



UNIVERSIDAD DE CHILE

FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS

DEPARTAMENTO DE GEOLOGÍA

MODELAMIENTO GEOQUÍMICO DE LOS FLUIDOS GEOTÉRMICOS EN LA
PLANTA CERRO PABELLÓN

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE GEÓLOGA

GABRIELA ALEJANDRA SOTO HERRERA

PROFESOR GUÍA:

DIEGO MORATA CÉSPEDES

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:

LINDA DANIELE

MARTIN REICH MORALES

GIANNI VOLPI

SANTIAGO DE CHILE

2019

**RESUMEN DE LA MEMORIA PARA
OPTAR AL TÍTULO DE:** Geóloga
POR: Gabriela Alejandra Soto Herrera
FECHA: 21 de junio del 2019
PROFESOR GUÍA: Diego Morata
Céspedes

MODELAMIENTO GEOQUÍMICO DE FLUIDOS GEOTÉRMICOS EN LA PLANTA CERRO PABELLÓN

La presente investigación tiene por objetivo establecer un modelo conceptual del comportamiento de los fluidos geotermales en su recorrido por la planta geotérmica Cerro Pabellón ubicada en la región de Antofagasta. La planta está compuesta por dos unidades de una potencia instalada bruta de 24 MW cada una por un total de 48 MW de capacidad y en operación es capaz de producir alrededor de 340 GWh al año. Con el modelo conceptual se pretende poder predecir la precipitación de diversas fases minerales procedentes de los fluidos extraídos de los pozos de producción e identificar los puntos en que se concentrarían los precipitados.

Para esto se analizaron muestras de los precipitados extraídos de las tuberías de la planta Cerro Pabellón caracterizando la morfología y mineralogía con el fin de identificar las fases minerales predominantes del precipitado formado a partir de los fluidos geotermales. Al mismo tiempo, a partir de la composición promedio del fluido otorgada por Geotérmica del Norte S.A. (Grupo Enel Green Power), se implementaron simulaciones geoquímicas usando el software PHREEQC. Este predice la variación de las concentraciones de los elementos en función parámetros termodinámicos, calculando las fases minerales predominantes y los cambios de pH y temperatura.

Este trabajo inició con una campaña de terreno para entender el funcionamiento de la planta Cerro Pabellón. Por otra parte, se llevaron a cabo diversos análisis de las muestras de los precipitados, otorgadas por ENEL Green Power utilizando microscopio electrónico de barrido (SEM), para determinar la morfología y la mineralogía presente de las muestras de sólidos encontradas dentro de la tubería de la planta. Además, se modeló el comportamiento del fluido geotérmico a partir de las variaciones termodinámicas existentes dentro de las tuberías de la planta de Cerro Pabellón.

Las dos muestras de los sólidos encontrados en las tuberías que dirigen el fluido hacia los pozos de reinyección, presentan minerales como el oropimente (As_2S_3), estibina (Sb_2S_3), hematita (Fe_2O_3), óxidos de hierro, pirita (FeS_2) y oro nativo (Au). Considerando esta mineralogía, se reprodujeron las condiciones termodinámicas de los fluidos en su recorrido por la planta.

Los resultados obtenidos permitieron elaborar un modelo conceptual que representa el comportamiento del fluido geotérmico de la planta, ilustrando los cambios de pH y la variación de los índices de saturación de la pirita, oropimente, estibina, hematita y sílice dentro de la planta.

Las simulaciones indican que, oropimente, sílice, estibina, hematita y pirita son los minerales con índice de saturación positivo, los cuales serían los precipitados predominantes dentro de la planta Cerro Pabellón.

AGRADECIMIENTOS

En primera instancia gracias al Centro de Excelencia en Geotermia de los Andes, proyecto FONDAP N° 15090013, y al Departamento de Geología por darme la oportunidad de llevar a cabo esta memoria. Muchas gracias a mi profesor guía, Diego Morata por la confianza en mí para realizar este trabajo y por su disposición, para los miembros de la comisión, Linda Daniele y Martin Reich por el apoyo, su gran disposición y sugerencias durante todo este trabajo.

A ENEL Green Power por su colaboración en este trabajo, en especial a Gianni Volpi y Germain Rivera por la muy buena disposición que tuvieron y la gran ayuda ante mis dudas durante el trabajo.

Gracias a mi mamá, por ser mi pilar fundamental en la vida, gracias por tu amor, por todo lo que me has enseñado y apoyo incondicional. A mi familia; Berni, abuela, tías abuelas, tíos, primos a todos que de una u otra manera han estado conmigo en este proceso con apoyo y confianza incondicional, los amo.

Quiero agradecer a todos mis amigos y compañeros que formaron parte de esta linda etapa de mi vida, en plan común y en geología. A toda la gente que conocí en la Feria Empresarial y los lindos momentos trabajando en la feria. A mis amigos del colegio y de la vida por las infinitas risas, alegrías y apoyo durante toda esta etapa y siempre.

Agradezco también a los profesores del departamento de geología, que hicieron que me interesara por esta carrera, y a la Blanca por su preocupación, disposición, buena onda y cariño, muchas gracias por todo.

Termino mi etapa universitaria feliz, eternamente agradecida de todo lo que aprendí, y de las lindas personas que conocí y fueron parte de este camino.

TABLA DE CONTENIDO

1	Introducción.....	1
1.1	Formulación del problema.....	1
1.1.1	Caso Cerro Pabellón.....	5
1.2	Objetivos.....	6
1.2.1	Objetivo general.....	6
1.2.2	Objetivos específicos.....	6
1.2.3	Hipótesis de trabajo.....	6
2	Marco Geológico.....	7
2.1	Ubicación y accesos.....	7
2.2	Marco geológico regional.....	8
3	Centrales de ciclo binario.....	12
3.1	Planta binaria Cerro Pabellón.....	13
3.2	Funcionamiento.....	14
4	<i>Precipitado mineral en centrales geotérmicas</i>	16
4.1	Precipitados en plantas geotermales.....	16
4.1.1	Tipos de precipitados.....	19
4.1.2	Prevención de precipitados.....	25
5	Geoquímica de fluidos geotermales en Cerro Pabellón.....	31
5.1	Análisis salmuera.....	32
5.2	Análisis gases condensados.....	34
6	Metodología.....	35
6.1	Trabajo de campo.....	35
6.2	Métodos analíticos.....	37
6.2.1	Microscopia electrónica de barrido (SEM).....	37
6.3	Modelamiento Geoquímico.....	38
7	Resultados.....	39
7.1	Imágenes SEM.....	39
7.1.1	Fases con Sb.....	39
7.1.2	Fases con As.....	43
7.1.3	Fases de sílice.....	48
7.1.4	Presencia de pirita (FeS ₂).....	52
7.1.5	Presencia de oro.....	55

7.1.6	Corrosión	56
7.1.7	Presencia de hematita.....	59
7.2	Modelamiento PHREEQC	62
8	Discusión.....	67
8.1	Geoquímica de fluidos.....	67
8.2	Modelo geoquímico.....	68
9	Conclusiones.....	78
10	Bibliografía.....	79
11	ANEXOS.....	82

Contenido de figuras

Figura 1: Sistema geotérmico relacionado con un campo volcánico activo típico de una configuración de arco magmático sobre una zona de subducción (Moeck 2014).....	2
Figura 2: Imágenes de scaling en tuberías geotérmicas. A la izquierda, precipitados de CaCO_3 en una tubería que transporta agua geotérmica de baja entalpía en Nigrita, Grecia. A la derecha, precipitados mixtos de sílice y sulfuro en la tubería de reinyección de la planta geotérmica de Milos, Grecia. (Andritsos et al., 2002).....	4
Figura 3: Imagen de planta geotérmica Cerro Pabellón (ENEL Green Power, 2017).	5
Figura 4: Mapa de ubicación del área de Apacheta (Informe interno ENEL GP).....	7
Figura 5a: Zona Volcánica Central (CVZ) en la Cordillera de los Andes que muestra el Complejo Volcánico Altiplano-Puna (APVC; de Silva, 1989) y los principales volcanes del Pleistoceno al Holoceno en la ubicación del sistema geotermal Cerro Pabellón (Maza et al., 2018).	8
Figura 6: Ubicación de los pozos de producción y reinyección de planta Cerro Pabellón (Gentileza ENEL GP).	13
Figura 7: Esquema de planta Cerro Pabellón (ENEL Green Power, 2018).	14
Figura 8: Diagrama T-s, central de expansión súbita (Matamala, 2014).	15
Figura 9: Diagrama de fluido que muestra los lugares más frecuentes de precipitación de scaling. (Tassew, 2001).	17
Figura 10: Imagen de pozo con severas consecuencias por scaling y corrosión (Jamero et al., 2018).....	18
Figura 11: Solubilidad para calcita y aragonito en pozos geotérmicos islandeses seleccionados (puntos), curvas de solubilidad teóricas para calcita (línea sólida) y aragonito (línea punteada). (Arnórsson, 1989).	20
Figura 12: Solubilidad de cuarzo, calcedonia y sílice amorfa vs temperatura (Corsi, 1986).	21
Figura 13: a) Solubilidad del oropimente (As_2S_3) en función del pH y temperatura en fluidos con bajo contenido de sulfuro, utilizando constantes de estabilidad para H_3AsO_3 (Webster, 1990) b) Solubilidad del oropimente en función del pH a 25 ° C en fluidos con un alto contenido de sulfuros, utilizando constantes de estabilidad para $\text{H}_2\text{As}_3\text{S}_5$ (Webster, 1990).....	24
Figura 14: Esquema de una planta para control de presión parcial de CO_2 (Corsi R. 1986).	26
Figura 15: Esquema de cristalizador flash (Vetter y Kandarpa, 1982).	30
Figura 16: Ubicación de los pozos muestreados señalados con cuadros rojos de planta Cerro Pabellón (Gentileza ENEL GP).	31
Figura 17: Fotografía de vista aérea de planta geotérmica Cerro Pabellón.....	35
Figura 18b: Fotografía de sistema de enfriamiento de isopentano de la planta geotérmica Cerro Pabellón. ...	36
Figura 19: Zonas seleccionadas para el análisis mediante SEM-EDX, incluyendo el espectro EDX obtenido. Los valores de los análisis elementales están recopilados en la Tabla 4 y 5, ambos análisis se hicieron de manera puntual por lo que reflejan la composición química de esos puntos específicos. a) Zona demarcada por cuadro rojo indica el sector donde se encuentra la estibina con morfología acicular. b) zona indicada con cuadro rojo, indica donde se encuentra la estibina con morfología irregular.	40
Figura 20: Zonas seleccionadas para el análisis mediante SEM-EDX, incluyendo el espectro EDX obtenido. Los valores de los análisis elementales están recopilados en la Tabla 4 y 5, ambos análisis se hicieron de manera puntual por lo que reflejan la composición química de esos puntos específicos. a) Mineral indicado con punto spectrum 1 corresponde a la estibina. b) Mineral indicado con punto spectrum 1 corresponde a estibina.....	41
Figura 21: Zonas seleccionadas para el análisis mediante SEM-EDX, incluyendo el espectro EDX obtenido. Los valores de los análisis elementales están recopilados en la Tabla 6 y 7, ambos análisis se hicieron de manera puntual por lo que reflejan la composición química de esos puntos específicos. a) Zona demarcada por cuadro rojo indica el sector donde se encuentra el oropimente b) sector indicado con flechas rojas indica sector donde se encuentra oropimente c) zona indicada con cuadro rojo indica sector donde se encuentra el oropimente d) zona indicada con flechas rojas indica cristales de oropimente e) zona demarcada con cuadro rojo indica sector donde se encuentra el oropimente.	45
Figura 22: Imágenes BSE con z (Morata, 2017)onas seleccionadas para el análisis mediante SEM-EDX, incluyendo el espectro EDX obtenido. Los valores de los análisis elementales están recopilados en la Tabla 6 y 7, ambos análisis se hicieron de manera puntual por lo que reflejan la composición química de esos puntos específicos. a) Zona indicada por spectrum 1 corresponde a oropimente. b) zona señalada con flechas rojas corresponden a oropimente.....	46
Figura 23: Zonas seleccionadas para el análisis mediante SEM-EDX, incluyendo el espectro EDX obtenido. Los valores de los análisis elementales están recopilados en la Tabla 8 y 9, ambos análisis se hicieron de manera puntual por lo que reflejan la composición química de esos puntos específicos. a) Zona demarcada por cuadro rosado indica el sector donde se encuentra la sílice. b) Mineral demarcado con cuadro rosado indica donde se	

encuentra la sílice. c) Mineral demarcado con cuadro rosado corresponde a la sílice rodeado de cristales pequeños los cuales son principalmente oropimente.	49
Figura 24: Zonas seleccionadas para el análisis mediante SEM-EDX, incluyendo el espectro EDX obtenido. Los valores de los análisis elementales están recopilados en la Tabla 8 y 9, el análisis se hizo de manera general por lo que refleja la composición química genérica de la muestra.	50
Figura 25: Zonas seleccionadas para el análisis mediante SEM-EDX, incluyendo el espectro EDX obtenido. Los valores de los análisis elementales están recopilados en la Tabla 10 y 11, ambos análisis se hicieron de manera puntual por lo que reflejan la composición química de esos puntos específicos. a) Zona demarcada por cuadro rojo indica el sector donde se encuentra la pirita y la demarcada con cuadro verde sector en que hay cristales de oropimente. b) zona demarcada con cuadro rojo indica donde se encuentra la pirita. c) zona demarcada con cuadro rojo indica sector en que se encuentra la pirita.....	53
Figura 26: Zonas seleccionadas para el análisis mediante SEM-EDX, incluyendo el espectro EDX obtenido. Los valores de los análisis elementales están recopilados en la Tabla 12, los análisis se hicieron de manera puntual por lo que reflejan la composición química de esos puntos específicos.....	55
Figura 27: Zonas seleccionadas para el análisis mediante SEM-EDX, incluyendo el espectro EDX obtenido. Los valores de los análisis elementales están recopilados en la Tabla 13 y 14, ambos análisis se hicieron de manera puntual por lo que reflejan la composición química de esos puntos específicos. Las zonas indicadas con puntos spectrum 1 en las figuras 27a, 27b, 27c y 27d corresponden a muestras de corrosión.....	57
Figura 28: Zonas seleccionadas para el análisis mediante SEM-EDX, incluyendo el espectro EDX obtenido. Los valores de los análisis elementales están recopilados en la Tabla 15 y 16, ambos análisis se hicieron de manera puntual por lo que reflejan la composición química de esos puntos específicos.	59
Figura 29: Zonas seleccionadas para el análisis mediante SEM-EDX, incluyendo el espectro EDX obtenido. Los valores de los análisis elementales están recopilados en la Tabla 15 y 16, ambos análisis se hicieron de manera puntual por lo que reflejan la composición química de esos puntos específicos. a) Zona indicada por spectrum 2, indica donde se encuentra la hematita b) zona indicada con spectrum 1, indica donde se encuentra la hematita.....	60
Figura 30: Modelo conceptual de planta geotérmica Cerro Pabellón, con temperatura en diferentes tramos de la tubería.	64
Figura 31: Gráfico de temperatura versus índices de saturación de estibina, oropimente, sílice, hematita y pirita.	65
Figura 32: Gráfico de pH versus temperatura, ante la variación de la temperatura dentro de la tubería.	66
Figura 33: Zonas seleccionadas para el análisis mediante SEM-EDX, imagen de la izquierda corresponde a hematita y de la derecha corresponde a oropimente.....	69
Figura 34: Solubilidad de estibina y especiación del Sb acuoso en función de la temperatura, el H ₂ S y el pH calculados a las presiones a lo largo del límite de saturación líquido-vapor de H ₂ O. A) Contornos de solubilidad (ppm Sb) para estibina en función de la temperatura y a H ₂ S a un pH constante = 5.5. Las líneas en negrita marcan los límites de campo entre los complejos Sb ₂ S ₂ (OH) ₂ , H ₂ Sb ₂ S ₄ y HSb ₂ S ₄ acuosos. B) Diagrama de temperatura vs log de H ₂ S que ilustra los efectos ante la variación de pH en los límites de los complejos acuosos predominantes. (Hagemann et al., 2003).....	71
Figura 35: Composición de pirita a partir de las muestras de Cerro Pabellon de As-Fe-S. (A) Diagrama ternario que muestra la composición de pirita de As-Fe-S. Cinco tendencias diferentes muestran la sustitución de (i) En cuanto a S (As ⁻¹ pirita); (ii) As ⁰ nano inclusiones (Deditius et al., 2009a); (iii) As ²⁺ para Fe (As ²⁺ pirita, Qian et al., 2013); (iv) As ³⁺ para Fe (As ³⁺ -pirita, Deditius et al., 2008); y metales divalentes (Me ²⁺) que sustituyen isovalentemente a Fe. La composición para As ²⁺ pirita (después de Qian et al., 2013; Deditius et al., 2014) se calculó basándose en el supuesto de ocupación ideal de S (66,66% en moles). La flecha gris discontinua marca una tendencia, paralela a la tendencia de nano-inclusiones As ⁰ , mostrada por un subgrupo del conjunto de datos. Esta deficiencia en la concentración de S y Fe se interpreta como la presencia de nano-inclusiones de As ⁰ . (B) Como vs. S gráfico de dispersión, que muestra la correspondencia inversa entre estos elementos en pirita desde el CPGS. Círculos amarillos: pirita-I, símbolos azules: pirita-II, y círculos blancos, pirita-III. También se muestran los coeficientes de correlación (r _P = Pearson, r _S = Spearman).....	72
Figura 36: imagen SEM con presencia de oro con tabla de % peso y % atómico.	73
Figura 37: Imagen SEM de la muestra FCP-10.2017091.	74
Figura 38: Modelo final de precipitación de minerales en planta geotermal Cerro Pabellón.	77

Contenido de tablas

Tabla 1: Análisis químico de la salmuera de los pozos de Cerro Pabellón (informe interno ENEL GP, 2017)..	33
Tabla 2: Promedio gas-vapor (%) de los pozos de producción (informe interno ENEL GP, 2017).....	34
Tabla 3: Análisis química de la fase gaseosa de los pozos de Cerro Pabellón (informe interno ENEL GP, 2017).....	34
Tabla 4: Análisis mediante SEM-EDX de muestras CRI-30112017 y FCP-10-2017091, en % atómico respectivos.	42
Tabla 5: Análisis mediante SEM-EDX de muestras CRI-30112017 y FCP-10-2017091, . en % peso para cada análisis.	42
Tabla 6: análisis de muestras CRI-30112017 y FCP-10-2017091, con % atómico respectivos.	47
Tabla 7: análisis de muestras CRI-30112017 y FCP-10-2017091 con % peso respectivos.....	47
Tabla 8: análisis de muestras CRI-30112017 y FCP-10-2017091, con % peso respectivos.....	51
Tabla 9: análisis de muestras CRI-30112017 y FCP-10-2017091, con % atómico respectivos.	51
Tabla 10: análisis de muestras CRI-30112017 con % peso respectivo.....	54
Tabla 11: análisis de muestras CRI-30112017 con % atómico respectivo.	54
Tabla 12: análisis muestras CRI-30112017 con % atómico y atómico respectivo.	55
Tabla 13: análisis de muestras CRI-30112017 con % peso respectivo.....	58
Tabla 14: análisis de muestras CRI-30112017 con % atómico respectivo.	58
Tabla 15: análisis de muestras CRI-30112017 con % peso respectivo.....	61
Tabla 16: análisis de muestras CRI-30112017 con % atómico respectivo.	61
Tabla 17: Compilación de base de datos de salmuera de fluidos geotermales de pozo de producción y reinyección de planta Cerro Pabellón (cortesía de Enel Green Power Chile – GDN S.A., 2017).....	62
Tabla 18: Datos obtenidos de modelamiento en PHREEQC que indican temperatura, pH e índices de saturación de estibina, oropimente, cuarzo, hematita y pirita.	63
Tabla 19: Análisis mediante SEM-EDX de muestras CRI-30112017 y FCP-10-2017091, con % pesos respectivos.	67
Tabla 20: análisis de muestras CRI-30112017 y FCP-10-2017091, con % atómico respectivos de fases con arsénico.....	67
Tabla 21: Datos de índice de saturación de fases minerales y variación del pH obtenidos del modelamiento en PHREEQC a partir de la composición promedio del fluido de Cerro Pabellón.	69
Tabla 22: porcentaje % peso de análisis de piritas.	72
Tabla 23: resultado de análisis de figura 36 con % peso y %atómico respectivos.	74
Tabla 24: Margen de error de datos simulados en PREEQC (pH experimental) en comparación con los datos medidos por ENEL GP (pH teórico).....	75

Contenido de anexos

Anexo 1: Programación utilizada para el modelamiento en software PHREEQC.....	82
Anexo 2: composición química de estibina con respecto al porcentaje peso (mineral data).....	83
Anexo 3: composición química de oropimente con respecto al porcentaje peso (mineral data).....	83
Anexo 4: composición química de escorodita con respecto al porcentaje peso (mineral data).....	83
Anexo 5: composición química de cuarzo con respecto al porcentaje peso (mineral data).	83
Anexo 8: composición química de pirita con respecto al porcentaje peso (mineral data).	83
Anexo 7: composición química de hematita con respecto al porcentaje peso (mineral data).....	83

1 INTRODUCCIÓN

1.1 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

Esta investigación se ha enfocado principalmente en los fluidos geotermales y su comportamiento ante variaciones termodinámicas, las cuales se producen dentro de las plantas geotermales durante la producción de energía geotérmica. La energía geotérmica es aquella que se obtiene del calor interno de la Tierra y se encuentra en el subsuelo en reservorios geotermales, para producir dicha energía se necesita un sistema geotermal (Figura 1), cuyas componentes se describen a continuación:

- Presencia de fuente de calor: Usualmente consiste en un cuerpo de magma a alta temperatura (600°C a 900°C) que entrega energía a las rocas adyacentes. Debe tener una profundidad menor a 10 km
- Reservorio: Corresponde al volumen del yacimiento, es decir, al volumen de rocas permeables que se encuentran saturadas en fluidos principalmente de origen meteórica, muy antigua y perteneciente a circuitos grandes y profundos con tiempo de recarga de miles de años. Los fluidos se pueden encontrar en estado líquido o gaseoso a altas temperaturas. Este se debe encontrar a una profundidad accesible mediante perforaciones.
- Capa sello: Se encarga mantener los fluidos en el sistema ya que impiden el escape de estos gracias a su baja permeabilidad y capacidad de preservar su temperatura. En general está conformada por rocas impermeables como las rocas arcillosas o precipitación de sales de las fuentes termales.
- Agua: Los fluidos son generalmente de origen meteórico (algunos casos pueden ser de origen superficial) los cuales se infiltran hasta llegar a una profundidad que permita aumentar su temperatura y entalpía para luego comenzar con el régimen convectivo. Estos fluidos están compuestos por pequeñas cantidades de gases (CO₂, H₂S, entre otros) agua y/o vapor, además de variados elementos químicos disueltos que se encuentran a altas temperaturas.
- Estructuras favorables que permitan la extracción del fluido geotérmico.

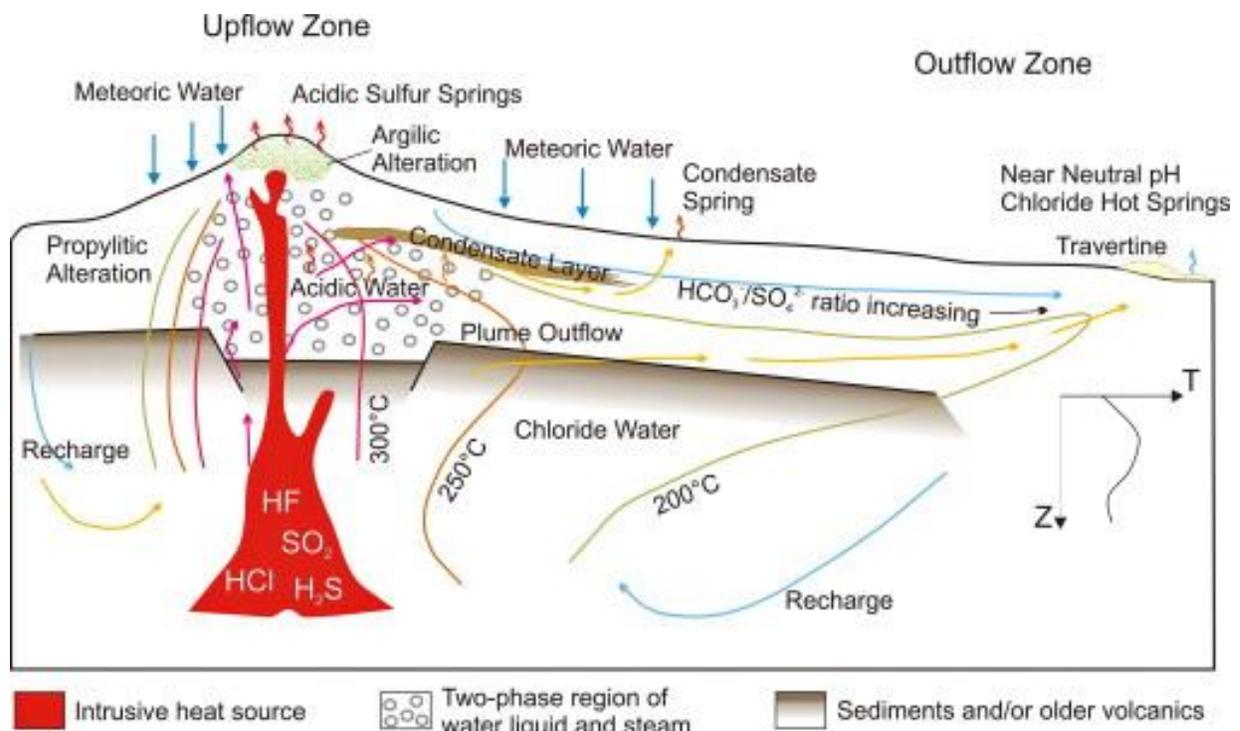


Figura 1: Sistema geotérmico relacionado con un campo volcánico activo típico de una configuración de arco magmático sobre una zona de subducción (Moeck 2014).

Los fluidos geotermales generalmente contienen sólidos y gases disueltos cuyo comportamiento termodinámico durante el funcionamiento de la planta geotérmica puede causar problemas, tales como la corrosión en superficies metálicas o precipitación de minerales.

Se denomina *scaling* al proceso de precipitación o cristalización que ocurre dentro de un sistema geotérmico en la cual el producto iónico de una sal poco soluble excede su producto de solubilidad en equilibrio. El término “*scaling*” se utiliza comúnmente cuando el precipitado formado es un depósito duro o a la formación de depósitos de sales de solubilidad inversa (CaCO₃, CaSO₄, etc.) (Andritsos *et al.*, 2002).

Durante la utilización de los fluidos geotermales para producir energía eléctrica hay cambios de temperatura y presión dentro de las tuberías de la planta geotérmica. Estas variables pueden conducir a la sobresaturación con respecto a uno o más minerales que causan precipitación de minerales, lo que conduce a problemas en las tuberías y en los equipos de la planta de energía.

Por lo tanto, la formación de precipitados en una planta geotérmica puede tener consecuencias económicas debido a pérdidas de energía, mayor costo de capital por sobredimensionamiento de equipos, mayores costos de bombeo, mayores costos de limpieza, mantenimiento debido a la obstrucción en los pozos y otros componentes de la planta y el sistema de acarreo de fluidos. Además, si el precipitado es de gran tamaño, se puede requerir una parada extraordinaria de la planta de generación para limpiar las líneas y el equipo para que la planta vuelva a funcionar por completo (Villaseñor y

Calibugan, 2011). Todo esto aumenta los costos de mantenimiento y reduce la capacidad de la planta.

La complejidad del proceso de formación de precipitados es el resultado de la gran cantidad de elementos que se encuentran en un fluido geotérmico y de los diferentes posibles mecanismos físicos y químicos involucrados. Además, la composición del fluido puede cambiar en gran medida de un sitio a otro y la variación de los procesos a lo largo del trayecto del fluido geotérmico dificultan la generalización tanto de los mecanismos responsables de la formación de precipitado, como de las medidas preventivas, por lo que es necesario realizar un estudio detallado de la zona en que se estudia el precipitado.

Corsi (1986) postula que reconocer los tipos de precipitados que se forman en la tubería de planta de energía geotérmica puede ser de gran ayuda ya que, dependiendo de la clasificación de estos, será la manera en que se tiene que adoptar para poder prevenir su formación. Los principales tipos de precipitados que se pueden formar son:

a. Sílice y silicatos.

La sílice se encuentra en general como sílice amorfa, normalmente como ópalo. De igual forma, los silicatos se presentan amorfos a semi-amorfos.

b. Carbonatos.

Los carbonatos se encuentran predominantemente como calcita baja en magnesio, aunque se han encontrado contenidos altos en magnesio y aragonito.

c. Sulfatos y sulfuros.

Los sulfatos son principalmente los sulfatos de calcio, barita y anhidrita la cual predomina en temperaturas más altas. En el caso de los sulfuros se presentan en muchas fases generalmente bien cristalizadas, las fases predominantes son de Pb, Zn, Fe, Cu y también se puede encontrar Sb_2S_3 (estibina).

En el mismo estudio, Corsi (1986) propone que entender los mecanismos de formación de precipitados puede ser de gran utilidad para prevenir la formación de estos. Se han reconocido tres principales entornos de formación:

1. Depósitos desde fluido monofásico (en tuberías de reinyección). En este caso el fluido debe estar sobresaturado con respecto a la fase única para que se produzca la precipitación de estos.
2. Depósitos desde fluido flashing ¹(en pozos separadores y tuberías bifásicas). Estos fluidos es una de las principales causas de la precipitación de minerales. El flashing se inicia por caídas de presión o por cavitación² en un flujo turbulento. El *flashing* mejora en gran medida la sobresaturación mediante uno de los siguientes mecanismos:
 - a. La pérdida de vapor de la fase líquida aumenta las concentraciones de los solutos restantes.

¹ Flashing: cuando la presión se reduce a través de la válvula por debajo de la presión del vapor, empieza a vaporizarse el fluido. La presión aguas abajo sigue siendo inferior a la presión de vapor, lo cual genera flujo bifásico permanente.

² La cavitación se refiere a la ocurrencia, formación de burbujas de gas o vapor formados en líquidos que fluyen, debido a la generación hidrodinámica de presiones bajas (debajo de la presión atmosférica).

- b. La caída de temperatura asociada con el proceso de expansión.
 - c. La pérdida de gases estables como CO₂ o H₂S aumenta el pH.
3. Depósitos por arrastre de vapor (en separadores, turbinas y tuberías de vapor).

Dicho lo anterior, es necesario comprender el proceso de formación de precipitados para poder tomar medidas para mitigar este problema dado a que la precipitación de las fases minerales puede ocurrir en casi todas partes en una planta geotérmica, tales como en los pozos de producción, instalaciones de superficie, tuberías, condensador y pozo de reinyección.



Figura 2: Imágenes de scaling en tuberías geotérmicas. A la izquierda, precipitados de CaCO₃ en una tubería que transporta agua geotérmica de baja entalpía en Nigrita, Grecia. A la derecha, precipitados mixtos de sílice y sulfuro en la tubería de reinyección de la planta geotérmica de Milos, Grecia. (Andritsos et al., 2002).

1.1.1 Caso Cerro Pabellón

“Cerro Pabellón” (Figura 3) es la primera planta geotérmica de Sudamérica. Esta es una planta de alta entalpía a ciclo binario e incorpora las tecnologías geotérmicas más avanzadas para garantizar un óptimo funcionamiento frente a las condiciones extremas de su ubicación, caracterizada por una elevada oscilación térmica y la gran altitud geográfica. Además, el fluido geotérmico extraído de los pozos de producción, una vez completado el ciclo de generación en la planta, se inyecta nuevamente en el reservorio, garantizando la disponibilidad y sostenibilidad a largo plazo del recurso geotérmico. Una de las particulares características de la geotermia es su capacidad de producir energía de manera continua, las 24 horas del día.



