

T-UES

1506

H557φ

2000

EJ. 2

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
FACULTAD DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA
INGENIERIA QUIMICA



faltan.
39

OPTIMIZACION DEL PROCESO DE FLOCULACION DE LA SILICE, CARACTERIZACION FISICOQUIMICA Y ALTERNATIVAS DE USO DEL SOLIDO OBTENIDO, UTILIZANDO COMO MATERIA PRIMA EL AGUA RESIDUAL DEL CAMPO GEOTERMICO DE BERLIN.

PRESENTADO POR

15101030

CARLOS BALTAZAR HERNANDEZ MURGA

15101030

JOSE ENRIQUE MENDOZA ALONZO

PARA OPTAR AL TITULO DE

INGENIERO QUIMICO



2000-4974

CIUDAD UNIVERSITARIA, DICIEMBRE DEL 2000

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR



RECTORA :

Dra. María Isabel Rodríguez

SECRETARIA GENERAL :

Licda. Lidia Margarita Muñoz Vela

FACULTAD DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA

DECANO :

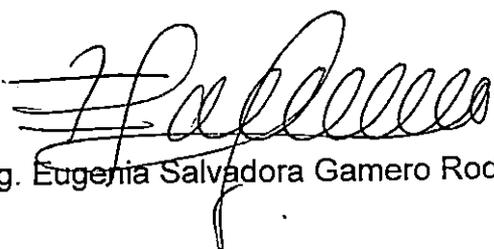
Ing. Alvaro Antonio Aguilar Orantes

SECRETARIO :

Ing. Saúl Alfonso Granados

ESCUELA DE INGENIERIA QUIMICA.

DIRECTORA :


Ing. Eugenia Salvadora Gamero Rodríguez



UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
FACULTAD DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA
ESCUELA DE INGENIERIA QUIMICA

Trabajo de graduación previo a la opción de:

INGENIERO QUIMICO

Título:

OPTIMIZACION DEL PROCESO DE FLOCULACION DE LA SILICE, CARACTERIZACION FISICOQUÍMICA Y ALTERNATIVAS DE USO DEL SOLIDO OBTENIDO, UTILIZANDO COMO MATERIA PRIMA EL AGUA RESIDUAL DEL CAMPO GEOTERMICO DE BERLIN.

PRESENTADO POR

CARLOS BALTAZAR HERNANDEZ MURGA
JOSE ENRIQUE MENDOZA ALONZO

Trabajo de Graduación aprobado por:

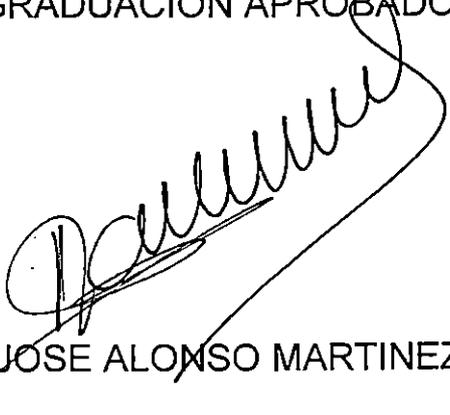
Coordinador: LIC. JOSE ALONSO MARTINEZ MALTEZ

Asesores: ING. BENJAMIN REINALDO MONGE RAMOS
ING. CARLOS EMILIO GUERRA GUERRERO
ING. JUAN RODOLFO RAMIREZ GUZMAN

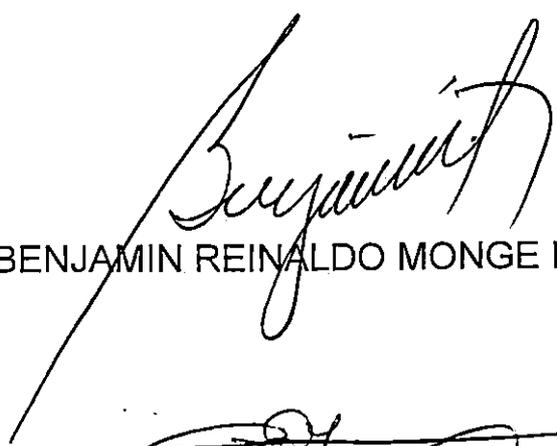
SAN SALVADOR, DICIEMBRE DEL 2000.

TRABAJO DE GRADUACION APROBADO POR:

COORDINADOR :


LIC. JOSE ALONSO MARTINEZ MALTEZ

ASESOR :

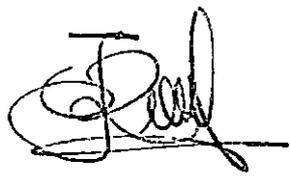

ING. BENJAMIN REINALDO MONGE RAMOS

ASESOR :


ING. CARLOS EMILIO GUERRA GUERRERO

ASESOR




ING. JUAN RODOLFO RAMIREZ GUZMAN

AGRADECIMIENTO

Los ponentes del presente trabajo de graduación patentizan su sincero agradecimiento a Geotérmica Salvadoreña, S.A de C.V. (GESAL) por su cooperación en la realización del mismo. Y de manera muy especial a la Gerencia de Estudios y Evaluación.

Así como su agradecimiento al personal del Laboratorio Químico y de la Planta Geotérmica de Berlín.

De igual manera dejan constancia de su reconocimiento a nuestro Cuerpo Asesor por su dedicado empeño y colaboración, especialmente al Ing. Benjamín Reinaldo Monge Ramos por su apoyo y entrega incondicional.

AGRADECIMIENTOS ESPECIALES

GEOTÉRMICA SALVADOREÑA, S.A de C.V.

GERENTE GENERAL

Ing. José Antonio Rodríguez Rivas

GERENTE DE ESTUDIOS Y EVALUACIÓN

Ing. Julio Alberto Guidos Pineda

GERENTE DE PLANTA GEOTÉRMICA DE BERLÍN

Ing. Mario Ernesto Avila Sandoval

PERSONAL DE APOYO:

Ing. Armando Rugamas

Ing. Emilio Guerra Guerrero

Lic. Elizabeth de Henríquez

Lic. Ulises Rodríguez

Lic. Roberto Renderos

Lic. Jeanette Ascencio

Sr. Arnoldo Pérez

Sr. Joaquín Morales

Sr. Noé Maravilla

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR

ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA

Ing. Tania Torres Rivera

Ing. Eugenia Gamero

Lic. José Alonso Martínez Maltez

Sra. Sandra Lorena Recinos

Sr. Juan Rodolfo Mendoza

Sr. Oscar Alfredo Morán Flores

Centro de Investigaciones Atómicas y Nucleares – Universidad de El Salvador

Ing. Ramón Portillo

Lic. Aída Isabel Santana de Zamora

ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL

ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA

DEDICATORIA

Dedico con mucho orgullo y agradecimiento, este fruto de mi esfuerzo:

A mis padres:

**Zoila Elba Murga de Hernández
Francisco Abel Hernández Hidalgo**

Por darme la vida, su educación, amor, respeto, confianza y apoyo en todo momento de mi formación académica, moral, espiritual y académica, a ellos, que han caminado junto a mí ya que su esfuerzo no ha sido en vano.

A mis Hermanos:

**Francisco Abel
Raúl Ernesto
José Emmanuel**

Por soportarme en todos los momentos y ayudarme a salir adelante cuando más los necesite.

A mi Tía Madrina:

Berta Alicia Barillas

Quien ha dado su vida, cariño y dedicación para hacer de mí un hombre honesto y respetuoso de mis semejantes.

A la memoria de mi Tío y Abuelos:

**Carlos Murga Barillas
Carlos Murga Alfaro
Abel Hernández Bruno**

Por sus consejos y sugerencias durante toda mi vida, por su presencia perpetua en mi pensamiento, que ha sido fuente de perseverancia para alcanzar mis metas.

A mi padrino:

Benjamín Reinaldo Monge Ramos

Por su dedicación, desvelos, consejos, apoyo y entrega incondicionales.-

A mis **Amigos, Profesores y familiares** que de una u otra forma han contribuido a mi formación profesional.

Y muy especialmente a la **Virgen María "Reina del Universo"** por su auxilio en todo momento, particularmente los más difíciles en los que ha sido mi aliento y consuelo.

Carlos Baltazar

DEDICATORIA

A Dios Todopoderoso por guiarme en todo momento, por iluminar mis pensamientos y darme sabiduría.

Con especial cariño y agradecimiento a mis padres: Enrique Mendoza y Milagro de Mendoza, por darme un buen ejemplo, por su amor, consejos y apoyo durante toda mi vida.

A mi hermano William, por creer en mi esfuerzo y brindarme su apoyo y comprensión.

A mis profesores, que han contribuido en mi formación académica.

A mis compañeros de estudio y amigos, por su amistad sincera y por compartir los pequeños y grandes momentos.

José Enrique Mendoza

RESUMEN

El presente estudio consta de 11 partes en las cuales se resume los aspectos más importantes del quehacer Geotérmico en El Salvador y la investigación de campo desarrollada para determinar las condiciones a las cuales realizar la remoción de la Sílice por el proceso de Floculación.

Se describen generalidades sobre Geotermia, que incluyen conceptos básicos y herramientas científicas utilizadas para la determinación del potencial y ubicación de un Campo Geotérmico, así como una descripción del Recurso Geotérmico disponible en El Salvador.

En la descripción del Campo Geotérmico de Berlín se indican aspectos geológicos y estructurales importantes, así como una cuantificación y caracterización química de sus aguas residuales. Además se describe el proceso de generación de energía eléctrica, que se desarrolla en esta planta.

Se detallan aspectos físicos y químicos de la Sílice en los que se incluyen sus diferentes fases características, solubilidad y temperatura de saturación para poder comprender el proceso de depositación de este mineral.

Se ha documentado además aspectos importantes sobre los procesos de floculación y coagulación, listando los floculantes que pueden ser utilizados en la remoción de la Sílice. De éstos se han seleccionado los que técnica y económicamente proporcionan las mejores características de remoción para luego realizar un ensayo y seleccionar entre ellos el mejor. De esta manera poder establecer las condiciones a las cuales es posible realizar el proceso de floculación de la Sílice con el floculante seleccionado y garantizar una buena disposición de esta agua mediante su reinyección en frío en el pozo TR-11A.

Luego de realizado el tratamiento y analizado los resultados obtenidos se ha determinado una concentración de Ca(OH)_2 que se sugiere dosificar a las aguas residuales para reducir la concentración de Sílice, de tal manera que no produzca problemas de incrustación en el reservorio. Se ha evaluado la posibilidad de que ocurra una incrustación debida a la Calcita generada por concentración de Calcio remanente en el sobrenadante, luego del tratamiento.

ÍNDICE

CONTENIDO	PAG.
INTRODUCCIÓN.....	i
I. GENERALIDADES DE LA GEOTERMIA.....	1
A. ORÍGENES DE LA ENERGÍA GEOTÉRMICA.....	1
B. FUNDAMENTOS GENERALES DE LA GEOTERMIA.....	4
1. FUENTE DE CALOR MAGMÁTICO.....	4
2. ZONA DEL RESERVORIO.....	4
3. ALIMENTACIÓN (RECARGA).....	5
4. CAPA SELLO.....	5
5. BASAMENTO.....	5
C. FORMA DE EXTRACCIÓN DE LA ENERGÍA GEOTÉRMICA.....	6
D. EXPLORACIÓN GEOTÉRMICA.....	7
E. TIPOS DE POZOS GEOTÉRMICOS.....	8
1. DE GRADIENTE.....	8
2. DE TESTIGO CONTINUO.....	8
3. EXPLORATORIO DE MÚLTIPLE PROPÓSITO.....	8
4. EXPLORATORIO PROFUNDO.....	9
5. POZOS DE EXPLOTACIÓN.....	9

F.	CONDICIONES GEOLÓGICAS DE EL SALVADOR.....	11
G.	EVALUACIÓN DEL RECURSO GEOTÉRMICO EN EL SALVADOR.....	14
II.	DESCRIPCIÓN DEL CAMPO GEOTÉRMICO DE BERLÍN.....	17
A.	UBICACIÓN.....	17
B.	ESTUDIOS GEOQUÍMICOS.....	20
1.	GEOQUÍMICA DE AGUAS.....	20
2.	GEOQUÍMICA DE GASES.....	22
C.	COMPOSICIÓN QUÍMICA DE LAS AGUAS DEL RESERVORIO.....	26
D.	EVOLUCIÓN DE AGUAS DE REINYECCIÓN.....	27
E.	EFFECTOS DE LA REINYECCIÓN.....	27
F.	MODELO GEOQUÍMICO CONCEPTUAL.....	29
G.	LOCALIZACIÓN DE POZOS PRODUCTORES Y REINYECTORES.....	34
H.	CUANTIFICACIÓN DEL AGUA RESIDUAL GENERADA EN EL CAMPO GEOTÉRMICO DE BERLÍN.....	36
I.	PERFILES TÍPICOS DE TEMPERATURA.....	38

J.	DESCRIPCIÓN DEL PROCESO DE EXTRACCIÓN Y GENERACIÓN.....	41
III.	QUÍMICA DE LA SÍLICE.....	45
A.	FASES CRISTALINAS DE LA SÍLICE.....	45
1.	ESTRUCTURA DEL LA SÍLICE FASE CUARZO.....	46
2.	ESTRUCTURA DE LA TRIDIMITA.....	48
3.	ESTRUCTURA DE L A CRISTOBALITA.....	49
4.	FASE CALCEDONITA.....	50
5.	FASE AMORFA DE LA SÍLICE.....	50
B.	PROPIEDADES QUÍMICAS DE LA SÍLICE.....	52
C.	SISTEMA SÍLICE – AGUA.....	52
D.	SOLUCIONES DE SÍLICE.....	53
E.	FASES EN EL SISTEMA SÍLICE – AGUA.....	53
F.	SOLUBILIDAD DE LA SÍLICE.....	54
IV.	DEPOSITACIÓN DE LA SÍLICE.....	59
A.	CONSIDERACIONES TERMODINÁMICAS DE DEPOSITACIÓN DE LA SÍLICE.....	59
1.	TEMPERATURA DE SATURACIÓN DE LA SÍLICE (TSS).....	62

B.	ASPECTOS CINÉTICOS DE DEPOSITACIÓN DE LA SÍLICE.....	63
1.	DEPOSITACIÓN COLOIDAL.....	65
V.	PROCESO DE COAGULACIÓN Y FLOCULACIÓN.....	69
VI.	COAGULACIÓN Y FLOCULACIÓN EN EL TRATAMIENTO QUÍMICO DE AGUAS GEOTÉRMICAS DE DESECHO.....	72
VII.	PROCESOS DE SEPARACIÓN DE SÍLICE.....	75
A.	INTERCAMBIO IÓNICO.....	75
B.	PRECIPITACIÓN.....	76
1.	REMOCIÓN DE LA SÍLICE POR EL PROCESO DE ABLANDAMIENTO EN FRÍO.....	76
2.	REMOCIÓN DE LA SÍLICE POR EL PROCESO DE ABLANDAMIENTO EN CALIENTE.....	78
3.	PROCESO DE ABLANDAMIENTO CON CAL – CARBONATO DE SODIO.....	78
VIII.	DESARROLLO Y RESULTADOS OBTENIDOS EN LA ETAPA EXPERIMENTAL.....	80
A.	ESTUDIO DE LA CINÉTICA DE POLIMERIZACIÓN DE LA SÍLICE.....	81
1.	OBTENCIÓN DE LA ECUACIÓN CINÉTICA APLICANDO ANÁLISIS DE REGRESIÓN LINEAL MÚLTIPLE A LOS DATOS EXPERIMENTALES.....	89

B.	EXPERIMENTACIÓN DEL USO DE FLOCULANTES EN LA REMOCIÓN DE SÍLICE DEL AGUA GEOTÉRMICA RESIDUAL, DETERMINACIÓN DEL FLOCULANTE QUE PROPORCIONE LOS MEJORES RESULTADOS.....	64
1.	ANÁLISIS ESTADÍSTICO DEL EXPERIMENTO DE DETERMINACIÓN DEL FLOCULANTE QUE PROPORCIONE LOS MEJORES RESULTADOS.....	97
C.	DETERMINACIÓN DE LAS CONDICIONES A LAS CUALES REALIZAR EL PROCESO DE FLOCULACIÓN CON EL FLOCULANTE IDENTIFICADO EN LA FASE ANTERIOR.....	101
1.	ANÁLISIS ESTADÍSTICO DEL EXPERIMENTO DE OPTIMIZACIÓN DEL PROCESO DE FLOCULACIÓN DE LA SÍLICE UTILIZANDO HIDRÓXIDO DE CALCIO COMO FLOCULANTE.....	105
D.	EXTRACCIÓN DE MUESTRA DEL LODO FORMADO POR EL PROCESO DE FLOCULACIÓN PARA LA REMOCIÓN DE SÍLICE DEL AGUA GEOTÉRMICA RESIDUAL.....	115
IX.	CARACTERIZACIÓN FÍSICOQUÍMICA. RESULTADOS DE LOS ANÁLISIS DE DIFRACCIÓN Y FLUORESCENCIA DE RAYOS X.....	117
A.	RESULTADOS DE ANÁLISIS DE DIFRACCIÓN DE RAYOS X.....	117
B.	RESULTADOS DE ANÁLISIS DE FLUORESCENCIA DE RAYOS X.....	118

X.	ALTERNATIVAS DE USO DEL LODO OBTENIDO OBTENIDO CONSIDERANDO LOS RESULTADOS DEL ANÁLISIS REALIZADO EN LA ETAPA DE CARACTERIZACIÓN FÍSICOQUÍMICA DEL LODO.....	119
A.	RESULTADOS DE LA EXPERIMENTACIÓN DEL USO DEL MATERIAL OBTENIDO PARA LA FABRI- CACIÓN DE LADRILLO REFRACTARIO.....	119
B.	RESULTADOS DE LA EXPERIMENTACIÓN DEL USO DEL MATERIAL OBTENIDO COMO AISLANTE TÉRMICO.....	121
XI.	INCRUSTACIÓN DE CALCITA.....	125
XII.	CONCLUSIONES.....	130
XIII.	RECOMENDACIONES.....	132
XIV.	BIBLIOGRAFÍA.....	134
XV.	GLOSARIO.....	138
XVI.	ANEXOS.....	143

ANEXO 1. TANQUE LABERÍNTICO PARA LA POLIMERIZACIÓN
DE LA SÍLICE

ANEXO 2. SISTEMA DE MANEJO DE AGUAS RESIDUALES HACIA
REINYECCIÓN EN EL POZO TR-11A

ANEXO 3. PROCEDIMIENTO PARA ANÁLISIS DE SÍLICE
MONOMÉRICA

ANEXO 4. GRÁFICAS OBTENIDAS DEL ANÁLISIS DE
DIFRACCIÓN DE RAYOS X

ANEXO 5. PRUEBAS DE CONDUCTIVIDAD TÉRMICA

ANEXO 6. RESULTADOS DE PROBABILIDAD DE INCRUSTACIÓN DE CALCITA
POR MEDIO DEL SOFTWARE WATCH 3

ANEXO 7. NORMAS DE DIMENSIONES DE LADRILLOS REFRACTARIOS

ÍNDICE DE FIGURAS

	PAG.
1. Esquema Genérico de un Campo Geotérmico.....	2
2. Esquema de las doce Placas Tectónicas de la tierra.....	3
3. Estructura interna de la Tierra.....	4
4. Estructura de un Campo Geotérmico.....	6
5. Diseño general de construcción utilizado para Pozos (Vertical y direccionado).....	10
6. Ubicación de El Salvador con relación a la Placa de Cocos y la placa del Caribe.....	12
7. Campos Termales y áreas de interés Geotérmico de El Salvador.....	16
8. Ubicación de Fuentes y Fumarolas.....	18
9. Ubicación de pozos Geotérmicos.....	19
10. Diagramas ternarios de $Cl-SO_4-HCO_3$ para identificación de manifestaciones superficiales.....	21
11. Contenidos relativos de los gases Nitrógeno (N_2), Helio (He) y Argón (Ar).....	23
12. Distribución del contenido de H_2 para el área de Berlín.....	25
13. Modelo Conceptual.....	30
14. Diagrama Entalpía-Cloruros.....	32
15. Extensión del Campo Geotérmico de Berlín.....	33
16. Mapa de ubicación de Pozos perforados en el Campo Geotérmico de Berlín...	35
17. Perfil de Presión y temperatura para un pozo Reinyector en caliente.....	40
18. Perfil de Presión y temperatura para un pozo Reinyector en Frío TR-11A	41
19. Esquema general de un separador ciclónico para Geotérmica.....	42
20. Diagrama esquemático Simplificado del Proceso general de Generación Eléctrica.....	44
21. Estructura Cristalina del Cuarzo (alto y bajo).....	47
22. Estructura de la Tridimita.....	48
23. Estructura de la Cristobalita.....	49

24.	Curva de Solubilidad de las diversas formas de SiO ₂	56
25.	Curva de solubilidad del Cuarzo Cristobalita y Sílice Amorfa.....	58
26.	Solubilidad del Cuarzo y Sílice Amorfa.....	61
27.	Relación de solubilidad / pH Calculada.....	64
28.	Potencial Zeta (δ).....	72
29.	Sistema de tanques de polimerización instado en la plataforma del pozo TR-11.	81
30.	Centro de operaciones ubicado en la plataforma del pozo TR-11.....	82
31.	Equipo portátil para análisis de Sílice monomérica.....	83
32.	Fotografía de barril plástico utilizado para estudio Cinético de polimerización natural de la Sílice.....	84
33.	Curva de resultados de análisis de sílice Monomérica obtenidos en el estudio realizado 08/08/00 a las 12:12 p.m.....	86
34.	Curva de resultados de análisis de sílice Monomérica obtenidos en el estudio realizado 09/08/00 a las 9:04 a.m.....	86
35.	Curva de resultados de análisis de sílice Monomérica obtenidos en el estudio realizado 15/08/00 a las 7:46 a.m.....	87
36.	Curva de resultados de análisis de sílice Monomérica obtenidos en el estudio realizado 08/08/00 a las 3:45 p.m.....	87
37.	Curva de Sílice Monomérica vrs. Tiempo con los datos experimentales obtenidos el 08/08/00 a las 12:12 p.m.....	89
38.	Gráfico de Residuos vrs, Valores ajustados.....	94
39.	Tanque Laberíntico del Sistema de Polimerización de la plataforma del pozo TR-11.....	96
40.	Baldes y equipo de agitación utilizado en la etapa experimental.....	102
41.	Forma en que se realizó el baño María a la entrada del tanque laberíntico del sistema de tratamiento de la plataforma del pozo TR-11.....	102
42.	Aspecto del agua geotérmica después del tratamiento con Hidróxido de Calcio.....	104
43.	Intervalos de Confianza.....	110
44.	Intervalos del Factor Tiempo.....	110
45.	Gráfica de probabilidad Normal de los Residuos.....	114

46.	Gráfica de Residuos en Función de los Valores Ajustados de Sílice Total.....	114
47.	Dosificación de Hidróxido de Calcio a 3 g/L de agua geotérmica para obtener una muestra sólida.....	116
48.	Equipo de moldeo utilizado para fabricar ladrillos refractarios.....	120
49.	Molde para la elaboración de refractarios.....	120
50.	Distribución uniforme del material seco en el molde del ladrillo.....	122
51.	Prensado del material para formar ladrillo.....	123
52.	Aspecto del ladrillo previo al desmolde.....	123
53.	Ladrillos enviados a prueba de medición del coeficiente de conductividad térmica luego de 24 h de reposo.....	124
54.	Equipo de medición del coeficiente de Conductividad Térmica en los laboratorios de Ingeniería Mecánica de la UCA.....	124
55.	Gráfico de sílice Total vrs. Dosificación de Flocualnte.....	128
56.	Grafico de Costo vrs. Dosificación.....	129

ÍNDICE DE TABLAS

		PAG.
1.	Generación de Potencia Geotérmica (MW) a Nivel Mundial.....	13
2.	Estimación del Potencial de Recursos Geotérmicos en El Salvador.....	15
3.	Geotemperaturas calculadas para Berlín.....	22
4.	Composición química del Reservorio.....	24
5.	Análisis Químico del Fluido Geotérmico a diversas profundidades para el Campo Geotérmico de Berlín.....	26
6.	Datos Generales para los pozos profundos del Campo Geotérmico de Berlín.....	34
7.	Datos para Pozos Productores.....	36
8.	Datos para Pozos Reinyectores.....	37
9.	Solubilidad de la Sílice amorfa.....	57
10.	Solubilidad de la Sílice a varias Temperaturas, en el Agua y Ácido.....	57
11.	Resultados del Estudio Cinético.....	85
12.	Datos de Sílice Mnomérica transformado a Acido Silícico.....	88
13.	Resultados de Análisis de Varianza.....	93
14.	Listado de Floculantes Utilizables en la remoción de la Sílice.....	95
15.	Resultados obtenidos en la prueba de floculante.....	97
16.	Resultados del Análisis del sobrenadante.....	97
17.	Análisis de Varianza.....	99
18.	Resultados de análisis de Sílice total en el tiempo y Calcio Remanente presente en el sobrenadante.....	103
19.	Definición de factores y niveles considerados en el experimento.....	105
20.	Resltados de los análisis de Sílice Total realizados al sobrenadante del agua tratada.....	106
21.	Análisis de Varianza para los datos de Sílice Total (ppm) en el Sobrenadante.....	109
22.	Análisis de Rango Múltiple para Sílice Total (pps) por Floculante.....	111
23.	Análisis de Rango Múltiple para Sílice Total (pps) por Tiempo min.....	112
24.	Resultados de Análisis del Lodo por el Método de Fluorescencia de rayos X.....	118
25.	Resultados del análisis por método de absorción atómica al sobrenadante del proceso de flocualcón con una dosificación de 3 g/L de Hidróxido de Calcio.....	127

INTRODUCCIÓN.

En El Salvador el proceso de explotación geotérmica es utilizado para generar únicamente energía eléctrica, sin que se hallan realizado estudios para promover otras formas de utilización no convencionales de este recurso. Sin embargo, es uno de los países que a nivel latinoamericano presenta una de las mejores y más modernas tecnologías para su aprovechamiento.

Todos los fluidos geotérmicos profundos contienen sustancias disueltas, producto de la interacción del agua con las rocas a las condiciones de elevada temperatura y presión prevalecientes en el reservorio. Durante la explotación de los Campos de Ahuachapán y Berlín, el fluido fluye a la superficie a través de los pozos que para tal fin se construyen, y la energía Cinética que posee este fluido es utilizada para producir energía eléctrica.

El vapor extraído es directamente inyectado a la turbina para realizar el ciclo de Carnott de generación de energía. El fluido geotérmico luego de ser utilizado es enfriado, disminuyendo así la solubilidad de la mayoría de sus componentes disueltos, por lo que existe la posibilidad de depositación de estas especies. Excepto para unos pocos casos aislados, en la explotación geotérmica únicamente dos compuestos químicos son responsables de causar incrustación: la Sílice (SiO_2) y Carbonato de Calcio (CaCO_3).

Esta depositación genera incrustación en las tuberías, dispositivos de evacuación y transporte del fluido, lo que produce efectos perjudiciales a la explotación. Las tuberías llegan a obstruirse y tienen que ser reemplazadas, los pozos de reinyección reducen su capacidad de absorción, los pozos productores y los desagües llegan a obstruirse y necesitan de una limpieza mecánica o química que podría generar con el tiempo problemas ambientales, además de no disponer de ese fluido para la generación.

La forma de evacuación de las aguas geotérmicas residuales utilizada en El Salvador en años anteriores, ha consistido en su descarga a través de una canaleta de concreto que lleva a éstas hacia el mar. Esto provoca una contaminación térmica debido a la

temperatura con que llegan a este lugar (58°C) y además una contaminación por los minerales presentes en el agua, algunos de los cuales están clasificados como tóxicos y peligrosos, como el Arsénico y el Boro. Aunado a esto, en el país se cuenta con normativas ambientales que regulan la actividades industriales, específicamente en lo que a desechos sólidos y a vertidos corresponde.

En la actualidad se está implementando el proceso de reinyección del agua residual en los campos geotérmicos de Ahuachapán y Berlín. Se ha comprobado que es la mejor forma y la más segura de disponer esta agua; además de proporcionar una recarga artificial al reservorio, se eliminan los problemas ambientales generados al disponer dichas aguas en superficie.

Para el proceso de reinyección en frío se hace necesario disminuir la concentración de los minerales disueltos y en especial de la Sílice, para evitar la incrustación en los dispositivos utilizados para esta operación.

El objetivo principal de este estudio es determinar las condiciones a las cuales se puede realizar el proceso de floculación de la Sílice, para disminuir su concentración en el agua residual. Para ello se ha ensayado previamente con los floculantes disponibles en el mercado nacional y seleccionando el que técnicamente proporcione los mejores resultados en cuanto a remoción.

Además, luego de realizar una caracterización fisicoquímica del lodo obtenido en el proceso de floculación se proponen alternativas de uso de dicho sólido.

I. GENERALIDADES DE LA GEOTERMIA

A. ORÍGENES DE LA ENERGÍA GEOTÉRMICA

La palabra Geotermia etimológicamente significa **calor terrestre**; en la práctica el término se refiere al aprovechamiento industrial del fluido geotérmico proveniente del subsuelo. El agua que se encuentra en el subsuelo es, en general de origen meteórico, es decir, agua lluvia que se infiltra a través de estructuras geológicas hasta grandes profundidades, se calienta y presuriza en **el reservorio geotérmico**. En la Figura 1 se muestra un esquema genérico de un Campo Geotérmico.

Dependiendo del estado físico del fluido geotérmico extraído del reservorio, este puede ser:

1. Agua dominante
2. Vapor dominante
3. Mezcla agua – vapor

La extracción del fluido en forma controlada, es la función principal de un pozo geotérmico; utilizar la presión y la energía que el vapor generado al despresurizarse el agua encerrada a una temperatura entre los 220 –230°C, es la función de un turbogenerador, o en términos más completos y usuales una planta o central geotérmica.

La Geofísica, aplicando sus diferentes técnicas ha mostrado que, en cualquier sitio de la corteza terrestre, la temperatura aumenta con la profundidad, existiendo por lo tanto un gradiente de temperatura o gradiente térmico, cuyo valor normal o de referencia, es de 0,0303°C/m. La tierra, de la superficie hacia el centro y de acuerdo al modelo dinámico vigente, estaría formada por la corteza, el manto o magma y el núcleo central.

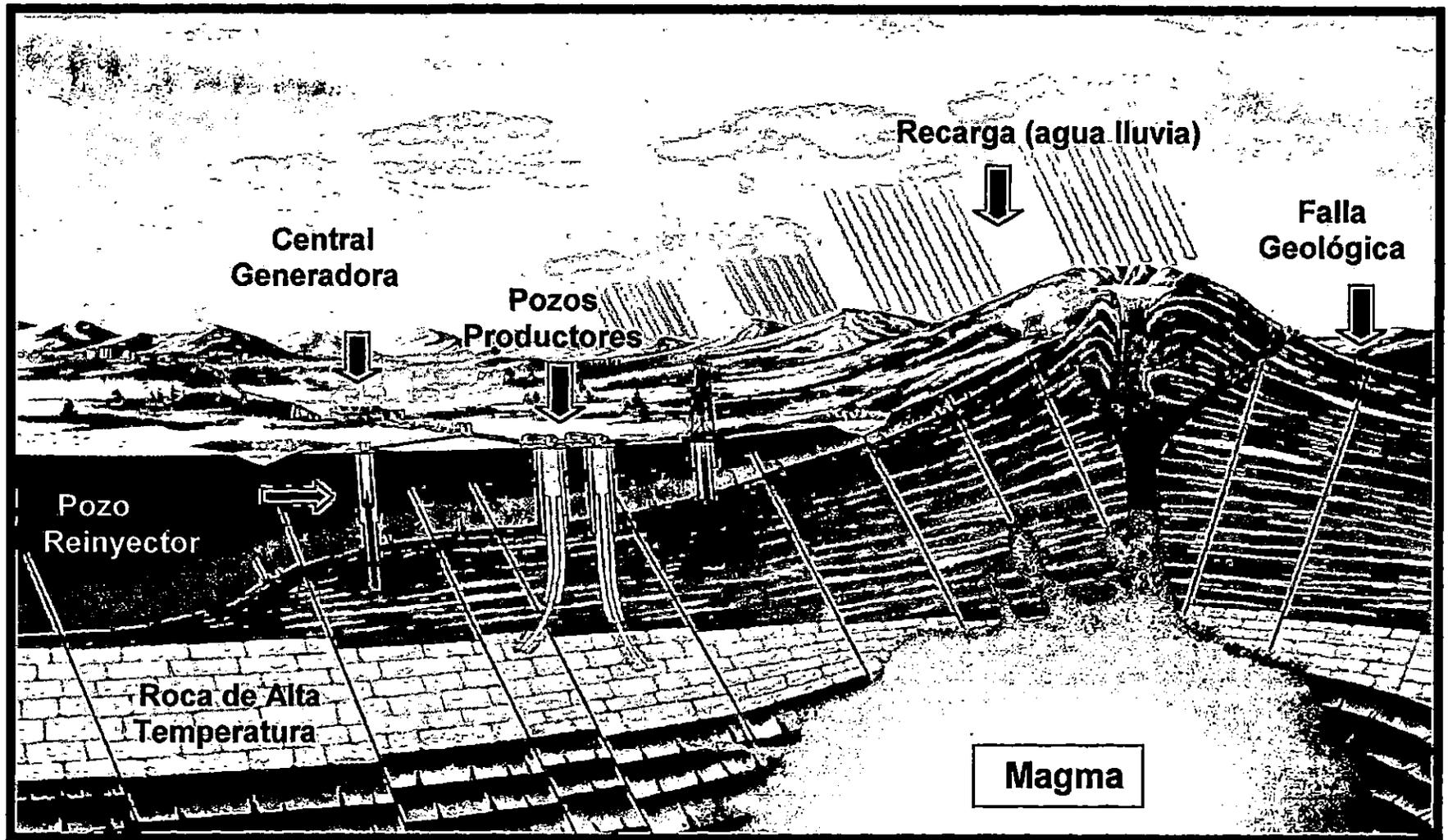


Figura 1. Esquema Genérico de un Campo Geotérmico.

La corteza está conformada por 12 placas rígidas que poseen libertad de movimiento sobre el manto (Figura 2). Este modelo presupone que las placas se mueven entre sí por corrientes convectivas que las hacen flotar y resbalar sobre el manto. Las juntas entre las diversas placas están representadas por dorsales medio oceánicas y por zonas de subducción, que son en general los medios naturales de escape o movimiento frecuente del magma y, consecuentemente focos de alta producción de calor terrestre.

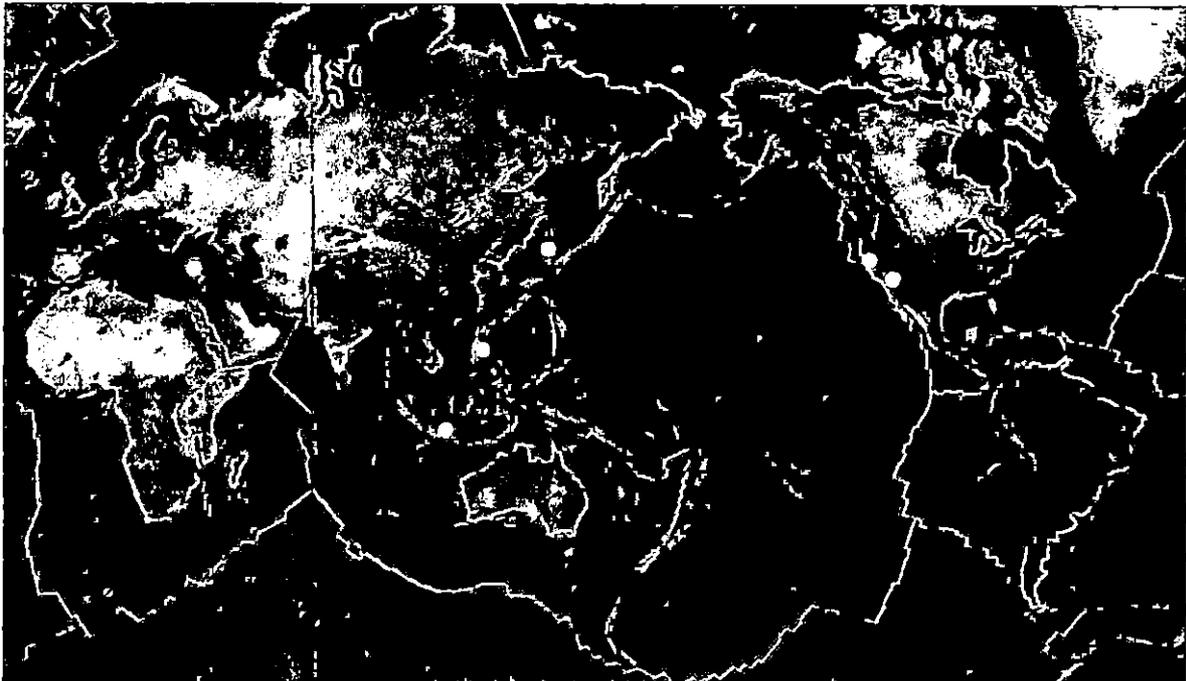


Figura 2. Esquema de las doce placas tectónicas de la tierra

En correspondencia con los continentes, la corteza tiene un espesor medio de 35 Km y bajo los océanos de 5 Km, con temperaturas en su base de 600-700°C y 150-200°C, respectivamente. Su densidad media es 2,7 g/cm³ y sus constituyentes predominantes son Silicio y Aluminio, estos datos son muy utilizados en las interpretaciones de prospección geotérmica. El valor medio del flujo de calor en superficie es 1,65 $\mu\text{cal}/\text{cm}^2\text{seg}$. El manto, que alcanzaría los 2.900 Km de espesor, tiene una densidad de 2,8 a 3,6 g/cm³, siendo la Sílice y el Magnesio sus principales constituyentes y cuyas temperaturas son del orden de 2.000°C (Figura 3).

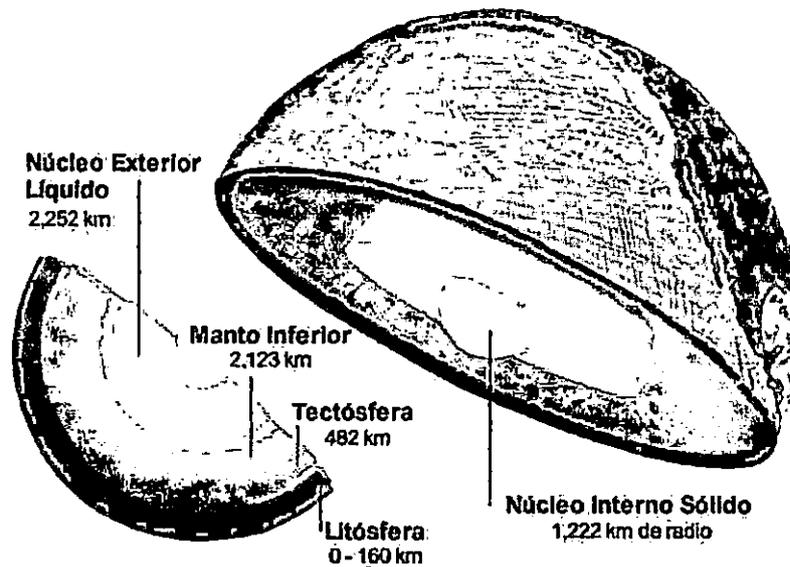


Figura 3. Estructura Interna de la Tierra

B. FUNDAMENTOS GENERALES DE LA GEOTERMIA

Un campo geotérmico (Figura 4) se encuentra estructurado por:

1. Fuente de Calor Magmático

Se encuentra a una profundidad de 5 a 15 Km abajo del reservorio y está constituida por porciones de magma en proceso de enfriamiento, emanando el calor por conducción, el cual reciben las rocas de un reservorio, calentando así el fluido geotérmico.

2. Zona del Reservorio

Es un estrato de rocas permeables, porosas y calientes. Normalmente alcanza varios cientos de metros de espesor, permitiendo el almacenamiento y circulación de fluidos en su interior agua y gases, a los cuales transmite su calor por convección, provocando que adquieran altas temperaturas y presiones. Para un reservorio las temperaturas de interés deben ser mayores que 230°C, cuando el objetivo es producir energía eléctrica;

si la temperatura es menor, el fluido geotérmico puede ser utilizado para usos no convencionales en los que se aprovecha como fuente de calor ya sea para calentar viviendas, secar granos u otros.

3. Alimentación (Recarga)

El fluido que se almacena en un reservorio para recibir el calor de las rocas es por lo general agua lluvia, que se infiltra en zonas aledañas al campo geotérmico (zona de recarga), a través de fallas geológicas o chimeneas de volcanes, hasta alcanzar grandes profundidades, adquiriendo así altas temperaturas y presiones, así como un alto contenido de sales y minerales disueltos producto del contacto con las rocas.

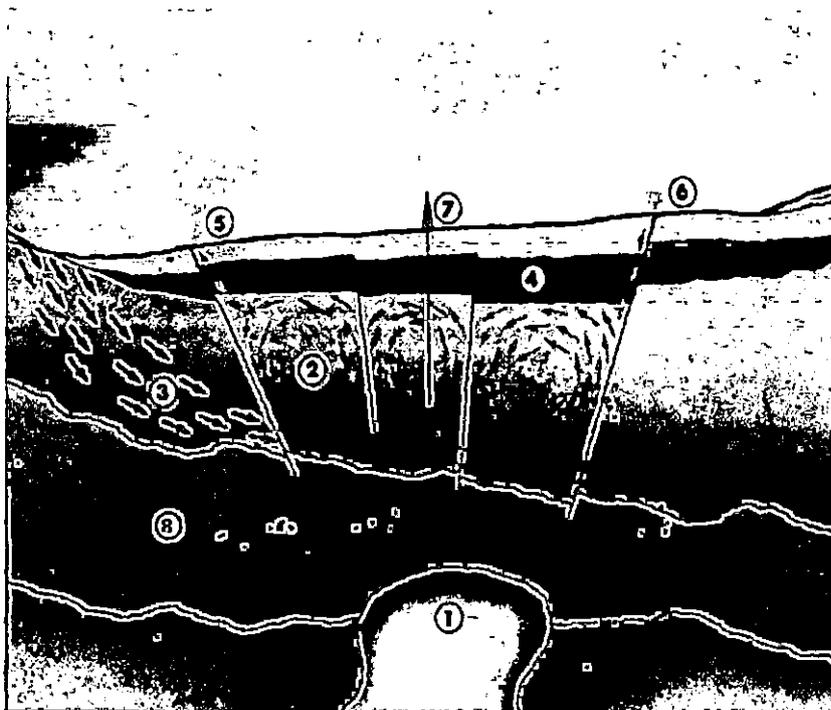
4. Capa Sello

Es el estrato más superficial, cuya parte superior está generalmente formada por materiales no compactos (permeables) y la parte inferior está formada por rocas impermeables, que impiden escapes directos de calor y de fluido caliente hacia la superficie.

