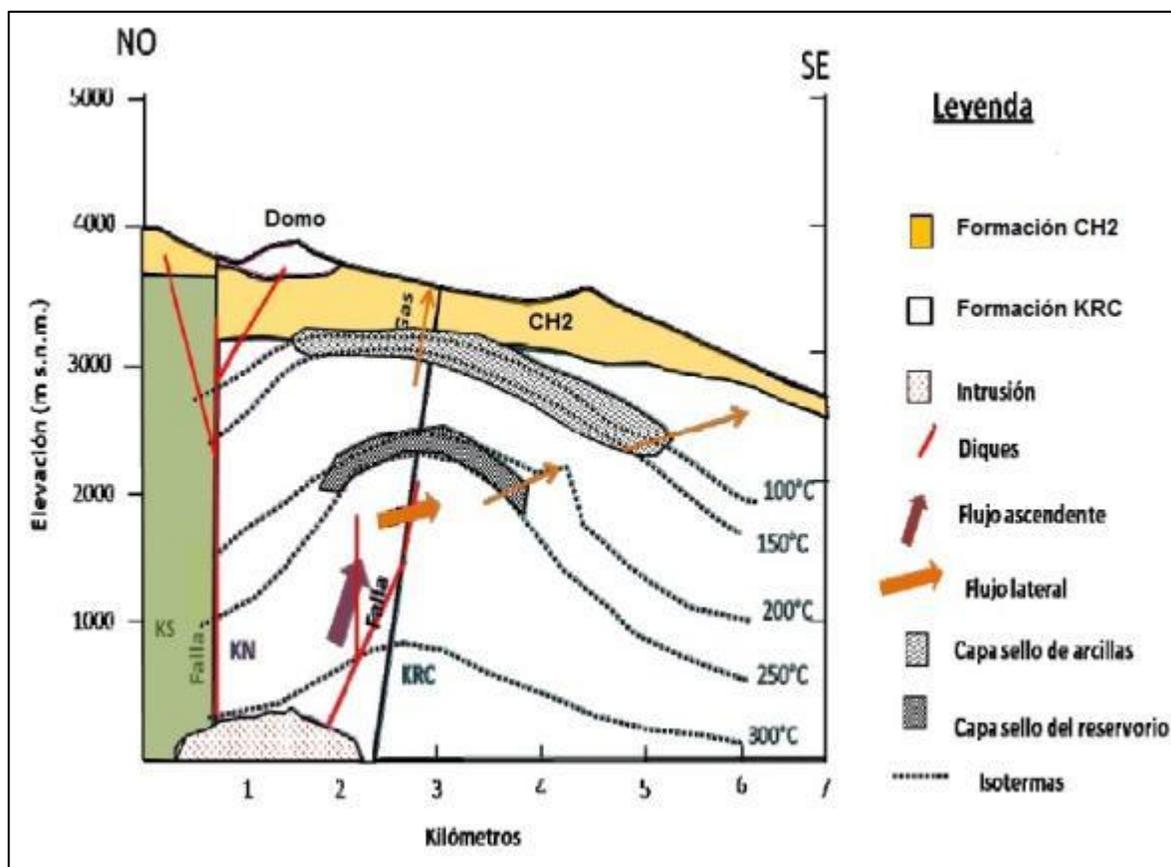


Figura 4. Modelo Conceptual para primer caso de Estudio. En esta figura se detalla la geología esperada y la capa sello del Reservorio. El pozo planteado busca encontrar la falla que atraviesa la capa sello del reservorio.

En la Figura 4 se observa una falla que se desarrolla desde el basamento y se propaga desde el basamento hasta la superficie, disectando tanto al reservorio como a ambas capas sello. Aunque esta falla es conocida como una simple línea en el mapa geológico, la falla puede ser una zona compleja compuesta por varios segmentos de falla intersecados con diferentes orientaciones. Una anomalía resistiva ubicada en el flanco sureste y sobre la zona de fallas es consistente con el control de estas estructuras sobre la migración y ascenso de los fluidos del sistema geotérmico.

Por último, entre las dos capas sello se infirió una zona de baja permeabilidad, con temperatura moderada y alta concentración gases, mayoritariamente CO<sub>2</sub>. En esta zona, los gases evolucionan composicionalmente y localmente migran a niveles superiores a través del acuífero confinado, donde se condensa el vapor de agua. De esta forma se explica la química y baja temperatura de las emanaciones de gases superficiales relevadas.

#### **4.1.2.2 GEOLOGÍA**

La secuencia litoestratigráfica esperada durante la tarea de perforación fue inferida mediante estudios geológicos previos. A nivel somero se encuentra la formación CH2, constituida por depósitos de flujos, piroclásticos del tamaño bloque y ceniza, intercalados con caídas de ceniza tipo escoria, flujos piroclásticos de ceniza y pómez, con caídas de pómez, domos dacíticos, escombros de material duro pero muy poroso, lavas basales de andesitas piroxenicas con olivino. Esta capa se estima que se encuentre entre las profundidades de 0-400m.

Una capa de arcillas se encuentra a continuación de la primera formación, se estima un espesor de 200 m.

Seguidamente, se extiende una nueva formación KRC que consiste principalmente de lavas masivas y rocas volcánicas clásticas intercaladas por lentes locales de areniscas. Las lavas son de composición basáltica a basandesítica, calco-alcalinas. Las rocas son compactas, de coloración verde y generalmente tienen venillas de cuarzo con abundante epidota. La matriz estácloritizada y las vesículas en las rocas están rellenas con cuarzo y/o zeolitas blancas. Se estima un espesor de 600 m.

Aproximadamente a los 1050 m de profundidad, se encuentra una nueva capa de un espesor estimado de 150 m; se asume es el techo de lo que sería el reservorio. A partir de esta profundidad se estima continúe la formación KRC hacia el interior.

#### **4.1.2.3 DISEÑO PROPUESTO**

Los diseños de pozos de exploración planteados pretenden alcanzar la isoterma de 250°C. Para esto se requiere alcanzar una profundidad de 1550 m aproximadamente, considerando que se estableció el punto de perforación a una altura de 3500 m.s.n.m.

En el presente estudio, se propone dos diseños de pozo vertical: el primero, un pozo de diámetro convencional y el segundo, un pozo del tipo Slim Hole.

## 4.2 PRIMER CASO: POZO DE DIÁMETRO CONVENCIONAL

Se propone para diseño un pozo de exploración vertical de diámetro en el fondo de 5½". Este diámetro corresponde al liner que está en contacto con el reservorio.

### 4.2.1 PERFIL DE POZO Y SELECCIÓN DE MATERIALES

El diseño inicia definiendo el perfil del pozo que se pretende obtener. En este punto se debe conocer cuáles son los requerimientos del pozo y cuál será su finalidad de uso.

El pozo se establece en 4 etapas iniciando con un agujero de 17½" y se culmina con una barrena de 6¼". En la Tabla 1 se muestran las etapas del pozo planteado, indicando los diámetros de agujero que se perforarán por etapa y el diámetro de tubería que se utilizará en cada una. En las etapas de 1 a 3 se utiliza casing para el revestimiento del agujero, mientras que en la etapa 4 se emplea un liner, es decir un tubo ranurado, el cual es el que se encuentra en contacto con el reservorio y es por donde el recurso geotérmico ingresa hacia el pozo hasta ascender a superficie. También se muestra en la tabla las características de la tubería como el peso lineal y el grado de acero a emplearse; y por último se muestra el tipo de junta que se utiliza en la tubería.

Los diámetros empleados son medidas que se encuentran estandarizadas en perforación. El tipo de tubería y grado seleccionado son valores comunes empleados en geotermia.

En la Figura 5 se muestra el perfil del pozo propuesto en este primer caso. En este diagrama se puede observar las medidas de diámetros de tuberías utilizadas en cada etapa y las profundidades alcanzadas en cada una.

El liner es una tubería que no se coloca desde el nivel cero, como el resto de etapas, sino que está en el fondo del pozo con una sujeción especial colocado en el casing de la etapa 3. Normalmente, la tubería se instala 50 m sobre el nivel final de la etapa anterior. En este caso la tubería iniciaría (en el interior de la etapa 3) a partir de la profundidad 1000 m hasta alcanzar la profundidad final de 1550 m.

Tabla 1. Diámetros de Agujero y Tuberías según la profundidad del pozo. Características de la tubería a emplearse

ETAP A	DIÁMETR O DE AGUJERO	DIÁMETR O DE TUBERÍA	PROFUNDIDA D (m)	CARACTERÍSTICAS DE TUBERÍA		TIPO DE JUNTA
				PESO LINEAL	GRADO ACERO	
1	17 1/2"	13 3/8"	100	54.5 lb/ft	K-55	Junta de conexión Buttress
2	12 1/4"	9 5/8"	600	36 lb/ft	k-55	Junta de conexión Buttress
3	8 1/2"	7"	1050	29.7 lb/ft	K-55	Junta de conexión Buttress
4	6 1/4"	5 1/2"	1550	20 lb/ft	K-55	Junta Integral Hydrill

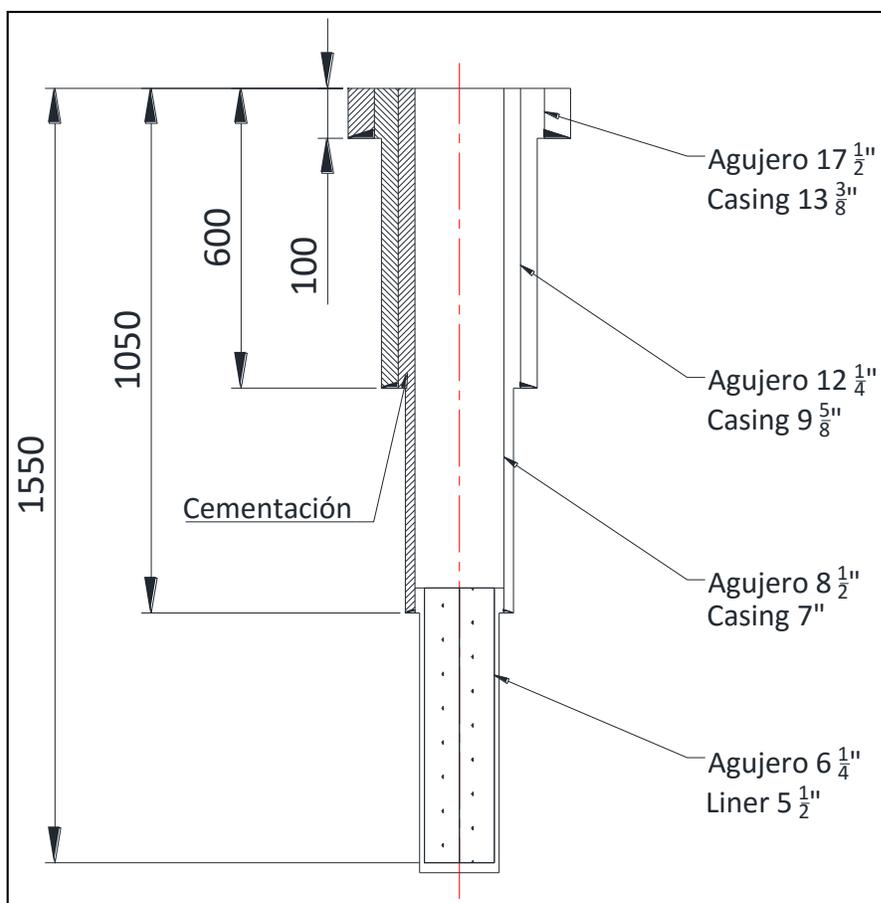


Figura 5. Perfil esperado de pozo de exploración planteado en el primer caso. Se detallan las etapas empleadas desde el nivel 0 hasta alcanzar los 1550 m de profundidad.

Con el perfil del pozo definido, se continúa con la selección de las barrenas a emplearse durante la perforación. En este punto es importante determinar las cantidades que se deberán mantener en stock. Las barrenas con el uso están sujetas a daños y afectaciones que pueden llevar a su reemplazo. Por lo tanto, en el stock de este tipo de materiales siempre debe preverse elementos o piezas adicionales, para evitar el retraso en las actividades.

Para este pozo por ser de diámetros convencionales, se empleará en las 4 etapas barrenas del tipo tricónicas.

Los núcleos testigos son importantes obtener durante la perforación de las formaciones. Estas operaciones de corte se van a realizar en la segunda y tercera etapa con una broca tipo corona de 6" para núcleos, y en la última etapa con una broca corona de 4½".

En la Tabla 2 se muestran datos del tiempo de duración estimado y la velocidad de avance durante la perforación, se toma como base, la experiencia de los campos geotérmicos de El Salvador.

Tabla 2. Datos de duración y velocidad de avance de barrenas.

BARRENA	TIEMPO DE DURACIÓN [horas]	VELOCIDAD DE AVANCE [m/h]	OBSERVACIONES
Barrena tricónica 17½"	100	1	
Barrena tricónica 12¼"	80	3	
Barrena tricónica 8½"	60	4	
Barrena tricónica 6¼"	40	6	Más dureza

Los diámetros de casing a emplearse en el revestimiento de cada etapa son seleccionados en base a los agujeros perforados. Hay diámetros y diseños típicos en la perforación profunda, en los cuales hay una diferencia aproximada entre 1 – 3 pulgadas entre el diámetro del agujero y el diámetro externo del casing; lo anterior está directamente relacionado al tamaño del diámetro del agujero, si el diámetro es mayor la diferencia de diámetros es mayor.

En la Tabla 3 se muestra los diámetros de tubería seleccionados por etapa, el tipo de acero y el tipo de junta entre tuberías a utilizarse.

Los accesorios y materiales que se requieren durante la perforación deben ser registrados adecuadamente para cada etapa. En este registro se deberá detallar los consumibles necesarios para perforar y los materiales y accesorios que se emplearán en el revestimiento.

En la Tabla 4 se muestra este registro detallado según la etapa y la profundidad alcanzada. Adicionalmente, se detalla los materiales a emplearse para el montaje del cabezal del pozo. Las medidas seleccionadas para el cabezal son utilizadas comúnmente para los diámetros de pozos seleccionados en campos geotérmicos del El Salvador.

Tabla 3. Diámetro de tuberías seleccionado por etapa, características de la tubería y tipos de junta.

ETAPA	DIÁMETRO DE AGUJERO	DIÁMETRO DE TUBERÍA	PROFUNDIDAD (m)	CARACTERÍSTICAS DE TUBERÍA		TIPO DE JUNTA
				PESO LINEAL	GRADO ACERO	
1	17 1/2"	13 3/8"	100	54.5 lb/ft	K55	Junta de conexión Buttress <sup>1</sup>
2	12 1/4"	9 5/8"	600	36 lb/ft	k55	Junta de conexión Buttress
3	8 1/2"	7"	1050	29.7 lb/ft	K55	Junta de conexión Buttress
4	6 1/4"	5 1/2"	1550	20 lb/ft	K55	Junta Integral <sup>2</sup>

Tabla 4. Accesorios y materiales requeridos para el completamiento de pozo propuesto.

	ETAPAS			
	1	2	3	4
<b>DIÁMETRO DE AGUJERO</b>	17 1/2"	12 1/4"	8 1/2"	6 1/4"
<b>PROFUNDIDAD</b>	100	600	1050	1550
<b>A - BARRENAS (Cantidades)</b>				
TRICÓNICAS	2	3	3	4
CORONA 6"		1		
CORONA 4 1/2"				1
<b>B - ACCESORIOS DE REVESTIMIENTO</b>				
B1. ZAPATAS, diám. (cant.)	13.375 (1)	9.625 (1)	7.625 (1)	5.5 zapata guía
B2. COLLAR FLOTADOR, diam. (cant.)		9.625 (1)	7.625 (1)	
B3. CENTRALIZADOR	8	25	35	
B4. COLGADOR (cantidad)				Tipo mecánico cuña sencilla (1)
<b>C. TUBERÍA DE REVESTIMIENTO</b>				
C1. TUBERÍA 13 3/8"	125mts tubos	(14)		

<sup>1</sup>La junta Buttress emplea una camisa con rosca interna para realizar la unión entre dos tuberías. Las tuberías tienen en cada extremo la rosca pin en su propio cuerpo.

<sup>2</sup>La Junta Integral realiza la unión directa entre tuberías sin emplear ningún elemento adicional, como una camisa. Ambas roscas (pin y caja) son maquinadas en el cuerpo de cada tubo.