Figura 3: Imagen de planta geotérmica Cerro Pabellón (ENEL Green Power, 2017).

Para poder garantizar el buen funcionamiento de la planta de Cerro Pabellón, es de gran importancia la prevención y/o detección de precipitados para mitigar los problemas que estos pueden traer al estar dentro de la tubería y los pozos, además de la corrosión que puede ocurrir debido a los cambios de pH dentro de la planta. Se estudiarán los fluidos geotérmicos de Cerro Pabellón para poder detectar en donde se podrían formar distintos tipos de precipitados a partir de la composición química promedio de los fluidos para poder generar un esquema que sea capaz de reproducir los procesos de cambios termodinámicos y precipitación de fases minerales predominantes que pueden suceder dentro de la planta geotérmica de Cerro Pabellón.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo general

El objetivo general de este trabajo es analizar el precipitado mineral que ocurre dentro de la planta geotérmica de Cerro Pabellón a través de estudios de la geoquímica y mineralogía de muestras recolectadas en las tuberías de Cerro Pabellón. Del análisis se espera generar un modelo hidrogeoquímico que sea capaz de reproducir el comportamiento de los fluidos, considerando las condiciones termodinámicas que expliquen la precipitación de los diversos sólidos de la planta geotérmica.

1.2.2 Objetivos específicos

Los objetivos específicos son:

1. Análisis geoquímico de las concentraciones de diversos elementos de los fluidos geotérmicos de la planta Cerro Pabellón, para predecir los inconvenientes que se pueden presentar como precipitados minerales y/o corrosión.
2. Identificar los sólidos que se encuentran en las tuberías de la planta que pueden causar precipitación de minerales a partir del análisis de dichos sólidos en el laboratorio SEM, para poder prevenir o solucionar estas dependiendo de su naturaleza.
3. Generar un modelo predictivo de posibles precipitados dentro de la planta a partir de índices de saturación de las fases minerales obtenido a partir de la base de dato otorgada por ENEL GP.

1.2.3 Hipótesis de trabajo

Los precipitados minerales y la corrosión son un problema a los que se tienen que enfrentar los operadores de las plantas geotérmicas. Estos son responsables de múltiples problemas en el funcionamiento de la planta, por lo que entender las condiciones del sistema geotérmico que generan los precipitados y corrosión es fundamental para tomar medidas para mitigar dichos problemas. La hipótesis de esta memoria de título es que es posible establecer estas condiciones de formación mediante simulaciones geoquímicas que permitan reproducir las condiciones exactas de precipitación/disolución y mejorar así la gestión de la planta.

2 MARCO GEOLÓGICO.

2.1 UBICACIÓN Y ACCESOS

El área de Cerro Pabellón se encuentra en la Cordillera de Los Andes, al norte de la II región de Antofagasta, 120 Km. al NE de la ciudad de Calama y aproximadamente 60 km al NNW del Tatio.

Se accede a la zona desde la ciudad de Calama a través del camino internacional a Bolivia (ruta 21). Este camino pasa por el pueblo Chiu Chiu en el Km. 31 el cual llega, en el Km. 78, a la Estación San Pedro. En este punto se toma un desvío al Este por un camino de tierra paralelo a una serie de acueductos hasta llegar a un desvío en dirección a Ojos de San Pedro. Luego se continua por ese camino hasta llegar al campamento de CODELCO en Ojos de San Pedro y desde allí se toma un desvío hacia el norte. Este último camino rodea por el norte al Cerro Lailai para llegar a la zona de Cerro Pabellón por el Portezuelo La Cachimba (Figura 4).

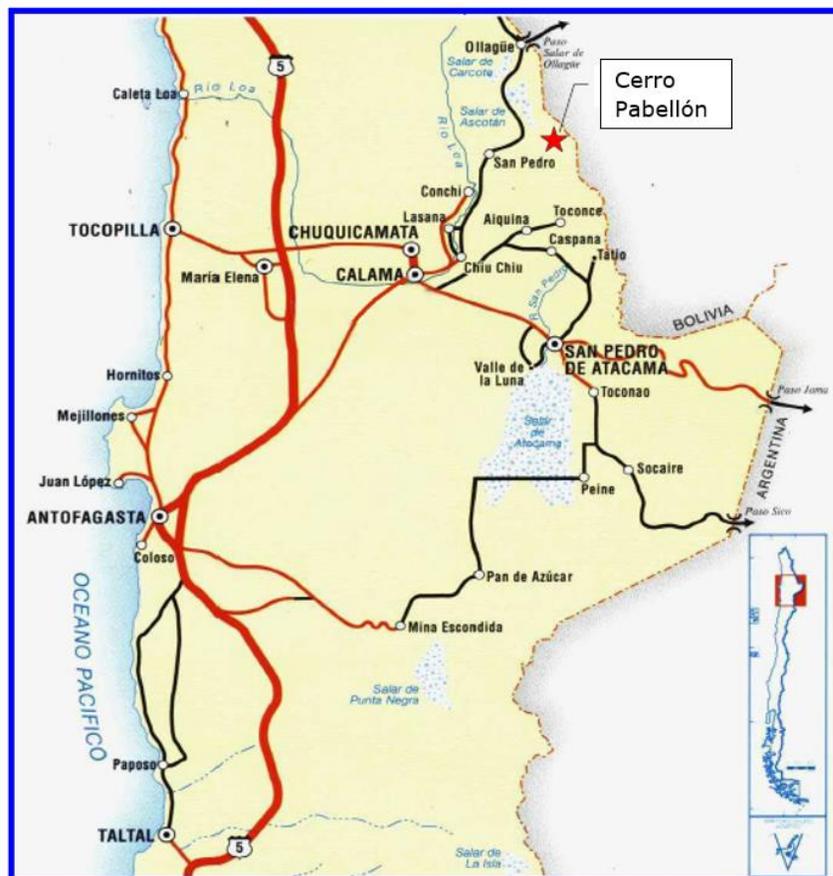


Figura 4: Mapa de ubicación del área de Apacheta (Informe interno ENEL GP).

Se accede al área con facilidad la mayor parte del año, aunque en el verano es la época más complicada a causa del “Invierno Boliviano”, el cual consiste en el desplazamiento hacia el pie andino occidental de masas de aire proveniente del Amazonas, las cuales

provocan lluvias intensas y tormentas eléctricas y posibles nevadas en zonas sobre 4.000 m.s.n.m., provocando el corte de algunos caminos de tierra. Durante el invierno también puede haber complicaciones por posibles nevadas.

2.2 MARCO GEOLÓGICO REGIONAL

Pampa Apacheta está inmersa en un arco volcánico formado en la Cordillera de los Andes (Figura 5a), la que en su totalidad incluye más de 200 volcanes potencialmente activos y al menos 12 sistemas de caldera gigante, como resultado de la subducción de las placas de Nazca y Antártica en la placa Sudamericana (Aravena et al., 2015).

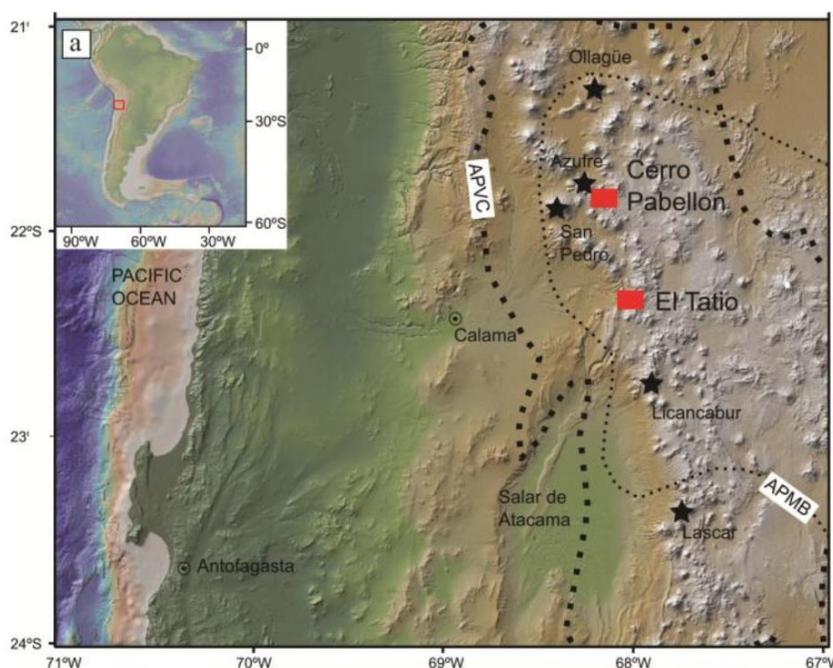


Figura 5a: Zona Volcánica Central (CVZ) en la Cordillera de los Andes que muestra el Complejo Volcánico Altiplano-Puna (APVC; de Silva, 1989) y los principales volcanes del Pleistoceno al Holoceno en la ubicación del sistema geotermal Cerro Pabellón (Maza et al., 2018).

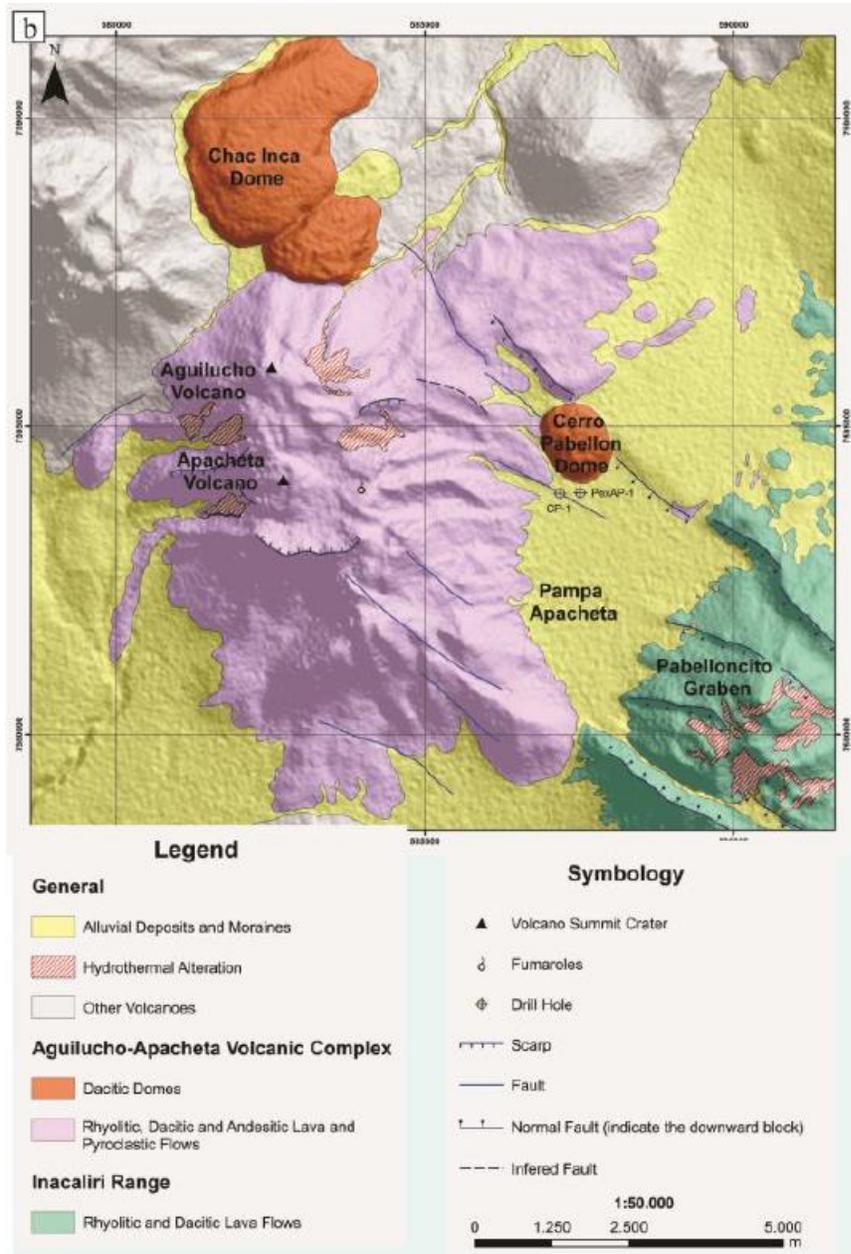


Figura 5b: Mapa geológico simplificado de campo geotermal Cerro Pabellón (Maza et al., 2018).

La Zona Volcánica Central Andina (CVZ) se ha formado bajo un intenso régimen geodinámico compresivo desde el Cretácico Temprano, y está asociada con la subducción de la Placa de Nazca bajo la Placa Sudamericana, que da lugar a actividad magmática e hidrotermal (Lahsen, 1988). En el norte de Chile, el magmatismo generó rocas volcánicas del Cretáceo medio - Mioceno tardío a riolíticas cubiertas por depósitos de ignimbrita Mioceno tardío - Pleistoceno (Lahsen y Trujillo, 1975). Estas rocas volcánicas constituyen el Complejo Volcánico Altiplano-Puna (APVC), una provincia magmática silícica volcotectónica generada por el derretimiento parcial de la corteza continental más gruesa del mundo (de Silva, 1989). Sobre estas unidades, se han

emplazado diferentes volcanes del Pleistoceno al Holoceno. El área del APVC coincide con la proyección de la superficie del Cuerpo Magmático Altiplano-Puna (APMB), un cuerpo parcialmente fundido dentro de la corteza superior a 4 a 25 km por debajo del nivel del mar, reconocido por métodos geofísicos (MT, análisis sísmicos, etc.) e interpretado como un batolito de corteza superior construido de manera incremental sobre una zona MASH de corteza superior (Braase et al., 2002).

En el área estudiada (Figura 5b), el CVZ se caracteriza por varios centros eruptivos orientados NW-SE dominados por el Pleistoceno poligénico al Holoceno Azufre-Inacaliri (Rivera et al., 2015), donde se reconocen los estratovolcanes de andesita basáltica a composición dacítica (Complejo Volcánico Apacheta-Aguilucho; Ahumada y Mercado, 2009) y domos riolíticos (cúpulas de Chac-Inca y Pabellón, Figura 5b; Rivera et al., 2015). Localmente, las diferentes unidades geológicas han sido identificadas por mapeo geológico de superficie y se han registrado cuatro pozos comerciales perforados por GDN (Rivera et al., 2015). Corresponden principalmente a plioceno - Pleistoceno andesítico a lava dacítica, brechas y tobas, cubiertas por un flujo de ceniza soldada de 100 m de espesor, mientras que la actividad volcánica reciente está asociada con una serie de cúpulas de lava dacítica del Pleistoceno (Pabellón, Chac-Inca y Chanka Figura 5b; Urzúa et al., 2002).

En el área se llevó a cabo una fase local de extensión del Plioceno, dentro de un régimen de compresión regional relacionado con la subducción de la Placa de Nazca debajo de la Placa de América del Sur (González et al., 2003). Esta fase generó un sistema de fallas normales del noroeste que se extiende desde el volcán Azufre en el noroeste hasta el volcán Inacaliri y el SE (Tibaldi et al., 2016). En la zona investigada, un área deprimida topográficamente de ~ 100 km² (Rivera et al., 2015), ~ 20 km de largo y 3 km de ancho, está bien definida por dos fallas importantes con saltos convergentes y pronunciados escarpes (~ 100–150 m), que forman un graben simétrico. Esta estructura graben NW-SE (el Pabelloncito Graben, Francis & Rundle, 1976), afecta a los estratovolcanes de Plioceno alineados NW-SE. De hecho, la avalancha de escombros en el complejo volcánico Apacheta-Aguilucho (AAVC), ubicado en la parte norte del graben, ha sido interpretada recientemente como un desencadenamiento por el colapso parcial de este edificio volcánico de 100 a 700 ka influenciado por la alteración hidrotérmica y por el entorno extensional (Godoy et al., 2017). La falla NE principal que limita el graben fue sellada por el domo dacítico Cerro Pabellón (Figura 5c, Tibaldi et al., 2009), la extrusión de las cuales se vio favorecida por la debilidad estructural relacionada con las fallas normales del graben.

El campo Cerro Pabellón no presenta manifestaciones hidrotermales superficiales; Este se clasifica como un campo geotérmico ciego. Sin embargo, en la cima del volcán Cerro Apacheta (Figura 5b), se reconocieron dos fumarolas sobrecalentadas (temperaturas medidas de 109 y 118 ° C) con altas tasas de descarga de vapor a 5150 m de elevación

(Urzúa et al., 2002). La geoquímica del gas de estas dos fumarolas sobrecalentadas sugiere su relación con un sistema geotérmico de alta temperatura, con un reservorio compuesto por fluidos bifásicos (líquido y vapor), a temperaturas de 250–325 ° C (Urzúa et al., 2002). Sin embargo, la única alteración de la superficie relacionada con el sistema geotérmico activo de Cerro Pabellón es la presencia de zonas de arcilla alteradas discontinuas, relacionadas espacialmente con una alteración ácido-sulfato, que incluyen azufre nativo y minerales arcillosos que afectan a las unidades volcánicas del Plioceno (Figura 5b; Tibaldi et al., 2009).



Figura 5c: Vista general de planta geotérmica Cerro Pabellón con el domo riolítico Cerro Pabellón en el fondo (Maza et al., 2018).

3 CENTRALES DE CICLO BINARIO.

En términos termodinámicos, las centrales geotérmicas binarias se asemejan en gran medida a las centrales térmicas convencionales y nucleares. Son utilizados en yacimientos con líquido dominante con el fin de obtener un rendimiento térmico mayor. Esta característica se presenta a lo largo de todo el planeta, por lo que la instalación de centrales geotérmicas binarias se ha masificado. Hasta el 2014, se registran 286 centrales de este tipo con potencia instalada, que corresponde al 47% de la totalidad de centrales geotérmicas instaladas en el mundo (Bertani, 2015).

Debido a la variedad de recursos geotérmicos es que hay distintas configuraciones que permiten aprovechar el calor para obtener energía eléctrica. Estas dependen en general de la temperatura, presión, caudal, título y composición del fluido. La generación de potencia es viable para recursos de media y alta entalpía. Actualmente hay distintas configuraciones genéricas para la obtención de potencia:

- Sistemas de conversión directa
- Sistemas de expansión súbita de una etapa o simple flash
- Sistemas de expansión súbita de doble etapa o doble flash
- Sistemas de ciclo binario
- Sistemas combinados

El caso de la central Cerro Pabellón es un sistema de ciclo binario con expansión súbita, el cual se explica a continuación.

En Cerro Pabellón se ha implementado un ciclo rankine orgánico (ORC por sus siglas en inglés) que utiliza isopentano con temperaturas de evaporación y condensación muy inferiores (aproximadamente 28°C a 1 bares) que las del fluido geotérmico. De tal forma que la fase líquida del fluido geotérmico extraído del pozo de producción, entrega calor al fluido binario y mediante elementos de intercambio térmico como el vaporizador y el precalentador (o *pre-heater*). El isopentano, posteriormente se expande en una turbina generando de energía eléctrica.

3.1 PLANTA BINARIA CERRO PABELLÓN.

Cerro Pabellón está compuesto por dos unidades de una potencia instalada bruta de 24 MW cada una por un total de 48 MW de capacidad (Figura 6). En operación será capaz de producir alrededor de 340 GWh al año, lo que equivale a las necesidades de consumo anual de más de 165.000 hogares chilenos, evitando la emisión a la atmósfera de más de 166.000 toneladas de CO₂ cada año.

Cerro Pabellón es una planta de alta entalpía a ciclo binario e incorpora las tecnologías geotérmicas más avanzadas para garantizar un óptimo funcionamiento frente a las condiciones extremas de su ubicación, caracterizada por una elevada oscilación térmica y la gran altitud geográfica. Además, el fluido geotérmico extraído de los pozos de producción, una vez completado el ciclo de generación en la planta, se inyecta nuevamente en el reservorio, garantizando la disponibilidad y sostenibilidad a largo plazo del recurso geotérmico. Una de las particulares características de la geotermia es su capacidad de producir energía de manera continua, las 24 horas del día.

La primera unidad de 24 MW comenzó a entregar algo de energía al sistema de transmisión Norte Grande (SING) a finales de marzo del 2017 (durante la etapa de comisionamiento y *start up*), mientras que la segunda unidad comenzó su etapa de *start up* en octubre del 2017. La capacidad completa esta prevista para Junio-Julio del 2019.



Figura 6: Ubicación de los pozos de producción y reinyección de planta Cerro Pabellón (Gentileza ENEL GP).

3.2 FUNCIONAMIENTO

La planta Cerro Pabellón, como se mencionó anteriormente, es una planta de ciclo binario. La distribución de los distintos equipos y máquinas participantes del proceso de generación eléctrica de la central se muestra en la Figura 7 y su funcionamiento se describe a continuación:

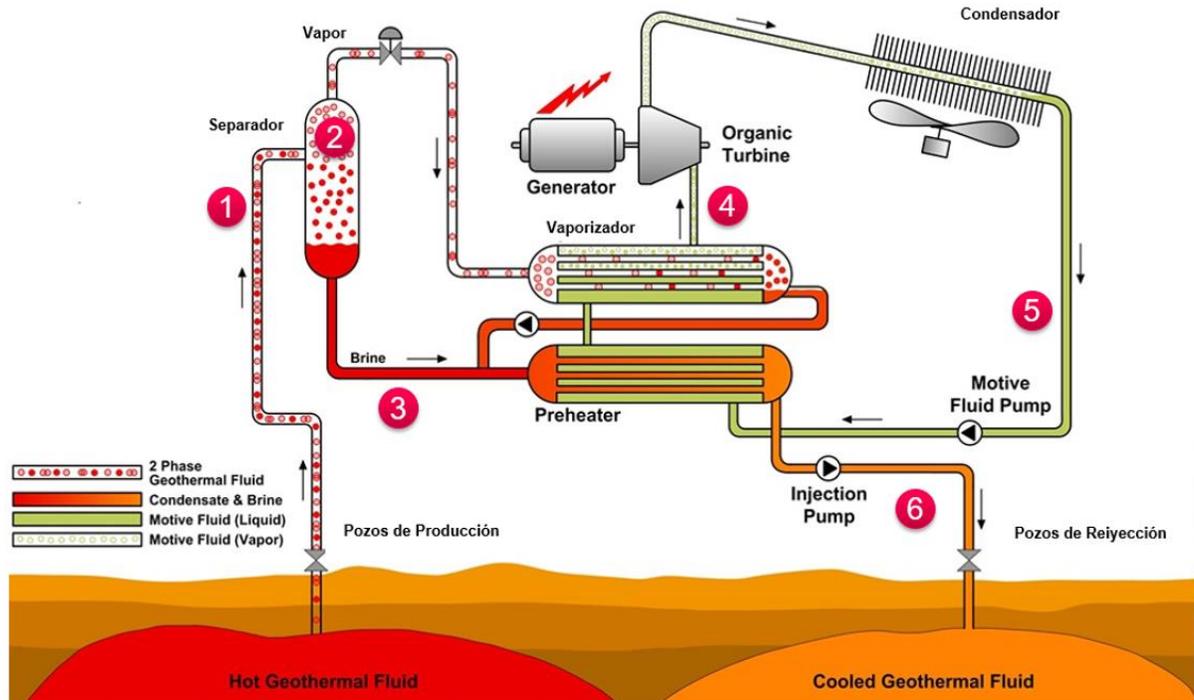


Figura 7: Esquema de planta Cerro Pabellón (ENEL Green Power, 2018).

1. Se extrae el fluido geotérmico de altas temperaturas desde los pozos de producción, cuyo fluido se encuentra en bifase líquido-vapor (Punto 1, figura 7). El fluido bifásico es conducido hacia el separador ciclónico en donde el fluido es despresurizado hasta la presión de operación del separador ciclónico (6,9 bar).
2. En el separador ciclónico el fluido bifásico (Punto 2, figura 7) proveniente del pozo es separado en su fase de vapor y líquida (a una presión de 6.9 bar, correspondiente a unos 170°C).
3. Desde el separador ciclónico, el fluido en fase vapor es conducido hacia el vaporizador, donde cede su energía térmica al fluido secundario (isopentano).
4. El isopentano vaporizado mueve el turbo-generador (Punto 4, figura 7) y es sucesivamente enfriado, alcanzando de nuevo un estado líquido (Punto 5, figura 7).
5. Por otra parte, el fluido geotérmico en fase líquida (Punto 3, figura 7) que sale del separador ciclónico resulta ser salmuera muy concentrada donde quedan contenidas todas las sales minerales y otros sólidos provenientes del reservorio. Dicha salmuera, de igual manera que el fluido en fase gaseosa cede calor al isopentano mediante el *preheater*.
6. Por último, el líquido saturado (Punto 3, figura 7) y el condensado del vapor (Punto 5, figura 7) son reinyectados a través de los pozos de reinyección (Punto 6).

El diagrama termodinámico temperatura – entropía (T-s) asociado una central geotérmica se muestra en la Figura 8.

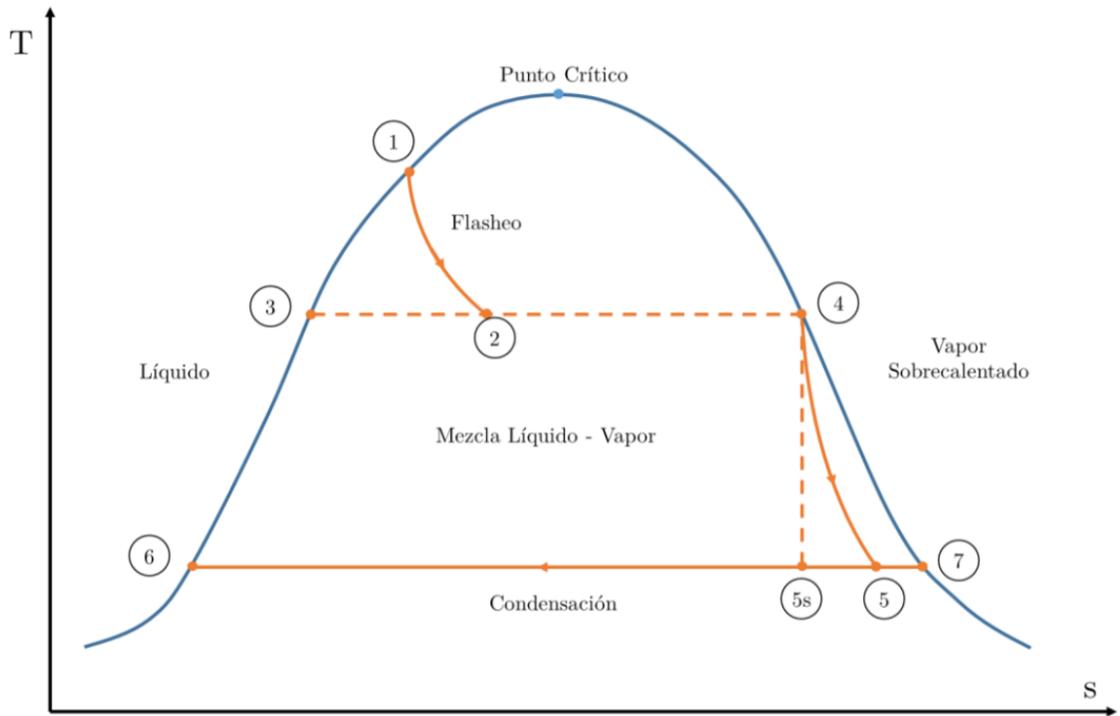


Figura 8: Diagrama T-s, central de expansión súbita (Matamala, 2014).

Como muestra la figura 8, el fluido extraído desde el reservorio se encuentra en un estado inicial (1) caracterizado por una entalpía, presión, temperatura y título (que representa el porcentaje de vapor en el fluido). Luego, al ingresar al separador (2) las propiedades cambian a excepción de la entalpía que se mantiene constante. El punto 3 representa al líquido saturado obtenido en el separador que luego de pasar por el preheater es reinyectado (6), y el punto 4 corresponde al vapor saturado obtenido del separador.

Después de la separación la fase líquida se dirige al *preheater* y la fase vapor al vaporizador para ceder su energía térmica al fluido secundario. El fluido secundario entra en ebullición e inicia a circular en un sistema separado, donde se ubica el turbo generador, a temperatura y presión de unos 150°C y 20 bar, respectivamente. Mueve la turbina, es condensado mediante el sistema de enfriamiento y recirculado para nuevamente cumplir su labor en turbina.

4 *PRECIPITADO MINERAL EN CENTRALES GEOTÉRMICAS*

4.1 PRECIPITADOS EN PLANTAS GEOTERMALES

Uno de los grandes problemas que se encuentra frecuentemente durante la producción de energía geotérmica son los depósitos de precipitados minerales en los pozos y en la infraestructura de la planta. Cuando se extraen fluidos geotérmicos altamente mineralizados, están sujetos a cambios de temperatura y presión. Estas variables pueden conducir a la sobresaturación con respecto a uno o más minerales que causan la precipitación de dichos minerales, lo que conduce a problemas en las tuberías y en los equipos de la planta de energía.

Según Barbier (2002) la química de un fluido geotérmico en el reservorio depende de:

- Las variaciones de temperatura
- Contenido de gas
- Fuente de calor
- Tipo de roca
- Permeabilidad de la roca
- Edad del sistema hidrotermal
- Fuente de fluido.

En algunos casos, la composición de un fluido puede variar dentro de los mismos sistemas geotérmicos o el mismo pozo, por lo que dado a que las características de los fluidos geotérmicos varían dependiendo del lugar en donde se encuentre (desde el reservorio, a través de los pozos, las tuberías de acarreo, los intercambiadores de calor y hasta la reinyección). El precipitado poseerá distintas características y por otra parte las medidas tomadas para combatir estos problemas serán propias del lugar en estudio.

La precipitación de minerales puede ocurrir en cualquier punto dentro de la planta de energía geotérmica (Figura 9). Siguiendo el recorrido del fluido al llegar a la superficie, los cambios en la temperatura pueden llevar a una sobresaturación mineral que puede causar precipitación de minerales. Una disminución en la presión también puede conducir a la liberación de gases disueltos del fluido, cambiando las concentraciones de sus componentes y el pH, lo que también conduce a la formación de precipitado. Cuando el fluido se mueve a lo largo de las tuberías hacia diferentes partes de la estación de energía, pueden ocurrir reacciones de precipitación mineral y generar precipitados a lo largo de estas vías como se observa en la Figura 10 (Jamero et al., 2018).