5. Basamento

Este es un estrato impermeable que puede o no ser interceptado con la perforación. Es la base del reservorio que está en contacto con la fuente calórica. Existen campos geotérmicos en donde el techo de este estrato aún no ha sido identificado, lo cual es debido por una parte a que existe un límite tecnológico y económico para las profundidades que se pueden alcanzar en una perforación geotérmica. Estas profundidades generalmente son del orden de los 3 Km. Por otra parte, no es el objetivo perforar hasta alcanzar el techo de un basamento, excepto bajo propósitos especiales de investigación en un determinado campo.

El fluido (mezcla bifásica de agua y vapor) calentado por el magma y presurizado, el potencial de calor y la magnitud de una recarga de agua, son elementos que califican la importancia de un campo geotérmico.



1. Fuente de calor (Magma)
2. Zona del Reservorio (Roca permeable)
3. Alimentación o recarga (Agua meteórica)
4. Capa sello
5. Manifestación de vapor
6. Geysers
7. Perforación
8. Basamento

Figura 4. Estructura de un Campo Geotérmico

C. FORMA DE EXTRACCIÓN DE LA ENERGÍA GEOTÉRMICA

Al igual que el petróleo, el fluido geotérmico es un recurso existente a considerables profundidades, que sólo puede extraerse mediante pozos que se diseñan y perforan específicamente para ese propósito. Sin embargo, en el caso geotérmico hay que afrontar el problema de elevadas temperaturas, las cuales pueden llegar a ser tan altas como para fundir las herramientas utilizadas en la perforación petrolera, por lo que se utilizan materiales específicamente diseñados para las condiciones del sistema que se está perforando. La perforación es una de las etapas más costosas del proceso geotérmico y por esa razón se emplea un proceso gradual de evaluación de resultados técnicos que permita, paulatinamente, ir reduciendo los subsiguientes riesgos técnicos y financieros. En geotermia, este trabajo se aborda diseñando la exploración de una

región en 3 grandes etapas técnicas, sucesivamente condicionantes y de menor a mayor costo, las cuales son: reconocimiento, prefactibilidad y factibilidad.

D. EXPLORACIÓN GEOTÉRMICA

Es una fase muy importante, en el proceso de evaluación del recurso geotérmico, tanto en la etapa de reconocimiento como en la de prefactibilidad.

Al inicio de toda exploración geotérmica se emplean usualmente la geología (con sus ramas afines aplicadas a la geotermia como fotogeología, petrografía, hidrogeología, geovulcanología, etc.), y la geoquímica de superficie (cuantificación de especies químicas en los fluidos de: ausoles, fumarolas, fuentes de agua termal y no termal, incluyendo pozos domésticos; pronóstico de temperaturas profundas mediante geotermometría, técnicas isotópicas y otras) de tal manera que se puedan establecer correlaciones de isosalinidad para determinar si los fluidos provienen de un reservorio somero o de uno profundo y lograr definir un mapa del área con la mayor cantidad posible de información para la ubicación del reservorio geotérmico. La geofísica normalmente se agrega en el camino y comprende entre otras especialidades, la geoeléctrica (estudio de la resistividad del subsuelo), la gravimetría (comportamiento de la densidad), la magnetotelúrica (campos electromagnéticos naturales) y otras.

La correlación de toda la información producida por dichas disciplinas permite identificar en extensión y profundidad, cuales son las zonas que presentan condiciones de interés geotérmico, es decir donde está la zona de producción, la zona de recarga, las direcciones de movimiento de los fluidos, etc. delimitando las áreas y profundidades donde se ubicarán los pozos productores y reinyectores para la explotación del recurso geotérmico.

E. TIPOS DE POZOS GEOTÉRMICOS

La secuencia normal en una exploración, estos tipos de pozos con sus características principales son los siguientes:

1. De Gradiente

Usualmente en el rango de 30 a 150 metros de profundidad y unos 350 metros como máximo; diámetros pequeños en el rango de 2 a 4 pulgadas, se perfora con el fin principal de medir el gradiente de temperatura.

2. De Testigo Continuo

El fin principal de éste es estudiar en detalle la litología mediante un testigo "muestra de roca en forma de núcleo cilíndrico", implicando mayor complejidad y costo, aunque tengan similares dimensiones que los anteriores. Estos tipos de "pozos someros", obtenidos con equipos de perforación pequeños, se practica antes en la etapa inicial del reconocimiento geotérmico de una región o área.

Con el tiempo estos dos tipos de pozos mencionados anteriormente se hicieron uno sólo, el tipo 2 ampliando un poco el rango de diámetros involucrados y la profundidad, restringiendo a tramos el testigo continuo y conservando a medias el objetivo de medir el gradiente térmico. A este único tipo se le continuó llamando "de testigo continuo" por ser esto lo que comanda los costos y las dificultades técnicas.

3. Exploratorio de Múltiple Propósito

Múltiple propósito de exploración significa investigar litología, temperatura, permeabilidad, quimismo, etc. Son pozos con un agujero máximo en la parte superior de alrededor de 12 pulgadas y usualmente entre 400 a 500 metros de profundidad llegando a alcanzar los 600 a 700 metros como máximo. Se comenzaron a utilizar en la

medida que se incrementó la gama y la confiabilidad de estudios geocientíficos de superficie. Normalmente corresponden a la etapa de prefactibilidad geotérmica.

4. Exploratorio Profundo

Estos son pozos de mayores diámetros y profundidades (agujero inicial y final respectivamente de 26" y 8½", con 600 a 1.500 metros de profundidad; como referencia). En los tipos de completamiento y en los costos prácticamente no difieren de los pozos que se perforan para la explotación de un reservorio. Los objetivos y alcances investigativos para una identificación y evaluación directa de propiedades de los fluidos y de las rocas a esas profundidades hacen diferencia. Normalmente son perforados en la parte final de una etapa de prefactibilidad, tienen como fin principal interceptar un reservorio de calidad comercial. Estos pozos dan resultados útiles a los fines de una evaluación del potencial energético y de una delimitación de la zona de mayor interés para extraer el recurso.

5. Pozos de Explotación

Este grupo comprende los pozos de explotación, de reinyección y de propósitos especiales, estos últimos, en general, combinados. Las profundidades máximas de estos pozos son del orden de 3.000 metros, aunque en El Salvador se han realizado en el rango de 600 a 2.500 metros. (La Figura 5 muestra el diseño general para un pozo vertical y uno direccional perforados en el Campo Geotérmico de Berlín).

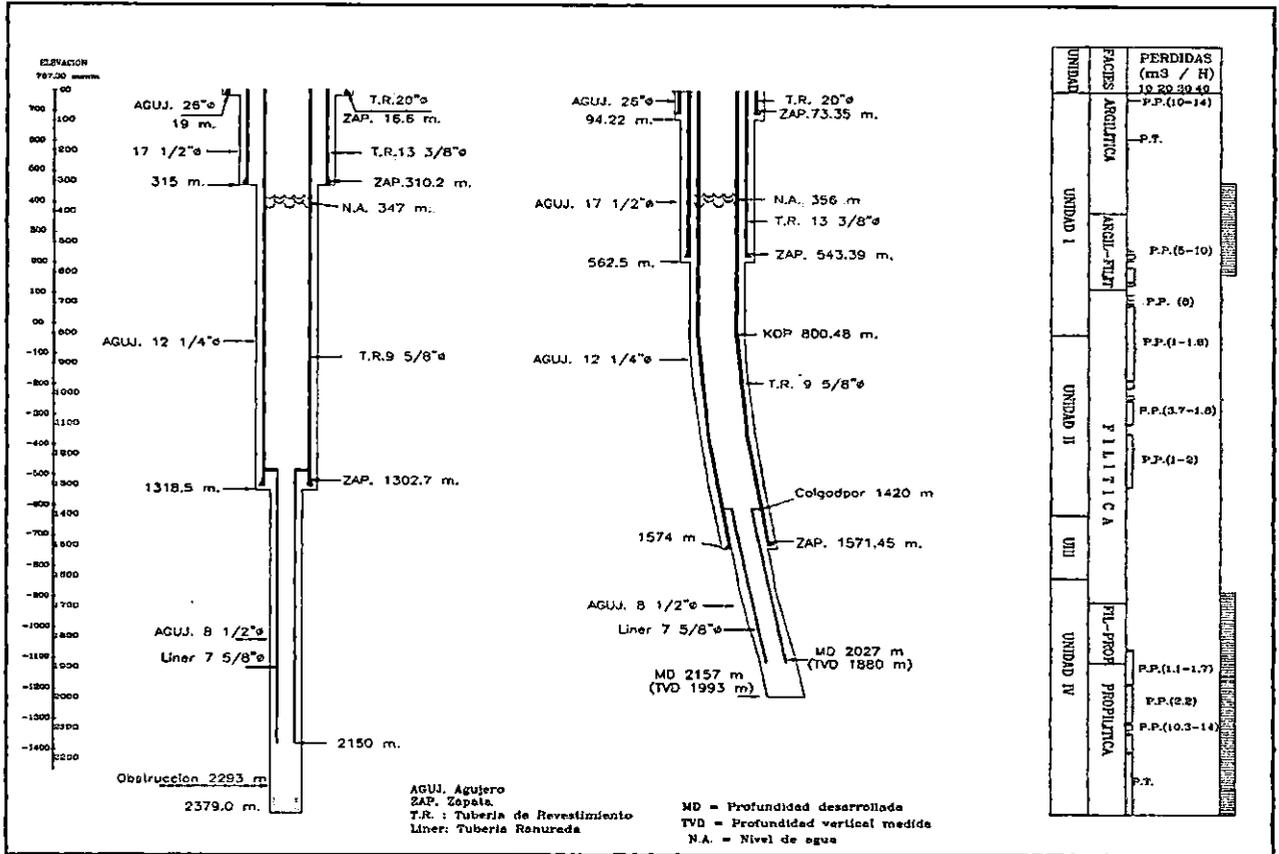


Figura 5. Diseño general de construcción utilizado para pozos (Vertical y Direccional)

El término "explotación" engloba no solamente la acción principal de producción (extracción del fluido), sino también el caso más general en que ésta puede ser combinada con reinyección (retorno al subsuelo del líquido residual obtenido al haber separado el vapor utilizable para impulsar un turbogenerador), y otros propósitos o necesidades propias de una utilización, tales como la expansión o delimitación del campo (en área y profundidad) o el perfeccionamiento en el manejo del mismo.

Algunas peculiaridades propias de cada uno de estos tipos de pozos son las siguientes:

a. Pozos de Producción

Reúnen las máximas exigencias en todo sentido. Si resultan ser no productivos o con déficit en la calidad comercial, lo cual no es extraño dentro de la gran heterogeneidad

de los reservorios geotérmicos, pueden eventualmente servir como reinyectores, si su ubicación relativa dentro del campo lo permite. A veces se hacen pequeñas modificaciones al interior del pozo para adecuarlo al nuevo uso. En otros casos, se utilizan como pozos de monitoreo de la presión y/o temperatura del reservorio.

b. Pozos de Reinyección

Se diseñan específicamente con relación a la profundidad de la zona permeable y el diámetro del agujero, conforme al caudal de agua separada a reinyectar; pero su diseño mecánico satisface las mismas exigencias que un pozo productor. De hecho en algunos casos un pozo que fue previsto para reinyección puede operarse como productor. La profundidad total depende de si el esquema previsto de reinyección es arriba, al mismo nivel o por abajo del reservorio principal.

c. Pozos de Propósitos Especiales

Cuando se hacen para verificar la extensión del reservorio en profundidad, pueden eventualmente ser más profundos que los pozos productores perforados en la zona; pero su completamiento mecánico sigue siendo esencialmente el mismo ya que requieren ser previstos como para operar en una eventual producción.

F. CONDICIONES GEOLÓGICAS DE EL SALVADOR

En términos de los procesos térmicos terrestres, El Salvador es una de las regiones tectónicamente más activas de Centro América. Esta parte del continente se encuentra entre la placa de Cocos y la placa del Pacífico, del lado del Océano Pacífico; y la placa del Caribe, del lado del Océano Atlántico (Figura 6), ocurriendo un proceso de subducción en el que la placa de Cocos desaparece por debajo del área de Centro América. De esta manera se originan grandes extensiones con elevaciones topográficas, las cuales son responsables de la formación de las cadenas volcánicas y

fallas geológicas a lo largo de la región, que son la fuente de potencial energético geotérmico. Este fenómeno es continuo, lo que hace pensar que constituye una fuente casi inagotable de condiciones propicias a la existencia de campos geotérmicos. El Salvador es cruzado de Este a Oeste por dos principales sistemas volcánicos, localizándose una estructura de graben entre ellas.

La Cadena Volcánica Norte se considera de la Era Terciaria y permanece inactiva desde tiempos geológicos. La Cadena Volcánica Sur se originó en la Era Cuaternaria y permanece activa en algunos lugares. Las bajas y medias temperaturas ($< 200^{\circ}\text{C}$) de los sistemas hidrotermales convectivos se encuentran en ambos sistemas volcánicos; pero principalmente en el sistema Norte. Los sistemas hidrotermales convectivos de alta temperatura ($> 200^{\circ}\text{C}$) se han encontrado principalmente en la Cadena Volcánica Sur.

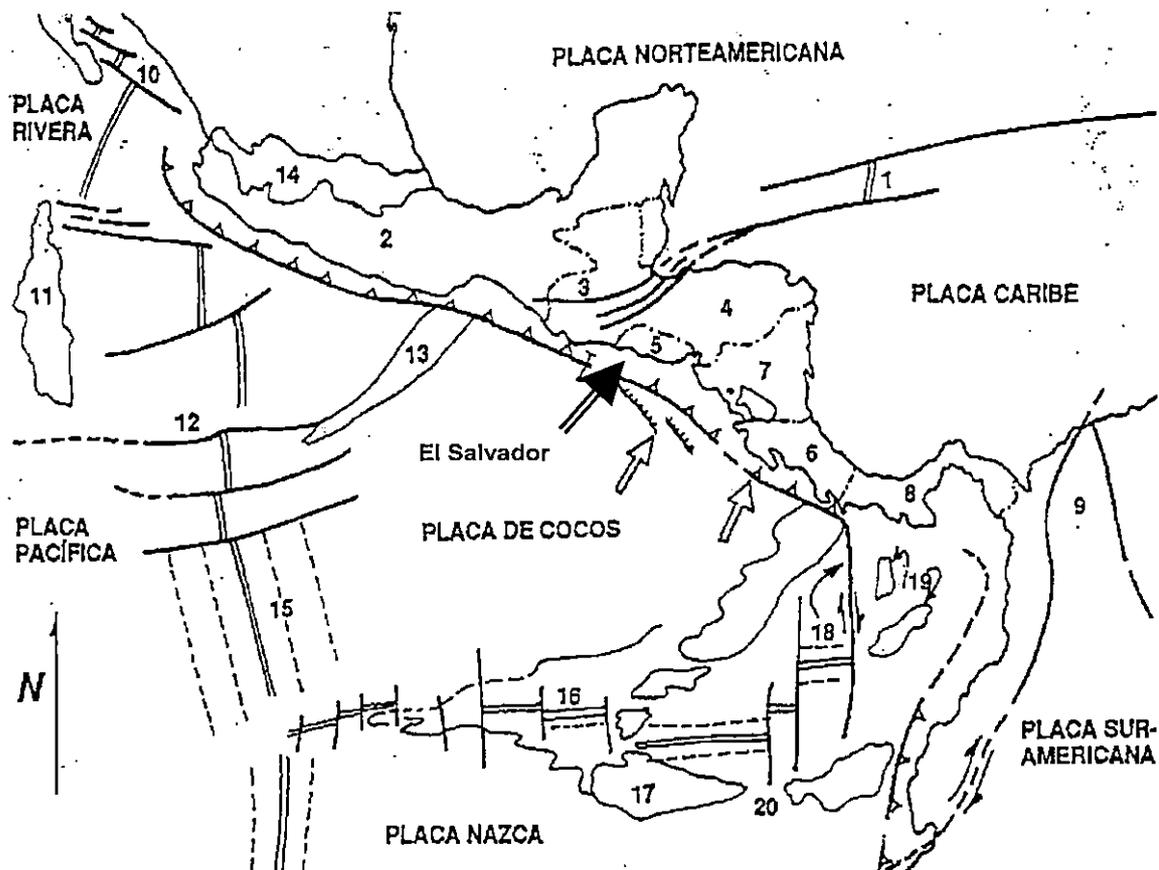


Figura 6. Ubicación de El Salvador con relación a la placa de Cocos y la placa del Caribe.

Tabla 1. Potencia Geotérmica Instalada a Nivel Mundial (MWe).

País	1990	1995	2000
1. USA	2.774,600	2.816,700	3.395
2. Filipinas	891,000	1.227,000	1.978
3. México	700,000	753,000	960
4. Italia	545,000	631,700	856
5. Japón	214,600	413,705	600
6. Indonesia	144,750	309,750	1.080
7. Nueva Zelanda	283,200	286,000	440
8. El Salvador	95,000	105,000	165
9. Costa Rica	0,000	55,000	170
10. Islandia	44,600	49,400	nd
11. Kenia	45,000	45,000	nd
12. Nicaragua	350,000	35,000	nd
13. China	19,200	28,780	81
14. Turquía	20,600	20,600	125
15. Rusia	11,000	11,000	110
16. Portugal	3,000	5,000	nd
17. Francia	4,200	4,200	nd
18. Argentina	0,670	0,670	nd
19. Tailandia	0,300	0,300	nd
20. Australia	0,000	0,170	nd
21. Grecia	0,000	0,000	nd
TOTAL	5.831,720	6.797,975	9.960

nd: no disponible.

G. EVALUACIÓN DEL RECURSO GEOTÉRMICO EN EL SALVADOR

De acuerdo con estudios realizados, tales como: composición química de los fluidos encontrados en las áreas geotérmicas y temperaturas profundas, se obtuvieron resultados que presentan un estimado total del potencial geotérmico disponible en El Salvador de 644 ± 248 MWe para un período de 25 años. Este potencial geotérmico, aún no ha sido evaluado completamente, pero se está trabajando en una metodología para la realización de esta actividad y otras etapas contempladas dentro del desarrollo geotérmico.

El Salvador ocupa a nivel mundial el octavo lugar en cuanto a la utilización de la tecnología apropiada para explotar el recurso geotérmico con propósitos de generación de electricidad (Tabla 1), contando con 19 áreas geotérmicas identificadas, de las cuales se ha evaluado el potencial geotérmico para 11 de ellas (Tabla 2) las ocho restantes son: Chipilapa (Ahuachapán), Metapán (Santa Ana), Ciudad Arce, Chanmico (La Libertad), Suchitoto (Cuscatlán), Guayabo (Cabañas), Agua Caliente (Chalatenango), Carolina, y Santa Rosa de Lima (La Unión).

Un mapa geotérmico preliminar, tomando como base la información geológica y geotérmica existente, muestra los campos termales y áreas de interés geotérmico distribuidos en todo el territorio (Figura 7). Con esta información se investigó con mayor detalle los campos geotérmicos de Ahuachapán y Berlín, dejando para etapas posteriores la investigación de la factibilidad de los campos de San Vicente, Coatepeque, Chinameca y Santa Rosa de Lima.

Tabla 2. Estimación del Potencial de Recursos Geotérmicos en El Salvador

Sitio No	Sitios Geotérmicos	Potencia posible (Mwe)	Mínima potencia (MWe)
1	Ahuachapán	100 ± 20	50
2	Berlin	119 ± 50	69
3	San Vicente	117 ± 56	61
4	Chinameca	76 ± 30	46
5	Coatepeque	70 ± 26	44
6	Chambala	26 ± 9	17
7	Caluco	15 ± 9	6
8	San Lorenzo	16 ± 10	6
9	Conchagua	13 ± 7	6
10	Chilanguera	11 ± 6	5
11	Olomega	11 ± 7	4
		TOTAL	314

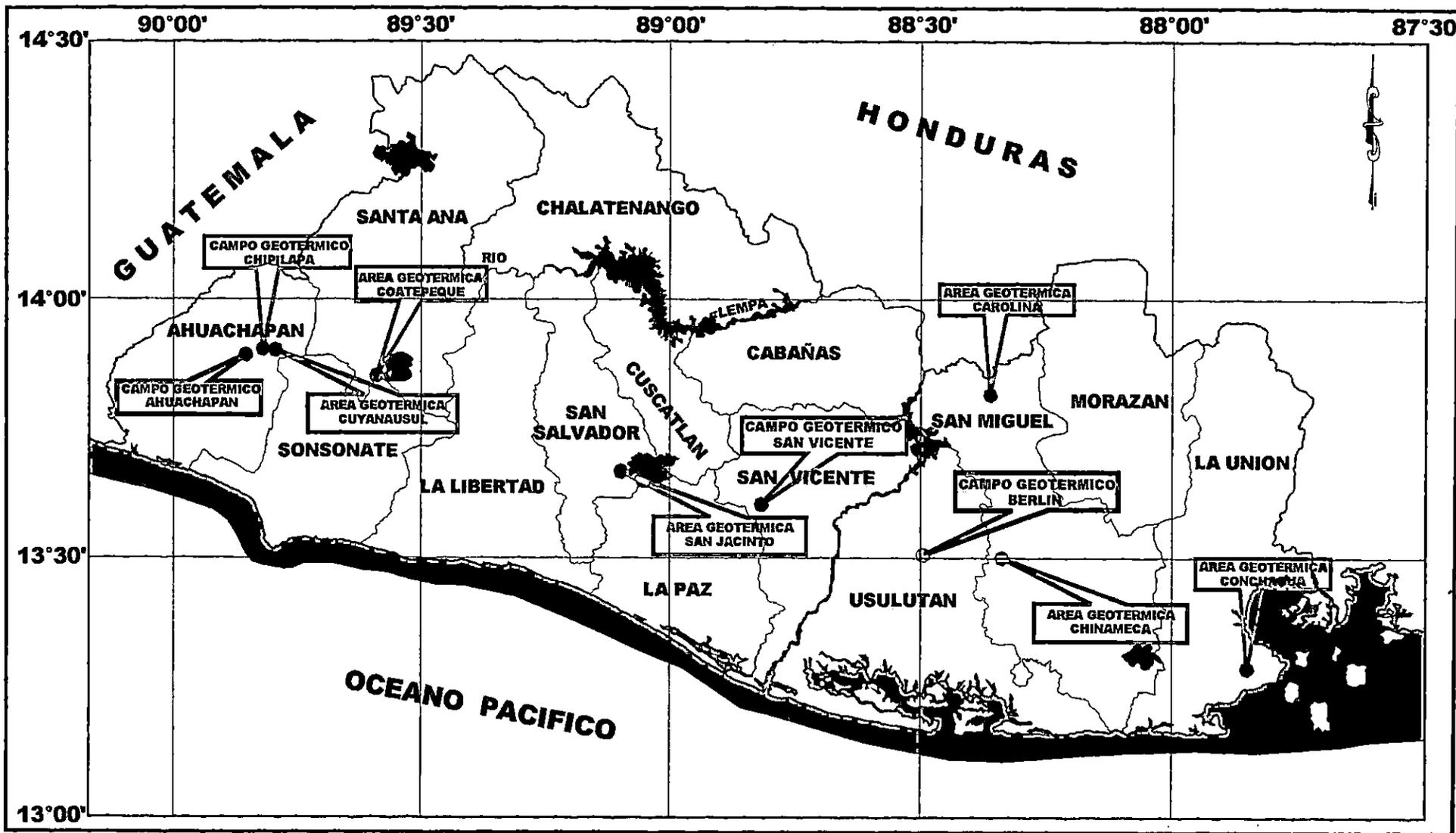


Figura 7. Campos geotérmicos y áreas de interés geotérmico de El Salvador

II. DESCRIPCIÓN DEL CAMPO GEOTÉRMICO DE BERLÍN

A. . UBICACIÓN

El Campo Geotérmico de Berlín se encuentra localizado en la zona oriental del país, aproximadamente 120 Km al Este de la ciudad de San Salvador, en el departamento de Usulután, en la falda NO del Complejo Volcánico Cuaternario Berlín-Tecapa, a una elevación de 1.594 m.s.n.m. El sistema geotérmico se encuentra en el interior de una estructura caldérica denominada caldera de Berlín, cuyo borde Norte es afectado por un sistema de fallas que forman un graben de aproximadamente 7 Km de ancho con rumbo ONO-ESE.

El mapa que muestra la zona geográfica del Campo Geotérmico de Berlín, sus fuentes y sus fumarolas, que son indicativos de actividad geotermal puede observarse en la Figura 8.

La Figura 9 muestra la ubicación de los pozos perforados para la explotación geotérmica en el campo (Productores, Direccionales y Reinyectores).

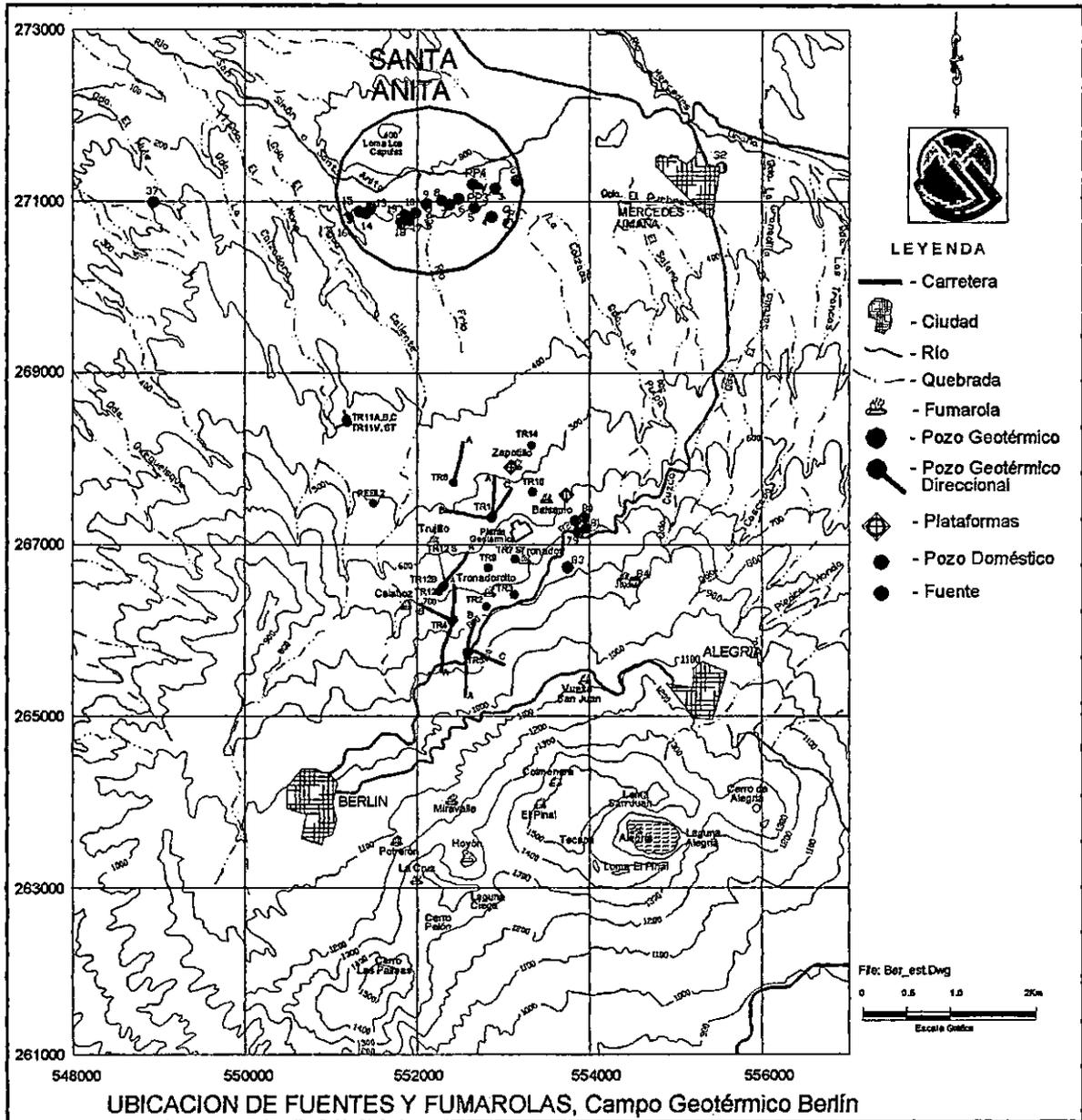


Figura 8. Ubicación de Fuentes y Fumarolas

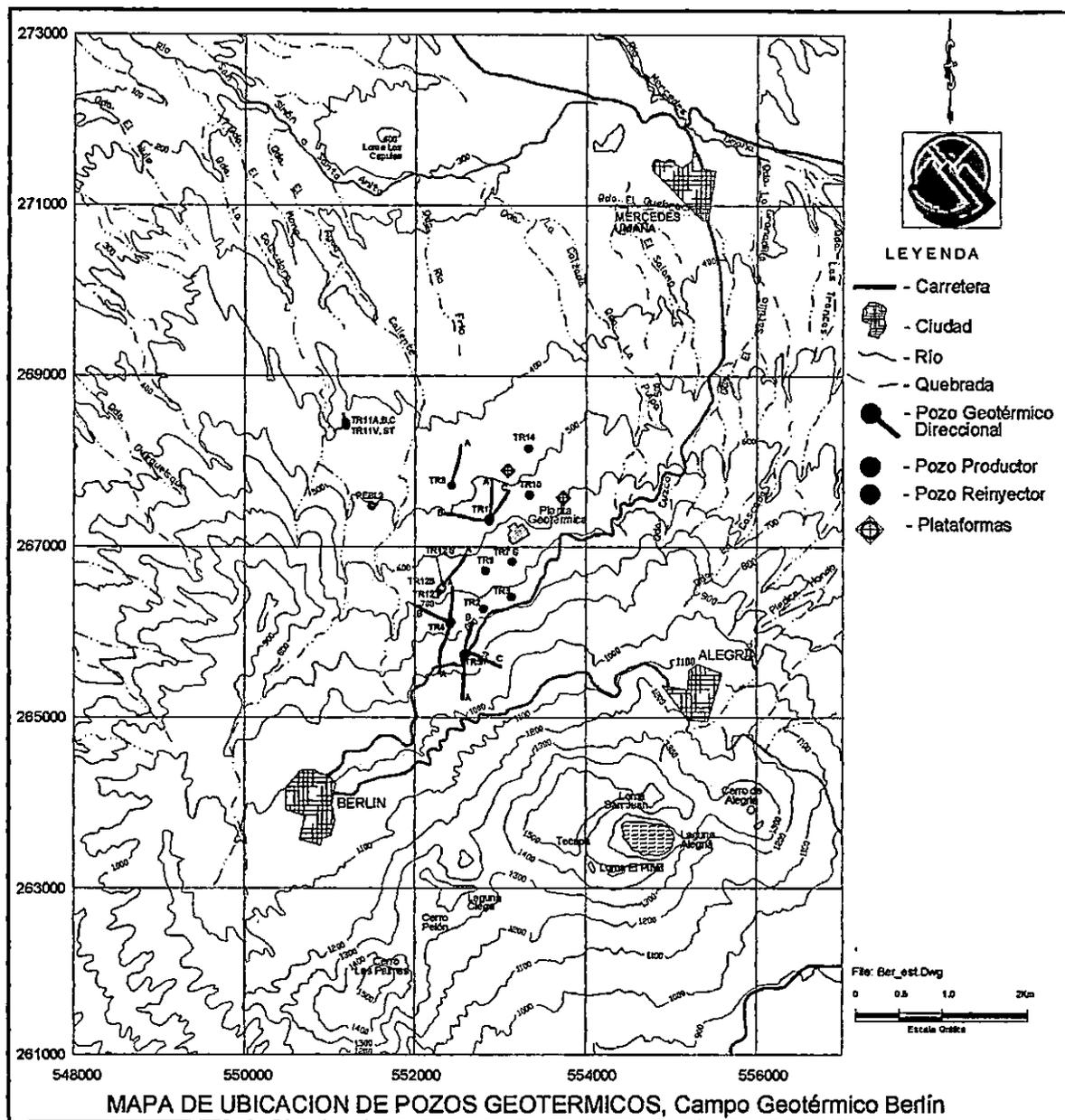


Figura 9. Ubicación De Pozos Geotérmicos

B. ESTUDIOS GEOQUÍMICOS

1. Geoquímica de Aguas

a. Geoquímica Superficial

Las aguas superficiales del área de Berlín comprenden aguas frías y calientes, provenientes de pozos domésticos y fuentes ubicados en su mayoría hacia el Norte, Noreste y Noroeste del campo geotérmico, cuya localización se muestra en la Figura 10. Químicamente, las aguas del área de Berlín se clasifican en tres principales grupos utilizando un diagrama ternario Cl-SO₄-HCO₃. Esta clasificación comprende:

Aguas Bicarbonatadas: de origen completamente superficial o meteórico. La mayoría de manifestaciones al Norte y Noroeste del campo corresponden a esta clasificación, ejemplos de este tipo de agua son las fuentes F-1, F-5, F-16, etc. ubicadas hacia el Norte del campo geotérmico, en las cercanías del río San Simón.

Aguas Sulfatadas: en la mayoría de sistemas geotérmicos esta agua es de origen superficial, las cuales contienen bajo contenido de Cloro (en forma de Cloruros, Cl⁻). El pH entre 2 y 5 es producido por procesos secundarios someros o superficiales, tales como reacción con gases que emergen desde la profundidad. Este acuífero es evidenciado por la fuente 83 principalmente.

Aguas de Composición Cloruro-Sódicas: típicas de aguas profundas en sistemas de alta temperatura son asociadas con áreas volcánicas y son representadas por las aguas geotérmicas propiamente dichas.

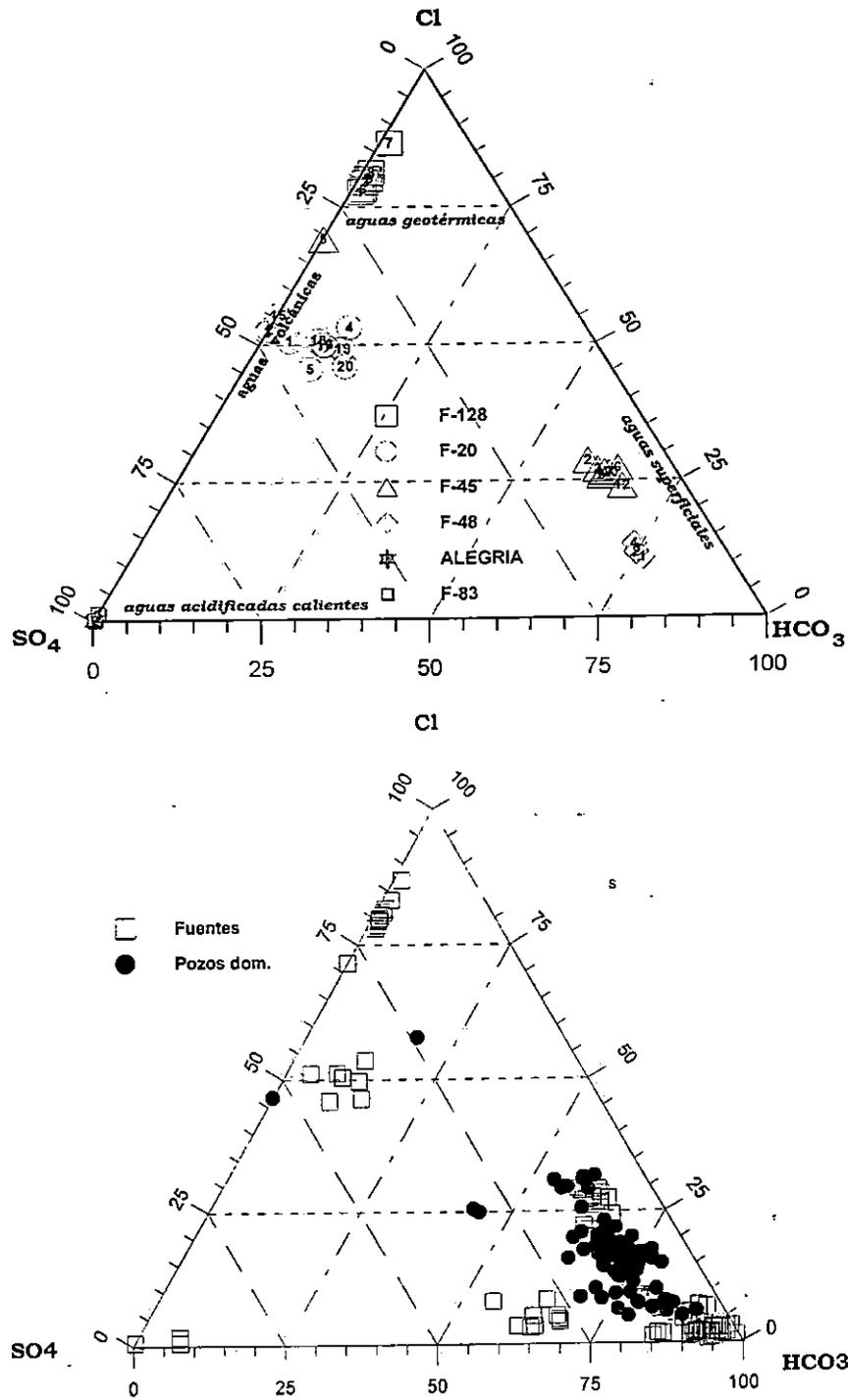


Figura 10. Diagramas Ternarios Cl-SO₄-HCO₃ para Identificación de Manifestaciones Superficiales

b. Geoquímica Profunda

Las aguas profundas del sistema geotérmico de Berlín corresponden a los pozos geotérmicos, productores y reinyectores, perforados en un área aproximada de 6 km². La temperatura profunda calculada considerando el equilibrio de los posibles minerales existentes en el pozo, es de 274°C, y la geotemperatura de Na-K-Ca es de 293°C, siendo la que más se asemeja a la temperatura medida (Tabla 3).

Tabla 3. Geotemperaturas Calculadas para Berlín

Pozo	Máx. Temp. Medida (°C)	Cloruros ppm	Profundidad m.	Elevación m.s.n.m.	Temperatura (°C)		
					Geotermómetros		Programa Watch
					Na-K-Ca	Sílice	
TR-2	293,0	6.238	1.400	-648	293		274
		7.600	1.750	-998			
		6.268	1.900	-1.148			
TR-3	289,0	5.353	1.900	-1.139	263	269	271
TR-4	299,7						
TR-5	291,0	3.798	1.900	-1.060	326	285	295
TR-9	290,0	4.344	1.700	-1.051	281	266	256
		4.078	1.900	-1.251			

ppm: Partes por millón

2. Geoquímica de Gases

La Figura 11 muestra los contenidos relativos de los gases Nitrógeno (N₂), Helio (He) y Argón (Ar), obtenidos de los análisis de composición química del reservorio para el Campo Geotérmico de Berlín (Tabla 4). Este diagrama indica que el origen de los gases es parcialmente magmático (profundo) y parte meteórico (superficial). La ubicación de los puntos en el diagrama confirma que el gas proviene de una fuente profunda que se origina principalmente de la interacción roca-agua-gas en un sistema hidrotermal andesítico-volcánico (D'Amore y otros, 1996). La ubicación de la muestra de la fumarola

El Tronador en el diagrama, cercano a la posición del aire, puede indicar una ligera contaminación con aire de la muestra durante o después del muestreo.

