

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR  
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA  
ESCUELA DE POSGRADO

DIPLOMADO EN GEOTERMIA PARA AMÉRICA LATINA  
EDICION 2018



**ESTUDIO DE MANIFESTACIONES SUPERFICIALES EN  
PLATAFORMAS DE POZOS GEOTÉRMICOS**

PRESENTAN: Roger Isaac Castellón Ríos

Carlos Eduardo Garcia Antezana

ASESOR: Claudia Mejía de Molina

CIUDAD UNIVERSITARIA, DICIEMBRE 2018



*Dedicado a mi abuela:*

*Elena Arauco Valles*

*Q.E.P.D.*

***“La única adicción saludable, es el amor”***

*J. Mujica*

## ÍNDICE

<b>CONTENIDO.....</b>	<b>Pág.</b>
<b>1. RESUMEN .....</b>	<b>1</b>
<b>2. INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>1</b>
<b>3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA .....</b>	<b>2</b>
<b>4. JUSTIFICACIÓN DEL ESTUDIO .....</b>	<b>2</b>
<b>5. OBJETIVOS.....</b>	<b>3</b>
5.1. Objetivo General .....	3
5.2. Objetivos Específicos .....	3
<b>6. MARCO TEÓRICO.....</b>	<b>3</b>
6.1. Plataformas de pozos geotérmicos.....	3
6.2. Equipos superficiales .....	6
6.2.1. Cabezal de pozo .....	7
6.2.2. Separador ciclónico.....	8
6.2.3. Sistemas de tuberías y acarreo.....	9
6.3. Corrosión.....	10
6.3.1. Métodos de control de corrosión .....	11
6.4. Manifestaciones Superficiales .....	11
6.4.1. Alteración Hidrotermal .....	13
6.4.2. Factores que afectan la alteración hidrotermal.....	13
6.4.3. Procesos debidos a la alteración hidrotermal.....	14
6.4.4. Tipos de alteración hidrotermal.....	14
<b>7. METODOLOGÍA .....</b>	<b>15</b>
<b>8. ANÁLISIS DE DATOS .....</b>	<b>16</b>
8.1. Caso de estudio .....	16
8.1.1. Introducción .....	16
8.1.2. Situación actual.....	20
8.1.3. Análisis de caso de estudio y formulación de hipótesis.....	23
8.1.4. Recomendaciones y propuestas de solución para el caso de estudio.....	27
<b>9. PRESENTACIÓN DE RESULTADOS .....</b>	<b>28</b>
9.1. Metodología de la propuesta recomendada.....	28
9.1.1. Perforación de pozos e inyección de cemento .....	28
9.1.2. Instalación de respiraderos (sistema de venteo) en el área de la plataforma .....	32



9.1.3. Programa de mantenimiento de tubería conductora .....	34
<b>10. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....</b>	<b>37</b>
10.1. Conclusiones .....	37
10.2. Recomendaciones .....	38
<b>11. AGRADECIMIENTOS.....</b>	<b>38</b>
<b>12. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>39</b>
<b>13. APÉNDICES .....</b>	<b>40</b>

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Sitios y obras civiles durante la construcción de una plataforma geotérmica.....	4
<b>Figura 2.</b> Esquema de distribución de equipos típicos de una torre de perforación .....	4
<b>Figura 3.</b> Plataforma de perforación luego de obras civiles .....	5
<b>Figura 4.</b> Diseño telescópico de pozos geotérmicos .....	6
<b>Figura 5.</b> Profundidades y diámetros típicos en la perforación de pozos geotérmicos.....	6
<b>Figura 6.</b> Equipos superficiales instalados en una plataforma geotérmica.....	7
<b>Figura 7.</b> Válvula de cabezal y línea (sacrificio) de pozo geotérmico.....	8
<b>Figura 8.</b> Equipos superficiales en plataforma de separación.....	9
<b>Figura 9.</b> Líneas de acarreo de flujo vapor y salmuera.....	10
<b>Figura 10.</b> Manifestaciones superficiales.....	12
<b>Figura 11.</b> Ubicación de Central Geotérmica San Jacinto Tizate.....	16
<b>Figura 12.</b> Plataforma SJ6 luego de perforación de pozo SJ6-1.....	17
<b>Figura 13.</b> Inicio de manifestaciones alrededor de plataforma y fumarola .....	18
<b>Figura 14.</b> Plataforma SJ6 luego de perforación de pozo SJ6-2.....	19
<b>Figura 15.</b> Plataforma SJ6 luego de perforación de pozo SJ6-3.....	20
<b>Figura 16.</b> Plataforma SJ6.....	21
<b>Figura 17.</b> Acceso a plataforma SJ6 en la actualidad.....	21
<b>Figura 18.</b> Plataforma SJ6 en la actualidad.....	22
<b>Figura 19.</b> Muestreo de temperaturas en plataforma SJ6.....	22
<b>Figura 20.</b> Mapa geoelectrico plataforma del área de la Central San Jacinto .....	23
<b>Figura 21.</b> Perfil geoelectrico del área de San Jacinto Tizate .....	24
<b>Figura 22.</b> Anomalías en la plataforma SJ6.....	26
<b>Figura 23.</b> Propuesta de distribución de pozos de lechada. ....	30
<b>Figura 24.</b> Preventor anular de pozo (4 ½'') .....	32
<b>Figura 25.</b> Respiraderos ubicados en plataforma SJ5 – San Jacinto Tizate .....	32
<b>Figura 26.</b> Diseño de respiraderos .....	33
<b>Figura 27.</b> Daños en equipos superficiales y tubería conductora.....	35
<b>Figura 28.</b> Secuencia de reparación de tubería conductora .....	37

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1.</b> Descripción litológica de pozo de lechada 1 .....	25
<b>Tabla 2.</b> Muestreo de gases alrededor de la plataforma SJ6 .....	27
<b>Tabla 3.</b> Características del equipo de perforación de pozos de lechada .....	28
<b>Tabla 4.</b> Diseño de pozo de lechada. ....	30

## 1. RESUMEN

Este documento reúne temáticas sobre manifestaciones superficiales que surgen comúnmente en zonas de campos geotérmicos. Ante estas alteraciones es necesario realizar estudios y control para conocer los orígenes y evolución en especial para casos riesgosos en plataformas de pozos geotérmicos en operación.

Se toma como caso de estudio una plataforma de pozos productores donde las alteraciones superficiales han invadido parcialmente el área de la plataforma. Los gases y vapores que emanan a la superficie han dañado el material (tuberías) y acortado la vida útil de las estructuras (contrapozo), así también las altas temperaturas existentes a nivel del suelo son de gran riesgo para personal que transita en el área de la plataforma.

Con los estudios realizados a la fecha en el área se logró realizar el análisis del caso para interpretar las posibles causas de la evolución de las alteraciones, así también para proponer las posibles medidas de prevención y control, para evitar mayores daños en el área.

Las medidas de mitigación propuestas son basadas en experiencias similares que se han tenido en diferentes campos geotérmicos de la región.

## 2. INTRODUCCIÓN

El aprovechamiento de los recursos geotérmicos ha sido de gran ventaja y beneficio para el desarrollo sostenible de nuestra tierra. Se trata de utilizar adecuadamente el calor presente en el interior de la tierra y convertirlo en diferentes fines de acuerdo a nuestra necesidad.

Para la generación de electricidad con la geotermia, es necesario la extracción del recurso (fluido a cierta temperatura) por medio de la perforación de pozos a gran profundidad y la instalación de equipos superficiales para la conversión de la energía. Sin embargo, antes de iniciar estas actividades es necesario realizar una serie de estudios y verificaciones en toda la zona de posible existencia del recurso geotérmico.

En las áreas con potencial geotérmico es común encontrar suelos con emisiones de gases, vapor, agua, lodo hirviendo y otros tipos de manifestaciones superficiales como fumarolas y suelos humeantes (llamadas también zonas de alteración hidrotermal), las cuales pueden indicar cambios continuos en permeabilidad, temperatura, infiltración de fluidos o aguas superficiales. Estos cambios o afectaciones superficiales pueden ser perjudiciales para la estabilidad de las plataformas y para los equipos instalados en el sitio.

Estas consideraciones deben de ser tomadas en cuenta antes de las actividades de construcción de plataformas, perforación de pozos e instalación de equipos superficiales.



Ante este tipo de manifestaciones es necesario realizar un estudio detallado de la zona y de sus características litológicas y de estabilidad del terreno, para decidir si es conveniente utilizar el área para la construcción de la plataforma para perforación de pozos geotérmicos o como área para montaje de equipos superficiales.

Si el área consta con alguna inestabilidad o alteración, es posible realizar algunas intervenciones y trabajos civiles o mecánicos para la estabilización previa de la zona. Todo dependerá del grado de inestabilidad superficial que se encuentre en el suelo y de las metodologías escogidas para dichas intervenciones.

El documento presenta información relacionada con los tipos de manifestaciones superficiales en plataformas de pozos geotérmicos, así como las medidas de mitigación y daños que se pueden ocasionar a equipos y estructuras.

### 3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Durante la planeación para la perforación de pozos geotérmicos, se toman en cuenta los resultados de los trabajos de exploración superficial y se selecciona el lugar idóneo para la construcción de la plataforma tomando en cuenta las condiciones como: características mecánicas de la torre de perforación, de obras civiles (rutas de acceso, topografía, entre otros), legales, ambientales y demás. Sin embargo, muy poco se considera las características superficiales del suelo y de estructuras litológicas superficiales que pueden afectar la estabilidad de la plataforma a corto o largo plazo.

Se toma en cuenta como caso de estudio una plataforma de producción donde se puede observar el efecto de manifestaciones hidrotermales en los equipos superficiales (corrosión) y en la plataforma (inestabilidad, daño en la estructura civil).

Estas manifestaciones superficiales traen consigo muchos riesgos e inconvenientes antes, durante y después de la perforación de un pozo geotérmico, la misma puede no ser visible en los primeros años de operación, dependerá de la intensidad en la que se presente.

Para determinar las posibles causas que originan este tipo de manifestaciones es necesario realizar un análisis de factores involucrados en la composición del suelo de la plataforma, según sea el caso de estudio para establecer las medidas de mitigación necesarias para evitar daños y pérdidas económicas considerables.

### 4. JUSTIFICACIÓN DEL ESTUDIO

Las manifestaciones superficiales en plataformas geotérmicas durante la etapa de operación de una central geotérmica, crean mayores riesgos de pérdidas económicas debido al deterioro continuo de equipos, reemplazo de piezas o salidas forzadas de pozos, así también los costos adicionales para la mitigación y reparación. En algunos casos estas manifestaciones pueden provocar daños a las tuberías de revestimiento superficiales de los pozos, lo que traería un potencial riesgo de deterioro a la integridad interna de pozo.

El control y mitigación de este tipo de emanaciones de la superficie del suelo, involucra un estudio de los impactos negativos para los equipos superficiales en la zona.

Los resultados obtenidos del presente estudio podrán ser utilizados como base para determinar si un área reúne las características mecánicas y geológicas para realizar construcción de obras civiles (plataforma para pozos geotérmicos).

El presente documento servirá como referencia para evaluar los tipos de daños ocasionados por las alteraciones en plataformas geotérmicas, además de la metodología de solución adecuada.

## **5. OBJETIVOS**

### **5.1. Objetivo General**

Estudiar las manifestaciones superficiales en plataformas de pozos geotérmicos, para evaluar su impacto en equipos superficiales de la plataforma.

### **5.2. Objetivos Específicos**

- Estudiar los tipos de afectaciones superficiales en plataformas de pozos geotérmicos.
- Analizar los factores influyentes que generan este tipo de afectaciones en un caso de estudio en una plataforma de pozos productores.
- Presentar posibles medidas de mitigación para caso de estudio.
- Presentar metodología de solución para caso de estudio.

---

3

## **6. MARCO TEÓRICO**

### **6.1. Plataformas de pozos geotérmicos**

Todo proyecto geotérmico inicia con el reconocimiento del área de exploración, adicionalmente se necesita la ejecución de las demás etapas del proyecto como pre-factibilidad, factibilidad, desarrollo.