**Continua Tabla 4**

C2. TUBERÍA 9 5/8"		650mts (73 tubos)		
C3. TUBERÍA 7 5/8"			1100mts (123 tubos)	
C4. TUBERÍA 5 1/2" TRA				550mts (62 tubos)
<b>D. ACCESORIOS DE CABEZAL</b>				
D1. BRIDA DE CABEZAL		10" (1) API-2000		
D2. CARRETE DE EXPANSIÓN	10x8" 2000psi (1) 2 SALIDAS LATERALES BRIDADAS 2"			
D3. VÁLVULAS LATERALES		Compuerta Bridadas 2" (2)		
D4. VÁLVULA MAESTRA		COMPUERTA 8" SERIE 2000 (1)		
D5. CONTRABRIDAS		2" (2) Y 8" (1 SOLDABLE)		

Con el perfil de pozo definido y sus profundidades, se seleccionan los accesorios para revestimiento. En este caso se empleará una zapata por cada etapa, empleando una zapata guía en la 4ta Etapa. Se debe utilizar un collar flotador en la segunda etapa y otro en la tercera etapa, esto busca reducir la contaminación de las lechadas de cementos con el uso de estos accesorios.

El casing a utilizar es Rango 2 (longitud de cada pieza de 9 m. aproximadamente, así mismo este revestimiento debe ser centralizado en el agujero de tal manera que se garantice la uniformidad de la cementación en los espacios anulares. Para esto se empleará centralizadores en las etapas 1, 2 y 3.

El liner que se empleará en la 4ta etapa es instalado por medio del uso de un colgador que se lo coloca mecánicamente en la 3ra etapa.

#### 4.2.2 FLUIDOS DE PERFORACIÓN

Los fluidos de perforación deben ser diseñados de acuerdo al pozo que se va a perforar. Sus características dependerán de las temperaturas y la profundidad en las que se encuentren perforando.

Para el presente caso se ha considerado características típicas utilizadas en geotermia en pozos con profundidades y temperaturas similares. En las Tabla 5 a 7 se muestran las propiedades fisicoquímicas que se busca obtener en el fluido.

Como se mencionó anteriormente, para este caso se emplea un lodo a base de agua y bentonita. Este fluido debe garantizar la limpieza del pozo, el traslado de recortes a superficie, la estabilidad del pozo, el enfriamiento de la herramienta, la lubricación, entre otras funciones, que deben ser controladas por especialistas.

El Ingeniero de lodos determina las concentraciones de bentonita y demás aditivos que deberá emplear para alcanzar las propiedades requeridas.

En este punto se debe calcular los volúmenes de fluido que se van a requerir durante la perforación de cada etapa.

Tabla 5. Propiedades fisicoquímicas a obtener con el fluido de perforación en la Etapa I

<b>PROPIEDADES FISICOQUÍMICAS</b>	<b>UNIDAD</b>	<b>INTERVALO</b>
Densidad	g/cc	1.04 - 1.10
Viscosidad Marsh	s/l	75 - 85
Viscosidad Plástica	cPs	16 – 28
Punto de Cedencia	lb/100 pie <sup>2</sup>	14 – 30
Resistencia de Gel - 10"	lb/100 pie <sup>2</sup>	06-12
Resistencia de Gel - 10'	lb/100 pie <sup>2</sup>	10-24
Filtrado API (30 min)	ml	12-20
Cake	mm	2–4
Ph		9 –11
Contenido de Arena	% V	0.20 - 0.3
Contenidos Sólidos	% V	03-06

Tabla 6. Propiedades fisicoquímicas a obtener con el fluido de perforación en la Etapa II.

<b>PROPIEDADES FISICOQUIMICAS</b>	<b>UNIDAD</b>	<b>INTERVALO</b>
Densidad	g/cc	1.04 - 1.10
Viscosidad Marsh	s/l	55 –65
Viscosidad plástica	cP	16 – 24
Punto de cedencia	lb/100 pie <sup>2</sup>	14 –26
Resistencia de Gel - 10"	lb/100 pie <sup>2</sup>	6– 12
Resistencia de Gel - 10'	lb/100 pie <sup>2</sup>	8-20
Filtrado API (30 min)	ml	12-16
Cake	Mm	2–3
pH		09-10
Contenido de Arena	% V	0.25 - 0.3
Contenidos Sólidos	% V	3 –6

Tabla 7. Propiedades fisicoquímicas a obtener con el fluido de perforación en la Etapa III.

PROPIEDADES FISICOQUIMICAS	UNIDAD	INTERVALO
Densidad	g/cc	1.04 - 1.10
Viscosidad Marsh	s/l	40 - 50
Viscosidad plástica	Cps	14 – 18
Punto de cedencia	lb/100 pie <sup>2</sup>	12 – 20
Resistencia de Gel - 10"	lb/100 pie <sup>2</sup>	4 - 8
Resistencia de Gel - 10'	lb/100 pie <sup>2</sup>	8 - 16
Filtrado API (30 min)	ml	8 - 12
Cake	mm	1 – 2
pH		9 - 10
Contenido de Arena	% V	0.25 – 0.3
Contenidos Sólidos	% V	2 - 5

Para el caso de estudio se asumirá que para el sistema de circulación de fluidos se cuenta con 3 tanques de 30m<sup>3</sup> cada uno, para mantener un volumen constante del fluido en superficie de 90m<sup>3</sup>. Este volumen debe permanecer constante durante las tres etapas de perforación. La variación de este valor puede indicar problemas en la perforación como entrada en zonas de pérdida de circulación, si el fluido empieza a disminuir.

Adicional al volumen de los tanques, se calcula el volumen de circulación que debe existir en el interior del pozo. Aquí se considera los volúmenes de agujeros abiertos, el volumen en espacios anulares, el volumen de desplazamiento por la sarta de perforación y el volumen contenido en la sarta.

Para el presente estudio y para facilitar los cálculos, se ha considerado el volumen geométrico de los agujeros abiertos y zonas con revestimiento, el volumen interno del casing.

En las Tabla 8 a la 10 se muestran los volúmenes de fluido que se requieren durante la perforación de cada etapa del 1 a la 3.

Tabla 8. Volumen estimado para la perforación de la Etapa I. Para el cálculo se considera el diámetro del agujero de 17½" y la profundidad de 100m.

Volumen en Superficie (m <sup>3</sup> )	90
Volumen de lodo en anular (m <sup>3</sup> )	18
Volumen de Trabajo(m <sup>3</sup> )	108

Tabla 9. Volumen estimado para la perforación de la Etapa II. Para el cálculo se considera el diámetro del agujero de 12¼” y la profundidad de 500m y el volumen contenido por el casing de 13¾” de la primera etapa.

Volumen en Superficie (m <sup>3</sup> )	90
Volumen en espacio anular (m <sup>3</sup> )	53
Volumen Total de Intervalo(m <sup>3</sup> )	143

Tabla 10. Volumen estimado para la perforación de la Etapa III. Para el cálculo se considera el diámetro del agujero de 8 1/2” y la profundidad de 450m y el volumen contenido por el casing de 9⅝” de la segunda etapa.

Volumen en Superficie (m <sup>3</sup> )	90
Volumen en espacio anular (m <sup>3</sup> )	47
Volumen Total de Intervalo(m <sup>3</sup> )	137

Conocidas las concentraciones y los volúmenes requeridos con simple matemática se puede estimar las cantidades de cada producto requerido. Las cantidades finales dependerán de las presentaciones en que se comercialice cada producto. Para este caso se han considerado las presentaciones comercializadas en el mercado de El Salvador.

En la Tabla 11 se detalla las cantidades requeridas de cada producto por etapa de perforación y totales en toneladas.

Tabla 11. Cantidades totales de productos en toneladas requeridos para la perforación total del pozo.

MATERIALES	ETAPAS				TOTAL
	17½”	12¼”	8½”	6¼”	Toneladas
Bentonita High Yield	8.00	10.00	8.00	-	26.00
Soda Caustica	1.00	1.00	1.00	1.00	4.00
CMC HV	1.00	1.00	1.00	2.00	5.00
Tannathin (Leonardita)	-	-	1.00	-	1.00
Caustilig	1.00	1.00	1.00	-	3.00
Black Sack	1.00	1.00	1.00	-	3.00
Spercene CF (Lignosulfonato)	-	1.00	1.00	-	2.00
Detergente de perforación	1.00	1.00	1.00	-	3.00
PHPA (19kg/drum)	-	-	-	1.00	1.00
Goma Xantica (16 kg/sx)	-	-	-	2.00	2.00

Las cantidades mostradas en la Tabla 11 para la etapa 4 (diámetro 6¼") son calculadas de una manera distinta a las etapas anteriores.

Se considera que esta etapa será perforada en su totalidad con pérdida de circulación total. En esta zona, al estar cerca al reservorio, se espera esta condición pues aumenta la porosidad de la formación que es lo que permite la obtención del recurso geotérmico.

Para este caso, se considera que no existe retorno de fluido a superficie, por lo tanto, los productos que se emplean permiten diluir el lodo residual de la anterior etapa y permite limpiar las paredes del pozo para eliminar cualquier contaminante que podría entrar en contacto con el recurso.

Para el cálculo se ha considerado un volumen requerido de 536m<sup>3</sup> el cual se pierde a través de las fracturas en la formación. El cálculo de las cantidades se las realiza de igual manera que en las etapas anteriores empleando el volumen y las concentraciones establecidas para esta etapa.

### 4.2.3 CEMENTACIÓN

Para este pozo, el proceso de cementación se lo llevará a cabo entre las etapas 1 a 3. Es decir, hasta llegar a la profundidad de 1050 m con un agujero de 8½" y un casing de 7".

Se considera realizar la cementación empleando el método por stab-in, dicho método permite cierta flexibilidad en el proceso de cementación, por la presencia de pérdidas de circulación durante la perforación de pozos geotérmicos. En todo caso en general, los métodos a emplearse dependerán del tipo de pozo, la profundidad y las condiciones del mismo.

En la Tabla 12 se muestra las cantidades de materiales requeridos para la cementación del pozo. Se observa las cantidades de cemento, agua y aditivos necesarios para esta tarea. Los cálculos con los que fueron obtenidas estas cantidades se detallan en el **Anexo Tablas 36 a 38**.

Tabla 12. Materiales y cantidades requeridas para cementación de pozo de diámetro convencional.

DESCRIPCIÓN DE MATERIALES	Requerimiento de materiales						
	CASING			Totales en Sk y Gls.		Totales Ton, Kg. Y Lts	
	13¾"	9 ⅝"	7"				
Cemento clase "H" 94Lbs/Sk <sup>3</sup>	455	1,12 2	535	2,112	Sks.	90.04	Ton
Silice 55.125 Lbs/Sk	271	670	319	1,260	Sks.	31.51	Ton
Dispersante 50 Lbs/Sk	4	7	4	14	Sks.	328	Kg
Antiespumante	9	22	11	42	Gls.	160	Lts

<sup>3</sup>LBS/Sk, hace referencia al peso en libras que tiene cada saco del material indicado.

Continúa Tabla 12

Reductor de filtrado	9	370	80	460	Gls.	1,740	Lts
Retardador de fraguado	-	63	8	71	Gls.	268	Lts
Agua de mezcla (primaria)	7	18	10	35	M <sup>3</sup>	35,499	Lts
Agua de mezcla (complem.)	3.47	8.09	2.94	15	M <sup>3</sup>	14,504	Lts

### 4.3 SEGUNDO CASO: POZO SLIM HOLE

El diseño del pozo tipo Slim Hole fue realizado para una terminación de diámetro HQ (3 1/2"), para el mismo campo geotérmico en exploración, esto con el fin de comparar ambas tecnologías e identificar los principales aspectos de ventajas / desventajas de una sobre la otra. A continuación se describirán los aspectos de diseño consideradas para este pozo.

#### 4.3.1 PERFIL DEL POZO Y SELECCIÓN DE MATERIALES

El diseño del pozo fue desarrollado para alcanzar el techo del reservorio a 1050 m, debido a que los pozos tipo Slim Hole son de diámetros pequeños, son más estables que uno de diámetro comercial, por ello se justifica el uso de 3 etapas solamente para alcanzar la misma profundidad que un pozo exploratorio convencional.

En la Tabla 13 se muestran las etapas del pozo Slim Hole, estos se muestra el resumen del diámetro de los agujeros a perforar, en donde solamente las etapas 1 y 2 se consideran con tubería de revestimiento, la etapa 3 se construirá con liner ranurado, el cual se considera colgado de la base de la etapa 2.

Tabla 13. Diámetros de agujero y tuberías de acuerdo a la profundidad del pozo. Características de la tubería a emplearse.

ETAPA	DIÁMETRO DE AGUJERO	DIÁMETRO DE TUBERÍA	PROFUNDIDAD (m)	CARACTERÍSTICAS DE TUBERÍA		TIPO DE JUNTA
				PESO LINEAL	GRADO ACERO	
1	8 1/2"	7"	300	29.7lb/ft	K55	Junta Integral
2	5 1/2"	5"	1050	11.5 lb/ft	k55	Junta Integral
3	3.78" HQ"	3 1/2" HQ	1550	9.20 lb/ft	J55	Junta Integral

En la Figura 6 se presenta el resumen del perfil del pozo diseñado, este se concentra en facilitar la visualización de los diámetros perforados y diámetro del casing utilizado.

Es importante destacar que la tubería liner que es colocada en la última etapa, se coloca desde 50 m de altura del fondo de la etapa anterior.

Posterior a definir por completo los diámetros necesarios para alcanzar el punto de interés de estudio es necesario definir las barrenas a emplearse para la perforación, para ello

se consideran la cantidad de barrenas en función de la proporción de horas aproximadas de duración de la misma y el avance de diseño (ver, Tabla 14), estos datos se basan en la experiencia del personal de perforación en campos geotérmicos en El Salvador.

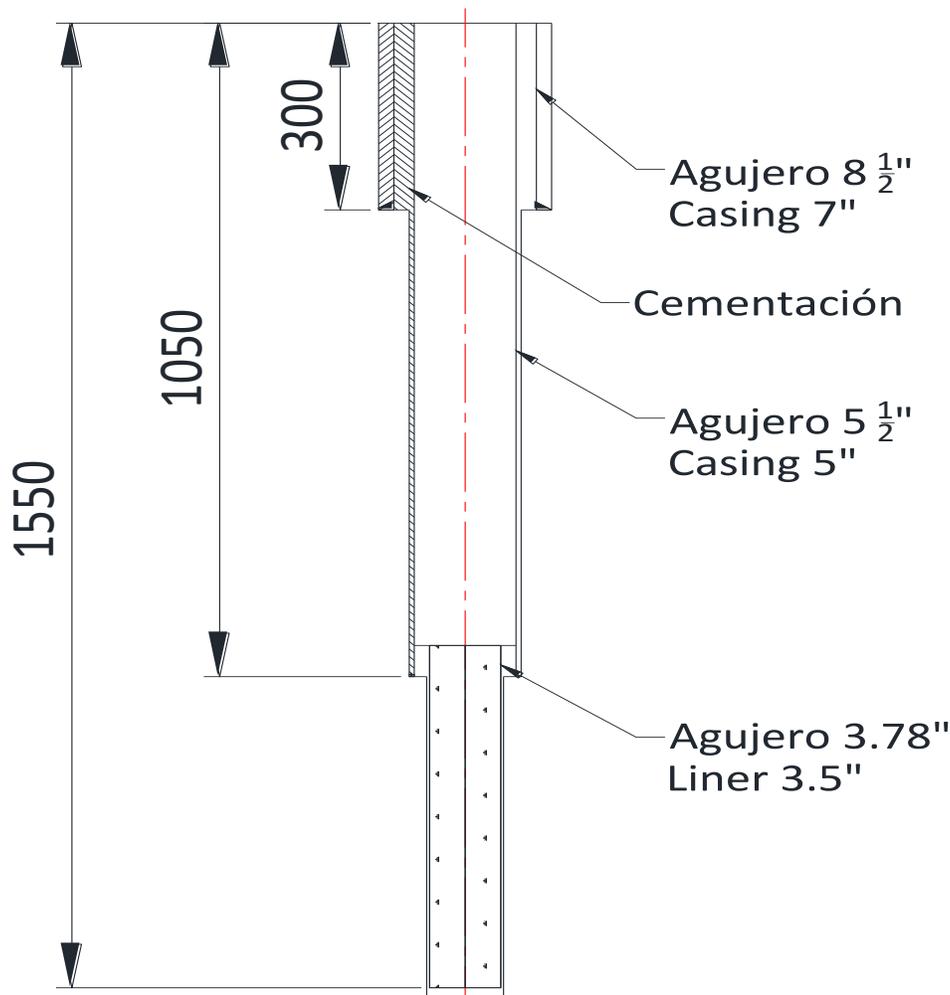


Figura 6. Perfil esperado de pozo de exploración planteado para el segundo caso. Se detallan las etapas empleadas desde el nivel 0 hasta alcanzar los 1550 m de profundidad.