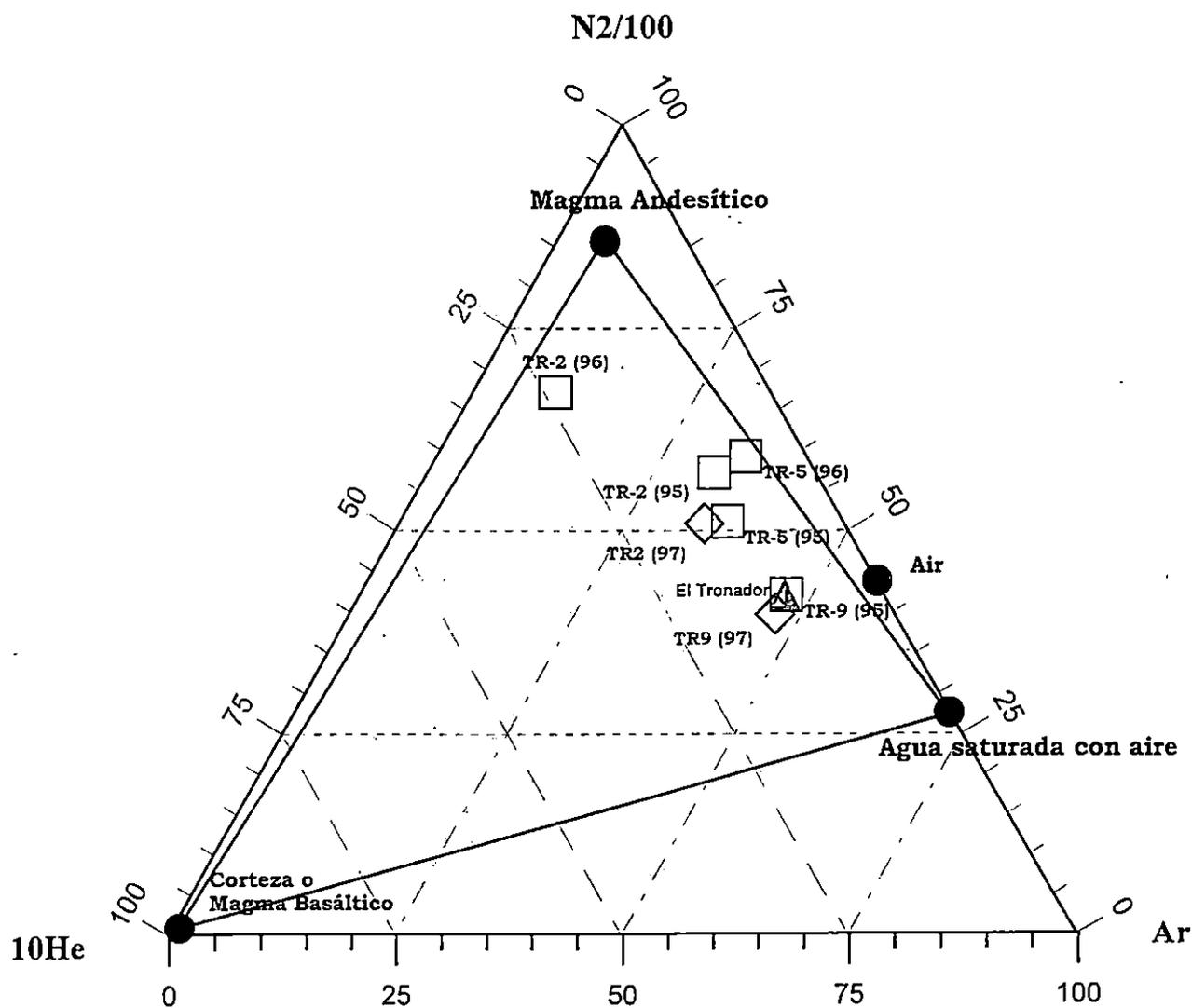


Figura 11. Contenidos Relativos de los Gases Nitrógeno (N_2), Helio (He) y Argón (Ar)

Tabla 4. Composición Química del Reservorio

POZO	TR-1	TR-2	TR-3	TR-5	TR-9
AÑO	1980	1995	1993	1995	1995
T res (°C)	255,000	274,000	271,000	295,000	256,000
pH	5,700	5,050	5,400	5,700	5,100
CO ₂ ppm	225,000	1.066,000	677,000	556,000	1.180,00
H ₂ S ppm	16,700	77,100	73,900	84,900	65,600
NH ₃ ppm	0,410	0,300	0,130	0,300	0,380
H ₂ ppm	9,550	0,430	0,520	0,440	0,410
CH ₄ ppm	0,270	0,770	0,650	0,820	0,690
N ₂ ppm	427,000	9,540	6,180	3,080	10,710
B ppm	75,400	97,400	130,000	84,900	96,200
SiO ₂ ppm	258,900	460,000	633,000	694,000	378,000
Na ppm	2.006,000	2.881,000	4.067,000	1.878,000	2.820,000
K ppm	168,000	652,000	690,000	486,000	612,000
Ca ppm	168,300	52,500	166,600	5,600	87,200
Mg ppm	0,109	0,077	0,050	0,040	0,083
Cl ppm	3687,000	5.083,000	6.893,000	3.412,000	4.926,000
SO ₄ ppm	63,800	6,450	10,840	6,590	7,510
Al ppm	0,011	0,011	0,011	0,001	0,011
Fe ppm	0,870	0,840	0,860	0,790	0,900
STD	6.453,000	9.242,000	12.607,000	6.583,000	8.951,000
P(CO ₂)	0,539	2,340	1,500	1,040	2,900
P (H ₂ S) bar	0,16 E-1	0,631 E-1	0,648 E-1	0,618 E-1	0,639 E-1
P (NH ₃) bar	0,913 E-4	0,492 E-4	0,272 E-4	0,738 E-4	0,478 E-4
P (H ₂) bar	0,225 E-1	0,795 E-1	7,100	0,601 E-1	0,960 E-1
P (CH ₄) bar	0,119 E-1	0,272 E-1	0,241 E-1	0,224 E-1	0,301 E-1
P (N ₂) bar	8,600	0,151	0,010	0,369 E-1	0,213
P (H ₂ O) bar	43,200	58,600	55,900	80,000	44,000
log P (O ₂)	-40,630	-35,8200	-36,310	-33,610	-37,790
log P (S ₂)	-16,900	-12,200	-12,470	-11,310	-12,920
T med (°C)	212,000	293,000	290,000	291,000	290,000
T Cuarzo (°C)	199,000	248,000	289,000	306,000	230,000
T SiO ₂ (°C)	203,000	246,000	269,000	285,000	226,000
T NaKCa (°C)	200,000	293,000	263,000	326,000	281,000

Considerando que el Hidrógeno es uno de los gases más volátiles presente en el vapor de las fumarolas y que tanto su baja solubilidad en el agua a altas temperaturas, como su generación en el ambiente mineralógico hidrotermal, obedece a reacciones químicas cuyas constantes de velocidad son altamente dependientes de la temperatura. Se ha

construido un diagrama que muestra la distribución del contenido de H_2 en el área de Berlín y se presenta en la Figura 12.

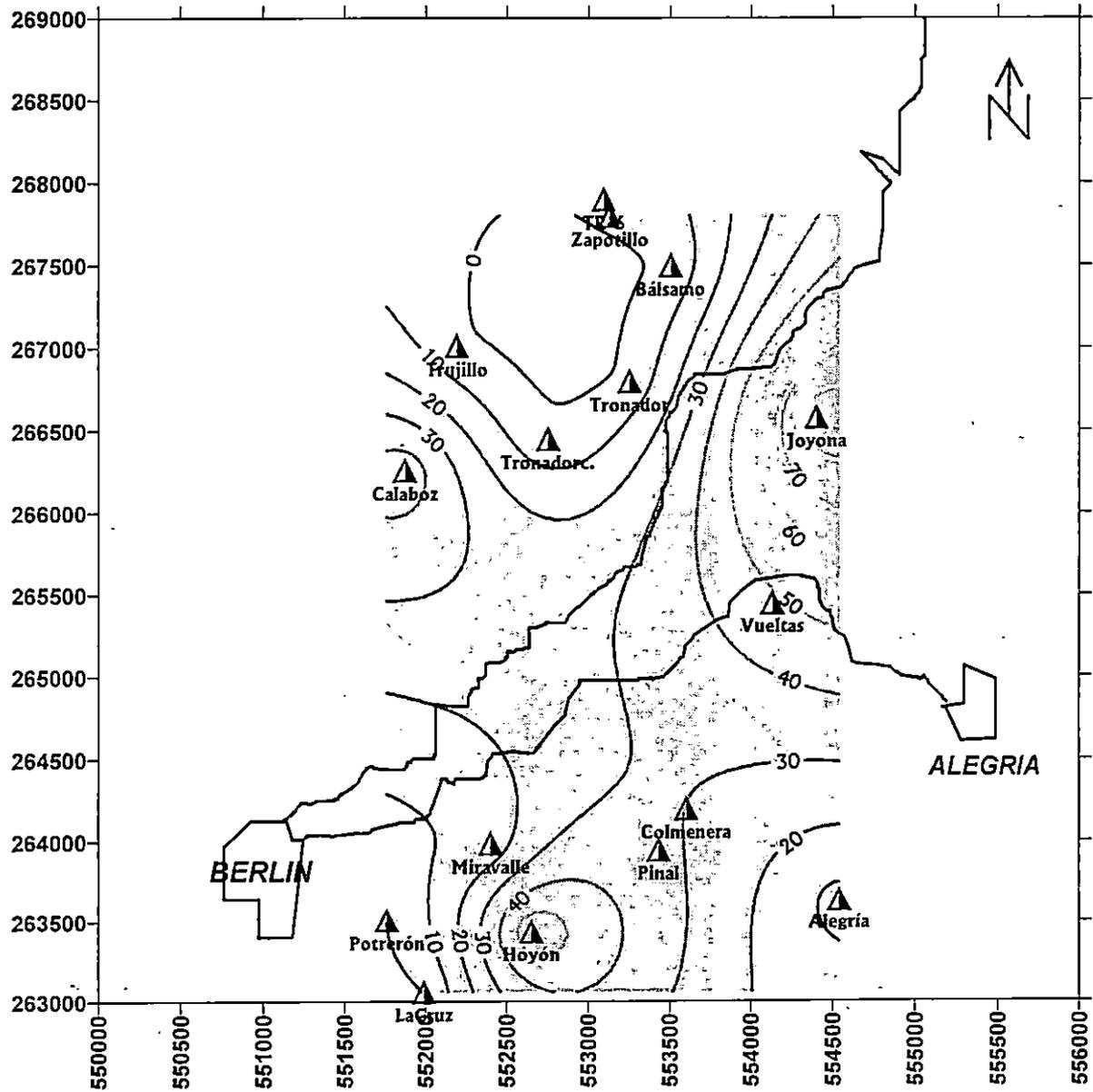


Figura 12. Distribución del Contenido de H_2 para el Área de Berlín (1992)

En este diagrama se puede apreciar que la fuente calórica del sistema está localizada hacia el Nor-Este de la ciudad de Berlín, en la zona de fallamiento circular que originó la caldera del antiguo volcán de Berlín (Departamento de Exploración, 1991). Esta concentración posee una tendencia a disminuir en forma radial hacia el Nor-Noreste / Sur-Sureste del punto localizado en las coordenadas 554500, 266500 cercano a la Joyona, lo que podría ser un indicativo de una dirección de circulación profunda del fluido hidrotermal.

C. COMPOSICIÓN QUÍMICA DE LAS AGUAS DEL RESERVORIO

Para la estimación del quimismo del reservorio se ha considerado los datos químicos de agua de descarga superficial de los pozos (Tabla 5). Para los pozos TR-2 y TR-9, las muestras se colectaron en el cabezal de cada pozo utilizando un miniseparador tipo Webre. Las muestras de los pozos TR-1, TR-3 y TR-5 fueron colectadas a condiciones de vertedero (a presión atmosférica).

Tabla 5. Análisis Químico del Fluido Geotérmico a diversas profundidades para el Campo Geotérmico de Berlín

PROF. m.	ELEV. m.s.n.m.	Na	K	Ca	Cl	SO ₄	HCO ₃	SiO ₂	B	pH	Conductividad eléctrica MHOS/CM.
TR-2											
1.900	-1.148,00	3.375	845	94,0	6.268	63,8	92,3	562	140,0	7,68	0,0160
TR-3											
2.200	-1.439,20	1.200	214	39,5	1.799	130,0	209	342	40,7	8,21	0,0062
TR-4											
1.900	-1.132,63	1.650	246	27,5	2.867	89,7	37,2	428	82,0	7,38	0,0080
TR-5											
2.000	-1.160,00	1.675	395	17,0	3.181	77,0	n.d.	749	74,0	4,01	0,0090
TR-9											
1.900	-1.250,78	2.380	530	58,0	4.078	15,7	18,9	567	90,0	7,07	0,0093

n.d. no detectable.

m.s.n.m.: metros sobre el nivel del mar

D. EVOLUCIÓN QUÍMICA DE AGUAS DE REINYECCIÓN

Según el historial químico (Cloruros y Sílice) de la mezcla del agua de los pozos TR-2 y TR-9 desde 1995 a 1998, los Cloruros de la mezcla se estabilizan alrededor de 6.500 ppm, con pocos datos puntuales hasta de 7.500 ppm. El contenido de Sílice varía entre 700 ppm y 1.000 ppm para dicha mezcla.

La variación para los Cloruros de la mezcla que se reinyecta a los pozos TR-14 y TR-8 es, en promedio para ambos, de 6.800 ppm con máximos entre 7.200-7.600 ppm, mientras la concentración de Sílice es de un valor promedio constante de 800 ppm. Para la reinyección en frío la concentración de la Sílice alcanza los 1.100,00 ppm.

E. EFECTOS DE LA REINYECCIÓN

El proceso de reinyección ha sido monitoreado con trazadores radioactivos y geoquímicamente utilizando el modelo de mezcla entalpía-cloruro y el geotermómetro de Sílice se estimó que aproximadamente un 50% del agua reinyectada en el pozo TR-9 retorna al pozo TR-2.

En el Campo Geotérmico de Berlín el proceso de reinyección se realiza de dos formas:

1. Reinyección en frío, cuando el fluido es expandido a condiciones atmosféricas ($T \cong 98^{\circ}\text{C}$).
2. Reinyección en caliente, el fluido es reinyectado a temperaturas superiores a la de saturación de la Sílice amorfa (200°C) sin necesidad de una expansión previa.

El tipo de reinyección que produce menos complicaciones es la reinyección en caliente. Aunque en estudios realizados en 1997 por CFG (de sus siglas en francés: Compagnie

Francaise Geothermique) se concluyó que podría realizarse hasta un mínimo de 160°C. A una temperatura menor existe el riesgo de precipitación de Sílice Amorfa.

Para la reinyección en frío, luego del proceso de expansión a presión atmosférica, se produce una sobresaturación de la salmuera geotérmica, por lo que se requiere tratar física o químicamente las aguas antes de su reinyección.

En el Campo Geotérmico de Berlín se cuenta con un sistema de tanques para la polimerización y separación de la Sílice, el cual consta de dos tanques laberínticos y tanques de polimerización. Un esquema general de este Sistema de tanques se muestra en el Anexo 1 "Sistema de Tanques de Polimerización de la Sílice", el cual colecta las aguas producto de la separación ciclónica del fluido geotérmico como se muestra en el Anexo 2 "Sistema de manejo de agua residuales hacia reinyección en el pozo TR-11A".

Actualmente la eficiencia de separación del tanque no es la que se esperaba y es necesario el estudio de este fenómeno para promover el uso de un método más eficiente de remoción de Sílice, para que no se produzcan efectos adversos al proceso de reinyección por la depositación de dicho mineral en el pozo de reinyección, lo que provocaría una disminución de la capacidad de absorción de agua y la necesidad de intervenir el pozo para la respectiva limpieza.

El proceso más importante asociado a la reinyección en caliente y en frío es el de mezcla de aguas químicamente diferentes. El agua residual se encuentra más concentrada en sólidos disueltos que la del reservorio, ocurriendo lo contrario con las especies gaseosas disueltas, por lo tanto mediante un balance de masa es posible detectar la presencia del agua reinyectada en la descarga de un pozo.

F. MODELO GEOQUÍMICO CONCEPTUAL

La Figura 13 muestra el modelo conceptual geoquímico del campo geotérmico de Berlín. El agua meteórica recarga al sistema desde los 1.350 m.s.n.m., posteriormente ocurren procesos de mezcla con fluidos provenientes del sistema volcánico. La fuente de calor del sistema podría estar localizada hacia el Sur de la zona de pozos geotérmicos, en la zona donde se encuentran ubicados los centros eruptivos del complejo volcánico Berlín-Tecapa. El fluido que alimenta el reservorio geotérmico de Berlín proviene del Sur y entra al sistema desde el fondo (ascenso de fluido vertical) probablemente cerca del triángulo formado por los pozos TR-5, con características de moderada salinidad, probablemente alrededor de 3.000-4.000 ppm de Cloruros, con contenido de Sílice entre 500-600 ppm. En su ruta de circulación, el fluido pierde calor por procesos predominantemente de ebullición y/o evaporación produciendo el fluido que alimenta los pozos TR-1, TR-2, TR-3 y TR-9. Se ha evidenciado que no existen efectos de la reinyección al considerar el análisis de los parámetros geoquímicos, isotópicos y termodinámicos ya que se observa una concentración constante de:

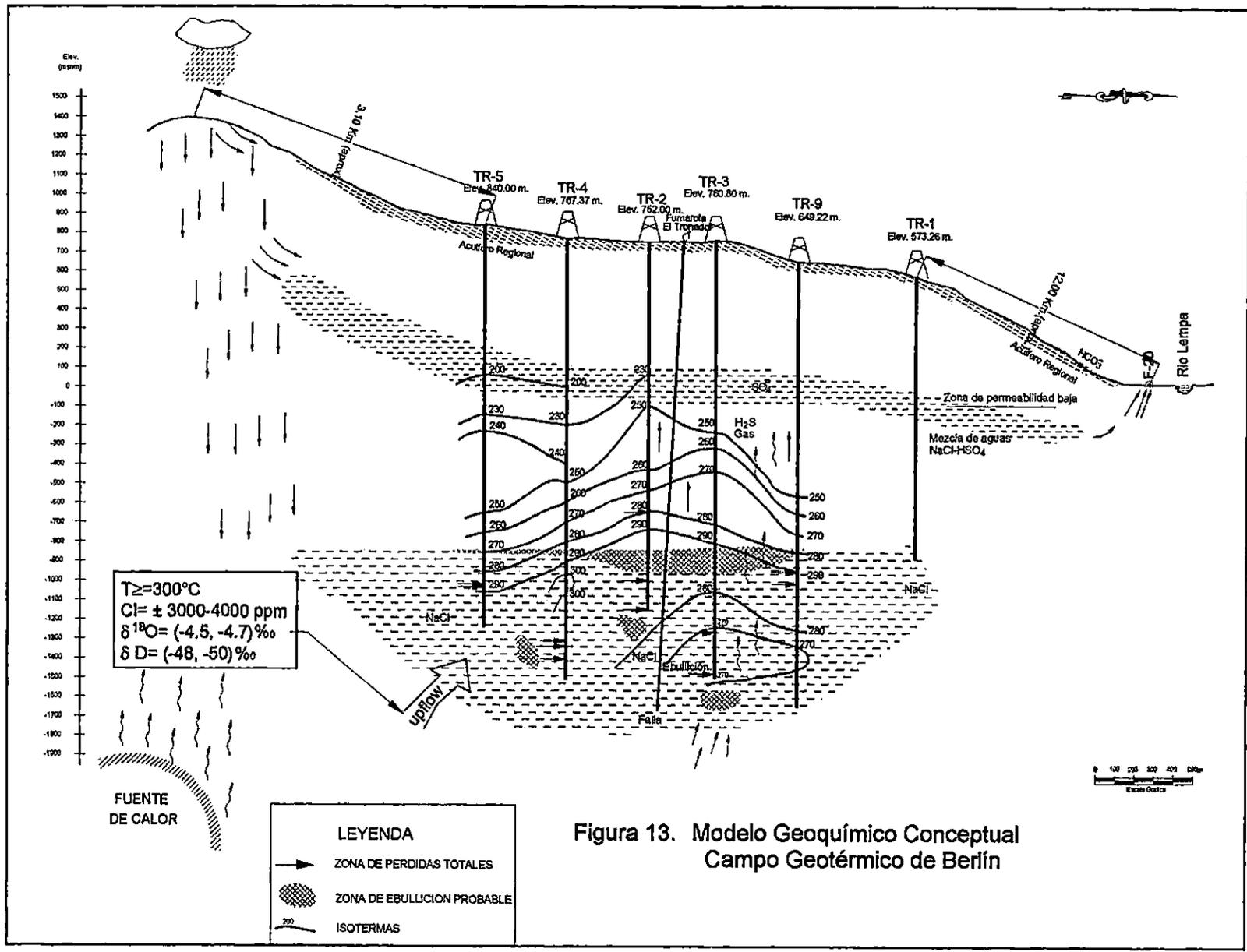
Cl = 3.000 ~ 4.000 ppm

$\delta^{18} \text{O} = (-4,5 \sim -4,7)\%$

$\delta \text{D} = (-48 \sim -50)\%$.

Además, la temperatura del reservorio no ha experimentado cambios significativos en su magnitud manteniéndose en un valor de 300°C.

De acuerdo al diagrama de mezcla Entalpía-Cloruros (Figura 14), existe una aparente ebullición o evaporación en el fluido que alimenta al pozo TR-3 (fluido primario ebullicido), lo que provoca una concentración anormal de especies químicas, evidenciado por la alta concentración de Cloruros (mayor de 7.000 ppm). En ambos casos, se estaría produciendo desgasificación del líquido y la consecuente producción de vapor y gases, los cuales al ascender se mezclan con un acuífero semiprofundo o intermedio en las cercanías de los pozos TR-2, TR-3, y TR-9 y producen las aguas sulfatadas en las



cercanías de las fumarolas de El Tronador y El Tronadorcito. La mezcla de aguas geotérmicas del tipo NaCl y aguas sulfatadas (SO_4^{2-}) fluye hacia el Norte a una profundidad tal que no permite que se mezclen posteriormente con aguas superficiales del tipo HCO_3^- . Podría establecerse que en los alrededores de la zona de Montañita y Santa Anita, existe algún estrato mineralógico con una pobre o casi nula permeabilidad, el cual no permite la mezcla de los fluidos.

Durante la modelación del campo se ha investigado la hipótesis que el fluido se desplaza hacia el Nor-Noroeste, en dirección al río Lempa, sin embargo los datos químicos e isotópicos preliminares no evidencian dicha relación de mezcla del fluido profundo del reservorio de Berlín con aguas superficiales (F-20).

La geotermometría de gases y soluciones, junto a las prospecciones de gases en las fumarolas y los modelos resultantes de la combinación de Cloruro/Temperatura/Entalpía, sugieren que el campo se extiende hacia el Sur del actual campo de pozos y podría estar conectado en una dirección Sur principalmente (Figura 15).

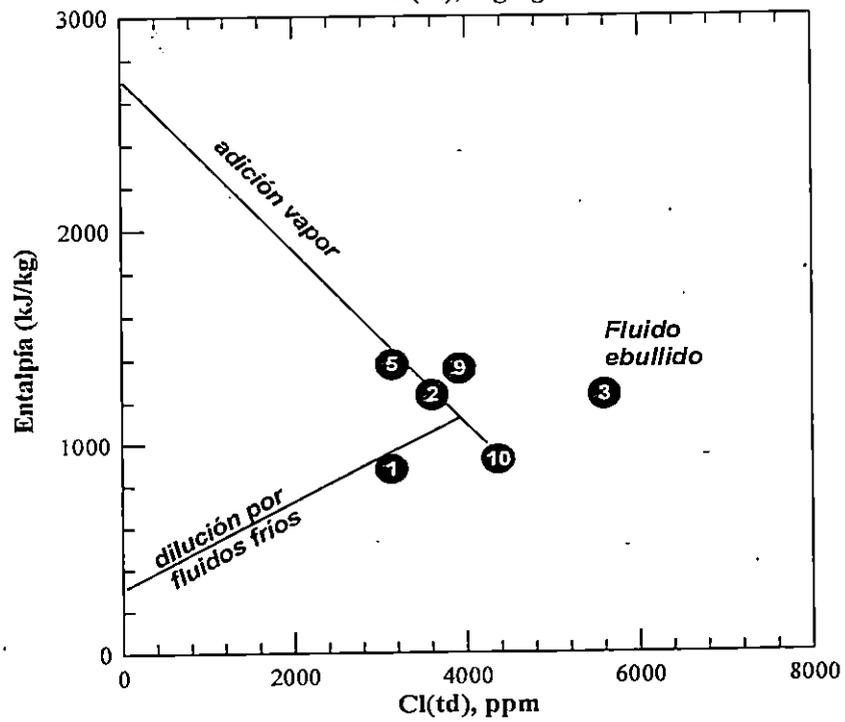
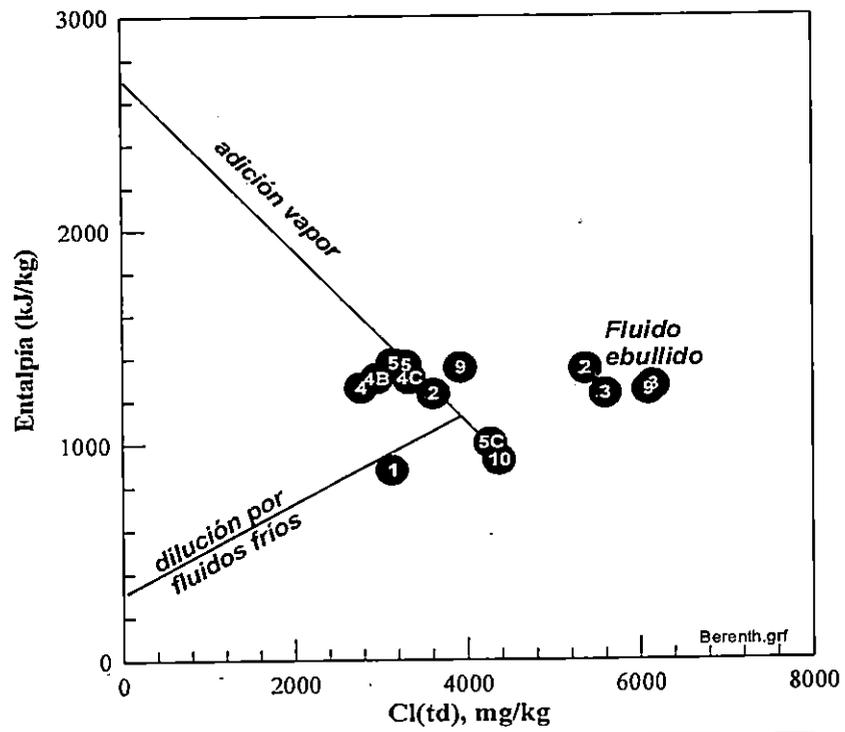


Figura 14. Diagramas Entalpía - Cloruros

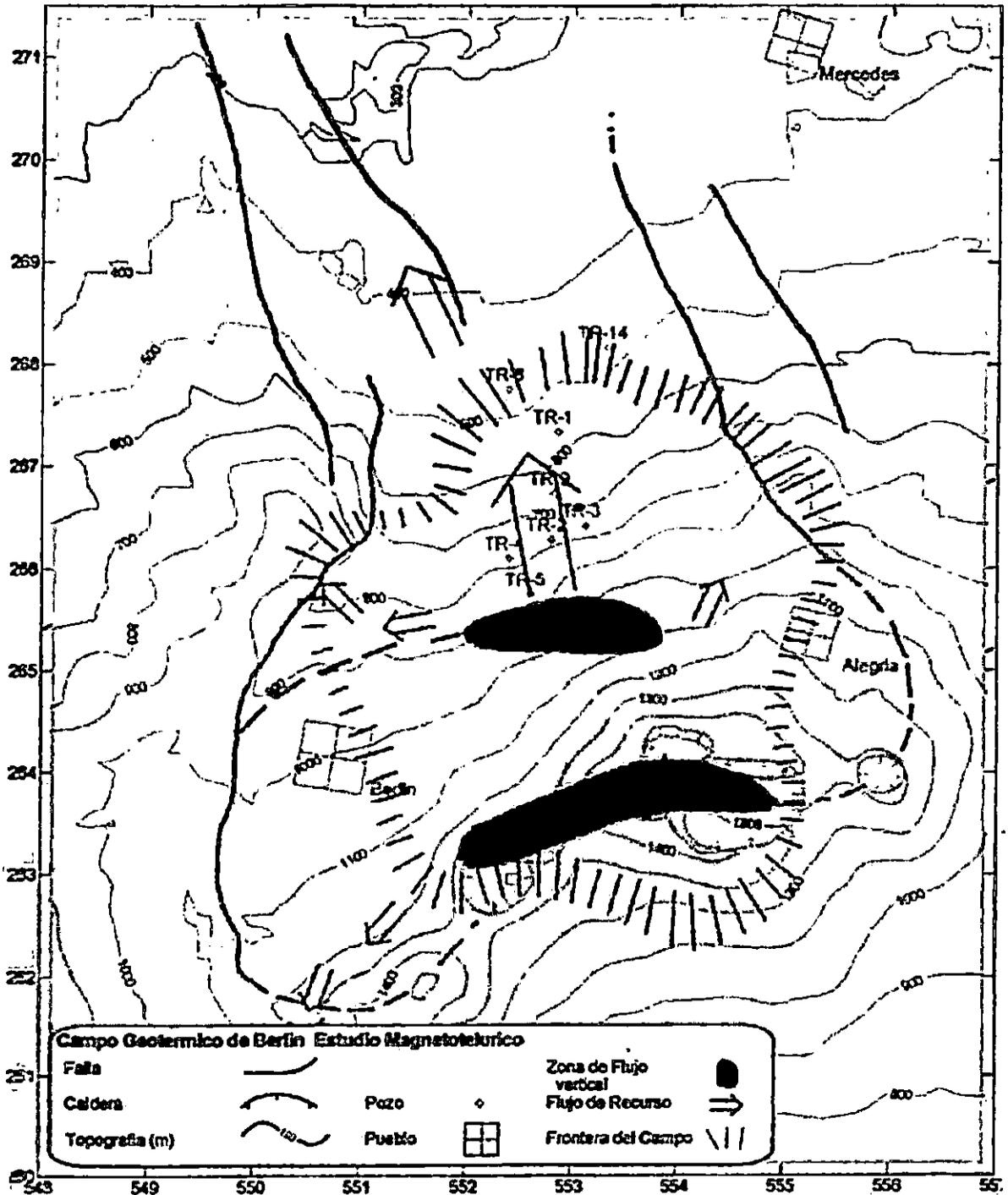


Figura 15. Extensión del Campo Geotérmico de Berlín

Fuente: Estudio Magnetotelúrico del Campo Geotérmico de Berlín, Geothermal Energy New Zealand Limited (GENZL), febrero 1995.

G. LOCALIZACIÓN DE POZOS PRODUCTORES Y REINYECTORES

En el Campo Geotérmico de Berlín se cuenta con 27 pozos, de los cuales 8 son productores y 14 son reinyectores. Un detalle de éstos se presenta en la Tabla 6.

Tabla 6. Datos Generales para los Pozos Profundos, Campo Geotérmico de Berlín

POZO	INCLINACIÓN	DIRECCIÓN	PROFUNDIDAD FINAL (m)	ELEVACIÓN (m.s.n.m.)	ESTADO DE LA EXPLOTACIÓN
TR-1		VERT.	1.458,00	573,26	ABANDONADO
TR-1A	26°	N 05 E	2.331,00	573,26	REINYECTOR
TR-1B	28°	N 72 W	2.432,00	573,26	REINYECTOR
TR-1C	20°	N 38 E	2.495,00	573,26	REINYECTOR
TR-2		VERT.	1.900,00	752,00	PRODUCTOR
TR-3		VERT.	2.300,00	760,00	REINY. EN ESTUD.
TR-4		VERT.	2.375,00	767,30	MONITOREO
TR-4A	30°	S 04 W	2.157,00	767,30	REINYECTOR
TR-4B	25°	N 56 W	2.292,00	767,30	PRODUCTOR
TR-4C	22°	N 05 W	2.179,00	767,30	PRODUCTOR
TR-5		VERT.	2.086,00	840,00	PRODUCTOR
TR-5A	32°	S 03 W	2.325,60	840,00	PRODUCTOR
TR-5B	16°	N 17 E	2.208,00	840,00	PRODUCTOR
TR-5C	25°	S 70 E	2.342,00	840,00	PRODUCTOR
TR-7		VERT.	750,00	657,27	REINY. FRÍO
TR-8		VERT.	2.393,00	466,10	REINYECTOR
TR-8A	23.5°	N 02 W	2.590,00	466,10	REINYECTOR
TR-9		VERT.	2.300,00	649,22	PRODUCTOR
TR-10		VERT.	2.350,00	537,05	ABANDONADO
TR-11ST		VERT.	2.044,80	445,40	REINYECTOR
TR-11A		VERT.	503,88	445,40	REINY. FRÍO
TR-11B	25°	N 10 W	614,00	445,40	MONITOREO
TR-11C	25°	S 70 E	800,00	445,40	MONITOREO
TR-12		VERT.	733,30	675,00	REINYECTOR
TR-12A	24°	N 40 E	2.428,00	687,00	REINYECTOR
TR-14		VERT.	2.200,00	457,00	REINYECTOR

Un mapa de ubicación de los pozos antes descritos en el Campo Geotérmico de Berlín se presenta en la Figura 16.

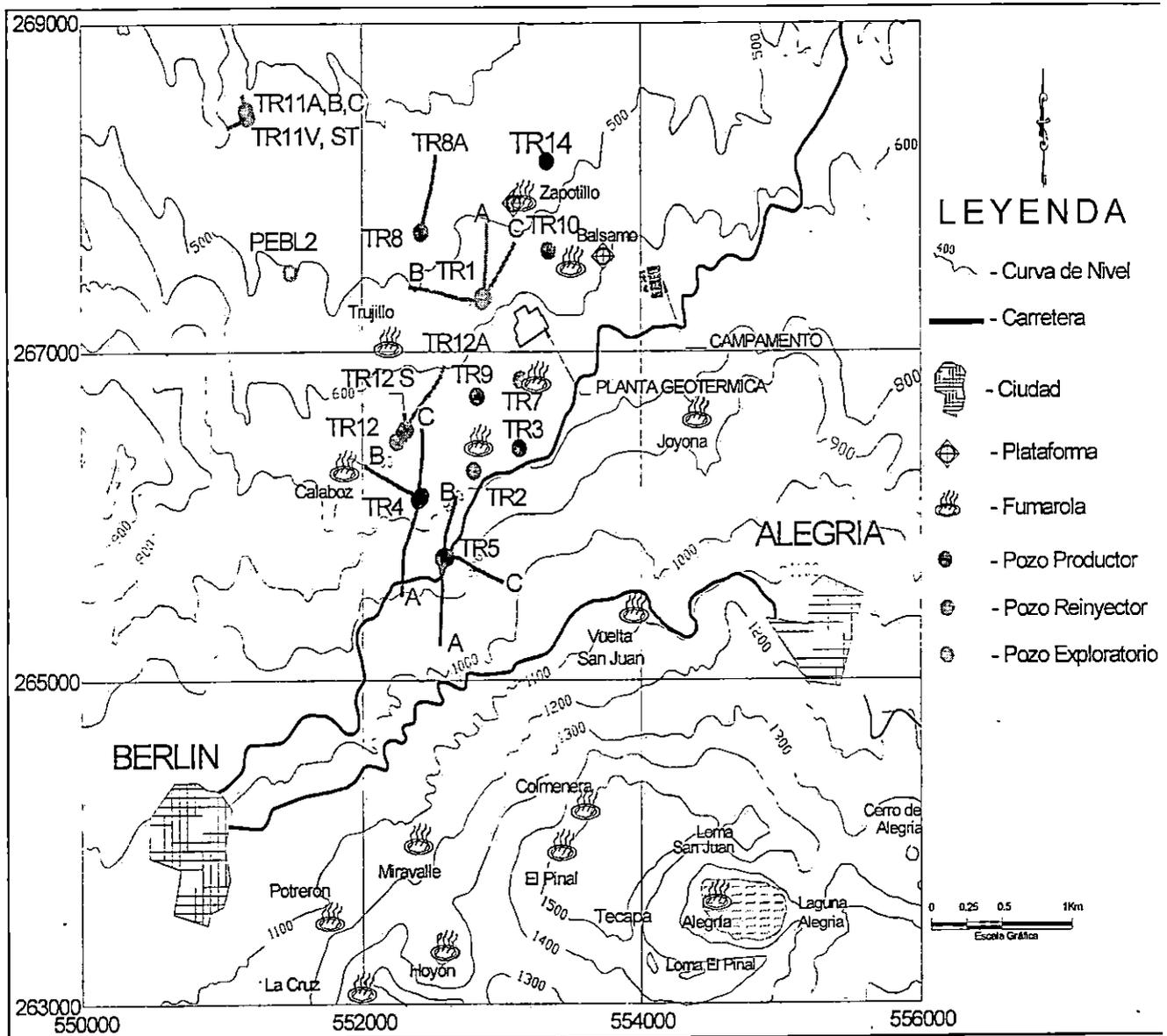


Figura 16. Mapa de Ubicación de Pozos Perforados en el Campo Geotérmico de Berlín.

H. CUANTIFICACIÓN DEL AGUA RESIDUAL GENERADA EN EL CAMPO GEOTÉRMICO DE BERLÍN

La Tabla 7 presenta los valores promedio de generación de vapor y agua para pozos productores. La cantidad de agua residual generada por todos los pozos es, en promedio, de 284 Kg/seg.

Tabla 7. Datos para Pozos Productores

POZOS PRODUCTORES	VAPOR Kg / seg.	AGUA Kg / seg	TOTAL Kg / seg	WHP Kg / cm ² abs	Cm
TR-2	18,30	52.75	71.05	11.70	
TR-9	4,60	32.66	37.33	22.50	
Psep. ABB				9.75	
Nivel de agua					2,125
TR-4B	6,00	18,00	24,00	10,50	
TR-4C	17,00	32,00	49,00	33,60	
Psep: TRs-4				9,45	
Nivel de agua					51,950
TR-5A	20,00	58,00	78,00	11,65	
TR-5B	9,50	26,00	35,00	10,30	
Psep. TRs-5				10,00	
Nivel de agua					48,260
TR-5V	23,00	40,00	63,00	10,35	
TR-5C	9,00	26,00	35,00	10,30	
Psep. TRs-5				9,50	
Nivel de agua					103,200
TOTAL	106,73	284,00	390,73		

- Psep Presión de separación
 TR-5A Mayor productor de agua separada.
 TR-5V Mayor productor de vapor

La Tabla 8 presenta los datos de agua residual que llega a cada pozo reinyector. Se calcula que un 18% del agua residual a reinyectar, llega al pozo TR-11A.

Tabla 8. Datos para Pozos Reinyectores

POZOS REINYECTORES	AGUA Kg / seg	WHP bar-g.
TR-1A	17,75	70,60
TR-1B	26,00	15,50
TR-1C	11,50	15,25
TR-4A	39,95	6,40
TR-8V	50,00	2,50
TR-8A	7,50	2,40
TR-14	17,00	25,60
TR-11A	51,00	00,00
TR-11ST	13,00	25,75
TR-12A	24,50	9,70
TR-12V	16,75	9,45
Atmosf.	8,60	----
TR-3V	20,50	5,00
TR-7	00,00	----
TOTAL	304,05	

Atmosf.: Descarga a la atmósfera.

TR-11A Mejor reinyector en frío.

TR-8V Mejor reinyector en caliente.

I. PERFILES TÍPICOS DE TEMPERATURA

Algunos de los perfiles de temperatura a profundidad para los diferentes pozos, han sido seleccionados con el objeto de mostrar los principales cambios con respecto al tiempo para los pozos productores y reinyectores.

Se realizó un estudio de los mejores pozos del campo para presentar sólo aquellos que sean representativos; entre ellos se seleccionó el TR-5V como el productor que genera mayor cantidad de vapor, el TR-5A como el productor que genera mayor cantidad de agua separada, el TR-8V como el reinjector que posee la mayor capacidad de absorción en caliente y el TR-11A como el que posee la mayor capacidad de absorción en frío. En la Figura 17 se presenta un perfil de presión y temperatura para un pozo reinjector en caliente.

El TR-11A es un pozo reinjector de agua separada, que absorbe 51 Kg/seg de agua (70°C) el cual trabaja por gravedad, lo que significa que no requiere de una bomba para su funcionamiento. Posee un silenciador previo a los tanques de polimerización, el cual reduce el ruido que se genera al evaporarse súbitamente el vapor debido a la despresurización que ocurre cuando el fluido se descarga a la presión atmosférica. La alta presión a la entrada del silenciador resulta de la acumulación de las presiones de separación de la mezcla bifásica original más la columna hidrostática entre la separación y el silenciador menos las pérdidas por fricción a lo largo del sistema de acarreo. En la Figura 18 se presenta un perfil de presión y temperatura para este pozo.

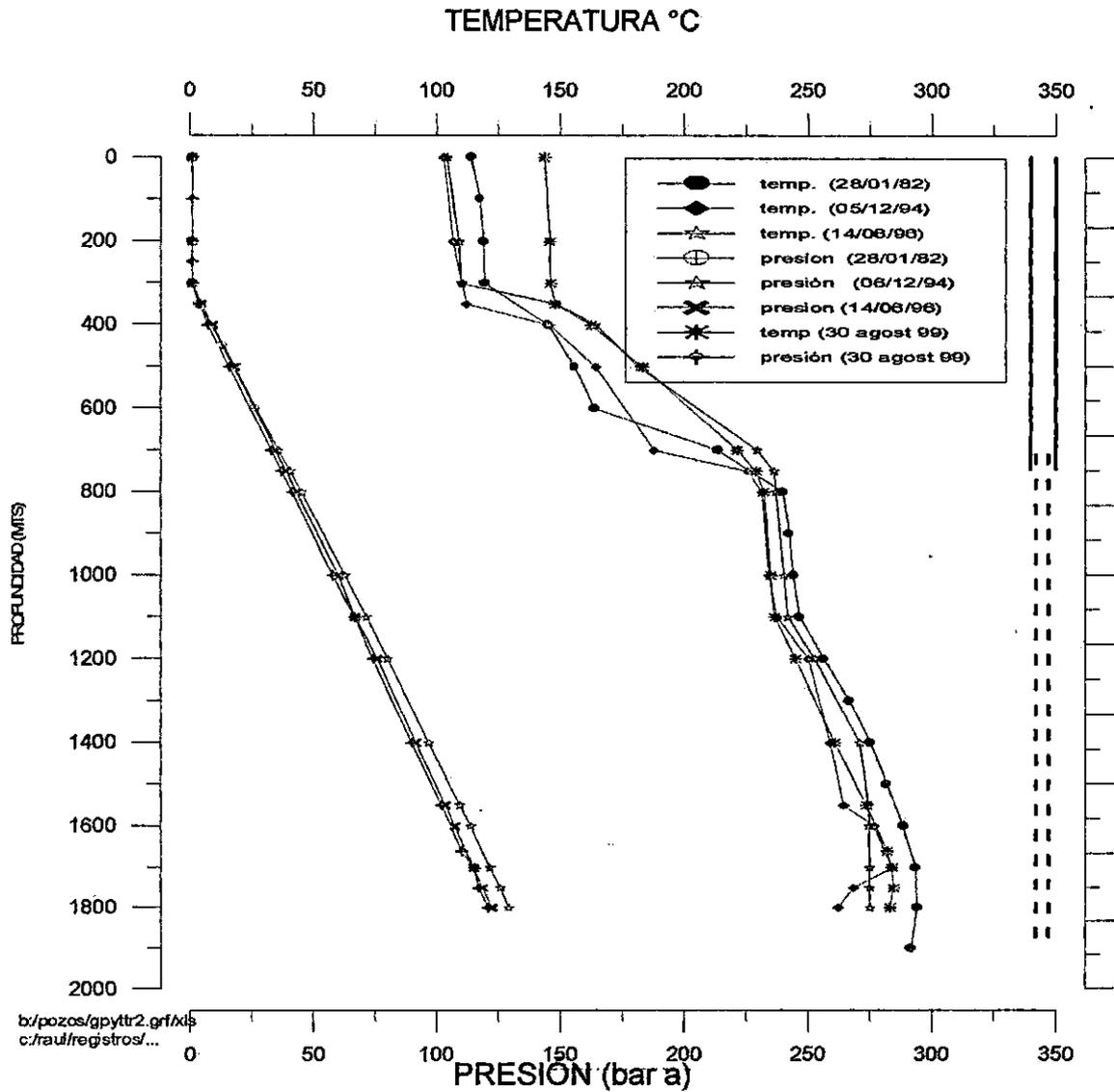


Figura 17. Perfil de Presión y Temperatura para un Pozo Reinyector en Caliente.