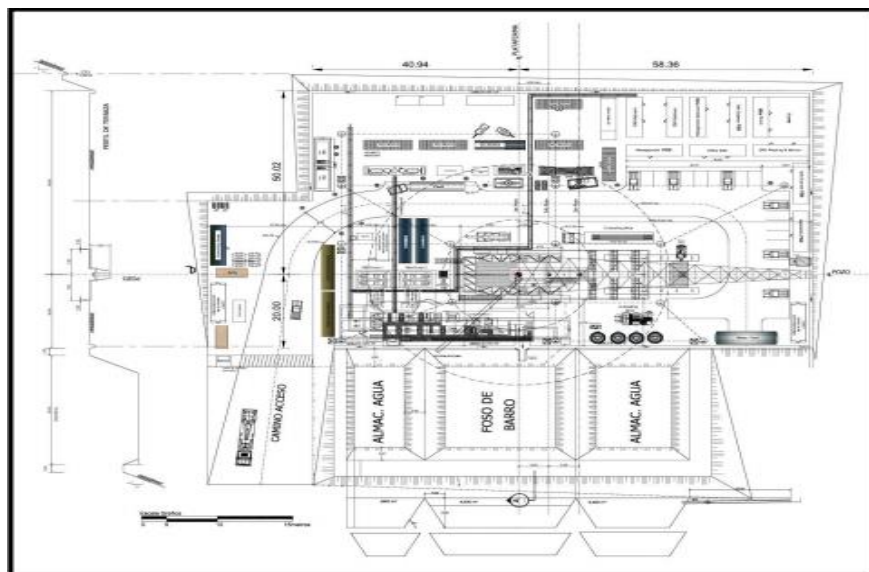
Para la ejecución de estas etapas se requiere de diferentes disciplinas geo-científicas como geología, geofísica, hidrogeología, geoquímica, entre otras y a través de un exhaustivo análisis e interpretación de datos se delimitan las zonas de interés, ubicación de reservorios y de los sitios (plataformas para pozos) en donde se deben perforar los pozos productores y re-inyectores.

Antes de iniciar el proyecto se seleccionan los lugares más adecuados para la construcción de las plataformas de perforación, estaciones de separación, equipos de planta y sub estación eléctrica. La selección dependerá de las características de la zona, dimensiones del área del reservorio y su potencial de generación, los requerimientos de los equipos de perforación, de las dimensiones y capacidades de la planta y equipos de separación, entre otros (Figura 1).



**Figura 1.** Sitios y obras civiles durante la construcción de una plataforma geotérmica (Mayorga, 2018).

Una plataforma geotérmica es toda aquella área destinada para realizar la perforación de pozos geotérmicos, para luego ser ocupada en la instalación de equipos superficiales necesarios para la operación de una central geotérmica. Anterior a la perforación es necesario adecuar el área realizando obras civiles como: caminos de acceso, terracería, cortes de taludes, drenajes pluviales, pilas de lodo, relleno de materiales selecto, compactación, entre otros. Las dimensiones y espacios de la plataforma dependerán del tipo y cantidad de pozos a perforar, del proceso de perforación a utilizar, de la profundidad del pozo, capacidades del equipo de perforación entre otras. La normatividad de obras civiles determina el tipo de concreto reforzado necesario para la construcción del contrapozo, dependiente de las cargas a las que estará sometidas durante la perforación del pozo geotérmico (Figura 2).



**Figura 2.** Esquema de distribución de equipos típicos de una torre de perforación (Polio, 2018).

La plataforma destinada para la perforación del pozo, se requiere la construcción de otras estructuras necesarias durante el proceso como: pilas de lodos y recortes, pilas de agua, canales de drenaje, talud y caminos de acceso en el área de la plataforma (**Figura 3**).



**Figura 3.** Plataforma de perforación luego de obras civiles (**Fuente: Mayorga, 2018**).

El diseño constructivo de un pozo geotérmico dependerá de las características litológicas de la zona, de la profundidad y dirección del área objetivo que se busca. Usualmente la estructura consta de un diseño telescópico donde cada etapa es aislada físicamente del terreno y de zonas de acuíferos superficiales. La tubería de recubrimiento comúnmente llamada “casing” protege y da estabilidad a los pozos donde podrían encontrarse problemas de erosión y estructuras no consolidadas.

Los primeros 10 - 15 metros de profundidad son construidos durante las obras civiles donde se instala el primer casing o tubería conductora. Tanto el tubo conductor como el casing superficial (50 - 150 metros) son los más afectados por las emanaciones de vapores y gases que salen a la superficie dañando directamente la integridad del pozo (Figura 4).



Figura 4. Diseño telescópico de pozos geotérmicos (Fuente: Mayorga, 2018).

La figura 5 muestra las profundidades y diámetros típicos en la perforación de pozos geotérmicos.

Etapa	Diametro de Agujero (pulg.)	Diametro de Tubería (pulg.)	Profundidad (m)	Función
Obra Civil	40	36	8 - 12	Estructural
1a.	32	26	60 - 150	Superficial
	26	20		
2a.	23	18 5/8	400 - 900	Intermedia
	17 1/2	13 3/8		
3a.	17 1/2	13 3/8	800 -1600	Anclaje / Producción
	12 1/4	9 5/8		
4a.	12 1/4	9 5/8	1500 -2600	Liner
	8 1/2	7 5/8 - 7		

Figura 5. Profundidades y diámetros típicos en la perforación de pozos geotérmicos (Fuente: Mayorga, 2018).

## 6.2. Equipos superficiales

Luego de la perforación de los pozos geotérmicos es necesario la instalación de un conjunto de equipos y líneas de acarreo para separar y llevar el fluido geotérmico hacia la planta, donde se hará el proceso de conversión a energía eléctrica. Los equipos superficiales son todos aquellos destinados para la regulación y control del flujo proveniente de los pozos.

Estos equipos son usados para separar el fluido bifásico, control de parámetros operativos (presión, temperatura, caudal), protección sobre presión, así también equipos para realizar pruebas de producción como silenciadores, válvulas, canaletas, líneas de acarreo y derivación de flujos, pilas de salmuera, entre otros (Figura 6).



Figura 6. Equipos superficiales instalados en una plataforma geotérmica. (Fuente: Flamenco, 2018)

Es de vital importancia que todos estos equipos mantengan su integridad física para operar correctamente y evitar posibles accidentes durante la operación. Las manifestaciones superficiales afectan esta integridad en los equipos ocasionando corrosión agresiva, la cual causa un rápido deterioro. Una central geotérmica consta con un plan de mantenimiento preventivo/correctivo lo cual prolonga la vida útil y evalúa el estado de los equipos, sin embargo, en los equipos que sufren daños por corrosión debido a las manifestaciones superficiales en la zona (altos contenidos de  $\text{CO}_2$  y  $\text{H}_2\text{S}$ ), requieren mantenimientos continuos y de costos elevados debido a la gravedad de los daños.

### 6.2.1. Cabezal de pozo

El cabezal es el punto final donde las sartas concéntricas de revestimientos y tuberías de producción llegan a la superficie. Esa colección de válvulas, carretes y elementos empacadores se conoce como el cabezal.

La función es de controlar y dirigir la entrada y salida de fluidos y gases, bajo las condiciones de presión de las distintas sartas de tubería, principalmente con el uso de las válvulas y reductores. Además, proporciona salidas para el retorno de fluidos que ascienden por el espacio anular. Facilitar la suspensión y sellar la siguiente sarta de revestimiento; y los espacios anulares entre las tuberías (Figura 7) (Mendoza, 2015).



**Figura 7.** Válvula de cabezal y línea (sacrificio) de pozo geotérmico 1) Válvula maestra; 2) Válvula de proceso (sacrificio); 3) Tubería de acarreo de flujo bifásico (**Fuente: Flamenco, 2018**).

Además de las válvulas de cabezal de pozo, la plataforma de producción consta con equipos adicionales necesarios para la operación de un pozo como: tuberías de acarreo, equipos de medición de flujo, indicadores de presión y temperatura, contra pozo, válvulas venteos y drenaje, entre otras.

8

### 6.2.2. Separador ciclónico

El fluido bifásico saliente de los pozos productores es necesario separarlo en fases independientes. Para esto se utiliza un equipo mecánico llamado separador ciclónico. Dependiendo de las necesidades de separación puede ser horizontal o vertical. El separador ciclónico más usado actualmente es del tipo Webre vertical.

Para la selección del separador ciclónico adecuado es necesario hacer una serie de cálculos para la mejor elección: masas del flujo bifásico, calidad de fluido, entalpía total del fluido, presión y temperatura del fluido, pérdidas de presión, entre otras. Con todos estos datos de operación del separador ciclónico podemos estimar la eficiencia de separación de fases, la cual no podrá ser menor del 99%, esto nos podrá garantizar la separación de vapor lo más efectiva posible (Figura 8).



**Figura 8.** Equipos superficiales en plataforma de separación 1) Separador ciclónico; 2) Tanque de agua; 3) Tanque de bola; 4) Líneas de acarreo (Fuente: Flamenco, 2018)

Además del separador ciclónico, el sistema de separación incluye otros equipos necesarios para poder poner en servicio este sistema.

Entre los equipos complementarios están: Equipos de medición e instrumentación (presión, temperatura, caudal), válvulas manuales o automáticas para el control de presiones y flujos de operación, bombas de reinyección (si aplica), discos de ruptura, silenciadores, entre otros.

9

### 6.2.3. Sistemas de tuberías y acarreo

Las tuberías de acarreo de flujo bifásico, vapor y salmuera tienen que ser seleccionadas de acuerdo al rango de operación de cada sistema. En primera instancia considerando los parámetros de cada fluido para calcular las dimensiones de las mismas y manteniendo las mínimas pérdidas hidráulicas posibles.

Las tuberías de la línea de salmuera son generalmente de pequeño diámetro y en ocasiones uso de líneas paralelas para lograr un mayor flujo de reinyección (Figura 9).





Figura 9. Líneas de acarreo de flujo vapor y salmuera. (Fuente: Elaboración Propia, 2018)

### 6.3. Corrosión

Se define como la destrucción o deterioro continuo a través del tiempo de un material debido a una reacción química o electroquímica con el medio ambiente donde se encuentra trabajando u operando (Casallas, 2005).

Las formas más conocidas de corrosión son:

- **Corrosión uniforme**, el metal es afectado uniformemente, quedando la superficie cubierta con los residuos resultantes del proceso de corrosión. Este fenómeno es muy común en los equipos o superficies expuestas a altas temperaturas y en materiales metálicos expuestos a soluciones ácidas.
- **Corrosión localizada**, el ataque se da como pequeños agujeros tipo, los cuales son de forma irregular que a menudo se conectan entre sí. Entre las causas más comunes están: a) Imperfecciones estructurales del metal; b) Impurezas y heterogeneidad de las aleaciones; c) Transformaciones metalúrgicas en el metal base por acción de procesos de soldadura o procesos de transformación y conformado. d) Formación de pequeñas celdas electrolíticas por contacto del metal o de uniones de metales diferentes con soluciones de concentración variable.
- **Corrosión por ataque selectivo**, se da en metales o aleaciones no homogéneos, debido a inclusiones, segregación, presencia líquidos contaminados.
- **Corrosión por agrietamiento**, este fenómeno es muy común en partes de equipos rotativos como ejes, pernos, partes de máquinas con geometría irregular fabricadas en acero al carbono.
- **Corrosión por erosión**, los metales son expuestos en ambientes agresivos o propicios para un proceso de corrosión y los productos de este se desprenden del metal generándose erosión y con ella la desintegración.

- **Corrosión galvánica**, se puede dar entre zonas distintas del mismo material o entre materiales distintos que están en contacto y en presencia de un electrolito determinado generando ataque sobre uno de los dos a cambio de la protección del otro, lo cual es conocido como corrosión galvánica.
- **Corrosión por altas temperaturas**, el acero es una aleación hierro - carbono que es susceptible a transformaciones al ser expuesto a altas temperaturas, las cuales tienen comportamientos diferentes a un ataque por corrosión.

Algunas formas de corrosión por altas temperaturas son:

- Oxidación en seco por ataque de oxígeno, carbono o azufre, agravado por la formación de gases que hacen frágil el metal.
- Corrosión por transferencia de masa (solución de ésta en un punto y acumulación en otro).
- Corrosión ocasionada por destrucción de las capas protectoras del metal.

### 6.3.1. Métodos de control de corrosión

Entre los métodos más utilizados esta:

- Protección catódica.
- Protección anódica.
- Recubrimientos orgánicos.
- Recubrimientos inorgánicos.
- Selección de materiales.
- Modificaciones de diseño.
- Modificaciones del medio actuante.