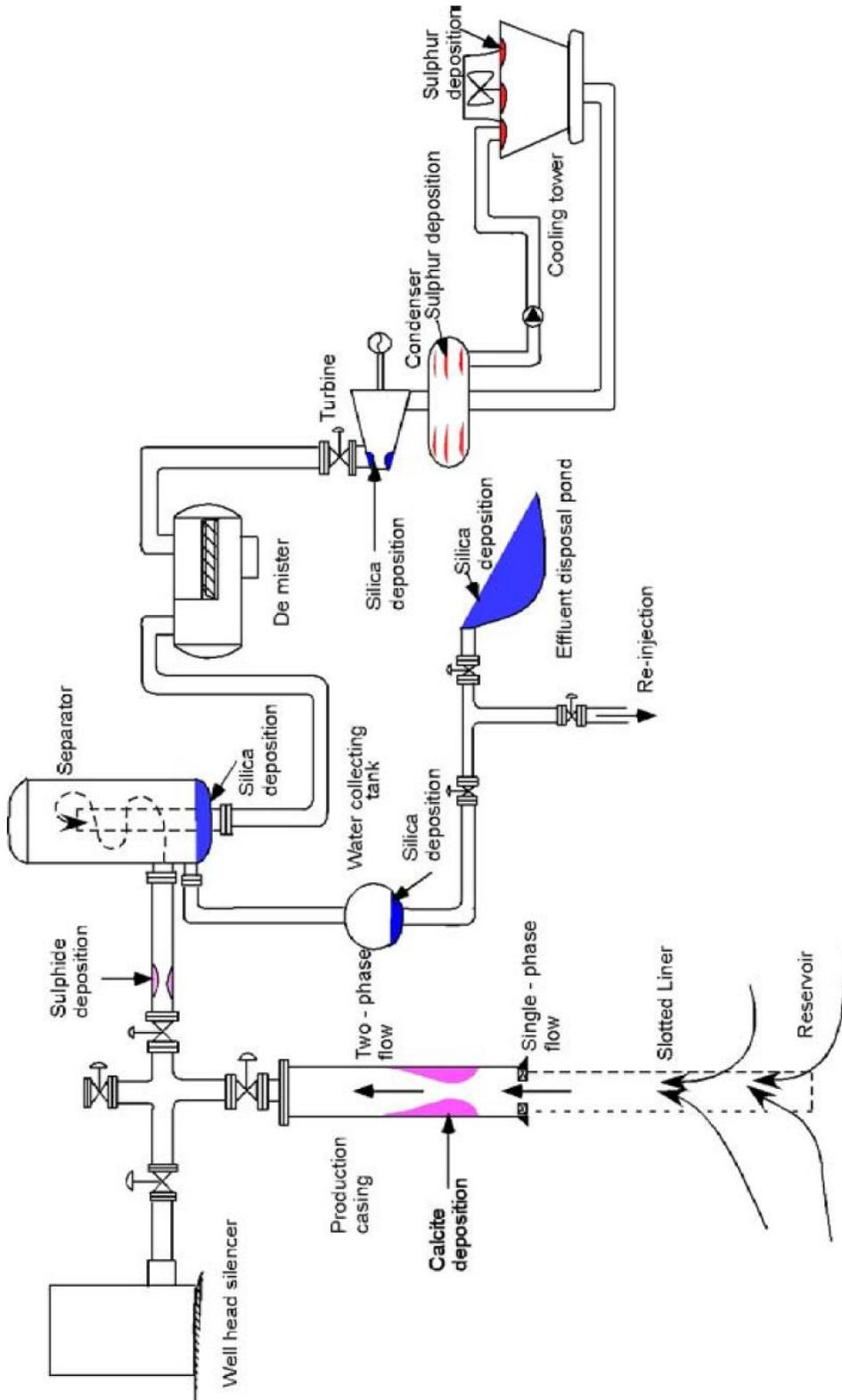


Figura 9: Diagrama de fluido que muestra los lugares más frecuentes de precipitación de scaling. (Tassew, 2001).

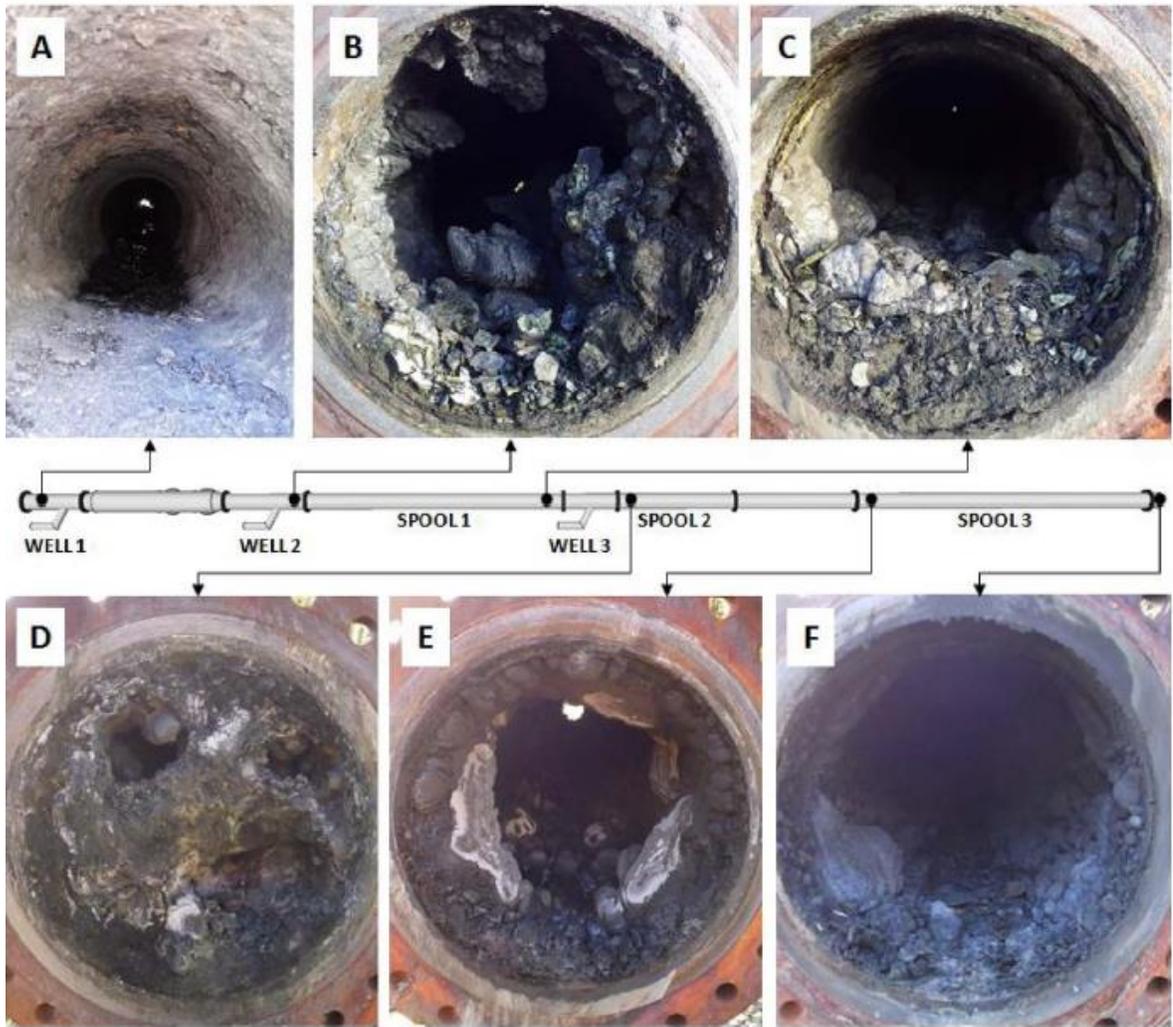


Figura 10: Imagen de pozo con severas consecuencias por scaling y corrosión (Jamero et al., 2018).

4.1.1 Tipos de precipitados

La formación de precipitados es un problema importante en la explotación de recursos geotérmicos. La precipitación de sílice, calcita y los sulfuros son tipos de precipitados comunes en plantas geotérmicas, es decir, pozos y demás equipos de superficie (Figura 10). Es por eso que es necesario conocer sus mecanismos de formación.

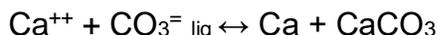
4.1.1.1 Carbonatos

Casi todos los sistemas geotérmicos contienen dióxido de carbono disuelto (CO_2). La cantidad de CO_2 presente en una solución de agua en equilibrio es proporcional a la presión parcial del CO_2 en contacto con la solución, de acuerdo con la ley de Henry (a una temperatura constante, la cantidad de gas disuelto en un líquido es directamente proporcional a la presión parcial que ejerce ese gas sobre el líquido.).

La concentración de CO_2 disuelto es en forma de CO_2 acuoso y también incluye HCO_3^- . La explotación geotérmica comienza con un fluido con alto contenido de CO_2 sin fase de vapor. Cuando la producción comienza, la presión disminuye y el equilibrio se desplaza hacia la derecha (Corsi, 1986):



El *flashing* de la fase de vapor y la liberación de CO_2 provocan un aumento de pH. Como resultado, se establecen las condiciones de sobresaturación y se deposita CaCO_3 :



La concentración de CO_3^{2-} aumenta y puede causar precipitación de CaCO_3 , de acuerdo con el producto de solubilidad (Ca^{++}) • (CO_3^{2-}). Por lo que la precipitación de CaCO_3 comienza así con el *flashing*.

En estos tipos de fluidos es predominantemente calcita baja en magnesio, aunque se han encontrado contenidos alto en magnesio y aragonito (Corsi, 1986).

La calcita es una forma cristalina de carbonato de calcio (CaCO_3) y es un mineral secundario abundante en los campos geotérmicos de todo el mundo. La precipitación de carbonato de calcio de un fluido geotérmico es un problema importante en muchos de campos geotérmicos debido, principalmente, a la obstrucción de los pozos de producción.

Los polimorfos más comunes de los minerales de carbonato de calcio son calcita, aragonito y vaterita. La vaterita es el primer mineral que se forma en una solución de carbonato cálcico sobresaturado (Dalas y Koutsoukos, 1989), pero aparentemente es inestable y se recristaliza para formar la calcita más estable. Por lo tanto, los minerales de precipitado de carbonato de calcio que se producen con mayor frecuencia son calcita y aragonito, en donde la calcita es la más común (Arnórsson 1989).

A partir de la curva de solubilidad, es posible concluir que la calcita se vuelve más soluble a medida que la temperatura disminuye; es decir, se produce el fenómeno de solubilidad inversa o retrógrada (Figura 11).

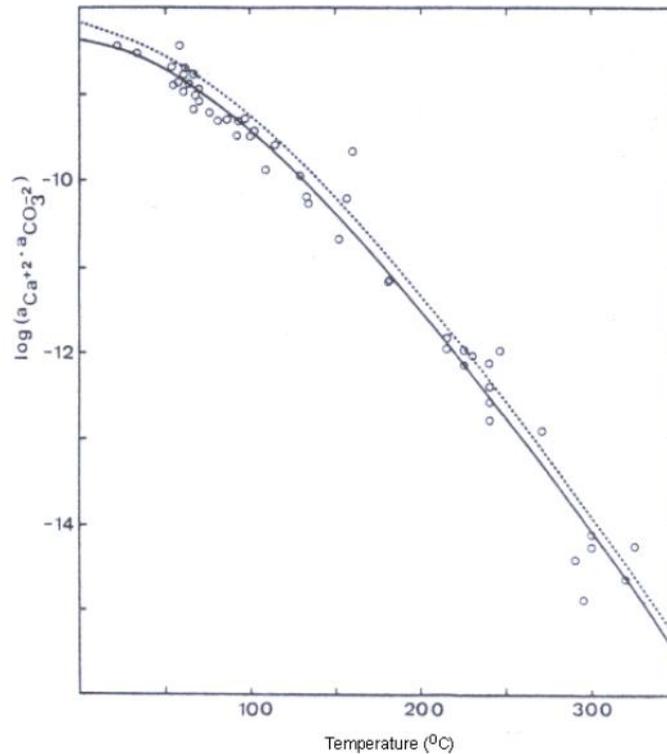


Figura 11: Solubilidad para calcita y aragonito en pozos geotérmicos islandeses seleccionados (puntos), curvas de solubilidad teóricas para calcita (línea sólida) y aragonito (línea punteada). (Arnórsson, 1989).

Tras la ebullición, los gases disueltos presentes en la fase líquida se dividen fuertemente en la fase de vapor. En las etapas iniciales de *flashing*, la concentración de iones de carbonato en el agua aumenta rápidamente. Por lo tanto, si al hervir se pierde una pequeña cantidad de vapor, se escapa una gran cantidad de CO_2 de la fase líquida a la fase de vapor, lo que provoca un aumento en el pH en el fluido y las concentraciones de ion carbonatado, por lo que la calcita precipita rápidamente al comienzo del *flashing*. Esta condición favorece la precipitación de carbonato de calcio en un pozo y, con el tiempo, obstruirá el flujo del fluido geotérmico formando precipitado.

4.1.1.2 Sílice

Mientras que los precipitados de carbonatos es común en recursos de temperatura media, el precipitado de sílice es muy frecuente en plantas geotérmicas de alta entalpía, donde se produce separación de vapor, debido a que en dichas plantas poseen altas concentraciones iniciales de sílice, por lo que se depositan especialmente en las líneas de reinyección, separadores y algunas veces en los pozos.

Las dos formas de sílice que son relevantes son el cuarzo y la sílice amorfa. La precipitación de cuarzo en pozos y equipos de superficie no es un problema común debido a la baja velocidad de formación, pero no así la sílice amorfa, ya que está asociada con cambios en la temperatura del fluido geotérmico. Por lo tanto, la precipitación de sílice amorfa es la que causa mayores problemas cuando precipita en equipos de superficie tales como tuberías, separadores, boquillas de turbinas, intercambiadores de calor y pozos de reinyección.

Generalmente, en el depósito geotérmico se asume que el fluido está en equilibrio con el cuarzo a la temperatura del fluido. En el intervalo de interés ($\text{pH} < 8$), la solubilidad del cuarzo puede considerarse independiente del pH. A medida que se enfría, el fluido geotérmico se vuelve sobresaturado con respecto al cuarzo. La cinética del cuarzo es muy lenta y la precipitación de sílice a temperaturas más bajas está controlada por el equilibrio de la sílice amorfa, que es más soluble que el cuarzo a una temperatura determinada. La solubilidad de la sílice amorfa aumenta con la temperatura, disminuye con la salinidad y aumenta bruscamente con el pH. (Corsi, 1986).

En la mayoría de los campos geotérmicos, el separador de vapor funciona debajo de la línea de sílice amorfa (subsaturada) para evitar la formación de precipitado de sílice en las tuberías y el separador. El funcionamiento por encima de la línea de sílice amorfa causará la formación de estas, pero a velocidades muy diferentes, dependiendo de la composición del agua, el tiempo de retención y otros factores. La solubilidad de varias fases de sílice en el fluido a la presión de vapor de la solución se muestra en la Figura 12.

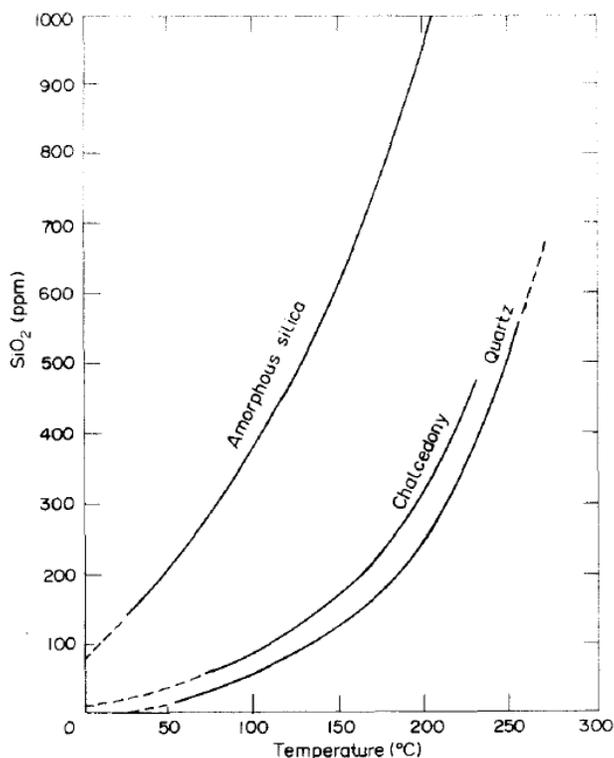


Figura 12: Solubilidad de cuarzo, calcedonia y sílice amorfa vs temperatura (Corsi, 1986).

La sílice amorfa precipita a bajas temperaturas mucho más rápido que otras formas de sílice. Por lo tanto, esta es la precipitación dominante en el equipo de superficie, así como en donde se descarga la eliminación de aguas residuales.

De acuerdo con Hurtado et al. (1989), la precipitación de sílice de fluidos geotérmicos puede ocurrir en períodos de minutos u horas después que la sobresaturación ocurre. Por lo tanto, la precipitación de sílice puede controlarse cinéticamente y retrasarse unos minutos u horas después de alcanzar la saturación.

La mayoría de los métodos de tratamiento se centran en la prevención de la precipitación de sílice o en el control de la formación de polímeros, ya que la precipitación de sílice suele ser inerte para la mayoría de los productos químicos y, una vez precipitada, también es bastante resistente a la eliminación mecánica.

4.1.1.3 Sulfuros y sulfatos

En los sistemas geotérmicos el precipitado de sulfuro puede ocurrir en todo tipo de fluido geotérmico, ya sea con entalpía baja, intermedia o alta, aunque el mecanismo responsable de la formación de precipitación de sulfuro es diferente en fluidos geotérmicos de baja y alta entalpía (Tassew, M. 2001).

Criaud y Foulliac (1989) observaron que los campos de baja entalpía que contienen altas concentraciones de sólidos disueltos podrían causar una leve corrosión en la cubierta de acero, lo que causaría la liberación de hierro. Por lo tanto, el hierro migrado, debido a la corrosión, reacciona rápidamente con fluidos geotérmicos ricos en H₂S que producen una mayor tasa de precipitación de sulfuros y sulfatos.

En cambio, en un sistema geotérmico de alta entalpía, la precipitación de estos minerales se debe a que el azufre (S⁼) se enlaza con metales como el hierro y algunos otros metales básicos (Zn, Pb, As, Sb etc.). Las precipitaciones de sulfuro en los sistemas geotérmicos de alta entalpía pueden ser graves en aguas con un alto contenido de sólidos disueltos, ya que se combinan con el precipitado de sílice. En estos sistemas, los sulfuros y óxidos metálicos se depositan con frecuencia luego de un cambio de fase o pH (Tassew, 2001).

La tasa de precipitación de sulfuros y óxido metálico en la mayoría de los sistemas de alta entalpía está controlada por el grado de cambio de pH que acompaña al proceso de evaporación de fluidos y por la concentración de iones metálicos (Karabelas et al., 1989). En este sentido, pequeñas concentraciones de iones metálicos en fluidos geotérmicos limitan la velocidad de precipitación de sulfuros metálicos en campos de alta entalpía. Las concentraciones de iones metálicos pueden ser elevadas como consecuencia de condiciones de alta salinidad (como es el caso de Salton Sea). El intercambio de azufre entre sulfato y ácido sulfhídrico dependen de su concentración, temperatura y pH. La reacción es rápida en condiciones ácidas, pero es muy lenta en ambientes alcalinos (Robinson, 1973).

4.1.1.4 Arsénico

El enriquecimiento de arsénico en sistemas geotérmicos ocurre predominantemente cerca de la superficie, junto con otros elementos como Sb, Au y Hg (White, 1981). Por el contrario, los metales básicos como Ag, Cu, Pb, Zn se depositarán a mayor profundidad. En profundidad, As se concentra principalmente en la pirita, como se ha observado en algunos campos geotérmicos (Ballantyne y Moore, 1988) y como es el caso de Cerro Pabellon (Maza et al., 2018). Los minerales de arsénico como la arsenopirita (FeAsS) parecen ser poco comunes en los depósitos geotérmicos.

Se ha sugerido que la zonificación de metales observada puede reflejar simplemente diferentes mecanismos de precipitación para los metales base complejos de cloruro y los metales epitermales complejos de sulfuro (Drummond y Ohmoto, 1985). Si se transporta como un metal complejo, se esperará que el As precipite en respuesta a la disminución de la temperatura y la ebullición (pérdida de H_2S) en las zonas permeables.

Spycher y Reed (1989) argumentan que el As se transporta más probablemente como H_3AsO_3 en soluciones hidrotérmicas. Por otro lado, la zonificación de metales se debe a un proceso de tres pasos de ebullición de fluidos, transporte en fase gaseosa y reacciones ácidas con aguas que contienen metales. La precipitación del metal base ocurre en respuesta a la ebullición y al aumento del pH que ocurre cuando se elimina el gas CO_2 . Durante la ebullición, As permanece soluble como anión bajo el pH más alto y las concentraciones más bajas de sulfuro presentes en el fluido. La precipitación del oropimente ocurre luego en respuesta a la acidificación de las aguas termales con aguas ácidas sulfatadas, enfriamiento subaéreo del fluido o concentraciones incrementadas de H_2S .

En la Figura 13 se observa que la oxidación rápida de As o H_2S reduce las concentraciones de estos componentes y por lo tanto aumenta la solubilidad del oropimente. La precipitación del realgar (As_4S_4) puede ocurrir cuando la temperatura desciende por debajo de 130°C (Spycher y Reed, 1989b).

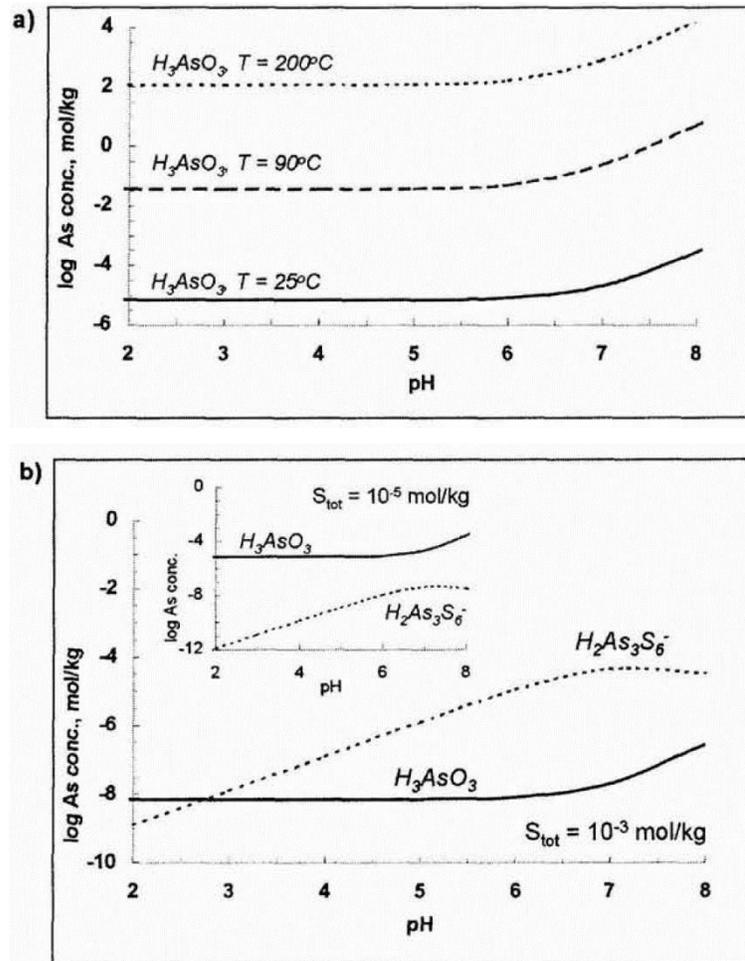


Figura 13: a) Solubilidad del oropimente (As_2S_3) en función del pH y temperatura en fluidos con bajo contenido de sulfuro, utilizando constantes de estabilidad para H_3AsO_3 (Webster, 1990) b) Solubilidad del oropimente en función del pH a $25^\circ C$ en fluidos con un alto contenido de sulfuros, utilizando constantes de estabilidad para $H_2As_3S_5$ (Webster, 1990).

El precipitado que se forma en tuberías y pozos de un campo geotérmico también pueden ser rico en As. El precipitado rico en As y Au se deposita en placas de contrapresión, como es el caso en el campo geotérmico Ohaaki, debido a la caída repentina de la presión y la consecuente ebullición del fluido (Simmons y Browne, 2000).

En el campo geotermal Wairakei, Nueva Zelanda, las concentraciones de As en los fluidos geotermales son 1.6 (mg/kg) y 9.4% (wt%) y para el caso de Ohaaki, Nueva Zelanda, las concentraciones de As en los fluidos geotermales son de 10 (mg/kg) y 0.1% (wt%) (Welch et al., 2003).

El precipitado que se forma en el drenaje del yacimiento Wairakei demuestra una estrecha correlación positiva entre el contenido de As y de Fe, con la precipitación de As principalmente debido a la adsorción en el óxido de Fe (Finlayson y Webster, 1989).

4.1.2 Prevención de precipitados

Existen muchos métodos para controlar la formación de precipitados en sistemas geotermales. Algunas de las medidas más comunes son el diseño adecuado de la planta geotérmica y la selección de las condiciones de funcionamiento, el ajuste del pH, el uso de aditivos químicos y la eliminación de depósitos por medios químicos o mecánicos (Andritsos et al., 2002).

Debe enfatizarse que cuando se trata de un problema de precipitados o corrosión en una planta geotérmica se debe tomar en consideración lo siguiente:

- No hay un procedimiento específico para tratar todas las variaciones de la formación de precipitados.
- Una medida efectiva de control para los precipitados en una planta geotérmica puede convertirse en ineficaz en caso de cambio de las condiciones en la operación (cambios de temperatura o presión) o cuando se aplica a otra planta geotérmica.

Por lo que es de gran importancia detectar el tipo de precipitado que se podría formar para poder utilizar diferentes métodos de prevención dependiendo de las características de este.

4.1.2.1 Prevención de precipitación de carbonatos

Se han aplicado métodos diferentes para controlar la formación de precipitación de carbonatos en campos geotérmicos. En sistemas de baja entalpía puede controlarse limitando el grado de desgasificación y los cambios de pH resultantes que producen la sobresaturación de minerales de carbonato (Kristmannsdóttir, 1989). Pero en los sistemas de alta entalpía, donde no se puede evitar la ebullición, es necesario eliminar directamente los depósitos sólidos ensanchando con una plataforma de perforación, desde la zona de precipitación, si es que el precipitado no ha tapado los acuíferos o la parte del revestimiento del pozo. Las pruebas y la experiencia demuestran que se pueden aplicar inhibidores químicos para evitar la precipitación de calcita en el pozo, lo que puede eliminar o minimizar los efectos adversos de los precipitados (Tassew, 2001).

Los métodos de prevención de estos procesos deben diseñarse y adaptarse a cada planta geotérmica dependiendo de las condiciones en terreno. Por lo que las medidas señaladas serán óptimas dependiendo del sitio en donde se encuentre la planta.

Según Corsi (1986), el precipitado de carbonato de calcio se puede prevenir mediante:

- a. Actuando sobre la presión parcial de CO_2 .

Las manipulaciones de presión y temperatura del fluido geotérmico se pueden lograr fácilmente bombeando un pozo geotérmico en lugar de depender de su flujo natural. La utilización de una bomba de pozo disminuirá drásticamente o eliminará la presión en el pozo y las caídas de temperatura causadas por flashing.

Los fluidos producidos se pueden mantener como un sistema de fase única por medio de una bomba mecánica de fondo de pozo. Por lo tanto, se puede eliminar la formación de precipitados "sensibles a la presión" tales como CaCO_3 . La formación de precipitado "sensibles a la temperatura" como BaSO_4 puede retrasarse o al menos trasladarse desde los pozos al equipo de superficie más accesible por lo que su manejo se vuelve mucho más fácil.

Otro posible método de prevención de precipitados consiste en mantener artificialmente una alta presión parcial de CO_2 mediante la reinyección de parte del CO_2 producido de vuelta al pozo productor de acuerdo con el esquema de la Figura 14.

Los experimentos con este método tuvieron éxito en los EE. UU. (Kuwada, 1982) pero parecen válidos solo para líquidos con bajas presiones parciales de CO_2 .

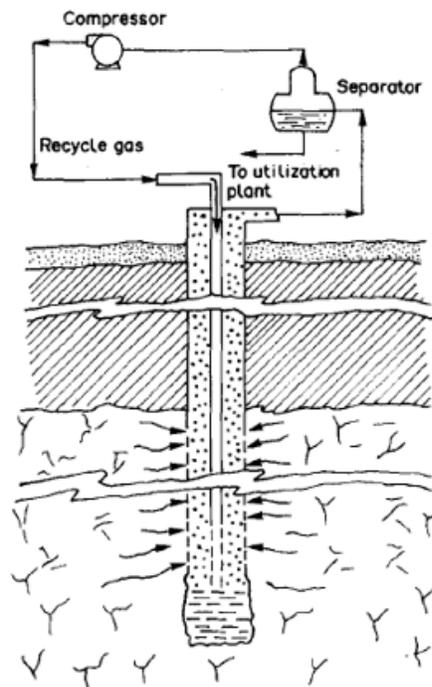


Figura 14: Esquema de una planta para control de presión parcial de CO_2 (Corsi R. 1986).

b. Actuando sobre el pH de la solución.

La manipulación de la composición química de los fluidos geotérmicos, en particular su pH, es otra forma para evitar la formación de precipitados. Por ejemplo, agregar HCl a un fluido geotérmico para disminuir el pH por debajo de un cierto valor al cual no se puede formar precipitados de CaCO_3 puede ser factible pero no económicamente viable. El costo del ácido puede ser mucho mayor que el costo de la electricidad producida por el sistema, ya que muchos líquidos

geotérmicos tienen una capacidad de amortiguación extremadamente grande. Se requieren cantidades excesivamente grandes de ácido para obtener incluso pequeñas disminuciones de pH.

c. Usar aditivos químicos (inhibidor de precipitados).

Una de las técnicas más comunes para controlar los precipitados de carbonato implica el uso de aditivos químicos (crecimiento de cristales o inhibidores de precipitados). Estas sustancias son generalmente moléculas moderadamente grandes que se adsorben fácilmente en los sitios activos de crecimiento de las superficies de los cristales, lo que retarda la nucleación y el crecimiento del cristal y distorsiona la estructura cristalina del precipitado (Amjad, 1995). La inhibición del crecimiento cristalino se considera el método más eficaz para controlar la formación de precipitados de carbonatos en instalaciones geotérmicas (Benoit 1990).

La eficacia de la inhibición del precipitado depende de la capacidad del inhibidor para interferir con las etapas de formación del precipitado, ya sea en la etapa de nucleación o en la etapa de crecimiento del cristal. Se considera que los diversos inhibidores actúan de acuerdo con uno (y generalmente más de uno) de los siguientes mecanismos principales de interferencia con el crecimiento del cristal:

- i. Efecto umbral: el inhibidor actúa retardando la precipitación de la sal.
- ii. Efecto de distorsión cristalina: el inhibidor interfiere con el crecimiento del cristal produciendo una estructura irregular (generalmente superficies redondeadas) con escaso potencial de escalamiento.
- iii. Dispersión: la inducción de una carga sobre la superficie del cristal da como resultado la repulsión entre los cristales vecinos.
- iv. Secuestro o quelación: la unión con ciertos cationes (Fe, Mg, etc.) para formar complejos solubles.

Finalmente, es importante señalar que el uso de inhibidores reduce la tendencia termodinámica del fluido a precipitar debido a su sobresaturación, pero al permanecer tiempos prolongados, la efectividad del inhibidor se reduce.

4.1.2.2 Prevención de precipitación de sílice y sulfatos

Debido a que la cinética de precipitación es lenta a temperatura ambiente, la ubicación del precipitado depende del tiempo de residencia del fluido sobresaturado. Los estudios han demostrado que la acidificación reduce la tasa de precipitación. La acidificación del fluido de Salton Sea (pH 5-6) a pH 4,5 retrasa la precipitación durante al menos tres meses. A pH mayor que 8, se produce la ionización de la sílice, lo que aumenta en gran medida la solubilidad de la sílice (Corsi, 1986).

Otro mecanismo utilizado para evitar la precipitación de sílice en el equipo de superficie incluye restringir la separación de vapor a temperaturas a las que se reduce al mínimo la sobresaturación de sílice, con respecto a la sílice amorfa (Gallup, 1996).

Dicho lo anterior, en los estudios realizados por Corsi (1986) propone como enfoque principal para la prevención es la modificación química de la salmuera (por ejemplo, reducción del pH), el diseño cuidadoso de la planta, la selección de condiciones operativas apropiadas, el manejo de salmuera y el uso de aditivos (principalmente inhibidores de crecimiento de cristales). Cada enfoque se detalla a continuación:

a. Reducción de pH

Este método de control mediante la reducción del pH de la salmuera geotérmica, se basa en el hecho que la solubilidad de los sulfuros aumenta marcadamente en soluciones ácidas. En el intervalo de valores de pH que son típicos de salmueras de alta salinidad y alta entalpía ($\text{pH} < 6$), se obtiene un aumento diez veces mayor de la solubilidad de sulfuro reduciendo el pH en una unidad.