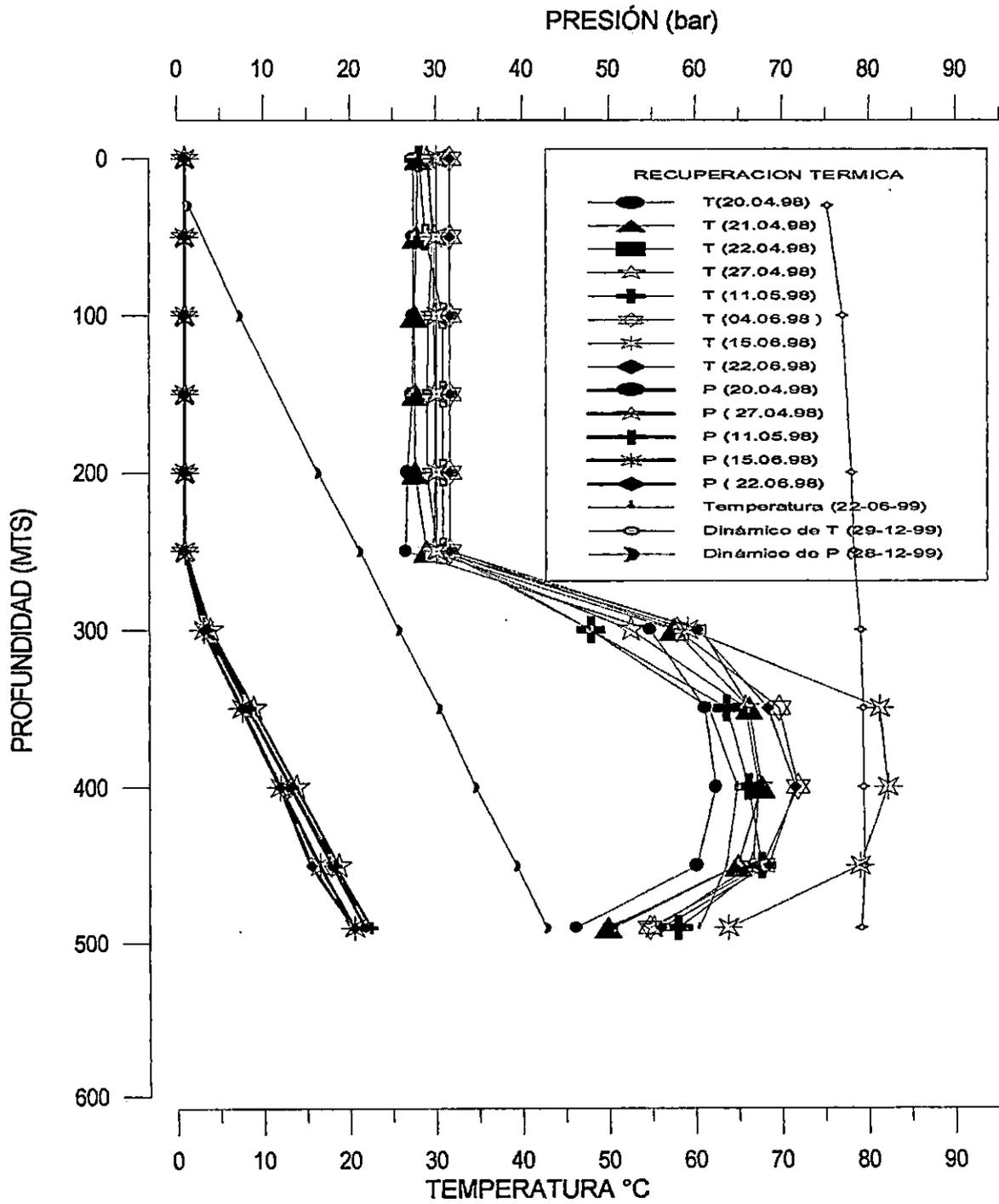


Figura 18. Perfil de Presión y Temperatura del Pozo Reinyector en Frío TR-11A.

J. DESCRIPCIÓN DEL PROCESO DE EXTRACCIÓN Y GENERACIÓN

Como se describió anteriormente, luego de realizar la etapa de perforación profunda y una vez resultan pozos productores de vapor, se comprueba la existencia de un reservorio geotérmico, comercialmente explotable.

Una vez instalada la planta de conversión que consta de turbina y generador y la tubería de transporte, los pozos se abren para que el ciclo de generación se inicie.

Este ciclo puede describirse para el Campo Geotérmico de Berlín, como sigue: Del reservorio de líquido dominante se extrae, a través de los pozos productores, una mezcla bifásica compuesta de líquido y vapor a una presión y temperatura elevada (180°C y 11 bar promedio), ésta se hace pasar por un separador ciclónico, el cual separa la fase agua de la fase vapor tal como el mostrado en la Figura 19.

El agua separada es descargada a un sistema de acarreo, el cual la conduce hacia los pozos destinados a reinyección ya sea en caliente o en frío (para estos últimos se requiere de un tratamiento previo a su reinyección para eliminar la Sílice monomérica que contiene). El vapor generado se transporta a través de tuberías aisladas hacia la planta de conversión, estas tuberías poseen trampas de vapor para extraer el condensado que se produce por el enfriamiento ocurrido durante el transporte. Luego el vapor se hace pasar por el separador de humedad o secador, para ser conducido hacia las turbinas con una calidad óptima.

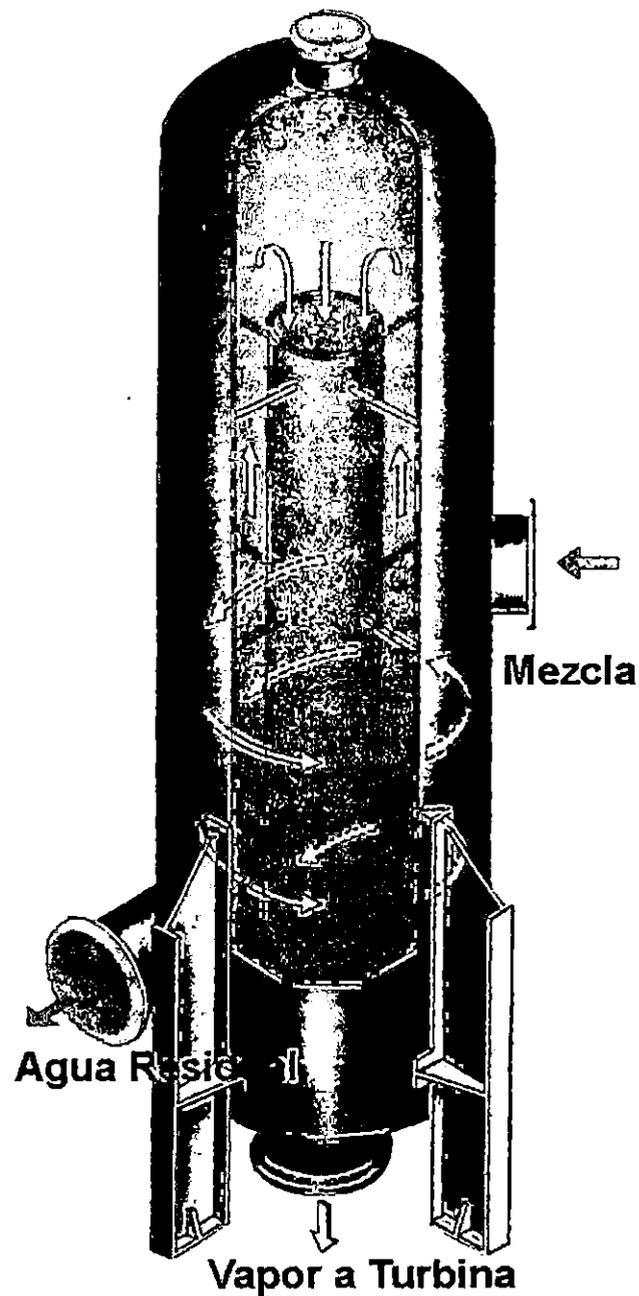


Figura 19. Esquema General de un Separador Ciclónico de Vapor

El vapor seco que posee una elevada entalpía acciona los álabes de la turbina, haciéndolos girar para convertir así la energía cinética en energía mecánica (disponibilidad de torque con velocidad angular en el eje de la misma). La turbina hace

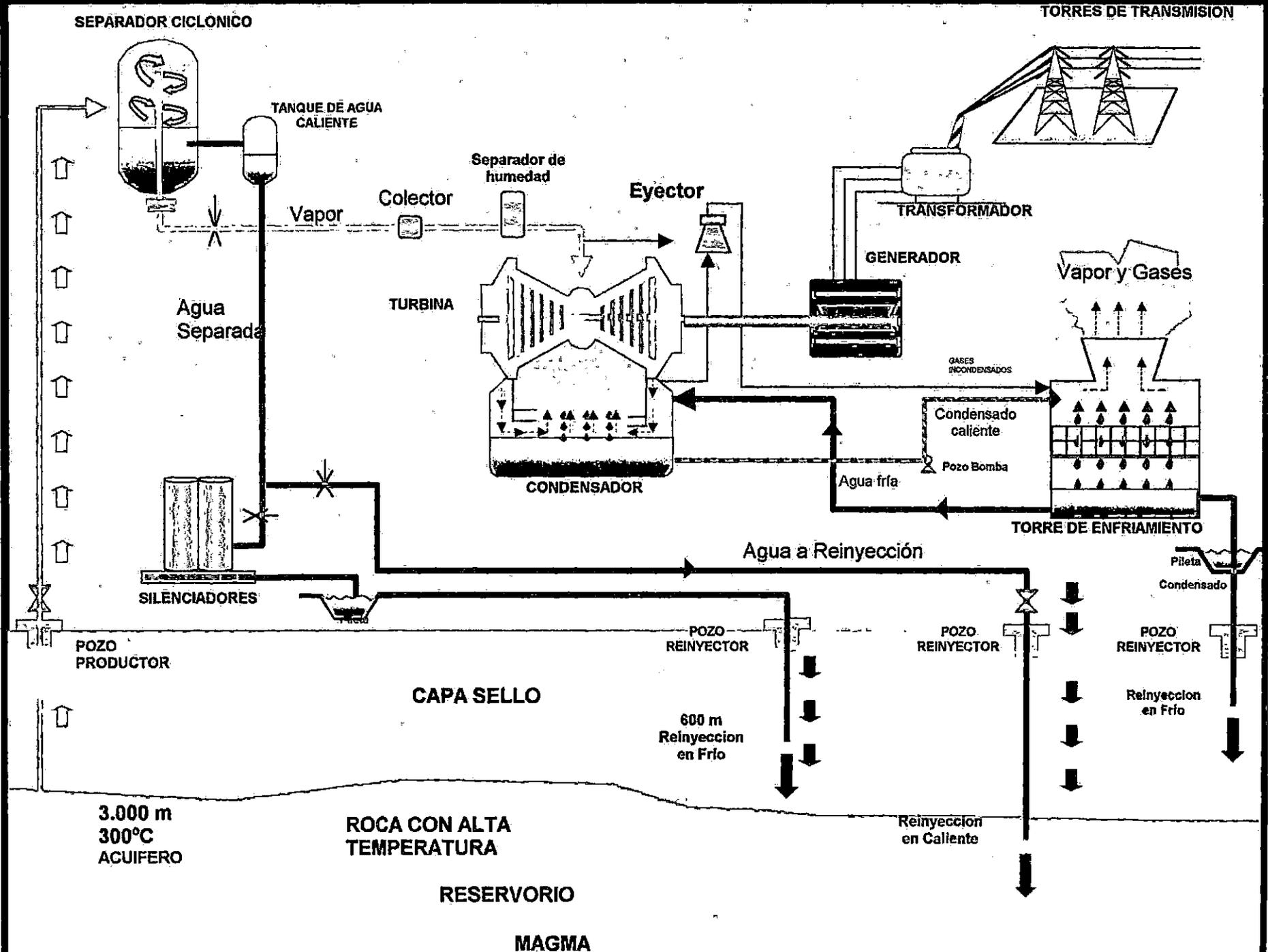
girar un alternador constituido por el eje de acople a la turbina, el rotor y el estator, el cual transforma la energía mecánica en eléctrica. A partir de los terminales o bornes de salida del alternador, la energía eléctrica normalmente va a un grupo de transformadores que se encargan de elevar el voltaje (subestaciones primarias o elevadoras) y de éstas a las líneas de transmisión primarias o de alto voltaje (230, 115 ó 46 kV, por ejemplo).

El vapor exhausto de la turbina pasa a través de un eyector que extrae los gases no condensables, tales como H_2S y CO_2 , éstos son descargados a la atmósfera. El vapor es condensado por contacto directo con agua fría proveniente de una torre de enfriamiento, luego es depositado en un tanque de condensados para su posterior reinyección a los pozos perforados para tal fin.

En resumen, una planta geotermoeléctrica es una planta de vapor en la que el generador de vapor ha sido reemplazado por el "reservorio" geotérmico y en la que la energía es suministrada por la energía térmica de la tierra en lugar de petróleo u otro combustible empleado.

En la Figura 20 se muestra el ciclo de generación de energía eléctrica en un Campo Geotérmico.

FIGURA 20. DIAGRAMA ESQUEMÁTICO SIMPLIFICADO DEL PROCESO GENERAL DE GENERACIÓN ELÉCTRICA



III. QUÍMICA DE LA SÍLICE

La Sílice y sus formas combinadas (los Silicatos) cuya composición varía, desde los minerales situados profundamente como las dunitas y cuyos constituyentes son en gran parte orto-silicatos (basaltos y las piroxenitas, formadas por minerales principalmente meta-silicatos), hasta llegar a las rocas graníticas más silíceas y las venas de Cuarzo que surgen a la superficie; forman la mayor parte de la corteza terrestre y de las estructuras que el hombre ha erigido sobre el planeta. La Sílice (SiO_2), es uno de los compuestos más abundantes de la corteza terrestre, constituyendo un 60% aproximadamente.

A pesar de que las fases sólidas resultantes no han sido plenamente estudiadas, se sabe que al menos tres fases existen en los sólidos amorfos resultantes: coloidal, polimérica y monomérica.

A. FASES CRISTALINAS DE LA SÍLICE

En la naturaleza las fases cristalinas de Sílice más conocidas son cinco:

1. Cuarzo
2. Tridimita
3. Cristobalita
4. Calcedonita
5. Sílice Amorfa

La unidad estructural fundamental de la Sílice (SiO_2) y de los Silicatos (SiO_4), es el átomo de Silicio o centro iónico rodeado ordinariamente por cuatro átomos de Oxígeno en coordinación tetraédrica.

La molécula gigante de Sílice es no polar y su fórmula estructural es Si-O , unida por enlace covalente.

1. Estructura de la Sílice Fase Cuarzo

El Cuarzo es estable a presión atmosférica desde el cero absoluto de temperatura hasta 876°C; existen Cuarzo Alto y Cuarzo Bajo, el Cuarzo Bajo existe hasta 573°C y el Alto de 578°C a 867°C.

El Cuarzo es un mineral muy difundido y sus usos son muy variados. Es duro y tenaz, es refractario y resistente a los ácidos. En la industria de la construcción se utilizan grandes cantidades de arena de Cuarzo para hacer morteros de hormigón. La Cuarzita se emplea como piedra de construcción y los ladrillos de Sílice para las coronas de los hornos destinados a fabricación de vidrio y acero; los cristales de Cuarzo de mejor calidad se utilizan para instrumentos ópticos.

El Cuarzo cristaliza fácilmente entre los 250°C y los 500°C, con ayuda del agua y a presiones altas esencialmente en soluciones ligeramente alcalinas. El gas que coexiste en estas condiciones con la solución saturada de Cuarzo contiene grandes cantidades de SiO₂ en solución debido a la humedad que posee.

Las celdas unitarias del Cuarzo (Alto y Bajo), son hexagonales en sentido general, cada una contiene 3 moléculas de SiO₂, las dos estructuras son relativamente cerradas. (Figura 21). En esta Figura la posición del átomo de Oxígeno no es mostrada.

Los círculos representan átomos de Silicio:

- Los círculos blancos representan un alto nivel
- Los círculos negros un bajo nivel

En el Bajo Cuarzo los átomos de Silicio cambian de una posición más simétrica (a), a una menos simétrica (b).

La disposición de los átomos en el Cuarzo Alto y Cuarzo Bajo es tan semejante, que cuando se calienta cuidadosamente un cristal de Cuarzo Bajo, pasando por la

temperatura de conversión (573°C), éste se convierte gradualmente y sin violencia en un cristal de Cuarzo de la forma correspondiente a la temperatura alta. En esta transformación hay una distorsión ligera de la estructura, pero el carácter general del enlace no varía.

La conversión del Cuarzo en Tridimita a 867°C es tan lenta que se puede efectuar solo con auxilio de sustancias mineralizantes como el Tungstanato de Sodio fundido. El cambio de Cuarzo a Cristobalita es el que se efectúa ordinariamente cuando se calienta el Cuarzo sin un fundente; pero la velocidad de conversión casi no puede apreciarse a temperaturas inferiores a 1.000°C .

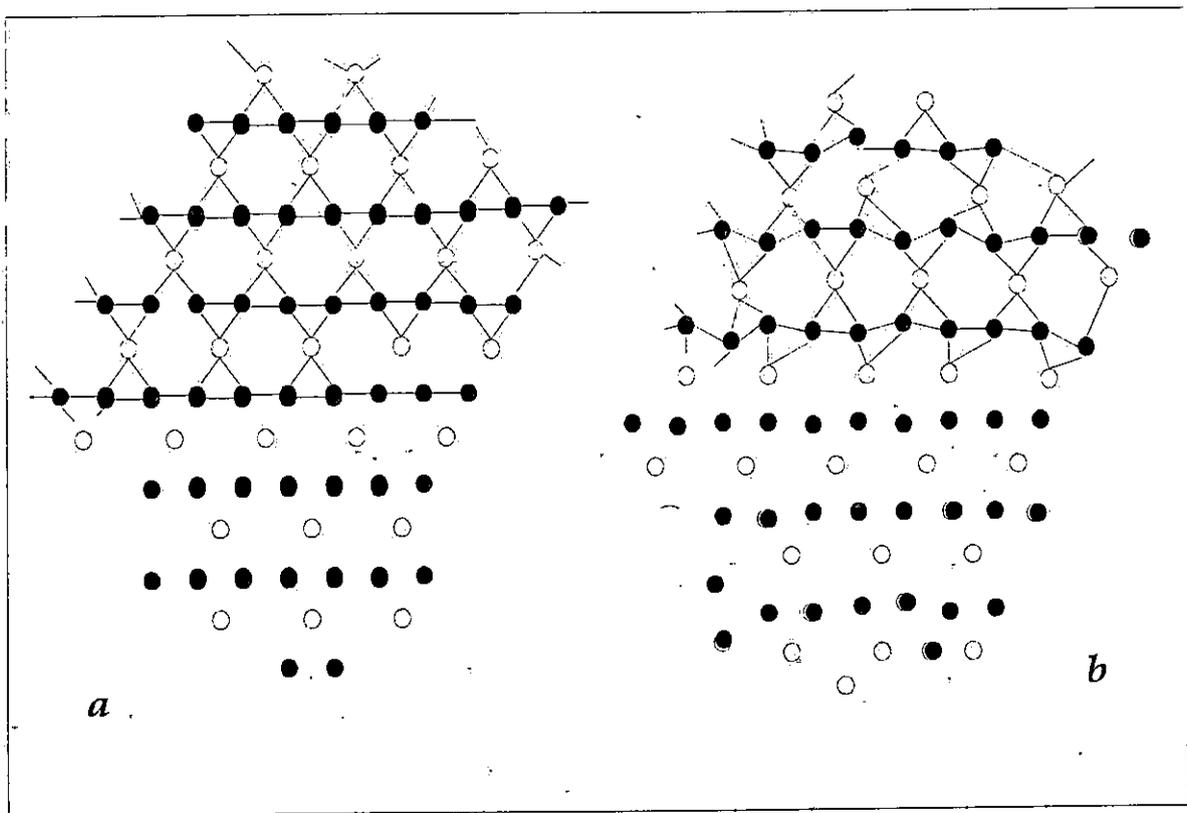


Figura 21. Estructura Cristalina del Cuarzo. (a- Alto; b- Bajo)

2. Estructura de la Tridimita

Estable a presión atmosférica desde 867°C hasta 1.470°C existiendo dos tipos de Tridimita, la primera "*Tridimita S*" estable hasta 1.470°C y capaz de permanecer metaestable arriba de los 1.470°C y abajo de los 867°C; y la "*Tridimita M*", metaestable a altas temperaturas que cambian a "*Tridimita S*" gradualmente, lo cual sólo es apreciable arriba de los 900°C. La estructura de las seis, modificaciones de "*Tridimita S*" y las tres modificaciones de "*Tridimita M*" son dudosas.

Sus simetrías son prácticamente hexagonales pero de diferente forma que las del Cuarzo. Una estructura hexagonal simplificada puede ser corregida por la modificación de la alta temperatura (Figura 22), los números dentro de los átomos de Silicio indican la posición de ellos en la celdilla.

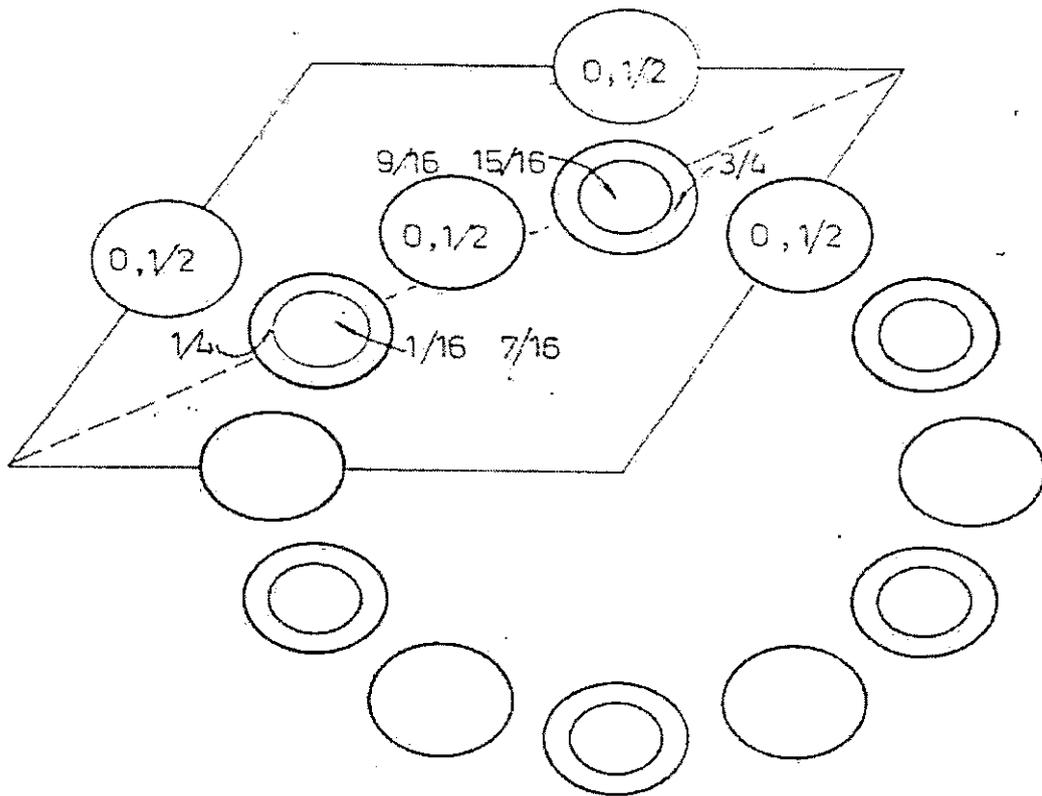


Figura 22. Estructura cristalina de la Tridimita.

3. Estructura de la Cristobalita.

Estable a presión atmosférica desde 1.470°C a 1.723°C, que es el punto de ebullición, capaz de permanecer metaestable a cualquier temperatura abajo de los 1.470°C (Figura 23).

Se conocen dos tipos de Cristobalita: Alta y Baja. En la Baja Cristobalita, las celdas presentan simetrías tetragonales, contiene cuatro moléculas de SiO_2 su conversión de la forma Alta a Baja se efectúa entre 200°C y 300°C.

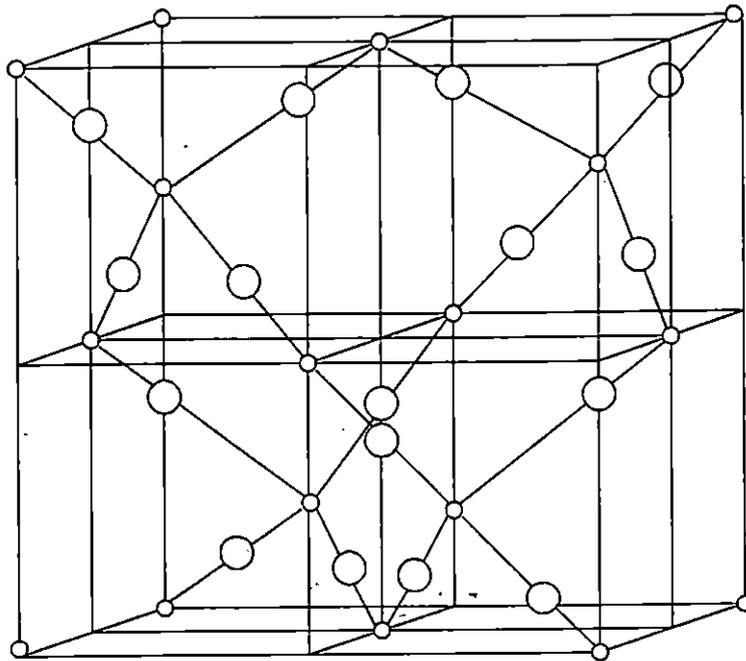


Figura 23. Estructura de la Cristobalita.

Las esferas pequeñas representan el Silicio.

Las esferas grandes representan el Oxígeno.

La temperatura de conversión depende de la temperatura a que la Cristobalita se formó y alcanzó el equilibrio, del tipo de Sílice del que se forman originalmente y de su historia térmica.

4. Fase Calcedonita

Se conoce como Sílice Calcedónica, a ciertas variedades de Sílice diferenciadas de la mayoría de las anteriores, principalmente por su estado de fina subdivisión.

La Calcedonia es una forma microcristalina de la Sílice, la mayor parte de las especies de Sílice Calcedonia son predominantemente cristalinas. Su color es casi siempre debida a sustancias extrañas y la forma externa de los agregados de fibras depende de las condiciones de depositación.

Las propiedades de la Sílice Calcedonia se aproximan más a las del Cuarzo que a las de cualquier otra de las fases principales.

La mayor parte de especies de la Sílice Calcedonia poseen la estructura del Cuarzo Bajo.

5. Fase Amorfa de la Sílice

Existen 5 fases Amorfas de la Sílice:

- a. Sílice líquida.
- b. Sílice vítrea.
- c. Sílice suprapiezovitrea.
- d. Sílice compacta.
- e. Sílice M.

La Sílice vítrea (fase 2) es producida cuando cualquiera de las fases cristalinas de la Sílice es fundida hasta formar Sílice líquida (fase 1) y luego es rápidamente enfriada.

La Sílice piezovítrea (fase 3) es una modificación de la Sílice Vítrea, polimórfica de alta presión, se diferencia de la Sílice vítrea por una marcada y reversible baja compactación cerca de 31 a 33 kilobar a temperatura ambiente.

La Sílice Vítrea compacta (fase 4) fue descubierta en 1953 bajo presión de 1.000 kilobar o más, lo cual es cerca del límite obtenido experimentalmente a temperatura ambiente. La Sílice Vítrea común, se mantiene permanentemente condensada a una fase de densidad 2,61 la cual es 18% más densa como el Cuarzo cristalino.

La Sílice micromorfa granular es una forma finamente dividida en partículas tan pequeñas que a veces el microscopio no puede revelar si son o no cristalinos, esta forma de Sílice puede ser obtenida por dos métodos:

- Precipitación desde una solución.
- Depositación desde la fase vapor.

La Sílice precipitada, puede ser preparada en las siguientes formas:

- Por adición de un ácido a una solución de Silicato de Sodio en agua, el precipitado de SiO_2 hidratado es lavado, secado y decantado lo suficiente para eliminar el agua.
- Pasando el vapor de SiF_4 en agua. El precipitado de SiO_2 hidratado es filtrado y calentado para eliminar el agua.
- Por hidrólisis de un silicato orgánico.

La Sílice presente en el Agua Geotérmica se encuentra en estado coloidal, que es desde luego una forma de Sílice Amorfa, y es la que interesa para el presente trabajo.

B. PROPIEDADES QUÍMICAS DE LA SÍLICE

La Sílice es, en todas sus formas, resistente al ataque de agentes químicos.

El Cuarzo y el Vidrio de Sílice son insolubles en todos los ácidos excepto en el Fluorhídrico, que forma SiF_4 volátil y que también se forma rápidamente al calentarlos con Fluoruro de Amonio.

Las Soluciones de Álcalis o de Carbonatos alcalinos fríos, tampoco afectan al Cuarzo y al Vidrio de Sílice. En las soluciones hirvientes, la Sílice Amorfa precipitada se disuelve con bastante rapidez. El Vidrio de Sílice se afecta lentamente y el Cuarzo apenas si se altera. Ambos se volatilizan en forma de Tetracloruro de Silicio (SiCl_4) calentándolos con Tricloruro de Fósforo o con Tetracloruro de Carbono; al calentarlos con Azufre se forma SiO_2 .

C. SISTEMA SÍLICE - AGUA

La Sílice (SiO_2) se encuentra frecuentemente asociada con agua, especialmente Sílice mineral.

Investigaciones sobre este sistema, demuestran que la Sílice disuelta se encuentra en forma monomérica ya sea en estado estable o metaestable, no se adhiere ni precipita mientras no polimerice.

La polimerización es favorecida por las colisiones interpartículas y por el tiempo de retención necesario para que la conversión de monomérica a polimérica sea posible.

Para explicar mejor el comportamiento de las distintas fases en que se presenta la Sílice, es necesario el tratamiento del sistema Sílice - Agua en forma unitaria.

D. SOLUCIONES DE SÍLICE

Si se considera el sistema $\text{SiO}_2 - \text{H}_2\text{O}$ como una solución y se coloca una muestra de cualquier forma de Sílice en contacto con cualquier fase de H_2O inmediatamente comienza a disolverse hasta alcanzar un estado de equilibrio. Esto limita las posibilidades de combinación a un número de 44 fases de 2 componentes, resultantes de las posibles combinaciones entre las 22 fases de la Sílice y las 2 restantes del agua.

La solubilidad de la Sílice varía de acuerdo a muchos factores que sobre todo dependen de la historia o procedencia de la fase silíceas disuelta. Así por ejemplo la solubilidad del Cuarzo es mucho menor que la solubilidad de la Sílice Vítreas (no obstante ambas son fases Silíceas).

Es claro que las condiciones de presión y temperatura serán determinantes en el proceso de formación y descomposición de las fases de la Sílice, incluso de las soluciones, pero no debe olvidarse que, a condiciones determinadas no siempre existe la misma fase y que una variable muy importante en estas transformaciones es el tiempo, por lo tanto, puede evidenciarse que la solubilidad de la Sílice no estará completamente determinada por las condiciones de presión y temperatura prevaletes, sino en gran medida, de la fase en cuestión y de la historia seguida en el proceso de solubilización.

E. FASES EN EL SISTEMA SÍLICE - AGUA

El primer paso en el estudio de un sistema de dos componentes es identificar las fases, éstas son regidas por la regla de las fases de GIBBS.

$$F = C - P + 2$$

En ésta ecuación:

F = número de grados de libertad del sistema y proporciona el número de variables cuyo valor debe especificarse arbitrariamente antes de que el estado del sistema quede caracterizado.

Según esta regla el número de grados de libertad de un sistema, está determinado por la diferencia en el número de componentes y el de fases presentes.

C = número de componentes

P = número de fases.

Para el sistema Sílice-Agua, $C = 2$, por lo tanto si cuatro fases existen en equilibrio ($F=0$), puede ser solamente a temperatura fija, presión fija, y concentración fija de Sílice y agua en cada una de las cuatro fases, más de cuatro fases no pueden existir en equilibrio.

Las fases de la Sílice pura, incluyendo sus modificaciones Altas y Bajas son en numero de 22 de las cuales 17 fases son cristalinas y los 5 restantes son amorfos. En cuanto al Agua se le conocen 9 fases de las cuales 7 son sólidas, 1 es gaseosa y otra líquida.

F. SOLUBILIDAD DE LA SÍLICE

La solubilidad es usada como un significado de concentración de una solución, la cual está en equilibrio químico con una fase definida.

Si se considera el sistema $\text{SiO}_2 - \text{H}_2\text{O}$ como solución de Sílice, se tendría que analizar las 198 fases de 2 componentes resultantes de combinaciones posibles entre las 9 fases del agua y las 22 anhídras de la Sílice.

La solubilidad en equilibrio de Sílice en agua depende de muchos factores, incluyendo el estado de combinación de la Sílice, la temperatura, presión y pH.

A temperaturas y presiones normales, la solubilidad de la Sílice en sus diversas formas es despreciable, sin embargo para las condiciones de presión y temperatura prevalentes en el subsuelo (reservorio) ésta solubilidad posee significación.

En el Agua la solubilidad del Cuarzo es extremadamente baja. A una determinada presión la solubilidad del Cuarzo incrementa con la temperatura excepto en la región cercana al punto crítico del agua donde la densidad de la solución es pequeña.

En la Figura 24 se presentan las solubilidades de diversas formas de la Sílice estudiadas.

La solubilidad de la Sílice Amorfa en equilibrio en agua destilada de 250 a 350°C, ha sido reportada ser cerca de 180 ppm. equivalente a 180 mg/lit.

El efecto del pH sobre la solubilidad de la Sílice Amorfa en agua fue determinado por Alexander (de ref. 4), cuyos valores se detallan en la Tabla 9, los cambios de pH fueron efectuados con HCl o con NaOH.

A las determinaciones hechas por Alexander en cuanto a la solubilidad de la Sílice, se puede agregar:

1. A 0°C la Sílice Amorfa tiene una solubilidad de 60 a 80 ppm, a 25°C de 100 a 140 ppm. y a 90°C de 300 a 380 ppm. Las formas cristalinas tienen las más bajas solubilidades, siendo las del Cuarzo las más bajas.
2. La solubilidad de la Sílice Amorfa es poco afectada por los cambios de pH en el rango de 0 a 9, pero arriba de los 9 incrementa rápidamente. Los iones de Silicato

existen en cantidades apreciables solamente a pH mayores de 9, en soluciones más ácidas, el ácido Silícico es esencialmente no ionizado.

3. La velocidad de aproximación al equilibrio de la Sílice en agua es lenta de 200°C a 250°C y rápida a 1.000°C.

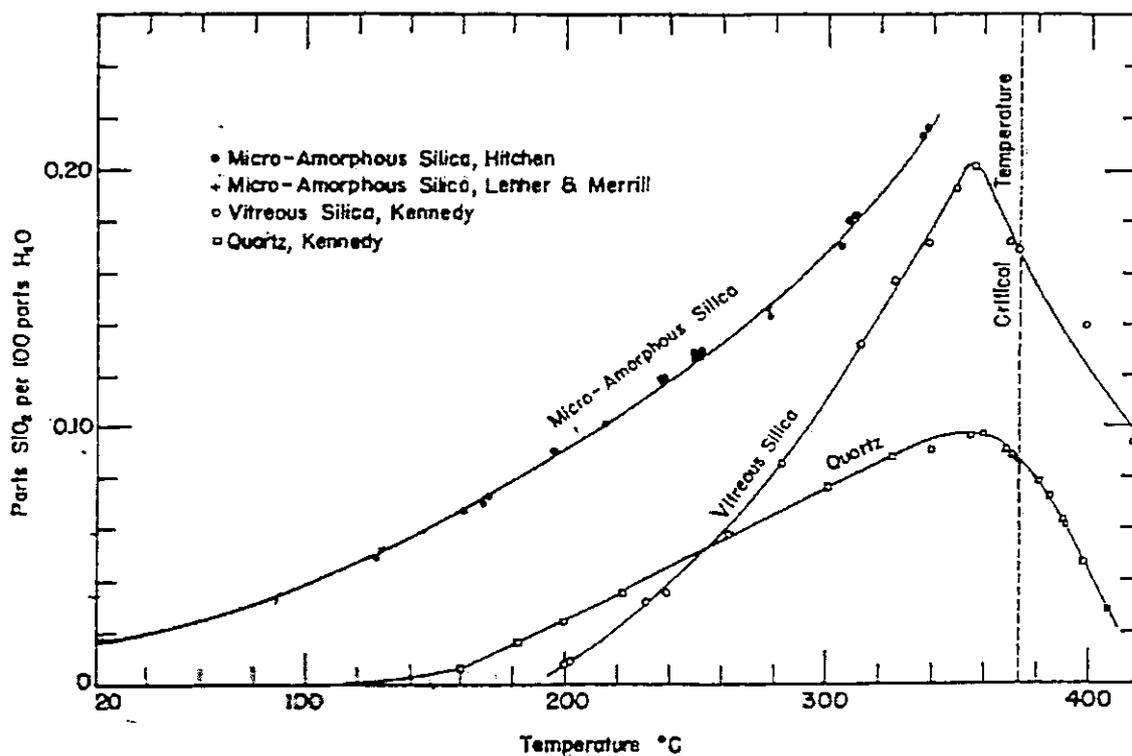


Figura 24. Solubilidades de Diversas Formas de la Sílice (de ref. 11).

Tabla 9. Solubilidad de la Sílice Amorfa a 250°C

pH	SiO ₂ (ppm)
1,00	140
2,00	150
3,00	150
4,20	130
5,70	110
7,70	100
10,26	490
10,60	1.120

Elmer y Nordberg (1962), propusieron una proyección de la solubilidad en agua a 95°C como 465 ppm. de SiO₂ este dato posee relativa concordancia con los datos de Leuder y Meniel que indicaron una Solubilidad de 432 ppm de SiO₂ a 95°C (de ref. 4).

Otros datos sobre la solubilidad de la Sílice dados por Elmer y Nordberg se presentan en la Tabla 10.

Tabla 10. Solubilidad de la Sílice a varias Temperaturas, en el Agua y Ácido.

TEMPERATURA °C	SiO ₂ (ppm)	
	AGUA	ACIDO
0	AGUA PURA	HNO ₃ (8N)
95	465	10
65	270	10
36	170	5

La Figura 25 presenta la solubilidad del Cuarzo, Cristobalita y Sílice Amorfa a diversas temperaturas.

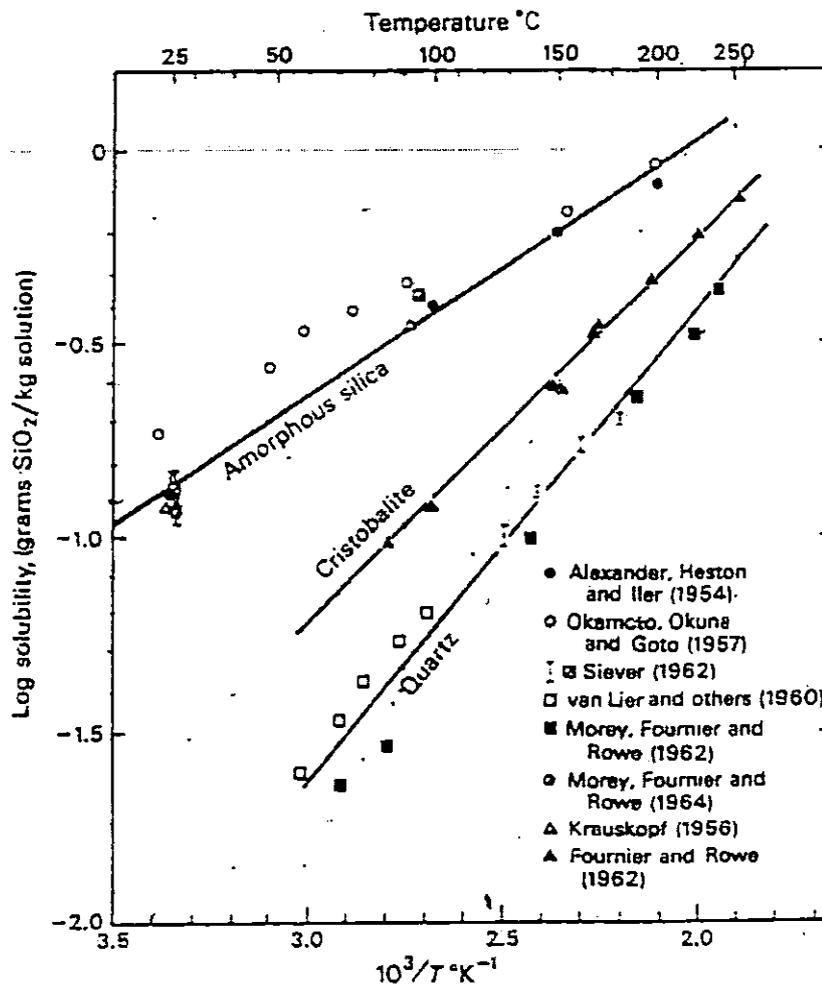


Figura 25. Solubilidad del Cuarzo, Cristobalita y Sílice Amorfa vrs. Temperatura (de ref. 11).

IV. DEPOSITACIÓN DE LA SÍLICE.

El fenómeno de depositación de la Sílice puede ser estudiado convenientemente por: la termodinámica y la cinética de depositación. La termodinámica de soluciones de Sílice permite predecir qué debe suceder eventualmente cuando el equilibrio es alcanzado. La cinética procura explicar qué tan rápido es alcanzado el equilibrio.

A. CONSIDERACIONES TERMODINÁMICAS DE DEPOSITACIÓN DE LA SÍLICE

El Cuarzo, es la más abundante de las fases cristalinas de la Sílice encontradas en la naturaleza, siendo la sustancia que se encuentra en mayor proporción en las capas profundas de los reservorios geotérmicos.

El agua confinada en los reservorios que se encuentran a diversas profundidades dentro de la tierra, tiene una alta temperatura (290°C, para el caso del Campo Geotérmico de Berlín). Arriba de los 200°C, generalmente se considera que el Cuarzo está en equilibrio de solubilidad, lo cual se representa por la siguiente reacción:



Esta reacción depende de la temperatura y obedece la ecuación:

$$\text{Log } C = -1.309(T^{-1}) + 5,19 \quad (1)$$

Donde: C = concentración (mg/Kg) en solución.

T = Temperatura absoluta (°K).