Durante el diseño de una central geotérmica se seleccionan los tipos de materiales y equipos a utilizar dependiendo de las características físicas del fluido geotérmico disponible y al ambiente de trabajo a que serán sometidos los equipos. De la correcta selección de los materiales dependerá la vida útil de los equipos utilizados. En las centrales geotérmicas los equipos están expuestos a diferentes ambientes que pueden provocar daños a las propiedades físicas del equipo. Esto debido a que lo ambientes contienen sustancias corrosivas como: gases disueltos, sulfuro de hidrógeno ( $H_2S$ ) y dióxido de carbono ( $CO_2$ ), y los iones de cloruro ( $Cl^-$ ) (**Casallas, 2005**).

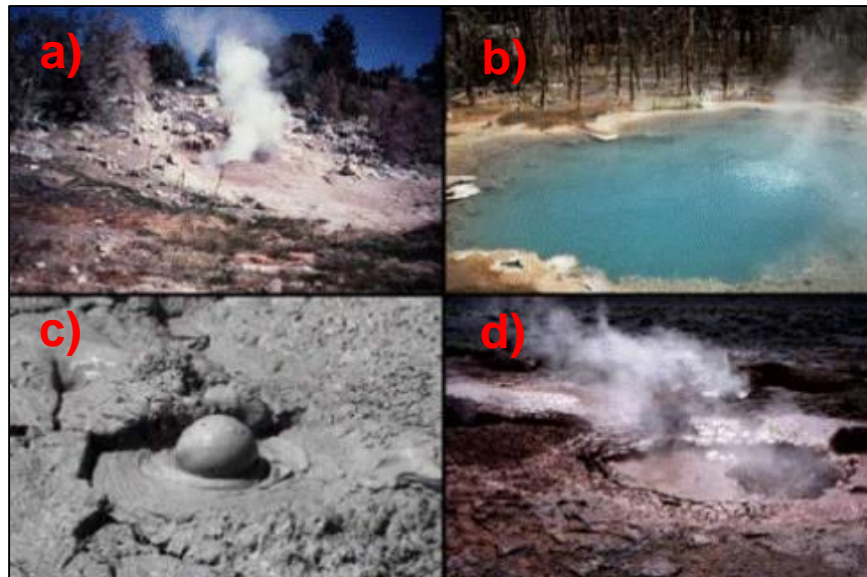
### 6.4. Manifestaciones Superficiales

Según **Llopis y Rodrigo (2010)**, determinadas zonas de la litosfera están sometidas a tensiones que generan gran cantidad de calor y presión, produciéndose fracturas y fallas por las cuales pueden ascender desde el manto, magmas, masas de rocas incandescentes, en estado de fusión total o parcial, con pequeñas cantidades de materias volátiles como agua, anhídrido carbónico, ácidos sulfúrico y clorhídrico, etc.

Si las condiciones tectónicas son favorables, los magmas, por su movilidad, pueden ejercer un empuje hacia arriba y romper la costra superficial de la tierra, formando volcanes que expulsan lavas, cenizas y gases.

Se estima que, para una determinada cantidad de magma arrojado por un volcán, un volumen diez veces mayor permanece debajo de la superficie, formando cámaras magmáticas que calientan las rocas circundantes.

Si esas rocas son permeables o están fracturadas y existe circulación de agua subterránea, esta última capta el calor de las rocas pudiendo ascender hasta la superficie a través de grietas o fallas dando lugar a la formación de aguas termales, geiseres, fumarolas y piscinas de lodo, que se muestra en la figura 10 (Llopis T. G., Rodrigo A. V., 2010).



**Figura 10.** Manifestaciones superficiales a) Emanaciones de vapor; b) piscinas de agua sobrecalentada; c) y d) piscinas de lodo (Fuente: Llopis T. G., Rodrigo A. V., 2010)

Juntamente con los volcanes, las manifestaciones superficiales constituyen características visibles del calor de la tierra, y son los que tradicionalmente han atraído la investigación y el estudio de los recursos de energía geotérmica (Llopis T. G., Rodrigo A. V., 2010).

Generalmente las alteraciones geotérmicas de mayor magnitud presentan unas "manifestaciones superficiales" que indican su posible existencia y que pueden ser:

- Zonas de alteración hidrotermal
- Emanaciones gaseosas y de vapor
- Fuentes termales y depósitos minerales
- Anomalías térmicas

Sin embargo, estas manifestaciones no representan un signo definitivo de la existencia de un gradiente geotérmico aprovechable, pero a falta de otros métodos, suelen ser el punto de partida de una prospección en busca de un campo geotérmico (Fijarbo, 2001).

#### 6.4.1. Alteración Hidrotermal

Se define como alteración hidrotermal al “intercambio químico que ocurre durante una interacción fluido hidrotermal y roca original” (Torio, 2018).

El término alteración hidrotermal es utilizado para calificar “la respuesta mineralógica, textural y química de las rocas a un cambio ambiental, en térmicos químicos y termales, con la presencia de agua caliente, vapor o gas. La alteración hidrotermal ocurre a través de la transformación de fases minerales, crecimiento de nuevos minerales, disolución de minerales y/o precipitación, y reacciones de intercambio iónico entre los minerales constituyentes de una roca y el fluido caliente que circuló por la misma. Aunque la composición litológica inicial tiene una influencia en la mineralogía secundaria (hidrotermal), su efecto es menor que el debido a la permeabilidad, temperatura y composición del fluido” (Maksaev, 2005).

La temperatura del fluido y el pH del mismo son los factores más relevantes en la asociación mineralógica resultante de los procesos de alteración hidrotermal, más que la litología (Maksaev, 2005).

En términos generales se puede establecer un orden relativo de susceptibilidad a la alteración de los minerales primarios:

Olivino > magnetita > hiperstena > hornblenda > biotita > plagioclasa

13

La característica esencial de la alteración hidrotermal es la conversión de un conjunto mineral inicial en una nueva asociación de minerales más estable bajo las nuevas condiciones hidrotermales de temperatura, presión y sobre todo de composición de fluidos.

#### 6.4.2. Factores que afectan la alteración hidrotermal

Los siguientes factores como principales influyentes en el resultado de una alteración hidrotermal son:

- **Temperatura y la diferencia de temperatura entre la roca y el fluido que la invade:** mientras más caliente el fluido mayor será el efecto sobre la mineralogía original.
- **Composición del fluido:** sobre todo el pH del fluido hidrotermal: mientras más bajo el pH (fluido más ácido) mayor será el efecto sobre los minerales originales.
- **Permeabilidad de la roca:** Una roca compacta y sin permeabilidad no podrá ser invadida por fluidos hidrotermales para causar efectos de alteración. Sin embargo, los fluidos pueden producir fracturamiento hidráulico de las rocas o disolución de minerales generando permeabilidad secundaria en ellas.

- **Duración de la interacción agua/roca y variaciones de la razón agua/roca:** mientras mayor volumen de aguas calientes circulen por las rocas y por mayor tiempo, las modificaciones mineralógicas serán más completas.
- **Composición de la roca:** la proporción de minerales: es relevante para grados menos intensos de alteración, dado que los distintos minerales tienen distinta susceptibilidad a ser alterados, pero en alteraciones intensas la mineralogía resultante es esencialmente independiente del tipo de roca original.
- **Presión:** este es un efecto indirecto, pero controla procesos secundarios como la profundidad de ebullición de fluidos, fracturamiento hidráulico (generación de brechas hidrotermales) y erupción o explosiones hidrotermales. Los dos factores iniciales temperatura y composición del fluido hidrotermal son los más importantes para la mineralogía hidrotermal resultante de un proceso de alteración (**Maksaev, 2005**).

#### 6.4.3. Procesos debidos a la alteración hidrotermal

Los procesos que ocurren en la roca debido a la alteración hidrotermal ha sido identificados de la siguiente manera:

- **Deposición directa,** los minerales son depositados directamente a partir de soluciones hidrotermales. Para poder hacerlo la roca debe tener conductos para que el fluido pueda moverse dentro de ella (ejemplo: permeabilidad debido a fracturamiento)
- **Reemplazo,** muchos minerales de las rocas son inestables en un ambiente hidrotermal y estos tienden a ser reemplazados por nuevos minerales que son estables o al menos meta estables en las nuevas condiciones ambientales.
- **Lixiviación,** algunos de los componentes químicos de las rocas son extraídos por los fluidos hidrotermales, particularmente cationes metálicos, de modo que la roca es deprimida en dichos componentes o lixiviada (**Maksaev, 2005**).

#### 6.4.4. Tipos de alteración hidrotermal

Las alteraciones hidrotermales se clasifican en 2:

1. En base al mineral de alteración, estas pueden ser: silicificación, sericitización, argilización, cloritización, epidotización, carbonatación y sulfatación (**Meyer, C. y Hemley, J.J., 1967**).
2. En base al ensamble mineralógico secundario
  - a. **Alteración propilítica,** presencia de epidota y/o clorita y ausencia de un apreciable metasomatismo catiónico o lixiviación de álcalis o tierras alcalinas; H<sub>2</sub>O, CO<sub>2</sub> y S pueden agregarse a la roca y comúnmente se presentan también albita, calcita y pirita. Este tipo de alteración representa un grado bajo de hidrólisis de los minerales de las rocas y por lo mismo su posición en zonas alteradas tiende a ser marginal.

- b. **Alteración argílica intermedia**, importantes cantidades de caolinita, montmorillonita, esmectita o arcillas amorfas, principalmente reemplazando a plagioclasas; puede haber sericita acompañando a las arcillas; el feldespato potásico de las rocas puede estar fresco o también argilizado. Hay una significativa lixiviación de Ca, Na y Mg de las rocas. La alteración argílica intermedia representa un grado más alto de hidrólisis relativo a la alteración propilítica.
- c. **Alteración sericítica**, ambos feldespatos (plagioclasas y feldespato potásico) transformados a sericita y cuarzo, con cantidades menores de caolinita. Normalmente los minerales máficos también están completamente destruidos en este tipo de alteración.
- d. **Alteración argílica avanzada**, ásporo, alunita y cuarzo. Este tipo de alteración representa un ataque hidrolítico extremo de las rocas en que incluso se rompen los fuertes enlaces del aluminio en los silicatos originando sulfato de Aluminio (alunita) y óxidos de Aluminio (diásporo). En casos extremos la roca puede ser transformada a una masa de sílice oquerosa residual (“vuggy silica” en inglés).
- e. **Alteración potásica**, alteración de plagioclasas y minerales máficos a feldespato potásico y/o biotita. Esta alteración corresponde a un intercambio catiónico (cambio de base) con la adición de K a las rocas. A diferencia de las anteriores este tipo de alteración no implica hidrólisis y ocurre en condiciones de pH neutro o alcalino a altas temperaturas (principalmente en el rango 350°-550°C. Por esta razón, frecuentemente se refiere a la alteración potásica como tardimagmática y se presenta en la porción central o núcleo de zonas alteradas ligadas al emplazamiento de plutones intrusivos (Meyer, C. y Hemley, J.J.,1967).

## 7. METODOLOGÍA

Para la realización de este trabajo se recurrió a delimitar los temas que se relacionan directamente con las manifestaciones superficiales (alteración hidrotermal), estructuras civiles (plataformas) y mecánicas (equipos superficiales). Con estos tópicos definidos, el siguiente paso fue buscar documentos científicos, papers, y otros recursos que aportaran para justificar la investigación.

Una vez obtenida la información, se utilizó para el análisis de los factores relacionados a geotermia (manifestaciones superficiales, alteración hidrotermal), estructuras civiles y mecánicas con el fin de evaluar el impacto en equipos superficiales.

Para el presente trabajo, se toma como caso de estudio una plataforma de pozos de producción en Nicaragua, donde se analizará la situación actual de la plataforma con el objetivo de plantear recomendaciones, propuestas de solución y elaborar la metodología de la solución propuesta.

## 8. ANÁLISIS DE DATOS

Para el presente trabajo, se tomó en cuenta el caso de estudio de la plataforma de pozos productores SJ6 - Central Geotérmica San Jacinto Tizate en Nicaragua.

### 8.1. Caso de estudio

#### 8.1.1. Introducción

La Central Geotérmica San Jacinto - Tizate se encuentra en el noroeste de Nicaragua, en la comarca de San Jacinto, municipio de Telica, a 20 km de la ciudad de León (Figura 11). El área de concesión geotérmica es de 40 km<sup>2</sup> y es desarrollada bajo un acuerdo de concesión de explotación entre Polaris Energy Nicaragua (PENSA) y el Ministerio de Energía y Minas (MEM).