Incluso una pequeña reducción de pH a veces puede reducir drásticamente la cantidad de depósitos. Una reducción del pH también tendrá un efecto beneficioso sobre la formación de depósitos de sílice y silicato de metal. Sin embargo, también se deben considerar dos factores negativos; es decir, la posible corrosión de las tuberías a valores bajos de pH y el costo del ácido.

El método de acidificación de la salmuera se ha aplicado con éxito en varios casos. Gallup (1996) informa que la inhibición del precipitado de silicato de hierro se logra reduciendo el pH en solo 0,1 a 0,3 unidades. Sin embargo, para una prevención completa del precipitado, el pH de la salmuera debería reducirse a aproximadamente 3, lo que tiende a aumentar significativamente la velocidad de corrosión del acero. De las consideraciones anteriores parece que el pH de una solución puede variarse para reducir o eliminar el precipitado de sílice.

Estos inhibidores de se probaron en los Estados Unidos y México, pero por el momento no existe un inhibidor conocido y económicamente viable para las muy problemáticas precipitaciones de sílice, silicato y sulfuro de metal pesado. Además, la manipulación de presión, temperatura y caudal permite al operador desplazar los precipitados dentro del equipo, pero no le permitirán eliminar su problema.

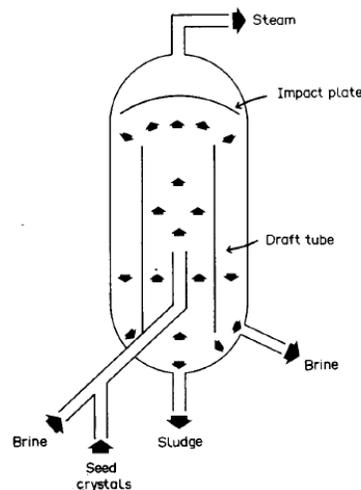
b. Manejo de salmuera

El proceso tiene como objetivo la precipitación y el posterior asentamiento de las especies solubles en equipos especialmente diseñados, de modo que no haya precipitación mineral en la instalación.

Ya que los aditivos químicos no son efectivos, se puede probar una técnica totalmente diferente para combatir el problema del precipitado. En lugar de intentar evitar su formación, es posible permitir la precipitación dentro de un equipo especialmente diseñado eligiendo cuidadosamente los pasos graduales en la reducción de las presiones y temperaturas entre los cabezales de los pozos productores y los de reinyección. Se pueden usar numerosos tipos de equipos para esta técnica, dependiendo de la presión total y de la caída de presión deseada en cualquier ubicación dada.

La Figura 15 muestra esquemáticamente el principio de un cristizador flash tal como lo describen Vetter y Kandarpa (1982), "el principio básico de un proceso de cristalización instantánea es que la salmuera se evapora súbitamente desde condiciones en que no se presenta precipitado a condiciones en que si están presentes y al mismo tiempo se proporciona suficiente cristal semilla³ para que ocurran reacciones de precipitación de sólidos y estas no precipiten en las paredes internas del equipo".

Sin embargo, este tipo de enfoque no resuelve el problema de la tubería de reinyección, donde, debido a la caída de temperatura, pueden estar presentes partículas de sílice en suspensión. En estos casos, se pueden probar los enfoques convencionales de clarificación del agua. Estos consisten básicamente en separaciones sólido - líquido tales como flotación de sedimentación, filtración o con separador ciclónico⁴. Los grandes caudales involucrados en las operaciones geotérmicas hacen que el uso de estos métodos sea problemático debido al tamaño de las plantas de purificación requeridas.



³ Es un cristal pequeño que se coloca en una solución saturada o sobresaturada para hacer crecer a un cristal grande. Este rompe el equilibrio que existía en la solución y permite iniciar el proceso de cristalización.

⁴ Es un equipo utilizado para separar partículas sólidas suspendidas en el aire, gas o flujo de líquido, sin el uso de un filtro de aire, utilizando un vórtice para la separación

Figura 15: Esquema de cristalizador flash (Vetter y Kandarpa, 1982).

Para el caso del arsénico se han investigado varios métodos para su eliminación a partir de aguas residuales geotérmicas, en laboratorio, plantas piloto y plantas en funcionamiento. Entre estos métodos se incluyen la adsorción en flóculos de óxido de Fe y la posterior separación por flotación de aire disuelto (Carlo y Thomas, 1985) y la coprecipitación con cal (CaO) para formar un silicato de calcio rico en As (Rothbaum y Anderton, 1979). En ambos casos, la eliminación efectiva se logró solo después de la oxidación de As(III) a As(V). Para el tratamiento con flóculos de óxido de Fe, la adsorción competitiva de sílice inhibe la adsorción As, particularmente la de As(III) (Swedlund y Webster, 1999), sugiriendo que la eliminación de la sílice ayudaría a optimizar la eficiencia de eliminación de As. El uso de resinas quelantes⁵ selectivas de iones para la remoción de As de las aguas geotermales también se ha intentado con éxito (Egawa et al., 1985).

⁵ Sustancia que forma complejos con iones de metales pesados. Una de las aplicaciones de los quelantes es evitar la toxicidad de los metales pesados para los seres vivos.

5 GEOQUÍMICA DE FLUIDOS GEOTERMALES EN CERRO PABELLÓN

A la fecha GDN ha muestreado para análisis química los pozos CP-1, CP-2, CP-5, CP-5A y CP-1A, (como se indica con los cuadros rojos en la Figura 16) durante las pruebas de producción llevadas a cabo respectivamente durante la etapa de construcción del proyecto (2015-2018).



Figura 16: Ubicación de los pozos muestreados señalados con cuadros rojos de planta Cerro Pabellón (Gentileza ENEL GP).

La base de datos ha sido analizada utilizando diversas técnicas analíticas instrumentales que se especifican a continuación:

- Determinación de alcalinidad, alcalinidad de retorno y medición de pH
 - Técnica analítica instrumental: titulación potenciométrica de neutralización.
- Análisis de aniones (fluoruro, cloruro, sulfato, bromuro, yoduro).
 - Técnica Analítica Instrumental: Cromatografía Iónica.
- Análisis de cationes
 - Cationes Na, K, Ca, Mg, Li, Al, Fe, As, Rb, Sr y Sb
 - Técnica analítica instrumental: Espectrometría de Emisión Óptica con fuente de plasma de acoplamiento inductivo, ICP-OES.
 - Cationes Li, Al, As, Rb, Sr, Sb, Cs, Hg, B.
 - Técnica analítica instrumental: Espectrometría de masa cuadrupolo con fuente de plasma de acoplamiento inductivo y celda de colisión, ICP-MS Q.
- Análisis de amoníaco
 - Técnica analítica instrumental: Absorción molecular en el visible

- Análisis de Sílice (SiO_2)
 - Técnica analítica instrumental: Absorción molecular en el visible.
- Análisis de H_2S .
 - Técnica Analítica: titulación volumétrica iodometría.
- Análisis de gases condensables (CO_2 y H_2S).
 - Técnica Analítica: titulación de neutralización y volumétrica iodométrica, respectivamente.
- Análisis gases no condensables H_2 , N_2 , O_2 , CH_4 , Ar, He, CO.
 - Técnica Analítica Instrumental: Cromatografía de Gas
- Análisis de Gas seco: CO_2 , H_2 , N_2 , O_2 , CH_4 (Botella Bala)
 - Técnica Analítica Instrumental: Cromatografía de Gas (GC)

5.1 ANÁLISIS SALMUERA

El fluido promedio producido se puede clasificar como alcalino-clorurado, una composición típica de los reservorios geotérmicos y con un pH próximo a la neutralidad (valor promedio ≈ 6.7). En la Tabla 1 se reporta la composición química promedio de la fase líquida extraída del reservorio Cerro Pabellón.

Las características generales del fluido geotérmico de los pozos son:

- La fase líquida de los pozos posee fluido benigno, no corrosivo.
- El gas en el fluido geotérmico es muy bajo (en promedio $<1\%$ en fase vapor).
- La mayor parte del gas es CO_2 (próximo a 100%).
- El pH del fluido próximo a la neutralidad (valor promedio ≈ 6.7).

Salmuera	Unidad	Pozo Producción	Pozo Reinyección
pH		6.90	5.75
H ₂ S	mg/l	45.07	36.04
Cond.	mS/cm	32791.25	23544.00
Alc.	meq/L HCl	0.86	0.93
Alc rit.	meq/L HCl	0.31	0.51
Na	mg/l	6487.56	4486.80
K	mg/l	1031.38	573.40
Ca	mg/l	808.69	564.00
Mg	mg/l	0.31	0.14
Cl-	mg/l	12299.75	8112.60
SO ₄ =	mg/l	44.70	25.76
SiO ₂ tot	mg/l	522.19	326.00
H ₃ BO ₃	mg/l	2425.07	1671
NH ₄ ⁺	mg/l	4.37	5.95
Li	mg/l	63.84	47.64
Rb	mg/l	8.62	5.92
Cs	mg/l	36.77	25.18
Sr	mg/l	16.03	12.34
Sb	mg/l	3.94	0.71
As	mg/l	84.09	66.42
Al	mg/l	0.30	0.11
Fe	mg/l	0.14	1.92
F-	mg/l	3.65	1.43
Br-	mg/l	14.07	10.32

Tabla 1: Análisis químico de la salmuera de los pozos de Cerro Pabellón (informe interno ENEL GP, 2017).

La baja cantidad del catión Mg⁺⁺ (máx. 1 ppm, medido en el pozo CP-2) se relaciona a la eficaz circulación del fluido geotérmico (convección) mientras que la del ion bicarbonato HCO₃⁻ (solamente 45 – 50 ppm) está sin duda ligada a las bajas cantidades de CO₂, como sugerido por la baja relación gas-vapor (G/V) que promedia un 0.79%.

La baja cantidad de ion bicarbonato impide la formación y precipitación de calcita, por lo que no habría posible precipitado de carbonato, lo que es de gran importancia sobre todo para los pozos de producción.

La salinidad promedio varía entre 20000 y 25000 ppm, con el contenido mayor del ion Cl⁻. El catión predominante es el Na⁺ (5000 a 8000 ppm), seguido por el K⁺ (1100 a 1200 ppm) y el Ca⁺⁺ (700 a 1000 ppm). El contenido promedio de SiO₂ es de 570 ppm.

5.2 ANÁLISIS GASES CONDENSADOS

El contenido en gas del fluido geotérmico de Cerro Pabellón es muy bajo (en promedio < 1% en masa), como se observa en la Tabla 2.

Pozo	CP-1	CP-1A	CP-2	CP-5A	CP-5A
G/V (%)	0,54	1,26	0,61	0,84	0,70

Tabla 2: Promedio gas-vapor (%) de los pozos de producción (informe interno ENEL GP, 2017).

En la Tabla 3, se reporta el análisis de los gases extraídos de los pozos de Cerro Pabellón muestreados hasta la fecha (en % v/v). Se observa que el contenido en CO₂ es aproximadamente 100% en todos los pozos.

Gases	Unidad	Promedio
H ₂	%v/v	0.13
O ₂ +Ar	%v/v	0.45
N ₂	%v/v	2.65
CH ₄	%v/v	0.08
CO ₂	%v/v	96.02
H ₂ S	%v/v	0.26
CO	ppm	2.8
He	ppm	13.6

Tabla 3: Análisis química de la fase gaseosa de los pozos de Cerro Pabellón (informe interno ENEL GP, 2017).

6 METODOLOGÍA.

6.1 TRABAJO DE CAMPO

El trabajo de campo consistió en una salida a terreno durante el mes de abril del 2018. La central (Figura 17) se encuentra en el Desierto de Atacama, a una altitud de 4500 m.s.n.m., a 100 km. noreste de Calama. La salida estuvo centrada en la identificación de las zonas de interés, en la cual se reconoció el área de explotación de los recursos geotérmicos, reconociendo los distintos pozos de producción (Figura 18a), zona de ventilación (Figura 18b), turbina y los pozos de reinyección para comprender el funcionamiento, la operación y los problemas que podrían surgir en la central. La planta considera once plataformas de perforación para pozos de producción y pozos de reinyección, así como una red de tuberías, red de caminos internos y obras auxiliares para su funcionamiento. Además, la planta es compuesta por dos módulos binarios de 24 MW brutos cada uno.



Figura 17: Fotografía de vista aérea de planta geotérmica Cerro Pabellón.



Figura 18a: Fotografía de pozo de producción CP-5A durante una prueba al separador atmosférico..



Figura 18b: Fotografía de sistema de enfriamiento de isopentano de la planta geotérmica Cerro Pabellón.

6.2 MÉTODOS ANALÍTICOS

Para la caracterización y descripción de los precipitados, se realizó en primer lugar la identificación mineral y química de las muestras. Los equipos utilizados para estos análisis fue la microscopía electrónica de barrido (SEM) acoplado con analizador de erosión de energía por rayos X (EDX), el cual arroja resultados semicuantitativos, perteneciente al CEGA que se encuentra ubicado en el Departamento de Geología de la Universidad de Chile.

Por otra parte, se utilizó el software PHREEQC para poder modelar el comportamiento de los fluidos geotermales junto con la base de datos otorgada por ENEL GP.

6.2.1 Microscopía electrónica de barrido (SEM)

Se empleó SEM para poder observar la morfología de los precipitados con mayor detalle, además de poder identificar la naturaleza de los fragmentos sólidos presentes en las muestras tomadas de los pozos de Cerro Pabellón.

Las muestras analizadas fueron enviadas por ENEL GP a los laboratorios – CEGA – Departamento de Geología (FCFM, Universidad de Chile). Estas constan de una bolsa con muestra húmeda, formada por diferentes fragmentos sólidos inmersos en un barro de color marrón. Consecuentemente, una fracción de esta muestra húmeda fue secada en un horno convencional, a unos 35°C durante 20 horas. Con posterioridad a este tiempo de secado, se seleccionaron fragmentos blancos y oscuros presentes en la muestra, los que fueron analizados mediante SEM.

Se analizó una briqueta pulida confeccionada en los talleres de ENEL GP, para poder realizar de manera más precisa el estudio mineralógico. Esta briqueta recibida tuvo que ser pulida nuevamente a fin de obtener una superficie de la muestra con condiciones idóneas para su estudio.

El SEM utilizado es un FEI Quanta 20 Scanning Electron Microscope (SEM), equipado con un detector Oxford de energía de rayos-X (EDX) para microanálisis y mapeo elemental. Se trabajó con electrones retro-dispersados (BSE) y con análisis de EDX (análisis semicuantitativo).

6.3 MODELAMIENTO GEOQUÍMICO

Para el modelamiento geoquímico se utilizó el software PHREEQC versión 3.4.0, proporcionado por el USGS, este es un programa de modelamiento geoquímico utilizado para reacción en y entre el agua y la roca y los sedimentos. Las reacciones pueden ser equilibrio acuoso, disoluciones y precipitación del mineral, intercambio iónico, soluciones sólidas, equilibrio gas-agua y reacciones biogeoquímicas.

El programa fue utilizado para modelar el comportamiento de las especies químicas presentes en el fluido geotérmico de Cerro Pabellón, en donde al utilizar las distintas funciones del software, se arrojan resultados de las variaciones de los índices de saturación de las especies según condiciones termodinámicas, además de la variación del pH a lo largo de la planta geotérmica.

Para poder generar el modelo predictivo fue necesario incluir las condiciones de pH, pe, temperatura y presión inicial. Luego de aplicar las condiciones iniciales se ingresaron las especies químicas de las muestras analizadas de la fase líquida de los pozos de Cerro Pabellón. Cabe señalar que al utilizar la fase líquida (salmuera) - sin considerar la dilución por parte del condensado de vapor proveniente del vaporizado - el modelamiento presentado a continuación representa el caso más crítico en términos de concentración de iones de todos los que se puedan dar durante la normal operación de una planta binaria.

Para el caso de los gases, se introdujo CO₂ en un 10% ya que después del vaporizador, el vapor es condensado y entra al *preheater* pero los gases son extraídos (por lo menos en un 90%) y no siguen circulando en el sistema de intercambio de calor de la planta binaria.

Después de haber incluido los datos iniciales, se ingresaron las fases minerales que pueden precipitar a partir de las especies químicas predominantes, tales como el oropimente (As₂S₃), estibina (Sb₂S₃), calcita (CaCO₃), sílice (SiO₂), hematita (Fe₂O₃), yeso (CaSO₄ · 2H₂O), rejalgar (As₄S₄), pirita (FeS₂), basanita (CaSO₄ · 1/2H₂O). Además, se consideraron las fases minerales analizadas en un informe interno realizado por Diego Morata (Morata, 2017).

Luego de haber ingresado todos los datos y las fases minerales de interés que fueron utilizadas (Anexo 1) se obtuvo una base de datos que arroja los índices de saturación de las fases minerales consideradas, las cuales fueron analizadas para reconocer las especies minerales que podrían estar precipitando dentro de la planta si se dieran las condiciones termodinámicas simuladas. Para esto se analizan los índices de saturación cuyos valores positivos indicarían la posibilidad de precipitación y, los negativos se encuentran disueltos. El valor cero indica un posible equilibrio mineral.

7 RESULTADOS

Los resultados obtenidos de las muestras CRI-30112017 y FCP-10-2017091, con el fin de identificar las fases minerales que se encuentran en los sólidos de la tubería de la planta, identificando su morfología, porcentaje atómico y porcentaje peso. Además, se presentan los resultados del modelamiento en el software PHREEQC a partir de la composición química promedio del fluido del sistema geotérmico Cerro Pabellón otorgada por ENEL GP.

7.1 IMÁGENES SEM

Se presentan a continuación los resultados del estudio SEM de las muestras CRI-30112017 y FCP-10-2017091, procedentes de uno de los codos de la tubería que conducen a los pozos de reinyección en donde se mezcla el vapor condensado con la salmuera y la otra muestra pertenece al filtro del pozo CP-10 (pozo de reinyección), respectivamente, de la planta Cerro Pabellón.

7.1.1 Fases con Sb

La figura 19a y 19b muestra imágenes SEM grabadas a partir de la muestra CRI-30112017, incluyendo el espectro EDX y cuyos valores de los análisis elementales están recopilados en la Tabla 4 y 5, con sus porcentajes de peso y porcentaje atómico. Estas imágenes pertenecen a una muestra de uno de los codos de la tubería que conducen a los pozos de reinyección de la planta de Cerro Pabellón. La temperatura en este punto de la tubería es de aproximadamente 90°C.

La imagen señalada de la figura 19a corresponde a la estibina que posee morfología acicular y de color blanco, esta se encuentra coprecipitando junto al oropimente (zona gris alrededor de zona blanca demarcada). En cambio, en la imagen señalada con cuadro rojo de la figura 20b corresponde también a la estibina, pero se observa una morfología irregular porosa (indicadora de ebullición rápida) de color blanco la cual co-precipita junto al oropimente.

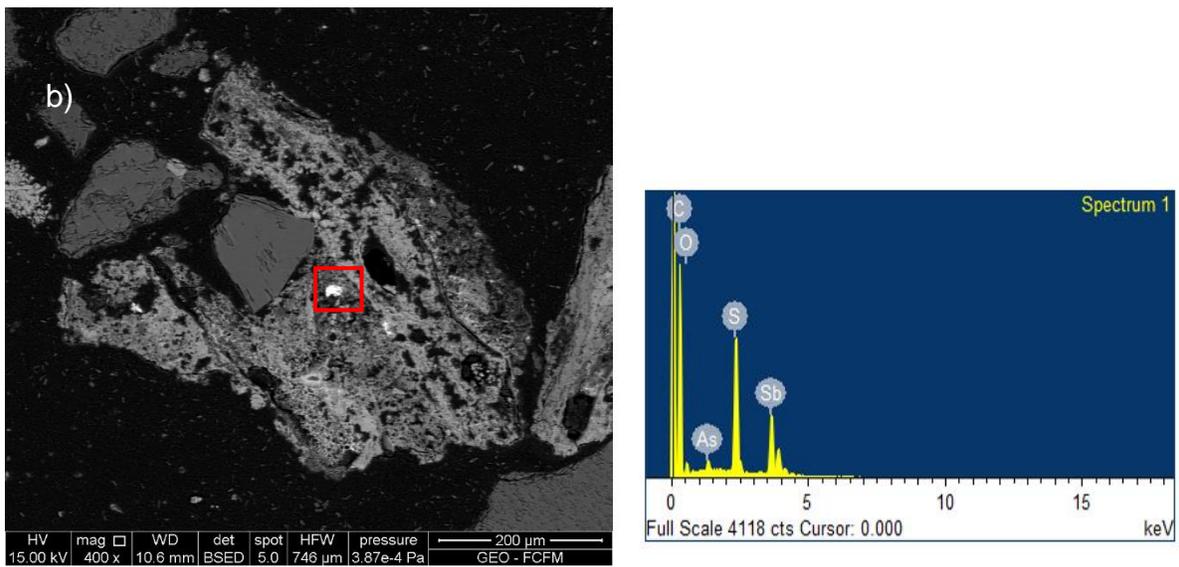
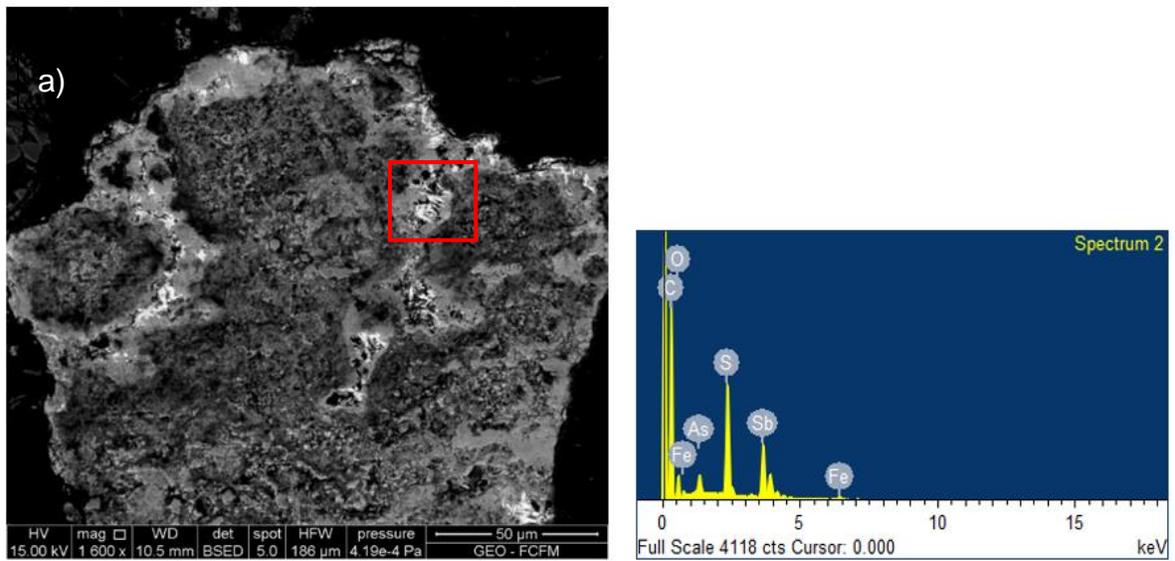


Figura 19: Zonas seleccionadas para el análisis mediante SEM-EDX, incluyendo el espectro EDX obtenido. Los valores de los análisis elementales están recopilados en la Tabla 4 y 5, ambos análisis se hicieron de manera puntual por lo que reflejan la composición química de esos puntos específicos. a) Zona demarcada por cuadro rojo indica el sector donde se encuentra la estibina con morfología acicular. b) zona indicada con cuadro rojo, indica donde se encuentra la estibina con morfología irregular.

La figura 20a y 20b muestra imágenes SEM grabadas a partir de la muestra FCP-10-2017091, la cual se encuentra en el filtro del pozo de reinyección CP-10 de la planta de Cerro Pabellón a una temperatura de 90°C aproximadamente (temperatura de pozo de reinyección). Las imágenes de las muestras se encuentran junto al espectro EDX obtenido. Los valores de los análisis elementales están recopilados en la Tabla 5 y 6.

En la figura 20a se observa la estibina con una morfología acicular, de color blanco y de un tamaño mucho mayor que el de la muestra anterior (figura 19a) ya que ambas imágenes fueron tomadas con la misma magnitud. La figura 20b también corresponde a la estibina la cual posee una morfología acicular de color blanco, al igual que la imagen superior.

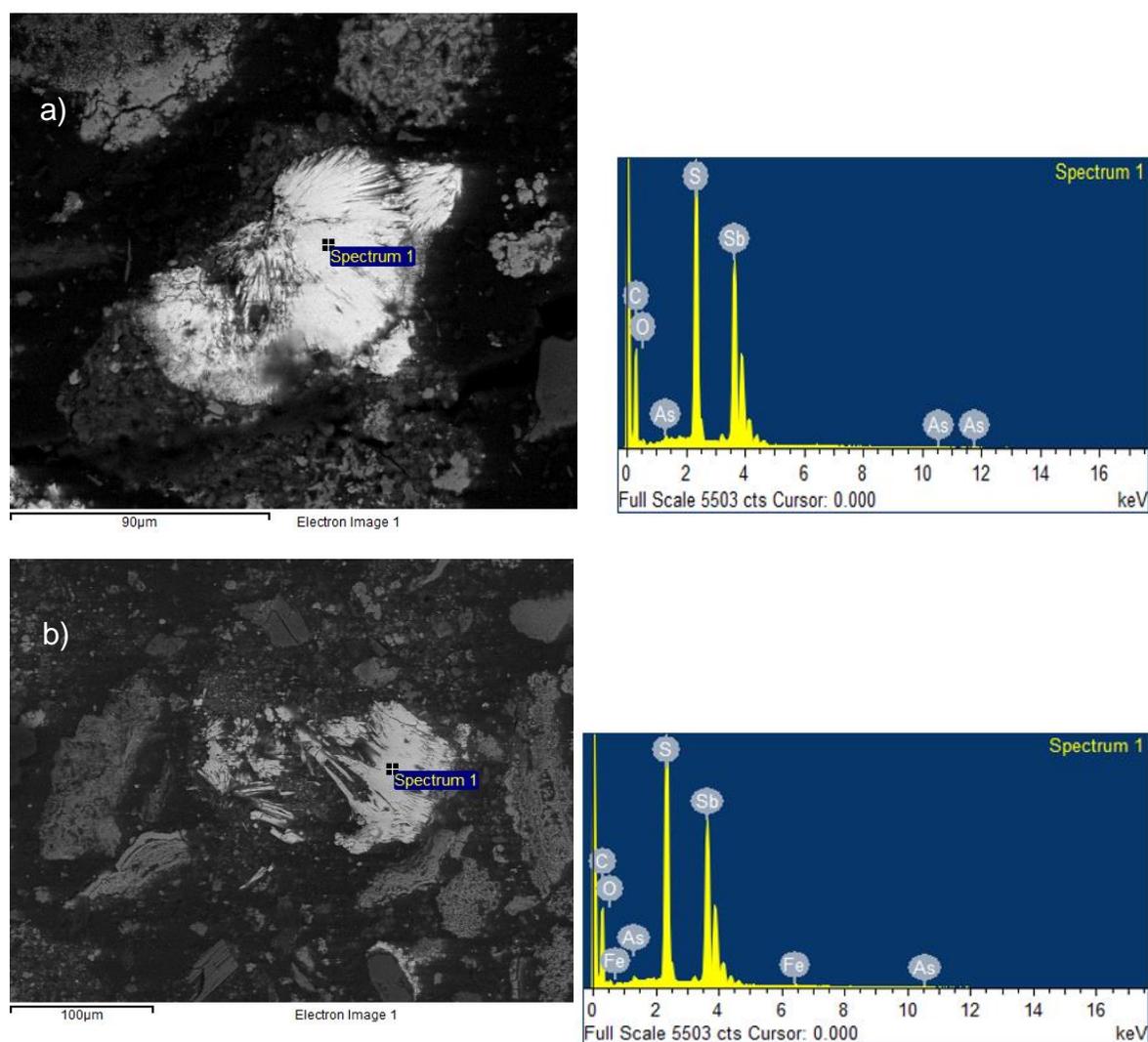


Figura 20: Zonas seleccionadas para el análisis mediante SEM-EDX, incluyendo el espectro EDX obtenido. Los valores de los análisis elementales están recopilados en la Tabla 4 y 5, ambos análisis se hicieron de manera puntual por lo que reflejan la composición química de esos puntos específicos. a) Mineral indicado con punto spectrum 1 corresponde a la estibina. b) Mineral indicado con punto spectrum 1 corresponde a la estibina.

Los valores de los análisis elementales están recopilados en la Tabla 4 (la cual señala el porcentaje atómico de las muestras) y la Tabla 5 (la cual señala el porcentaje peso de dichas muestras). El análisis 1 corresponde a la figura 19a y el análisis 2 corresponde a la figura 19b, ambas muestras fueron tomadas al comienzo de la tubería que conduce el fluido a los pozos de reinyección (CRI-30112017) y el análisis 3 corresponde a la figura 20a y el análisis 4 corresponde a la figura 20b, ambas muestras fueron tomados en el filtro de pozo de reinyección (FCP-10-2017091).

Se observa que los 4 análisis son similares entre sí y sobre la base de las mediciones espectrométricas y la tabla adjunta, se parte de las consideraciones químicas cristalinas que se supone que la solución sólida del Sb sería consistente con la estibina (Sb_2S_3), dadas las relaciones 2:3 de Sb y S respectivamente tomando en consideración para la estequiometría el % peso de las muestras (Anexo 2). Además, en todos los análisis se puede observar la alta presencia de O, seguido por la presencia de As y en algunos casos Fe, en menor medida.

Elemento (%)	Análisis 1	Análisis 2	Análisis 3	Análisis 4
Sb	9.59	9.77	11.47	11.27
S	17.18	18.36	17.62	17.65
As	2.03	0.85	0.33	0.35
Fe	1.11			0.18
O	70.09	71.02	70.58	70.55
Total	100	100	100	100

Tabla 4: Análisis mediante SEM-EDX de muestras CRI-30112017 y FCP-10-2017091, en % atómico respectivos.