El Cuarzo se disuelve en el agua en forma de Sílice monomérica, alcanzando el equilibrio de solubilidad a la temperatura a la que se produce la solución.

Al ser extraída esta solución del reservorio se produce un exceso sobre el límite de solubilidad producto del cambio en la presión y temperatura que sufre el fluido Geotérmico. A estas nuevas condiciones el Cuarzo tiende a pasar a la fase sólida. Sin embargo, la forma de Sílice normalmente precipitada en la superficie es Sílice Amorfa. Ésta no presenta una estructura cristalina y es más soluble que el Cuarzo.

La solubilidad de la Sílice Amorfa ha sido determinada experimentalmente a la presión de saturación de agua (Fournier and Rowe, 1977). Esta solubilidad obedece la ecuación:

$$\text{Log } C = -731(T^{-1}) + 4,52 \quad (2)$$

Donde: C y T tienen los mismos significados y unidades que en la ecuación (1).

La Figura 26 muestra las solubilidades del Cuarzo y Sílice Amorfa. En ésta puede observarse que la solubilidad de la Sílice Amorfa es mayor que la del Cuarzo a cualquier temperatura.

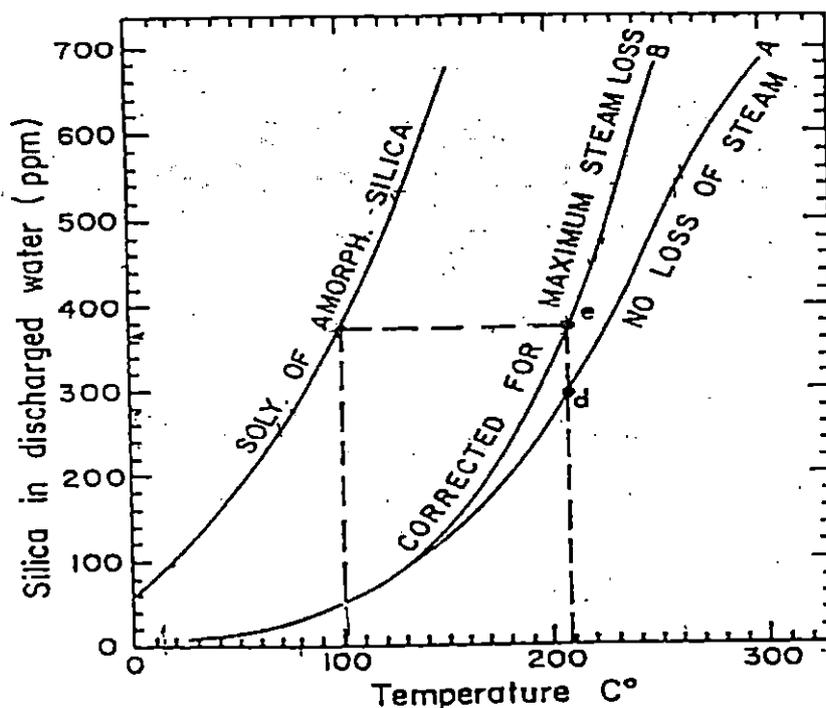


Figura 26. Solubilidad del Cuarzo y Sílice Amorfa (de ref. 11)

Las ecuaciones (1) y (2) han sido calculadas a la presión de vapor saturado del agua pura.

A medida que la concentración de otras especies disueltas se incrementa, la solubilidad del Cuarzo y Sílice Amorfa tiende a disminuir ante la presencia de otras sales (e.g. en soluciones de NaCl).

Por lo tanto, cuando las aguas geotérmicas se someten a las condiciones del ambiente en la superficie, la diferencia de solubilidades entre Sílice Amorfa y Cuarzo permite operar con una considerable caída de temperatura antes que la solución se sobresature con respecto a la Sílice Amorfa, esto permite la explotación de sistemas geotérmicos sin que exista la posibilidad de incrustación de Sílice.

1. Temperatura de Saturación de la Sílice (TSS)

La Temperatura de Saturación de la Sílice es la temperatura a la cual el agua separada a las condiciones de temperatura y presión se satura con respecto a la Sílice Amorfa, esta temperatura cambia dependiendo de las condiciones del reservorio. La temperatura de saturación de la Sílice es importante ya que si el fluido geotérmico se separa a una temperatura mayor que ésta, la incrustación de Sílice no ocurrirá.

Para el Campo Geotérmico de Berlín, la temperatura máxima observada en el acuífero tiene un valor aproximado de 300°C. A esta temperatura, el líquido en el reservorio tendrá una concentración de Sílice de 805 ppm en equilibrio con Cuarzo. Con estos datos se ha calculado la temperatura de Saturación de la Sílice, la cual es de 200°C.

Obviamente, si la reinyección del agua separada es considerada, ésta será igualmente segura si la temperatura del sistema se mantiene arriba de la temperatura de saturación de la Sílice.

El Cuarzo posee una estructura cristalina en la que todo átomo de Silicio se encuentra rodeado por cuatro átomos de oxígeno. Cada átomo de oxígeno está conectado a otro átomo de Silicio tetraédrico separado y la serie se repite en tres dimensiones.

Cuando la Sílice se disuelve en agua, se forman moléculas discretas de Ácido Silícico (H_4SiO_4). El que en solución forma un ácido débil que se disocia de acuerdo a la siguiente reacción:



Un incremento en el pH favorecerá la verificación de la reacción anterior hacia la derecha, incrementando la concentración de iones $H_3SiO_4^-$. Así, la Sílice es más soluble a pH alcalinos.

El pK_1 para esta primera ionización de Ácido Silícico (o Sílice disuelta) ha sido proporcionado por los investigadores Truesdell y Singers por medio de la siguiente reacción:

$$\text{Log } K_1 = - 2549(T^{-1}) - 15.36 \times 10^{-6} T^2 \quad (3)$$

Donde: T = Temperatura absoluta ($^{\circ}\text{K}$)

La Figura 27 muestra la relación solubilidad/pH calculada para el pozo BR-22 de Broadlands, New Zealand (Henley, 1983). Como se puede ver, la solubilidad de Sílice amorfa aumenta marcadamente a medida que el pH se incrementa.

B. ASPECTOS CINÉTICOS DE DEPOSITACIÓN DE LA SÍLICE

En la práctica, generalmente las soluciones de Sílice requieren tiempos muy largos para alcanzar el equilibrio. Experimentos de laboratorio y observaciones de campo han mostrado que existen muchos factores que afectan la cinética de depositación de la Sílice, algunos de los más importantes son:

- Grado de Sobresaturación.
- pH.
- Temperatura.
- Razones de flujo.
- Aireación.
- Otros iones en solución.

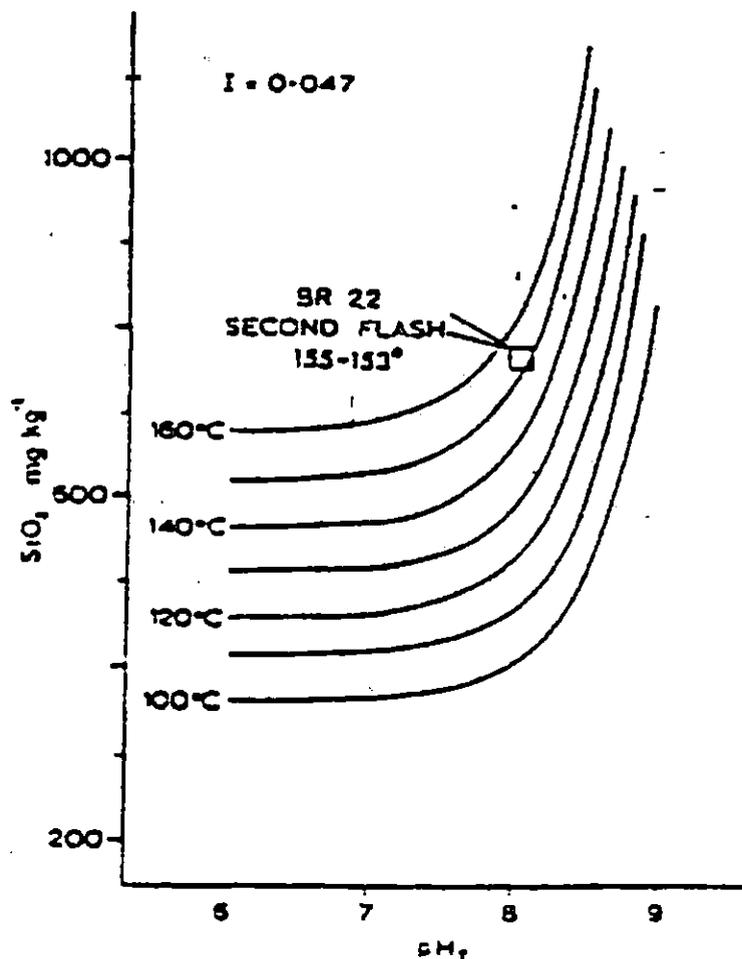


Figura 27. Relación Solubilidad / pH Calculada, Pozo BR-22 (Henley, 1983 de ref. 11)

En general, la depositación de Sílice sigue uno de los dos posibles mecanismos siguientes:

- Formación preliminar de un coloide y subsecuente precipitación.
- Depositación directa en superficies sólidas.

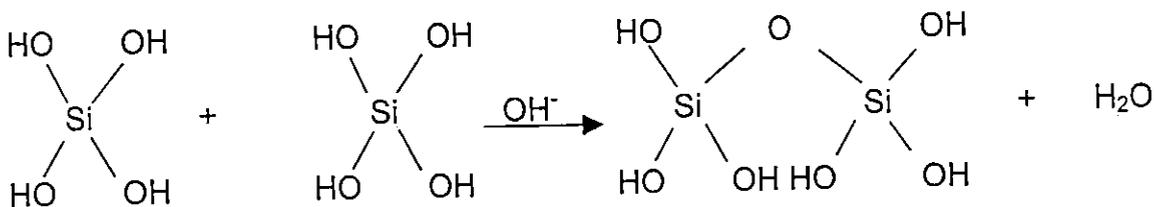
El producto del primer mecanismo es un depósito poroso, de baja densidad, no muy adhesivo y suave; mientras que el segundo tiende a dar un producto vítreo, muy duro, difícil de remover y de alta densidad.

1. Deposición Coloidal

Es el mejor mecanismo de depositación, cuando la razón de sobresaturación es mayor que 2, iniciándose con la formación de una solución coloidal estable; toma lugar en tres fases: Nucleación, Maduración y Crecimiento.

a. Nucleación

Cuando dos moléculas de ácido Silícico se unen en una solución sobresaturada pueden combinarse para formar un dimero: $H_6Si_2O_7$.



Esta reacción es el primer escenario en la polimerización de Sílice. La reacción en cadena continúa formando trimeros, tetrameros, etc.

Esta reacción es catalizada por el ión hidroxilo. Puede observarse que si se incrementa el pH de la solución, se favorece la reacción de polimerización.

Marsh et. al. (1975) también indica que la máxima razón de polimerización ocurriría a un pH de 9,8, el cual es equivalente al pK_A de la primera reacción de ionización del ácido Silícico. A este valor pH, las moléculas ionizadas y no disociadas de $Si(OH)_4$ estarán a igual concentración.

Las ligaduras de la solución se forman aleatoriamente y consecuentemente el polímero formado tiene una estructura no cristalina.

Como sólo dos moléculas (dos monómeros) son necesarias para comenzar la reacción, este mecanismo es llamado "nucleación homogénea". Muchas veces, si el grado de sobresaturación es bajo, hay un tiempo retardado antes que la nucleación proceda. Éste a veces es referido como un "período de inducción".

b. Maduración

Este proceso controla el número de partículas que eventualmente se formarán.

Como la polimerización continúa, el tamaño de las partículas (esféricas) se incrementa por encadenamiento de más partículas de Sílice monomérica presentes en la solución sobresaturada, hasta que esta se reduce su presencia a tal grado que las reacciones de nucleación finalizan. En este escenario, el proceso de "maduración" toma lugar en donde las partículas más pequeñas se disuelven y las de mayor tamaño continúan creciendo hasta que se alcanza el equilibrio y no existen mas partículas pequeñas disolviéndose.

c. Crecimiento

En la medida que más Sílice monomérica esté disponible (e.g. enfriamiento adicional del fluido) las partículas formadas pueden crecer. Generalmente no se formarán más partículas, es decir, la nucleación no comenzará de nuevo una vez que la fase de maduración ha sido completada. El tamaño final de las partículas coloidales puede oscilar entre 0,01 a 3 μm .

Es importante considerar que en el rango de pH típico de los fluidos geotérmicos, entre 6 y 7, las partículas coloidales poseen una gran superficie cargada negativamente. Esta carga y el tamaño de las partículas son los responsables que éstas permanezcan suspendidas en la solución por muy largos períodos.

Los tres mecanismos anteriores representan el primer escenario en la formación de incrustación de Sílice voluminosa encontrada en las centrales geotérmicas.

El segundo escenario es la precipitación de las partículas coloidales desde la solución. Esto puede suceder por medio de tres formas:

- i. Debido a que las superficies de los coloides están muy altamente cargadas, y, en el caso de la Sílice ésta es una carga negativa, cationes en solución, especialmente cationes di y trivalentes, pueden actuar como un puente entre partículas coloidales vecinas. Las partículas combinadas resultantes precipitan fuera de la solución debido al incremento en su peso molecular. Este proceso es llamado coagulación o floculación. Los cationes Fe^{+3} y Ca^{+2} podrían contribuir a este tipo de depositación así como otros floculantes artificiales.

Los cationes Al^{+3} , Ca^{+2} y Fe^{+3} han mostrado ser muy efectivos en la floculación de soluciones coloidales cargadas negativamente.

- ii. A razones de saturación entre 2, 5 y 3, las partículas coloidales pueden agregarse, éstas consiguen acercarse lo suficiente unas a otras y vencer la repulsión electrostática. Al lograr unirse, las partículas combinadas aumentan su tamaño y su peso molecular, por lo que precipitan.
- iii. Un tercer mecanismo de depositación se produce cuando el coloide cargado eléctricamente es atraído a las paredes del recipiente que lo contiene por fuerzas electrostáticas. Una vez en la pared, el coloide puede agregarse con otras partículas coloidales.

Una vez que el coloide ha sido depositado por cualquiera de estos métodos, se convierte en una incrustación, la cual seguirá creciendo por la adición de Sílice en la solución.

De lo anterior, se plantean las siguientes alternativas para evitar la depositación de la Sílice:

Un método posible de tratamiento es disminuir la polimerización, ésta puede lograrse:

- i. Manteniendo la temperatura lo suficientemente alta y por consiguiente la solubilidad de la Sílice arriba del nivel de sobresaturación.
- ii. Disminuyendo la turbulencia, para evitar incrementos del gradiente de velocidad y colisión de las partículas que puedan provocar incrementos del pH.
- iii. Disminuyendo el pH de la solución, que tiene un marcado efecto en la velocidad de polimerización en soluciones sobresaturadas con respecto a la Sílice. Esto puede lograrse acidificando el agua residual. La disminución del pH a valores menores que 6,5 causa una marcada disminución en la polimerización y un aumento en la estabilidad de la Sílice.

Un método adicional es retener el agua, hasta que se produzca la total polimerización y precipitación de la Sílice Monomérica, en un punto de fácil limpieza. Si no hay Sílice Monomérica adicional en solución para unir las partículas, entonces la adhesión es pobre y la incrustación puede ser removida fácilmente.

V. PROCESO DE COAGULACIÓN Y FLOCULACIÓN

Se define la coagulación como la precipitación de sólidos no sedimentables contenidos en una fase líquida, mediante la adición de productos químicos llamados coagulantes. La materia coagulada forma flóculos, a este proceso se le conoce como floculación.

El tamaño de las partículas sólidas presentes en el agua varían desde el material grueso, hasta el muy fino en las superficies. La presencia de sólidos suspendidos origina turbidez, alguna coloración en las aguas.

Las partículas gruesas se depositan rápidamente, no así las partículas finas que se mantienen en suspensión, por lo que para poder agruparlos en partículas de mayor tamaño y lograr precipitarlos hay necesidad de usar un coagulante. Otros cuerpos de mayor tamaño y consistencia constituyen los flóculos, éstos se caracterizan por la progresiva formación de partículas mayores, por adherencia.

La coagulación en el agua reduce la concentración de éstos materiales a límites aceptables. Se puede decir que la floculación es el efecto del tratamiento del agua con coagulantes.

La floculación es muy usada para mejorar la reducción de sólidos suspendidos en el proceso de sedimentación. Algunos desechos contienen materia suspendida la cual no sedimenta rápidamente, en tales casos es muy ventajoso agregar un coagulante para formar un gran flóculo de materia sedimentable con una gran área de superficie relativa al peso de la partícula del flóculo.

Cuando el flóculo sedimenta a través del líquido, se pone en contacto con éstas partículas que se vienen a adherir y provocan la sedimentación en masa.

Después del mezclado, el líquido es agitado suavemente en el floculador por 20 a 60 minutos, para dejar suficiente tiempo a fin de que al flóculo se adhieran otras partículas y crezca. El tiempo promedio es de 30 a 40 minutos.

La floculación provoca colisiones entre las partículas desestabilizadas que generan la formación de agregados sedimentables que pueden ser removidos por decantación o por filtración.

La mayor parte de la materia en suspensión en el agua se encuentra en estado coloidal por naturaleza, por su tamaño tiene una acción superficial en lo que respecta a concentrar otras sustancias en la superficie (adsorción), y a recibir o producir cargas (propiedades electrostáticas). Un estado coloidal es definido cuando un sólido insoluble está finamente dividido en partículas que forman una suspensión relativa permanente.

Los coloides pueden ser descritos como una fase dispersa en un medio homogéneo; existen fuerzas que tienden a mantener un coloide tal cual ha sido producido, y otras que buscan su eliminación.

Entre las fuerzas que tienden a mantener un coloide, los cuales son conocidos como factores de estabilización, se tiene el potencial zeta (δ). Y las fuerzas que buscan su eliminación o factores de desestabilización, como las fuerzas de Van Der Waals y el movimiento Browniano.

La mayoría de los coloides naturales del agua están cargados negativamente, por lo que se rechazan en lugar de reunirse en partículas mayores que podrán depositarse permaneciendo así en suspensión, por lo que es necesario añadir un material catiónico que neutralice éstas partículas generando otras de sedimentación rápida.

Una partícula electronegativa atraerá una capa lo suficientemente compacta de contornos adyacentes a la partícula, ésta se conoce como capa fija. Los contornos se

hacen más ampliamente espaciados en tanto se extienden fuera de la capa fija, generando una capa difusa externa a la capa fija.

Existe un punto donde la concentración de los contornos alrededor de la partícula será igual a la concentración de la masa del líquido. Esto se conoce como doble capa alrededor del coloide con un cambio de gradientes en cationes y aniones, cuando la distancia de la capa fija hacia el seno del líquido se incrementa la diferencia de concentración entre las especies catiónicas y aniónicas originan el establecimiento de campos electrostáticos.

Si a la masa de la solución se le asigna un potencial cero, el potencial en cualquier punto a través de la doble capa estará medido por el trabajo requerido para transportar una unidad de carga de la masa de la solución a la superficie de la partícula. El plano de corte es una frontera entre la posición de la solución que se mueve con partículas y su movimiento independiente de las partículas.

El potencial que existe en el plano de corte que está definido como el potencial zeta (δ), y es el responsable del comportamiento electrocinético de los coloides (Figura 28).

El objeto de la coagulación es reducir la magnitud del potencial zeta, de forma que las fuerzas de repulsión entre partículas sean menores que las fuerzas de atracción de Van Der Waalls produciéndose entonces una coalescencia de las partículas coloidales y la coagulación requerida.

El movimiento Browniano es una actividad cinética de las partículas en suspensión en un líquido de tipo térmico, provocado por acciones de choques moleculares sobre las partículas coloidales. Esto constituye una tendencia a la transformación del coloide en una suspensión no coloidal.

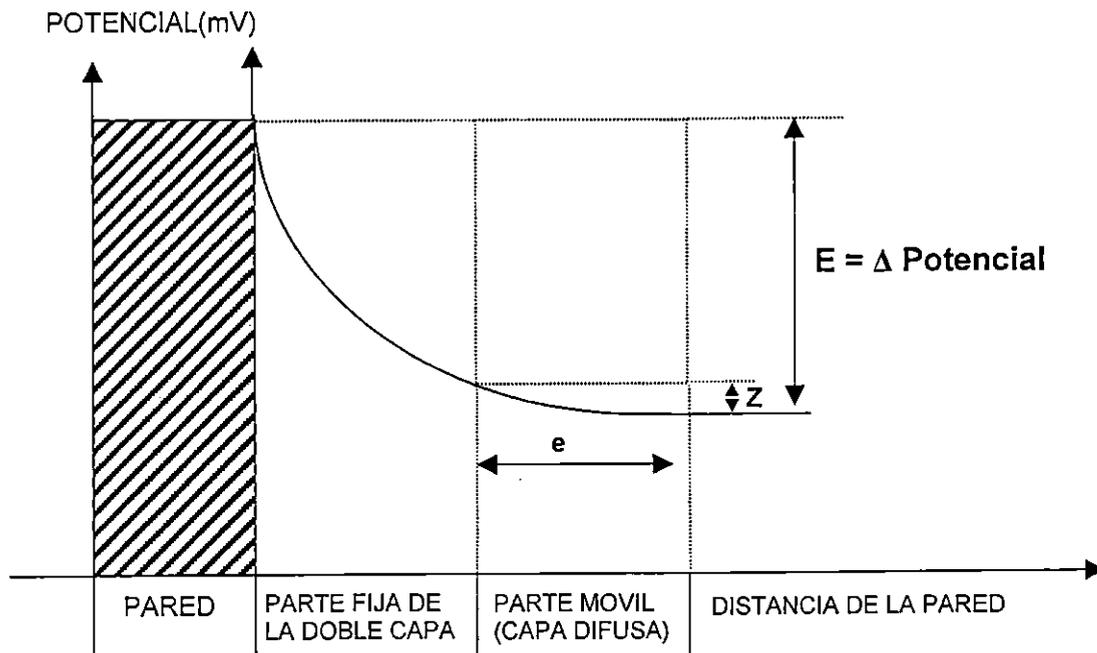


Figura 28. Potencial Zeta (δ)

VI. COAGULACIÓN Y FLOCULACIÓN EN EL TRATAMIENTO QUÍMICO DE AGUAS GEOTÉRMICAS DE DESECHO

El tratamiento aplicado a un agua geotérmica de desecho depende de varios factores, entre ellos:

- El tipo y concentración de los contaminantes presentes en el agua.
- El uso final es al que se destinará el efluente tratado.
- El costo del tratamiento.

Los contaminantes presentes, generalmente sólidos, se encuentran:

- Disueltos: Flotantes

- No disueltos {
 Suspendidos
 Sedimentables
 Coloidales

De todas estas formas, las que no pueden ser removidas rápidamente por medios físicos como filtración ó sedimentación natural, son los disueltos y los que se encuentran en forma coloidal.

Sólidos disueltos, son aquellos que presentan un tamaño de partícula menor a 1 milimicrón (millonésima parte de un milímetro) y su concentración no cambia con el tiempo.

Sólidos coloidales, presentan un tamaño entre 1 y 500 mili micrones ($m\mu$) y pueden permanecer dispersos por años.

Los sólidos disueltos y coloidales, sólo pueden ser removidos rápidamente por medios químicos.

El proceso de remoción de sustancias disueltas se conoce como precipitación química.

Las sustancias coloidales presentan un comportamiento diferente, ya que su remoción está influida por las especies características químicas de los coloides.

Una suspensión coloidal consiste de partículas sólidas rodeadas por un líquido, teniendo cada partícula una superficie que constituye una barrera entre sólido y líquido.

Las partículas coloidales se encuentran cargadas eléctricamente y éste es uno de los factores que contribuyen a su permanencia en estado de fina división, ya que se repelen mutuamente, sin poderse unir y aumentar su tamaño hasta que las cargas se neutralicen.

El tratamiento para la remoción de coloides se conoce como floculación, consiste en la adición de ciertas sales inorgánicas solubles (coagulante) para formar sustancias gelatinosas, que son producto de la desestabilización eléctrica y aglomeración en coágulos de las partículas coloidales presentes en el agua.

Al mismo tiempo el coagulante soluble, agente químico que provoca la desestabilización de las partículas, experimenta reacciones químicas originando compuestos insolubles en forma de partículas diminutas cargadas eléctricamente que ocasionan la precipitación de una porción adicional de la materia coloidal.

La adición de coagulantes al agua cumple dos funciones:

- Acelera el asentamiento de la materia en suspensión
- Permite velocidades de filtración más altas que no se pueden lograr con otros métodos.

Cuando el agua se ha coagulado, el flóculo formado se asienta en el fondo, lo que forma un sedimento de consistencia sólida con el tiempo.

VII. PROCESOS DE SEPARACIÓN DE SÍLICE

La Sílice puede ser removida del agua por:

- Intercambio Iónico, se lleva a cabo a través de intercambiadores fuertemente básicos.
- Precipitación acompañada de clarificación, puede llevarse a cabo por suavización en frío o en caliente y por ablandamiento con cal - carbonato.

A. INTERCAMBIO IÓNICO

La remoción de Sílice por medio de este proceso se lleva a cabo con el uso de resinas fuertemente básicas; con objeto de optimizar operaciones se usan en serie los dos tipos aniónicos: las fuertemente básicas son regeneradas con hidróxido de sodio, y las resinas débilmente básicas son regeneradas con carbonato de sodio.

También se puede remover por un proceso combinado de cal en frío seguida por un proceso de ionización con Zeolita, este proceso remueve la Sílice a valores bajos entre 1,0 – 3,0 ppm.

Se puede además, efectuar este proceso con un pre tratamiento en caliente antes del intercambio iónico.

Debido a que los cambiadores aniónicos no poseen la misma estabilidad química que los catiónicos, deben ser considerados como artículos gastables.

La vida útil de las resinas aniónicas no está garantizada.

B. PRECIPITACIÓN

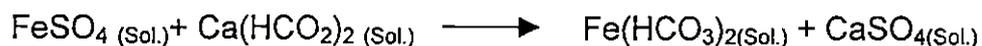
1. Remoción de la Sílice por el Proceso de Ablandamiento en Frío

La remoción de la Sílice por el proceso en frío se lleva a cabo a temperatura ambiente. Existen dos procesos de remoción de Sílice en frío.

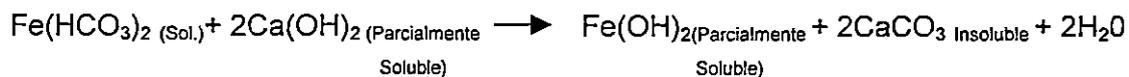
- a. Por medio del Hidróxido Férrico.
- b. Por medio de Magnesio.

a. Remoción de Sílice Mediante Hidróxido Férrico. Para este proceso se emplea Sulfato de Hierro, éste es un reactivo que tiene que importarse, actualmente disponible en el Mercado a un costo aproximado de \$5,50/kilogramo, este proceso es precipitado con sosa o con cal.

Al agregar agua al Sulfato Ferroso y ésta contiene Bicarbonatos, ocurre la siguiente reacción:



Luego se agrega la cal, teniendo lugar la siguiente reacción:



El Hidróxido de Hierro se oxida en el agua con el Oxígeno disuelto formando Hidróxido de Hierro insoluble.



La Sílice que se encuentra en estado coloidal, se une al hidróxido de Hierro con el cual forma el flóculo siendo así removida.

El pH óptimo para éste proceso es aproximadamente 9,0 para aguas con contenido inferior a 10 ppm de Sílice, la dosis requerida de Sulfato Férrico es de 15 a 20 ppm por cada ppm de Sílice removida.

Al aumentar la concentración de SiO_2 en el agua, la dosis de Sulfato de Hierro por cada ppm de SiO_2 removida es muy baja.

La eficiencia de este proceso disminuye al aumentar la temperatura, por lo que se debe llevar a cabo sólo a temperatura ambiente. Este proceso no es muy recomendable debido a que aumenta los Sulfatos (dureza temporal en el agua), además de influir directamente en la vida útil de los equipos.

b. Remoción de Sílice Mediante Magnesio. Éste es menos eficiente que el proceso con Sulfato de Hierro, a 10°C para remover 1 mg/lit de Sílice en exceso a 15 mg/lit se requiere la precipitación de aproximadamente 30 ppm de dureza y de Magnesio.

A temperatura de $21,1^\circ\text{C}$ (70 F) se puede remover 1 ppm. de Sílice por cada 6 a 7 ppm. de dureza removida.

El Magnesio se puede obtener de diferentes fuentes: Sulfato de Magnesio Soluble, Cal Dolomita u Oxido de Magnesio, de los cuales el menos indicado es el Sulfato de Magnesio debido a su alto costo y al aumento de Sulfatos en el agua.

Se puede obtener Óxido de Magnesio en el comercio, se puede utilizar para tal efecto la cal Dolomita que está compuesta de 32,2 de Oxido de Magnesio y 62,2 de cal hidratada $\text{Ca}(\text{OH})_2$.

Si un agua no disuelve suficiente Magnesio, será necesario agregar CO_2 para precipitar carbonatos.

2. Remoción de la Sílice por el Proceso de Ablandamiento en Caliente

La Sílice posee alta solubilidad cuando se encuentra en agua caliente y el medio es alcalino.

Ya en el proceso de ablandamiento en frío se habló de los compuestos del Magnesio y se indicó que el Hidróxido de Magnesio es el agente de remoción más efectivo.

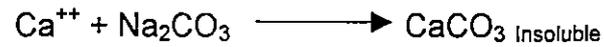
Conforme la temperatura sube hasta 80°C , la velocidad de hidratación de varios óxidos de Magnesio aumenta considerablemente, en el proceso de suavización en caliente a 104°C , su efectividad como reactivo no difiere grandemente.

3. Proceso de Ablandamiento con Cal - Carbonato de Sodio

La Sílice es removida en forma de Silicato de Calcio y como Silicato Hidroxo de Magnesio, además es absorbida por precipitados que se forman como el CaCO_3 aunque éste no es muy efectivo (10). La cal es un compuesto de bajo costo y abundante por lo tanto fácil de conseguir.

Este proceso puede ser aplicado en caliente y en frío, el Ca^{++} precipita como CaCO_3 y el Mg^{++} como $\text{Mg}(\text{OH})_2$





Para igualar las concentraciones estequiométricas finales de Ca^{2+} y C se debe cumplir:

$$(\text{Ca}^{++})_{\text{inicial}} + (\text{Ca}^{++})_{\text{cal agregada}} = (\text{Ct})_{\text{original}} + (\text{C})_{\text{carbonato sodio agregado}}$$

Lo que significa que al adicionar cal hidratada, se debe adicionar una cantidad estequiométrica de carbonato de Sodio.

Con el aumento de temperatura, decrecen las solubilidades de CaCO_3 e $\text{Mg}(\text{OH})_2$ y se elevan las velocidades de precipitación.

VIII. DESARROLLO Y RESULTADOS OBTENIDOS EN LA ETAPA EXPERIMENTAL

El desarrollo de la experimentación de campo se dividió en cuatro fases:

- A. Estudio de la Cinética de polimerización de la Sílice.
- B. Experimentación del uso de floculantes en la remoción de Sílice del agua geotérmica residual, determinación del floculante que proporcione los mejores resultados.
- C. Determinación de las condiciones a las cuales realizar el proceso de floculación con el floculante que ha proporcionado los mejores resultados, identificado en la fase anterior.
- D. Extracción de muestra de lodo formado por el proceso de floculación utilizado en la remoción de Sílice del agua geotérmica residual.

Del desarrollo de la experimentación se obtuvo información que ha sido utilizada para realizar un análisis estadístico y determinar las condiciones a las cuales el proceso de floculación puede ser técnicamente factible para la remoción de la Sílice del agua geotérmica residual.

La planificación de los experimentos y los análisis realizados se basaron en un diseño experimental, determinándose qué tipos de análisis químicos y estadístico serían necesarios para asegurar la representatividad de las muestras en las diferentes etapas del desarrollo de la experimentación de campo.

El experimento se desarrolló en el sistema de tanques de polimerización instalado en la plataforma del pozo TR-11, (Figura 29).

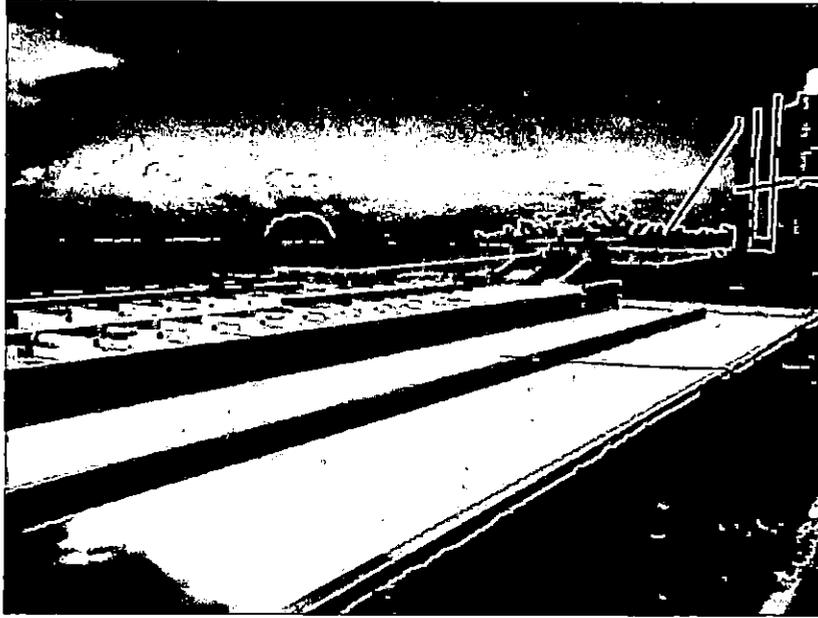


Figura 29. Sistema de tanques de polimerización instalado en la plataforma del pozo TR-11 del Campo Geotérmico de Berlín

La descripción de cada una de las etapas desarrolladas con sus respectivos resultados se plantean a continuación.

A. ESTUDIO DE LA CINÉTICA DE POLIMERIZACIÓN DE LA SÍLICE.

En este estudio se establecieron las condiciones para que se produjera la polimerización natural de la Sílice monomérica, realizando un muestreo continuo durante el proceso.

El experimento se realizó en la plataforma del pozo TR-11, específicamente en el sistema de tanques para polimerización de Sílice. En el Anexo 1 "Tanque laberíntico para la polimerización de la Sílice", se muestra un diagrama esquemático de esta plataforma y la ubicación del lugar donde se desarrolló el experimento. En la Figura 30 se presenta una fotografía del sitio en el que se instaló el equipo de análisis y los dispositivos de muestreo.

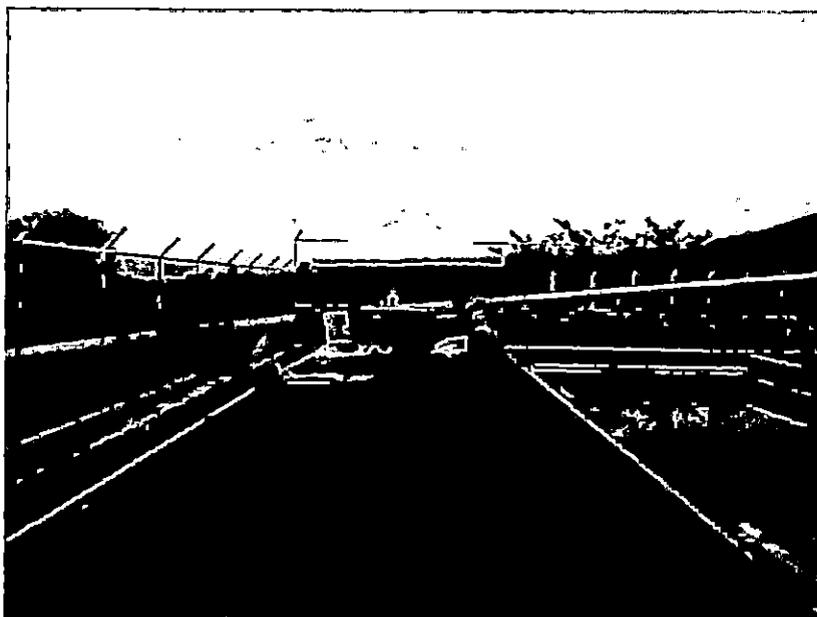


Figura 30. Centro de operaciones ubicado en la Plataforma del pozo TR-11.

El experimento se llevó a cabo llenando un barril de plástico de 55 gal y propiciado la polimerización natural de la Sílice disuelta en el agua geotérmica residual y realizando mediciones de:

1. Temperatura
2. pH
3. Sílice Monomérica en el sitio
4. Sílice Total

Los análisis de Sílice monomérica se realizaron con el equipo portátil "Fotómetro de campo SQ118" (Figura 31) proporcionado por GESAL (el procedimiento de análisis seguido para el uso de este equipo se presenta en el Anexo 3 "Procedimiento para análisis de Sílice Monomérica"). El análisis de Sílice Total se realizó por medio de absorción atómica en los laboratorios de GESAL, las muestras se acondicionaron al momento del muestreo regulando con Ácido Clorhídrico su valor de $\text{pH} \approx 1$.



Figura 31. Equipo portátil para análisis de Sílice monomérica. Fotómetro de campo MERK SQ118.

Las muestras para análisis se tomaron cada 15 minutos durante la primera hora y luego cada 30 min hasta que la concentración de Sílice Monomérica evaluada en el sitio, no varió en tres lecturas consecutivas. Para garantizar que las muestras posean la misma representatividad se tomaron siempre del mismo punto lo que se consiguió instalando al barril una llave plástica (15 cm abajo de la parte superior y al centro del barril) para acondicionarlo como dispositivo de muestreo, (Figura 32).

El experimento se repitió cuatro veces para garantizar su representatividad. Es conveniente hacer notar que la concentración de Sílice Total en el agua residual varía notablemente con el tiempo por lo que no se puede establecer un valor puntual de concentración inicial de ésta en las aguas de desecho, lo que llevó a establecer un rango de concentración inicial de la Sílice Total entre 1.000 – 1.100 ppm.



Figura 32. Fotografía de barril plástico utilizado para el estudio cinético de polimerización natural de la Sílice.

Los datos obtenidos de esta etapa se utilizaron para establecer un modelo cinético de polimerización de la Sílice que servirá como punto de partida para estudios posteriores. Dicha información se ha utilizado como parámetro de comparación entre la efectividad de remoción de los floculantes que se han ensayado y el proceso natural de precipitación.

Los resultados del experimento, en el que se reportan datos de: Temperatura, análisis de Sílice Total, Sílice Monomérica y pH, en función del tiempo, se muestran en la Tabla 11 y en las Figuras 33, 34, 35 y 36.

Tabla 11. Resultados del Estudio Cinético.

MUESTREO	TIEMPO min	T (°C)	SiO ₂ TOTAL (ppm)	SÍLICE MONOMÉRICA (ppm)	pH
1	0	87,0	1.142	663,40	7,05
1	15	84,0	1.136	423,72	7,08
1	30	81,5	1.158	479,36	6,92
1	45	79,5	1.164	543,56	7,07
1	60	78,5	1.142	492,20	7,11
1	90	75,0	1.121	299,20	7,10
1	120	72,0	1.146	XX	7,08
1	150	70,0	1.085	368,08	7,08
1	180	68,0	1.146	XX	7,10
1	240	64,5	1.132	192,60	7,15
1	300	60,5	1.144	177,62	7,16
1	360	57,0	1.022	149,80	7,16
2	0	84,0	1.039	282,48	6,84
2	15	79,5	1.115	218,28	6,85
2	30	78,0	1.093	231,12	6,88
2	45	75,5	1.068	209,72	6,91
2	60	73,0	1.007	171,20	6,90
2	90	70,0	1.098	59,92	6,90
2	120	66,0	1.100	38,52	6,93
2	150	XX	1.086	XX	6,93
3	0	85,5	1.120	1.062,60	6,95
3	20	80,0	1.134	881,68	6,95
3	40	78,0	1.126	770,40	6,95
3	60	75,0	1.019	761,84	6,93
3	90	72,0	1.069	778,96	6,93
3	120	70,0	1.121	766,12	6,93
3	150	67,2	1.038	774,68	6,93
3	180	65,0	1.159	684,80	6,89
3	300	58,0	1.080	55,64	6,89
3	360	55,0	1.029	114,13	6,89
3	420	53,0	1.161	68,48	XX
4	0	87,5	1.060	659,12	6,84
4	15	85,5	1.013	603,48	6,84
4	30	81,5	1.031	492,20	6,90
4	45	79,0	1.018	505,04	6,85
4	60	77,5	1.053	462,24	6,91
4	90	73,5	1.077	483,64	6,86
4	120	70,0	1.070	470,80	6,86
4	180	64,0	1.089	98,44	6,89
4	210	61,5	1.079	107,00	6,90
4	240	60,0	1.100	201,16	6,90
4	300	56,5	1.084	190,46	6,91
4	420	53,5	1.092	184,04	7,00
4	480	50,0	1.086	181,90	6,98
5 (6 días)	8640	XX	914	XX	XX

XX: Valor no registrado.

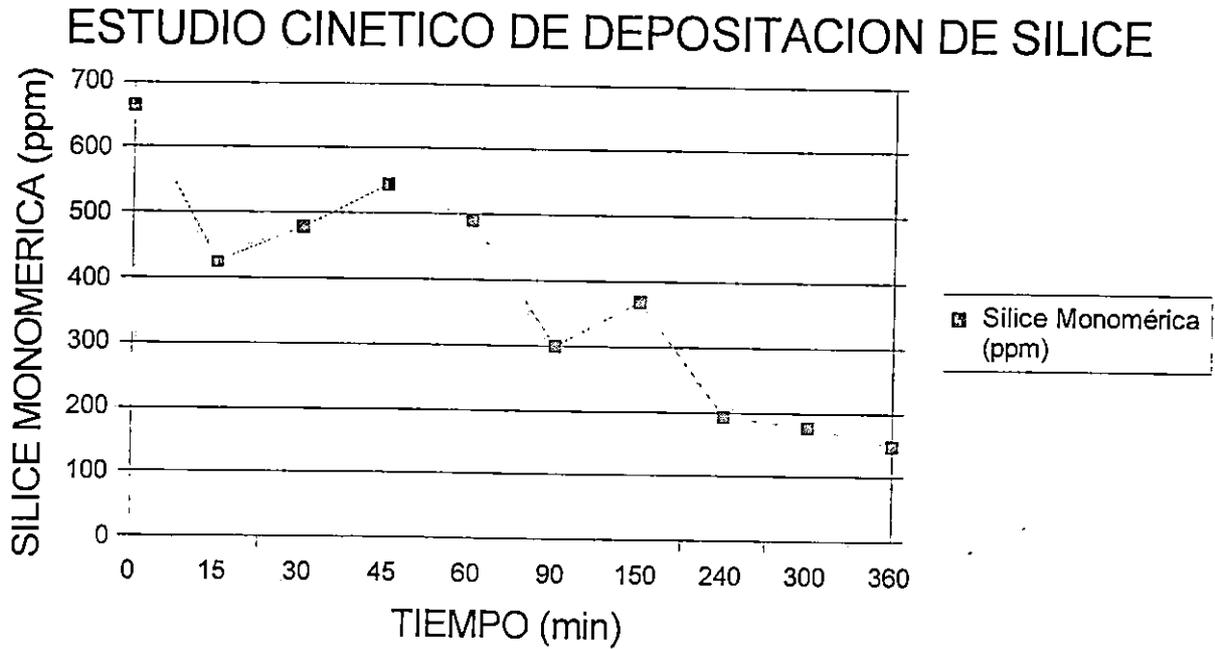


Figura 33. Curva de resultados del análisis de Sílice Monomérica obtenidos en el estudio realizado 08/08/00 a las 12:12 p.m.