Figura 11. Ubicación de Central Geotérmica San Jacinto Tizate (Fuente: Google Earth, 2018)

Los primeros estudios de exploración en superficie se realizaron entre los años 1970 y 1980, los que indicaron presencia de recurso con alta temperatura (250 - 300 °C).

Las primeras perforaciones profundas (7 pozos en total) se realizaron entre 1993 y 1995 con profundidades desde 728 a 2339 metros. Cinco de los pozos fueron probados, para producción y/o inyección, siendo tres (SJ4-1, SJ5-1 y SJ6-1) considerados como productores comerciales (**Polaris, 2018**).

La plataforma de pozos productores SJ6 fue construida en el año 1994, con dimensiones iniciales de 50 metros (ancho) x 70 metros (largo) aproximadamente. El primer pozo de la plataforma se perforó entre agosto y diciembre del mismo año. Se identifica con las siglas SJ6-1 con profundidad 1881 metros, tipo vertical con terminación en liner 6 5/8" (Figura 12).



Figura 12. Plataforma SJ6 luego de perforación de pozo SJ6-1 (Fuente: Google Earth, 2005)

Posterior a las pruebas de producción, el pozo SJ6-1 fue conectado a la planta y puesto en servicio en el año 2005.

La figura 13 muestra las condiciones iniciales de la plataforma y de sus alrededores en el año 2005. Se presume que existía manifestaciones superficiales en el área, sin embargo, estas no fueron detectadas por los trabajos civiles que se realizaron. Al año siguiente de la puesta en servicio del pozo SJ6-1 comienza a manifestarse algunas alteraciones en zonas cercanas a la plataforma, con mayor presencia (en forma de fumarola) a 200 metros al noreste de la plataforma, contiguo al camino de acceso y con un área aproximada de 7 metros de ancho x 8.5 metros de largo.





**Figura 13.** Inicio de manifestaciones alrededor de plataforma y fumarola a 200 metros NE (Fuente: Google Earth, 2006)

En el año 2007 previo a la perforación del segundo pozo en la plataforma SJ6, se realizaron 24 perforaciones de agujero de lechada (groute holes de 50 - 75 metros) para inyección de cemento en la plataforma, con el objetivo de estabilizar el área antes de la instalación de la torre de perforación (Chavez G., 2018).

El pozo SJ6-2 fue perforado entre abril y junio del año 2008 con profundidad total de 2000 metros, tipo direccional hacia el este y con terminación en liner de 9 5/8" y 7". Cabe destacar que durante la perforación del segundo pozo se encontró con una posible zona de acuíferos caliente en profundidad de 230 metros. Además, posterior a la perforación el pozo SJ6-2 presentó problemas de fugas de vapor entre el casing de 18 5/8" y 13 3/8" por lo que se necesitó realizar trabajos complementarios para reparar la fuga. Las reparaciones consistieron en la perforación de dos pozos de agujero de lechada (40 a 50 metros de profundidad) cercanos al cabezal del pozo con inyección de cemento para estabilizar la zona. Por otro lado, realizó registro para examinar las condiciones del casing 13 3/8" y luego se realizó cementación complementaria desde el cabezal.

Durante el período del año 2008 al 2010 se nota un gran incremento en las manifestaciones superficiales en los alrededores de la plataforma SJ6. Cabe destacar que la fumarola (localmente llamada "Gladys") ubicada a 200 metros de la plataforma y contigua al camino de acceso incrementó su área a 20 metros de ancho x 20 metros de largo aproximadamente. Así mismo iniciaron a surgir otras manifestaciones en los alrededores de esta fumarola. Debido a la inestabilidad del suelo de la zona y del riesgo para el personal, el camino de acceso fue cerrado indefinidamente, habilitando otra ruta de acceso a la plataforma SJ6 (Figura 14).



Figura 14. Plataforma SJ6 luego de perforación de pozo SJ6-2 (Fuente: Google Earth, 2010)

Debido a la planificación de perforación del tercer pozo en la plataforma SJ6, se tomaron medidas para la estabilización del área. En junio del año 2015 se realizaron estudios geofísicos con el fin de estudiar el origen de las manifestaciones superficiales en el área. De acuerdo a los resultados obtenidos se observó áreas de baja resistividad en la zona por debajo de la plataforma. La fumarola "Gladys" fue la evidencia hidrotermal más alta encontrada (espesor medio estimado de 300 metros). Esto indicó una posible relación de áreas con alta temperatura.

Además de los estudios geofísicos se realizaron obras adicionales para dar estabilidad a la plataforma SJ6. Dentro del plan de estabilización se incluyó la perforación de dos pozos de agujero de lechada (incluyendo inyección de lechada de cemento) con profundidades entre 40 y 50 metros dentro de la plataforma. A su vez se realizaron obras civiles de ampliación del área total de la plataforma en dirección sudoeste, quedando con dimensiones aproximadas de 60 metros x 110 metros.

El pozo SJ6-3 se perforó entre octubre y diciembre del año 2015 con profundidad total de 1918 metros tipo direccional hacia el Oeste con terminación en liner de 9 5/8" y 6 5/8". Durante la perforación del pozo SJ6-3 se encontró zonas de alta permeabilidad en los primeros 155 metros. Cabe destacar que durante la instalación del casing de 18 5/8" en agujero abierto de 24" (profundidad de 155 metros), hubo un descontrol del pozo (reventón), esto podría confirmar la existencia de zonas de altas temperaturas en esas profundidades. Luego de la conexión del pozo SJ6-3 a la central geotérmica las manifestaciones de vapor y gases se hicieron más relevantes tanto en el contra pozo como en la plataforma (Figura 15).



**Figura 15.** Plataforma SJ6 luego de perforación de pozo SJ6-3. El área encerrada en el rectángulo representa la ampliación de la plataforma y el área del círculo la evolución de la fumarola Gladys (**Fuente: Google Earth, 2016**)

### 8.1.2. Situación actual

En la actualidad la plataforma SJ6 ha cambiado significativamente sus condiciones superficiales. La zona ha sido afectada gravemente debido a las manifestaciones superficiales tanto dentro de la plataforma como en sus alrededores. Actualmente las emanaciones de vapores y gases son visibles por toda la plataforma: talud lado oeste, talud lado norte y sur, además de fuerte emanaciones en el contra pozo SJ6-3.

Los equipos superficiales han sido afectados directamente debido a la emanación y agresividad de este tipo de vapores y gases provocando corrosión excesiva (altos contenidos de  $\text{CO}_2$  y  $\text{H}_2\text{S}$ ) y daños a la estructura civil. La vegetación cercana a la plataforma también se ve afectada debido a la temperatura alta y concentraciones de los gases, se nota la pérdida de vegetación por estas razones (Figura 16).



**Figura 16.** Plataforma SJ6 Áreas encerradas en amarillo con alteraciones hidrotermales; áreas encerradas en rojo fumarolas activas (Fuente: Google Earth, 2016).

Cabe destacar que la problemática de las manifestaciones superficiales de este tipo no solo afecta a los equipos superficiales y a la vegetación de sus alrededores, sino también se convierte en un potencial riesgo de accidente o daños a la integridad física del personal que labora cerca del área afectada. El personal de operaciones y mantenimiento de la planta podrían sufrir accidentes al transitar por el área debido a la inestabilidad de la zona y al inesperado cambio o transformación del terreno.

Desde el año 2016 a la fecha las condiciones de la plataforma han ido empeorando, surgiendo nuevas manifestaciones y fumarolas a los alrededores. La falta de drenaje en el contra pozo afecta en gran medida la conservación de los materiales de los equipos superficiales y el estancamiento del agua de lluvia de la plataforma activa aún más las emanaciones de vapores y gases debido a la filtración en la superficie. (Figura 17 y 18).

21



**Figura 17.** Acceso a plataforma SJ6 en la actualidad (Fuente: Elaboración Propia, 2018)



**Figura 18.** Plataforma SJ6 en la actualidad (Fuente: Elaboración Propia, 2018)

Los muestreos superficiales indican temperaturas a nivel de suelo de 94 a 99 °C dentro de la plataforma y surgimiento de nuevas fumarolas a sus alrededores (Figura 19). Los muestreos de aguas y gases de las manifestaciones indican que las emanaciones no provienen del reservorio, sino que son de origen superficial.



**Figura 19.** Muestreo de temperaturas en plataforma SJ6 (Fuente: Chavez G., 2018)

### 8.1.3. Análisis de caso de estudio y formulación de hipótesis

Ante la creciente situación de manifestaciones superficiales en las zonas cercanas a la plataforma SJ6, se han realizado una serie de estudios enfocados a determinar el origen y las medidas de control necesarias. Estas alteraciones en la zona iniciaron con la formación de una fumarola en el año 2006 a 200 metros de distancia de la plataforma con un exponencial crecimiento a lo largo de los años.

Las alteraciones del suelo en los alrededores de la plataforma son normales y propias del sector. Sin embargo, nuevas apariciones dentro de la plataforma surgieron a partir del año 2016 luego de la perforación del pozo SJ6-3. A continuación se muestran algunos estudios y medidas de mitigación realizadas a la fecha la plataforma en estudio.

#### 8.1.3.1. Estudio Geofísico Geoeléctrico 2D

En el año 2015, con el objetivo de verificar la dinámica hidrotermal y la fumarola (llamada localmente “Gladys”) ubicada a 200 metros de la plataforma SJ6, se realizó el estudio geofísico donde se utilizó el método geoeléctrico 2D con arreglo polo-dipolo con configuración mínima de 125 metros, logrando profundidad mínima de penetración de 37 metros (Figura 20).

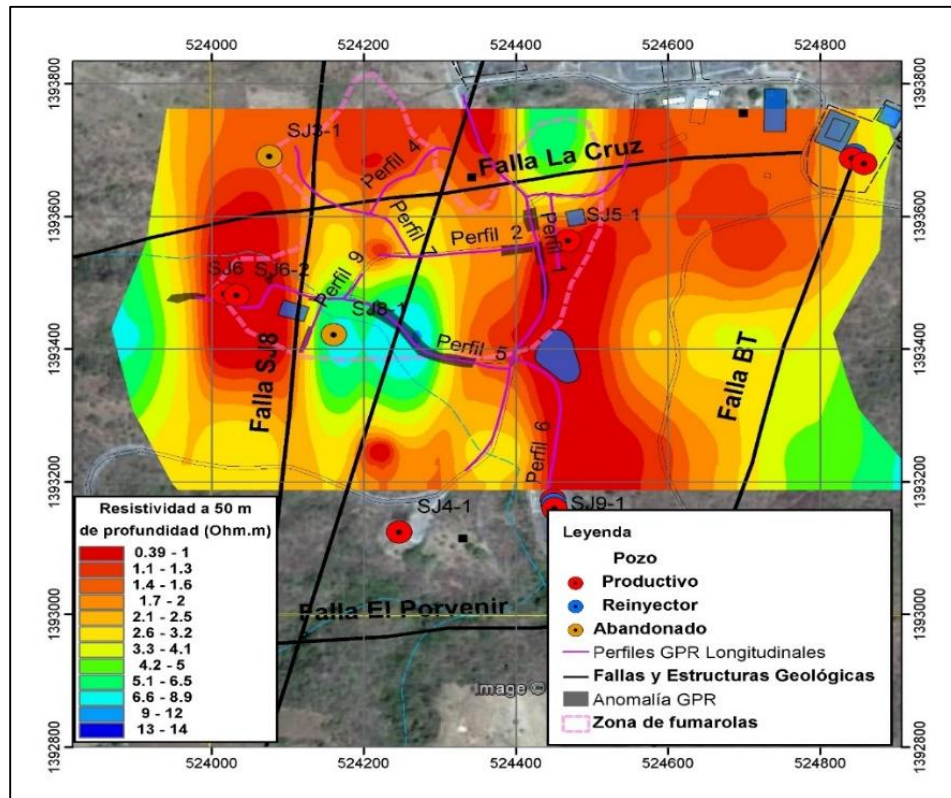
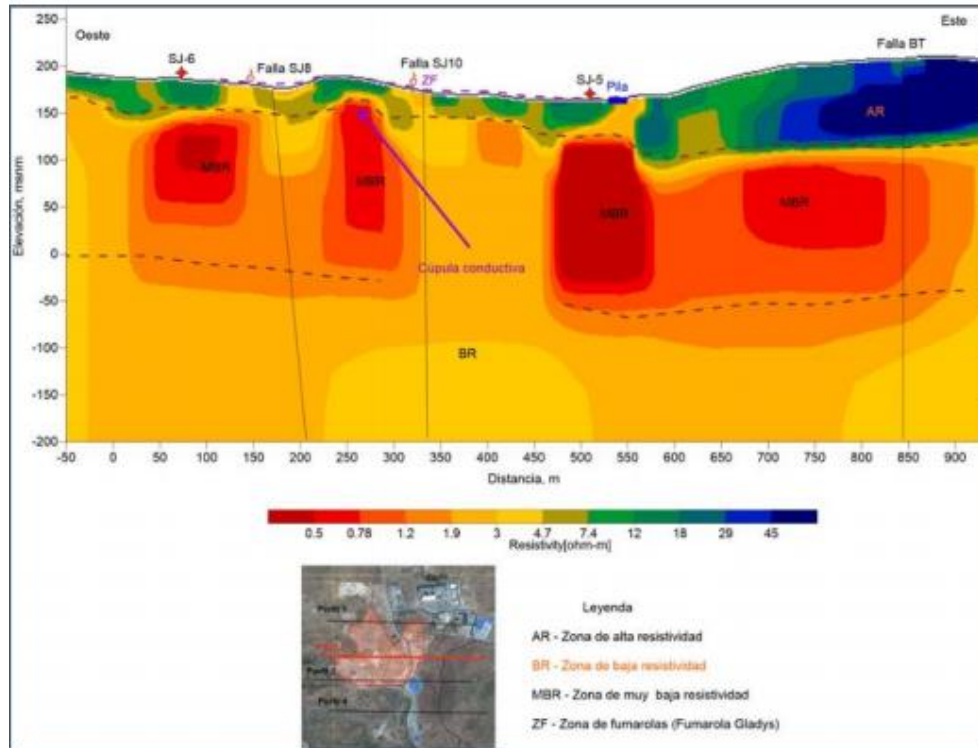