La extracción de núcleos para actualización de modelos conceptuales es muy importante durante una perforación exploratoria, es por ello que la etapa final se considera perforación completa con una corona de diamantes de diámetro HQ (3.78").

Los diámetros de casing seleccionados en cada etapa se basan en el diámetro perforado. En cambio a un pozo convencional, este tipo de pozos (Slim Hole) las etapas a medida se alejan de la superficie las holguras entre agujero y casing se van haciendo más pequeñas (llegan hasta menos de  $\frac{1}{2}$ ").

Tabla 14. Datos de duración y avances de barrenas.

BARRENA	TIEMPO DE DURACIÓN [horas]	VELOCIDAD DE AVANCE [m/h]	OBSERVACIONES
Barrena tricónica 8 ½"	40	8	
Barrena tricónica 5 ½"	200	10	
Barrena de diamante HQ	150	10	Diámetro de 3.78", para extracción de núcleo.

La Tabla 15 muestra los diámetros de tubería seleccionadas por etapa, el tipo de acero y el tipo de junta entre tubería a utilizarse.

Tabla 15. Diámetro de tuberías seleccionado por etapa, características de la tubería y tipos de juntas.

ETAPA	DIÁMETRO DE AGUJERO	DIÁMETRO DE TUBERÍA	PROFUNDIDAD (m)	CARACTERÍSTICAS DE TUBERÍA		TIPO DE JUNTA
				PESO LINEAL	GRADO ACERO	
1	8 1/2"	7"	300	29.7lb/ft	K55	Junta de integral
2	5 1/2"	5"	1050	11.5 lb/ft	k55	Junta de integral
3	3.78" HQ"	3 1/2" HQ	1550	9.20 lb/ft	J55	Junta de integral

Los accesorios y materiales que se requieren durante la perforación deben ser registrados de forma ordenada y sistemática, el registro debe detallar los consumibles necesarios para perforar y los materiales y accesorios necesarios para el revestimiento, considerando las cantidades necesarios a poseer en bodega para no incurrir en un atraso durante el proceso de perforación por falta de materiales mencionados anteriormente. Este registro se presenta en la tabla 16, además son incluidos los materiales necesarios para el montaje de cabezal con medidas frecuentemente utilizada. En el caso de las tuberías se utilizaran de Rango 1 (6 m. de longitud) por el tipo de equipo a utilizar.

Tabla 16. Accesorios y materiales requeridos para implementación de pozo propuesto.

	ETAPAS		
	1	2	3
<b>DIAMETRO DE AGUJERO</b>	8 1/2"	5 1/2"	3.78 "
<b>PROFUNDIDAD</b>	100	800	1500
<b>A - BARRENAS (Cantidades)</b>			
BARRENA TRICÓNICA	2	2	
BARRENA DE DIAMANTE			2
<b>B - ACCESORIOS DE REVESTIMIENTO</b>			
B1. ZAPATAS STAB IN	7 (1)	5 (1)	ZAPATA. GUÍA 3.5" (1)
B2. COLLAR FLOTADOR		5 (1)	
B3. CENTRALIZADOR	9	67	
B4. SOLTADOR			1
<b>C. TUBERIA DE REVESTIMIENTO</b>			
C1. TUBERIA 7"	312mts (52 tubos)		
C2. TUBERIA 5"		1074mts (179 tubos)	
C3. TUBERIA 3 1/2"			558mts (186 tubos)
<b>D. ACCESORIOS DE CABEZAL</b>			
D1. BRIDA DE CABEZAL	6" (1) API-2000		
D2. CARRETE DE EXPANSION	6x6" 2000psi (1)		
D3. VALVULAS LATERALES	Compuerta Bridadas 2"		
D4. VALVULA MAESTRA	COMPUERTA 6" SERIE 2000		
D5. CONTRABRIDAS	2" (2) Y 6" (1 SOLDABLE)		

### 4.3.2 FLUIDOS DE PERFORACIÓN

Los fluidos de perforación son diseñados primeramente para extraer la formación triturada por la barrena, limpieza del pozo y además de lubricar el sistema de perforación. Las características de los fluidos de perforación serán altamente dependientes de la temperatura de formación a perforar.

Para el pozo Slim Hole solamente se utilizaran fluidos de perforación convencionales para las dos primeras etapas, la etapa final se utilizará un fluido especial para la perforación y extracción de núcleo.

En las Tabla 17y 18 se presentan las propiedades de los lodos de perforación para las dos primeras etapas. Este es un lodo a base de agua y bentonita.

Tabla 17. Propiedades fisicoquímicas a obtener con el fluido de perforación en la Etapa I.

PROPIEDADES FISICOQUÍMICAS	UNIDAD	INTERVALO
Densidad	g/cc	1.04 - 1.10
Viscosidad Marsh	s/l	75 - 85
Viscosidad Plástica	cPs	16 – 28
Punto de Cedencia	lb/100 pie <sup>2</sup>	14 – 30
Resistencia de Gel - 10"	lb/100 pie <sup>2</sup>	06-12
Resistencia de Gel - 10'	lb/100 pie <sup>2</sup>	10-24
Filtrado API (30 min)	ml	12-20
Cake	mm	2–4
Ph		9 –11
Contenido de Arena	% V	0.20 - 0.3
Contenidos Sólidos	% V	03-06

Tabla 18. Propiedades fisicoquímicas a obtener con el fluido de perforación en la Etapa II.

PROPIEDADES FISICOQUÍMICAS	UNIDAD	INTERVALO
Densidad	g/cc	1.04 - 1.10
Viscosidad Marsh	s/l	55 –65
Viscosidad plástica	cP	16 – 24
Punto de cedencia	lb/100 pie <sup>2</sup>	14 –26
Resistencia de Gel - 10"	lb/100 pie <sup>2</sup>	6– 12
Resistencia de Gel - 10'	lb/100 pie <sup>2</sup>	8-20
Filtrado API (30 min)	ml	12-16
Cake	Mm	2–3
pH		09-10
Contenido de Arena	% V	0.25 - 0.3
Contenidos Sólidos	% V	3 –6

Para la tercera etapa fue necesario un fluido de perforación a base de polímero, soda caustica, lignita y lubricante, esto con el fin de disminuir el torque.

Con base a este intervalo de concentración fueron realizados los cálculos de volúmenes de fluido a requerir durante cada etapa de perforación.

Para este caso se asumirá que el sistema de bombeo y circulación de lodos cuenta con 2 tanques de 15 m<sup>3</sup> cada uno, para mantener el volumen constante de fluido en la superficie además de regenerar (retirar la mayor cantidad de sólidos disueltos y enfriar el fluido a temperaturas de operación para no dañar las bombas), además de observar los niveles de líquido para identificar las pérdidas de circulación.

Es importante calcular la cantidad mínima de lodo que debe circular dentro del agujero en perforación por las dos primeras etapas, para ello fue necesaria la simplificación geométrica que el espacio dentro del agujero perforado será un perfecto cilindro, además para la segunda etapa se considera el cilindro generado por la etapa cementada y con la tubería de casing debidamente fijada.

En las tablas 19 a 21 se presentan los volúmenes de fluido necesario para la perforación de la etapa I y II:

Tabla 19. Volumen estimado para perforación de la etapa I.

Volumen en Superficie (m <sup>3</sup> )	30
Volumen de lodo en anular (m <sup>3</sup> )*	13
Volumen de Trabajo(m <sup>3</sup> )	43

Para los cálculos fueron considerados el diámetro del agujero de 8 ½" y una altura de 300m.

Tabla 20. Volumen estimado para perforación de la etapa II.

Volumen en Superficie (m <sup>3</sup> )	30
Volumen de lodo en anular (m <sup>3</sup> )*	20
Volumen de Trabajo(m <sup>3</sup> )	50

Para los cálculos fueron considerados el diámetro del agujero de 5 ½" y una altura de 750m, además del volumen necesario para sobrepasar la etapa I, con un diámetro de 7" y una altura de 300m.

Tabla 21. Volumen estimado para perforación de la etapa III.

Volumen en Superficie (m <sup>3</sup> )	30
Volumen de lodo en anular (m <sup>3</sup> )*	32
Volumen de Trabajo(m <sup>3</sup> )	62

La cantidad a adquirir por cada producto (ver, Tabla 22) fueron calculadas a partir de los volúmenes totales por cada aditivo y volumen total de fluido de perforación. Para este caso se ha considerado las presentaciones comercializadas en el mercado de El Salvador.

Tabla 22. Cantidades totales de productos en sacos o barriles requeridos para la perforación total del pozo.

MATERIALES	ETAPAS			TOTAL (sacos o drum)
	8½"	5½"	3.78"	
Bentonita High Yield (22.72 kg/Sk)	133.00	8.00	-	26.00
Soda Caustica (25 kg/Sk)	2.00	1.00	5.00	4.00
CMC HV (25 kg/Sk)	1.00	1.00	2.00	5.00
Caustilig (22.72 kg/Sk)	2.00	1.00	-	1.00
Black Sack (25 kg/Sk)	1.00	1.00	-	3.00
Detergente de perforación (55 gal/drum)	1.00	1.00	-	3.00
PHPA (19kg/drum)	-	-	13.00	1.00
Goma Xantica (16 kg/Sk)	-	-	12.00	2.00

Las cantidades calculadas para la etapa 3 (diámetro HQ, 3.78") son determinadas de forma diferente a las etapas anteriores. Se considera que esta etapa será perforada en su totalidad con pérdida de circulación total. En esta zona, al estar cerca al reservorio, se espera esta condición pues aumenta la porosidad de la formación que es lo que permite la obtención del recurso geotérmico.

Para este caso, se considera que no existe retorno de fluido a superficie, por lo tanto, los productos que se emplean permiten diluir el lodo residual de la anterior etapa y permite limpiar las paredes del pozo para eliminar cualquier contaminante que podría entrar en contacto con el recurso.

### 4.3.3 CEMENTACIÓN

Para la propuesta de perforación de un pozo tipo Slim Hole se realizara cementación de las etapas 1 y 2. Es decir llega a la profundidad de 1050m con un agujero de 5 ½" y un casing de 5".

Se considera realizar cementación empleando el método por stab-in. El método a emplearse dependerá del tipo de cementación a realizar, este se realiza con las barras HQ equipadas con un Stinger. En la Tabla 23 se muestran las cantidades de materiales requeridos para la fabricación de la lechada de las dos primeras etapas. Los cálculos con los que fueron obtenidas estas cantidades se detallan en el ANEXO Tabla 39 - 40.

Tabla 23. Materiales y cantidades requeridas para la cementación de un pozo tipo Slim Hole.

Requerimiento de materiales						
DESCRIPCIÓN DE MATERIALES	Casing		Totales en Sk y Gl		Totales en Sk, Kg y Lt	
	7"	5"				
Cemento clase "H" 94Lbs/Sk <sup>4</sup>	382	192	575	Sks.	24.49	Ton
Sílice 55.125 Lbs/Sk	228	115	343	Sks.	8.57	Ton
Dispersante 50 Lbs/Sk	3	1	5	Sks.	102	Kg
Antiespumante	8	4	11	Gls.	43	Lts
Reductor de filtrado	8	63	71	Gls.	269	Lts
Retardador de fraguado	-	11	11	Gls.	41	Lts
Agua de mezcla (primaria)	7	3	11	m <sup>3</sup>	10550	Lts
Agua de mezcla (complem.)	1.93	1.11	3	m <sup>3</sup>	3046	Lts

<sup>4</sup>LBS/Sk, hace referencia al peso en libras que tiene cada saco del material indicado.

## 5- PROGRAMACIÓN DE PERFORACIÓN DE POZO CONVENCIONAL EXPLORATORIO y SLIM HOLE.

El programa de perforación muestra en detalle los tiempos en que se desarrollarán las actividades planificadas para la perforación del pozo exploratorio y Slim Hole. Tomando como parámetros estudios de la elaboración de otros pozos similares y algunas suposiciones con algunos tiempos en el desarrollo de la perforación.

### 5.1 POZO EXPLORATORIO CONVENCIONAL.

#### 5.1.1 SECUENCIA Y DESCRIPCIÓN DEL PROGRAMA DE TRABAJO

##### 5.1.1.1 PREPARATIVOS INICIALES

Los preparativos iniciales es la parte en donde se incluye el acceso al lugar de perforación, construcción de la plataforma, instalación de equipo de perforación, preparativos administrativos y pruebas de equipo, siendo la construcción de la plataforma con el mayor tiempo en la realización. (60 días aproximadamente)

##### 5.1.1.2 PERFORACIÓN

Consta de cuatro etapas, la profundidad total 1550 m, las estimaciones para los tiempos de perforación en cada etapa se calculó mediante la velocidad de avance de la barrena (ver, Tabla 24).

Estas etapas llevan un procedimiento de revestimiento que consiste en la instalación y conexión de tubería y la preparación de los lodos de perforación con sus respectivos aditivos dependiendo de la profundidad de la perforación.

Tabla 24. Descripción de parámetros para perforación de pozo convencional.

<b>ETAPA I</b>	
Diámetro:	17 1/2"
Diámetro tubería de revestimiento:	13 3/8"
Profundidad final:	100 m
Velocidad de perforación:	1 m/h
<b>ETAPA II</b>	
Diámetro:	12 1/4"

**Continúa Tabla 24**

Diámetro tubería de revestimiento:	9 5/8"
Profundidad final:	600 m
Velocidad de perforación:	3 m/h
Esta etapa es similar a la primera, aquí se agrega la realización de pruebas de operación BOP y se estima que a partir de esta etapa sean necesarios los controles de pérdidas de circulación mediante el uso de tapones de cemento	
<b>ETAPA III</b>	
Diámetro:	8 1/2"
Diámetro tubería de revestimiento:	7"
Profundidad final:	1050 m
Velocidad de perforación:	4 m/h
La característica principal de la etapa III son los registros que se realizan como registros estáticos de presión-temperatura, registros estáticos de formación y registros de recuperación térmica.	
<b>ETAPA IV</b>	
Diámetro:	6 1/4"
Diámetro tubería de revestimiento:	5 1/2"
Profundidad final:	1550 m
Velocidad de perforación:	6 m/h
En la etapa IV se realiza la instalación y conexión de liner y registros de inyektividad y pruebas de absorción e inyektividad	

Las actividades de verificación de parámetros de operación, parámetros de fluidos de operación, control de geología son ejecutadas en todas las etapas y su control es diario.

La Tabla 25 detalla los tiempos estimados para cada actividad que es necesario realizar para ejecución de la perforación de un pozo geotérmico convencional, es necesario aclarar que los mismos tiempos se consideran con holgura para asumir problemas relacionados a pérdidas de circulación o algún imprevisto que requiera paro de actividades.

Tabla 25. Programa de perforación de pozo convencional, tiempos de ejecución estimados para cada actividad a desarrollar para perforación de la propuesta de pozo convencional.