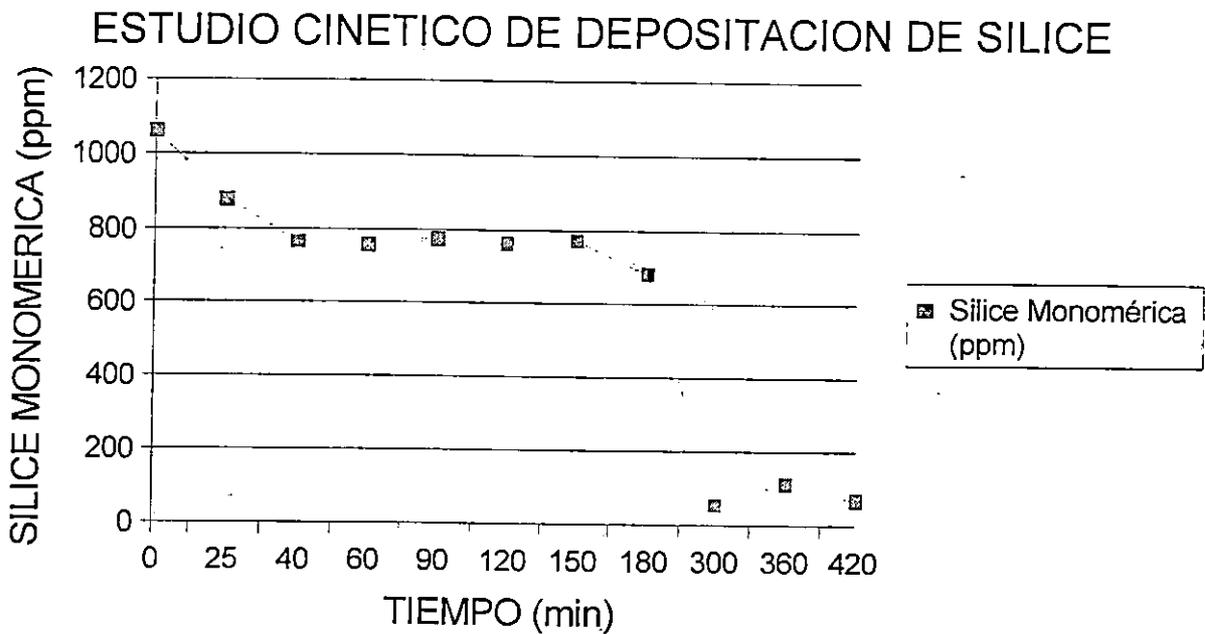


Figura 34. Curva de resultados del análisis de Sílice Monomérica obtenidos en el estudio realizado 09/08/00 a las 9:04 a.m.

ESTUDIO CINETICO DE DEPOSITACION DE SILICE

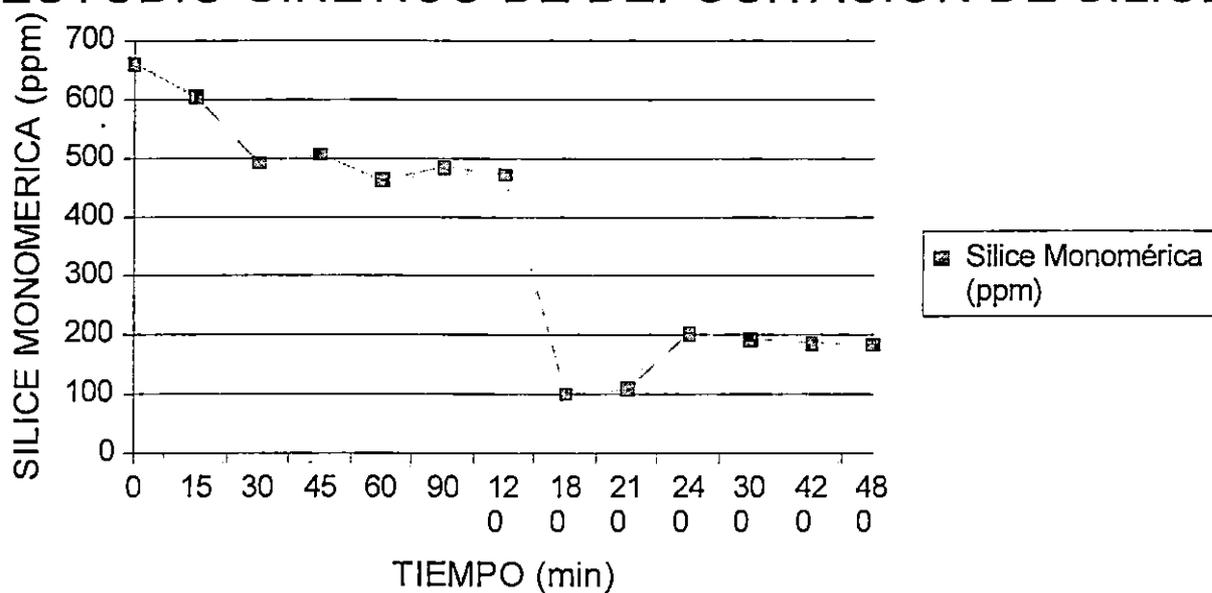


Figura 35. Curva de resultados del análisis de Sílice Monomérica obtenidos en el estudio realizado 15/08/00 a las 7:46 a.m.

ESTUDIO CINETICO DE DEPOSITACION DE SILICE

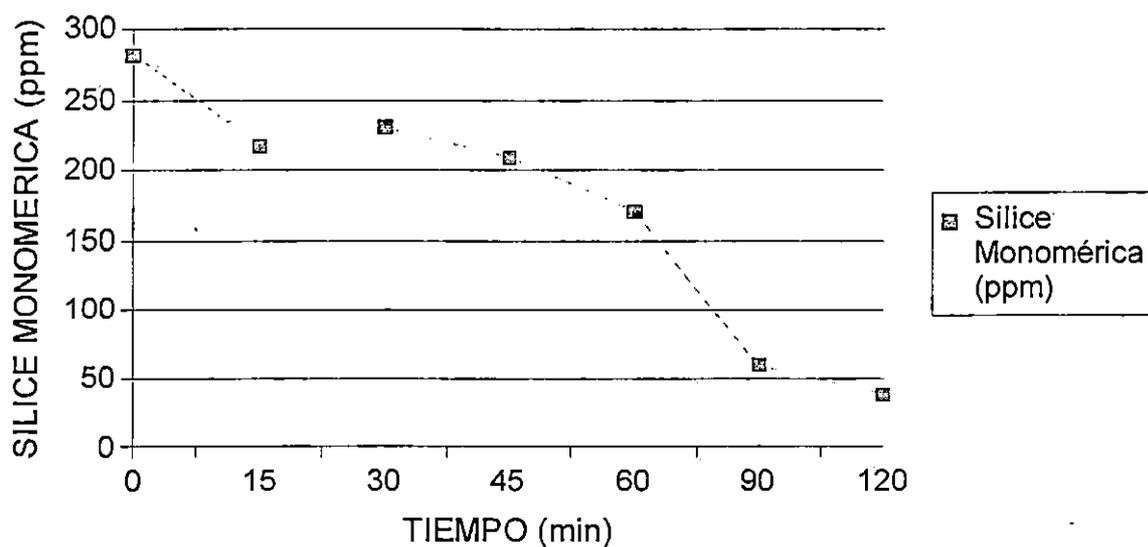


Figura 36. Curva de resultados del análisis de Sílice Monomérica obtenidos en el estudio realizado 08/08/00 a las 3:45 p.m.

Los datos de Sílice Monomérica obtenidos en el experimento (Tabla 11) han sido expresados en la forma de Ácido Silícico (mol/L) y fueron graficados en el Software TBL-CURVE®, para observar su comportamiento. La curva que mejor se ajusta a los datos experimentales es la que corresponde a los análisis realizados el 08/08/00 a las 12:12 p.m. (Figura 33), escogiéndose ésta para obtener la ecuación cinética que represente el proceso de polimerización de la Sílice en el sistema de tratamientos de las aguas en el TR-11. para realizar el estudio Cinético del fenómeno de polimerización de la Sílice. Los datos transformados se presentan en la Tabla 12, su representación gráfica puede apreciarse en la Figura 37.

Tabla 12. Datos de Sílice Monomérica transformados a Acido Silícico.

TIEMPO (min)	SÍLICE MONOMÉRICA EN FORMA DE ÁCIDO SILÍCICO (H ₄ SiO ₄)	T (°K)
0	0,0110411	360,15
45	9,04655 x 10 ⁻³	352,65
60	8,19176 x 10 ⁻³	351,65
150	6,12601 x 10 ⁻³	343,15
240	3,20547 x 10 ⁻³	337,65
300	2,95615 x 10 ⁻³	333,65
360	2,49314 x 10 ⁻³	330,15

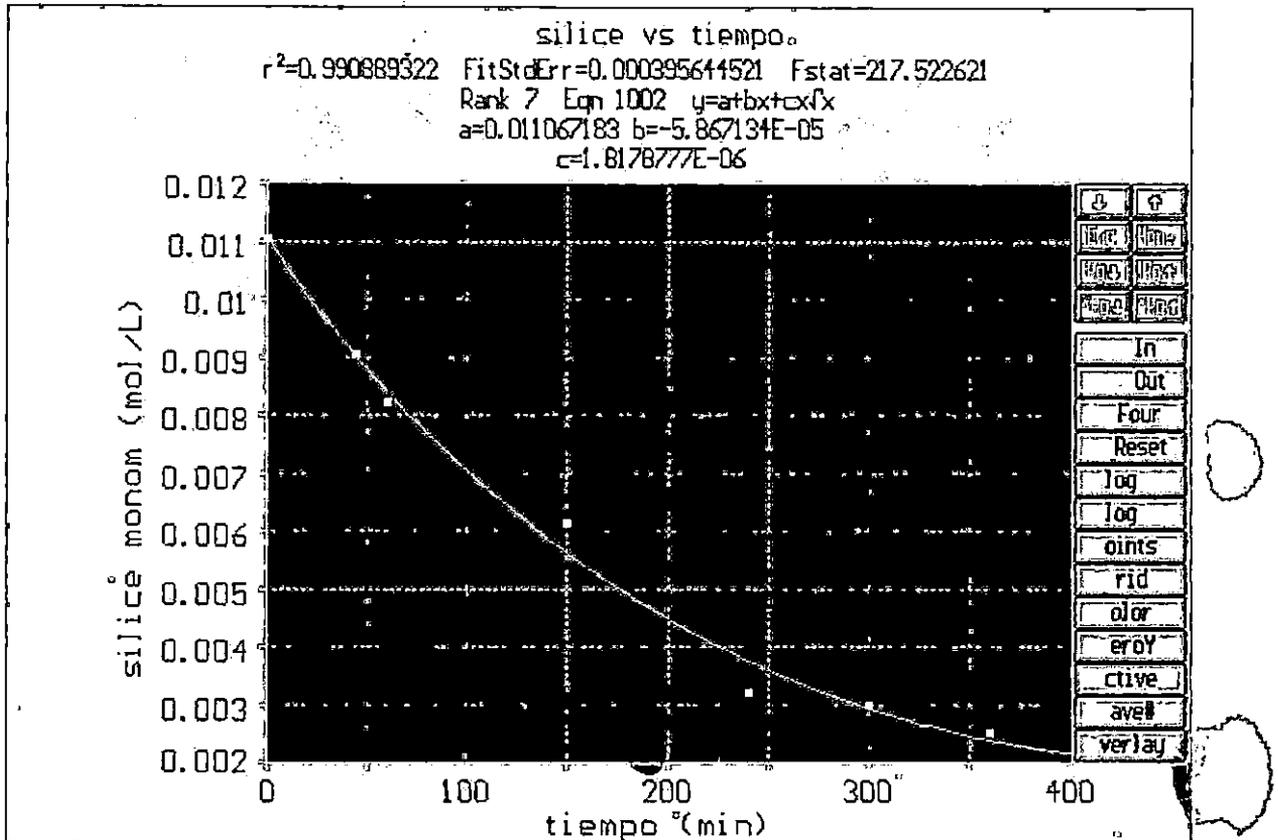


Figura 37. Curva de Sílice Monomérica vrs Tiempo construida con los datos experimentales obtenidos el 08/08/00 a las 12:12 p.m.

1. Obtención de la Ecuación Cinética Aplicando Análisis de Regresión Lineal Múltiple a los Datos

Después de obtener la mejor curva que representa los datos de Sílice monomérica en función del tiempo, el siguiente paso consistió en generar una ecuación que representara el fenómeno de polimerización de la Sílice en los tanques de tratamiento del TR-11. De las tres variables que fueron registradas durante el experimento (concentración de Sílice monomérica, pH, Temperatura), sólo dos mostraron una variación apreciable con el tiempo: La Temperatura y la concentración de Sílice

monomérica. Por lo que la ecuación de velocidad de reacción puede expresarse como un producto de estos dos factores, es decir:

$$-r_i = f_1(\text{Temperatura}) \cdot f_2(\text{Concentración de Sílice monomérica})$$

De donde $-r_i = k \cdot f_2(\text{Concentración de Sílice monomérica})$ (4)

Se ha encontrado que el factor dependiente de la temperatura se ajusta a la ecuación de Arrhenius como sigue:

$$k = k_0 \text{EXP}(-E/RT) \quad (5)$$

Donde:

- k_0 : factor de frecuencia
- E : Energía de activación en cal/mol
- R : Constante de los gases ideales, 1,987 cal/mol-K
- T : Temperatura en K

Para la expresión de la velocidad de reacción se propuso la siguiente ecuación:

$$-r_A = kC_A^n \quad (6)$$

ya que el sistema considera únicamente la reacción entre moléculas de Ácido Silícico para el proceso de polimerización de la Sílice.

Donde:

- A : Sílice monomérica (en forma de Ácido Silícico)
- $-r_A$: Velocidad de desaparición de Sílice monomérica
- k : Constante de polimerización
- C_A : Concentración de Sílice monomérica (mol/L)
- n : Orden de la reacción

Sustituyendo (5) en (6) se tiene:

$$-r_A = k_0 \text{EXP}(-E/RT) C_A^n \quad (7)$$

Para probar si los datos experimentales se ajustan a la ecuación (7), se decidió analizar estadísticamente el problema como un modelo de regresión lineal múltiple de dos variables. Los valores de $-r_A$ fueron calculados derivando la ecuación de la curva obtenida en la Figura 37 y evaluando la derivada para cada tiempo en los que se hicieron las mediciones.

a. Análisis de Regresión Lineal Múltiple

El problema de regresión consiste en ajustar el modelo:

$$y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_k X_k + \epsilon \quad (8)$$

que es una ecuación general.

Donde: $\{\beta_i\}$ se denominan coeficientes de regresión.

Para dos variables el modelo tiene la forma siguiente:

$$y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \epsilon \quad (9)$$

Aplicando logaritmo natural en la ecuación (7) para llevarla a una expresión lineal se tiene:

$$\text{Ln} (-r_A) = \text{Ln} k_0 - E/R(1/T) + n \text{Ln} C_A \quad (10)$$

La ecuación anterior tiene la forma de la ecuación (9), donde:

$$Y = \text{Ln}(-r_A)$$

$$\beta_0 = \text{Ln } k_0$$

$$\beta_1 = -E/R$$

$$\beta_2 = n$$

$$x_1 = 1/T$$

$$x_2 = \text{Ln } C_A$$

b. Prueba de Hipótesis

Para probar si la regresión lineal múltiple es significativa, se prueban las hipótesis:

$$H_0: \beta_1 = \beta_2$$

$$H_1: \beta_i \neq 0 \text{ al menos una } i.$$

El rechazo de H_0 en esta ecuación implica que al menos una variable en el modelo contribuye significativamente al ajuste.

Estadístico de prueba: $F_0 = MS_R/MS_E$

Si $F_0 > F_{\alpha, k, n-k-1}$ se rechaza H_0

Aplicando la ecuación (10) a los datos obtenidos en la fecha antes mencionada, se obtuvo el modelo de regresión por medio del Software Statgraphics®, y el cual proporciona la siguiente expresión:

$$\text{Ln}(-r_A) = 9.6375 - 6574.32 (1/T) + 0.232686 \text{Ln } C_A \quad (11)$$

De la cual se tiene que:

$$k_0 = 15.329,00$$

$$E/R = 6.574,00$$

$$N = 0,23$$

Y la ecuación de velocidad de reacción obtenida es:

$$-r_A = 15.329,00 \exp(-6.574,00/T) C_A^{0,23} \quad (12)$$

La Tabla 13 muestra el análisis de varianza para la significancia de la regresión lineal múltiple.

Tabla 13. Resultados del Análisis de Varianza.

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de Libertad	Media de Cuadrados	F ₀	F _{0.05,2,4}	Valor P
Regresión	3,38820	2	1,6941000	75,16	6,94	0,0007
Error o Residuo	0,09010	4	0,0225413			
Total	3,47836	6				

$F_0 > F_{0.05,2,4}$ por lo que se concluye que al menos una variable en el modelo contribuye significativamente al ajuste.

La Figura 38 muestra los residuos contra los valores ajustados en la cual se observa una tendencia de éstos, lo que indica que alguna variable además de las consideradas influyen en el modelo y debe ser incluida, por ejemplo, la presencia de otras especies químicas como iones, sales u óxidos.

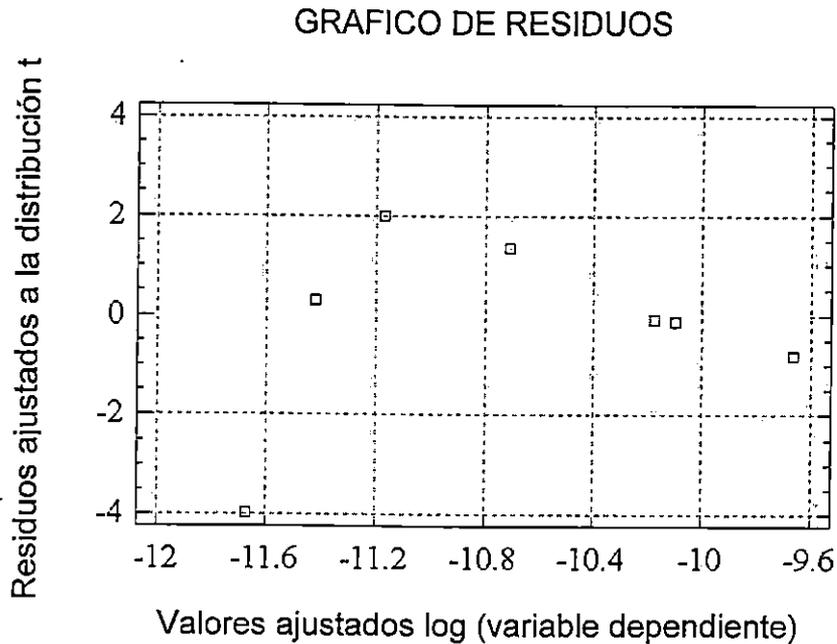


Figura 38. Gráfico de Residuos vrs. Valores ajustados.

B. EXPERIMENTACIÓN DEL USO DE FLOCULANTES EN LA REMOCIÓN DE SÍLICE DEL AGUA GEOTÉRMICA RESIDUAL, DETERMINACIÓN DEL FLOCULANTE QUE PROPORCIONE LOS MEJORES RESULTADOS

Se han estudiado y analizado los floculantes que reúnen las características técnicas básicas para ser utilizados en el proceso de remoción de la Sílice presente en el agua residual y se presentan en la Tabla 14; de éstos se seleccionaron el Hidróxido de Calcio y el Sulfato de Aluminio por ser los que técnica y económicamente presentan las mejores características de disponibilidad en el mercado, bajo precio y facilidad de uso.

Tabla 14. Listado de Floculantes Utilizables en la remoción de la Sílice.

No.	FLOCULANTE	COSTO (Colones / Kg)
1	Óxido de Calcio	3,50
2	Hidróxido de Calcio	2,20
3	Sulfato de Aluminio	3,00
4	Sulfato Férrico	60,00
5	Clorhidrato de Aluminio	NDL
6	Cloruro de polialuminio	NDL
7	Zeolita industrial	No determinado

NDL: No disponible localmente

Se realizó un experimento primario para seleccionar entre ellos el que proporcionó mejores resultados en la remoción de la Sílice del agua geotérmica residual, considerando siempre aspectos técnicos y económicos en el ensayo.

El experimento consistió en la dosificación de cantidades iguales de cada floculante, a 5 g/L, (cantidad que ha sido seleccionada basándose en estudios previos de remoción de Sílice, Arsénico y Boro realizado por el centro de investigaciones geotérmicas, Área de ingeniería Química de GEOCEL 1994), y para un volumen de 1 L de agua geotérmica residual con el fin de determinar cuál de los floculantes experimentados removía mayor cantidad de Sílice.

El proceso se realizó a temperatura constante, lo que se consiguió por medio de un baño María realizado en el tanque laberíntico del sistema de polimerización instalado en la plataforma del pozo TR-11, aprovechando la alta temperatura del agua geotérmica (Figura 39). Esto ayudó a reducir el número de factores a considerar al momento de realizar el análisis estadístico de los resultados.

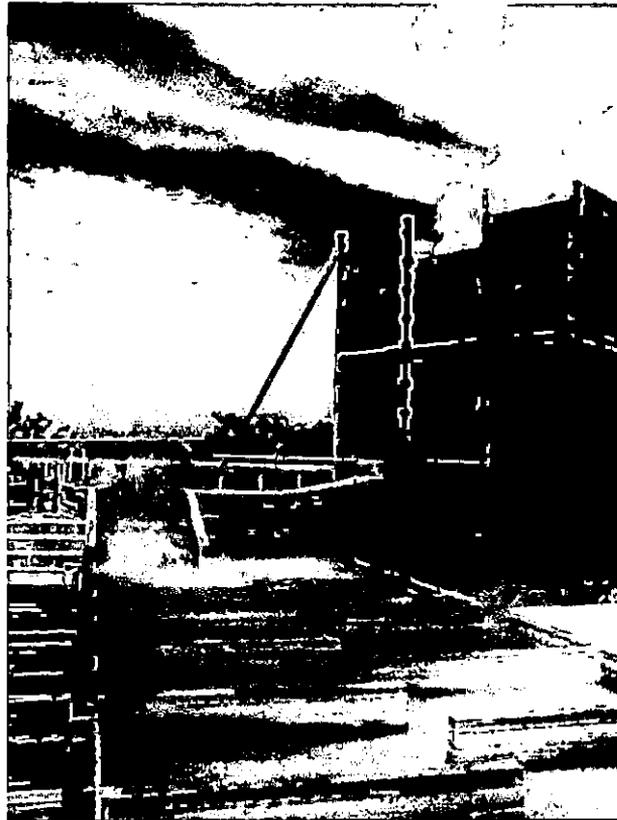


Figura 39. Tanque Laberíntico del Sistema de Polimerización de la plataforma del pozo TR-11

Este experimento permitió comparar la efectividad de remoción de los floculantes en las mismas condiciones, eligiéndose luego de un análisis estadístico el Hidróxido de Calcio como el que proporcionó los mayores porcentajes de remoción. Una vez seleccionado, se procedió a determinar las condiciones a las cuales operar el proceso de remoción de la Sílice.

Se tomaron muestras para el análisis de Sílice total al cabo de 1 h de iniciada el proceso. Los resultados obtenidos de los análisis químicos en esta etapa del experimento se muestran en la Tabla 15

Tabla 15. Resultados obtenidos en la prueba del floculante.

Floculante	Muestreo	Tiempo (h)	SiO ₂ Total ppm
--	0	0	933,9
Ca(OH) ₂	1	1	19,3
Ca(OH) ₂	2	1	18,0
Ca(OH) ₂	3	1	7,3
--	0	0	1104,0
Al ₂ (SO ₄) ₃	1	1	550,7
Al ₂ (SO ₄) ₃	2	1	515,9
Al ₂ (SO ₄) ₃	3	1	500,1

1. Análisis Estadístico del Experimento de Determinación del Floculante que Proporcione los Mejores Resultados

El experimento se realizó utilizando dos floculantes seleccionados previamente: Hidróxido de Calcio Ca(OH)₂ y Sulfato de Aluminio Al₂(SO₄)₃. Se diseñó un experimento unifactorial para realizar un análisis estadístico de los datos. Los resultados del análisis de Sílice Total en el sobrenadante luego de 1 h después de adicionar el floculante y realizando en ambos casos la misma dosificación del floculante, se presentan en la Tabla 16.

Tabla 16. Resultados del Análisis del sobrenadante.

Tipo de Floculante	SiO ₂ Presente en el Sobrenadante (ppm)			Totales
	1	2	3	
Hidróxido de Calcio	19,3	18,0	7,3	44,6
Sulfato de Aluminio	550,7	515,9	500,1	1.566,7
Totales				1.611,3

Factor: Tipo de Floculante

Tratamientos: Hidróxido de Calcio y Sulfato de Aluminio

Durante el experimento la temperatura se mantuvo constante a 80°C, por lo que no ha sido considerada como factor en el análisis.

Nos interesa probar la igualdad de medias entre los dos tipos de floculantes, por lo que las hipótesis nulas y alternas son:

$$H_0: \mu_1 = \mu_2$$

$$H_1: \mu_1 \neq \mu_2$$

Estadístico de prueba: F_0

$$F_0 = \frac{S_{\text{Stratamientos}} / (a-1)}{SSE / (N-a)} = \frac{M_{\text{Stratamientos}}}{MSE}$$

Criterio de decisión: Se rechaza H_0 si $F_0 > F_{\alpha, a-1, N-a}$

Análisis de varianza para datos de Sílice Total:

$$S_{\text{Total}} = S_{\text{Stratamientos}} + S_{\text{error}}$$

$$S_{\text{Total}} = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^n y_{ij}^2 - (y^2_{..} / abn)$$

$$\sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^n y_{ij}^2 = (19.3)^2 + (18)^2 + \dots + (500,1)^2$$

$$= 820.273,0900$$

$$y^2_{..} / abn = (1.611,3)^2 / 6$$

$$= 432.714,6150$$

$$SS_{\text{total}} = 387.558,4750$$

$$SS_{\text{tratamiento}} = \sum_{i=1}^5 y_{i.}^2 / n - y^2_{..} / N$$

$$\sum_{i=1}^5 y_{i.}^2 / n = \frac{(44,6)^2 + (1.566,7)^2}{3}$$

$$= 818.846,0167$$

$$SS_{\text{tratamientos}} = 386.131,4017$$

$$SS_{\text{error}} = 1.427,0733$$

En la tabla 17 se presentan los resultados obtenidos del análisis de varianza.

Tabla 17. Análisis de Varianza

Fuente de Variación	Suma de Cuadrados	Grados de Libertad	Media de Cuadrados	Fo
Entre tratamientos	386.131,4017	1	386.131,401700	1.082,3029
Error	1.427,0733	4	356,768325	
Total	387.558,4750	5		

$$F_{0,05,1,4} = 7.71$$

$F_0 > F_{\text{tablas}}$, por tanto, estadísticamente existe una diferencia significativa en la remoción de Sílice total entre los dos floculantes empleados.

El floculante a escoger se determina evaluando el porcentaje de remoción de Sílice total promedio, por medio de la formula siguiente:

$$\% \text{ Remoción} = \frac{C_f - C_i}{C_i} \times 100$$

Donde:

C_i = Concentración inicial promedio de Sílice total, ppm a $t = 0$ h.

C_f = Concentración final promedio de Sílice total, ppm a $t = 1$ h.

Se escogerá el floculante que proporcione el mayor porcentaje de remoción.

Hidróxido de Calcio:

$$\% \text{ Remoción} = \frac{14,87 - 1.018,95}{1.018,95} \times 100$$

$$\% \text{ Remoción} = 98,50$$

Sulfato de Aluminio:

$$\% \text{ Remoción} = \frac{522,23 - 1.018,95}{1.018,95} \times 100$$

$$\% \text{ Remoción} = 48,70$$

Por tanto el floculante que remueve mayor cantidad de Sílice es el Hidróxido de Calcio y es el que se requiere utilizar en el proceso.

C. DETERMINACIÓN DE LAS CONDICIONES A LAS CUALES REALIZAR EL PROCESO DE FLOCULACIÓN CON EL FLOCULANTE IDENTIFICADO EN LA FASE ANTERIOR

Luego de analizar los resultados obtenidos y seleccionar al Hidróxido de Calcio como el floculante que reúne las mejores condiciones técnico - económicas y como el que proporciona los mejores resultados de remoción, se procedió a determinar la cantidad de floculante a utilizarse para la remoción de Sílice.

Para esto se consideraron los estudios de Remoción de Sílice, Arsénico y Boro realizado por el Centro de Investigaciones Geotérmicas, Área de Ingeniería Química de GEOCEL 1994 en el que se recomendaba como rango de aplicación para la remoción de Sílice dosificaciones de floculante entre 3 y 11 g/L de Hidróxido de Calcio para la remoción efectiva de la Sílice del agua geotérmica ya que a concentraciones menores este estudio concluye que el proceso presenta una marcada reducción en la capacidad de remoción.

Para esta etapa se utilizaron baldes plásticos (Figura 40), agregándoseles 8 L de agua geotérmica y se sumergieron en un baño María en el tanque laberíntico del Sistema de Polimerización de la Plataforma del pozo TR-11 (Figura 41). una vez estabilizada la temperatura del agua dentro de los baldes se dosificaron diversas concentraciones de Hidróxido de Calcio (3, 5, 7, 9 y 11 g/L de agua geotérmica) agitando la mezcla con un agitador eléctrico, por 3 minutos y dejando reposar por 1 hora.



Figura 40. Baldes y equipo de agitación utilizado en la etapa experimental.

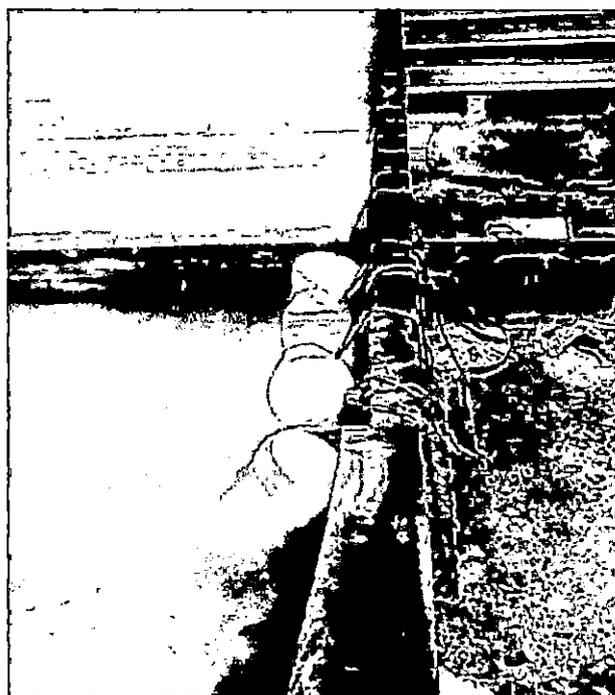


Figura 41. Forma en que se realizó el baño María a la entrada del tanque laberíntico del sistema de tratamiento de la plataforma del pozo TR-11.

El procedimiento se realizó por duplicado, tomándose muestras a 0, 15 min y a 1 h de iniciado el tratamiento, con lo que se pretendía comprobar que la mayor remoción de sílice ocurre durante los primeros 15 min. A cada muestra se le realizó análisis de Sílice total, además se analizó Calcio remanente al final de cada corrida del proceso, los resultados obtenidos se presentan a continuación en la Tabla 18.

Tabla 18. Resultados de análisis de: Sílice Total en el tiempo y Calcio Remanente, presentes en el sobrenadante.

DOSIFICACIÓN Ca(OH) ₂ g/L	REPLICA	TIEMPO (min)	SiO ₂ TOTAL (ppm)	CALCIO REMANENTE
0	0	0	1102	
3	1	15	22,0	
3	1	60	34,4	655,4
3	2	15	25,2	
3	2	60	19,0	655,9
5	1	15	22,8	
5	1	60	21,6	814,0
5	2	15	37,9	
5	2	60	30,0	825,0
7	1	15	19,9	
7	1	60	17,4	738,1
7	2	15	20,4	
7	2	60	19,4	864,6
0	0	0	1.008,0	
9	1	15	11,4	
9	1	60	14,1	920,2
9	2	15	16,3	
9	2	60	14,1	845,6
0	0	0	1.036,0	
11	1	15	23,1	
11	1	60	14,3	832,5
11	2	15	16,2	
11	2	60	19,5	792,9

Como puede observarse en la Figura 42 la floculación de la Sílice con una dosificación de 3 g/L de Hidróxido de Calcio, proporciona buenos resultados los cuales pueden apreciarse a simple vista en el cambio de la coloración del agua tratada.

La experimentación ha considerado un tiempo de 1 h para el proceso, pero según los cálculos realizados, el sistema de tanques de polimerización existente proporciona un tiempo de retención de 4 h, por lo que se esperaría que en la prueba de dosificación directa de la pileta, se logre el objetivo de que la depositación del flóculo ocurra antes de que el agua salga del sistema de tratamiento.

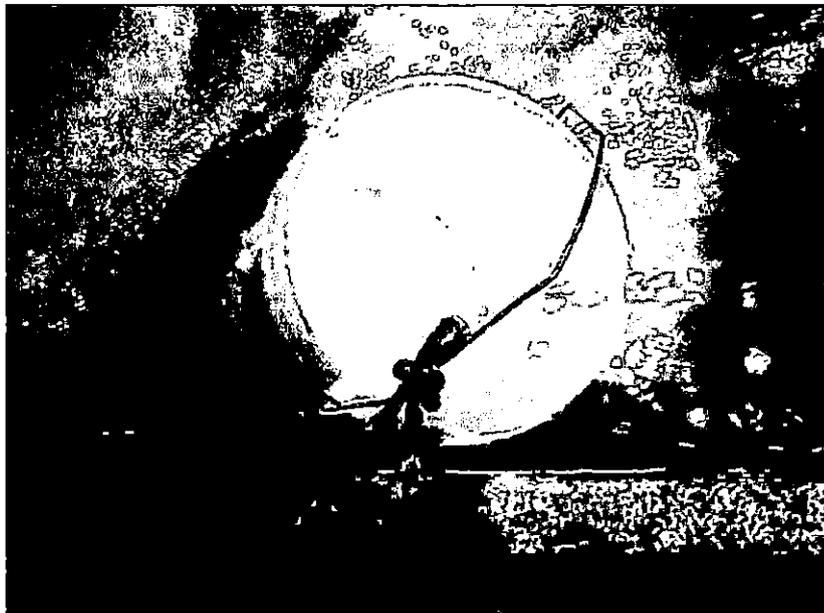


Figura 42. Aspecto del agua geotérmica después del tratamiento con Hidróxido de Calcio, se puede observar en el fondo del balde el lodo formado.

A los datos obtenidos se les aplicó análisis estadístico para establecer la concentración a la que debe dosificarse en el proceso de remoción de la Sílice, utilizando Hidróxido de Calcio como floculante.

1. Análisis Estadístico del Experimento de Optimización del Proceso de Floculación de la Sílice Utilizando Hidróxido de Calcio como Floculante

Para realizar el experimento se planteó un diseño factorial considerando dos factores y dos réplicas, registrando una sola variable respuesta. La definición de sus factores y los niveles considerados se presentan en la Tabla 19.

Tabla 19. Definición de factores y niveles considerados en el experimento

FACTOR	DEFINICIÓN	NIVELES
Tiempo	Establece el tiempo de tratamiento que se proporcionó al agua geotérmica.	15 y 60 min
Dosificación de Floculante	Establece la cantidad de Hidróxido de Calcio agregado por litro de agua geotérmica a tratar	3, 5, 7, 9 y 11 g/L

Durante el experimento la temperatura se mantuvo constante a 80°C.

La "variable respuesta" a evaluar es la "Concentración de Sílice Total" en el agua geotérmica, la cual puede definirse como: "El contenido de Sílice de la muestra después de adicionado el floculante" y que en general se representará por "y".

En la Tabla 20 se presentan los resultados del análisis.

Tabla 20. Resultados de los análisis de Sílice Total realizados al sobrenadante del agua tratada

Dosificación de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ (g/L)	Tiempo (min.)						y _{i..}
	15		Suma	60		Suma	
3	22,0	25,2	47,2	34,4	19,0	53,4	100,6
5	22,8	37,9	60,7	21,6	30,0	51,6	112,3
7	19,9	20,4	40,3	17,4	19,4	36,8	77,1
9	11,4	16,3	27,7	14,1	14,1	28,2	55,9
11	23,1	16,2	39,3	14,3	19,5	33,8	73,1
y.j.			215,2			203,8	419=y

a. Análisis de Datos

Interesa probar la hipótesis de igualdad de los efectos de las dosificaciones de Hidróxido de Calcio, las cuales pueden traducirse estadísticamente como:

$$H_0: \tau_1 = \tau_2 = \tau_3 = \tau_4 = \tau_5$$

$$H_1: \text{al menos una } \tau_i \neq 0$$

Siendo el estadístico de prueba y el criterio de decisión los siguientes:

$$\text{Estadístico de prueba: } F_0 = \frac{SS_A / (a-1)}{SS_E / ab(n-1)}$$

El criterio de decisión establece que se rechaza H_0 si: $F_0 > F_{\alpha, a-1, ab(n-1)}$

También interesa probar la igualdad de los efectos de factor tiempo.

$$H_0: \beta_1 = \beta_2$$

H_1 : al menos una $\beta_j \neq 0$

$$\text{Estadístico de prueba: } F_0 = \frac{SS_B / b-1}{SS_E / ab(n-1)}$$

se rechaza H_0 si: $F_0 > F_{\alpha, b-1, ab(n-1)}$

Además, interesa determinar si los tratamientos de renglón y de columna interactúan, es decir:

H_0 : $(\tau\beta)_{ij} = 0$, para toda i

H_1 : al menos una $(\tau\beta)_{ij} \neq 0$

$$\text{Estadístico de prueba: } F_0 = \frac{SS_{AB} / (a-1)(b-1)}{SS_E / ab(n-1)}$$

se rechaza H_0 si: $F_0 > F_{\alpha, (a-1)(b-1), ab(n-1)}$

Las sumas de cuadrados se calculan a continuación:

$$SS_T = \sum_{j=1}^5 \sum_{i=1}^2 \sum_{k=1}^2 y_{ijk}^2 - [y^2 \dots / abn]$$

$$SS_T = (22)^2 + (25,2)^2 + \dots + (19,5)^2 - [(419)^2 / 20]$$

$$SS_T = 873,51$$

$$SS_{\text{dosificación}} = \left[\sum_{i=1}^5 y^2_{i..} / bn \right] - [y^2... / abn]$$

$$SS_{\text{dosificación}} = [(100,6)^2 + (112,3)^2 + \dots + (73,1)^2 / 4] - [(419)^2 / 20]$$

$$SS_{\text{dosificación}} = 508,700$$

$$SS_{\text{tiempo}} = \left[\sum_{j=1}^2 y^2_{.j.} / an \right] - [y^2... / abn]$$

$$SS_{\text{tiempo}} = [(215,2)^2 + (203,8)^2 / 10] - [(419)^2 / 20]$$

$$SS_{\text{tiempo}} = 6,498$$

$$SS_{\text{interacción}} = \left[\sum_{i=1}^5 \sum_{j=1}^2 y^2_{ij.} / abn \right] - SS_{\text{dosificación}} - SS_{\text{tiempo}}$$

$$SS_{\text{interacción}} = (47,2)^2 + (53,4)^2 + \dots (33,8)^2 / 2 - (419,8)^2 / 20 - 508,07 - 6,498$$

$$SS_{\text{interacción}} = 34,502$$

$$SS_E = SS_T - SS_{\text{dosificación}} - SS_{\text{tiempo}} - SS_{\text{interacción}}$$

$$SS_E = 324,440$$

El análisis de varianza se presenta en la Tabla 21.

Tabla 21. Análisis de Varianza para los datos de Sílice Total (ppm) en el Sobrenadante

Fuente de Variación	Suma de Cuadrados	Grados de Libertad	Media de Cuadrados	Fo	Probabilidad
Dosificación	508,070	4	127,0170	3,910	0,0364
Tiempo (min.)	6,498	1	6,4980	0,200	0,6640
Interacción	34,502	4	8,6255	0,270	0,8933
Error	324,440	10	32,4440		
TOTAL	873,510	19			

De los resultados anteriores se puede concluir que no existe interacción significativa entre la dosificación de Hidróxido de Calcio y el tiempo de tratamiento al agua. También, se concluye que es significativo el efecto de la dosificación ya que $F_{0,05,4,10} = 3,48$; sin embargo, estadísticamente no es significativo el efecto del tiempo sobre la variable respuesta.

La Figura 43 muestra los intervalos de confianza para cada dosificación. Se puede observar que la dosificación de 9 g/L es la que genera la menor concentración promedio de Sílice total en el sobrenadante de todas las dosificaciones experimentadas.