Figura 20. Mapa geoelectrico plataforma del área de la Central Geotermica San Jacinto Tizate a una profundidad de 50 metros (Fuente: Chavez, 2015).

Los estudios mostraron áreas de baja resistividad en la plataforma SJ6, donde se observan estructuras tipo cúpulas conductivas en la zona desde las plataformas hasta la fumarola, donde está ubicada las mayores alteraciones de la zona (Figura 21).



**Figura 21.** Perfil geoelectrico del área de San Jacinto Tizate, donde se observan cúpulas conductivas, incluyendo la ubicada en la plataforma SJ6 (Fuente: Chavez, 2015).

Durante el estudio se detectó zonas de mínimo resistivo en un tramo de camino que conectaba a dos plataformas cercanas a la zona del SJ6. Con el paso del tiempo estas anomalías aumentaron provocando el colapso del camino, comprobando el riesgo que existe en este tipo de casos.

### 8.1.3.2. Perforación de agujeros de lechada (Grout Hole)

En el año 2015, con el objetivo de estabilizar el área de la plataforma SJ6, se realizó la perforación de 2 pozos con inyección de lechada de cemento previa la perforación del pozo SJ6-3.

La litología del pozo se realizó con las descripciones macroscópicas tomadas en el sitio a los núcleos obtenidos durante la perforación. Las descripciones resumen las características físicas de las rocas como color, tamaño, textura y posible grado de alteración. Esta información es importante para conocer los orígenes y las alteraciones a la que están sometidas las formaciones superficiales.

La tabla 1, detalla la litología encontrada en el pozo de lechada 1 para los primeros diez metros de perforación:

**Tabla 1.** Descripción litológica de pozo de lechada 1 (Fuente: Chavez, 2015).

Descripción Litológica de Núcleos de Perforación				
<b>Nombre de pozo:</b>		Pozo Grout Hole #1		
<b>Fecha:</b>		Agosto / 2015		
<b>Ubicación:</b>		Plataforma SJ6		
<b>Profundidad (metros)</b>				
Inicio	Final	Litología	Descripción	Observaciones
0.0	1.10	Suelo residual, Andesita.	Fragmentos lávicos masivos, con alteración en la superficie a arcilla/suelo	No se distinguieron cristales.
1.10	2.25	Andesita vesiculada.	En los fragmentos de núcleos se distinguen cristales de plagioclasas alterados totalmente a arcilla.	Coloración gris claro/oscuro a rojizo pálida.
2.25	3.05	Andesita	Fragmentos de lava gris oscura, con cristales de plagioclasas alterados a arcilla.	Alteración a óxidos de hierro. En la parte central del núcleo se evidencia oxidación.
3.05	4.05	Andesita	Continúa la lava masiva, ahora incrementando la vesicularidad, encontrándose rellenas por óxidos de hierro y arcillas.	Evidencia de aumento de vesículas en lava.
4.05	4.95	Andesita	Núcleos extraídos casi íntegramente. Lava masiva con mínimas vesículas, comprendiendo cristales de plagioclasas.	Contiene finas venas de sílice.
4.95	5.40	Andesita	Núcleo de lava masiva con mayor alteración respecto a anterior.	Altera a óxidos de hierro, arcilla amarilla y arcilla clorítica.
5.40	6.00	Andesita	Matriz con alteración a óxidos de hierro, arcilla amarilla y clorítica.	Fracturas internas en el núcleo. También silicificación.
6.00	7.30	Andesita	Material lávico fracturado, con apariencia brechosa.	Intensidad de alteración débil a fuerte.
7.30	7.85	Andesita	Fragmentos lávicos masivos con fracturación media	Alteración moderada a óxidos de hierro y arcillas, evidenciadas en líneas de fracturas.
7.85	8.80	Andesita	Los primeros fragmentos de composición lávica, se presentan de tamaño aproximado de 3x3 cm, de coloración gris clara a oscura.	A medida que aumenta la profundidad, los fragmentos de núcleo son más grandes.
8.80	9.20	Andesita	Material lávico con fracturamiento medio, moderadamente alterado, principalmente a lo largo de fracturas.	Venas muy finas rellenas por calcita.
9.20	9.60	Andesita	Fragmentos de núcleo lávicos, masivos, comprendiendo plagioclasas tabulares.	Se encuentra calcita precipitando sobre los fragmentos
9.60	10.45	Andesita	Contiene plagioclasas tabulares a blocky, así como abundante calcita en parches diseminados, alterando sobre matriz y algunas plagioclasas.	Alteración a óxidos de hierro.



### 8.1.3.3. Estudio Geofísico GPR (Ground Penetrating Radar)

En el año 2018, con el objetivo de evaluar el estado de las plataformas, caminos de acceso y la posible afectación por la actividad hidrotermal en la zona, se utilizó el método geofísico GPR. De igual forma el estudio sirve de comparación con estudios previos para determinar los grados de afectación y extensión de las manifestaciones superficiales.

Esta metodología se basa en la reflexión de las ondas electromagnéticas de altas frecuencias generadas por una antena, la cual se propaga a través del suelo y con ayuda de otra antena se registran las ondas reflejadas hacia la superficie. Estas ondas reflejadas nos brindan información de las propiedades dieléctricas para diferentes tipos de litologías que componen el suelo. Como resultado del procesamiento de los perfiles de GPR, se detectaron varias zonas de anomalías que afectan el estado de los caminos y plataformas. Estas anomalías podrían estar asociadas a la presencia o circulación de fluidos geotérmicos en la parte somera. Cabe destacar que estas manifestaciones siguen presentes en el sitio a pesar de las intervenciones de dos pozos de inyección de lechadas realizadas en el año 2015.

El estudio muestra zonas de anomalías intermedia en el área de la plataforma SJ6, las que se expresan mediante una afectación no muy fuerte de la capa de relleno, sin embargo, debajo de estas plataformas se tiene la presencia de una anomalía de baja resistividad. Estas zonas coinciden con los estudios realizados en el 2015 y sugiere que la plataforma en estudio se encuentra en zonas de inestables actividades hidrotermales de alta temperatura relacionadas a zonas someras de alta conductividad (Figura 22).

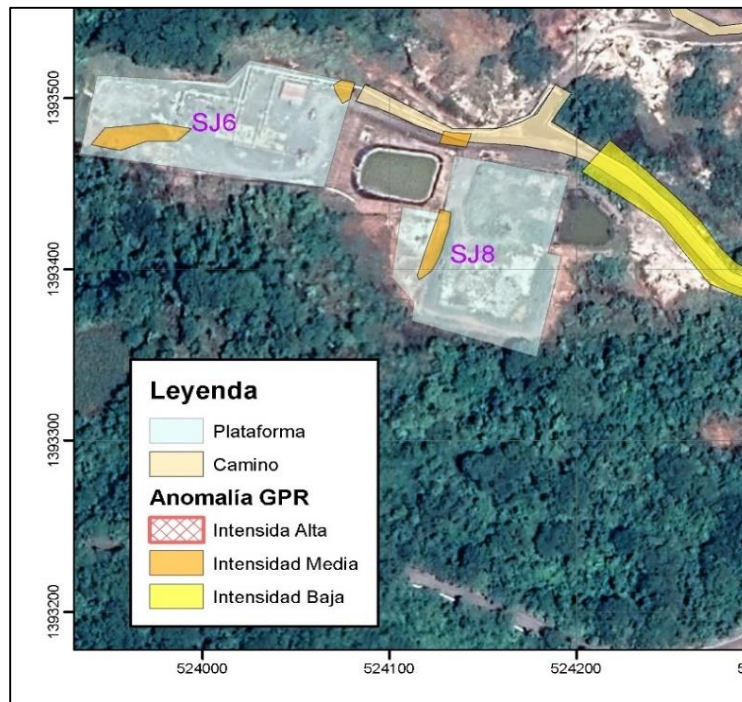


Figura 22. Anomalías en la plataforma SJ6 (Fuente: Chavez, 2018).

#### 8.1.3.4. Muestreo químico de fumarolas cercanas a la plataforma de pozos productores

Las fumarolas proporcionan los datos más confiables sobre la composición química de los gases en los sistemas geotérmicos. El vapor se forma por la ebullición de agua de origen geotérmico (o agua superficial almacenada en la plataforma) manifestándose en forma de fumarolas o suelos vaporizantes. El monitoreo de estos vapores y gases permite entender la relación entre el fluido que emerge en la superficie y el fluido origen en la profundidad.

La tabla 2 muestra los detalles de concentración de CO<sub>2</sub> y H<sub>2</sub>S presentes en las zonas cercanas en la plataforma. Estas concentraciones demuestran presencia de altos contenidos de gases agresivos en el área. Los valores medidos son similares entre sí, por lo que se puede presumir que hay una interconexión de las fumarolas con las manifestaciones presentes en la plataforma SJ6.

Tabla 2. Muestreo de gases alrededor de la plataforma SJ6 (Fuente: Polaris, 2018).

Lugar	Fecha	CO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> S
Contra pozo SJ6	Agosto/2018	584.7	21.2
Fumarola Gladys	Agosto/2018	416.1	18.3
Fumarola SJ8	Agosto/2018	422.3	12.9

#### 8.1.3.5. Hipótesis

Con la evaluación de los estudios realizados para este caso se logró preparar una posible secuencia de eventos involucrados en la aparición de las manifestaciones superficiales en la plataforma SJ6. Se puede estimar que las manifestaciones son de origen superficiales debido a que las concentraciones de gases CO<sub>2</sub> y H<sub>2</sub>S no son características de fluidos existentes en el reservorio.

Los estudios geofísicos confirman la existencia de cúpulas conductivas a pocas profundidades (entre 200 y 300 metros) y con posible conexión con la fumarola cercana existente.

Existe la posibilidad que a partir del blowout (reventón) ocurrido durante la perforación del pozo SJ6-3, parte de la actividad hidrotermal observada en la fumarola Gladys, se haya trasladado hacia la zona con mayor permeabilidad en la plataforma (área de extensión de la plataforma). Si se toma en consideración el análisis estructural realizado en los afloramientos (taludes) de la plataforma de los pozos SJ6 (Norini, 2016)

En esta área predominan las estructuras con dirección NNW-SSE a NNE-SSW y en menor cantidad están las estructuras NE-SW. En cierto modo, podría existir alguna conexión entre la fumarola Gladys (ubicada al Noreste de SJ6) y las manifestaciones hidrotermales observadas en la plataforma SJ6, tomando como “canal” el fracturamiento que tiene una orientación NE-SW.