<b>PREPARATIVOS INICIALES</b>	<b>DURACIÓN</b>	
Construcción Civil de Accesos y Plantel	60	días
Preparación documentos administrativos para servicios de pozo	7	días
Definir, ubicar e instalar equipos de suministro de agua	5	días
Movilización de Equipo Perforación y Montaje	14	días
Pruebas de operación del equipo	2	días

Continúa Tabla 25

<b>PERFORACIÓN</b>	<b>Duración</b>	
<b>PRIMERA ETAPA</b>		
Perforación hasta la profundidad de 100m, tubería 13 3/8"	3	días
Verificar parámetros de operación	Diario	
Parámetros fluidos de operación	Diario	
Control de Geología de pozos	Diario	
Anclaje de tubería		
<b>REVESTIMIENTO DE POZO</b>		
Instalación y conexión de tubería 13 3/8"	1.5	días
Ubicación de centralizadores		
Cementación		
Mezclado de productos, preparación de lechada e inyección en el pozo		
Tiempo de fraguado		
Instalación del cabezal de perforación y colocación de preventores	0.5	días
<b>SEGUNDA ETAPA</b>		
Perforación inicial y pruebas de operación de BOP	0.5	días
Perforación hasta la profundidad de 600m tubería de 9 5/8"	7	días
<b>CONTROL DE PERDIDAS DE CIRCULACIÓN SEGUNDA ETAPA</b>		
Pérdidas Parciales con uso de materiales obturantes		
Control de pérdidas totales con uso de tapones de cemento	2	días
<b>REVESTIMIENTO DE POZO</b>		
Instalación y conexión de tubería 9 5/8"	1.75	días
Ubicación de centralizadores		
Cementación		
Mezclado de productos, preparación de lechada e inyección en el pozo		
Tiempo de fraguado		
Instalación del cabezal de perforación para tercera etapa y prueba	0.75	días
<b>TERCERA ETAPA</b>		
Perforación inicial	0.5	días
Perforación hasta profundidad de 1050m, tubería de 7"	7	días
<b>CONTROL DE PERDIDAS DE CIRCULACIÓN TERCERA ETAPA</b>		
Pérdidas Parciales con uso de materiales obturantes		
Control de pérdidas totales con uso de tapones de cemento	3	días
Registro estático de medición de presión y temperatura	1	días
Registro estático de formación	0.75	días
Registro de recuperación térmica	0.25	días

Continúa Tabla 25

<b>REVESTIMIENTO DE POZO</b>			
Instalación y conexión de tubería 7"	1.75	días	
Ubicación de centralizadores			
Cementación			
Mezclado de productos, preparación de lechada e inyección en el pozo			
Tiempo de fraguado			
Descenso de cabezal, corte y montaje de preventores	0.25	días	
<b>CUARTA ETAPA</b>			
Perforación inicial			
Perforación hasta la profundidad de 1550m, tubería de 5 1/2"	4.1	días	
Control de Parámetros	Diario		
Control geológico hasta cuando existan recortes en superficie	Diario		
Ejecución de actividades para corte de núcleo de perforación	0.75	días	
Registros dinámicos de presión y temperatura	1	días	
Registro de inyectividad	0.75	días	
<b>REVESTIMIENTO DE POZO CON LINER</b>			
Instalación y conexión de liner 5 1/2", colgador	0.75	días	
Comprobación de pozo con herramienta	0.25	días	
Prueba de absorción, inyectividad	1	días	
Muestreo de agua profunda	0.25	días	
Operación de desconexión de herramientas	0.58	días	
Desmontaje de cabezal de perforación e instalación de cabezal de pozo	0.5	días	
<b>TIEMPO TOTAL DE PERFORACIÓN</b>		<b>41.35</b>	<b>días</b>
Desmontaje y desmovilización de equipo			
Registro de recuperación térmica	<b>30-60</b>	<b>días</b>	

## 5.2 POZO EXPLORATORIO SLIM HOLE

### 5.2.1 SECUENCIA Y DESCRIPCIÓN DEL PROGRAMA DE TRABAJO

El programa de perforación del pozo Slim Hole mantiene la misma secuencia del programa de trabajo del pozo convencional, la diferencia está en que será perforado en tres etapas y con diámetros reducidos, con el uso de un equipo más pequeño. Esto permite su ejecución con un manejo más fácil y en menor tiempo.

### 5.2.1.1 PERFORACIÓN

Consta de tres etapas, la profundidad total es de 1550 m, las estimaciones para los tiempos de perforación en cada etapa se calculó mediante la velocidad de avance de la barrena.

Estas etapas llevan un procedimiento de revestimiento que consiste en la instalación y conexión de tubería y la preparación de los lodos de perforación con sus respectivos aditivos dependiendo de la profundidad de la perforación.

Tabla 26. Descripción de parámetros para perforación de pozo Slim Hole.

<b>ETAPA I</b>	
Diámetro:	8 1/2"
Diámetro tubería de revestimiento:	7"
Profundidad final:	300 m
Velocidad de perforación:	8 m/h
<b>ETAPA II</b>	
Diámetro:	5 1/2"
Diámetro tubería de revestimiento:	5"
Profundidad final:	1050 m
Velocidad de perforación:	8 m/h
<b>ETAPA III</b>	
Diámetro:	3.78"
Diámetro tubería de revestimiento:	3 1/2"
Profundidad final:	1550 m
Velocidad de perforación:	10 m/h

La Tabla 27 detalla los tiempos estimados para cada actividad que es necesario realizar para ejecución de la perforación de un pozo geotérmico Slim Hole, es necesario aclarar que los mismos tiempos se consideran con holgura para asumir problemas relacionados a pérdidas de circulación o algún imprevisto que requiera paro de actividades.

Tabla 27. Programa de perforación de pozo Slim Hole, tiempos de ejecución estimados para cada actividad a desarrollar para perforación de la propuesta de pozo Slim Hole.

<b>PREPARATIVOS INICIALES</b>	<b>DURACIÓN</b>	
Accesos y Plantel	15	días
Preparación documentos administrativos	7	días
Definir, ubicar e instalar equipos de suministro de agua	3	días
Movilización de Equipo y Montaje	3	días
Pruebas de operación		
<b>PERFORACIÓN</b>		

Continúa Tabla 27

<b>PRIMERA ETAPA</b>		
Perforación hasta la profundidad de 300m, tubería 7"	4	días
Verificar parámetros de operación	Diario	
Parámetros fluidos de operación	Diario	
Control de Geología de pozos	Diario	
Anclaje de tubería		
<b>REVESTIMIENTO DE POZO</b>		
Instalación y conexión de tubería 7"	0.75	días
Ubicación de centralizadores		
Cementación		
Mezclado de productos, preparación de lechada e inyección en el pozo		
Tiempo de fraguado		
Instalación del cabezal de perforación y colocación de preventores	0.5	días
<b>SEGUNDA ETAPA</b>		
Perforación inicial y pruebas de operación de BOP	5	días
Perforación hasta la profundidad de 1050m tubería de 5"		
<b>CONTROL DE PERDIDAS DE CIRCULACIÓN SEGUNDA ETAPA</b>		
Pérdidas Parciales con uso de materiales obturantes	2	días
Control de pérdidas totales con uso de tapones de cemento		
<b>REVESTIMIENTO DE POZO</b>		
Instalación y conexión de tubería 5"	2.5	días
Ubicación de centralizadores		
Cementación		
Mezclado de productos, preparación de lechada e inyección en el pozo		
Tiempo de fraguado		
<b>TERCERA ETAPA</b>		
Perforación inicial	4	días
Perforación hasta profundidad de 1550m, tubería de 3.5"		
<b>REGISTROS DE EVALUACION EN TERCERA ETAPA</b>		
Registro estático de medición de presión y temperatura	0.25	día
Registro estático de formación	0.75	días
Registro de recuperación térmica	0.75	días
<b>REVESTIMIENTO DE POZO CON LINER</b>		
Instalación y conexión de tubería 3.5"	0.5	días
Descenso de cabezal, corte y montaje de preventores	0.25	días
Operación de desconexión de herramientas	0.5	días
Desmontaje de cabezal de perforación e instalación de cabezal de pozo	0.5	días
<b>TOTAL</b>		
	<b>22.25</b>	<b>días</b>
Desmontaje y desmovilización de equipo		
Registro de recuperación térmica	30-60	días

## 6- PRUEBAS Y MEDICIONES EN POZOS EXPLORATORIOS

### 6.1 PRUEBAS EN POZOS

En vista de que no se cuenta con los equipos para cumplir con estos trabajos se va a contratar una compañía que ofrece este tipo de servicio integral. El servicio incluye el diseño en sí de las pruebas, renta de las herramientas de fondo, equipos de superficie, y la interpretación de resultados. El método de análisis de estas pruebas de registro que se realizarán en el pozo son herramientas muy importantes que permiten valorar las condiciones termodinámicas del recurso, predecir el potencial del recurso y sus condiciones termodinámicas.

Las pruebas que se van a realizar en el pozo convencional durante la fase de perforación, es al terminar la tercera etapa a 1050 metros, tubería de revestimiento diámetro 7"; se realizarán registros de temperatura y presión. La prueba consiste en introducir un sensor de temperatura al fondo y dejarlo en reposo durante 18 horas.

Esta prueba se conoce como registro de temperatura de formación. Al final de la perforación de diámetro final 5 1/2" a una profundidad de 1550 metros, se realizaran registros dinámicos de temperatura y presión además pruebas de inyectividad del pozo.

Las pruebas de este pozo tienen una serie de objetivos; uno de ellos es la adquisición de datos del fondo del pozo y superficie, que es un procedimiento esencial para la evaluación de las condiciones del reservorio, conocer la ubicaciones de las zonas permeables del reservorio y la capacidad (permeabilidad del pozo), lo cual da un indicio de la posible productividad del pozo. y por ende a la toma de decisiones.

De acuerdo a la planificación para las diferentes pruebas que se va a realizar se ha considerado lo siguiente:

#### Pruebas durante la perforación:

- Registros dinámicos,
- Registros de Inyectividad,
- Registro estático de formación; y
- Pruebas de quimismo de agua.

#### Pruebas pos-perforación:

- Registros de temperatura y presión; y
- Pruebas de descarga del pozo, en esta prueba se evaluara las condiciones del reservorio, quimismo del agua, presión, temperatura y entalpia.

#### Pruebas para el pozo slim-hole:

- Termometrías,
- Termometría al final de la segunda etapa a 1050 metros de profundidad y tubería de revestimiento diámetro 5"; y
- Perfil de temperaturas de estabilización.

Para un buen entendimiento del pozo exploratorio que se ha perforado y para analizar el comportamiento del mismo, se ha aplicado varios tipos de registros sean estos dinámicos como estáticos. Cada técnica utilizada comprende pruebas útiles para caracterizar la existencia del recurso.

### 6.1.1 PRUEBAS DINÁMICAS

Las pruebas dinámicas que se realizarán en el pozo convencional son los perfiles de temperatura y análisis del quimismo del fluido. Cada una de estas pruebas utilizará una metodología apropiada para su análisis e interpretación y de esta manera correlacionar sus resultados para definir criterios e identificar el comportamiento termodinámico del pozo.

La metodología que se va a planificar para este tipo de pruebas comprende actividades como: adecuación de la herramienta y registro de pruebas, el procesamiento de los datos, construcción de gráficas y análisis de resultados. Cada una de las actividades aporta información para la caracterización del pozo, condiciones del recurso geotérmico.

### 6.1.2 PRUEBAS DE TEMPERATURA Y PRESIÓN.

Durante la ejecución de la perforación del pozo, y después de haber cementado la tubería de revestimiento de 7" es necesario realizar registros de temperatura y presión a diferente profundidad. Este indicador nos servirá como base para decidir si la zona es o no de interés. Los parámetros que se evalúan con estos registros son:

#### Temperatura:

- Gradientes de Temperatura,
- Localización de acuíferos,
- Temperaturas de formación; y
- Condiciones del reservorio.

#### Presión:

- Densidad de fluidos,
- Dirección de los fluidos,
- Permeabilidad; y
- Monitoreo para manejo de reservorios.

En la Figura 7 se puede visualizar un camión equipado con sus herramientas para realizar este tipo de registros de temperatura y presión.



Figura 7. Equipo para Registro de Temperatura.

### 6.1.3 PRUEBAS DE FORMACIÓN

La aplicación de estas pruebas durante la perforación de pozos exploratorios, es para evaluar en forma rápida zonas que por registros presentan propiedades y condiciones de contener recurso geotérmico. Una prueba bien realizada permite obtener una gran cantidad de datos tales como: índice de productividad, permeabilidad del reservorio, espesor, límites, presión, contenido de fluidos.

La evaluación de estos parámetros son trascendentales en la toma de decisiones, tales como: si la condición del recurso es económicamente rentable y favorable, la existencia de condiciones como presión y temperatura del recurso si es aprovechable, o puede llegar hasta el término de suspender la perforación.

Esta prueba de producción se puede realizar al término de la perforación o a su vez en agujero descubierto durante la perforación; siempre considerando algunos factores tales como: condiciones del pozo, tubería del equipo de prueba y condiciones del lodo.

El éxito de este tipo de pruebas exigen de una buena planificación y estar bien definidos los objetivos de la misma como:

- Evaluación e identificación de los fluidos de formación,
- Medición de la temperatura de fondo, las variaciones de presión,
- Determinar la productividad del pozo,
- Obtener muestras representativas de los fluidos de formación para análisis de laboratorio (presión, volumen y temperatura); y
- Determinar parámetros de permeabilidad, índice de productividad.

Con esta información y con la que se obtuvo durante la perforación del pozo exploratorio se puede: evaluar la capacidad de producción de la formación, realizar estudios geológicos y geofísicos; pruebas necesarias que se tienen que hacer en esta fase de perforación.

#### **6.1.4 PRUEBA DE INYECTIVIDAD**

En esta prueba se colocara la sonda a unos 300 metros del nivel hidrostático con la finalidad de medir la capacidad de absorción del pozo y el índice de inyectividad. Esta prueba consiste en medir la presión transitoria durante la inyección de un flujo dentro del pozo.

Para realizar esta prueba inicialmente se debe ingresar un elemento registrador de presión a una profundidad inferior a la correspondiente al nivel estático del agua con objeto de registrar continuamente los cambios de presión que ocurren tanto en la etapa de inyección como en la de recuperación, con esto buscamos medir la declinación de la presión y el tiempo en que se demora hasta el cierre de la inyección.

#### **6.1.5 PRUEBAS ESTÁTICAS**

Para este tipo de pruebas es conveniente realizar como mínimo una serie de cuatro registros de temperatura vs profundidad transcurriendo entre ellos un lapso determinado de tiempo con el objeto de permitir que la temperatura por registrarse dentro del pozo se incremente entre corridas. Una vez finalizado estos registros y disponiendo como datos del tiempo de circulación del lodo dentro del pozo a la profundidad de interés, así como de los tiempos de reposo de cada registro, es posible determinar en forma aproximada el valor de la temperatura estática de la formación.

#### **6.1.6 PRUEBAS DE PRODUCTIVIDAD DEL POZO**

Este tipo de pruebas solo se va a realizar en el pozo convencional con diámetro final de 5 ½" y profundidad 1550 metros, en el otro propuesto tipo slim-hole de diámetro final HQ 3 ½" no se puede realizar este tipo de pruebas de descarga debido a su diámetro muy pequeño y a su limitado flujo.

Esta prueba consiste, una vez finalizada la perforación de la última etapa, en hacer el lavado, el calentamiento del pozo y por ultimo su inducción, además es necesario realizar registros de temperatura y presión vs profundidad durante la etapa de calentamiento con el propósito de conocer la evolución del pozo durante esta etapa.

Una vez que el pozo se encuentra fluyendo se procederá a efectuar su fase final de calentamiento, dejándolo fluir a través de una línea de descarga tal como se aprecia en la Figura 8 que conecta a un silenciador y separador portátil durante unos días hasta alcanzar su

apertura total y este lo suficientemente caliente, durante este periodo de apertura se deriva el flujo alternadamente tanto horizontalmente como vertical y se toma cuatro registros de temperatura para monitorear su evolución y detectar posibles problemas con su terminación. En el transcurso de la etapa anterior se va midiendo parámetros de caudales de vapor, agua y mezcla, así como la entalpía de la misma.



Figura 8. Silenciador portátil para descarga del pozo.

Es recomendable dejar fluir al pozo completamente abierto por un periodo de tiempo lo más prolongado posible, monitoreando las variaciones con la presión del cabezal, caudales y entalpía, de esta manera tener un valor más confiable de su potencial.

### 6.1.7 MUESTREO Y ANÁLISIS DE LOS FLUIDOS DEL RESERVORIO

Se va a realizar tomas de muestras de fluido en el fondo del pozo durante las interrupciones en la perforación, así como mantener un programa de muestreos de fluidos producidos agua, vapor y mezcla, desde el momento que se inicia la apertura del pozo. Esto permite conocer la evolución de las características químicas de los fluidos producidos.

## **7- PRESUPUESTO PARA CADA UNA DE LAS PROPUESTAS EN PERFORACIÓN DE POZOS EXPLORATORIOS GEOTÉRMICOS**

Los costos estimados para las diferentes etapas, para los dos tipos de perforación planteados, están calculados tomando como referencia los valores disponibles de La Geo. Se consideró un incremento del 15% con respecto al sitio donde se va a perforar, los impuestos y la accesibilidad para el ingreso de los equipos. En referencia a la movilización de los equipos se cuenta con varias empresas que prestan este servicio, por lo tanto, el rubro de este costo tiende a reducirse.

Las condiciones de operación en la perforación exploratoria que se plantea realizar, incluyen una serie de trabajos y actividades que tienen que ejecutarse con empresas de servicios a contratar. Entre estas principales actividades que se requieren son:

- El diseño del pozo y sus especificaciones,
- Estudio y construcción de obra civil para accesos y plataformas,
- Suministro de herramientas y materiales de perforación,
- Suministro de agua para perforación e instalación de la línea,
- Ingeniería de perforación y la supervisión,
- Servicio del Taladro de Perforación y equipos,
- Provisión del personal de perforación,
- Servicios de cementación incluye equipo y personal,
- Servicio para fluidos de perforación y personal,
- Alquiler de herramientas de perforación; y
- Servicio de equipos, personal para medición y registro de pozo.