GRAFICO DE MEDIDAS E INTERVALOS AL 95% LSD

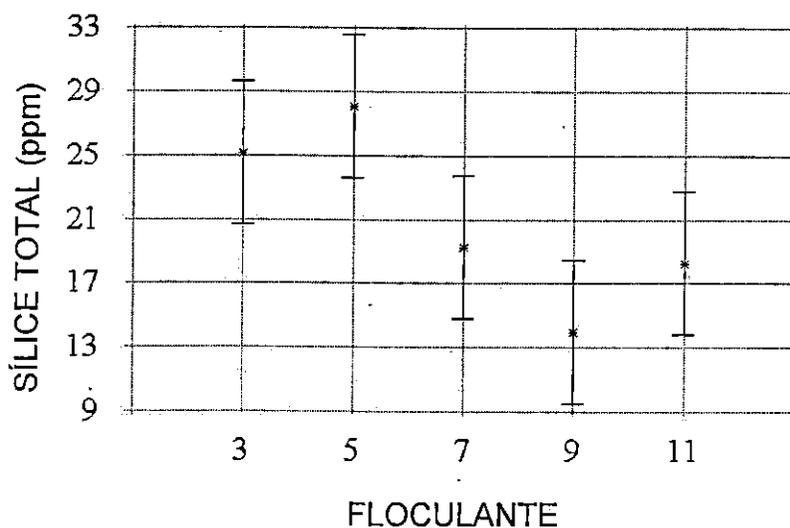


Figura 43. Intervalos de Confianza.

La Figura 44 presenta los intervalos en relación con el factor tiempo. Es evidente que a un tiempo mayor de tratamiento, la concentración promedio de Sílice Total disminuye, aunque la diferencia de concentración entre los tiempos considerados es pequeña.

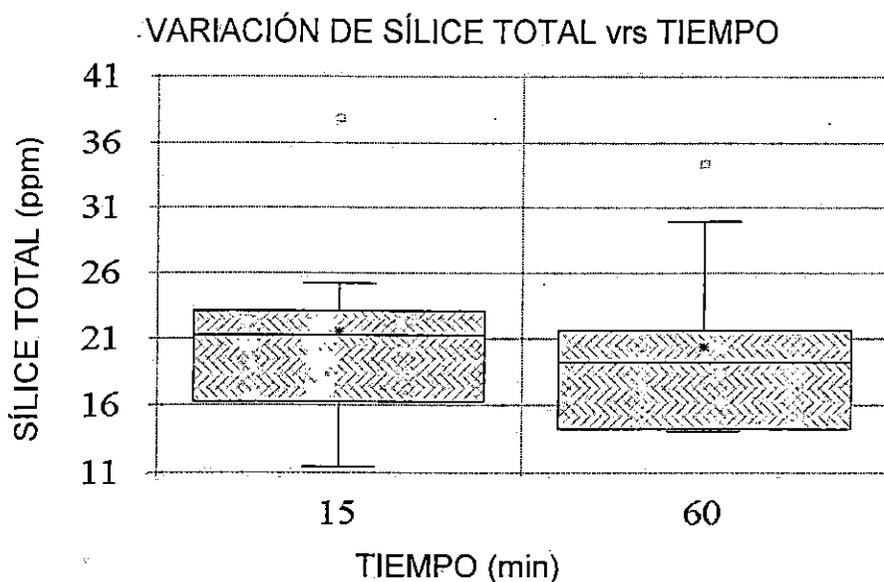


Figura 44. Intervalos del Factor Tiempo.

En la Tabla 22 se presenta el análisis de rango múltiple para Sílice total por dosificación, en ésta se muestran tanto los grupos homogéneos como los contrastes entre las diversas dosificaciones. Se observa que para las comparaciones 3-9, 5-9, 5-11, existe una diferencia significativa. Esto es apreciable en la Figura 43 donde las dosificaciones de 9 y 11 g/L presentan la menor concentración de Sílice total en el sobrenadante, en contraste con las de 3 y 5 g/L, siendo la dosificación de 9 g/L la que remueve la mayor cantidad de Sílice.

Tabla 22. Análisis de Rango Múltiple para Sílice Total (ppm) por Floculante

Método: 95,0 % LSD

FLOCULANTE	Número de réplicas	LS promedio	Grupos Homogéneos
9	4	13,975	X
11	4	18,275	XX
7	4	19,275	XXX
3	4	25,150	XX
5	4	28,075	X

LSD: Diferencia Mínima Significativa

Tabla 22A. Análisis de Rango Múltiple para Sílice Total (ppm) por Floculante (Cont.)

Contraste	Diferencia	± Límites
3 - 5	-2,925	8,97419
3 - 7	5,875	8,97419
3 - 9	*11,175	8,97419
3 - 11	6,875	8,97419
5 - 7	8,800	8,97419
5 - 9	*14,100	8,97419
5 - 11	*9,800	8,97419
7 - 9	5,300	8,97419
7 - 11	1,000	8,97419
9 - 11	-4,300	8,97419
*Estadísticamente denotan una diferencia significativa.		

La Tabla 23 muestra el análisis de rango múltiple para Sílice Total para el factor tiempo. Estadísticamente se puede observar que no hay diferencia significativa en la cantidad de Sílice Total en el sobrenadante, para un tiempo comprendido entre 15 y 60 min.

Tabla 23. Análisis de Rango Múltiple para Sílice Total (ppm) por Tiempo min.

Método: 95,0 % LSD

TIEMPO min.	Número de réplicas	LS Promedio	Grupos Homogéneos
60	10	20,38	X
15	10	21,52	X

LSD: Diferencia Mínima significativa

Tabla 23A. Análisis de Múltiple Rango para Sílice Total (ppm) por Tiempo min. (Cont.)

Contraste	Diferencia	± Límites
15 - 60	1,14	5,67578

Estadísticamente denotan una diferencia significativa.

b. Comprobación de Idoneidad del Modelo

La gráfica de probabilidad normal de los residuos (Figura 45), indica un comportamiento lineal de éstos y por lo tanto, la suposición de normalidad de los errores puede considerarse válida. En la Figura 46, se presenta el resultado de graficar los residuos en función de los valores ajustados. En esta figura se observa una tendencia de la varianza de los residuos a aumentar a medida que aumenta el valor de Sílice Total.

Esta tendencia de los residuos indica que existe o existen, además de los factores considerados en el experimento otro u otros que influyen en el proceso de floculación de la Sílice que generan que en el modelo utilizado se observe un comportamiento variable de la varianza de los errores.

Considerando que el modelo de análisis utilizado es del tipo balanceado y de efectos fijos y dado que el estadístico F para este tipo de consideraciones no es afectado por la incidencia de una varianza variable, puede establecerse que los resultados obtenidos del análisis del modelo estadísticamente son confiables y sí tienen significancia estadística.

La tendencia que muestra el comportamiento de los datos en la Figura 46, probablemente es debida al hecho de no haber considerado en el experimento ciertos factores que puedan tener influencia en el proceso y deban ser tomados en cuenta para conocer su efecto.

La información obtenida puede considerarse para el diseño de un nuevo experimento en el cual se incluyan parámetros adicionales, tales como: el tiempo y características de la agitación, y la reacción entre el floculante y otras especies químicas presentes en el agua geotérmica, con lo cual se logrará que el estudio estadístico posea una mayor representatividad de lo que ocurre en el proceso de floculación.

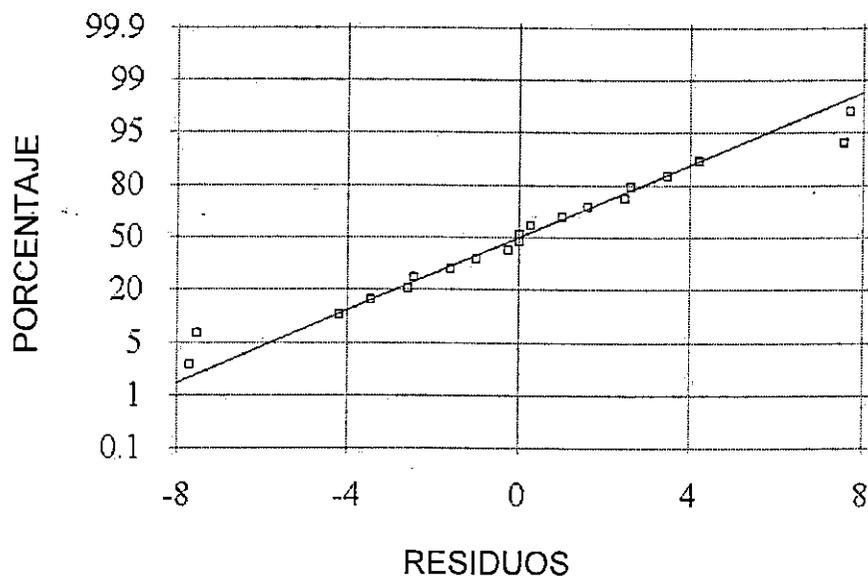


Figura 45. Gráfica de Probabilidad Normal de los Residuos

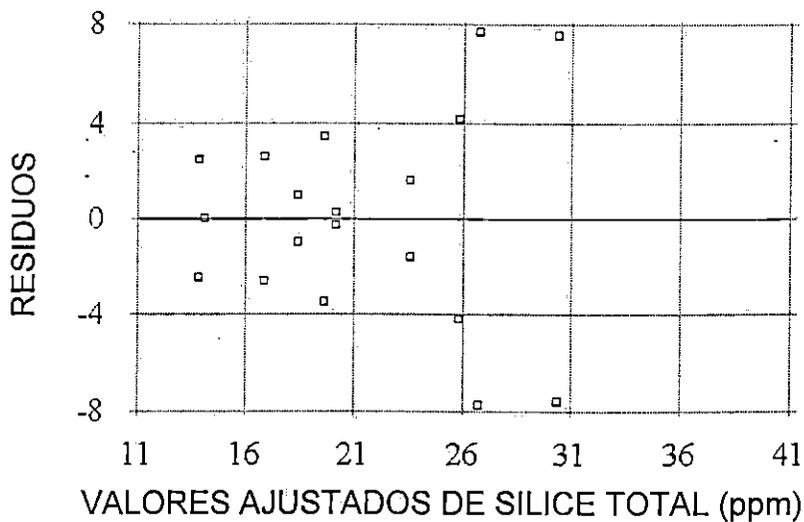


Figura 46. Gráfica de Residuos en Función de los Valores Ajustados de Sílice Total

Para establecer la dosis a la cual el proceso de floculación es factible, debe considerarse, además de lo antes expuesto, el factor económico del proceso. Debido a que este último factor es de suma importancia para la toma de decisión de realizar o no el proceso de remoción de la Sílice por medio de floculación.

Establecido lo anterior y considerando la inestabilidad del proceso a concentraciones menores a 3 g/L se determinó que esta concentración debe ser la que se utilice en el proceso de floculación. Además, se estaría reduciendo en una tercera parte el costo de tratamiento que generaría al utilizar la dosificación de 9 g/L.

D. EXTRACCIÓN DE MUESTRA DEL LODO FORMADO POR EL PROCESO DE FLOCULACIÓN PARA LA REMOCIÓN DE SÍLICE DEL AGUA GEOTÉRMICA RESIDUAL

En esta parte del experimento, luego de establecer la concentración de 3 g/L como la que genera la mejor remoción de la Sílice en el agua geotérmica, se procedió a tratar una cantidad de 220 gal de agua geotérmica residual para obtener una cantidad suficiente de lodo para realizar pruebas de caracterización fisicoquímica y evaluar posteriormente el posible uso industrial (Figura 47).

Se dosificó el Hidróxido de Calcio y se agitó por 15 min el sistema para homogenizar la mezcla luego se dejó reposar por 2 h para luego proceder a su decantación y así obtener el lodo floculado que se encontraba en el fondo del barril.

Una vez extraído se unieron los lodos de los barriles y se homogenizó la mezcla para luego dejar sedimentar aun más el producto. Una vez extraído el material se procedió a su secado y preparación para análisis utilizando el método muestreo compuesto y cuarteo para garantizar la representatividad de la muestra.

En esta etapa se realizaron los análisis de Difracción y Fluorescencia de Rayos X para caracterizar el lodo obtenido en el proceso. Los análisis se realizaron por triplicado y requirieron de técnicas de eliminación de interferentes para poder identificar la mayoría de compuestos que pudieran estar presentes en el producto obtenido.

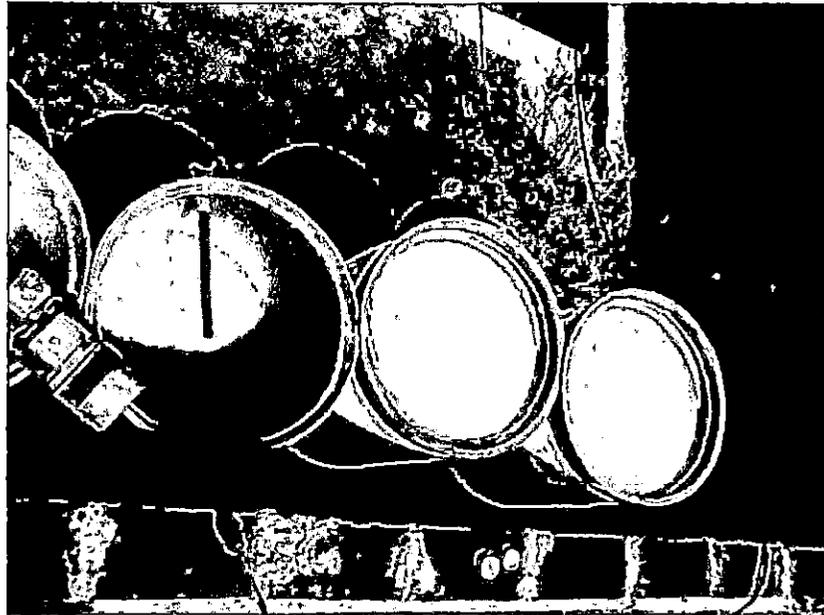


Figura 47. Dosificación de Hidróxido de Calcio a 3 g/L de agua geotérmica para obtener una muestra sólida

La muestra obtenida fue homogeneizada y preparada por el método de cuarteo para poder garantizar su representatividad y así obtener resultados confiables.

IX. CARACTERIZACIÓN FÍSICOQUÍMICA. RESULTADOS DE LOS ANÁLISIS DE DIFRACCIÓN Y FLUORESCENCIA DE RAYOS X

A continuación se presentan los resultados obtenidos de los análisis de Difracción y Fluorescencia de Rayos X de las muestras del lodo formado en el tratamiento del agua geotérmica residual con Hidróxido de Calcio.

El lodo obtenido es producto de dosificar 3 g de floculante por litro de agua geotérmica

A. RESULTADO DE ANÁLISIS DE DIFRACCIÓN DE RAYOS X

Para el análisis se utilizó el método de **Difracción de Rayos X** para determinar los compuestos que componen el lodo obtenido, detectando la presencia de:

Mg(OH) ₂	:	Hidróxido de Magnesio
CaCO ₃	:	Carbonato de Calcio
NaCl	:	Cloruro de Sodio
SiO ₂	:	Sílice Monomérica
SiO ₂	:	Cuarzo

El proceso de análisis realizado por el método de Difracción de Rayos X ha requerido de técnicas para la eliminación de interferentes en las que se considero muestras:

1. Secadas a temperatura ambiente (por triplicado)
2. Secadas al horno a 50°C (por triplicado)
3. Tratadas con Ácido Clorhídrico y secadas en horno (50°C)
4. Secadas al horno (110°C)
5. Lavadas con agua desmineralizada.

Esto lo evidencian las Gráficas generadas por el Software utilizado en el análisis y que se presentan en el Anexo 4 "Gráficas obtenidas del Análisis de Difracción de Rayos X".

B. RESULTADO DE ANÁLISIS DE FLUORESCENCIA DE RAYOS X

Por medio de este análisis se determinó las concentraciones de los elementos identificados presentes en el lodo obtenido.

La muestra corresponde a una dosificación de 3 g de Hidróxido de Calcio por litro de agua geotérmica. Los resultados se presentan en la Tabla 24.

Tabla 24. Resultados de Análisis del Lodo por el Método de Fluorescencia de Rayos X.

Peso de muestra para análisis: 1,4953 g

Elemento	Concentración	Elemento	Concentración
Silicio (Si)	13,00 %	Hierro (Fe)	892,00 ppm
Potasio (K)	1,50 %	Arsénico (As)	2,95 mg/g
Calcio (Ca)	15,90 %	Bromo (Br)	131,00 ppm
Vanadio (V)	250,00 ppm	Cloro (Cl)	3,08 %
Manganeso (Mn)	69,20 ppm		

La matriz residual es de origen inorgánico y está probablemente compuesta de óxidos, carbonatos o nitratos de elementos no cuantificados (Sodio, Magnesio, etc).

X. ALTERNATIVAS DE USO DEL LODO OBTENIDO CONSIDERANDO LOS RESULTADOS DEL ANÁLISIS REALIZADO EN LA ETAPA DE CARACTERIZACIÓN FISCOQUÍMICA DEL LODO

Delos resultados obtenidos del la caracterización Fiscoquímica del sólido se ha determinado que éste presenta buenas características para ser utilizado en:

- Elaboración de Ladrillos Refractarios
- Elaboración de Aislante Térmico
- Aditivos para pinturas
- Elaboración de materiales Cerámicos
- Material Desecante
- Estabilización de Suelos
- Elaboración de Cemento Blanco

De estas alternativas se escogió la fabricación de Ladrillos refractarios y el aislante térmico para realizar pruebas de uso del sólido.

A. RESULTADOS DE LA EXPERIMENTACIÓN DEL USO DEL MATERIAL OBTENIDO PARA LA FABRICACIÓN DE LADRILLO REFRACTARIO

Al compararse los resultados de la etapa de caracterización fiscoquímica con las especificaciones técnicas de los ladrillos refractarios, pudo apreciarse que su contenido de Sílice era similar al del lodo obtenido en el experimento y se procedió a fabricar dichos ladrillos refractarios con equipo de la Escuela de Ingeniería Civil (Figura 48). Se diseñó un molde para acoplarse al equipo de moldeo para obtener el ladrillo con las dimensiones requeridas por la norma de refractarios Anexo 7, el cual fue construido por los técnicos de la Escuela de Ingeniería Mecánica (Figura 49).

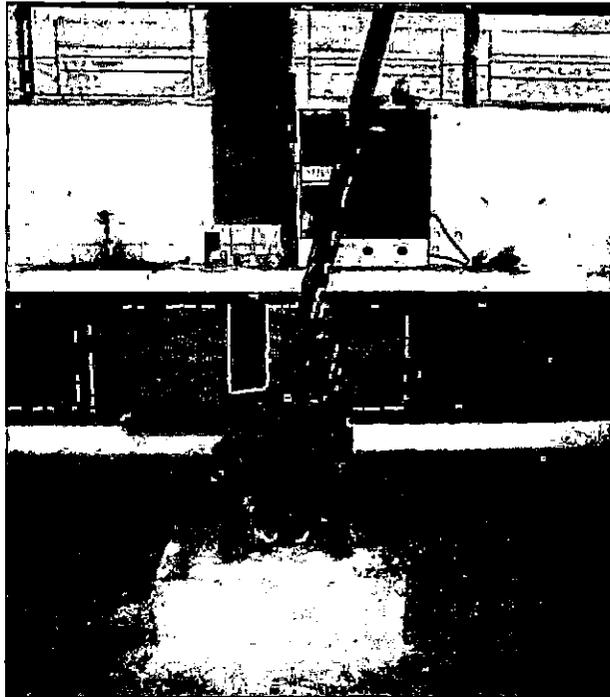


Figura 48. Equipo de moldeo utilizado para fabricar ladrillos refractarios.

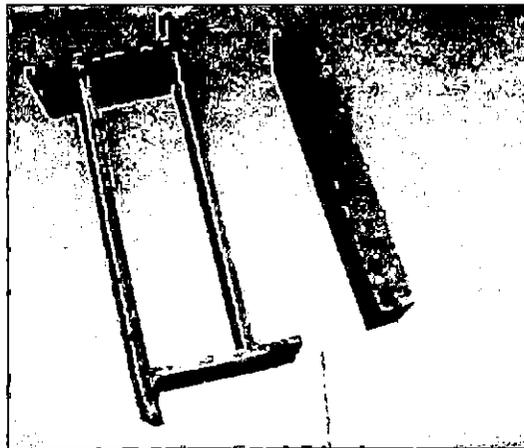


Figura 49. Molde para la elaboración de refractarios.

Los ladrillos se elaboraron considerando 3 formulaciones:

1. Sin ningún aditivo (material tal como ha sido obtenido del proceso de floculación).
Material obtenido + un 30% de Cemento.

1. Sin ningún aditivo (material tal como ha sido obtenido del proceso de floculación).
2. Material obtenido + un 30% de Cemento.
3. Material obtenido + un 30 % de Sulfato de Aluminio

Los ladrillos resultantes fueron enviados a los hornos de la fabrica IMACASA ubicada en Santa Ana y en donde fueron sometidos a una temperatura de 1.200°C aproximadamente.

Resultado de esta prueba se observó que el material experimentado no resistió las altas temperaturas, ya que después de 24 h de exposición todos los ladrillos sometidos a la prueba se desintegraron. De lo anterior se puede concluir que las formulaciones ensayadas con el lodo obtenido en el experimento no presentan buenas características para ser utilizado como material refractario.

B. RESULTADOS DE LA EXPERIMENTACIÓN DEL USO DEL MATERIAL OBTENIDO COMO AISLANTE TÉRMICO

Descartado el posible uso del material como refractario se pensó en la factibilidad de uso como aislante para las tuberías de transporte de vapor utilizadas en la planta. Se procedió a realizar pruebas de conductividad térmica con el equipo con el que cuentan los laboratorios de Ingeniería Mecánica de la Universidad Centroamericana José Simeón Cañas (UCA) y para lo cual se fabricaron ladrillos con las características requeridas por dicho laboratorio.

El proceso de fabricación de los ladrillos inició con el secado completo del lodo ya que así fue requerido por el técnico que los moldearía.

El lodo ya seco se llevó a la ladrillera El Castillo, S.A. de C.V. en donde fue moldeado y prensado para proporcionar a cada ladrillo las dimensiones de 25x25x1 cm. Al finalizar

Los ladrillos luego de elaborados se dejaron en reposo por 24 h en la sombra para un secado lento, luego se enviaron al laboratorio para el análisis de conductividad térmica que se mencionó anteriormente.

Las fases del proceso de fabricación y el equipo utilizado para el análisis de conductividad térmica se observan en las Figuras 50 a la 54.

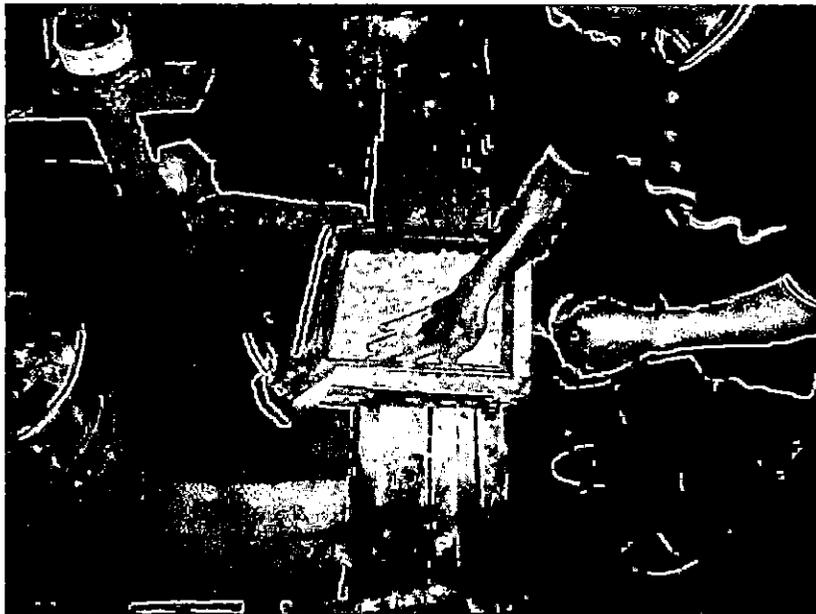


Figura 50. Distribución uniforme del material seco en el molde del ladrillo.



Figura 51. Prensado del material para formar el ladrillo.



Figura 52. Aspecto del ladrillo previo al desmolde

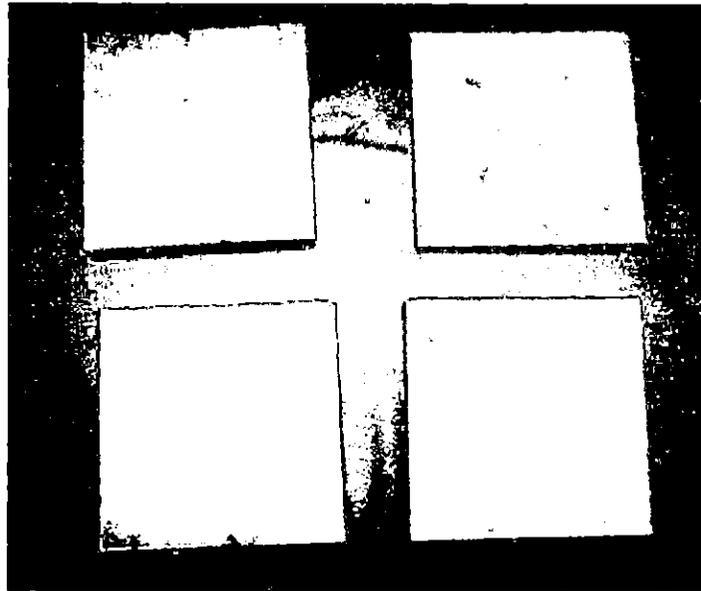


Figura 53. Ladrillos enviados a prueba de medición del coeficiente de conductividad térmica luego de 24 h de reposo.

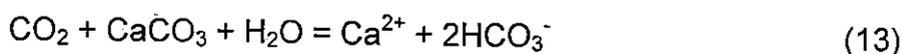


Figura 54. Equipo de medición del coeficiente de Conductividad Térmica en los laboratorios de Ingeniería Mecánica de la UCA.

Los resultados de este análisis de conductividad térmica se presentan en el Anexo 5 "Pruebas de Conductividad Térmica" de este documento.

XI. INCRUSTACIÓN DE CALCITA.

El potencial de incrustación de Calcita puede estimarse al considerar el siguiente equilibrio químico:



Durante la explotación de un Campo Geotérmico, el fenómeno de incrustación producido por la Calcita ocurre normalmente como resultado del proceso de separación de las fases Líquido - Vapor, en donde el CO_2 inicialmente en la fase líquida es transferido a la fase vapor. Esto origina que el equilibrio cinético del sistema se desplace hacia la depositación de Calcita. Por lo tanto, la depositación de Calcita es más evidente en la explotación geotérmica, se da normalmente dentro de la tubería del pozo en un punto donde ocurre la primera fase de separación. Otra consideración puede establecerse tomando en cuenta que la Calcita es uno de los pocos minerales que muestra solubilidad inversa, lo que significa que ésta se vuelve menos soluble a medida que aumenta la temperatura. En el proceso de explotación geotérmica esto es importante cuando el fluido separado, con una baja concentración de CO_2 , es reinyectado en una formación que se encuentra a alta temperatura.

Usando datos analíticos obtenidos de las muestras líquidas en superficie, y datos de equilibrio termodinámico, se puede calcular la diferenciación de especies químicas en el reservorio de producción o en el punto de separación de las fases en el pozo. Valores apropiados de las actividades de las especies químicas en la ecuación anterior se pueden calcular, y luego compararlos con la constante de equilibrio conocida para determinar si el fluido está en equilibrio saturado o no saturado con respecto a la depositación de Calcita. Para la ecuación anterior, el equilibrio termodinámico puede expresarse como:

$$K = [\text{Ca}^{2+}] [\text{HCO}_3^-] / f(\text{CO}_2) \quad (14)$$

Donde:

K: Constante de equilibrio que ha sido medida experimentalmente.

[Ca] y [HCO₃]: Actividades del ión calcio y el ión bicarbonato respectivamente.

f(CO₂): Fugacidad del CO₂ la cual puede aproximarse a la presión parcial de CO₂ en solución, cuando se poseen bajas concentraciones.

Las actividades de [Ca] y [HCO₃] son calculadas como el producto de la concentración molar y el coeficiente de actividad Debye-Hückel. Por lo tanto, el lado derecho de la ecuación 2 se puede calcular y normalmente es designado como "Q" o "log Q", donde Q es el cociente de actividad química. Si Q es mayor que K para una temperatura dada, entonces el fluido está sobresaturado con Calcita.

Cuando el agua separada es reinyectada en una formación que incrementa la temperatura del fluido reinyectado, podría esperarse que ocurra la incrustación de Calcita.

Puede establecerse para el fluido separado a una determinada temperatura, la solubilidad de Calcita a diferentes temperaturas hasta llegar a calcular aquella en la cual estará saturado. Por lo tanto, si la temperatura de la formación de reinyección es mayor que la temperatura de saturación calculada, habrá depositación de Calcita.

En los pozos de reinyección muy a menudo se utiliza una mezcla de los ácidos Clorhídrico HCl y Fluorhídrico HF para disolver tanto la incrustación de Calcita como la de Sílice.

Por lo anterior se realizó un análisis completo de caracterización química por el método de absorción atómica a la muestra del sobrenadante obtenido al final del proceso de

floculación, en el que se utilizó una concentración de 3 g/L de Hidróxido de Calcio (Tabla 25) y se observa un incremento de la concentración de Calcio.

Tabla 25. Resultados del análisis por método de absorción atómica al sobrenadante del proceso de floculación con una dosificación de 3 g/L de Hidróxido de Calcio.

MUESTRA	Na	K	Ca	Mg	Li	Cl	SO ₄	CO ₃	HCO ₃	Suma Cationes	Suma Aniones	Cat - Ani	% Error	SiO ₂	B	pH	
	CONCENTRACION (ppm)																LAB.
Tanque Laberintico (1-3-120)	3521	739,7	807	0,196	13,86	6248	7,9	1283	86,6	212,375	220,502	-8,127	-1,88	14,7	103,1	11,2	

Fecha de Análisis: 7/septiembre/2000

Al observar los resultados surgió la inquietud de determinar si el sobrenadante resultado del tratamiento podría producirse o no una incrustación de Calcita en el reservorio debido a la alta concentración de Calcio remanente en el agua, por lo que se utilizó el Software WATCH 3 para evaluar la probabilidad de esta incrustación en las condiciones del reservorio del pozo TR-11A. Los resultados de este análisis se presenta en el anexo 6 "Resultados del análisis de probabilidad de incrustación de calcita por medio del software Watch 3"

De los resultados obtenidos en la corrida del programa Watch se puede concluir que: debido a que la temperatura de operación del pozo es baja, aproximadamente 80°C, la posibilidad de incrustación de Calcita es también baja, ya que la Calcita muestra una mayor solubilidad a bajas temperaturas. Sin embargo, se puede establecer según el índice de incrustación que se producirá incrustación, aunque en una cantidad mínima.

Sabiendo que no es necesario el nivel de remoción de Sílice del agua geotérmica alcanzado con la dosificación de 3 g/L para garantizar un buen proceso de reinyección y conociendo la temperatura de la formación permeable en la cual es reinyectada el agua geotérmica residual en el pozo TR-11A, se estableció que una concentración aproximada de 200 ppm de Sílice en el sobrenadante luego del tratamiento sería aceptable para garantizar que no se presentarían problemas en la disposición final del

XII. CONCLUSIONES

- A. El proceso de reinyección es actualmente la mejor forma de disponer las aguas geotérmicas residuales proporcionando una recarga artificial al reservorio (cuando la reinyección se realiza dentro del campo) y disminuyendo el impacto ambiental ocasionado por éstas. El proceso de reinyección en frío presenta problemas de incrustación ya que la concentración de la Sílice disuelta en éste, excede la solubilidad en el equilibrio a la temperatura de reinyección del fluido, por lo que la remoción de este mineral previo a su disposición garantizará la vida útil del pozo de reinyección y específicamente el TR-11A.

- B. Se estableció un modelo Cinético para representar el fenómeno de polimerización de la Sílice presente en el agua Geotérmica residual que es reinyectada en el pozo TR-11A, para el cual se tomó en cuenta la influencia de dos variables: Temperatura del fluido y Concentración de Sílice monomérica, ambas en función del tiempo. El modelo generado aplicando Análisis de Regresión Lineal Múltiple explica el 97% de la variabilidad de $\ln(-r_A)$, esto quiere decir que la ecuación cinética obtenida para el proceso de polimerización de la Sílice en el sistema de tanques del TR-11 es muy representativa de los datos obtenidos en el experimento.

- C. Se ha determinado que el Hidróxido de Calcio es el floculante que presenta las mejores características técnicas y económicas para realizar el proceso de remoción de la Sílice disuelta en el agua residual del Campo Geotérmico de Berlín.

- D. La remoción de la Sílice presente en el agua geotérmica residual a una dosificación de 3 g/L resultó ser del 98 %, con una concentración final en el sobrenadante de 26.7 ppm de Sílice. Se ha establecido que no es necesaria una remoción tan alta ya que una concentración de aproximadamente 200 ppm en el sobrenadante aseguraría que la reinyección en frío no afectará el grado de

absorción del pozo TR-11A, ya que la concentración de equilibrio de la Sílice para la temperatura de la formación permeable (80°C) es de alrededor de 280 ppm.

- E. El estudio realizado debe servir de base para continuar la optimización del proceso de floculación a fin de establecer la dosificación de Hidróxido de Calcio que proporcione la remoción necesaria para garantizar una buena reinyección, futuras pruebas deberán realizarse en rangos de dosificación menores a 3 g/L .

- F. La alternativa de uso del lodo como material para la formación de ladrillos refractarios debe ser experimentada aún más, ya que las formulaciones evaluadas no proporcionaron buenos resultados al ser expuestas a temperaturas tan elevadas como 1.200°C. Debe considerarse que si se realizan dosificaciones menores de Hidróxido de Calcio se mejorarían las características del material. Además debe experimentarse con aglutinantes inorgánicos adicionales en la formulación.

- G. Los resultados obtenidos en la prueba de conductividad térmica, muestran que el material obtenido de la floculación con $\text{Ca}(\text{OH})_2$ presenta buenas características como aislante térmico ya que posee una conductividad térmica de 0.19 W/m°C, este valor se encuentra en el rango de conductividades de los materiales aislantes. Se requiere de una nueva experimentación a fin de determinar los aglutinantes y aditivos que proporcionen a éste la resistencia mecánica y estabilidad para utilizarlo como aislante en las tuberías de transporte de vapor.

XIII. RECOMENDACIONES

- A. La ecuación cinética obtenida en el estudio de polimerización de la Sílice debe ser utilizada como punto de partida para la realización a futuro de estudios similares al realizado, para verificar los resultados obtenidos en este experimento, y además, en la manera de lo posible, realizar una investigación de la influencia de otras variables que puedan afectar el fenómeno de polimerización, como por ejemplo, la presencia de otras especies químicas en el agua residual, y el grado de agitación o aireación del fluido.
- B. La dosificación de 3 g/L de Hidróxido de Calcio proporciona buenos resultados en lo que a remoción de Sílice respecta. Pero dado que no es necesario alcanzar el nivel de remoción que se logra con esta dosificación y como resultado de la extrapolación de datos realizada, se recomienda ensayar el proceso de floculación con una dosificación de 1,5 g/L o menores para establecer si se estarían obteniendo siempre buenos resultados de remoción, a la vez que se reduciría aun más la posibilidad de una incrustación de Calcita y los costos de tratamiento.
- C. Con los resultados obtenidos la experimentación del proceso de floculación puede pensarse en realizar la remoción de la sílice directamente en el sistema de tanques de polimerización ya existente, para esto será conveniente considerar que la dosificación debe realizarse en el bafle número 18, lo que se estaría garantizando una buena homogenización de el floculante. Además debe considerarse la reestructuración del sistema para ser utilizado como un sistema de floculación, puede pensarse en un estudio que busque la manera de hacer las modificaciones necesarias para que el proceso se realice en forma continua.
- D. Deben realizarse estudios enfocados a reducir la probabilidad de incrustación de Calcita en las aguas a reinyección en frío o en caliente, considerando la ecuación Cinética de esta depositación y evaluando la factibilidad de adicionar CO₂ proveniente de los gases no condensables que se obtienen en la planta. La

experimentación puede simularse inicialmente en el laboratorio recreando el fluido geotérmico y luego realizarse directamente en el campo.

- E. Considerando la alta presión que posee el agua residual cuando es descargada a los silenciadores del pozo TR-11, la cual es producto de la suma de la presión debida a la separación, más la presión que proporciona la columna de agua, menos las pérdidas del transporte por tuberías, es factible pensar en que el fluido previo a su reinyección pueda poseer un buen potencial para generar energía eléctrica. Debe evaluarse esta alternativa incluyendo las consideraciones necesarias para establecer la factibilidad de utilización de éste en un ciclo de baja entalpía.

XIV. BIBLIOGRAFIA.

1. Arnorsson, Stefan, Sigurdsson, Sven, Science Institute, University of Iceland and Hördur Svavarsson. **"THE CHEMISTRY GEOTHERMAL WATERS IN ICELAND. I. CALCULATION OF AQUEOUS SPECIATION FROM 0° TO 370°C"**. April 20 1982
2. Barnes, Hubert Lloyd. **"GEOCHEMISTRY OF HIDROTHERMAL ORE DEPOSITS"**. Holt, Rinehart and Winston, Inc., U.S.A., 1967
3. Brown, K. L. **"SCALING AND GEOTHERMAL DEVELOPMENT"**. Abril, 1991
4. Calderón Melara, R.I., Cortez Alvarenga, J.A. (1979). **"OPTIMIZACION DE UN PROCESO DE FLOCULACION DE SÍLICE PRESENTE EN AGUAS GEOTÉRMICAS"**. Trabajo de Graduación para optar al Título de Ingeniero Químico, Universidad de El Salvador, San Salvador, El Salvador
5. Cuéllar, Gustavo. **"COMPORTAMIENTO DE LA SÍLICE EN AGUAS GEOTERMICAS DE DESECHO"**. Informe de CEL-Laboratorio Geoquímico, El Salvador. 19xx
6. ELC Electroconsul. **"INFORME DE FACTIBILIDAD CAMPO GEOTÉRMICO DE BERLÍN"**. CGB-2-ELEC-R-11952(R01), enero 1994
7. Geothermal Energy New Zealand Limited. **"PRESENTACIÓN DE SERVICIOS DE CONSULTORIA PARA DESAROLLAR LOS ESTUDIOS GEOCIENTIFICOS COMPLEMENTARIOS A LA ETAPA DE FACTIBILIDAD DEL CAMPO GEOTÉRMICO DE BERLÍN DEPARTAMENTO DE USULUTAN, EL SALVADOR"**. Partida 3, Estudio Geoquímico, Problemas de incrustación en el campo, Informe Definitivo, Febrero de 1995

8. Geothermal Energy New Zealand Limited. **“PRESENTACIÓN DE SERVICIOS DE CONSULTORIA PARA DESAROLLAR LOS ESTUDIOS GEOCIENFICOS COMPLEMENTARIOS A LA ETAPA DE FACTIBILIDAD DEL CAMPO GEOTERMICO DE BERLIN DEPARTAMENTO DE USULUTAN, EL SALVADOR”**. Partida 3, Estudio Geoquímico, Caracterización de Geoquímica, Informe Definitivo, Febrero de 1995
9. Geothermal Energy New Zealand Limited. **“PRESENTACIÓN DE SERVICIOS DE CONSULTORIA PARA DESAROLLAR LOS ESTUDIOS GEOCIENFICOS COMPLEMENTARIOS A LA ETAPA DE FACTIBILIDAD DEL CAMPO GEOTERMICO DE BERLIN DEPARTAMENTO DE USULUTAN, EL SALVADOR”**, Partida 6, Informe Integrado, Febrero de 1995
10. Holman, J.P. **“TRANSFERENCIA DE CALOR”**. Compañía Editorial Continental S.A., U.S.A, 1984
11. International Geothermal Association **“Proceedings of the WORD GEOTHERMAL CONGRESS, 1995”**, Florence, Italy 18-31 May 1995.
12. Landaverde Osorio M. A., Ayala Beltrán S. H. (1998). **“ANALISIS DE LAS INSTALACIONES GEOTERMoelectricas DE EL SALVADOR”**. Trabajo de Graduación para optar al Título de Ingeniero Eléctrico, Universidad Politécnica de El Salvador, San Salvador, El Salvador
13. Möcker de Valdivieso, G. I. (1998). **“PROPUESTA DE DISEÑO PARA LA CONSTRUCCIÓN DE UN SISTEMA DE TANQUES PARA TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUAL. CAMPO GEOTÉRMICO DE BERLÍN”**. Geotérmica Salvadoreña, S.A. de C.V., Unidad de Ingeniería Química, Superintendencia Explotación y Conservación de Recursos Geotérmicos. Gerencia de Recursos Geotérmicos

14. **"MODELO CONCEPTUAL. CAMPO GEOTÉRMICO DE BERLÍN"**. Síntesis de la información científica. Gerencia de Recursos Geotérmicos, CEL, El Salvador, 1996
15. **"MODELO GEOQUÍMICO CONCEPTUAL. CAMPO GEOTÉRMICO DE BERLÍN"**. Geotérmica Salvadoreña S.A de C.V., El Salvador, 1999
16. Monge Ramos, B. R., Luna Araujo, L. A. (1983). **"EVALUACION DE PARAMETROS PARA LA REMOCIÓN DE ARSENICO CONTENIDO EN LAS AGUAS DE DESECHO DEL CAMPO GEOTÉRMICO DE AHUACHAPAN POR MEDIO DE OXIDO DE CALCIO COMO FLOCULANTE"**. Trabajo de Graduación para optar al Título de Ingeniero Químico, Universidad de El Salvador, San Salvador, El Salvador
17. Montgomery, Douglas. **"DISEÑO Y ANALISIS DE EXPERIMENTOS"**. Editorial Iberoamericana, 1991
18. Octave Levenspiel. **"INGENIERÍA DE LAS REACCIONES QUÍMICAS"**. Editorial Reverté. S.A. 6ª, Reimpresión, Mexico 1997
19. Revista Informativa **"GEOCIENCIA No.1"**. GEOCEL, Septiembre 1996
20. Robinson, A. Bruce. **"QUARTZ DISSOLUTION AN SILICA DEPOSITION IN HOT DRY ROCK GEOTHERMAL SYSTEMS"**. Los Alamos National Laboratory, Los Alamos, New México, U.S.A., julio, 1982
21. Solórzano Figueroa, L. M.; Herrera Mancía, C. M.; Hernández Cabezas, C. A.; García Castillo, H. N. (1976). **"UTILIZACIÓN DE LOS DEPÓSITOS DE SÍLICE PROVENIENTE DE AGUAS RESIDUALES DE UNA PLANTA GEOTÉRMICA"**. Trabajo de Graduación para optar al Título de Ingeniero Químico, Universidad de El Salvador, San Salvador, El Salvador

22. Sosman, Robert B. **"THE PHASES OF SILICA"**. Quinn & Boden Company Inc., 1st. Edition, U.S.A., 1965
23. Tomas Campos. **"FUNDAMENTOS DE GEOTERMIA"**. Julio 1991
24. Welty, James R. **"TRANSFERENCIA DE CALOR APLICADA A LA INGENIERÍA"**. Editorial Limusa, 1^a Edición, U.S.A., 1974

XV. GLOSARIO

ABSORCIÓN:	Incorporación de materia en otra materia, como la disolución de un gas en un líquido.
CABEZAL:	Parte de las máquinas-herramienta en la que van montados los elementos que transmiten el movimiento del motor al eje o árbol de transmisión.
CADENAS VOLCÁNICAS:	Cordillera, serie de montañas.
CARBONATOS:	Sal resultante de la combinación del ácido carbónico con un radical.
CORTEZA:	Capa exterior de la tierra, llamada también Litósfera.
DECANTADO:	Separación de un líquido y un sólido o de dos líquidos no miscibles aprovechando la gravedad.
DENSIDAD:	Masa por unidad de volumen de un cuerpo.
DESGASIFICACIÓN:	Acción y efecto de eliminar los gases.
DORSALES:	Elevaciones del fondo de los océanos en forma de cordillera de montañas.
ENTALPÍA:	Calor total contenido en un fluido. En termodinámica se define en general como la suma de la energía interna (U) y el factor de trabajo presión-volumen; siendo por lo tanto $dH = dU + pdV$. La expresión puede cambiar en término de otros parámetros, dependiendo del proceso termodinámico específico al que se está aplicando.