#### 8.1.4. Recomendaciones y propuestas de solución para el caso de estudio

Las siguientes recomendaciones se basan en experiencias realizadas en casos similares, donde existieron manifestaciones superficiales en plataformas geotérmicas. Entre algunas:

- Construcción del sistema de drenaje del contrapozo y plataforma.
- Perforación de pozos de gradiente (recuperación de testigo) para reconocimiento del sitio con alteración y comparar con estudios previos.
- Realizar múltiples perforaciones para la inyección de lechada de cemento de alta temperatura (tipo H) para disminuir la acción de las manifestaciones superficiales en la plataforma.
- Instalación de chimeneas que faciliten la evacuación de los gases y vapores hacia la superficie.
- Reemplazo y relleno de la plataforma con material selecto suelo superficial buscando dar mayor estabilidad a la misma.
- Inspección superficial de material de tubo conductor.
- Inspección y reparación (reemplazo) de tubo conductor si se requiere.
- Construcción de obras de estabilización de los taludes aledaños a la plataforma SJ6.

El apéndice 1, muestra el diagrama de proceso para las soluciones para el caso de estudio.

## 9. PRESENTACIÓN DE RESULTADOS

### 9.1. Metodología de la propuesta recomendada

#### 9.1.1. Perforación de pozos e inyección de cemento

Debido al incremento de las manifestaciones superficiales en el área se plantea realizar la perforación de 10 pozos de lechada para la estabilización de la plataforma (contrapozo). Estos pozos tienen por objetivo sellar las pérdidas superficiales que se encuentren hasta la profundidad de 115 metros. Para esto se propone el programa de perforación:

1. **Actividades previas**, antes de iniciar con la perforación de los pozos es necesario realizar preparativos para asegurar la operación continua del equipo de perforación. Estas actividades previas incluyen:
  - **Preparativos administrativos y alcance del proyecto**, cantidad, diseño y ubicación de puntos seleccionados para la perforación de los pozos y asegurar suficiente espacio para las operaciones.
  - **Selección del equipo de perforación**, el equipo debe cumplir con los requisitos mínimos de potencia, torque, profundidad, bombeo, mezcla e inyección de cemento, entre otros para este tipo de pozos.

Tabla 3. Características del equipo de perforación de pozos de lechada

Parámetro requerido	Detalle
<b>Torre de perforación</b>	
Profundidad de perforación (HQ)	200 metros
Potencia	125 HP
Carga hacia arriba	13450 lbs
Carga hacia abajo	13450 lbs
Torque	3500 ft/bs
RPM	680 rpm
Tipo	Hidráulico
<b>Equipo circulación y cementación</b>	
Capacidad de bomba	30 a 45 HP
Presión de bombeo	500 – 700 psi
Cantidad disponibles en sitio	2 bombas mínimo

- **Adecuar acceso y lugar de perforación**, de ser posible que no obstruya el tránsito de personal y manipulación de pozos en operación.
- **Suministro de agua fresca**, en todas las perforaciones se requiere suministro de agua fresca para enfriamiento del pozo, no se realizarán las operaciones sin la disponibilidad del fluido.
- **Realizar plan de seguridad industrial**, tomar en cuenta peligros, riesgos y medidas de mitigación ante emergencias.
- **Obligatorio. Instalación y uso de detector de gases H<sub>2</sub>S en sitio**, es muy probable presencia de gases durante la perforación de pozos.
- **Instalación de ventilación en sitio para evacuar gases y evitar concentración en el área.**
- **Realizar plan de manejo ambiental y control de desechos**, reunir requisitos y/o permisos necesarios para este tipo de trabajo.
- **Suministro de materiales y consumibles**, antes de iniciar operaciones, todo el material necesario debe de estar en sitio: cemento, aditivos, tuberías, entre otras.
- **Movilización y prueba de equipos**, se realiza una vez aprobada la orden del proyecto. Se instala y se realizan pruebas de todos los equipos necesarios para la operación: sistema de rotación, sistema de elevación, sistema de circulación, sistema de mezcla e inyección de cemento, sistema de prevención, etc.
- **Pruebas previas a equipos de prevención BOP (anular 4 1/2").**
- **NOTA: Se puede dar inicio a la operación de perforación si y solo si se cumplan las anteriores actividades descritas.**

2. **Ubicación prevista de pozos a perforar**, los primeros 8 pozos se perforarán a un metro de distancia alrededor del contrapozo. El objetivo es sellar la salida de vapor y dar estabilidad a la columna de tuberías, así también proteger el material de las tuberías del pozo contra corrosión. La profundidad de las inyecciones de lechada de cemento dependerá de las fracturas que se encuentren mientras se perfora los pozos. Luego se estimada necesario la perforación de mínimo dos pozos adicionales para estabilizar el área total de la plataforma. Los puntos en rojo muestran la ubicación más proxima donde existen mayores alteraciones en el sitio. (Figura 23).

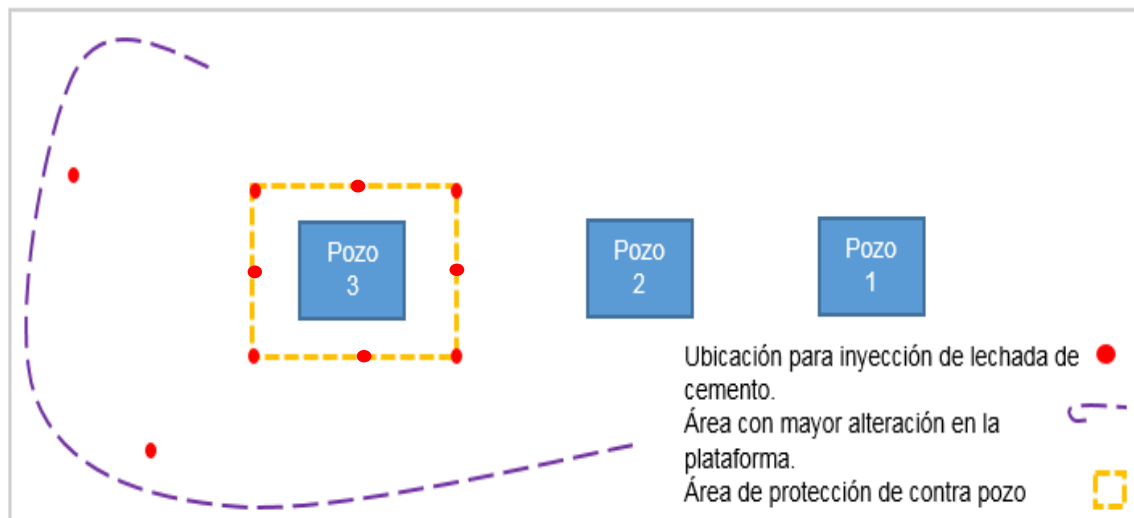


Figura 23. Propuesta de distribución de pozos de lechada.

3. **Perforación**, se propone el siguiente diseño de perforación, que consta de 2 etapas (Tabla 4). El apéndice 2, muestra el diagrama del pozo a perforar. El apéndice 3 muestra la litología del pozo SJ6-3 del cual se tomó información para la profundidad objetivo de los pozos de lechada.

Tabla 4. Diseño de pozo de lechada.

Diseño de pozo. Inyección de cemento plataforma geotérmica				
Profundidad de pozo	Diámetro casing	Diámetro agujero	Temperatura estimada	Formación estimada
15 m	Ø 4 ½"	Ø 6 ¼"	97 °C	Andesita
115 m	Abierto	Ø HQ	105 °C	Andesita

A continuación, se explica los pasos a seguir para la perforación de los pozos de lechada.

**Perforación de agujero Ø6 ¼" e instalación de tubería de revestimiento Ø 4 ½":**

1. Realizar mezcla viscosa a base de bentonita. La viscosidad y densidad varían según los parámetros de perforación de cada sitio.
2. Armar sarta de perforación con barrena tipo diamantino Ø HQ e iniciar circulación de fluido.
3. Iniciar perforación hasta los 15 metros de profundidad según programa. Los parámetros de perforación varían según cada caso: rotación, torque, avance, caudal de bombeo, peso, entre otras.
4. Recuperar cada tramo de testigo de perforación y almacenarlo de forma adecuada para la respectiva descripción macroscópica.
5. Sacar tubería y desmontar sarta de perforación con arreglo de barrena tipo diamantino Ø HQ.
6. De ser posible tomar registro de temperatura a esta profundidad.

7. Armar sarta de perforación con barrena tipo tricónica Ø 6 ¼”.
8. Ampliar y profundizar hasta los 15 metros según programa.
9. Sacar sarta de perforación con barrena tricónica y desarmar arreglo.
10. Instalar tubería de revestimiento de pozo de Ø4 ½” hasta los 15 metros de profundidad.
11. Realizar cementación de la tubería de revestimiento.
12. Esperar fragüe de cemento.

#### **Perforación de agujero Ø HQ e inyección de lechada de cemento:**

1. Instalación de cabezal y equipo BOP 4 ½”.
  2. Realizar pruebas de equipos de prevención ante reventón de pozo.
  3. Armar sarta de perforación con barrena tipo diamantino Ø HQ e iniciar circulación de fluido.
  4. Iniciar perforación hasta los 115 metros de profundidad según programa. Los parámetros de perforación varían según cada caso: rotación, torque, avance, bombeo, peso, entre otras.
  5. Cada vez que se pierda circulación total o parcial de fluido proceder a profundizar un máximo de 5 metros.
  6. Sacar sarta de perforación.
  7. Preparar equipos y realizar mezcla de lechada de cemento.
  8. De ser posible tomar registro de temperatura a esta profundidad. (Dependiendo de la temperatura y concentraciones de gases del pozo, es necesario inyectar una mezcla previa de soda caustica o Zinc para neutralizar los gases presentes)
  9. Realizar inyección de lechada de cemento hasta alcanzar presión estimada. La presión varía para cada caso y sitio de perforación.
  10. Esperar fragüe de cemento.
  11. Continuar perforando formación con barrena tipo diamantino Ø HQ hasta alcanzar los 115 metros de profundidad o repetir el paso 4 de ser necesario.
  12. Recuperar cada tramo de testigo de perforación y almacenarlo de forma adecuada para la respectiva descripción macroscópica.
  13. Sacar tubería y desmontar arreglo de barrena tipo diamantino Ø HQ.
  14. Realizar inyección final de cemento a los 100 – 115 metros de profundidad.
  15. Esperar fragüe de cemento.
  16. Movilización al siguiente pozo.
- 4. Cabezal de pozo (BOP),** se requiere preventor anular de 4 1/2” y wireline BOP. De igual forma se debe considerar almacenamiento de agua, en caso que haya surgencia para enfriar el pozo (Figura 24).

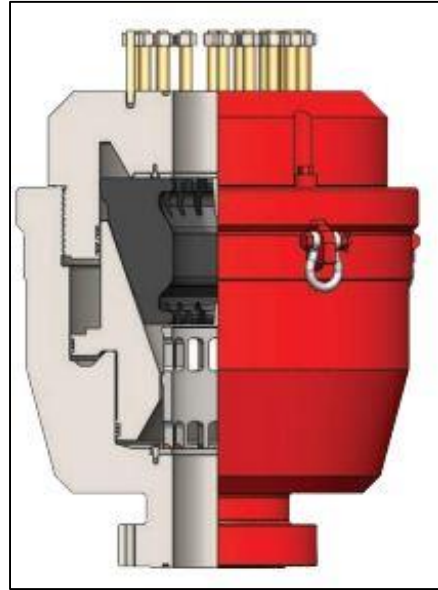


Figura 24. Preventor anular de pozo (4 ½´´)

### 9.1.2. Instalación de respiraderos (sistema de venteo) en el área de la plataforma

Las manifestaciones de vapor y gases dentro del área de la plataforma pueden controlarse a través de perforaciones e inyección de lechada de cemento y compactaciones del suelo.