### **7.1 COSTO DEL SERVICIO DEL EQUIPO DE PERFORACIÓN**

En este tipo de exploración, generalmente se va a contratar a una compañía de perforación para que perfore estos pozos exploratorios. El contratista de perforación debe proveer el equipo de perforación y la cuadrilla de personal capacitado. Estos servicios se contratan habitualmente por una tarifa diaria que depende del tipo de equipo de perforación utilizado. Estas tarifas diarias en general se determinan según la potencia nominal del equipo de perforación, lo que además establece la profundidad hasta la que puede perforar el equipo.

El recurso más importante es el personal que debe tener la experiencia adecuada para operar este taladro, teniendo como compromiso la seguridad, calidad, excelencia y el respeto con el medio ambiente en sus operaciones.

Las Tabla 28 y 29 muestran los valores en que se incurren por el alquiler del equipo de perforación en cada pozo. Esto incluye la movilización, desmovilización y el uso del equipo. Se ha tomado en consideración que el caso de perforación se dará en una zona geotérmica de Suramérica en la que únicamente se cuenta con los Servicios de perforación para la

industria Petrolera, por lo que los servicios del equipo de perforación son más elevados que los que se dan para geotermia en Centro América. Por tanto dichos valores son más altos que los convencionales.

Tabla 28. Se puede ver costo de perforación para un pozo convencional a una profundidad de 1550 metros con un diámetro final 5 ½” el equipo de perforación tiene una capacidad de 1200BHP.

PRESUPUESTO DE SERVICIOS POZO CONVENCIONAL					
PTDA.	DESCRIPCION	UNIDAD	Precio Unitario US \$		
				CANTIDAD	TOTAL
<b>A</b>	<b>SERVICIOS EQUIPO PERFORACION</b>				
<b>A1</b>	<b>MOVILIZACION</b>				<b>900,000.00</b>
A1.1	Movilización Inicial y Pruebas del equipo	S.G.	500,000.00	1.00	500,000.00
A1.2	Desmovilización final del equipo	S.G.	400,000.00	1.00	400,000.00
<b>A2</b>	<b>TRABAJOS DE PERFORACION</b>				<b>2,332,640.00</b>
A2.1	Equipo de perforación operando con herramienta en pozo	dia	52,000.00	41.35	2,150,200.00
A2.2	Equipo en espera	dia	20,800.00	4.00	83,200.00
A2.3	Reembolso de Diesel				99,240.00
<b>A3</b>	<b>ACTIVIDADES COMPLEMENTARIAS</b>				<b>157,130.00</b>
A3.1	Servicios de Asistencia Tecnica	dia	1,800.00	41.35	74,430.00
A3.2	Servicios de Ing. de lodos (compañía de servicio)	dia	1,000.00	41.35	41,350.00
A3.3	Bombeo de agua geotermica	dia	1,000.00	41.35	41,350.00
	<b>SUB TOTAL SERVICIOS EQUIPO DE PERFORACION US \$</b>				<b>3,389,770.00</b>

Tabla 29. Costo de perforación para un pozo Slim Hole a una profundidad de 1550 metros con un diámetro final 3 ½” el equipo de perforación tiene una capacidad de 800BHP.

PRESUPUESTO DE SERVICIOS POZO SLIM HOLE					
PTDA.	DESCRIPCION	UNIDAD	Precio Unitario US \$		
				CANTIDAD	TOTAL
<b>A</b>	<b>SERVICIOS EQUIPO PERFORACION</b>				
<b>A1</b>	<b>MOVILIZACION</b>				<b>75,000.00</b>
A1.1	Movilización Inicial y Pruebas del equipo	S.G.	50,000.00	1.00	50,000.00
A1.2	Desmovilización final del equipo	S.G.	25,000.00	1.00	25,000.00
<b>A2</b>	<b>TRABAJOS DE PERFORACION</b>				<b>672,870.00</b>
A2.1	Equipo de perforación operando con herramienta en pozo	dia	28,000.00	22.50	630,000.00
A2.2	Equipo en espera con Personal	dia	10,000.00	3.00	30,000.00
A2.3	Reembolso de Diesel				12,870.00
<b>A3</b>	<b>ACTIVIDADES COMPLEMENTARIAS</b>				<b>16,875.00</b>
A3.1	Bombeo de agua fresca	dia	750.00	22.50	16,875.00
	<b>SUB TOTAL SERVICIOS EQUIPO DE PERFORACION US \$</b>				<b>764,745.00</b>

En los gráficos de las Figura 9 y 10 siguientes se puede ver una comparación del tiempo de perforación y costos con las diferentes tecnologías de perforación de pozo. Como se puede visualizar el sistema Slim Hole es más económico en el rubro del equipo de perforación que un pozo convencional.

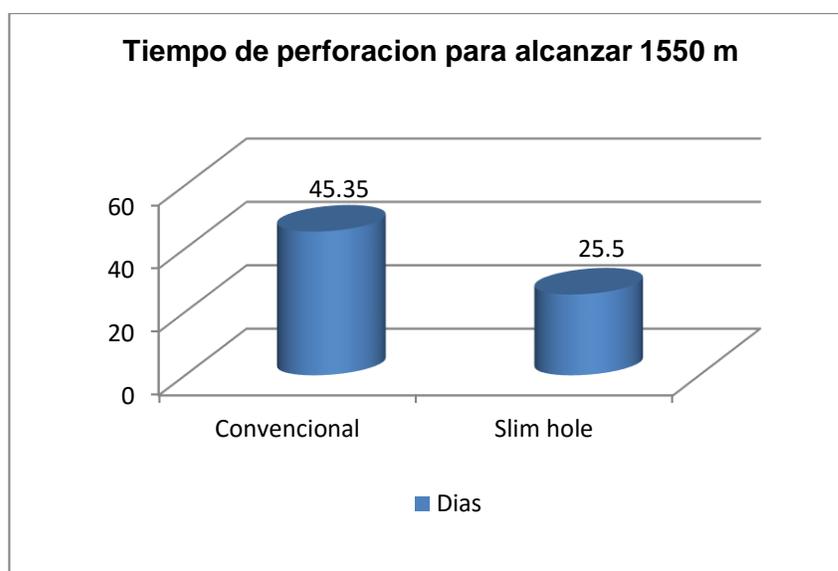


Figura 9. Tiempo de Perforación.

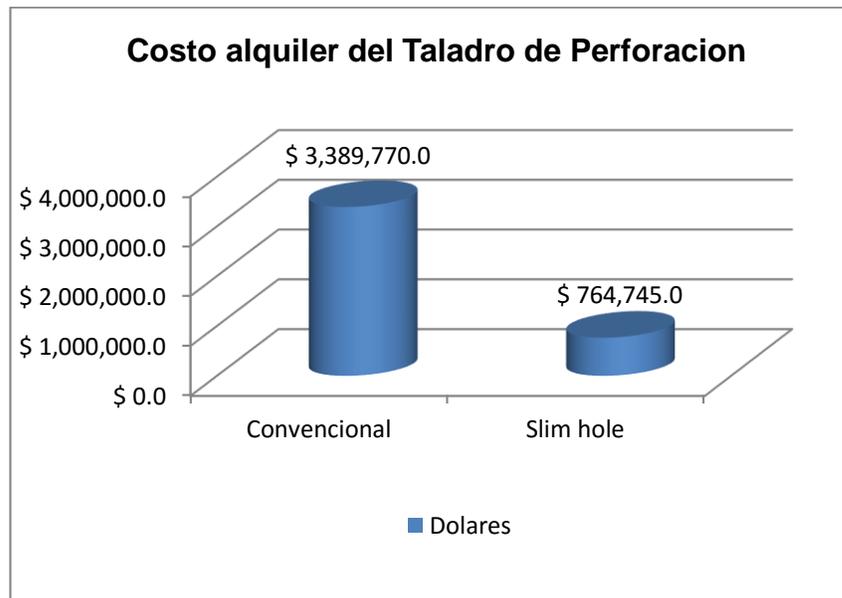


Figura 10. Costos de equipo de perforación.

## 7.2 COSTO DEL SERVICIO DE CEMENTACIÓN

En las diferentes etapas de la perforación, se utilizará una tubería especial llamada tubería de revestimiento, esta tubería cubre las paredes del pozo para protegerle de los derrumbes y lo aísla de varias formaciones que pueden producir problemas. Esta tubería tiene que cementarse y para ello se solicita los servicios de una compañía de cementación.

Este servicio se requiere varias veces de acuerdo a las etapas que se vaya avanzando en la perforación, además se requiere cementar cuando exista pérdida total de circulación en el agujero. Los costos de este servicio son los mostrados en las Tabla 30 y 31 para el pozo convencional y Slim Hole respectivamente.

Tabla 30. Costo de servicio de cementación pozo convencional

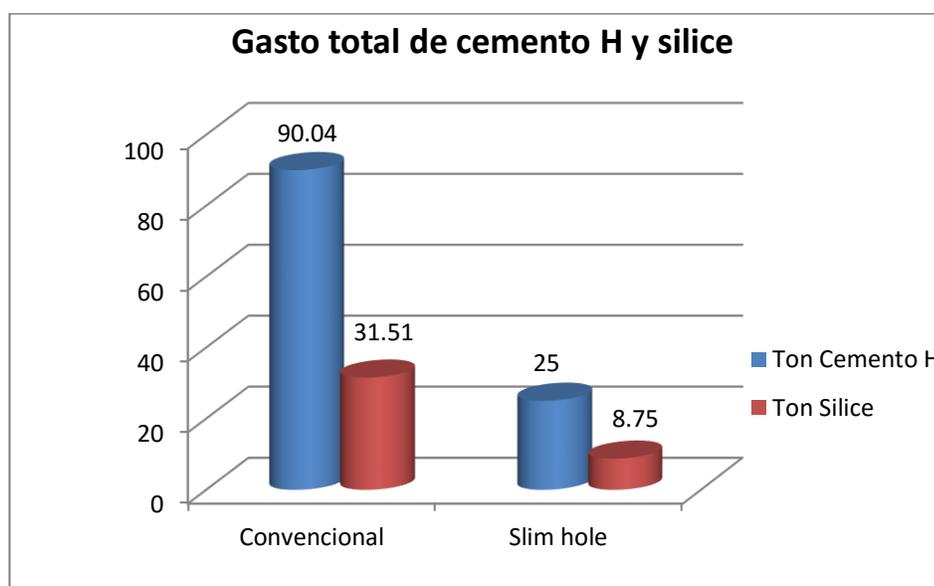
PTDA.	DESCRIPCION	UNIDAD	Precio Unitario US \$		
				CANTIDAD	TOTAL
<b>B</b>	<b>SERVICIOS DE CEMENTACIÓN</b>				
B1	<b>COSTOS OPERATIVOS</b>				
B1.1	Movilización inicial de los equipos	S.G.	50,000.00	1.00	50,000.00
B1.2	Desmovilización final de los equipos	S.G.	50,000.00	1.00	50,000.00
B1.3	Alquiler de los equipos (con personal)	día	2,900.00	41.35	119,915.00
B1.4	Cementación ademe de 13 3/8"	c/u	15,750.00	1.00	15,750.00
B1.5	Cementación ademe 9 5/8"	c/u	15,750.00	1.00	15,750.00
B1.6	Cementación ademe 7"	c/u	12,600.00	1.00	12,600.00
B1.7	Colocación de tapones de cemento	c/u	4,725.00	10.00	47,250.00
B1.8	Mezcla seca cemento y sílica	Ton	26.25	121.55	3,190.79
B2	<b>SUMINISTRO DE MATERIALES DE CEMENTACION</b>				
B2.1	Cemento Portland, 94 lb/saco	Saco	10.19	500.00	5,095.00
B2.2	Cemento G ó H	Ton	492.80	90.04	44,371.71
B2.3	Harina de Sílice	Ton	900.00	31.51	28,362.60
B2.4	Antiespumante	Lts	18.34	160.00	2,934.40
B2.5	Reductor de Filtrado	Lts	4.00	1,740.00	6,960.00
B2.6	Dispersante/Reductor de Fricción	Kg	13.28	328.00	4,355.84
B2.7	Retardador de Fraguado para alta temperatura	Lts	8.40	268.00	2,251.20
B2.8	Cloruro de Calcio	Kg	1.18	600.00	708.00
	<b>SUB TOTAL SERVICIOS DE CEMENTACION US \$</b>				<b>409,494.54</b>

**Tabla 31. Costo de servicio de cementación pozo Slim Hole.**

PTDA.	DESCRIPCION	UNIDAD	Precio Unitario US \$		
				CANTIDAD	TOTAL
<b>B</b>	<b>SERVICIOS DE CEMENTACION</b>				
<b>B1</b>	<b>COSTOS OPERATIVOS</b>				
B1.1	Movilización inicial de los equipos	S.G.	12,075.00	1.00	12,075.00
B1.2	Desmovilización final de los equipos	S.G.	12,075.00	1.00	12,075.00
B1.3	Cementación ademe de 7"	c/u	4,500.00	1.00	4,500.00
B1.4	Cementación ademe 5"	c/u	4,500.00	1.00	4,500.00
B1.5	Colocación de tapones de cemento	c/u	1,000.00	5.00	5,000.00
B1.6	Mezcla seca cemento y sílice	Ton	20.00	33.75	675.00
<b>B2</b>	<b>SUMINISTRO DE MATERIALES DE CEMENTACION</b>				
B2.1	Cemento Portland, 94 lb/saco	Saco	10.19	500.00	5,095.00
B2.2	Cemento G ó H	Ton	492.80	25.00	12,320.00
B2.3	Harina de Sílice	Ton	900.00	8.75	7,875.00
B2.4	Antiespumante	Lts	18.34	43.00	788.62
B2.5	Reductor de Filtrado	Lts	4.00	269.00	1,076.00
B2.6	Dispersante/Reductor de Fricción	Kg	13.28	102.00	1,354.56
B2.7	Retardador de Fraguado para alta temperatura	Lts	8.40	41.00	344.40
	<b>SUB TOTAL SERVICIOS DE CEMENTACION US \$</b>				<b>67,678.58</b>

Estos costos incluyen el mantener los equipos de cementación disponibles en campo aunque no sean utilizados.

En la Figura 11 se muestra un cuadro de las cantidades en toneladas de cemento H y sílice principales materiales que se necesita en las lechadas utilizadas en el proceso de cementación de los dos tipos de pozo.


**Figura 11. Gasto de cemento y sílice**

En la Figura 12 representa la variación del costo total de este servicio incluidos los materiales para la cementación para los dos tipos de pozo propuesto.

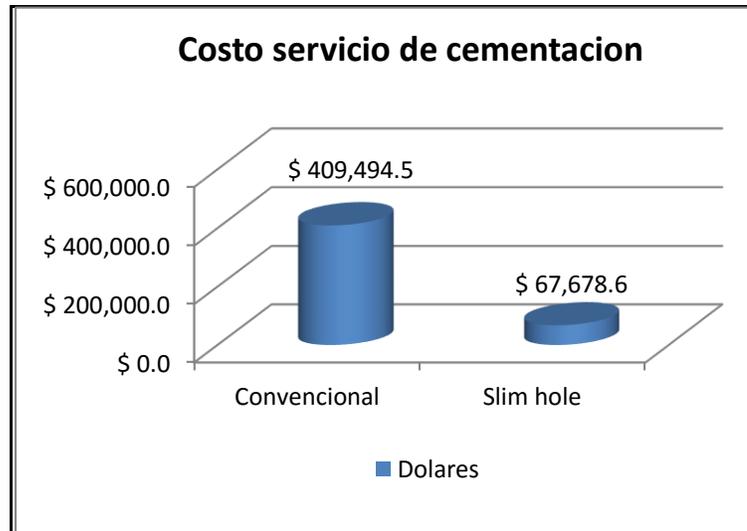


Figura 12. Comparación costo servicio de cementación.

### 7.3 COSTOS POR SERVICIOS DE REGISTROS DE POZOS

Otros de los servicios necesarios que se realiza para determinar la existencia del recurso es el registro de pozos. La compañía que ofrece este servicio trae un camión laboratorio portátil a la torre los mismos que bajan herramientas registradoras dentro del hoyo sostenido mediante cuerdas de acero, las herramientas llegan hasta el fondo del hoyo y se van subiendo lentamente. A medida que la herramienta va subiendo esta mide las propiedades de las formaciones que va atravesando.

En las Tabla 32 y 33 se detallan los costos relacionados con los registros que se va a realizar durante la perforación y después para los dos tipos de pozos propuestos.