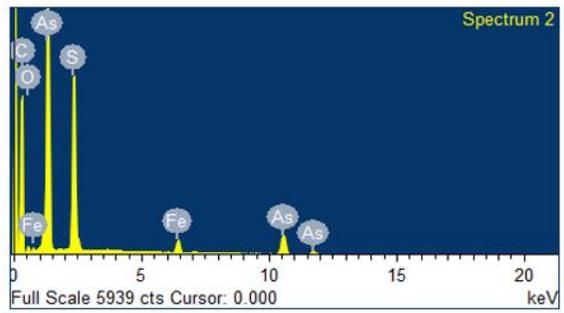
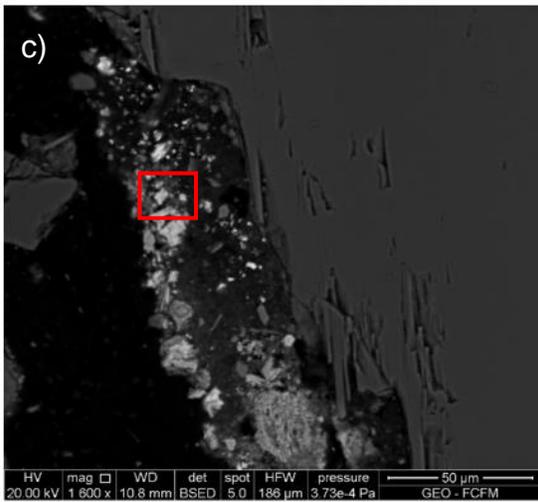
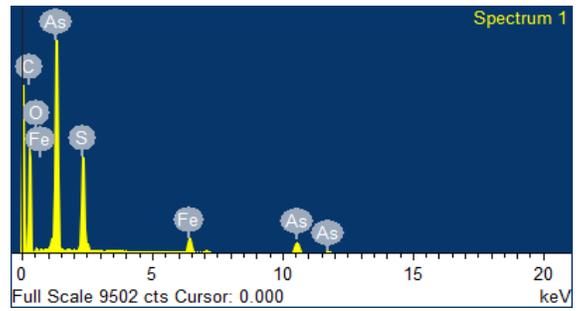
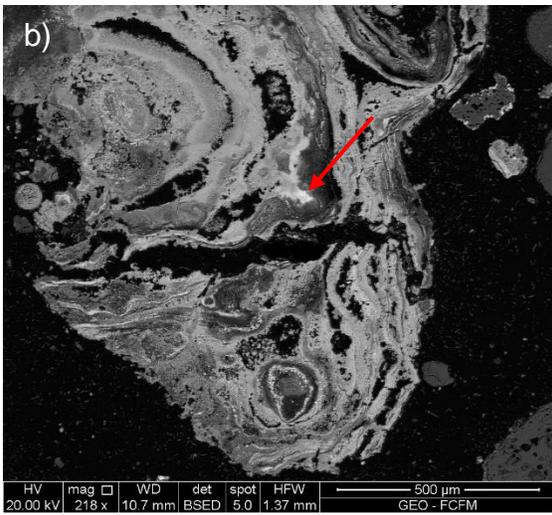
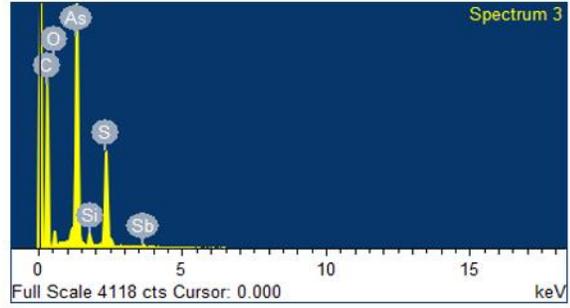
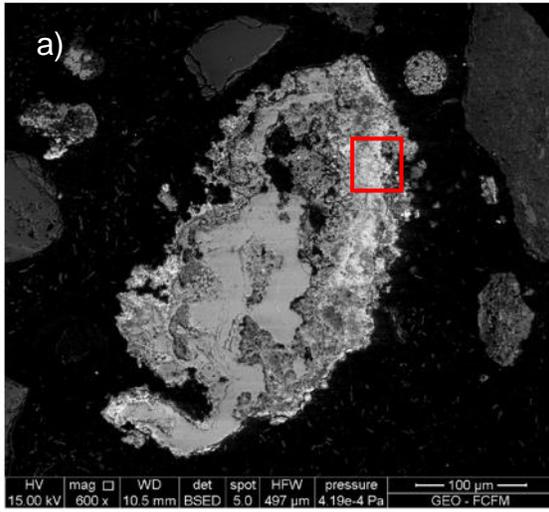
Elemento (%)	Análisis 1	Análisis 2	Análisis 3	Análisis 4
Sb	38.24	39.94	44.82	44.21
S	18.04	19.77	18.13	18.24
As	4.98	2.14	0.80	0.84
Fe	2.02			0.33
O	36.72	38.15	36.25	36.38
Total	100	100	100	100

Tabla 5: Análisis mediante SEM-EDX de muestras CRI-30112017 y FCP-10-2017091, en % peso para cada análisis.

7.1.2 Fases con As

La figura 21a, 21b, 21c, 21d y 21e corresponden a imágenes SEM grabadas a partir de la muestra CRI-30112017, incluyendo el espectro EDX y cuyos valores de los análisis elementales están recopilados en la Tabla 6 y Tabla 7 con sus porcentajes atómico y de peso, respectivamente. Estas imágenes pertenecen a una muestra de uno de los codos de la tubería que conducen a los pozos de reinyección de la planta de Cerro Pabellón que se encuentran a una temperatura de 90°C aproximadamente.

La zona demarcada por el cuadrado rojo de la figura 22a, corresponde al oropimente que posee morfología irregular porosa (característico de ebullición rápida) de color blanco grisáceo, esta se encuentra co-precipitando junto con la pirita (que se describe en el capítulo 7.1.4.). En la figura 22b. los sectores de color blanco (indicado con flecha roja) serían los correspondientes al oropimente, este sector posee una morfología coliforme (característico de zonas de ebullición rápida) y se encuentra co-precipitando con hematita (zonas más oscuras, que se describe en capítulo 7.1.7.). En la figura 22c, el sector demarcado por el cuadrado rojo se puede observar cristales definidos de oropimente de color blanco alrededor de la sílice (que se describe en el capítulo 7.1.3.). En la figura 22d la imagen señalada por flechas de color rojo corresponde al oropimente que presenta cristales definidos variando de color blanco a gris, además se encuentra relleno de los espacios del óxido de hierro (mineral de forma circular que se describe con mayor detalle en el capítulo 7.1.6.). Por último, en la figura 22e la imagen señalada por un cuadro rojo corresponde también al oropimente, este posee una morfología irregular de color blanco grisáceo y dentro de este mineral se observa precipitación de oro (que se describe en el capítulo 7.1.5.).



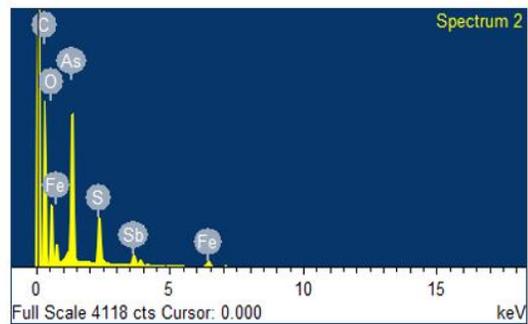
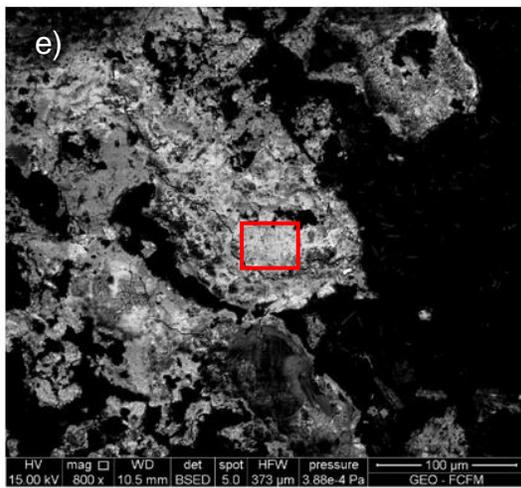
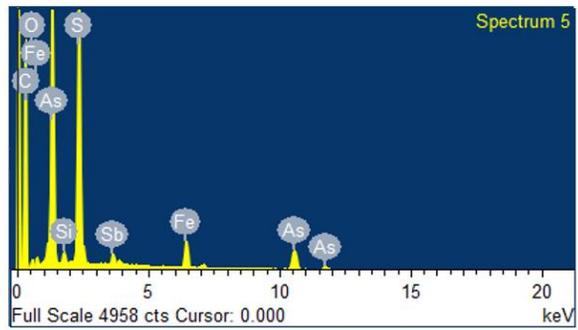
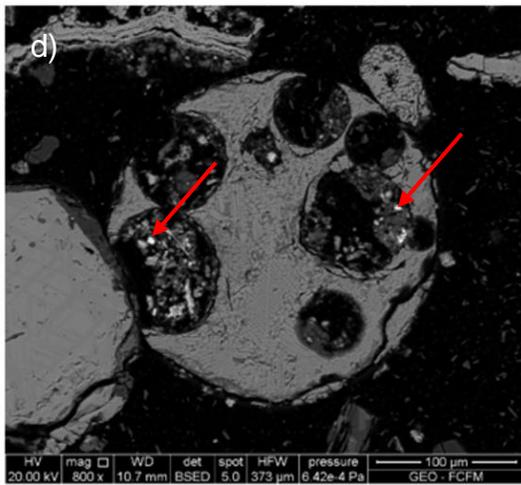


Figura 21: Zonas seleccionadas para el análisis mediante SEM-EDX, incluyendo el espectro EDX obtenido. Los valores de los análisis elementales están recopilados en la Tabla 6 y 7, ambos análisis se hicieron de manera puntual por lo que reflejan la composición química de esos puntos específicos. a) Zona demarcada por cuadro rojo indica el sector donde se encuentra el oropimente b) sector indicado con flechas rojas indica sector donde se encuentra oropimente c) zona indicada con cuadro rojo indica sector donde se encuentra el oropimente d) zona indicada con flechas rojas indica cristales de oropimente e) zona demarcada con cuadro rojo indica sector donde se encuentra el oropimente.

La figura 22a y 22b muestra imágenes SEM grabadas a partir de la muestra FCP-10-2017091, la cual se encuentra en el filtro del pozo de reinyección CP-10 de la planta de Cerro Pabellón a una temperatura de 90°C aproximadamente (temperatura de pozo de reinyección), las imágenes de las muestras se encuentran junto al espectro EDX obtenido. Los valores de los análisis elementales están recopilados en la Tabla 6 y 7.

En la figura 22a indicada por el punto *spectrum 1* corresponde al oropimente el cual posee una morfología coloforme (indicador de ebullición rápida) de color blanco rodeada por hematita (descrito en el capítulo 7.1.7), y en la figura 22b los sectores más blancos de la muestra (indicada con flecha roja) serían oropimente, este presenta morfología coloforme de color blanco y al igual que la figura 22a se encuentra rodeado por óxido de hierro.

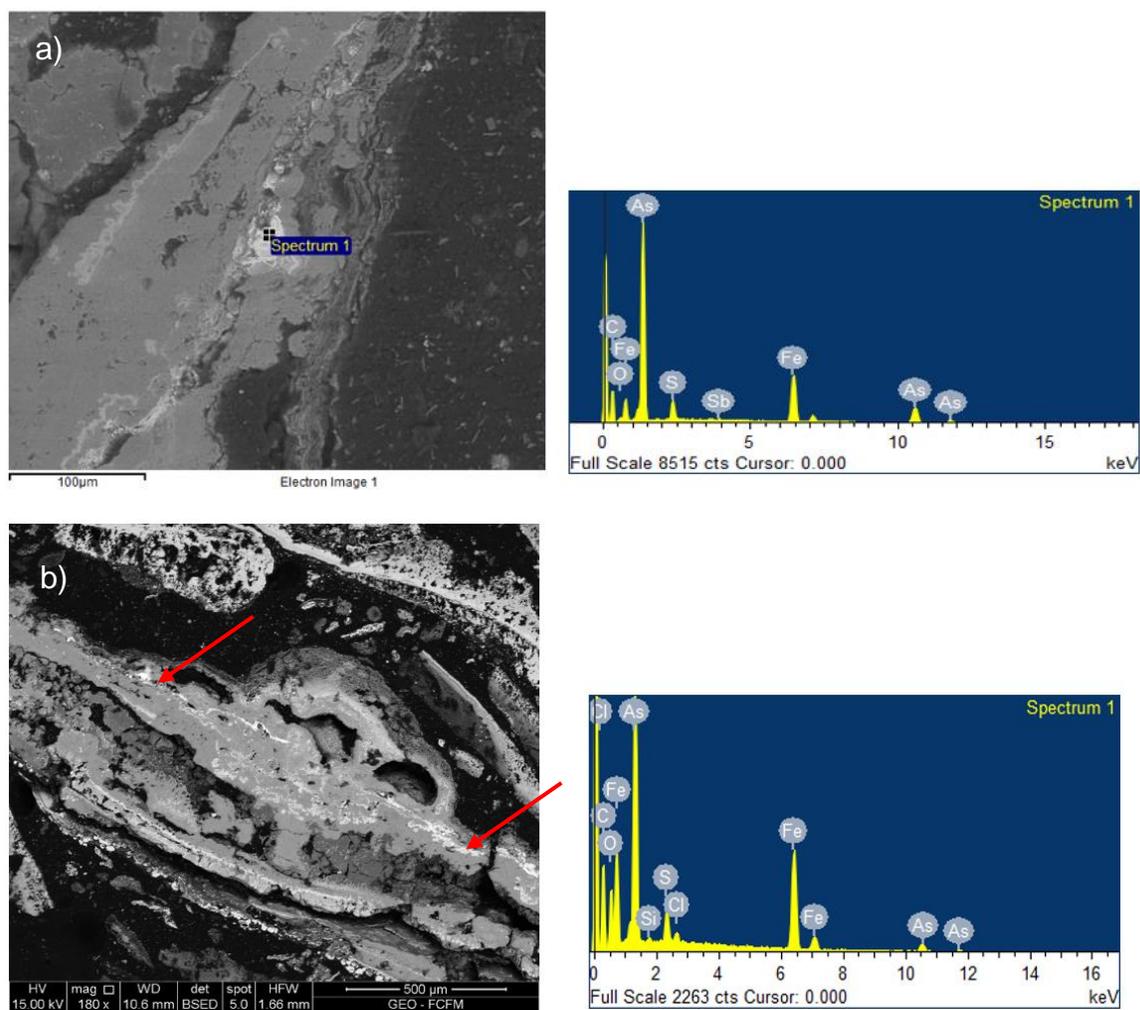


Figura 22: Imágenes BSE con z (Morata, 2017)onas seleccionadas para el análisis mediante SEM-EDX, incluyendo el espectro EDX obtenido. Los valores de los análisis elementales están recopilados en la Tabla 6 y 7, ambos análisis se hicieron de manera puntual por lo que reflejan la composición química de esos puntos específicos. a) Zona indicada por spectrum 1 corresponde a oropimente. b) zona señalada con flechas rojas corresponden a oropimente.

Los valores de los análisis elementales están recopilados en la Tabla 6 (la cual señala el porcentaje atómico de las muestras) y la Tabla 7 (la cual señala el porcentaje peso de dichas muestras). El análisis 1 corresponde a la figura 21a, el análisis 2 corresponde a la figura 22b, el análisis 3 corresponde a la figura 22c, el análisis 4 corresponde a la figura 22d y por último el análisis 5 corresponde a la figura 22e, todas estas muestras fueron tomadas al comienzo de la tubería que conduce el fluido a los pozos de reinyección (CRI-30112017). El análisis 6 corresponde a la figura 22a y el análisis 7 corresponde a la figura 22b, ambas muestras fueron tomados en el filtro de pozo de reinyección (FCP-10-2017091).

Se observa que los primeros 5 análisis son similares entre sí y sobre la base de las mediciones espectrométricas y la tabla adjunta, se parte de las consideraciones químicas cristalinas que se supone que la solución sólida del As sería consistente con el oropimente (As_2S_3) dadas las relaciones 2:3 de As y S respectivamente y considerando el % peso para la estequiometría (Anexo 3). Además, en todos los análisis se puede observar la alta presencia de O y en algunos casos Fe, Sb o Cl en mucho menor medida.

En los análisis 6 y 7 se observan datos muy diferentes a los análisis anteriores, en donde al analizar las mediciones EDX y la tabla adjunta, la fase mineral de As sería consistente con la escorodita $FeAsO_4 \cdot 2(H_2O)$ dadas las relaciones 1:1:4 de Fe, As y O, y considerando el % peso para la estequiometría (Anexo 4).

Elemento (%)	Análisis 1	Análisis 2	Análisis 3	Análisis 4	Análisis 5	Análisis 6	Análisis 7
As	16.81	16.23	15.64	17.24	12.39	22.82	27.07
S	13.17	13.11	14.35	10.69	15.09	3.62	4.55
Si	1.43				0.73		0.77
Fe		3.49	1.75	3.64	2.58	13.95	34.40
Sb	0.41			2.73	0.52	0.22	
O	68.18	67.17	68.26	65.70	68.69	59.39	31.78
Cl							1.43
Total	100						

Tabla 6: análisis de muestras CRI-30112017 y FCP-10-2017091, con % atómico respectivos.

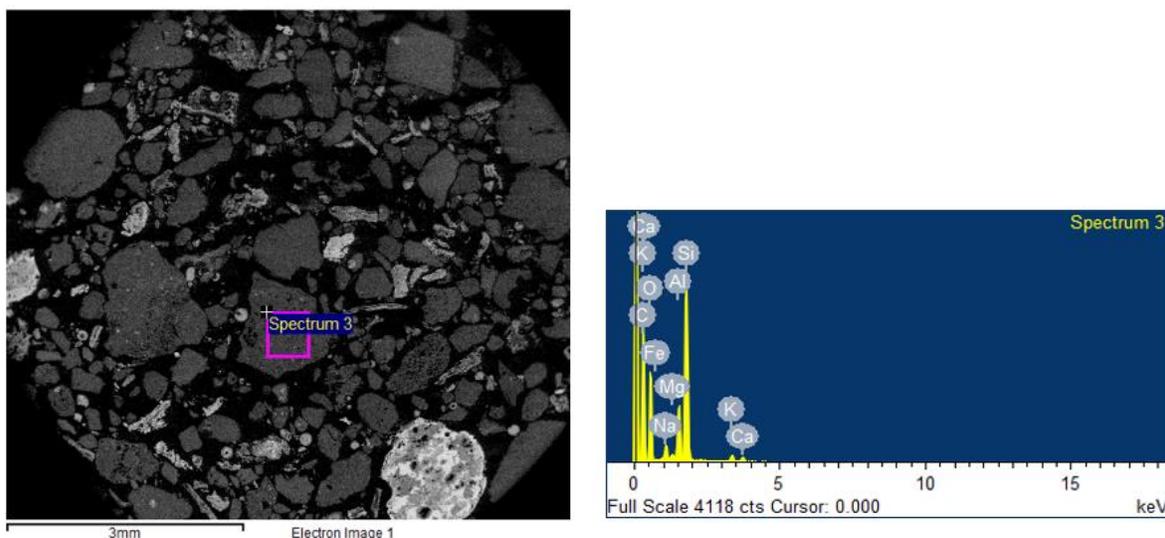
Elemento (%)	Análisis 1	Análisis 2	Análisis 3	Análisis 4	Análisis 5	Análisis 6	Análisis 7
As	44.00	41.85	41.52	40.09	33.90	47.74	43.38
S	14.76	14.47	16.30	10.64	17.67	3.24	3.12
Si	1.40				0.75		0.46
Fe		6.70	3.48	6.32	5.26	21.74	41.08
Sb	1.72			10.33	2.30	0.75	
O	38.12	36.98	38.70	32.62	40.12	26.53	10.88
Cl							1.08
Total	100						

Tabla 7: análisis de muestras CRI-30112017 y FCP-10-2017091 con % peso respectivos.

7.1.3 Fases de sílice.

La figura 23a, 23b y 23c muestra imágenes SEM grabadas a partir de la muestra CRI-30112017, incluyendo el espectro EDX y cuyos valores de los análisis elementales están recopilados en la Tabla 8 y 9, con sus porcentajes de peso y porcentaje atómico. Estas imágenes pertenecen a una muestra de uno de los codos de la tubería que conducen a los pozos de reinyección de la planta de Cerro Pabellón. La temperatura en este punto de la tubería es de aproximadamente 90°C.

En la figura 23a y 23b la zonas demarcadas por el cuadrado rosado corresponden a un sectores en que se presenta la sílice, estas poseen una morfología porosa y de color gris oscuro, además poseen concentraciones de otros elementos los cuales se detallan en las Tablas 8 y 9. La figura 21c, el mineral gris oscuro de gran tamaño, centrado en la imagen, correspondería a sílice, este posee una morfología regular, poco porosa, la cual está rodeada de cristales pequeños los que corresponderían al oropimente, como se observa en la figura 21c. previamente analizada.



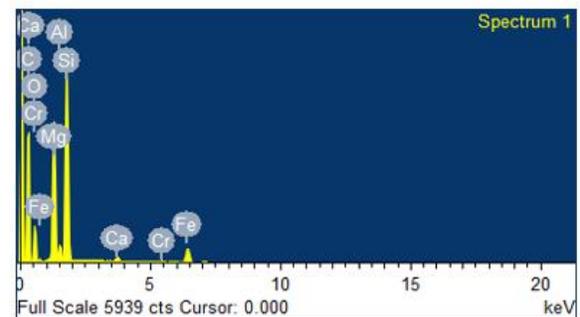
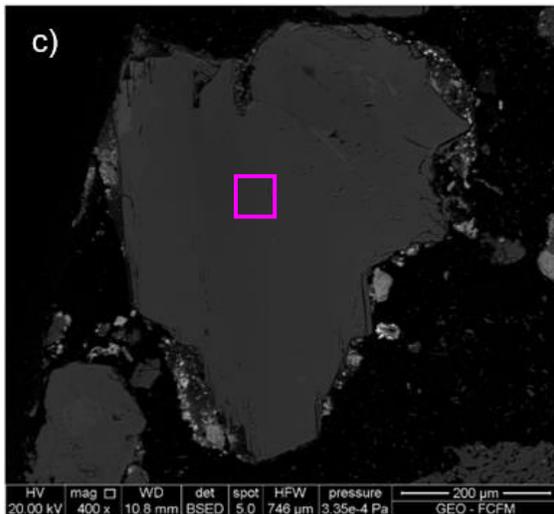
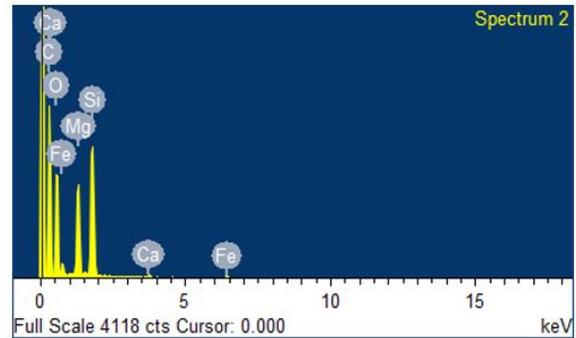
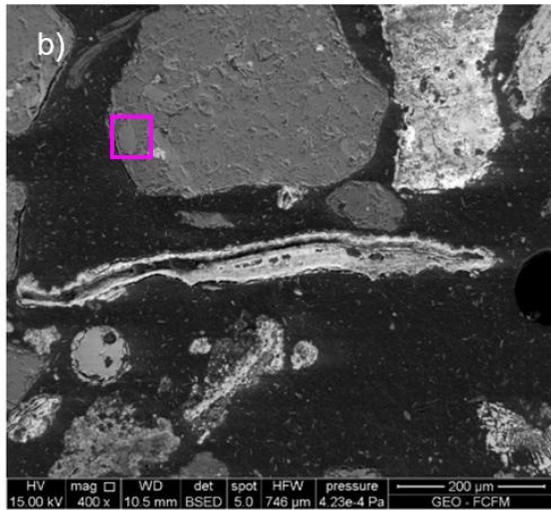


Figura 23: Zonas seleccionadas para el análisis mediante SEM-EDX, incluyendo el espectro EDX obtenido. Los valores de los análisis elementales están recopilados en la Tabla 8 y 9, ambos análisis se hicieron de manera puntual por lo que reflejan la composición química de esos puntos específicos. a) Zona demarcada por cuadro rosado indica el sector donde se encuentra la sílice. b) Mineral demarcado con cuadro rosado indica donde se encuentra la sílice. c) Mineral demarcado con cuadro rosado corresponde a la sílice rodeado de cristales pequeños los cuales son principalmente oropimente.

La figura 24 muestra una imagen SEM grabada a partir de la muestra FCP-10-2017091, la cual se encuentra en el filtro del pozo de reinyección CP-10 de la planta de Cerro Pabellón a una temperatura de 90°C aproximadamente (temperatura de pozo de reinyección), la imagen de las muestras se encuentra junto al espectro EDX obtenido. Los valores de los análisis elementales están recopilados en la Tabla 9 y 10.

En la figura 24 indicada por el cuadro rosado indica un sector en donde los minerales de color gris oscuro que se observan corresponderían a aquellos con altas concentraciones de sílice, estos minerales poseen morfología alargada, al contrario de las muestras del comienzo de la tubería de reinyección las cuales poseen morfología más circular que alargada. Los otros elementos contenidos en esta zona se observan en las tablas 8 y 9.

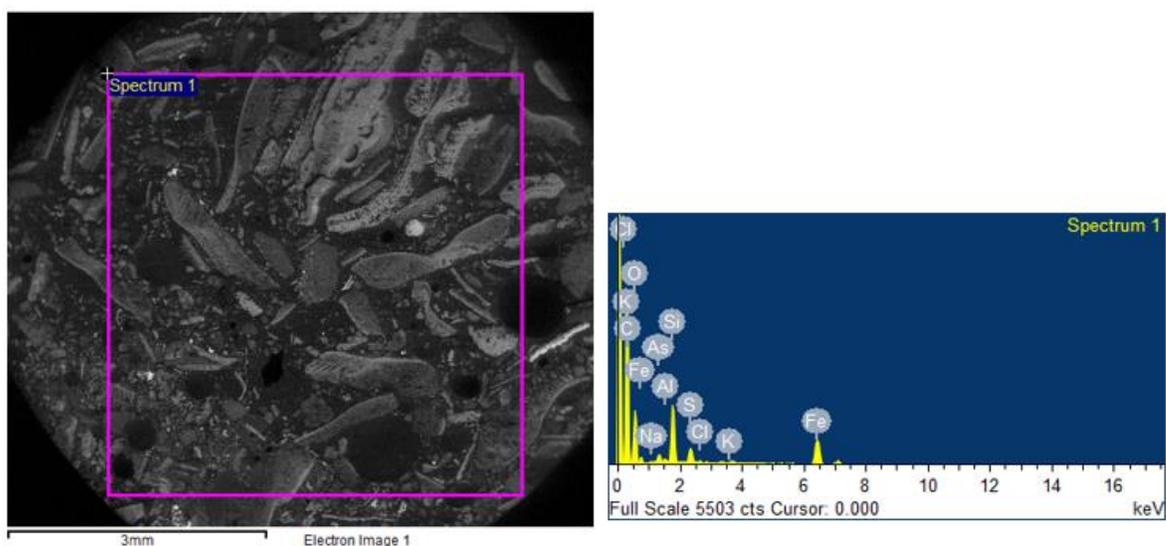


Figura 24: Zonas seleccionadas para el análisis mediante SEM-EDX, incluyendo el espectro EDX obtenido. Los valores de los análisis elementales están recopilados en la Tabla 8 y 9, el análisis se hizo de manera general por lo que refleja la composición química genérica de la muestra.

Los valores de los análisis elementales están recopilados en la Tabla 8 (la cual señala el porcentaje en peso de las muestras) y la Tabla 9 (la cual señala el porcentaje atómico de dichas muestras). El análisis 1 corresponde a la figura 23a, el análisis 2 corresponde a la figura 23b, el análisis 3 a la figura 23c y el análisis 4 corresponde a la figura 24. Estas muestras fueron tomadas al comienzo de la tubería que conduce el fluido a los pozos de reinyección (CRI-30112017) y el análisis 4 corresponde a la figura 24, esta muestra fue tomada en el filtro de pozo de reinyección (FCP-10-2017091).

Se observa que los 4 análisis son similares entre sí (existe una pequeña variación en el análisis 4), sobre la base de las mediciones EDX y la tabla adjunta, se parte de las consideraciones químicas cristalinas que se supone que la solución sólida del Si sería consistente con la sílice (SiO_2), dadas las relaciones 1:2 de Si y O respectivamente considerando el % peso para la estequiometría (Anexo 5). Además, se pueden observar en menor porcentaje otros elementos tales como, Mg, Al, Fe, Ca, entre otros.

Elemento (%)	Análisis 1	Análisis 2	Análisis 3	Análisis 4
Si	34.19	29.79	26.90	17.91
O	49.07	47.35	46.06	39.77
Na	3.24			0.93
Mg	0.62	18.11	17.51	
Al	8.11		1.62	0.99
K	2.29			0.77
Ca	1.68	1.24	0.78	
Fe	0.80	3.51	6.61	29.37
Cr			0.52	
S				5.64
As				4.62
Total	100	100	100	100

Tabla 8: análisis de muestras CRI-30112017 y FCP-10-2017091, con % peso respectivos.

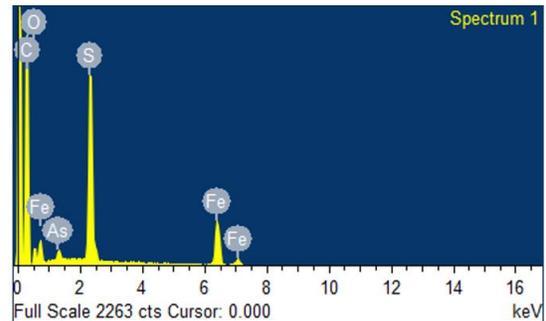
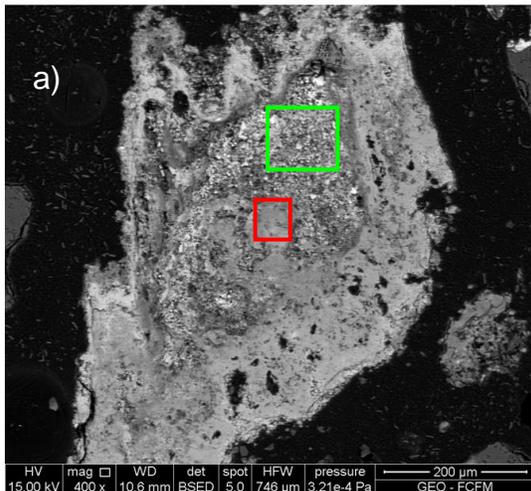
Elemento (%)	Análisis 1	Análisis 2	Análisis 3	Análisis 4
Si	25.02	21.83	20.10	16.01
O	63.03	60.91	60.42	62.36
Na	2.90			1.02
Mg	0.52	15.33	15.11	
Al	6.18		1.26	0.92
K	1.21			0.53
Ca	0.86	0.64	0.41	
Fe	0.28	1.29	2.48	13.22
Cr			0.22	
S				4.32
As				1.62
Total	100	100	100	100

Tabla 9: análisis de muestras CRI-30112017 y FCP-10-2017091, con % atómico respectivos.

7.1.4 Presencia de pirita (FeS_2)

La figura 23a, 23b y 23c muestra imágenes SEM grabadas a partir de la muestra CRI-30112017, incluyendo el espectro EDX y cuyos valores de los análisis elementales están recopilados en la Tabla 10 y 11, con sus porcentajes de peso y porcentaje atómico. Estas imágenes pertenecen a una muestra de uno de los codos de la tubería que conducen a los pozos de reinyección de la planta de Cerro Pabellón. La temperatura en este punto de la tubería es de aproximadamente 90°C .

La figura 23a, la zona demarcada con el cuadro rojo indicaría el sector en que se encuentra la pirita, esta posee morfología porosa de color gris claro y cuyos cristales pequeños que se encuentran alrededor (indicados con cuadro verde) serían principalmente pequeños cristales de oropimente. En la figura 23b y 23c las zonas demarcadas por el cuadrado rojo corresponden a sectores en que se presenta la pirita, estas poseen una morfología muy similares las cuales se destacan por ser regulares en comparación a los minerales que se encuentran entorno a esta y de color gris claro, el mineral que se encuentra co-precipitando junto a la pirita sería oropimente como se señala en el capítulo 7.1.2..