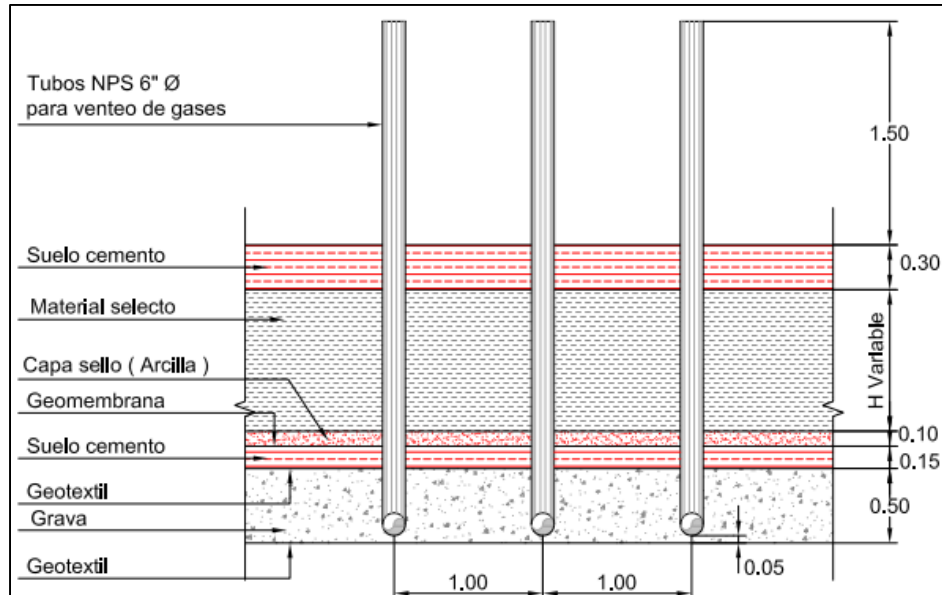
Adicionalmente se recomienda construir una estructura destinada a facilitar la evacuación de estos fluidos, evitando afectar la propiedad física del concreto y demás materiales usados para conformar la plataforma. Los respiraderos o venteos son estructuras instaladas en profundidades superficiales del suelo (de 1 a 1.5 metros de profundidad) (Figura 25).

32



Figura 25. Respiraderos ubicados en plataforma SJ5 – San Jacinto Tizate (Fuente: Polaris, 2018).

Se instalan tuberías horizontalmente con ranuras hacia abajo y conectadas a tuberías verticales con el fin de direccionar el flujo de vapor o gases hacia la superficie. Además de las tuberías es necesario el mejoramiento del terreno donde será instalada la chimenea, aplicando rellenos de diferentes materiales como grava, arcillas, suelo cemento y material selecto con el objetivo de impermeabilizar el suelo y evitar la salida de emanaciones a la superficie (Figura 26).



**Figura 26.** Diseño de respiraderos (Fuente: Polaris, 2018).

La profundidad, forma, tamaño, cantidad y demás detalles de la estructura de chimenea dependerán de factores propios del área afectada, tipo de manifestaciones, tipo de suelo, material disponible, presupuesto disponible y tiempo para realizar las obras. En forma general, la construcción se realiza de la siguiente manera:

- Excavación del terreno hasta una profundidad donde se pueda observar mayor presencia de alteración del suelo (alteración hidrotermal). Esta profundidad varía con cada terreno y cada caso es diferente ya que dependerá del criterio del encargado de la obra. (Profundidad puede variar de 1.2 a 1.5 metros)
- Relleno de excavación con capa de material selecto (60 – 80 cm aproximadamente). Agregar uniforme y adecuadamente sobre todo el área compactando el relleno por capas hasta lograr compactación uniforme.
- Instalación de red de tuberías para chimenea. Instalar horizontalmente según sea el diseño seleccionado y realizar conexiones (soldaduras) respectivas. Cabe señalar que se recomienda que la tubería sea ranurada o contenga aberturas solamente en la parte inferior de la misma. Con esto se garantiza que el fluido que asciende desde abajo de la plataforma se introduzca en los tubos y no trate de fluir hacia arriba. Se puede usar tubería de acero al carbón (según esté disponible el material) de 4 a 6 pulgadas de diámetro.



- Instalar y conectar tuberías de chimeneas verticales a red de tuberías horizontales. Esta tubería debe de sobre salir 30 a 40 centímetros aproximadamente luego de nivel de piso terminado de la plataforma. Generalmente se usa tubería de 6 pulgadas de diámetro si ranuras.
- Rellenar capa de 10 a 20 centímetros con suelo cemento o material que sirvan de capa sello para evitar que las emanaciones suban hacia la superficie. Este material puede ser mezcla con arcillas o materiales con propiedades de sellado. Es opcional el uso de materiales sintéticos como geo membranas.
- Agregar capa de relleno de material selecto hasta nivel de plataforma, dejando un margen de 20 a 30 centímetros en la parte superior que será compactado con suelo cemento. Al agregar este material se aplicará compactación adecuada a cada capa.
- Aplicar capa de 20 a 30 centímetros de suelo cemento en la superficie de la plataforma con lo cual dejamos a nivel del suelo. La mezcla y porciones del suelo cemento dependerá del grado de compactación que se desee.
- Señalización y delimitación del área de la chimenea para evitar daños por tránsito vehicular.

### 9.1.3. Programa de mantenimiento de tubería conductora

La operación de pozos geotérmicos se basa en un programa de mantenimiento preventivo y correctivo de los equipos superficiales instalados en el pozo y en la plataforma. No es muy usual el mantenimiento y reparaciones de las tuberías de revestimiento de los mismos. Esto debido a que el daño de esta tubería depende del tipo de suelo y tipo de alteraciones presentes en la zona.

En presencia de emanaciones de vapores y gases agresivos cerca de las plataformas de pozos geotérmicos (plataforma y contra pozo), es necesario realizar una inspección detallada para comprobar la integridad y buenas condiciones de la tubería conductor del pozo.

La inspección primaria consiste en inspección física y superficial (visual) de material del tubo conductor, si se notan daños por corrosión más hacia debajo de la superficie es necesario realizar ciertas actividades correctivas con el fin de reparar o reemplazar las partes dañadas del tubo conductor.

Para este caso en particular, el contrapozo del pozo SJ6-3, no tiene canales de drenaje, y debido a las lluvias de la temporada, ocasiono acumulaciones de agua en el contrapozo. Al no tener un sistema de drenaje, el agua puede infiltrarse por pequeñas fracturas, lo que puede traducirse en daños en las tuberías de revestimiento (corrosión) (Figura 27).



**Figura 27.** Daños en equipos superficiales y tubería conductora (Fuente: Polaris, 2018).

El plan de reparación o reemplazo (según se requiera) de una tubería conductor puede variar según sean las condiciones o los alcances previstos a realizar.

El plan deberá incluir detalles de trabajos a realizar como: obras civiles, maniobras operativas, soldadura, reemplazo de piezas y/o equipos. El personal involucrado deberá estar calificado para este tipo de trabajo para evitar en cualquier momento riesgos de accidentes.

En forma general, se puede realizar una inspección o reparación del tubo conductor de un pozo geotérmico tomando en cuenta los siguientes pasos:

1. Inspección visual del área afectada, equipos superficiales, tubería conductora, contra pozo, suelo del contra pozo y suelo cercano a la plataforma. Valorar el grado de alteración superficial y calificar el daño presente en el material del tubo conductor (parte que sobre sale). Determinar si es necesario o no realizar una inspección más profunda de la tubería.
2. Realizar planificación de la obra, determinar si es necesario o no poner fuera de servicio el pozo (cerrar válvula de cabezal) y si es necesario realizar enfriamiento total del pozo. (Nota: Este documento NO incluye procedimientos, detalles y/o criterios para determinar si es conveniente o no poner fuera de servicio el pozo). Dependerá del estado de cada pozo y del criterio del personal a cargo de la obra.
3. Tomar todas las medidas de seguridad posible (tanto para el personal como para el equipo a intervenir): Anclaje o sujeción de equipos superficiales usando cadenas, cables para tensión u otro equipamiento para mantener asegurado el equipo temporalmente mientras se realizan las inspecciones y/o reparaciones.
4. Establecer un área de trabajo en el contorno del pozo, aproximadamente de 10 a 12 metros. Iniciar excavación del área a un metro de profundidad alrededor del pozo.
5. Continuar excavación del área alrededor del pozo (1 metro de profundidad) acercándose poco a poco hasta llegar al contra pozo.

6. Realizar inspección en material del tubo conductor y determinar si es necesario continuar con la excavación. De no ser necesario realizar reparaciones. (Pasar al paso 8)
7. De presentar muchos daños el material del tubo conductor a esta profundidad, seguir profundizando la excavación un metro más, siempre iniciando desde el contorno hacia dentro del contra pozo. Cabe destacar que el objetivo es descubrir el tubo conductor hasta poder observar la cantidad de tubería dañada, sin embargo, dependerá de la estabilidad de la columna de tubería del pozo. No se recomienda descubrir más de 4 metros de profundidad.
8. Preparación de equipos y materiales para la reparación: El personal, el equipo y los materiales deberán estar en sitio y disponible cuando se requieran. Todo trabajo deberá realizarse sin riesgos, bajo la supervisión y aprobación del inspector de seguridad.
9. Realizar corte de material dañado en tubo conductor y limpieza del área donde se instalará la nueva pieza del conductor.
10. Medición e instalación de nuevo material. El nuevo tramo de tubo del conductor se instalará en dos piezas en forma de U hasta ajustarse y unirse a través de soldadura.
11. Una vez finalizada la unión de piezas a través de soldadura, se procede a construcción de nueva estructura metálica del contra pozo si lo requiere (para mayor soporte y estabilidad).
12. Rellenar nueva estructura metálica de contra pozo con nuevo concreto. Asegurarse de que el concreto sea tipo H (para alta temperatura) y que se aplique uniformemente aplicando vibración durante el llenado del concreto.
13. Finalizado el llenado de concreto en el contrapozo rellenar con material selecto la zona expuesta alrededor del pozo compactando por capas para una compactación uniforme.
14. Habilitar los equipos superficiales para operación según se requiera.

La figura 28, muestra la secuencia de los trabajos de reparación y reemplazo de la tubería conductora.



Figura 28. Secuencia de reparación de tubería conductora (Fuente: Mayorga, 2018).

## 10. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 10.1. Conclusiones

Las plataformas de pozos geotérmicos son áreas vulnerables ante la aparición de manifestaciones superficiales en forma de vapores, gases y lodo hirviendo. Esto implica potencial daño a los pozos y a equipos superficiales instalados en el sitio.

El tipo de manifestación en la plataforma dependerá de las características químicas del fluido de la zona y la permeabilidad. La transformación del mineral origen en otros tipos de minerales es debido a la temperatura, presión y composición química a los cuales son sometidos durante un determinado tiempo.

Los estudios geocientíficos previos ayudan a seleccionar adecuadamente las áreas para construcción de las plataformas geotérmicas y brindan relevante información en casos de apariciones (futuras) de manifestaciones superficiales en plataformas en operación. Estos estudios pueden determinar el origen, causas, ubicación, área de extensión y grado de inestabilidad de la zona, y permiten a su vez, diseñar las obras civiles necesarias para lograr una plataforma estable.

Las metodologías más usadas para el control de estas alteraciones son la perforación de pozos en el área afectada para la inyección de lechada de cemento de alta temperatura. Con esto se logra el sellado adecuado de la zona y se evita la propagación por toda el área. La cantidad de pozos y profundidad dependerá del grado de alteración superficial para cada caso.

En caso de manifestaciones superficiales en plataformas de pozo productores en operación, es necesario la inmediata intervención para evitar mayores riesgos en el personal y en los equipos.

En estos casos los estudios complementarios junto con las acciones de mitigación y control son la clave para mantener la operación segura de la plataforma.

## 10.2. Recomendaciones

- Los estudios geofísicos demuestran las propiedades resistivas de los suelos en las profundidades afectadas por las alteraciones superficiales. Es recomendable realizar estudios geofísicos como el de microgravimetría alrededor de la plataforma, con una separación de 5 metros en los extremos de la misma. A medida que se vaya acercando a la zona de interés, se recomienda realizar mediciones cada metro, esto para mejorar la resolución de las variaciones resistivas que pueden aparecer en la zona. Con este estudio se espera observar si el área es una zona de actividad hidrotermal, o si se encuentra estructuras como cavidades.
- Realizar estudio de gases difusos y correlacionar con el estudio geofísico de gravimetría para verificar la profundidad de las emanaciones de vapor.
- Es muy importante conocer el origen de las manifestaciones a través de estudios geoquímicos de vapor, agua y gases en plataforma (y sus alrededores). Al conocer el origen de los fluidos se pueden enfocar las acciones correctivas hacia el origen del problema.
- La corrosión se puede convertir en la causa de poner fuera de servicio un pozo geotérmico. En plataformas con manifestaciones superficiales agresivas para los materiales se recomienda planificar mantenimientos especiales o rutinarios que incluyan: inspección, limpieza, recubrimiento, reemplazo y pruebas a todos los equipos superficiales de la plataforma.
- Al diseñar las estructuras de las obras civiles, se recomienda el uso de materiales resistentes a la corrosión y alta temperatura en zonas con alteraciones en el suelo.
- El uso de chimeneas para liberar vapores y gases superficiales evita daños en los materiales de relleno de las plataformas.
- Elaborar en la plataforma y sus alrededores, una malla de puntos equidistantes, para medición de las temperaturas en el suelo, y a profundidad (podría ser a 50 cm), con ayuda de una termocupla. Realizar monitoreos periódicos para evaluar las variaciones de temperatura del suelo con el tiempo, antes y después de realizar las obras de mitigación.
- Las recomendaciones y metodologías de mitigación de las manifestaciones superficiales en plataformas geotérmicas sugeridas en este documento no son soluciones definitivas, ya que dependen de muchos factores en cada caso. Es necesario un monitoreo de control de la zona para determinar futuras acciones preventivas y/o correctivas a realizar.