Tabla 32. Costo servicio de Registros en pozo convencional.

PARTIDA	DESCRIPCION	UNIDAD	PRECIO UNITARIO		
				CANTIDAD	COSTO (\$)
<b>1</b>	<b>SERVICIOS DE REGISTROS TERMODINAMICOS</b>				
<b>1.1</b>	<b>Costos de Movilización</b>				
1.1.1	Movilización equipos	S.G.	5,000.00	1	5,000.00
1.1.2	Desmovilización equipos	S.G.	5,000.00	1	5,000.00
1.1.3	Movilización y desmovilización de personal	S.G.	2,000.00	2	4,000.00
<b>1.2</b>	<b>Cargos Operativos:</b>				
1.2.1	Cargo de personal (un ingeniero y dos operadores)	día	2,000.00	15	30,000.00
1.2.2	Cargo por Servicio	c/u	3,000.00	4	12,000.00
1.2.3	Cargo por Disponibilidad de Equipos	día	1,000.00	15	15,000.00
<b>TOTAL SERVICIOS DE REGISTROS TERMODINAMICOS, US \$</b>					<b>71,000.00</b>

Tabla 33. Costo servicio de Registros en pozo Slim Hole.

PARTIDA	DESCRIPCION	UNIDAD	PRECIO UNITARIO		
				CANTIDAD	COSTO (\$)
<b>1</b>	<b>SERVICIOS DE REGISTROS TERMODINAMICOS</b>				
<b>1.1</b>	<b>Costos de Movilización</b>				
1.1.1	Movilización equipos	S.G.	5,000.00	1	5,000.00
1.1.2	Desmovilización equipos	S.G.	5,000.00	1	5,000.00
1.1.3	Movilización y desmovilización de personal	S.G.	2,000.00	2	4,000.00
<b>1.2</b>	<b>Cargos Operativos:</b>				
1.2.1	Cargo de personal (un ingeniero y dos operadores)	día	2,000.00	8	16,000.00
1.2.2	Cargo por Servicio	c/u	3,000.00	2	6,000.00
1.2.3	Cargo por Disponibilidad de Equipos	día	1,000.00	0	-
<b>TOTAL SERVICIOS DE REGISTROS ELECTRICOS, US \$</b>					<b>36,000.00</b>

## 7.4 COSTO DE MATERIALES DE PERFORACION

Para el suministro de los materiales necesarios para el pozo se debe contar con uno(s) proveedores en cuanto al suministro de los materiales de perforación, razón de que es un punto crítico durante la perforación. En caso de necesitar herramientas o materiales, por daño o desgaste de los que se están empleando, si no se cuenta con ello se detienen los trabajos ocasionando retrasos y costos adicionales por el costo diario del equipo de perforación.

### 7.4.1 MATERIALES DE PERFORACIÓN PARA UN POZO CONVENCIONAL

En la Tabla 34 se muestran los diferentes costos por el suministro y las cantidades de las materiales de perforación, barrenas, tuberías de revestimiento, accesorios de cementación

y materiales para la formulación del lodo y las lechadas para las diferentes etapas de perforación con relación al pozo convencional.

Tabla 34. Materiales para perforación de pozo convencional.

<b>MATERIALES PARA PERFORACION POZO CONVENCIONAL</b>		
PTDA.	DESCRIPCION	COSTO (\$)
<b>C.</b>	<b>MATERIALES PARA PERFORACION</b>	
<b>C.1</b>	<b>MATERIALES PARA FLUIDO PERFORACION</b>	<b>86,202.55</b>
<b>C.2</b>	<b>BARRENAS</b>	<b>152,802.00</b>
<b>C.3</b>	<b>TUBERIAS DE REVESTIMIENTO</b>	<b>187,650.00</b>
<b>C.4</b>	<b>ACCESORIOS DE CABEZAL</b>	<b>49,103.00</b>
<b>C.5</b>	<b>ACCESORIOS DE CEMENTACION</b>	<b>33,765.00</b>
	<b>TOTAL US (\$)</b>	<b>509,522.55</b>

## 7.4.2 MATERIALES DE PERFORACIÓN PARA UN POZO SLIM HOLE.

A continuación en la Tabla 35 se presenta el costo de los materiales estimados necesarios para la perforación del pozo slim hole.

Tabla 35. Materiales para perforación pozo Slim Hole.

<b>MATERIALES PARA PERFORACION POZO SLIM HOLE</b>		
PTDA.	DESCRIPCION	COSTO (\$)
<b>C.</b>	<b>MATERIALES PARA PERFORACION</b>	
<b>C.1</b>	<b>MATERIALES PARA FLUIDO PERFORACION</b>	<b>27,805.55</b>
<b>C.2</b>	<b>BARRENAS</b>	<b>23,560.00</b>
<b>C.3</b>	<b>TUBERIAS DE REVESTIMIENTO</b>	<b>215,806.20</b>
<b>C.4</b>	<b>ACCESORIOS DE CABEZAL</b>	<b>9,710.35</b>
<b>C.5</b>	<b>ACCESORIOS DE CEMENTACION</b>	<b>12,293.62</b>
	<b>TOTAL US (\$)</b>	<b>289,175.72</b>

En relación al pozo Slim Hole la disminución en los costos se realizan a partir del uso de tuberías de diámetro más reducidos, tamaños más pequeños en los equipos de perforación, menos cantidad de cemento y fluidos de perforación y a su vez menor disposición de los recortes de perforación, así como perforar el pozo y completarlo en un periodo de tiempo más corto.

En la Figura 12, se muestra la diferencia de valores económicos con respecto a la cantidad de materiales para cementación y lodos, tuberías y barrenas que se necesita para las dos propuestas planteadas.

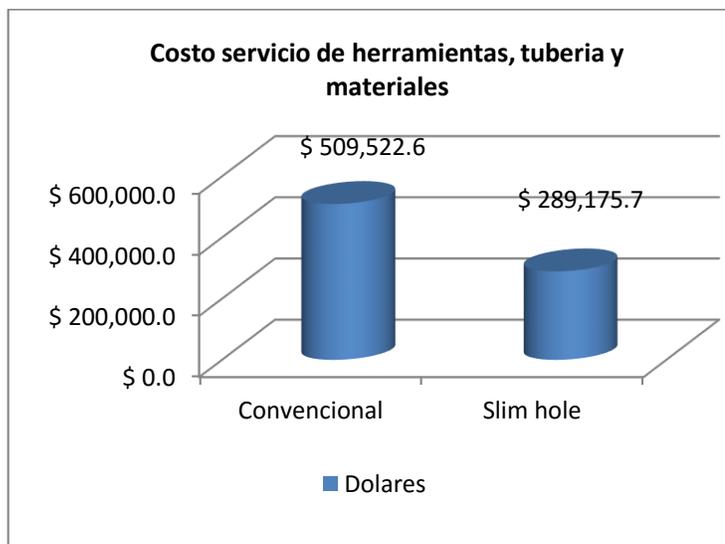


Figura 13. Costo comparativo.

## 7.5 RESUMEN DE COSTOS DE PERFORACIÓN PARA UN POZO EXPLORATORIO CONVENCIONAL

Los costos totales de la perforación del pozo convencional se indican en la siguiente tabla, donde se encuentra la sumatoria final de todos los cálculos de los servicios anteriormente descritos como servicios del equipo de perforación, cementación, registros y materiales de perforación: barrenas, tuberías, accesorios de revestimiento, aditivos para lodo y, materiales para preparar las mezclas de cementación.

El monto de otros servicios comprende todo lo relacionado con el transporte de los materiales, el servicio de tratamiento de recortes de perforación, el alquiler de camiones y excavadora para su manejo. Adicional en este rubro también va el alquiler de campamento y alimentación para el hospedaje del personal de perforación.

El costo total de perforación para el tipo de pozo exploratorio que se consideró con diámetro final de 5 ½" es de \$ 5,014,304.84 dólares. (Ver, Tabla 36).

Tabla 36. Presupuesto para perforación diámetro convencional diámetro 5 1/2".

<b>PRESUPUESTO RESUMEN</b>		
<b>Pozo exploratorio diámetro convencional 5 1/2"</b>		
<b>ITEM</b>	<b>DESCRIPCION</b>	<b>COSTO</b>
		<b>US (\$)</b>
<b>A.</b>	<b>SERVICIOS DE EMPRESA PERFORADORA</b>	<b>3,799,264.54</b>
A.1	SERVICIOS DE PERFORACION	3,389,770.00
A.2	SERVICIOS DE CEMENTACION	409,494.54
<b>B.</b>	<b>SERVICIOS COMPLEMENTARIOS</b>	<b>361,885.00</b>
B.1	SERVICIOS REGISTROS TERMODINAMICOS	71,000.00
B.2	OTROS SERVICIOS	290,885.00
<b>C.</b>	<b>MATERIALES DE PERFORACION</b>	<b>509,522.55</b>
C.1	MATERIALES PARA FLUIDO DE PERFORACION	86,202.55
C.2	BARRENAS	152,802.00
C.3	TUBERIAS DE REVESTIMIENTO	187,650.00
C.4	ACCESORIOS DE CABEZAL	49,103.00
C.5	ACCESORIOS DE CEMENTACION	33,765.00
<b>D.</b>	<b>COMPRA DE TERRENOS</b>	<b>100,000.00</b>
<b>E.</b>	<b>OBRA CIVIL CALLES DE ACCESO Y PLATAFORMAS</b>	<b>200,000.00</b>
<b>F.</b>	<b>GASTOS ADMINISTRATIVOS (15%)</b>	<b>43,632.75</b>
	<b>TOTAL US (\$)</b>	<b>5,014,304.84</b>

## 7.6 RESUMEN COSTOS PERFORACIÓN SLIMHOLE

Actualmente para los estudios de factibilidad y comprobación del recurso geotérmico, se está recurriendo en forma continua al uso de la tecnología de perforación slim hole con el objetivo de reducir los costos de perforación y mejorar los resultados de exploración. Con esta tecnología se logra disminuir costos económicos y reducir los costos del proyecto sobre los costos ya estimados de un proyecto convencional.

En la siguiente tabla 37 se indica el valor total de la perforación de la otra propuesta el tipo slim hole de diámetro 3 1/2" con un costo de \$ 1,369,161.80 dólares.

Tabla 37. Presupuesto para perforación de Slim Hole diámetro 3 1/2".

<b>PRESUPUESTO RESUMEN</b>		
<b>Pozo exploratorio tipo Slim Hole</b>		
<b>ITEM</b>	<b>DESCRIPCION</b>	<b>COSTO</b>
		<b>US (\$)</b>
<b>A.</b>	<b>SERVICIOS DE EMPRESA PERFORADORA</b>	<b>832,423.58</b>
A.1	SERVICIOS DE PERFORACION	764,745.00
A.2	SERVICIOS DE CEMENTACION	67,678.58
<b>B.</b>	<b>SERVICIOS COMPLEMENTARIOS</b>	<b>154,750.00</b>
B.1	SERVICIOS CONTROL DE TERMINACION DE POZOS	36,000.00
B.2	OTROS SERVICIOS	118,750.00
<b>C.</b>	<b>MATERIALES DE PERFORACION</b>	<b>289,175.72</b>
C.1	MATERIALES PARA FLUIDO DE PERFORACION	27,805.55
C.2	BARRENAS	23,560.00
C.3	TUBERIAS DE REVESTIMIENTO	215,806.20
C.4	ACCESORIOS DE CABEZAL	9,710.35
C.5	ACCESORIOS DE CEMENTACION	12,293.62
<b>D.</b>	<b>COMPRA DE TERRENOS</b>	<b>25,000.00</b>
<b>E.</b>	<b>OBRA CIVIL CALLES DE ACCESO Y PLATAFORMAS</b>	<b>50,000.00</b>
<b>F.</b>	<b>GASTOS ADMINISTRATIVOS (15%)</b>	<b>17,812.50</b>
	<b>TOTAL US (\$)</b>	<b>1,369,161.80</b>

En la Figura 14. Se indican en forma gráfica una comparación de los costos totales de perforación de las dos propuestas planteadas para el sitio de interés.

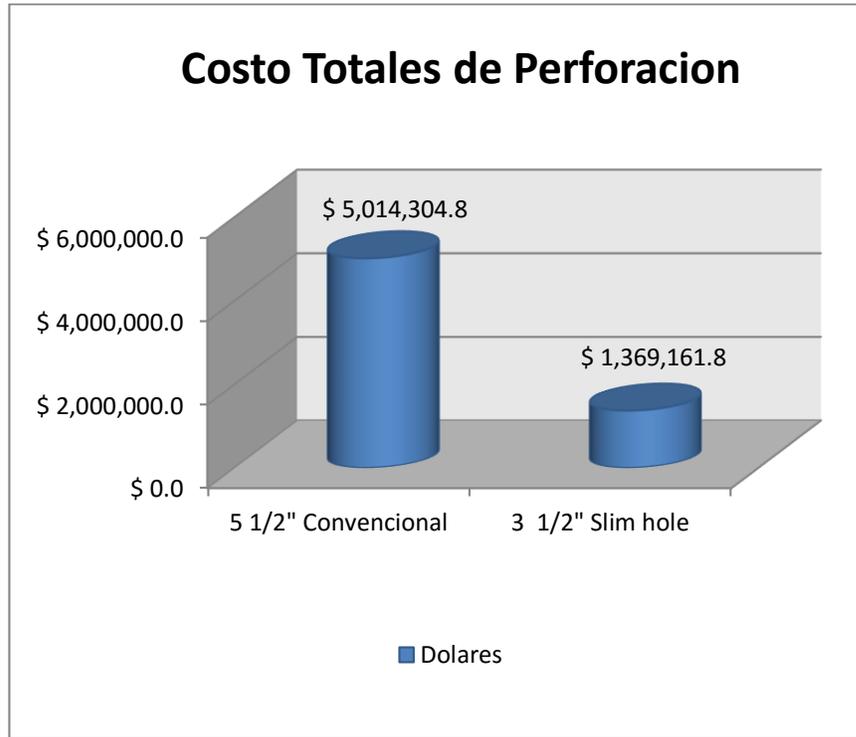


Figura 14 Costos de perforación

## 8- CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 8.1 CONCLUSIONES

Con el desarrollo del presente proyecto se obtienen los fundamentos necesarios para concluir que:

- Es necesario considerar el tipo de perforación exploratoria a ejecutar en función de la información que se quiere obtener, así como del presupuesto disponible para la ejecución de la perforación y la accesibilidad al lugar de perforación.
- Las actividades de perforación representan un alto costo durante el desarrollo de un proyecto geotérmico. Un buen diseño y una buena selección de materiales permitirán minimizar el costo de ejecución de este proceso. En este caso se obtuvo un valor de \$ 5,014,304.84 dólares para el pozo de diámetro convencional y para el pozo tipo Slim Hole se obtuvo un valor de \$ 1,369,161.80 dólares. Para un campo sin exploraciones profundas previas, el tipo Slim Hole es la mejor opción económica.
- Todo proyecto geotérmico sobre todo en la perforación de pozos exploratorios, se debe conocer las condiciones naturales del entorno, disponibilidad de materiales y las condiciones del sitio donde se va a perforar para realizar una adecuada evaluación y toma de decisiones.
- Para los proyectos de perforación se debe considerar el Estudio de Impacto Ambiental (EIA) ya que es un proceso destinado a mejorar el sistema de toma de decisiones, y está orientado a garantizar que las opciones de proyectos en consideración, sean ambiental y socialmente sostenibles.
- La planeación de la logística y los tiempos de perforación del pozo es una de las etapas importantes, en donde se establecen como premisas en el proceso los factores económicos, selección del equipo adecuado y materiales a utilizar tanto como el personal de trabajo.

## 8.2 RECOMENDACIONES

Para el desarrollo de proyectos de esta índole se recomienda:

- Considerar durante los estudios preliminares del sitio donde se va a perforar todos los aspectos técnicos, ambientales económicos y sociales; ya que la omisión de estos puede provocar serios problemas con las empresas que vayan a prestar los diferentes servicios.
- Perforar un pozo exploratorio tipo Slim Hole cuando el acceso al punto de perforación sea muy dificultoso, la disponibilidad de recurso hídrico sea relativamente escasa para el desarrollo de la actividad o la plataforma de perforación deba ser pequeña por los desniveles que hayan en el mismo.
- Perforar un pozo exploratorio tipo Slim Hole cuando el presupuesto dirigido para la actividad sea limitado, pues el presupuesto del mismo puede ser entre un 35-50% del total al de la perforación de un pozo convencional.
- Considerar perforación convencional cuando se espere explotar rápidamente el pozo con la instalación de unidades a boca de pozo.
- Para campos geotérmicos aun no perforados, si es media la posibilidad de comprobar / encontrar el recurso (elevada temperatura y permeabilidad adecuada); de acuerdo a los estudios geocientíficos, realizar perforación de un pozo tipo Slim Hole, con el fin de arriesgar menor cantidad de inversión en la actualización de los modelos geocientíficos y búsqueda del recurso.