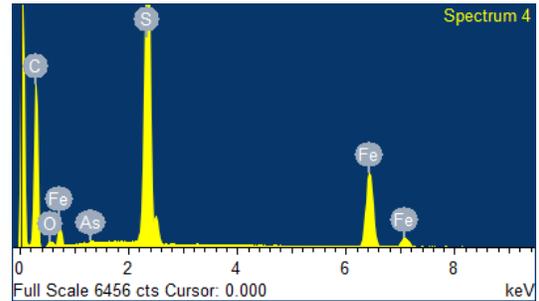
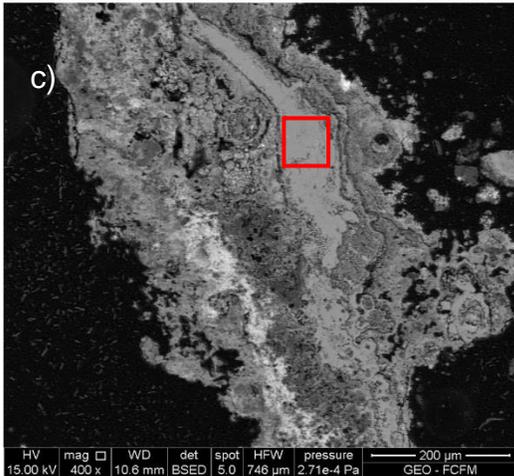
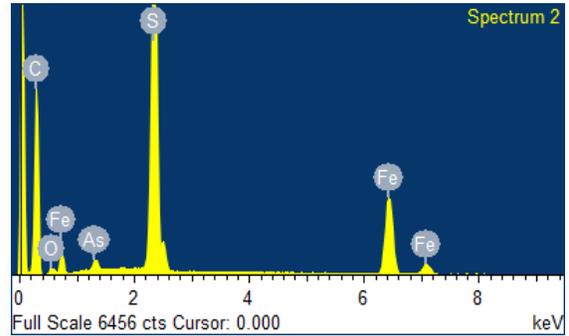
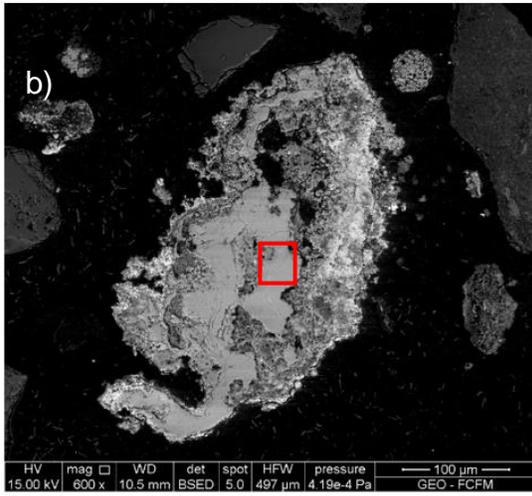


Figura 25: Zonas seleccionadas para el análisis mediante SEM-EDX, incluyendo el espectro EDX obtenido. Los valores de los análisis elementales están recopilados en la Tabla 10 y 11, ambos análisis se hicieron de manera puntual por lo que reflejan la composición química de esos puntos específicos. a) Zona demarcada por cuadro rojo indica el sector donde se encuentra la pirita y la demarcada con cuadro verde sector en que hay cristales de oropimente. b) zona demarcada con cuadro rojo indica donde se encuentra la pirita. c) zona demarcada con cuadro rojo indica sector en que se encuentra la pirita.

Los valores de los análisis elementales están recopilados en la Tabla 10 (la cual señala el porcentaje peso de las muestras) y la Tabla 11 (la cual señala el porcentaje atómico de dichas muestras). El análisis 1 corresponde a la figura 23a, el análisis 2 corresponde a la figura 23b, el análisis 3 a la figura 23c. Estas muestras fueron tomadas al comienzo de la tubería que conduce el fluido a los pozos de reinyección (CRI-30112017).

Se observa que en los tres análisis que poseen altas concentraciones de Fe y S. Sobre la base de las mediciones espectrométricas y la tabla adjunta, se parte de las consideraciones químicas cristalinas que se supone que la solución sólida del Fe sería consistente con la piritita (FeS_2), dadas las relaciones 1:2 de Fe y S, respectivamente y considerando el % peso para la estequiometría (Anexo 6).

Elemento (%)	Análisis 1	Análisis 2	Análisis 3
Fe	47.69	40.75	41.93
S	38.3	50.37	51.77
As	3.48	2.17	0.62
O	10.53	6.71	5.68
Total	100	100	100

Tabla 10: análisis de muestras CRI-30112017 con % peso respectivo.

Elemento (%)	Análisis 1	Análisis 2	Análisis 3
Fe	31.02	25.45	27.51
S	43.39	58.17	59.14
As	1.69	1.12	0.3
O	23.9	15.26	13.05
Total	100	100	100

Tabla 11: análisis de muestras CRI-30112017 con % atómico respectivo.

7.1.5 Presencia de oro

La figura 26 muestra imágenes SEM incluyendo el espectro EDX y cuyos valores de los análisis elementales están recopilados en la Tabla 12, esta imagen fue grabada a partir de la muestra CRI-30112017, la cual se encuentra en uno de los codos de la tubería que conducen a los pozos de reinyección de la planta de Cerro Pabellón a una temperatura de 90°C aproximadamente. La imagen de la derecha demarcada por un cuadro rojo indicaría donde se encuentra inserto el oro, el cual estaría rodeado de oropimente como se observa en la imagen 21e. La imagen de la derecha es un zoom del oro a una magnitud de 6000x, el cual posee un brillo blanco muy distinguible además de poseer una morfología regular.

En la Tabla 13 se puede observar el % en peso y % atómico del sector seleccionado el cual denota que la composición del sector seleccionado es principalmente oro.

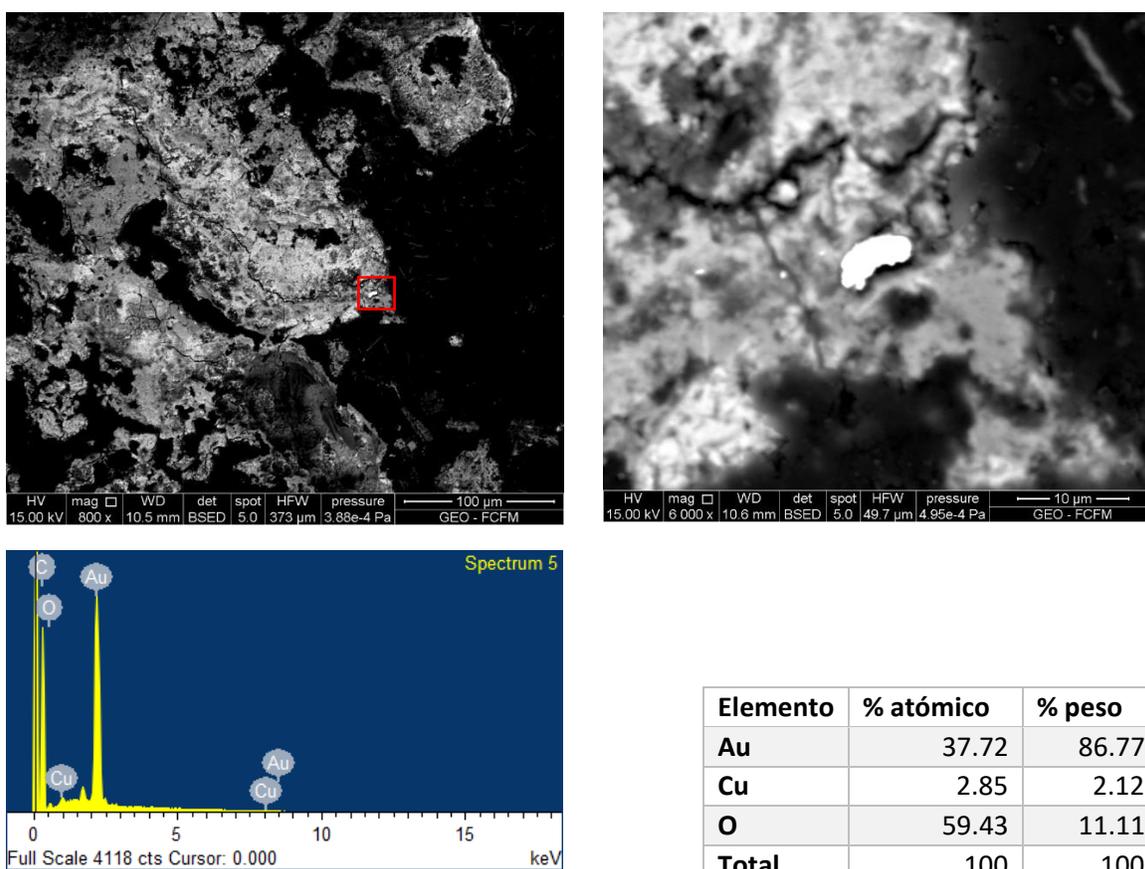


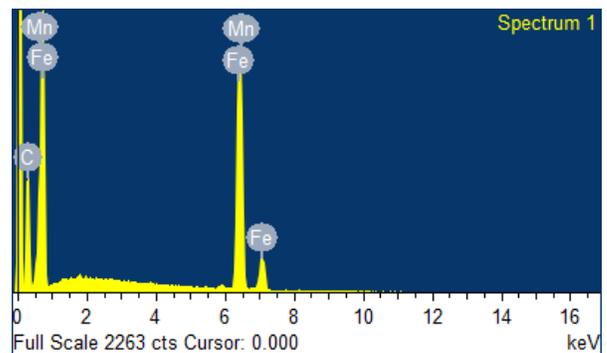
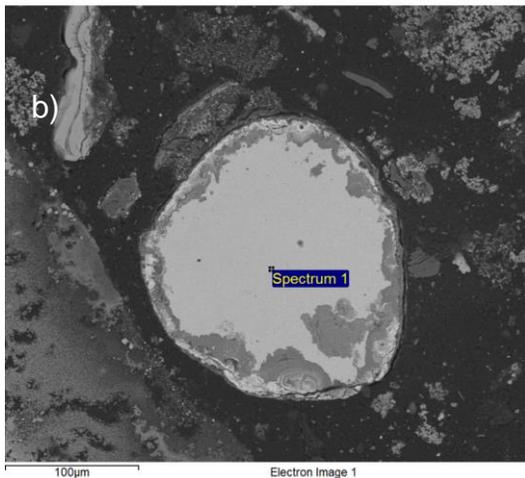
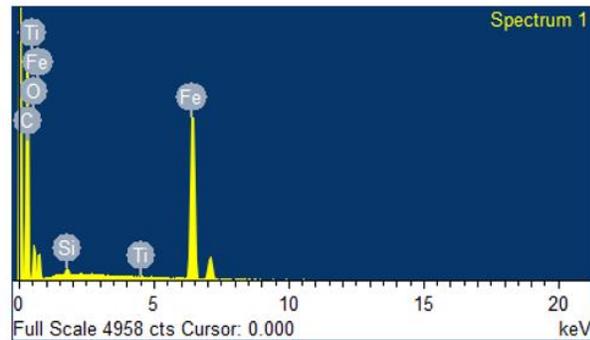
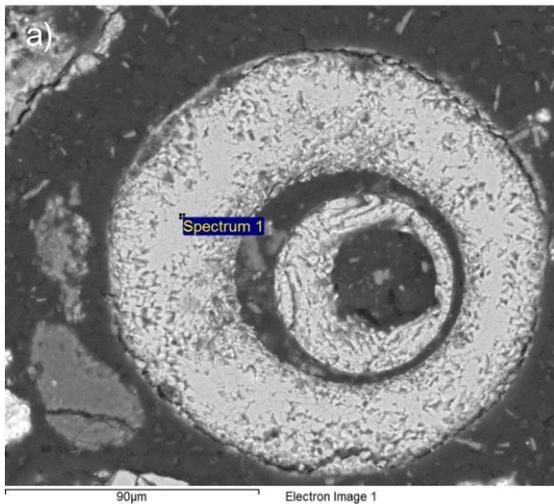
Figura 26: Zonas seleccionadas para el análisis mediante SEM-EDX, incluyendo el espectro EDX obtenido. Los valores de los análisis elementales están recopilados en la Tabla 12, los análisis se hicieron de manera puntual por lo que reflejan la composición química de esos puntos específicos.

Tabla 12: análisis muestras CRI-30112017 con % atómico y atómico respectivo.

7.1.6 Corrosión

La figura 27a, 27b y 27c muestra imágenes SEM grabadas a partir de la muestra CRI-30112017, incluyendo el espectro EDX y cuyos valores de los análisis elementales están recopilados en la Tabla 13 y 14, con sus porcentajes de peso y porcentaje atómico. Estas imágenes pertenecen a una muestra de uno de los codos de la tubería que conducen a los pozos de reinyección de la planta de Cerro Pabellón. La temperatura en este punto de la tubería es de aproximadamente 90°C.

De las figuras 27a, 27b, 27c y 27d corresponden a fragmentos de acero con morfologías marcadamente redondeadas las cuales corresponden a fragmentos alto en contenido de Fe con elementos trazas, esta morfología es indicadora de zonas de ebullición rápida y consecuencia posiblemente de corrosión. Para el caso de la figura 23a además de tener altas concentraciones de Fe y O, también posee concentraciones de Ti como se puede observar en la Tabla 13 y 14. En la figura 23b se observa una morfología subredondeada con alto contenido de Fe y elemento traza Mn.



En la figura 23c se observa un fragmento redondeado que posee alto contenido en Fe con cristales que se encuentran rellanando espacios, los cuales serían oropimente como se indica en el capítulo 7.1.2. Por último, en la figura 23d además de poseer altas concentraciones de Fe y O, también presenta concentraciones de Mn, Si y Ca.

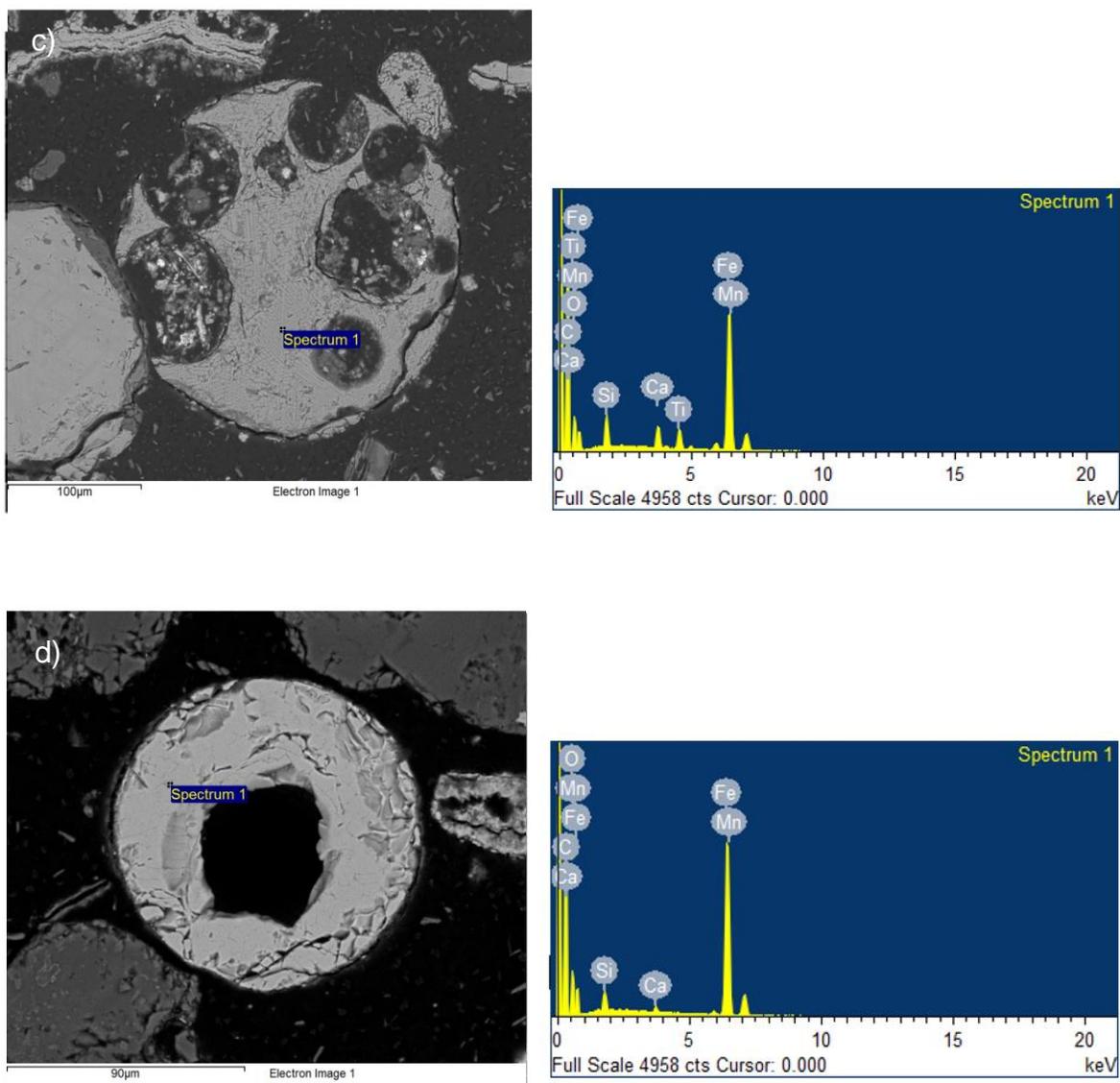


Figura 27: Zonas seleccionadas para el análisis mediante SEM-EDX, incluyendo el espectro EDX obtenido. Los valores de los análisis elementales están recopilados en la Tabla 13 y 14, ambos análisis se hicieron de manera puntual por lo que reflejan la composición química de esos puntos específicos. Las zonas indicadas con puntos spectrum 1 en las figuras 27a, 27b, 27c y 27d corresponden a muestras de corrosión.

Los valores de los análisis elementales están recopilados en la Tabla 13 (la cual señala el porcentaje peso de las muestras) y la Tabla 14 (la cual señala el porcentaje atómico de dichas muestras). El análisis 1 corresponde a la figura 27a, el análisis 2 corresponde a la figura 27b, el análisis 3 a la figura 27c. Estas muestras fueron tomadas al comienzo de la tubería que conduce el fluido a los pozos de reinyección (CRI-30112017).

Se observa que los 4 análisis son muy distintos entre sí, donde el elemento predominante en todas las muestras es el Fe, con variaciones de elementos trazas tales como O, Ti, Si, Ca y Mn.

Elemento (%)	Análisis 1	Análisis 2	Análisis 3	Análisis 4
Fe	75.92	98.73	59.13	71.37
O	22.92		26.50	24.12
Ti	0.32		4.28	
Si	0.84		3.99	2.68
Ca			3.52	0.82
Mn		1.27	2.58	1.01
Total	100	100	100	100

Tabla 13: análisis de muestras CRI-30112017 con % peso respectivo.

Elemento (%)	Análisis 1	Análisis 2	Análisis 3	Análisis 4
Fe	48.06	98.71	34.36	43.77
O	50.65		53.76	51.64
Ti	0.24		2.90	
Si	1.05		4.61	3.26
Ca			2.85	0.70
Mn		1.29	1.52	0.63
Total	100	100	100	100

Tabla 14: análisis de muestras CRI-30112017 con % atómico respectivo.

7.1.7 Presencia de hematita

Las figuras 28, 29a, y 29b son imágenes SEM grabadas a partir de la muestra CRI-30112017, incluyendo el espectro EDX y cuyos valores de los análisis elementales están recopilados en la Tabla 15 y 16, con sus porcentajes de peso y porcentaje atómico. Estas imágenes pertenecen a una muestra de uno de los codos de la tubería que conducen a los pozos de reinyección de la planta de Cerro Pabellón. La temperatura en este punto de la tubería es de aproximadamente 90°C.

En la imagen de la izquierda de la figura 28, la zona indicada con el punto *spectrum 3* corresponde al mineral con mayor presencia de hierro y oxígeno, este se encuentra dentro de una partícula subredondeada la que posee una morfología diseminada, botroidal de color gris oscuro y se encuentra rodeado por oropimente, como se observa en la imagen de la derecha, esta imagen es parte del sector externo de la partícula (señalado por cuadro rojo), la zona indicada con el punto *spectrum 1* corresponde al oropimente y cuyas concentraciones se detalla en la Tabla 15 y 16, posee una morfología de absorción y es de color blanco.

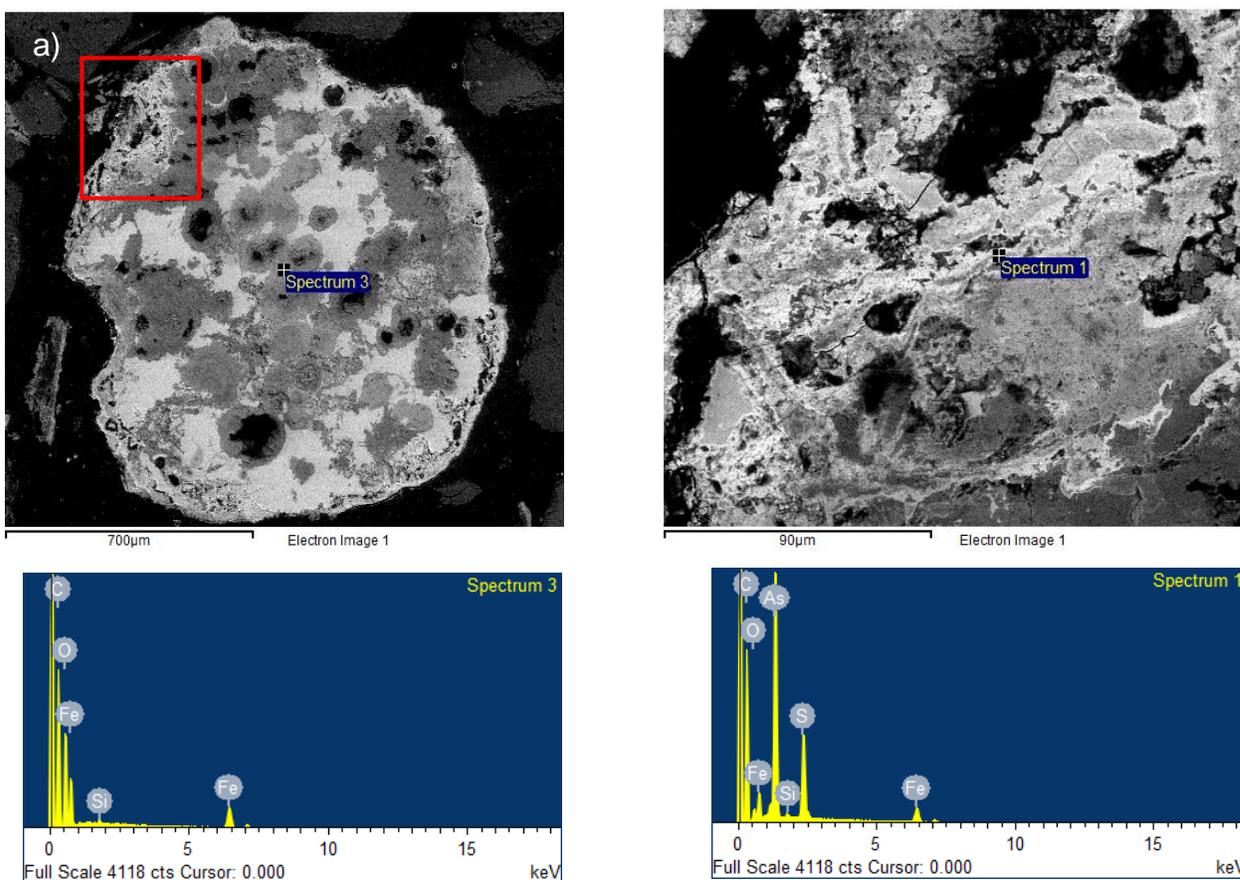


Figura 28: Zonas seleccionadas para el análisis mediante SEM-EDX, incluyendo el espectro EDX obtenido. Los valores de los análisis elementales están recopilados en la Tabla 15 y 16, ambos análisis se hicieron de manera puntual por lo que reflejan la composición química de esos puntos específicos.

En la figura 29a indicada por *spectrum 2*, es la zona con mayor presencia de Fe y O este posee morfología coloforme de color gris oscuro, se encuentra rodeado de oropimente (capítulo 7.1.2). La figura 29b tiene morfología porosa indicadora de ebullición súbita de color gris oscuro indicada por *spectrum 1*, a su alrededor se hay presencia de oropimente (capítulo 7.1.2.) y oro (capítulo 7.1.5.)

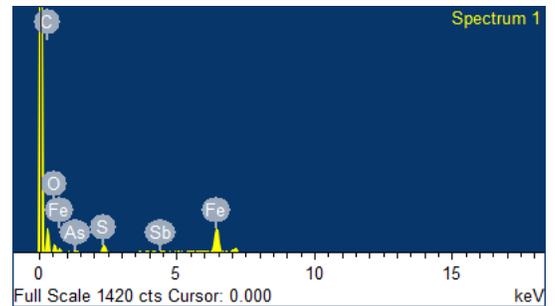
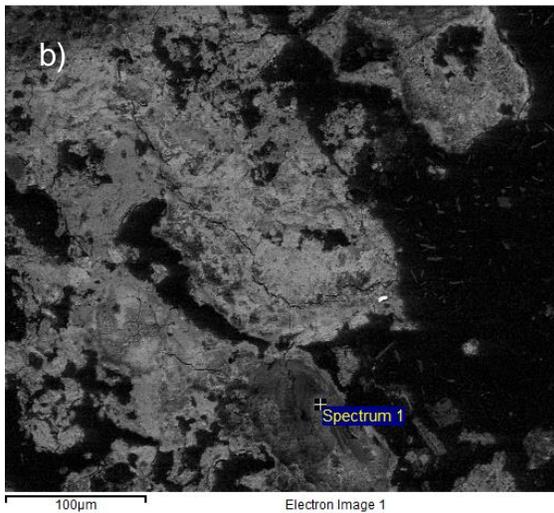
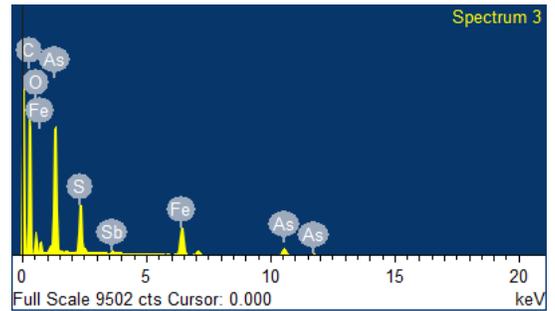
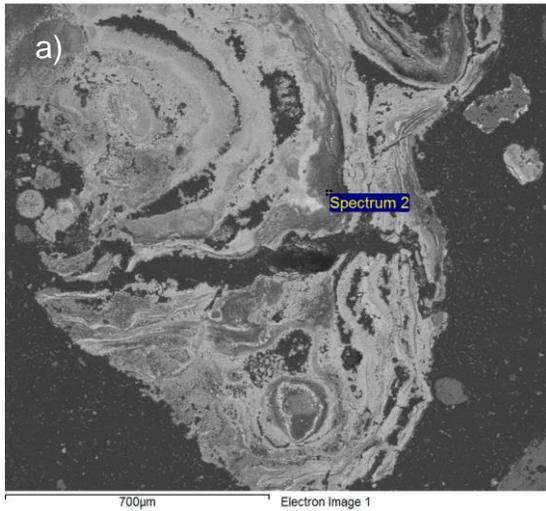


Figura 29: Zonas seleccionadas para el análisis mediante SEM-EDX, incluyendo el espectro EDX obtenido. Los valores de los análisis elementales están recopilados en la Tabla 15 y 16, ambos análisis se hicieron de manera puntual por lo que reflejan la composición química de esos puntos específicos. a) Zona indicada por *spectrum 2*, indica donde se encuentra la hematita b) zona indicada con *spectrum 1*, indica donde se encuentra la hematita.

Los valores de los análisis elementales están recopilados en la Tabla 15 (la cual señala el porcentaje peso de las muestras) y la Tabla 16 (la cual señala el porcentaje atómico de dichas muestras). El análisis 1 corresponde a la figura 28a, el análisis 2 corresponde a la figura 28b, el análisis 3 corresponde a la figura 29a y el análisis 4 corresponde a la figura 29b. Estas muestras fueron tomadas al comienzo de la tubería que conduce el fluido a los pozos de reinyección (CRI-30112017).

Se observa del análisis 1 el alto contenido de Fe y O y el análisis 2 los altos contenido de As, que correspondería a oropimente que se encuentran alrededor de la muestra de hematita. Los análisis 3 y 4 son similares entre sí y sobre la base de las mediciones espectrométricas y la tabla adjunta, se parte de las consideraciones químicas cristalinas que se supone que la solución sólida del Fe sería consistente con la hematita (Fe_2O_3), dadas las relaciones 2:3 de Fe y O respectivamente y considerando el % peso para la estequiometría (Anexo 7).

Elemento (%)	Análisis 1	Análisis 2	Análisis 3	Análisis 4
Fe	74.58	10.28	65.22	65.18
O	23.53	35.29	27.52	25.99
Si	1.89	0.53	0.50	
S		12.30	5.19	4.12
As		41.60	1.57	1.84
Sb				2.87
Total	100	100	100	100

Tabla 15: análisis de muestras CRI-30112017 con % peso respectivo.

Elemento (%)	Análisis 1	Análisis 2	Análisis 3	Análisis 4
Fe	46.48	5.50	37.81	39.32
O	51.17	65.89	55.7	54.73
Si	2.35	0.56	0.58	
S		11.46	5.24	4.32
As		16.59	0.67	0.83
Sb				0.8
Total	100	100	100	100

Tabla 16: análisis de muestras CRI-30112017 con % atómico respectivo.

7.2 MODELAMIENTO PHREEQC

Con el fin de comprender el comportamiento del fluido dentro de la planta de Cerro Pabellón, se utilizó datos que representan el valor promedio de la composición química de los fluidos del sistema geotérmico (Tabla 17). A partir de estos datos y utilizando el software PHREEQC, se han implementado las simulaciones para modelar el comportamiento del fluido considerando las variables termodinámicas. El objetivo es reproducir los procesos fisicoquímicos que dan origen a los precipitados a lo largo del recorrido del fluido geotérmico en la planta de producción.

	Unidad	Producción	Reinyección
pH		6.9	5.75
H₂S	mg/L	45.1	36
Conde	mS/cm	32791	23544
Alc	meq/L	0.86	0.93
Alc. Rit	meq/L	0.31	0.51
Na	mg/L	6488	4487
K	mg/L	1031	573
Ca	mg/L	809	564
Mg	mg/L	0.31	0.14
Cl⁻	mg/L	12300	8113
SO₄⁼	mg/L	44.7	25.8
SiO₂ tot	mg/L	522	326
SiO₂ m	mg/L	503	-
H₃BO₃	mg/L	2425	1671
NH₄⁺	mg/L	4.37	5.95
Li	mg/L	63.84	47.64
Rb	mg/L	8.62	5.92
Cs	mg/L	36.77	25.18
Sr	mg/L	16.03	12.34
Sb	mg/L	3.94	0.71
As	mg/L	84.09	66.42
Al	mg/L	0.3	0.11
Fe	mg/L	0.14	1.92
F⁻	mg/L	3.65	1.43
Br⁻	mg/L	14.07	10.32

Tabla 17: Compilación de base de datos de salmuera de fluidos geotermiales de pozo de producción y reinyección de planta Cerro Pabellón (cortesía de Enel Green Power Chile – GDN S.A., 2017).

Utilizando el software PHREEQC y los datos de la tabla 17, se simuló la variación de temperatura que ocurre en los fluidos al circular por la planta geotérmica. Se consideró el siguiente rango de temperaturas: 167°C (temperatura promedio de pozo de producción) hasta 20°C con sus respectivos pH. Se obtuvieron para cada temperatura considerada los índices de saturación de las fases minerales encontradas en la planta, así como los respectivos pH (Tabla 18).