## 11. AGRADECIMIENTOS

En esta oportunidad queremos agradecer a LaGeo, empresa geotérmica salvadoreña miembro del Grupo CEL, el United Nations University Geothermal Training Programme, de Islandia (UNU-GTP) y a la Universidad de El Salvador (UES) por darnos la oportunidad de participar en el “Diplomado en Geotermia para América Latina, El Salvador 2018”.

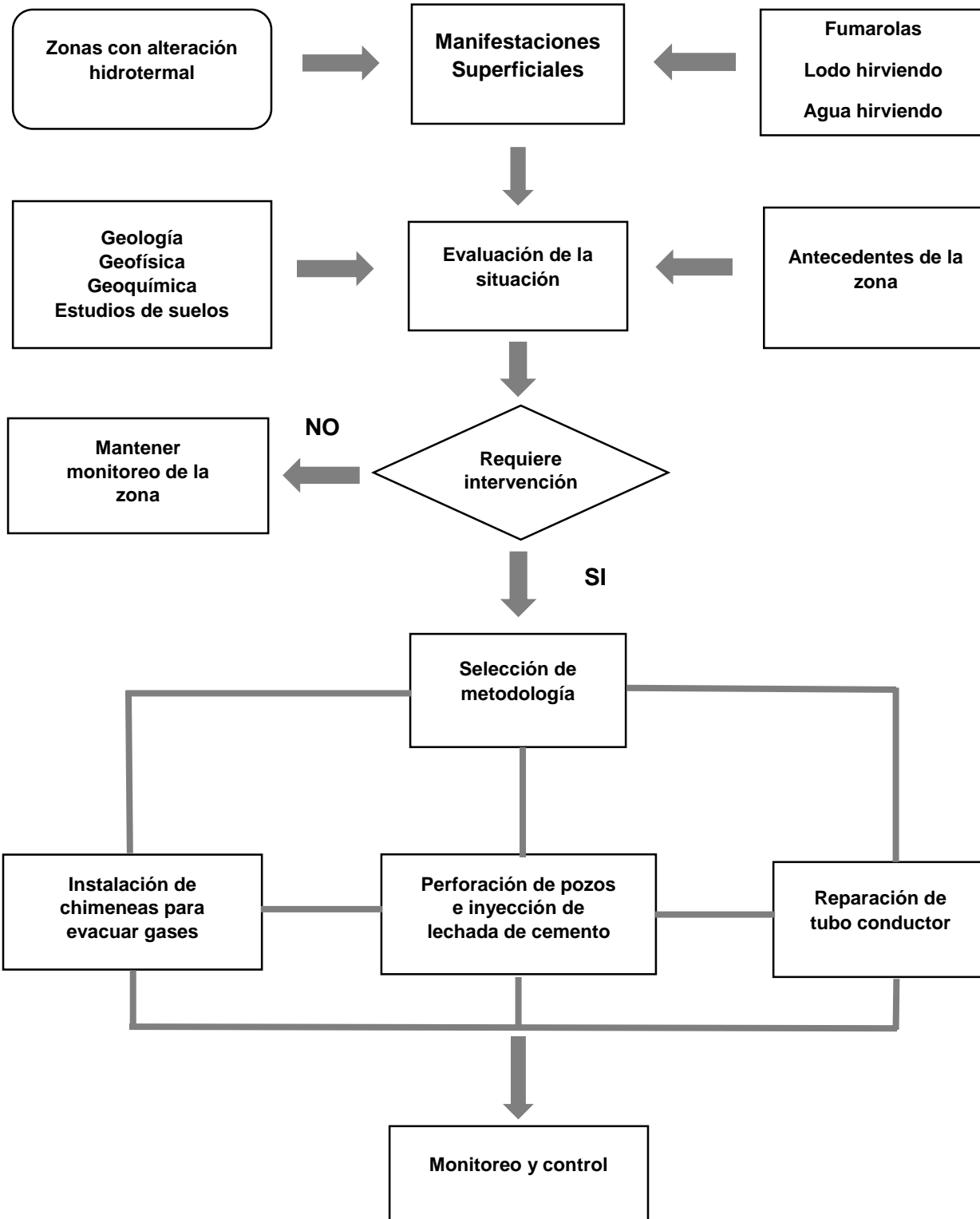
También deseamos agradecer al Claudia Mejía de Molina, Juan Polio y Herbert Manuel Mayorga Lemus por su dedicación en el desarrollo de este proyecto. Asimismo, nuestro pleno reconocimiento a los instructores que construyeron en nuestra formación con su experiencia y capacidad en el “Diplomado en Geotermia para América Latina, El Salvador 2018”.

## 12. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

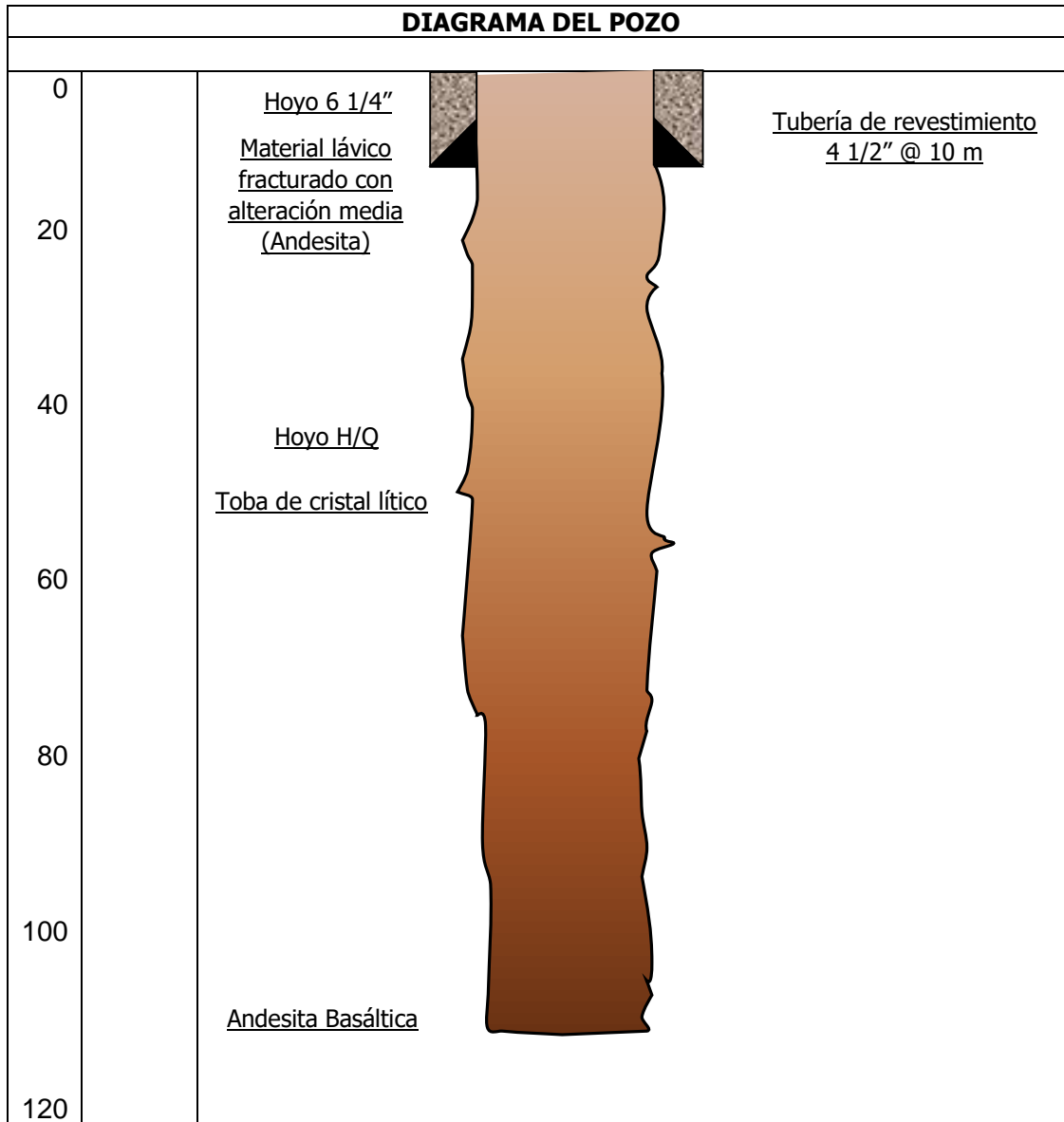
- Alvarenga, Amaya, & Sibrian. (2004). Evaluación y Análisis de los beneficios de la ecoeficiencia en el proceso de la perforación de pozos geotérmicos. San Salvador.
- Casallas S. Q., (2005). Conceptos básicos de corrosión. Carrera de Ingeniería industrial, Universidad Libre de Colombia.
- Chavez G. (2018). Inspection of reported steam flow at SJ6 pad. Nicaragua.
- Fijarbo (2001). El fenómeno geotérmico. Recuperado de: <https://fjarabo.webs.ull.es/TER/GEOTE/GEOTE01.HTM>.
- Flamenco A., (2018). Módulo VIII: Plantas geotérmicas, Sistemas de acarreo de fluidos geotérmicos.
- Instituto Geológico y Minero de España (2018). Los recursos geotérmicos. Recuperado de: <http://www.igme.es/geotermia/presentacion.htm>
- Instituto Nacional de Electrificación - INDE (2007). Energía Geotérmica. Recuperado de: [http://www.url.edu.gt/PortalURL/Archivos/44/Archivos/CGA\\_GEOTERMIA.pdf](http://www.url.edu.gt/PortalURL/Archivos/44/Archivos/CGA_GEOTERMIA.pdf)
- Llopis T. G., Rodrigo A. V. (2010). Guía de la energía geotérmica, Dirección General de Industria, Energía y Mina, Madrid, España.
- Maksaev, V. (2001). Apuntes de clases Metalogénesis, Departamento de Geología, Universidad de Chile. Recuperado de: <https://www.cec.uchile.cl/~vmaksaev/ALTERACION.pdf>
- Mayorga H., (2018). Módulo IV: Perforación geotérmica. Diseño de pozos geotérmicos.
- Mendoza L., 2015. Completación y rehabilitación de pozos. Recuperado de: <http://Perfob.Blogspot.Com/2015/06/Completacion-Y-Rehabilitacion-De-Pozos.Html>
- Meyer, C. y Hemley, J.J. (1967). Wall Rock Alteration. Geochemistry of Hydrothermal Ore Deposits.
- Norini G., 2016. Volcanotectonic study of the San Jacinto-Tizate concession and implications for the geothermal exploration. San Jacinto - Tizate Geothermal Project, Nicaragua.
- Polio J. (2018). Módulo IV: Perforación Geotérmica, Equipo de perforación y sus componentes principales.
- Polaris Energy Nicaragua S. A. (2018). San Jacinto - Tizate Geothermal Plant. Nicaragua.
- Plataforma Tecnológica Española de Geotermia - GEOPLAT (2018). Energía Geotérmica. Recuperado de: <http://www.geoplat.org/energia-geotermica/>
- Torio H. E. (2018). Módulo II: Geología aplicada a la Geotermia, Alteración hidrotermal en los sistemas geotérmicos.

### 13. APÉNDICES

#### “APÉNDICE 1 - SECUENCIA DE METODOLOGÍA PROPUESTA CASO DE ESTUDIO”



“APÉNDICE 2 - DIAGRAMA POZO DE LECHADA PROPUESTO”





### “APÉNDICE 3 - LITOLOGIA POZO SJ6-3”

En base a la litología encontrada en el pozo SJ6-3, se definió el diseño de los pozos de lechada. En la profundidad de 95 a 115 metros se encuentra una andesita basáltica estable, que podría actuar de sello a las manifestaciones por debajo de esta profundidad.