## 9- BIBLIOGRAFÍA

Alvarenga, Amaya, & Sibrian. (2004). *Evaluación y Análisis de Iso beneficios de la ecoeficiencia en el proceso de la perforación de pozos geotérmicos*. San Salvador.

Baroid. (2006). *Campaña de exploración*. Halliburton.

Chepkech. (2011). *Geothermal Drilling Fluids*. United Nations University, Geothermal Training Programme, Iceland.

Dayan, D. G. (2014). *Drilling Fluid Design for Geothermal Wells*. United Nations University, Geothermal Training Programme.

DEVEREUX, S. (1998). *Practical Well Planning and Drilling Manual*.

Dippipo. (2012). *Geothermal power plants, applications, case of studie and enviromental impact*. California, USA: ELSEVIER.

Evans, K. (2010). *Geothermal Well Cementing, Materials and Placement Techniques*. United Nations University, Geothermal Training Programme, Iceland.

Finger, & Blankenship. (2010). *Handbook of Best Practices of Geotermal Driling*. California, USA: Sandia Resports.

GOMBO, M. (2010). *Drilling Programme foar a Low-Temperature Geothermal Well using a small Rig – Case History: SIGLUFJÖRDUR, N-ICELAND*. United Nations University, Geothermal Training Programme, Iceland.

Hole. (2001). *Geothermal Drilling*. University of Auckland New Zeland, Geothermal Institue.

PETROLEO, I. F. (1991). *Drilling Data Handbook* (Sexta ed.).

Petroleum, B. (2003). *Completamiento Slim hole de BP*. British Petroleum, Colombia.

Staff. (1993). *Survey Slim hole Tech Drilling Contactor*.

## 10- ANEXOS

### ANEXO A

#### A.1 CALCULO DE CEMENTACIONES

En el cálculo de cementaciones se busca estimar 2 valores:

- i) Volumen de lechada para cementación
- ii) Cantidades de agua, cemento, sílice y aditivos

##### A.1.1 VOLUMEN DE LECHADA PARA CEMENTACIÓN

La cementación tiene como objetivo llenar de mezcla todo el espacio anular del pozo entre agujero y casing, y entre casing y casing, para que estos queden anclados y asegurados. Con esto se evita el desmoronamiento del pozo, la contaminación de acuíferos superficiales y la corrosión de las tuberías por la presencia de fluidos corrosivos en la formación.

El espacio anular o capacidad de anular es el espacio que encierran dos cilindros de distintos diámetros y que puede ser ocupado por un fluido.

Esta capacidad anular puede encontrarse entre el agujero perforado, que tiene un diámetro similar al de la barrena, y el casing introducido que tiene un diámetro externo que es menor. También se tiene un espacio anular cuando un casing es introducido al interior del casing de la etapa anterior. El primer casing tiene un diámetro interior y el segundo, que se introduce, tiene un diámetro externo menor.

Los volúmenes pueden ser calculados manualmente asumiendo la geometría del pozo como cilindros perfectos. Las unidades con las que se les representa son litros por metro. Para el cálculo se puede utilizar la siguiente fórmula:

$$\text{Espacio anular} = 1217369.588 * (D_1^2 - D_2^2), \quad [l/m] \quad (1)$$

Donde:

$D_1$  = es el diámetro del agujero o el diámetro interno del casing de la etapa anterior, expresado en pulgadas.

$D_2$  = es el diámetro externo del casing introducido en el agujero abierto o en el casing de la etapa anterior, expresado en pulgadas.

El espacio anular al multiplicarse por la profundidad permite obtener el volumen que la lechada deberá ocupar en la cementación.

En este punto es importante conocer varios volúmenes que dependerán de las ubicaciones de la zapata, collar flotador. También el volumen del agujero abierto que queda por debajo de la zapata.

Es importante también calcular la capacidad de volumen que puede mantener la tubería de perforación, pues por este camino circulará la lecha hasta ingresar a los espacios anulares. La capacidad es calculada con la fórmula de volumen de un cilindro.

En la Figura 14 se muestra un perfil de un pozo cementado con los volúmenes que se han mencionado en este texto.

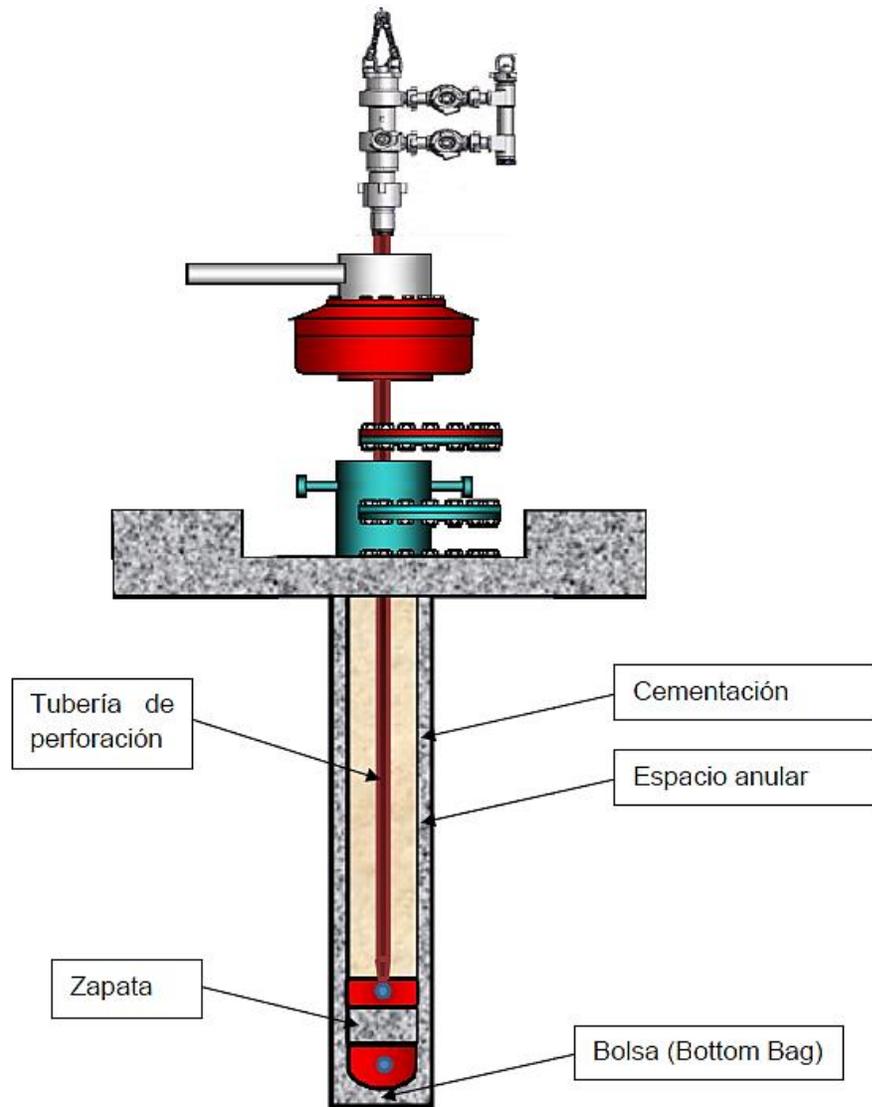


Figura 14. Perfil de un pozo cementado

Con la ayuda de una hoja de cálculo estas operaciones pueden facilitarse y realizarse muy rápidamente. Las capacidades y espacios anulares se encuentran tabulados y estandarizados para los diámetros utilizados en perforación. Así mismo muchas otras propiedades de los materiales empleados en perforación.

Tabla 38. Cálculo de cementación de la Etapa I del primer caso de estudio: Pozo exploratorio de diámetro convencional.

CEMENTACION DE CASING 13 3/8" 54.5 Lb/ft								
DATOS	ID"	CAP. L/m	ANULAR L/m	DATOS	OD"	ID"	CAP. L/m	LB/FT.
HUECO	17.5	155.2	64.5	CASING	13.375	12.615	80.64	54.5
				TP	5	4.276	9.26	19.5
DESCRIPCION		PROFUNDIDADES		VOLUMENES		100	% Exceso	
CASING/CASING	(V1)	0	Metros	Volumen 1	0.0	0.0	Bbl/ lechada	
AGUJERO DESC.	(V2)	98	Metros	Volumen 2	39.8	39.8	Bbl/ lechada	
DESPLAZAMIENTO	(V5)	0	Metros	Volumen 3	0.0	0.0	Bbl/ lechada	
BOLSA (Bottom bag)	(V4)	2	Metros	Volumen 4	2.0	2.0	Bbl/ lechada	
DESPLAZAMIENTO	(V5)	106.6	Metros	Volumen 5	6	Bbl/agua/desplazamiento		
BALANCE DE MASA SOBRE UN SACO DE CEMENTO DE 94 LIBRAS				REQUERIMIENTO/RENDIMIENTO				
Descripción	%peso/peso	kg/saco	kg/litros	litros/kg	litros/saco	X=	23.66	L/Sk
Cemento	100%	42.60	3.14	0.3185	13.57	PR=	43.06	L Lech./Sk
Sílice	35%	14.91	2.63	0.3802	5.67	DENSIDAD	1.89	Kg/L
C-35	0.50%	0.21	1.3	0.7692	0.16	AGUA	7	M <sup>3</sup>
CaCl <sub>2</sub>	0.05%	0.01	1.3	0.7692	0.01	C-35	0.005	0.50%
						CA-AFL	0.02	Gls/Sk
						C-18L	0.02	Gls/Sk
	Masa	57.73		Volumen	19.41	C-24L	0	Gls/Sk
Calculo de volúmenes y aditivos para cementación primaria por stinger							100	% Exceso
Vol/pozo	Bbl d/lech.	Litros/lech	Cemento "H"	Sílice	C-35	CA-AFL	C-18L	C-24L
1	0.0	0.0	0.0	-	-	-	-	-
2	79.5	12,642.0	293.6	175.22	2.76	5.87	5.87	-
3	0.0	0.0	0.0	-	-	-	-	-
4	3.9	620.8	14.4	8.60	0.14	0.29	0.29	-
Totales	83.4	13,263	308	184	3	6	6	0
	bbl lechada	Litros/lech	Sacos	Sacos	Sacos	Galones	Galones	Galones
Densidad	1.89	Kg/L	Aditivos sólidos			Aditivos líquidos		
Agua para Complementaria		7.29	M <sup>3</sup>					

En las Tabla 38 a la 40 se detallan los volúmenes calculados para la cementación de las tres etapas del primer caso de estudio en este texto.

Los datos de la tubería y agujero como diámetros, pesos lineales y capacidades son tomados del libro Drilling Data Handbook, 7ma. Edición, del Instituto Francés del Petróleo.

**Tabla 39. Cálculo de cementación de la Etapa II del primer caso de estudio: Pozo exploratorio de diámetro convencional.**

CEMENTACION DE CASING 9 5/8" 36 Lb/Ft								
DATOS	ID"	CAP. L/m	ANULAR L/m	DATOS	OD"	ID"	CAP. L/m	LB/FT.
HUECO	12.25	76.04	29.1	CASING	9.625	8.921	40.33	36
CSG/CSG	13,375"/9,625"		33.7	TP	5	4.276	9.26	19.5
DESCRIPCION			PROFUNDIDADES	VOLUMENES		100	% Exceso	
CASING/CASING	(V1)		98	Metros	Volumen 1	20.8	0.0	Bbl/lechada
AGUJERO DESC.+%Exceso	(V2)		500	Metros	Volumen 2	91.5	91.5	Bbl/lechada
SHOE TRACK	(V3)		22	Metros	Volumen 3	5.6	0.0	Bbl/lechada
BOLSA +% Exceso	(V4)		2	Metros	Volumen 4	1.0	1.0	Bbl/lechada
DESPLAZAMIENTO	(V5)		584.6	Metros	Volumen 5	34		Bbl/agua desplazamiento
BALANCE DE MASA SOBRE UN SACO DE CEMENTO DE 94 LIBRAS					REQUERIMIENTO/RENDIMIENTO			
Descripción	%peso/peso	kg/saco	kg/litros	litros/kg	litros/saco	X=	23.68	L/Sk
Cemento	100%	42.60	3.14	0.3185	13.57	PR=	43.05	L Lech./Sk
Sílice	35%	14.91	2.63	0.3802	5.67	DENSIDAD	<b>1.89</b>	<b>Kg/L</b>
CA-FR3P	0.40%	0.17	1.3	0.7692	0.13	AGUA	18	M³
						C-35	0.004	0.40%
						CA-AFL	0.02	Gls/Sk
						C-18L	0.33	Gls/Sk
	Masa	57.68		Volumen	19.37	C-24L	0.056	Gls/Sk
Calculo de volúmenes y aditivos para cementación primaria por stinger							100	% Exceso
Vol/pozo	Bbl d/lech.	Litros/lech	Cemento "H"	Sílice	C-35	CA-AFL	C-18L	C-24L
1	20.8	3,302.6	76.7	45.79	0.58	1.53	25.32	4.30
2	183.0	29,100.0	676.0	403.44	5.08	13.52	223.07	37.85
3	5.6	887.3	20.6	12.30	0.15	0.41	6.80	1.15
4	1.9	304.2	7.1	4.22	0.05	0.14	2.33	0.40
<b>Totales</b>	<b>211.3</b>	<b>33,594.0</b>	<b>780.4</b>	<b>466</b>	<b>6</b>	<b>16</b>	<b>258</b>	<b>44</b>
	bbl lechada	Litros/lech	Sacos	Sacos	Sacos	Galones	Galones	Galones
Densidad	1.89	Kg/L	Aditivos sólidos			Aditivos líquidos		
Agua para Complementaria		18.48	M³					

Tabla 40. Cálculo de cementación de la Etapa III del primer caso de estudio: Pozo exploratorio de diámetro convencional.

CEMENTACION DE CASING 13 3/8" 29 Lb/Ft									
DATOS	ID"	CAP. L/m	ANULAR L/m	DATOS	OD"	ID"	CAP. L/m	LB/FT.	
HUECO	8.5	36.61	11.73	CASING	7.000	6.184	19.38	29	
CSG/CSG	9,625"/7"		15.45	TP	3.5	2.602	3.43	15.5	
DESCRIPCION			PROFUNDIDADES	VOLUMENES		50	% Exceso		
CASING/CASING	(V1)		598	Metros	Volumen 1	58.1	0.0	Bbl/ lechada	
AGUJERO DESCUBIERTO	(V2)		450	Metros	Volumen 2	33.2	16.6	Bbl/ lechada	
SHOE TRACK	(V3)		22	Metros	Volumen 3	2.7	0.0	Bbl/ lechada	
BOLSA (Bottom bag)	(V4)		2	Metros	Volumen 4	0.5	0.2	Bbl/ lechada	
DESPLAZAMIENTO	(V5)		1034.6	Metros	Volumen 5	22	Bbl/agua desplazamiento		
BALANCE DE MASA SOBRE UN SACO DE CEMENTO DE 94 LIBRAS									
Descripción	%peso/peso	kg/saco	kg/litros	litros/kg	litros/saco	X=	23.68	L/Sk	
Cemento	100%	42.60	3.14	0.3185	13.57	PR=	43.05	L Lech./ Sk	
Sílice	35%	14.91	2.63	0.3802	5.67	DENSIDAD	1.89	Kg/L	
CA-FR3P	0.40%	0.17	1.3	0.7692	0.13	AGUA	10	M <sup>3</sup>	
						C-35	0.004	0.40%	
						CA-AFL	0.02	Gls/Sk	
						C-18L	0.15	Gls/Sk	
	Masa	57.68		Volume n	19.37	C-24L	0.015	Gls/Sk	
Calculo de volúmenes y aditivos para cementación primaria por stinger								50	% Exceso
Vol/pozo	Bbl d/lech.	Litros/lech	Cemento sk	Sílice	C-35	CA-AFL	C-18L	C-24L	
1	58.1	9,239.1	214.6	128.09	1.61	4.29	32.19	3.22	
2	49.8	7,917.8	183.9	109.77	1.38	3.68	27.59	2.76	
3	2.7	426.4	9.9	5.91	0.07	0.20	1.49	0.15	
4	0.7	109.8	2.6	1.52	0.02	0.05	0.38	0.04	
Totales	111.3	17,693.0	411.0	245	3	8	62	6	
	bbl lechada	Litros/lech	Sacos	Sacos	Sacos	Galones	Galones	Galones	
Densidad	1.89	Kg/L	Aditivos sólidos			Aditivos líquidos			
Agua p/complementaria		9.73	M <sup>3</sup>						

### A.1.2 CANTIDADES DE AGUA, CEMENTO, SÍLICE Y ADITIVOS

Las cantidades de agua, cemento, sílice y aditivos se encuentran en las Tabla 38 a la 40, estas cantidades son calculadas mediante porcentajes en la mezcla en base a los volúmenes determinados.