T°C	pH	Estibina	Oropimente	Sílice	Hematita	Pirita
167	6.28	-2.92	2.71	0.56	2.07	3.56
164	6.27	-2.38	2.97	0.57	1.29	2.75
162	6.26	-2.30	3.09	0.58	1.21	2.77
160	6.25	-2.14	3.32	0.60	1.04	2.80
150	6.21	-1.64	4.06	0.65	0.51	2.90
140	6.15	-1.02	5.00	0.71	-0.15	3.03
130	6.09	-0.44	6.01	0.78	-0.84	3.19
120	6.03	0.02	7.11	0.84	-1.56	3.38
110	5.98	0.32	8.13	0.92	-2.20	3.57
100	5.92	0.59	9.41	1.00	-2.98	3.84
90	5.81	0.82	10.80	1.09	-3.80	4.14
80	5.79	1.03	12.30	1.19	-4.66	4.50
70	5.73	1.23	13.68	1.29	-5.43	4.83
60	5.67	1.47	15.42	1.41	-6.37	5.27
50	5.61	1.74	17.29	1.56	-7.36	5.76
40	5.55	2.00	19.02	1.69	-8.26	6.21
30	5.47	2.33	21.19	1.87	-9.37	6.78
20	5.39	2.73	23.52	2.07	-10.55	7.38

Tabla 18: Datos obtenidos de modelamiento en PHREEQC que indican temperatura, pH e índices de saturación de estibina, oropimente, sílice, hematita y pirita.

Las fases minerales consideradas para el modelamiento (estibina, oropimente, sílice, hematita y pirita) proceden de un informe interno realizado por el Dr. Diego Morata (Morata, 2017).

El informe realizado previamente indica que:

- El *preheater* OEC-1 (OEC-1-CW 1092017) contiene As, S y Sb y contenidos menores de Si y Fe. La difracción de rayos X indica que los minerales presentes serían As_2S_3 (oropimente) como fase mayoritaria y sílice como fase minoritaria con posible presencia de arsenato hidratado (bassita).
- El *preheater* OEC-2 (OEC-2 CCW 01092017) contiene Sb, S y contenidos menores de Si, Fe y As. La difracción de rayos X indica que los minerales presentes en esta muestra corresponden a Sb_2S_3 (Estibina) como fase dominante, sílice, silvina y hematita como fases minoritarias.

En la Tabla 18 se observa la variación del pH y los índices de saturación de las fases minerales de estibina, oropimente, sílice, hematita y pirita ante la variación de temperatura. Las temperaturas consideradas son las temperaturas de distintos puntos dentro de la planta Cerro Pabellón, donde a los 164°C es la temperatura del separador, 162°C la temperatura de la salmuera mezclada con el condensado del vapor que sale del vaporizador, todo eso antes del ingreso al *preheater*, y por último 90°C la temperatura del líquido mezclado (salmuera con vapor condensado) desde el *preheater* hasta el pozo de reinyección (Figura 30). El resto de las temperaturas que aparecen en la Tabla 18 fueron consideradas para analizar la variación de las especies minerales hasta la temperatura ambiente.

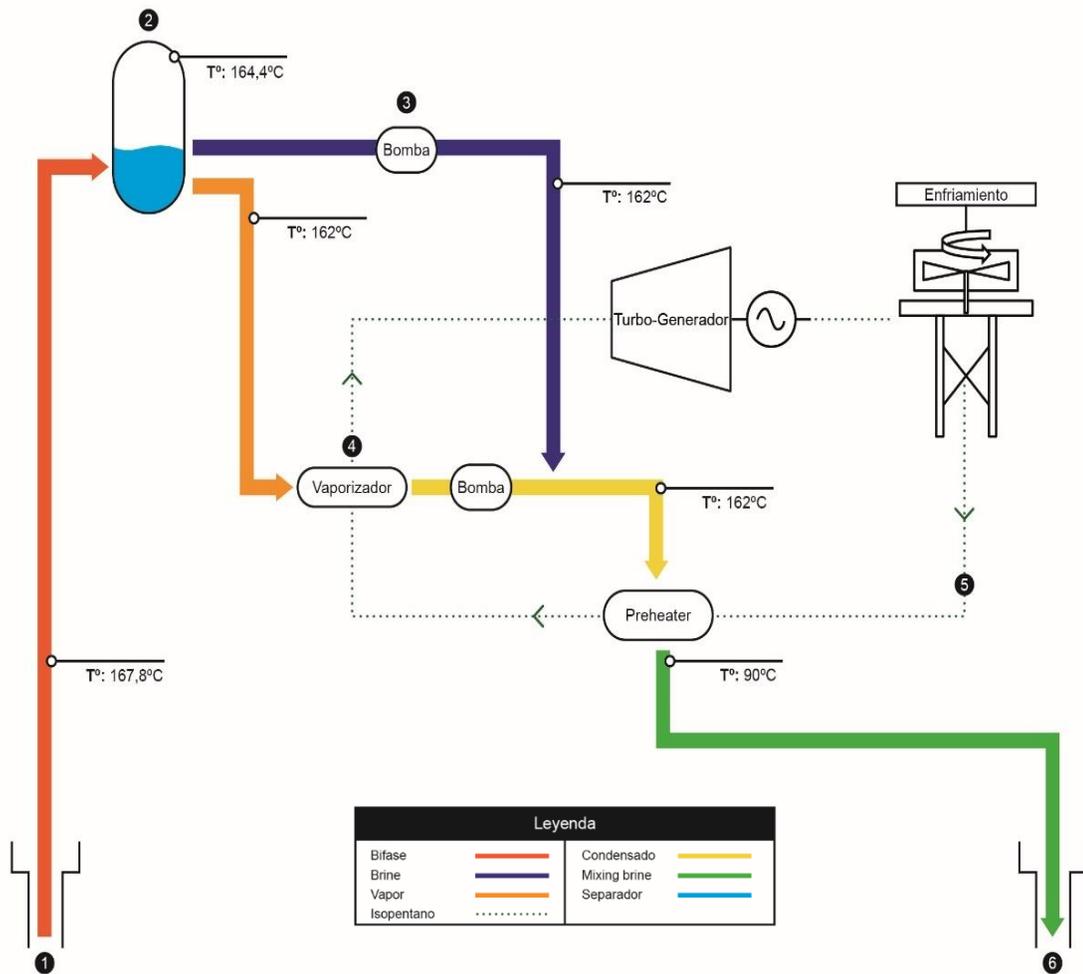


Figura 30: Modelo conceptual de planta geotérmica Cerro Pabellón, con temperatura en diferentes tramos de la tubería.

Los resultados de las simulaciones con PHREEQC permiten graficar el comportamiento de las fases minerales ante la variación de la temperatura desde 167 - 20°C (Figura 31), se observa la variación del índice de saturación de las diferentes especies minerales en respuesta la variación de la temperatura.

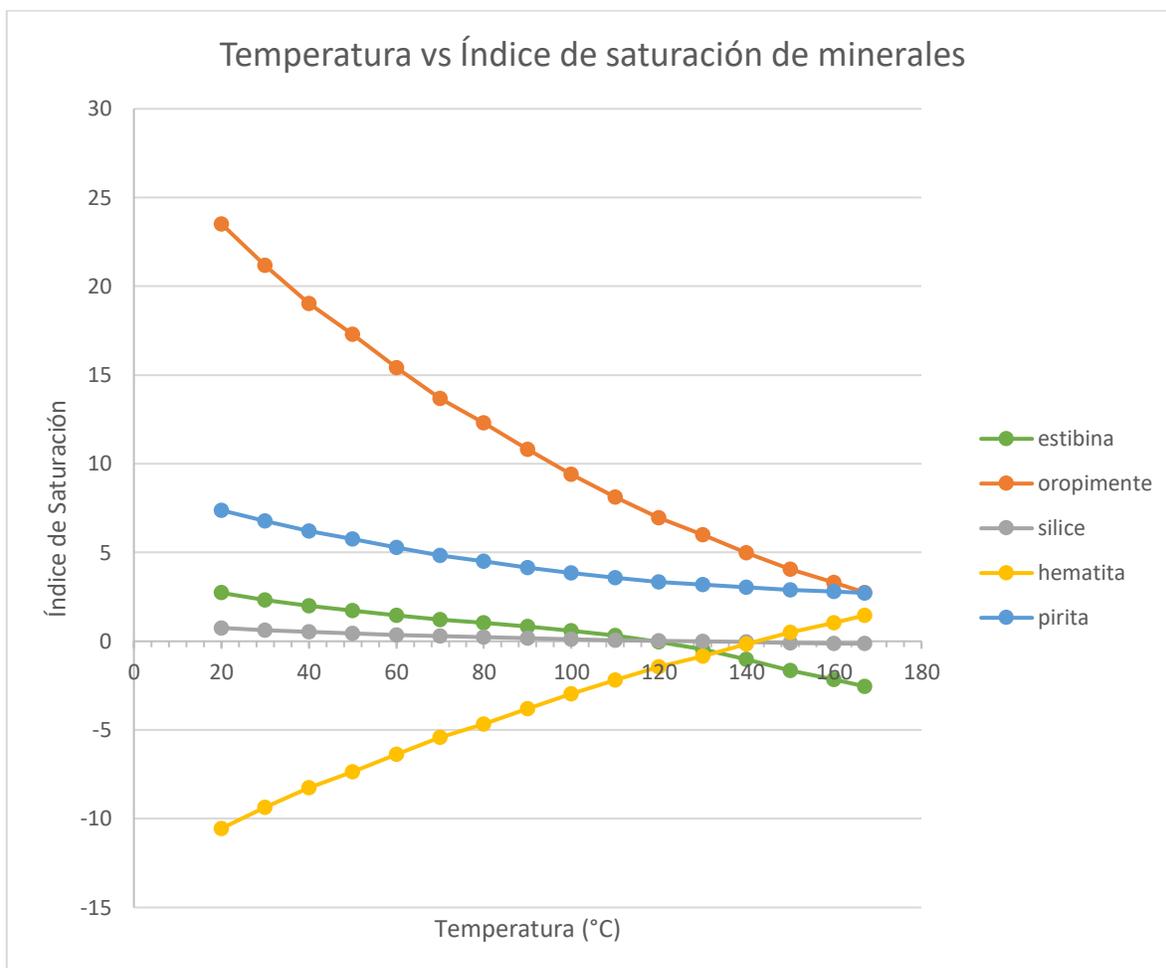


Figura 31: Gráfico de temperatura versus índices de saturación de estibina, oropimente, sílice, hematita y pirita.

Por otra parte, se graficó el comportamiento del pH ante la variación de temperatura (desde 168 – 90°C) como se muestra en la Figura 32. El cual tiene una variación de 6.28 a los 167°C (temperatura inicial desde el pozo de producción) hasta un pH de 5.81 a los 90°C (temperatura de pozo de reinyección).

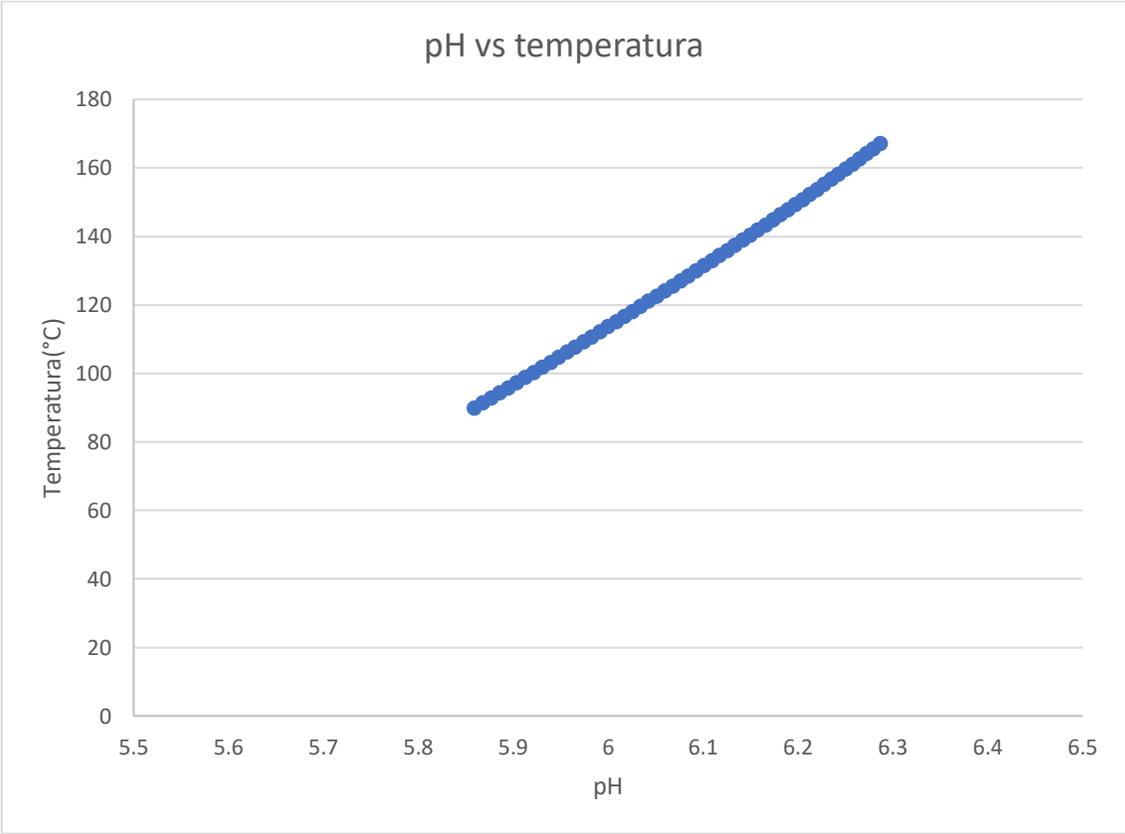


Figura 32: Gráfico de pH versus temperatura, ante la variación de la temperatura dentro de la tubería.

8 DISCUSIÓN.

8.1 GEOQUÍMICA DE FLUIDOS

Los resultados obtenidos de los análisis elementales del espectro EDX a partir de las imágenes SEM de las muestras otorgadas por ENEL GP, fueron utilizados para estimar las fases minerales que se estarían formando dentro de las tuberías de la planta Cerro Pabellón, teniendo en consideración que dichos resultados obtenidos de los análisis elementales son semicuantitativos.

Como se puede observar en la tabla de porcentaje peso obtenida para las fases minerales con antimonio y fases minerales con arsénico (Tabla 19 y Tabla 20, respectivamente), presentan altos porcentajes oxígeno.

Elemento (%)	Análisis 1	Análisis 2	Análisis 3	Análisis 4
Sb	38.24	39.94	44.82	44.21
S	18.04	19.77	18.13	18.24
As	4.98	2.14	0.80	0.84
Fe	2.02			0.33
O	36.72	38.15	36.25	36.38
Total	100	100	100	100

Tabla 19: Análisis mediante SEM-EDX de muestras CRI-30112017 y FCP-10-2017091, con % pesos respectivos.

Elemento (%)	Análisis 1	Análisis 2	Análisis 3	Análisis 4	Análisis 5	Análisis 6	Análisis 7
As	44.00	41.85	41.52	40.09	33.90	47.74	43.38
S	14.76	14.47	16.30	10.64	17.67	3.24	3.12
Si	1.40				0.75		0.46
Fe		6.70	3.48	6.32	5.26	21.74	41.08
Sb	1.72			10.33	2.30	0.75	
O	38.12	36.98	38.70	32.62	40.12	26.53	10.88
Cl							1.08
Total	100	100	100	100	100	100	100

Tabla 20: análisis de muestras CRI-30112017 y FCP-10-2017091, con % atómico respectivos de fases con arsénico.

Los altos porcentajes de oxígeno obtenidos en dichos puntos pueden deberse a que; las muestras estén hidratadas y, como el espectro EDX tiene un rango de detección, desde el berilio en adelante el hidrógeno no se detecta, por lo que las moléculas de agua no se podrían identificar. De la misma forma, como el hidrógeno no es detectado, tampoco se podrían identificar posibles hidróxidos en las soluciones sólidas de las muestras analizadas.

Otra posibilidad es que la resina utilizada para la muestra haya tenido contenido de oxígeno y dado a que el SEM es penetrable 10 micrones, el espectro EDX podría estar detectando resina bajo los minerales analizados.

Por lo tanto, se descartaría la presencia de sulfatos de antimonio ya que no existen minerales sulfatados de antimonio que cumplan con la estequiometría a partir de los datos obtenidos del espectro EDX. Para el caso del arsénico, el mineral sulfatado que se podría formar con los elementos detectados es la escorodita, pero dado a que los datos obtenidos por el espectro EDX son semicuantitativos, no se puede saber con certeza la presencia de la escorodita por lo que se recomiendan análisis más acabados en este caso.

8.2 MODELO GEOQUÍMICO

Recopilando los datos obtenidos del modelamiento en PREEQC, se generó un esquema de la planta Cerro Pabellón considerando la temperatura y presión dentro de la planta y sus respectivos pH, en donde se grafica los posibles puntos donde se comenzaría a generar precipitado de sílice, oropimente, estibina, hematita y pirita con temperatura y pH determinado en cada punto. Este modelo se creó en base a la tabla 21, la cual indica el índice de saturación de las fases minerales predominantes en las tuberías de Cerro Pabellón.

El índice de saturación positivo de la solución con respecto a las fases minerales indicaría la posibilidad de precipitación de éstas bajo las condiciones termodinámicas consideradas en las simulaciones. Las simulaciones ayudan a entender la sensibilidad del fluido ante la variación de pH, temperatura y como esta variación puede afectar en la formación de precipitados.

T°C	pH	presión (bar)	estibina	oropimente	sílice	hematita	pirita
167	6.28	7.50	-2.53	2.74	0.56	1.45	2.72
164	6.27	6.90	-2.38	2.97	0.57	1.29	2.75
162	6.26	9.00 ⁶	-2.30	3.09	0.58	1.21	2.77
90	5.81	5.80	0.82	10.80	1.07	-3.80	4.14

Tabla 21: Datos de índice de saturación de fases minerales y variación del pH obtenidos del modelamiento en PHREEQC a partir de la composición promedio del fluido de Cerro Pabellón.

Analizando la tabla 21, se observa la variación de los índices de saturación del fluido con respecto a las fases minerales predominantes. Se puede deducir a partir de dicha tabla que el oropimente y la pirita se podría encontrar a lo largo de toda la tubería de la planta. Las concentraciones de oropimente podrían aumentar a medida que disminuye la temperatura y, que la precipitación de oropimente ocurre en respuesta de la acidificación del fluido, de acuerdo a los resultados de Spycher y Reed (1989). Además, hay una correlación positiva entre el contenido de As y Fe que favorece la precipitación de As principalmente debido a la adsorción en el óxido de Fe. Por ejemplo, en la tabla 21 donde a medida que aumenta la concentración de oropimente, disminuye la concentración de hematita. Hecho que se observa en la figura 33, donde la imagen de la izquierda corresponde a hematita y la imagen de la derecha al oropimente que posee textura de absorción en los bordes de la hematita. Este caso fue estudiado por Finlayson y Webster (1989), en la planta geotermal de Wairakei, Nueva Zelanda, en la que se produce el mismo fenómeno que ocurre en Cerro Pabellón.

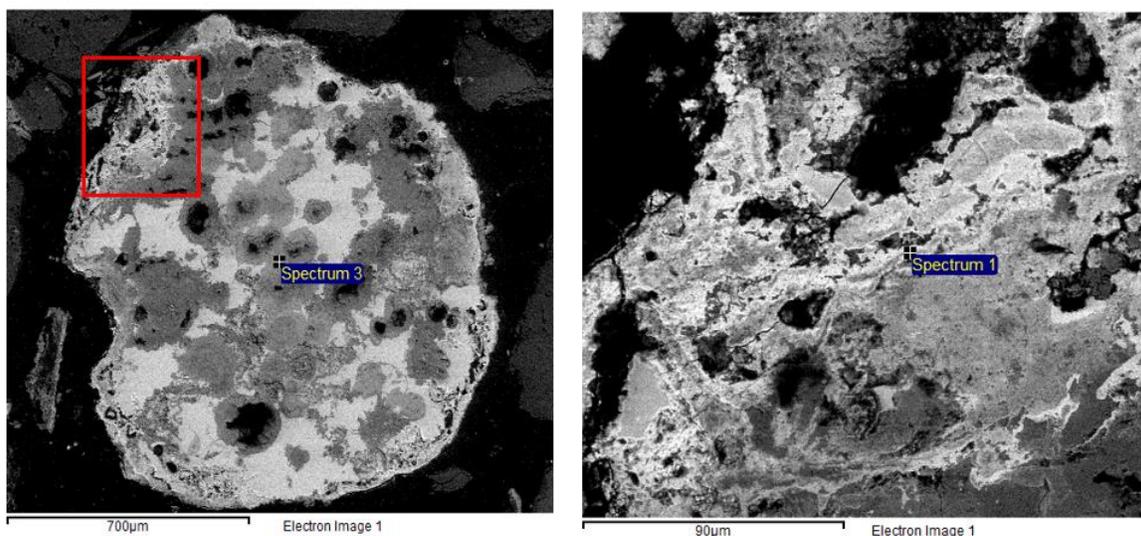
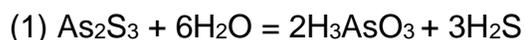


Figura 33: Zonas seleccionadas para el análisis mediante SEM-EDX, imagen de la izquierda corresponde a hematita y de la derecha corresponde a oropimente.

Se considera que H_3AsO_3 es el producto de la disolución de óxido As (As_4O_6) y oropimente (As_2S_3) en fluidos reducidos a pH ácido a neutro, en un amplio rango de

⁶ Presión de la salmuera desde el separador al preheater (número 3 en Figura 37)

condiciones de temperatura (Pokrovski et al., 1996). La solubilidad del oropimente está dada según la siguiente reacción:



La cual aumenta con la temperatura, hasta al menos 300 ° C (Pokrovski et al., 1996). Por lo que los fluidos de Cerro Pabellón tienen las condiciones aptas para la formación de oropimente, debido a:

- Las condiciones termodinámicas aptas (pe: -3 – -5 y con pH: 5-7) para que el fluido transporte ácido arsenioso (H_3AsO_3) y pueda formar oropimente por las condiciones ácido – neutras en un amplio rango de temperatura.
- Polimerización dada las altas concentraciones de As en el fluido (84.09 mg/L según base de datos otorgada por Cerro Pabellón).
- As se concentra principalmente en la pirita, como también se ha observado en algunos campos geotérmicos según los estudios hechos por Ballantyne y Moore (1988).
- As precipita en respuesta a la disminución de la temperatura, es decir, al disminuir la temperatura, el índice de saturación aumenta, como también es analizado en un estudio hecho por Welch et. al. (2003).
- La precipitación del oropimente ocurre luego en respuesta a la acidificación de las aguas termales. Analizado también en el estudio hecho por Spycher y Reed en 1989.

El precipitado sílice dentro de la planta, se encuentra desde que se extraen los fluidos geotermales de los pozos de producción hasta que se reinyectan. En las simulaciones la sílice aumenta su índice de saturación a medida que disminuye la temperatura. Además la solubilidad de la sílice puede considerarse independiente del pH dada la baja variación del índice de saturación ante los cambios de pH. Los resultados obtenidos y la bibliografía consultada (Corsi, 1986) permiten deducir que el leve aumento de los índices de saturación de la sílice (Tabla 21), estaría influenciado solamente por la disminución de temperatura y no afectaría la variación del pH.

La solubilidad de la estibina disminuye a medida que la temperatura disminuye y es más difícil que precipite a medida que hay pérdida de H_2S , es decir, a pH más básico, por lo que se esperaría tener un índice de saturación creciente a medida que el pH y temperatura disminuya, como es lo que se puede observar en la Tabla 21. Hagemann (2003) observó la misma situación para los mecanismos de precipitación de estibina con oro en los depósitos de Wiluna, Australia, donde propone la estabilidad según el gráfico que se muestra en la Figura 34.

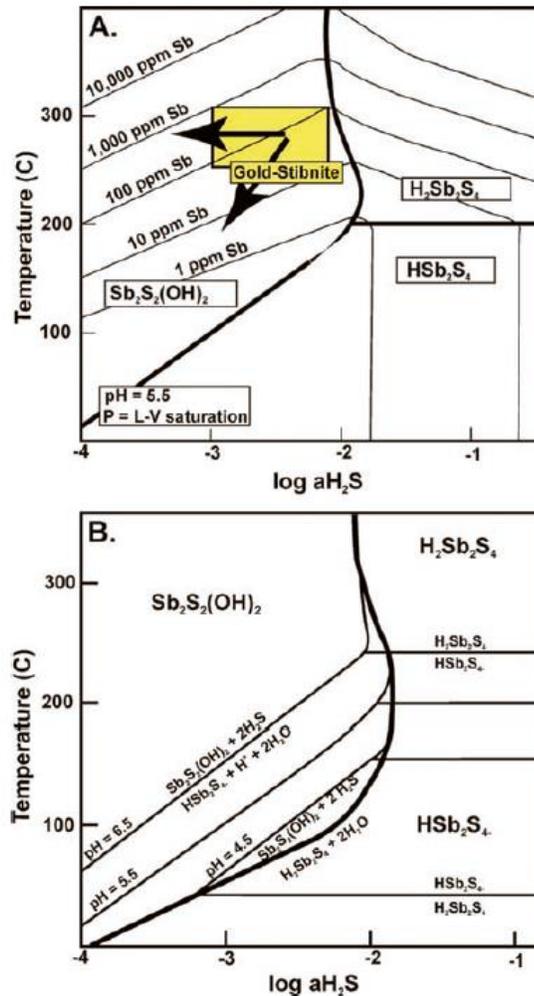


Figura 34: Solubilidad de estibina y especiación del Sb acuoso en función de la temperatura, el H_2S y el pH calculados a las presiones a lo largo del límite de saturación líquido-vapor de H_2O . A) Contornos de solubilidad (ppm Sb) para estibina en función de la temperatura y a H_2S a un pH constante = 5.5. Las líneas en negrita marcan los límites de campo entre los complejos $Sb_2S_2(OH)_2$, $H_2Sb_2S_4$ y HSb_2S_4 acuosos. B) Diagrama de temperatura vs \log de H_2S que ilustra los efectos ante la variación de pH en los límites de los complejos acuosos predominantes. (Hagemann et al., 2003).

Para el caso de la pirita se puede clasificar como piritas ricas en As ($Fe(S, As)_2$), ya que contiene As cuyo % peso varía desde ~1% a 4%, como se observa en la Tabla 22. Este tipo de pirita se encuentra en numerosos entornos geológicos, desde cuencas sedimentarias hasta depósitos de minerales hidrotérmicos, incluidos depósitos de Au de tipo Carlin y epitermales (Kolker et al., 2003). Además de ser un huésped económicamente importante para Au, la pirita de arsénico es de gran interés ambiental porque su en un ambiente oxidante puede liberar cantidades significativas de As y trazas de metales en el medio ambiente (Kolker et al., 2003).

Elemento (%)	Análisis 1	Análisis 2	Análisis 3
Fe	47.69	40.75	41.93
S	38.3	50.37	51.77
As	3.48	2.17	0.62
O	10.53	6.71	5.68
Total	100	100	100

Tabla 22: porcentaje % peso de análisis de piritas.

En estudios realizados por Román et al. (2019) sobre las piritas de Cerro Pabellón, se plotearon las muestras de las piritas en los diagramas ternarios As-Fe-S (Figura 34a) y el diagrama de dispersión As vs. S (Figura 35b) que sugieren que As^{-1} sustituye predominantemente a S en la pirita (FeS_2). En donde Román et al. concluye que, la pirita del Cerro Pabellón se caracteriza por tener concentraciones significativas de metales base (Co, Ni, Cu y Pb), metales preciosos (Au y Ag) y metaloides (As, Sb, Se, Bi y Tl).

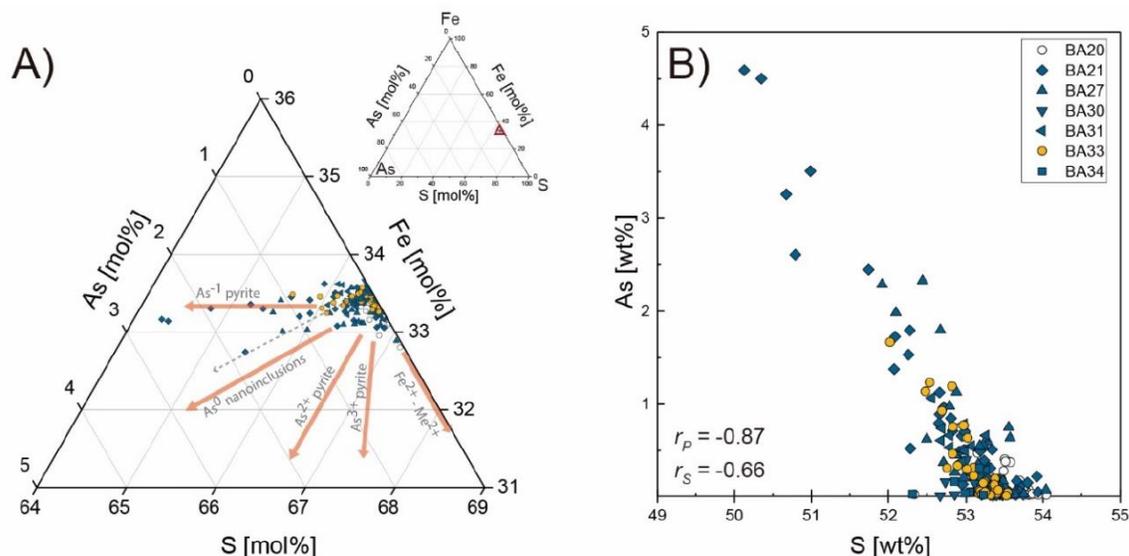
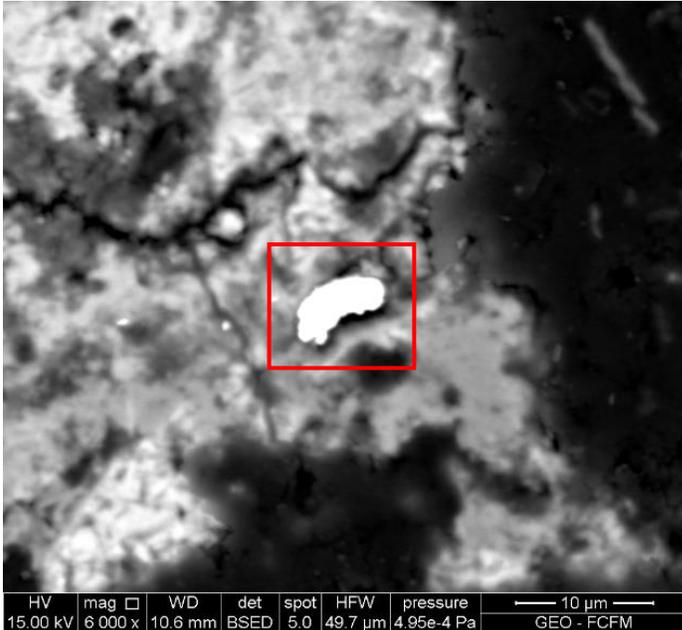


Figura 35: Composición de pirita a partir de las muestras de Cerro Pabellón de As-Fe-S. (A) Diagrama ternario que muestra la composición de pirita de As-Fe-S. Cinco tendencias diferentes muestran la sustitución de (i) En cuanto a S (As^{-1} pirita); (ii) As^0 nano-inclusiones (Deditius et al., 2009a); (iii) As^{2+} para Fe (As^{2+} pirita, Qian et al., 2013); (iv) As^{3+} para Fe (As^{3+} -pirita, Deditius et al., 2008); y metales divalentes (Me^{2+}) que sustituyen isovalentemente a Fe. La composición para As^{2+} pirita (después de Qian et al., 2013; Deditius et al., 2014) se calculó basándose en el supuesto de ocupación ideal de S (66,66% en moles). La flecha gris discontinua marca una tendencia, paralela a la tendencia de nano-inclusiones As^0 , mostrada por un subgrupo del conjunto de datos. Esta deficiencia en la concentración de S y Fe se interpreta como la presencia de nano-inclusiones de As^0 . (B) Como vs. S gráfico de dispersión, que muestra la correspondencia inversa entre estos elementos en pirita desde el CPGS. Círculos amarillos: pirita-I, símbolos azules: pirita-II, y círculos blancos, pirita-III. También se muestran los coeficientes de correlación (r_P = Pearson, r_S = Spearman).