El cemento representa el 100% de la mezcla y la sílice es común en un 35%. Los aditivos empleados son el dispersante, antiespumante, cloruro de calcio, retardador de fraguado y reductor de fraguado. Los porcentajes de estos aditivos dependerán de la etapa de cementación en la que se requieran.

### A.1.3 CEMENTACIÓN SEGUNDA PROPUESTA: POZO TIPO SLIM HOLE

La cementación en el pozo tipo Slim Hole se realiza en las etapas I y II. El cálculo se realiza de la misma manera que el presentado en el primer caso. Las Tablas a continuación muestran los resultados de los cálculos.

Tabla 41. Cálculos de cementación de la Etapa I del segundo caso: pozo tipo Slim Hole.

CEMENTACION DE CASING 7" 26 Lb/ft								
DATOS	ID"	CAP. L/m	ANULAR L/m	DATOS	OD"	ID"	CAP. L/m	LB/FT.
HUECO	8.5	36.61	11.8	CASING	7.000	6.184	19.38	26
				TP	3.5	2.602	3.43	15.5
DESCRIPCION		PROFUNDIDADES		VOLUMENES		100	% Exeso	
CASING/CASING	(V1)	0	Metros	Volumen 1	0.0	0.0	Bbl/ lechada	
AGUJERO DESC.	(V2)	298	Metros	Volumen 2	22.1	22.1	Bbl/ lechada	
DESPLAZAMIENTO	(V5)	298	Metros	Volumen 3	36.3	0.0	Bbl/ lechada	
BOLSA (Bottom bag)	(V4)	2	Metros	Volumen 4	0.5	0.5	Bbl/ lechada	
DESPLAZAMIENTO	(V5)	8.6	Metros	Volumen 5	0	Bbl/agua/desplazamiento		
BALANCE DE MASA SOBRE UN SACO DE CEMENTO DE 94 LIBRAS				REQUERIMIENTO/RENDIMIENTO				
Descripcion	%peso/peso	kg/saco	kg/litros	litros/klg	litros/saco	X=	23.66	L/Sk
Cemento	100%	42.60	3.14	0.3185	13.57	PR=	43.06	L Lech./Sk
Silice	35%	14.91	2.63	0.3802	5.67	DENSIDAD	1.89	Kg/L
C-35	0.50%	0.21	1.3	0.7692	0.16	AGUA	7	M <sup>3</sup>
CaCl <sub>2</sub>	0.05%	0.01	1.3	0.7692	0.01	C-35	0.005	0.50%
						CA-AFL	0.02	Gls/Sk
						C-18L	0.02	Gls/Sk
	Masa	57.73		Volumen	19.41	C-24L	0	Gls/Sk
Calculo de volúmenes y aditivos para cementación primaria por stinger							100	% Exeso
Vol/pozo	Bbl d/lech.	Litros/lech.	Cemento "H"	Silice	C-35	CA-AFL	C-18L	C-24L
1	0.0	0.0	0.0	-	-	-	-	-
2	44.2	7,032.8	163.3	97.47	1.54	3.27	3.27	-
3	36.3	5,775.2	134.1	80.04	1.26	2.68	2.68	-
4	0.9	146.4	3.4	2.03	0.03	0.07	0.07	-
Totales	81.5	12,954	301	180	3	6	6	0
	bbl lechada	Litros/lech.	Sacos	Sacos	Sacos	Galones	Galones	Galones
Densidad	1.89	Kg/L	Aditivos solidos			Aditivos liquidos		
Agua para Complementaria		7.12	M <sup>3</sup>					

**Tabla 42. Cálculos de cementación de la Etapa II del segundo caso: pozo tipo Slim Hole.**

CEMENTACION DE CASING 5" 11.5 Lb/Ft								
DATOS	ID"	CAP. L/m	ANULAR L/m	DATOS	OD"	ID"	CAP. L/m	LB/FT.
HUECO	5.5	15.33	2.66	CASING	5.000	4.559843	10.54	11.5
CSG/CSG	7"/5"		6.71	TP	2 7/8	2.44	3.01	6.85
DESCRIPCION			PROFUNDIDADES	VOLUMENES		100	% Exeso	
CASING/CASING	(V1)		298	Metros	Volumen 1	12.6	0.0	Bbl/ lechada
AGUJERO DESC.+%Exceso	(V2)		750	Metros	Volumen 2	12.5	12.5	Bbl/ lechada
SHOE TRACK	(V3)		18	Metros	Volumen 3	1.2	0.0	Bbl/ lechada
BOLSA +% Exeso	(V4)		2	Metros	Volumen 4	0.2	0.2	Bbl/ lechada
DESPLAZAMIENTO	(V5)		1038.6	Metros	Volumen 5	20		Bbl/agua desplazamiento
BALANCE DE MASA SOBRE UN SACO DE CEMENTO DE 94 LIBRAS								
Descripcion	%peso/peso	klg/saco	klg/litros	litros/klg	litros/saco	X=	23.68	L/Sk
Cemento	100%	42.60	3.14	0.3185	13.57	PR=	43.05	L Lech./Sk
Silice	35%	14.91	2.63	0.3802	5.67	DENSIDAD	<b>1.89</b>	<b>Kg/L</b>
CA-FR3P	0.40%	0.17	1.3	0.7692	0.13	AGUA	3	M <sup>3</sup>
						C-35	0.004	0.40%
						CA-AFL	0.02	Gls/Sk
						C-18L	0.33	Gls/Sk
	Masa	57.68		Volumen	19.37	C-24L	0.056	Gls/Sk
Calculo de volúmenes y aditivos para cementación primaria por stinger								
							100	% Exeso
Vol/pozo	Bbl d/lech.	Litros/lech.	Cemento "H"	Silice	C-35	CA-AFL	C-18L	C-24L
1	12.6	1,999.6	46.4	27.72	0.35	0.93	15.33	2.60
2	25.1	3,990.0	92.7	55.32	0.70	1.85	30.59	5.19
3	1.2	189.7	4.4	2.63	0.03	0.09	1.45	0.25
4	0.4	61.3	1.4	0.85	0.01	0.03	0.47	0.08
<b>Totales</b>	<b>39.2</b>	<b>6,240.6</b>	<b>145.0</b>	<b>87</b>	<b>1</b>	<b>3</b>	<b>48</b>	<b>8</b>
	bbl lechada	Litros/lech.	Sacos	Sacos	Sacos	Galones	Galones	Galones
Densidad	1.89	Kg/L	Aditivos solidos			Aditivos líquidos		
Agua para Complementaria		3.43	M <sup>3</sup>					

## ANEXOS B

Tabla 43. Desglose de costo de materiales de perforación para un pozo convencional.

MATERIALES PARA PERFORACION POZO CONVENCIONAL					
PTDA.	DESCRIPCION	UNIDAD	PRECIO		
			UNITARIO	CANT	COSTO (\$)
<b>C.</b>	<b>MATERIALES PARA PERFORACION</b>				
<b>C.1</b>	<b>MATERIALES PARA FLUIDO PERFORACION</b>				<b>86,202.55</b>
	Bentonita montmorillonitica. (Glo Ben 1000)	Ton	375.00	26.00	9,750.00
	Bentonita 100 lb/saco (local)	Ton	0.00	-	0.00
	Polícramila Parcialmente Hidrolizada (PHPA)	Ton	2,962.00	1.00	2,962.00
	Carboxi Metil Celulosa (CMC - HV) , 50 lb/saco	Ton	5,648.00	5.00	28,240.00
	Leonardita Altamente oxidada, 50 lbs/saco	Ton	740.55	1.00	740.55
	Agente Controlador de Filtrado, HTHP ,50 lbs/saco	Ton	3,404.39		0.00
	Lignosulfonato libre de cromo (libre de Cr)	Ton	2,253.00	2.00	4,506.00
	Aditivo lubricante (GLO EP 1000)	Ton	3,200.00		0.00
	Goma Xantica	Ton	7,902.00	2.00	15,804.00
	Aditivo antiespumante (Glo defoam 4000)	Ton	3,250.00		0.00
	Soda cáustica, 50 lb/saco (local)	Ton	800.00	4.00	3,200.00
	Bicarbonato de Sodio, 100 lbs/saco (local)	Ton	410.00		0.00
	Liberador de Tubería	Ton	4,829.33		0.00
	Black sack 25 kg/saco	Ton	2500.00	3	7,500.00
	Detergente de perforación 200 kg/drum	Ton	3000.00	3	9,000.00
	Lignita cáustica (Caustilig) 22.72 kg/saco	Ton	1500.00	3	4,500.00
<b>C.2</b>	<b>BARRENAS</b>				<b>152,802.00</b>
	17 ½" IADC 515, de insertos	C/U	18,901.00	2.00	37,802.00
	12 ¼" IADC 515, de insertos	C/U	14,000.00	3.00	42,000.00
	8 ½" IADC 515, de insertos	C/U	7,000.00	3.00	21,000.00
	6 ¼" IADC 515, de insertos	C/U	6,000.00	2.00	12,000.00
	6 ¼" IADC 637, de insertos	C/U	6,500.00	2.00	13,000.00
	Corona de 6"	C/U	15,000.00	1.00	15,000.00
	Corona de 4"	C/U	12,000.00	1.00	12,000.00
<b>C.3</b>	<b>TUBERIAS DE REVESTIMIENTO</b>				<b>187,650.00</b>
	Tubería de 13 3/8", K-55, 54.5 lb/pie, Buttress	m	130.00	125.00	16,250.00
	Tubería de 9 5/8", K-55, 36 lb/pie, Buttress	m	75.00	650.00	48,750.00
	Tubería de 7", K-55, 29.7 lbs/pie, Buttress	m	61.50	1,100.00	67,650.00
	Tubería ranurada de 5 1/2", 20 lbs/pie, Hydrill	m	100.00	550.00	55,000.00

Continúa Tabla 43

<b>C.4</b>	<b>ACCESORIOS DE CABEZAL</b>				<b>49,103.00</b>
	Valvula maestra de 8" - API 2000	C/U	25,000.00	1	25,000.00
	Carrete adaptador de 10" x 8" - API 2000	C/U	9,273.00	1	9,273.00
	Valvula lateral de 2" - API 2000	C/U	5,025.00	2	10,050.00
	Brida de 10" - 2000 API (companion flange)	C/U	2,500.00	1	2,500.00
	Brida superior (slip-on) de 8" - ANSI 600	C/U	1,680.00	1	1,680.00
	Brida (slip-on) de 2" - ANSI 600 RJ	C/U	300.00	2.00	600.00
<b>C.5</b>	<b>ACCESORIOS DE CEMENTACION</b>				<b>33,765.00</b>
	Collar flotador de 9 5/8", STD, Buttress	C/U	1,600.00	1.00	1,600.00
	Collar flotador de 7", Stab-in, Buttress	C/U	1,120.00	1.00	1,120.00
	Zapata flotadora de 13 3/8", Stab-in, Buttress	C/U	2,000.00	1.00	2,000.00
	Zapata flotadora de 9 5/8", STD, Buttress	C/U	1,000.00	1.00	1,000.00
	Zapata flotadora de 7", STD, Buttress	C/U	700.00	1.00	700.00
	Zapata guía de 5 1/2"	C/U	500.00	1.00	500.00
	Centralizador straight de 13 3/8"	C/U	98.00	8.00	784.00
	Centralizador straight de 9 5/8"	C/U	74.00	25.00	1,850.00
	Centralizador straight de 7"	C/U	60.00	35.00	2,100.00
	Colgador de 5 1/2 x 7"	C/U	15,000.00	1.00	15,000.00
	Tapón de desplazamiento para T.P. (dardo)	C/U	875.00	4.00	3,500.00
	Adaptador stinger TP-5", rosca 4 1/2" IF	C/U	3,611.00	1.00	3,611.00
	<b>TOTAL US (\$)</b>				<b>509,522.55</b>

Tabla 44. Desglose de costo de materiales de perforación para un pozo Slim Hole.

<b>MATERIALES PARA PERFORACION POZO SLIM HOLE</b>					
<b>PTDA.</b>	<b>DESCRIPCION</b>	<b>UNIDAD</b>	<b>PRECIO</b>		
			<b>UNITARIO</b>	<b>CANT</b>	<b>COSTO (\$)</b>
<b>C.</b>	<b>MATERIALES PARA PERFORACION</b>				
<b>C.1</b>	<b>MATERIALES PARA FLUIDO PERFORACION</b>				<b>27,805.55</b>
	Bentonita montmorillonitica. (Glo Ben 1000)	Ton	375.00	8.00	3,000.00
	Polícrámila Parcialmente Hidrolizada (PHPA)	Ton	2,962.00	1.00	2,962.00
	Carboxi Metil Celulosa (CMC - HV) , 50 lb/saco	Ton	5,648.00	1.00	5,648.00
	Leonardita Altamente oxidada, 50 lbs/saco	Ton	740.55	1.00	740.55
	Agente Controlador de Filtrado, HTHP ,50 lbs/saco	Ton	3,404.39		0.00
	Lignosulfonato libre de cromo (libre de Cr)	Ton	2,253.00	1.00	2,253.00
	Aditivo lubricante (GLO EP 1000)	Ton	3,200.00		0.00
	Goma Xantica	Ton	7,902.00	1.00	7,902.00
	Aditivo antiespumante (Glo defoam 4000)	Ton	3,250.00		0.00
	Soda cáustica, 50 lb/saco (local)	Ton	800.00	1.00	800.00
	Bicarbonato de Sodio, 100 lbs/saco (local)	Ton	410.00		0.00
	Liberador de Tubería (Slick Pipe-NT)	Ton	4,829.33		0.00
	Detergente de perforación 200 kg/drum	Ton	3,000.00	1.00	3,000.00
	Lignita cáustica (Caustilig) 22.72 kg/saco	Ton	1,500.00	1.00	1,500.00

Continúa Tabla 44.

<b>C.2</b>	<b>BARRENAS</b>				<b>23,560.00</b>
	8 ½" IADC 515, de insertos	C/U	7,000.00	2.00	14,000.00
	5 ½" IADC 515, de insertos	C/U	4,000.00	2.00	8,000.00
	Broca HQ	C/U	780.00	2.00	1,560.00
<b>C.3</b>	<b>TUBERIAS DE REVESTIMIENTO</b>				<b>215,806.20</b>
	Tubería de 7", K-55, 29.7 lbs/pie, Hydril	m	73.00	312.00	22,776.00
	Tubería de 5", K-55, 11.5 lbs/pie, Hydril	m	66.00	1,074.00	70,884.00
	Casing NW (10')	C/U	218.90	558.00	122,146.20
<b>C.4</b>	<b>ACCESORIOS DE CABEZAL</b>				<b>9,710.35</b>
	Brida 6" ANSI 600	C/U	404.34	1.00	404.34
	Carrete 6" ANSI 600	C/U	470.00	1.00	470.00
	Valvula 6" ANSI 600	C/U	6,623.09	1.00	6,623.09
	Válvula 2" ANSI 600	C/U	1,106.46	2.00	2,212.92
<b>C.5</b>	<b>ACCESORIOS DE CEMENTACION</b>				<b>12,293.62</b>
	Collar flotador de 5", STD, Hydril	C/U	1,760.00	1.00	1,760.00
	Zapata flotadora de 7", Stab-in, Hydril	C/U	2,000.00	1.00	2,000.00
	Zapata flotadora de 5", Stab-in, Hydril	C/U	1,400.00	1.00	1,400.00
	Zapata guía 3.5"	C/U	400.00	1.00	400.00
	Centralizador straight de 7"	C/U	59.20	9.00	532.80
	Centralizador straight de 5"	C/U	47.36	67.00	3,173.12
	Tapón de desplazamiento para T.P. (dardo)	C/U	500.00	1.00	500.00
	Adaptador stinger TP-2 7/8"	C/U	2,527.70	1.00	2,527.70
	<b>TOTAL US (\$)</b>				<b>289,175.72</b>