Por lo que las piritas observadas en este estudio serían las mismas a las analizadas en estudios anteriores en Cerro Pabellón (Román et al., 2019), las cuales corresponden a piritas arsenicales. Además, se puede apreciar la presencia de Au en las imágenes SEM analizadas (Figura 36, zona cuadro rojo indica oro con tabla de % peso y % atómico adjunta).



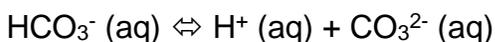
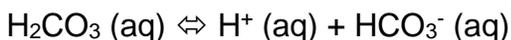
Elemento	% atómico	% peso
Au	37.72	86.77
Cu	2.85	2.12
O	59.43	11.11
Total	100	100

Figura 36: imagen SEM con presencia de oro con tabla de % peso y % atómico.

Por otra parte, se observa pH disminuye a medida que la temperatura desciende. La temperatura del fluido geotérmico desde los pozos de producción hasta el preheater es relativamente constante (disminuye de 167°C a 162°C). La disminución de temperatura más considerable es desde el preheater hacia los pozos de reinyección donde hay una disminución desde los 162°C a los 90°C, que es el punto en donde hay una mayor disminución del pH (de 6.2 a 5.8).

El preheater o intercambiador, en este punto el fluido condensado que proviene de las torres de enfriamiento está mezclado con la salmuera que fue extraída del separador, la cual contiene todas las sales minerales y sólidos provenientes del reservorio. El vapor que se condensa tiene una altísima concentración de CO₂ (98% según la base de datos otorgada por ENEL GP), por lo que, al condensarse, este líquido tendrá altas concentraciones de CO₂ disuelto.

La influencia del CO₂ disuelto en la acidificación del agua se explica ya que el dióxido de carbono ahora acuoso (CO₂ (aq)), reacciona con el agua formando ácido carbónico H₂CO₃ (aq). El ácido carbónico puede perder protones para formar bicarbonato, HCO₃⁻ y carbonato, CO₃²⁻, en este caso el protón se libera al agua, disminuyendo el pH lo que se explica en las siguientes ecuaciones de reacción.



Estas ecuaciones explicarían la disminución del pH desde el preheater en adelante, por lo que la corrosión estaría centrada principalmente desde este punto, lo que se corrobora con el análisis de las muestras SEM (Figura 37), donde hay una gran cantidad de contenido de Fe que sería parte de la tubería de la planta. La figura 36 es la imagen de la totalidad de la muestra por lo que tiene adjunta la tabla de porcentajes peso y atómico (Tabla 23), que indica el gran porcentaje de óxido de hierro en la muestra.

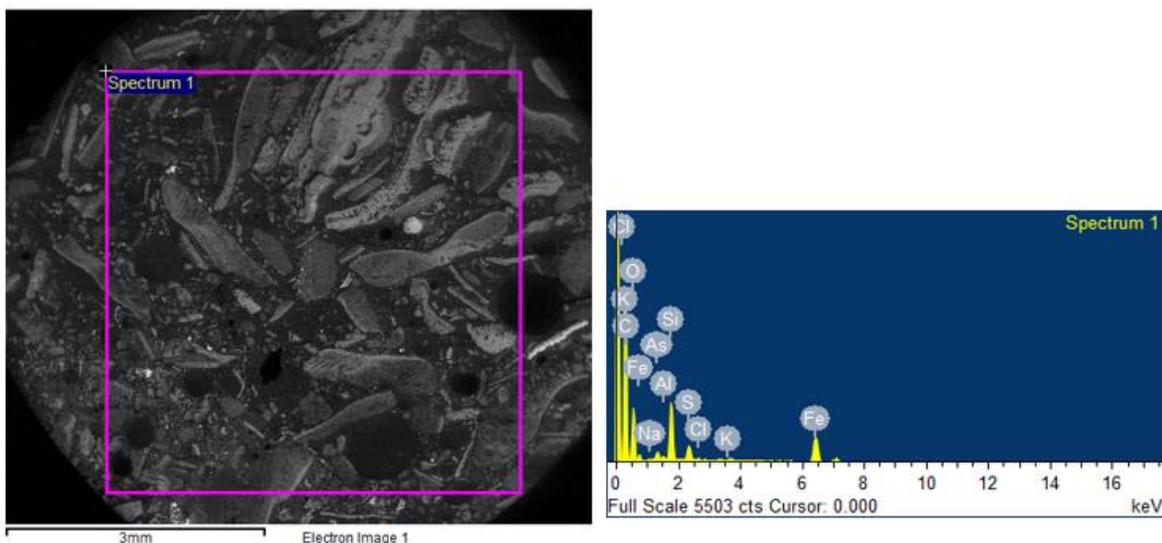


Figura 37: Imagen SEM de la muestra FCP-10.2017091.

Elemento	%peso	%atómico
Na	0.93	1.02
Al	0.99	0.92
Si	17.91	16.01
S	5.4	4.23
Cl	0.63	0.45
K	0.67	0.43
Fe	29.27	13.16
As	4.52	1.51
O	39.67	62.26

Tabla 23: resultado de análisis de figura 36 con % peso y %atómico respectivos.

Por último, con los datos y análisis obtenidos se creó un modelo conceptual, como se ilustra en la Figura 38, el cual muestra la variación de pH dentro de la tubería en base a la variación de temperatura y los índices de saturación de las fases minerales predominantes (oropimente, estibina, hematita, pirita y sílice) para predecir la precipitación de dichos minerales en la planta geotérmica.

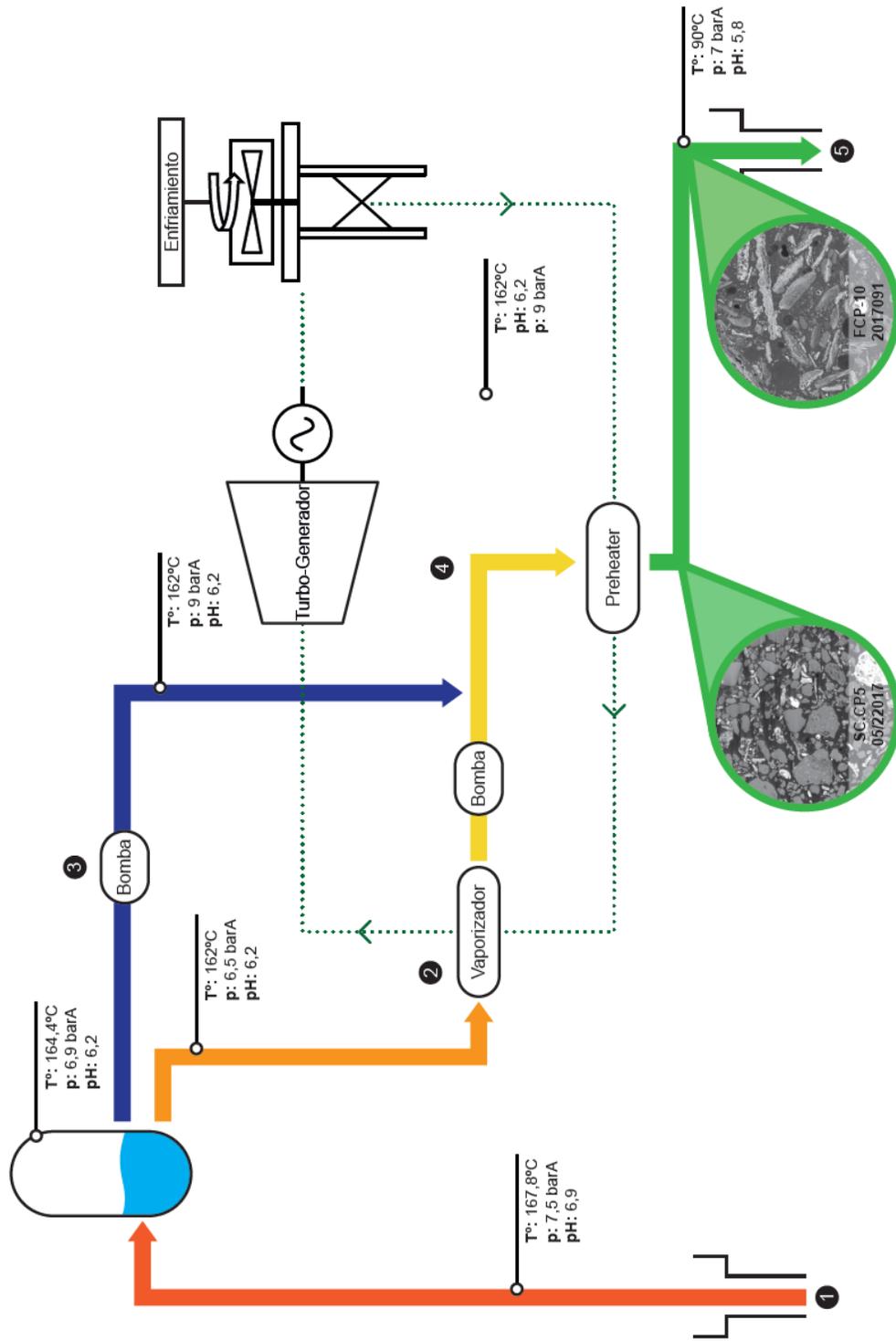
La figura 38 es una esquematización del comportamiento del fluido geotérmico dentro de la tubería bajo las condiciones termodinámicas dadas en la base de datos usada (LLNL.dat). Estas condiciones se ilustran al lado de cada tubería donde los valores de pH son los resultados obtenidos del modelo PHREEQC y los valores de presión y temperatura son los datos otorgados por ENEL GP para dichos puntos.

Los resultados obtenidos del modelamiento en el software PHREEQC fueron comparados con los datos entregados por ENEL GP, se calculó el margen de error del pH simulado en el software cuyos resultados se presentan en la tabla 24. El error máximo es del 9%, valor que se considera aceptable y que valida los resultados obtenidos.

Temperatura	pH medido	pH experimental	% error
167	6.90	6.28	8.99
164	6.70	6.27	6.42
162	5.91	6.26	5.92
90	5.75	5.85	1.73

Tabla 24: Margen de error de datos simulados en PHREEQC (pH experimental) en comparación con los datos medidos por ENEL GP (pH teórico).

Además, bajo el modelo de precipitación de los minerales se encuentran cinco barras las cuales grafican los índices de saturación de las principales fases minerales que se encuentran dentro de la tubería, estas son el oropimente (As_2S_3), estibina (Sb_2S_3), sílice amorfa (SiO_2), pirita (FeS_2) y hematita (Fe_2O_3). Cada color está asociado a diferentes tramos de la tubería como se esquematiza en el modelo de la planta geotérmica, y la altura de estos colores representaría los índices de saturación de los distintos minerales a través de toda planta geotérmica. Las fotografías que se encuentran en un círculo son las 2 muestras analizadas en el SEM reportadas donde fueron tomadas.



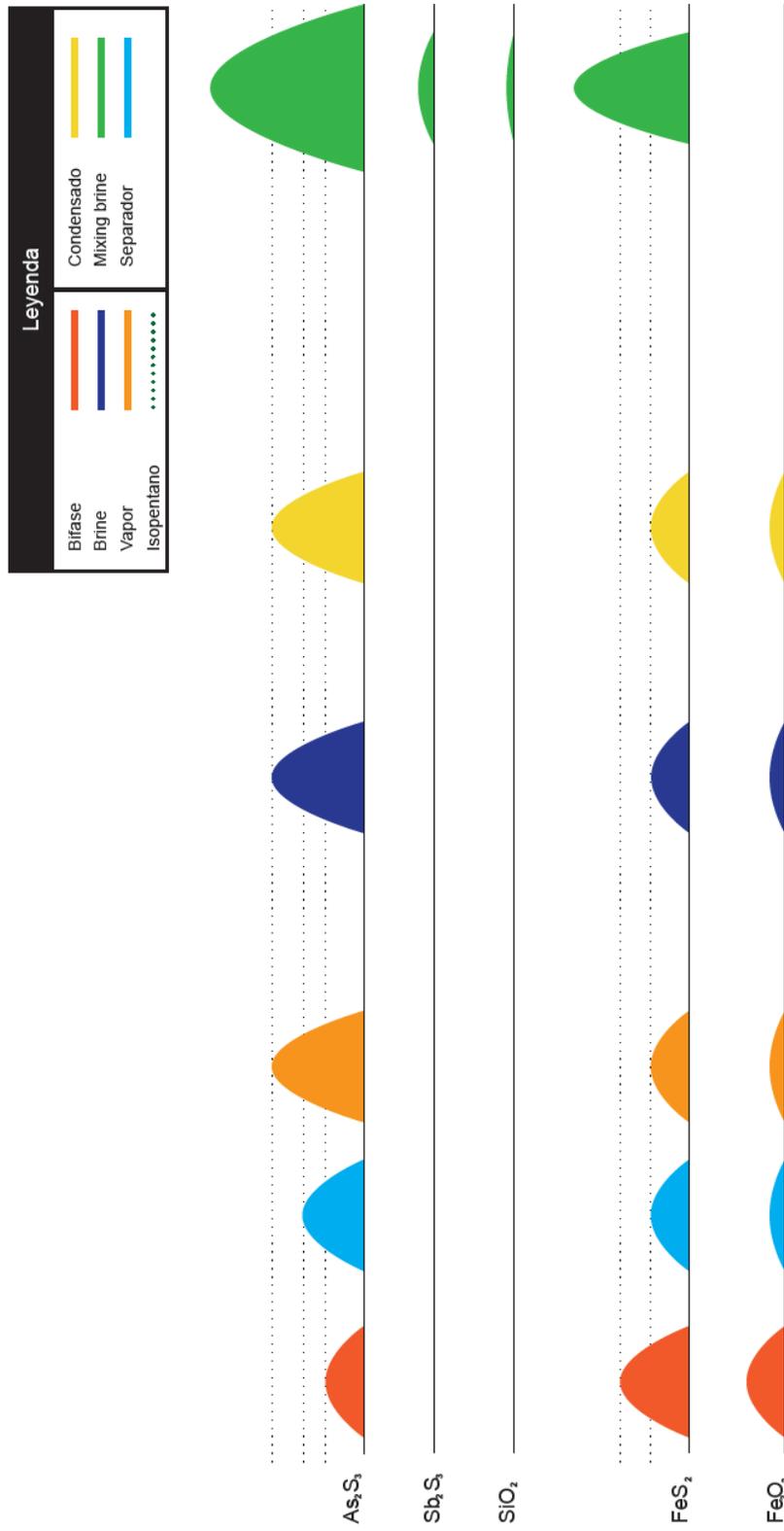


Figura 38: Modelo final de precipitación de minerales en planta geotermal Cerro Pabellón.

9 CONCLUSIONES

Con los datos obtenidos del modelamiento en PHREEQC y el análisis de las muestras SEM, se identificaron cinco fases minerales predominantes que estarían precipitando dentro de la tubería e intercambiadores de calor de la planta geotérmica de Cerro Pabellón, las cuales serían oropimente, pirita, sílice, estibina y hematita. La presencia de dichas fases minerales estaría causando precipitación de minerales dentro de las tuberías desde los pozos de producción hasta los pozos de reinyección según el esquema de precipitación de las fases minerales propuesto. Por lo tanto, las altas concentraciones de las fases minerales causarían grandes inconvenientes dentro de la planta si es que no se toman medidas paliativas para mitigar los precipitados que se está produciendo en la planta.

En el desarrollo de esta investigación, se determinó que la disminución de la temperatura y del pH son factores que influyen en gran medida en la precipitación de la mayoría de las fases minerales predominantes en los fluidos geotermales, ya que disminuye la solubilidad del oropimente, sílice, estibina y pirita ante la acidificación y la reducción de la temperatura. Por lo que después del *preheater* en donde la temperatura y el pH del fluido alcanzan su punto mínimo, sería el punto más crítico en concentración de precipitados.

Por otra parte la acidificación del fluido podría causar corrosión dentro de la tubería, principalmente en la zona en que se mezcla la salmuera con el vapor condensado procedente del vaporizador, debido a que el vapor contiene altas concentraciones de CO₂, que al condensarse se disuelve y el CO₂ acuoso afectaría en la disminución del pH, lo que produciría la corrosión de las tuberías desde el *preheater* hasta los pozos de reinyección, como se pudo observar en las imágenes analizadas del SEM de muestras tomadas en dichos puntos, las cuales tienen altas concentración de hierro.

Dicho lo anterior es de gran importancia tomar medidas para mitigar los problemas de corrosión y precipitados minerales. Tomando en consideración los casos de otras plantas geotérmicas que han presentado problemas similares, algunas de las medidas que se proponen ante la presencia de precipitados de sílice y sulfuros más adecuada para Cerro Pabellón (en este caso oropimente, estibina, sílice y pirita) es el manejo de la salmuera, proceso que tiene como objetivo la precipitación y el posterior asentamiento de las especies solubles en equipos especialmente diseñados, de modo que no se produzca precipitados minerales en la instalación.

Finalmente, para un entendimiento más acabado de la formación de precipitados y la corrosión se sugiere un muestreo geoquímico frecuente para tener un monitoreo de las variaciones que puedan ocurrir en las concentraciones de oropimente, estibina, sílice, pirita y hematita del fluido geotérmico, además de analizar muestras de sólidos de distintas partes de la tubería (pozo de producción, separador, tubería posterior y anterior al preheater y pozo de reinyección) de la planta para comprender como este varía dentro de esta.

10 BIBLIOGRAFÍA

- Amjad Z., 1995:** Performance of polymeric additives as hydroxyapatite crystal growth inhibitor. Phosphorus Research Bulletin, Vol (5), 1-11.
- Ahumada S. & Mercado J.L., 2009:** Evolución geológica y estructural del complejo volcánico Apacheta-Aguilucho (CVAA), Segunda Región, Chile. Dissertation, Bachelor's Degree Thesis, Universidad Católica del Norte, Antofagasta, Chile.
- Andritsos, N.; Karabelas, A. J. and Koutsoukos, P. G., 2002:** Scale formation in geothermal plants. International.
- Aravena D., Muñoz M., Morata D., Lahsen A., M, Parada M.A., Dobson P., 2015:** "Assessment of high enthalpy geothermal resources and promising areas of Chile", Geothermics 59, pp. 1-13.
- Arnórsson, S., 1989:** Deposition of calcium carbonate minerals from geothermal waters – theoretical considerations. *Geothermics*, 18, 33-39.
- Ballantyne J. and Moore J., 1988:** Arsenic geochemistry in geothermal systems. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 52, 475-483.
- Barbier, E., 2002:** Geothermal energy technology and current status: an overview. *Renew.Sustain. Energy Rev.* 6, 3–65.
- Benoit, W.R., 1990:** Development of a Carbonate Scale Inhibition Program at Dixie Valley, Nevada, *Trans. Geothermal Resources Council*, Vol. 14, Part II.
- Bertani R., 2015:** "Geothermal Power Generation in the World 2010-2014 Update Report", *Proceedings World Geothermal Congress*.
- Carlo, E. H. d., Thomas, D. M. 1985:** Removal of arsenic from geothermal fluids by adsorptive bubble flotation with colloidal ferric hydroxide. *Environmental Science and Technology*, 19, 538-544.
- Cook N. J. and Chryssoulis S. L., 1990:** Concentrations of invisible gold in the common sulfides. *Can. Mineral.* 28, 1–16.
- Corsi R. 1986.** *Scaling* and corrosion in geothermal equipment: problems and preventive measures. *Geothermics*, Vol. 15, No 5/6, pp. 839-856.
- Criaud, A., Fouillac, C., 1989:** Sulfide *scaling* in low-enthalpy geothermal environments: a review. *Geothermics*, 18, 73-81.
- Dalas, E., Koutsoukos, P.G., 1989:** Calcium carbonate scale formation on heated metal surfaces. *Geothermics*, 18, 83-88.
- de Silva S.L., 1989:** Altiplano-Puna volcanic complex of the central Andes. *Geology*, 17, 1102–1106.
- Deditius A. P., Reich M., Kesler S. E., Utsunomiya S., Chryssoulis S. L., Walshe J. y Ewing R. C., 2014:** The coupled geochemistry of Au and As in pyrite from hydrothermal ore deposits. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 140, 644–670.
- Deditius A. P., Utsunomiya S., Ewing R. C., Chryssoulis S. L., Venter D. y Kesler S. E., 2009:** Decoupled geochemical behavior of As and Cu in hydrothermal systems. *Geological Society of America* 37, 707.
- Dobson, P 1999:** Pampa Apacheta Geothermal Prospect. Unocal Memo to Rich Gunderson, June 8, 1999.
- Drummond, S.E., Ohmoto H., 1985:** Chemical evolution and mineral deposition in boiling hydrothermal systems. *Economic Geology*. 126-147.
- Egawa, H., Nonaka, T., Maeda, H., 1985:** Studies of selective adsorption resins. XXII. Removal and recovery of arsenic ion in geothermal power waste solution with chelating resins containing mercapto groups. *Separation Science and Technology*, 20, 653-664.
- ENEL GP, 2017:** Mantenimiento y sustentabilidad del campo geotermico Co. Pabellon. Santiago: Informe interno ENEL GP.
- Finlayson J.B., Webster J. G., 1989:** Arsenic, iron and silica in effluent and sinters if the Wairakei Borefield. *Chemestry Division Technical. Nore no.* 89/17.

- Francis P.W. & Rundle C.C., 1976:** Rates of production of the main magma types in the central Andes. Geological Society of America Bulletin, 87, 474–480.
- Gallup, D.L. 1996.** Brine pH modification scale control technology. Geothermal Resources Council Transactions 20, 749–755.
- Godoy B., Rodríguez I., Pizarro M. & Rivera G., 2017:** Geomorphology, lithofacies, and block characteristics to determine the origin, and mobility, of a debris avalanche deposit at Apacheta-Aguilucho Volcanic Complex (AAVC), northern Chile. Journal of Volcanology and Geothermal Research.
- González G., Cembrano J., Carrizo D., Macci A. & Schneider H., 2003:** The link between forearc tectonics and Pliocene-Quaternary deformation of the Coastal cordillera, northern Chile. Journal of South American Earth Sciences, 16, 321–342.
- Hagemann S., 2003:** P-T-X conditions of hydrothermal fluids and precipitation mechanism of stibnite-gold mineralization at the Wiluna lode-gold deposits, Western Australia: conventional and infrared microthermometric constraints. Article Mineralium Deposita, 38, 936-952.
- Hurtado, R., Mercado, S., and Gamiño, H., 1989:** Brine treatment test for reinjection on Cerro Prieto geothermal field. Geothermics, 18, 145-152.
- Jamero J., Zarrouk S., Mroczeck E., 2018:** Mineral scaling in two-phase geothermal pipeline: Two case studies. Geothermics, 72, 1-14.
- Karabelas, A.J., Andritsos, N., Mouza, A., Mitrakas, M., Vrouzi, F., and Christianis, K., 1989:** Characteristics of scales from the Milos geothermal plant. Geothermics, 18, 169-174.
- Kolker A., Haack S. K., Cannon W. F., Westjohn D. B., Kim M. J., Nriagu J., and Woodruff L. G., 2003:** Arsenic in southeastern Michigan. In Arsenic in Ground Water (eds. A. H. Welch and K. G. Stollenwerk). Kluwer Academic Publishers, Boston, pp. 281–294.
- Kuwada J. T., 1982:** Field demonstration of the EPP system for carbonate scale control. Geothermal Resources Council Bull, 11, 3-9.
- Kristmannsdóttir, H., 1989:** Types of *scaling* occurring by geothermal utilization in Iceland. Geothermics, 18, 183-190.
- Lahsen A., 1988:** Chilean geothermal resources and their possible utilization. Geothermics, 17, 401–410.
- Lahsen A. & Trujillo P., 1975:** El Tatio geothermal field. Proceedings of the Second United Nations Symposium on the Development and Use of Geothermal Resources, pp. 157–178.
- Matamala, J., 2014:** Análisis y comparación de ciclos termodinámicos para la generación de potencia a partir de recursos geotermiales de media y alta entalpía. Repositorio Uchile.
- Maza N., Camus E., Lizana C., Godoy B., Alvear B., Pizarro M., Morata D., 2018:** Clay minerals in geothermal systems: the case study from the Cerro Pabellon project (Apacheta, Chile). Scientific Reserch Abstracts, Vol. 7, p. 526.
- Moeck, I, 2014:** Catalog of geothermal play types based on geologic controls. Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 37, 867-882.
- Morata, D., 2017.** Estudio mineralógico mediante Difracción de Rayos X (DRX) de dos muestras de intercambiadores de calor de salmuera (pre-heater) de las unidades de generación. Informe interno.
- Pokrovski G., Gout R., Schott J., Zotov A., 1996:** Thermodynamic properties and stoichiometry of As (III) hydroxide complexes at hydrothermal conditions. Geochimica et Cosmochimica Acta. 60(5): 737-749.
- Qian G., Brugger J., Testemale D., Skinner W. and Pring A., 2013:** Formation of As(II)-pyrite during experimental replacement of magnetite under hydrothermal conditions. Geochimica et Cosmochimica Acta 100, 1–10.
- Ramírez, C.; Urzúa, L.; Vieytes, H.; Cumming, B.; Powell, T., 2002:** Resource Assessment of the Apacheta Geothermal Concession, El Loa Province, II Región –Antofagasta. Geotérmica del Norte S.A., Informe inédito, 49 p., anexos.
- Rivera G., Morata D. & Ramírez C., 2015:** Evolución vulcanológica y tectónica del área del Cordón Volcánico Cerro del Azufre – Cerro de Inacaliri y su relación con el Sistema Geotérmico

de Pampa Apacheta, II Región de Antofagasta. Congreso Geológico Chileno N°14 Actas, pp. 556–559.

Robinson, A.W., 1973: Sulphur isotope equilibrium during sulphur hydrolysis at high temperatures. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 18, 443-450.

Rothbaum, H. P., Anderton, B. H., 1979. Effect of silica polymerization and pH on geothermal *scaling*. *Geothermics*, volume 8, issue 1, page 1-20.

Simmons S., Browne P., 2000: Hydrothermal minerals and precious metals in the Broadlands-Ohaaki geothermal system: implications for understanding low-sulfidation epithermal environments. *Economic Geology*, 95, 971-999.

Spycher, N. F., Reed, M. H., 1989: As (III) and Sb(III) sulfide complexes: An evaluation of stoichiometry and stability from existing experimental data. *Geochimica et Cosmochimica Acta*. Vol 53, issue 9, 2185-2194.

Swedlund, P. J., & Webster, J. G., 1999: Adsorption and Polymerization of Silicic Acid on Ferrihydrite, and Its Effect on Arsenic Adsorption. *Water Research*, 33, 3413-3422.

Tassew, M. 2001. Effect of solid deposition on geothermal utilization and methods of control. Geothermal Training Programme, Reykjavík, Iceland.

Tibaldi A., Corazzato C. & Rovida A., 2009: Miocene–Quaternary structural evolution of the Uyuni–Atacama region, Andes of Chile and Bolivia. *Tectonophysics*, 471, 114–135.

Tibaldi A., Bonali F.L. & Corazzato C., 2016: Structural control on volcanoes and magma paths from local- to orogen-scale: The central Andes case. *Tectonophysics*, 699, 16–41.

Urzúa L., Powell T., Cumming W.B. & Dobson P., 2002: Apacheta, a new geothermal prospect in Northern Chile. *Geothermal Resources Council Transactions*, 26, 22–25.

Vetter, O. J., Kandarpa, V. 1982: Handling of scale in geothermal operations. Int. Conference on Geothermal Energy, BHRA. Florence, pp. 355- 372.

Villaseñor, L. B., Calibugan, A. A., 2011: Silica *scaling* in Tiwi – Current solution. Proceedings International Workshop on Mineral *Scaling*.

Webster J.G., 1990: The solubility of and speciation of As in dilute and sulphide-bearing fluids at 25 and Geochim. Cosmochim. Acta, 54,1009-1017.

Welch A., Stollenwerk K., Kenneth G., 2003: Aresenic in groundwater. Kluwer Academic Publisher. London, UK.

11 ANEXOS

SOLUTION 1 BRINE/PRODUCTION

```
temp      167
pH        6.9
pe        -5
redox     pe
units     mg/l
density   1
Al        0.3
As        84.09
B(3)     2435
Br(-1)   14.07
Ca        809
Cl(-1)   12300
Cs        36.77
F         3.65
Fe        0.14
K         1031
Li        63.84
Mg        0.31
N(-3)    4.37
Na        6488
Rb        8.62
S(-2)    45.1
S(6)     44.7
Sb        3.94
Si        522
Sr        16.03
-water   1 # kg
```

REACTION_PRESSURE 9

```
5.8 6.2 6.5 6.9 7.5 9
```

EQUILIBRIUM_PHASES 1

```
CO2(g) 0 10
```

REACTION_TEMPERATURE 1

```
167 20 in 100 steps
```

SELECTED_OUTPUT 1

```
-file          D:\GEO\memory\Phreeqc\final\ultimo3.sel
-pH            true
-temperature   true
-totals        As Ca S Sb Si Fe
-saturation_indices  Stibnite Calcite Orpiment SiO2(am)
                  Bassanite Gypsum Hematite Fe2(SO4)3
                  Realgar Pyrite
```

Anexo 1: Programación utilizada para el modelamiento en software PHREEQC.

Sb₂S₃
Molecular Weight = 339.70 gm

<u>Antimony</u>	71.68 %	Sb
<u>Sulfur</u>	28.32 %	S
	<u>100.00 %</u>	

Anexo 2: composición química de estibina con respecto al porcentaje peso (mineral data).

As₂S₃
Molecular Weight = 246.04 gm

<u>Arsenic</u>	60.90 %	As
<u>Sulfur</u>	39.10 %	S
	<u>100.00 %</u>	

Anexo 3: composición química de oropimente con respecto al porcentaje peso (mineral data).

Fe⁺⁺⁺AsO₄•2(H₂O)
Molecular Weight = 230.80 gm

<u>Iron</u>	24.20 %	Fe	34.60 %	Fe ₂ O ₃
<u>Arsenic</u>	32.46 %	As	49.79 %	As ₂ O ₅
<u>Hydrogen</u>	1.75 %	H	15.61 %	H ₂ O
<u>Oxygen</u>	41.59 %	O		
	<u>100.00 %</u>		<u>100.00 %</u>	= TOTAL OXIDE

Anexo 4: composición química de escorodita con respecto al porcentaje peso (mineral data).

SiO₂
Molecular Weight = 60.08 gm

<u>Silicon</u>	46.74 %	Si	100.00 %	SiO ₂
<u>Oxygen</u>	53.26 %	O		
	<u>100.00 %</u>		<u>100.00 %</u>	= TOTAL OXIDE

Anexo 5: composición química de sílice con respecto al porcentaje peso (mineral data).

FeS₂
Molecular Weight = 119.98 gm

<u>Iron</u>	46.55 %	Fe
<u>Sulfur</u>	53.45 %	S
	<u>100.00 %</u>	

Anexo 6: composición química de pirita con respecto al porcentaje peso (mineral data).

Fe₂O₃
Molecular Weight = 159.69 gm

<u>Iron</u>	69.94 %	Fe	100.00 %	Fe ₂ O ₃
<u>Oxygen</u>	30.06 %	O		
	<u>100.00 %</u>		<u>100.00 %</u>	= TOTAL OXIDE

Anexo 7: composición química de hematita con respecto al porcentaje peso (mineral data).