EQUILIBRIO:	Estado de un cuerpo o sistema cuando la resultante de las fuerzas que actúan sobre él es nula.
ESTRATO:	Capa rocosa de espesor variable, que constituye los terrenos sedimentarios, formando series separadas entre sí por superficies de discontinuidad, denominadas planos de estratificación.
EXPANSIÓN	Cambio brusco en el volumen de un fluido debida a una reducción en la presión del sistema.
ATMOSFÉRICA:	Es el cambio brusco de presión que sufre el fluido geotérmico cuando cambia de las condiciones de reservorio a las de superficie.
FALLAS:	Fracturas en masas rocosas, a lo largo de las cuales se producen desplazamientos de los bloques originados.
FASE:	Cada una de las partes separables físicamente en un sistema formado por uno o varios componentes.
GEOFÍSICA:	Parte de la geología que aplica los principios y métodos de la física al estudio de la tierra.
GEOTERMIA:	Rama de la geofísica que trata de los fenómenos térmicos internos de la Tierra.
GRADIENTE DE TEMPERATURA:	Es la variación de la temperatura por cada metro de distancia en profundidad.

- GRADOS DE LIBERTAD:** Es el número de variables a especificar para definir completamente el estado de un sistema.
- IMPERMEABLE:** Que no puede ser atravesado por agua u otro líquido.
- INFILTRACIÓN:** Introducir un líquido entre los poros de un sólido.
- MAGMA:** Rocas fundidas dentro de la tierra, de las cuales se forman rocas ígneas por enfriamiento.
- MONÓMERO:** Molécula o grupo molecular simple, de bajo peso y aislable, capaz de reaccionar consigo misma o con otras similares para formar polímeros.
- POLÍMERO:** Se dice de la sustancia de mayor peso molecular entre dos de la misma composición química.
- POLIMERIZACIÓN:** Proceso químico por el cual, mediante el calor, la luz o un catalizador, se unen varias moléculas de un compuesto, generalmente de carácter no saturado, llamado monómero, para formar una cadena de múltiples eslabones de éste y obtener una molécula de elevado peso molecular y de propiedades distintas.
- POLIMÓRFICA:** Existencia de un cuerpo que presenta en estado sólido dos o más formas, cada una de las cuales tiene una estructura y un ordenamiento atómico singular.
- POTENCIAL ENERGÉTICO:** Capacidad del reservorio para producir energía.
- POZO:** Perforación vertical, cilíndrica y muy profunda, efectuada en las capas superficiales de la corteza terrestre y que alcanza un yacimiento.

PRECIPITACIÓN:	Separación de una sustancia insoluble, originada ésta por una reacción química, en el seno de una disolución.
REFRACTARIO:	Material sólido que resiste la acción del fuego y temperaturas superiores a 1.580°C sin fundirse, deformarse ni descomponerse.
REINYECCIÓN:	La acción de devolver hacia el interior de un pozo a acuífero, el líquido residual que se obtuvo después de separar y utilizar el vapor que tenía la mezcla original extraída de otro pozo. Puede hacerse mediante bombeo o utilizando como impulsores la presión propia del líquido (al que se separó del vapor) y la gravedad (si el pozo reinyector está a menor elevación que el productor).
SALMUERA:	Solución geotérmica conteniendo grandes cantidades de cloruro de sodio u otras sales.
SATURACIÓN:	Delimitación de la zona de equilibrio líquido -vapor, en el diagrama p-v de una sustancia.
SOLUBILIDAD:	Es el número de g de soluto que se requieren para saturar 100 g de disolvente.
SOLUCIÓN:	Fase líquida (o sólida) que contiene diversas sustancias, una de las cuales llamada disolvente, se considera que realiza una función diferente a la de las otras, llamadas solutos.
SUBSUELO:	Terreno que está debajo de la capa laborable superficial.
SUSPENSIÓN:	Sistema heterogéneo formado por una fase dispersante y otra dispersa, constituida por un sólido dividido en partículas visibles al microscopio.

VERTEDERO: Escape para dar salida y medir flujos de agua saliendo de los silenciadores.

XVI. ANEXOS

ANEXO 1

Tanque laberíntico para la polimerización de la Sílice

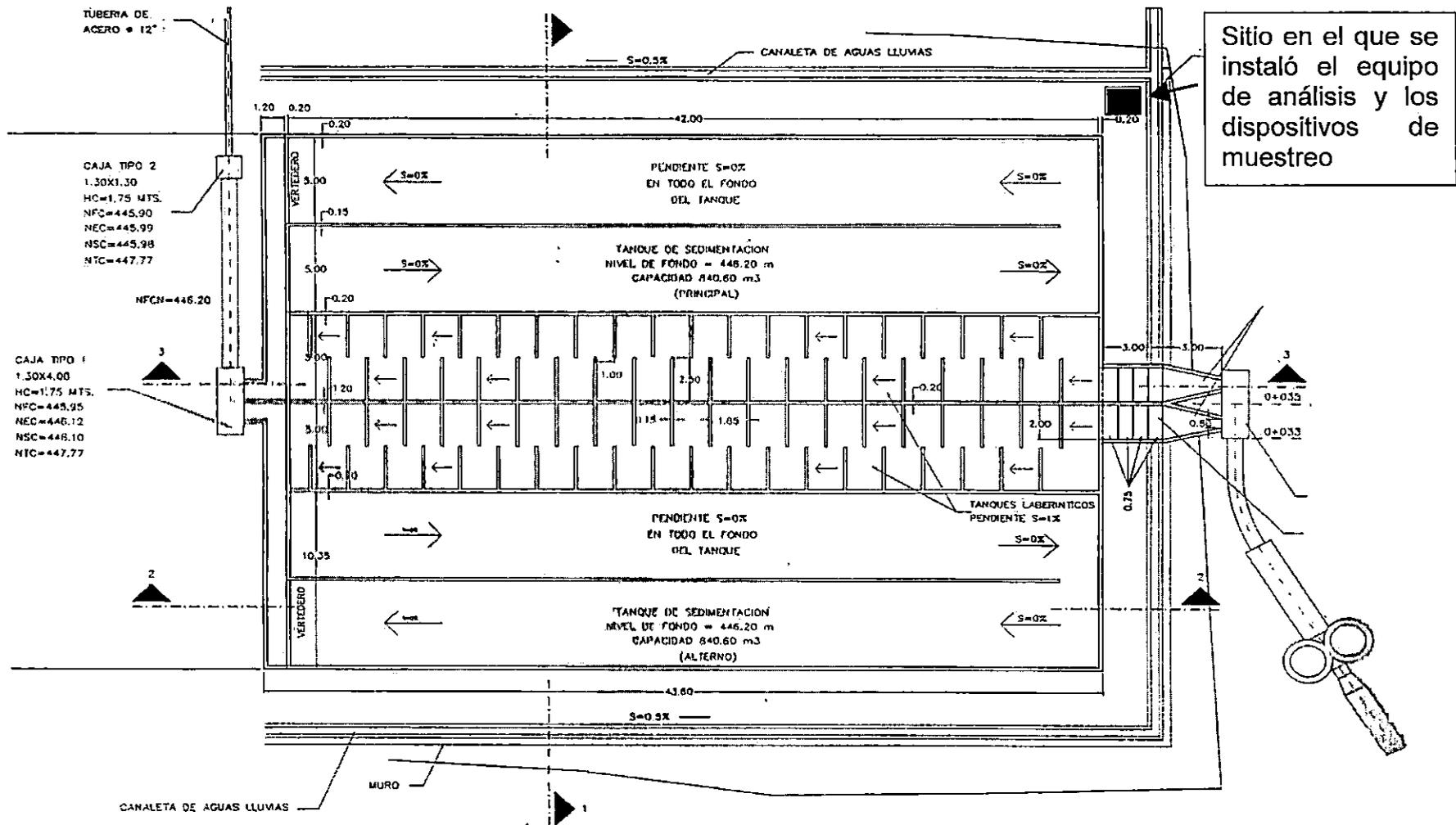
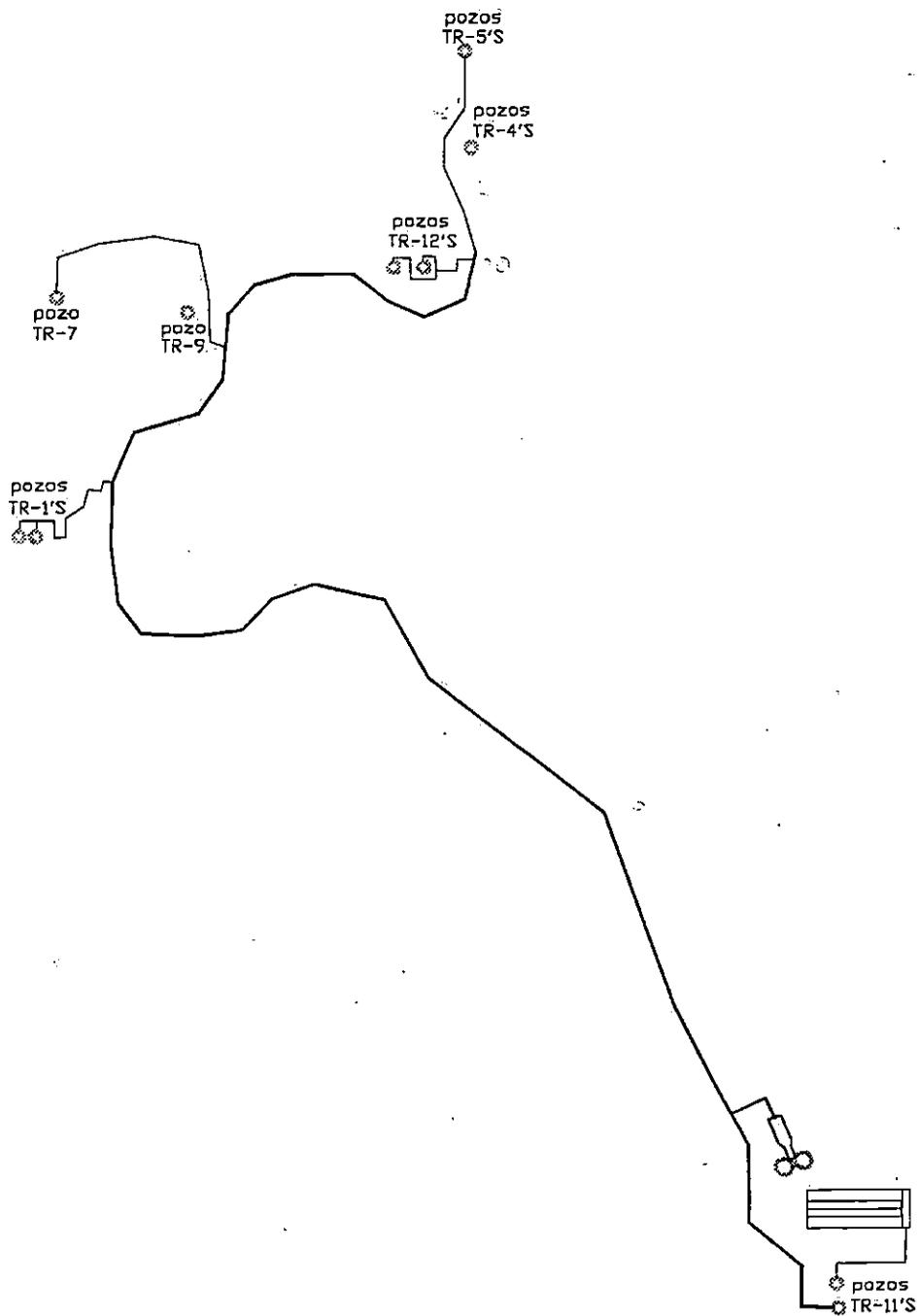


Figura 1. Sistema de Tanques de Polimerización TR-11.

ANEXO 2

**Sistema de manejo de agua
residuales hacia reinyección
en el Pozo TR-11**



	GEDTERMICA SALVADOREÑA S.A. de C. V.	
	GESAL S.A. de C.V.	
CENTRAL GEOTERMICA DE BERLIN.		
SISTEMA DE MANEJO DE AGUA		
REINYECCION EN CALIENTE		
Dibujo	Revisó	
José Paz Cruz Rivera	Guido E. Molina A.	D4 del Septiembre del 2000

ANEXO 3

Procedimiento para análisis de Sílice Monomérica

REACTIVOS PARA ANÁLISIS DE SÍLICE MONOMÉRICA

SOLUCIÓN A

Acido Sulfúrico 1,5 N.

Medir 41,47 ml de ácido sulfúrico Concentrado y aforar a 1.000 ml con agua desionizada.

SOLUCIÓN B

Mezcla de Heptamolibdato de Amonio e Hidróxido de Amonio.

Pesar 100 g de $(\text{NH}_4)_6\text{Mo}_7\text{O}_{24}\cdot 4\text{H}_2\text{O}$ y mezclar con 43,90 ml de NH_4OH y aforar a 1000 ml con agua desionizada.

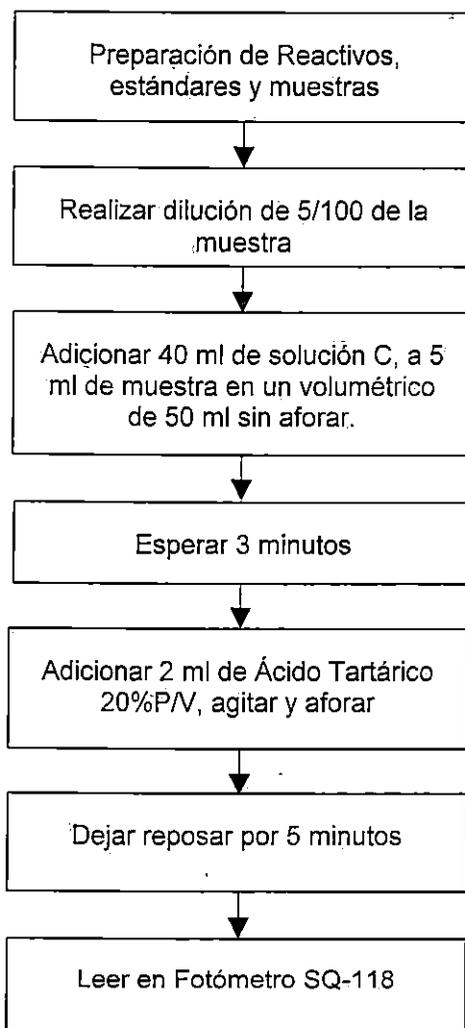
SOLUCIÓN C

A 500 ml de agua desionizada adicionar 200 ml de solución A y 100 ml de solución B (800 ml en total). Esta solución Tendrá una concentración de 0,0707 M con respecto a MoO_4^{2-} , 0,148 N en iones NH_4^+ y 0,375 N en iones SO_4^{2-} , teniendo un pH de aproximadamente 1,2.

ANALISIS DE LA MUESTRA.

Se toma la muestra, y se mide la temperatura realizando inmediatamente la dilución (5/100), luego se adicionan 5 ml de la muestra a 40 ml de mezcla C en un volumétrico de 50 ml, sin aforar, y se deja reposar por 3 min, posteriormente se le agregan 2 ml de Ácido Tartárico, se afora y se agita la solución dejándola reposar por 5 minutos, posteriormente se lee en el fotómetro SQ-118.

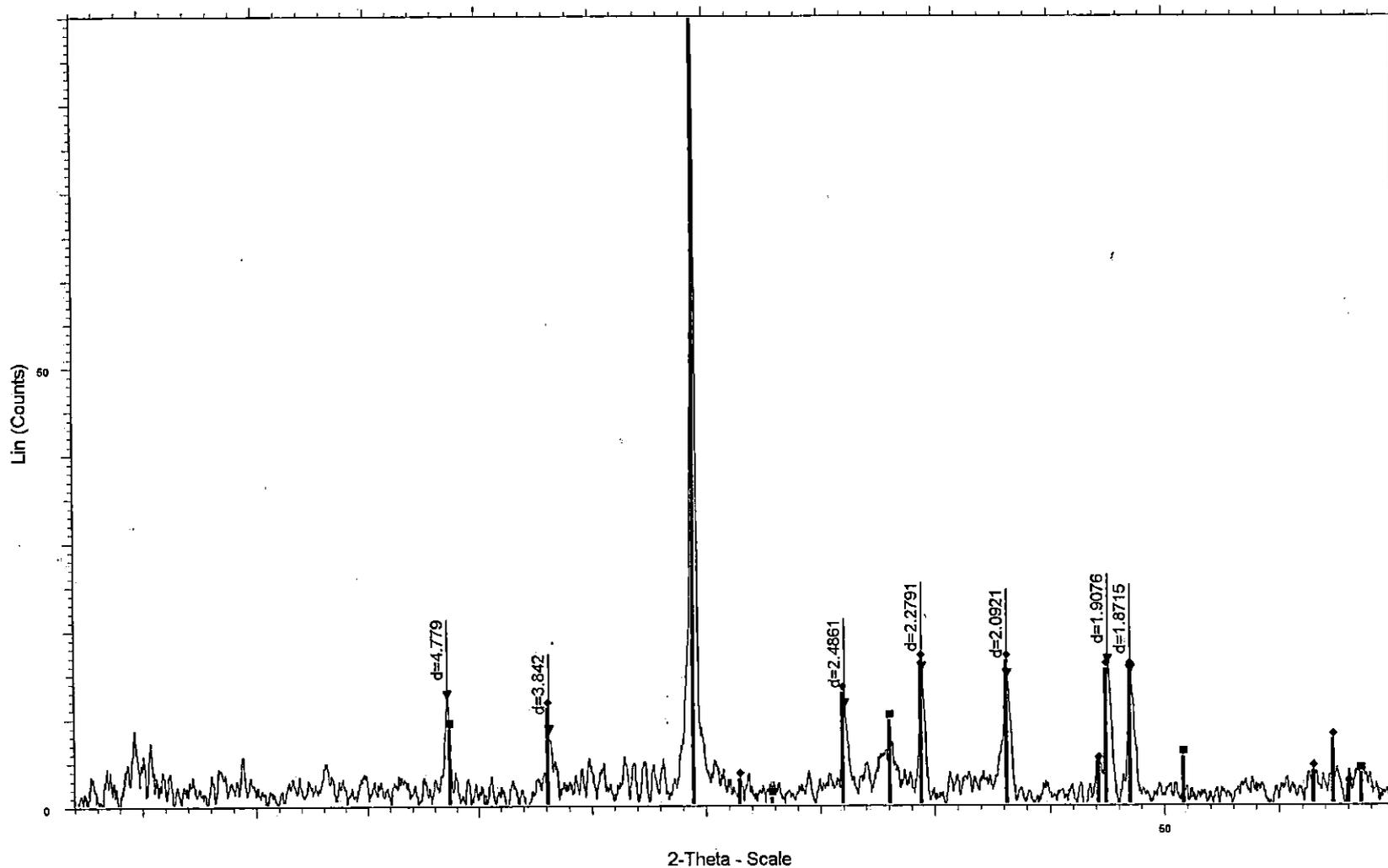
FLUJOGRAMA



ANEXO 4

**Gráficas obtenidas del Análisis de Difracción de
Rayos X**

TR-11 FLOCULO M2A SECADO AL AMBIENTE TANQUE DE SEDIMENTACIO

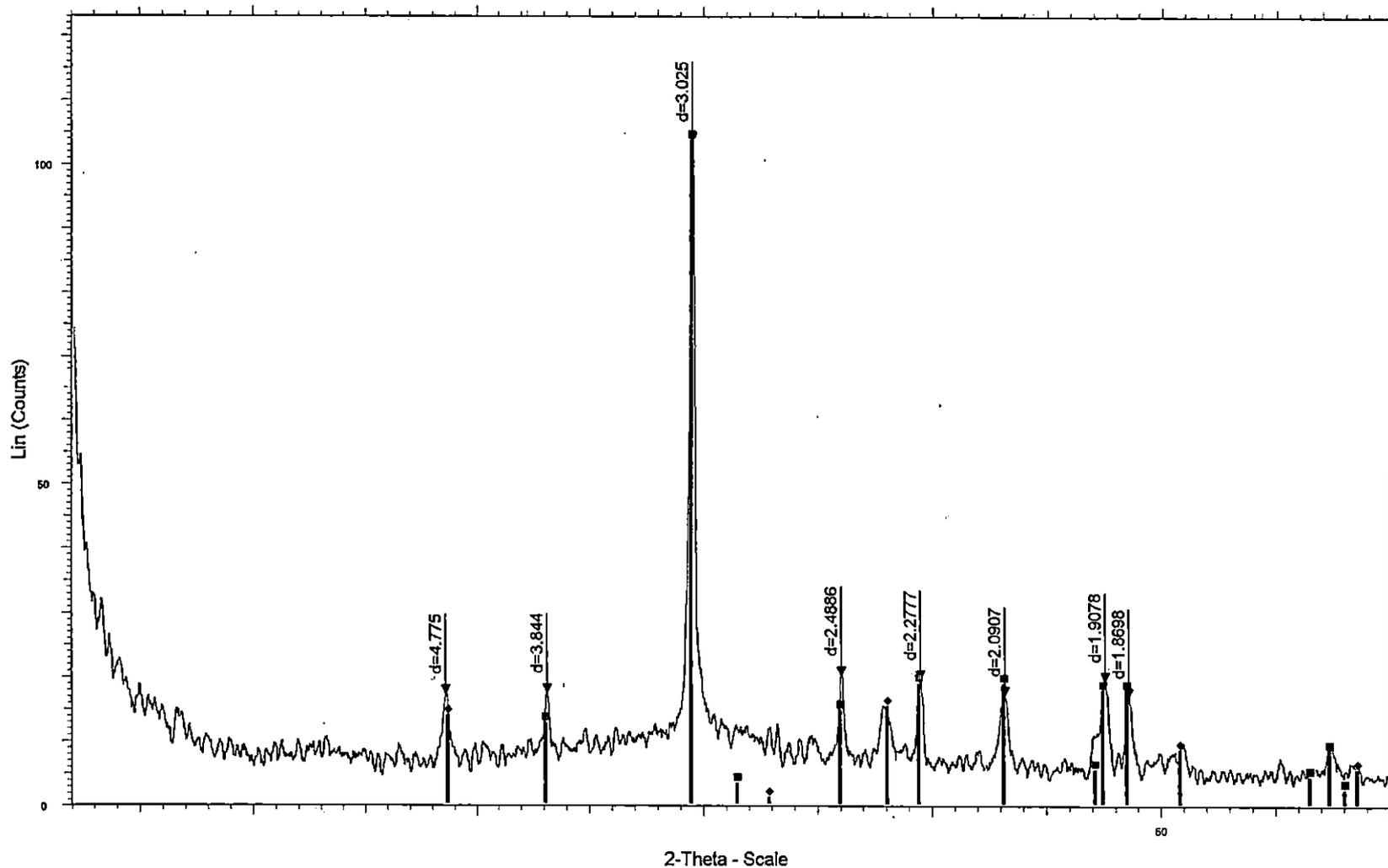


TR-11 FLOCULO M2A SECADO AL AMBIENTE TANQUE DE SEDIMENTACIO - File: TR-11 FLOCULO AMBIENTE M-2A.RAW - Type: 2Th/Th locked - Start: 2.000 ° - End: 60.00

07-0239 (l) - Brucite, syn - Mg(OH)₂ - Y: 10.42 % - d x by: 1.000 - WL: 1.54056

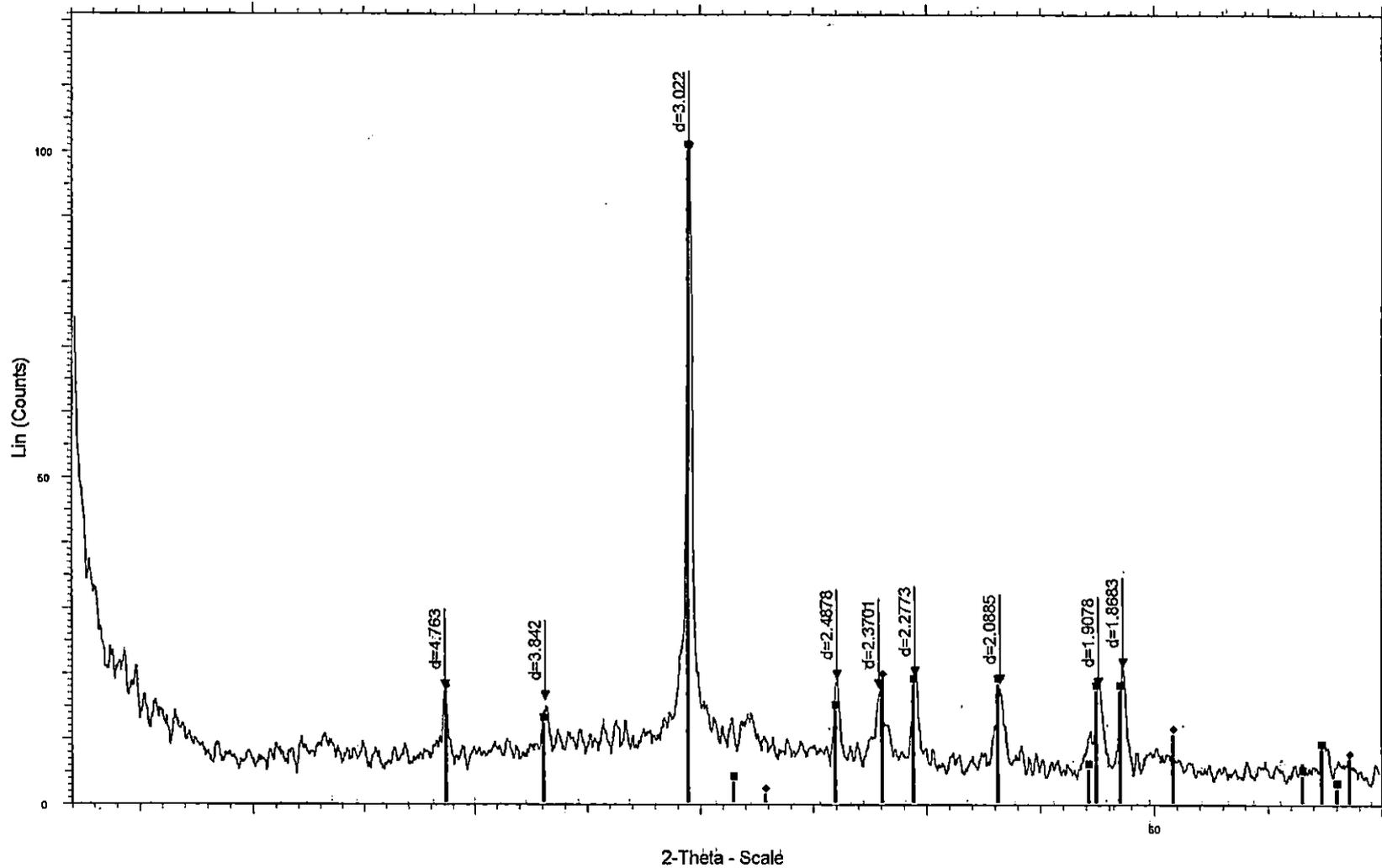
05-0586 (*) - Calcite, syn - CaCO₃ - Y: 100.00 % - d x by: 1.000 - WL: 1.54056

TR-11 FLOCULO M2B SECADO AL AMBIENTE TANQUE DE SEDIMENTACIO



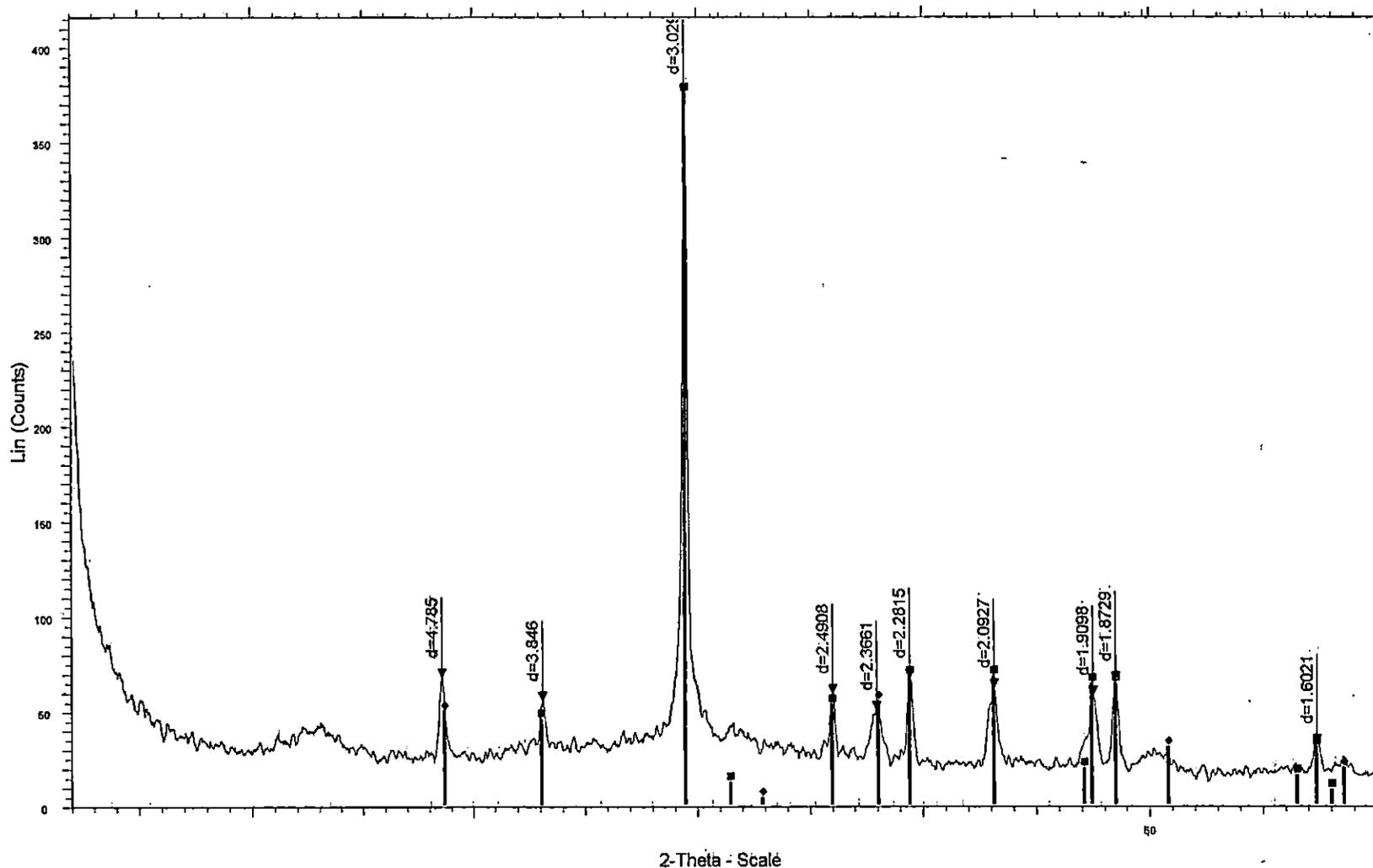
TR-11 FLOCULO M2B SECADO AL AMBIENTE TANQUE DE SEDIMENTACIO - File: TR-11 FLOCULO AMBIENTE M-2B.RAW - Type: 2Th/Th locked - Start: 2.000 ° - End: 60.00
05-0586 (*) - Calcite, syn - CaCO_3 - Y: 100.00 % - d x by: 1.000 - WL: 1.54056
07-0239 (l) - Brucite, syn - $\text{Mg}(\text{OH})_2$ - Y: 14.58 % - d x by: 1.000 - WL: 1.54056

TR-11 FLOCULO M2C SECADO AL AMBIENTE TANQUE DE SEDIMENTACIO



TR-11 FLOCULO M2C SECADO AL AMBIENTE TANQUE DE SEDIMENTACIO - Filé: TR-11 FLOCULO AMBIENTE M-2C.RAW - Type: 2Th/Th locked - Start: 2.000 ° - End: 60.0
07-0239 (l) - Brucite, syn - $Mg(OH)_2$ - Y: 18.75 % - d x by: 1.000 - WL: 1.54056
05-0586 (*) - Calcite, syn - $CaCO_3$ - Y: 100.00 % - d x by: 1.000 - WL: 1.54056

TR-11 FLOCULO M2A SECADO AL HORNO TANQUE DE SEDIMENTACION m

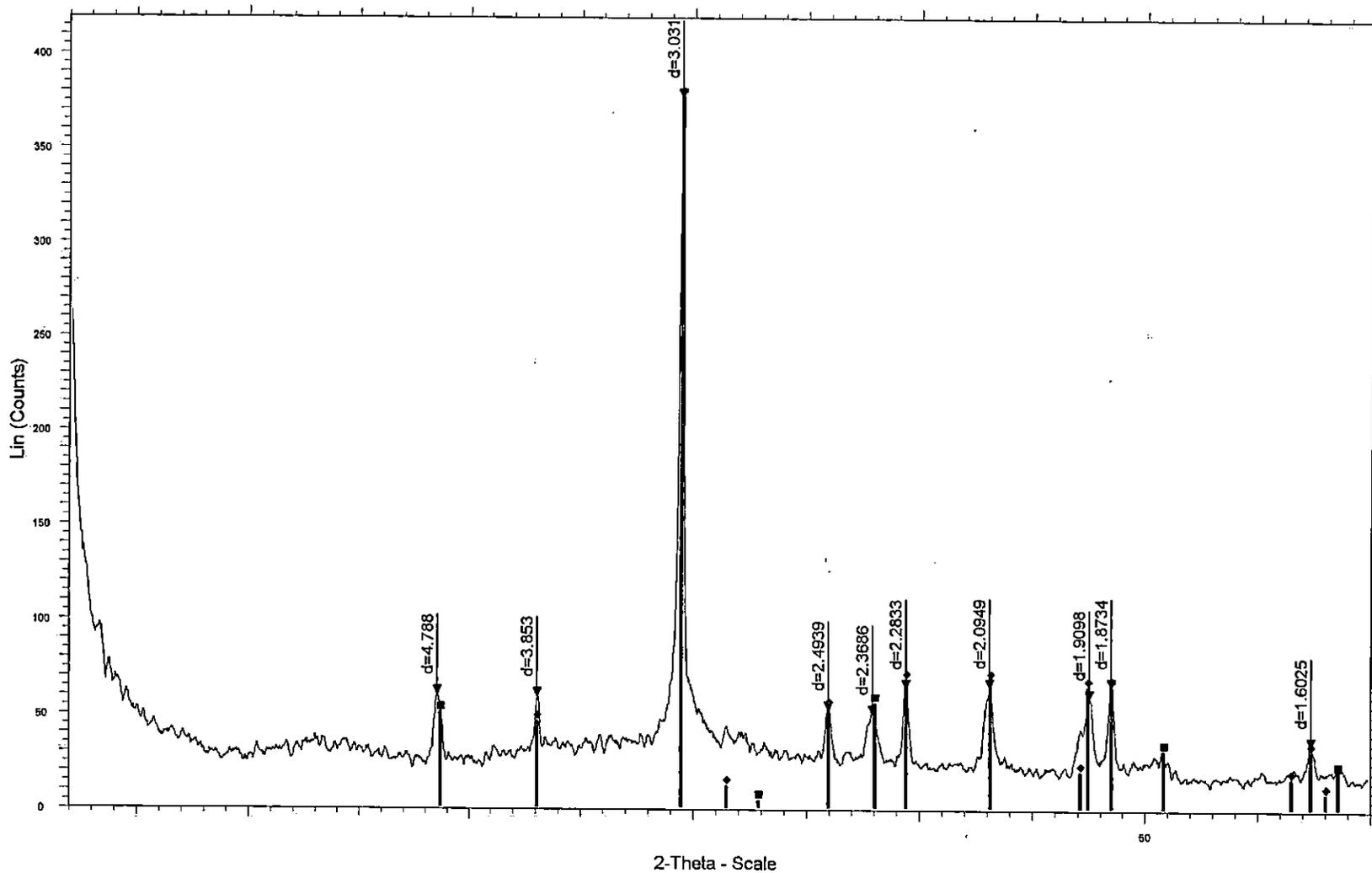


▲ TR-11 FLOCULO M2A SECADO AL HORNO TANQUE DE SEDIMENTACION m - File: TR-11 FLOCULO M-2A.RAW - Type: 2Th/Th locked - Start: 2.000 ° - End: 60.000 ° - Step:

■ 05-0586 (*) - Calcite, syn - CaCO₃ - Y: 100.00 % - d x by: 1.000 - WL: 1.54056

◆ 07-0239 (l) - Brucite, syn - Mg(OH)₂ - Y: 14.58 % - d x by: 1.000 - WL: 1.54056

TR-11 FLOCULO M2B SECADO AL HORNO TANQUE DE SEDIMENTACION m

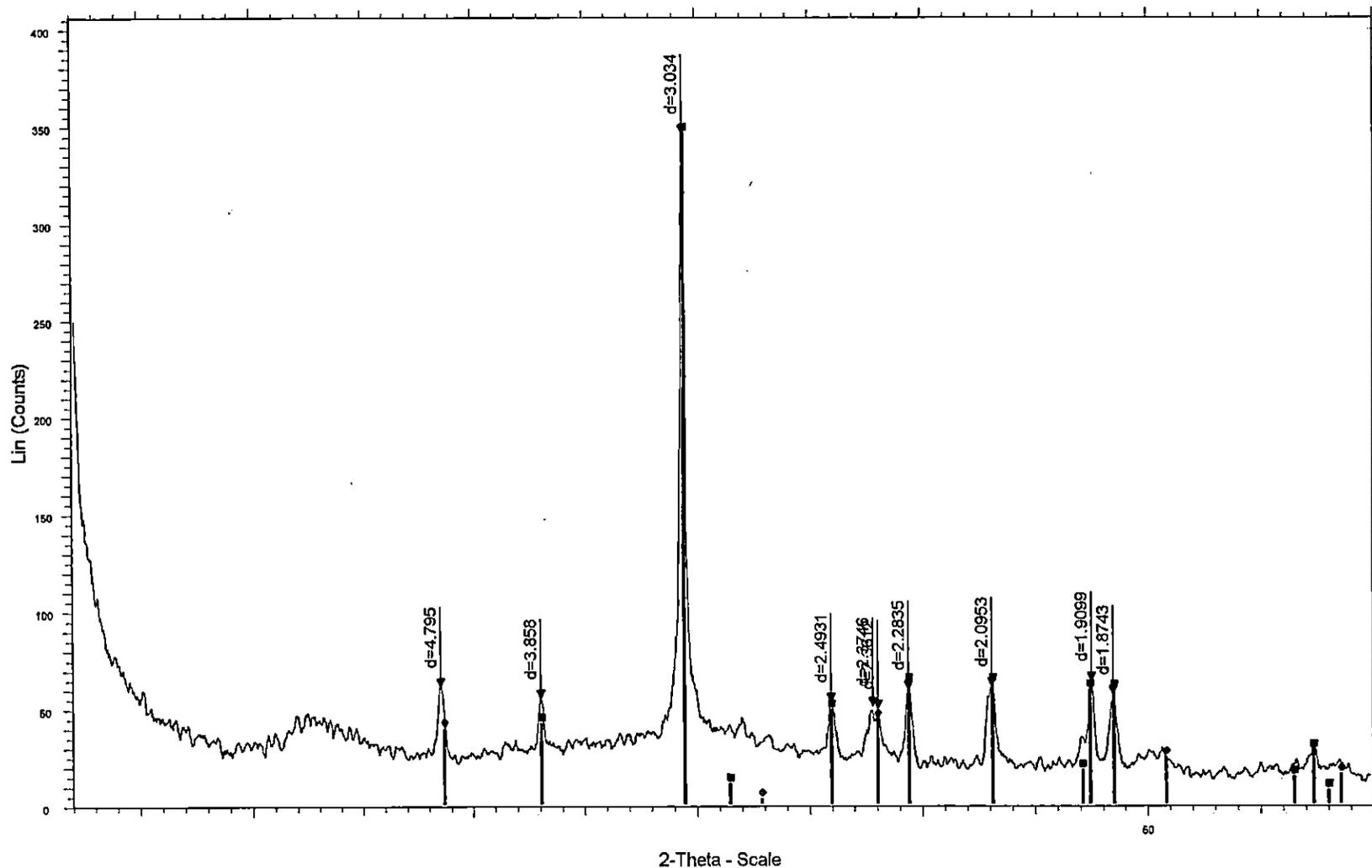


▲ TR-11 FLOCULO M2B SECADO AL HORNO TANQUE DE SEDIMENTACION m - File: TR-11 FLOCULO M-2B.RAW - Type: 2Th/Th locked - Start: 2.000 ° - End: 60.000 ° - Step:

■ 07-0239 (l) - Brucite, syn - Mg(OH)₂ - Y: 14.58 % - d x by: 1.000 - WL: 1.54056

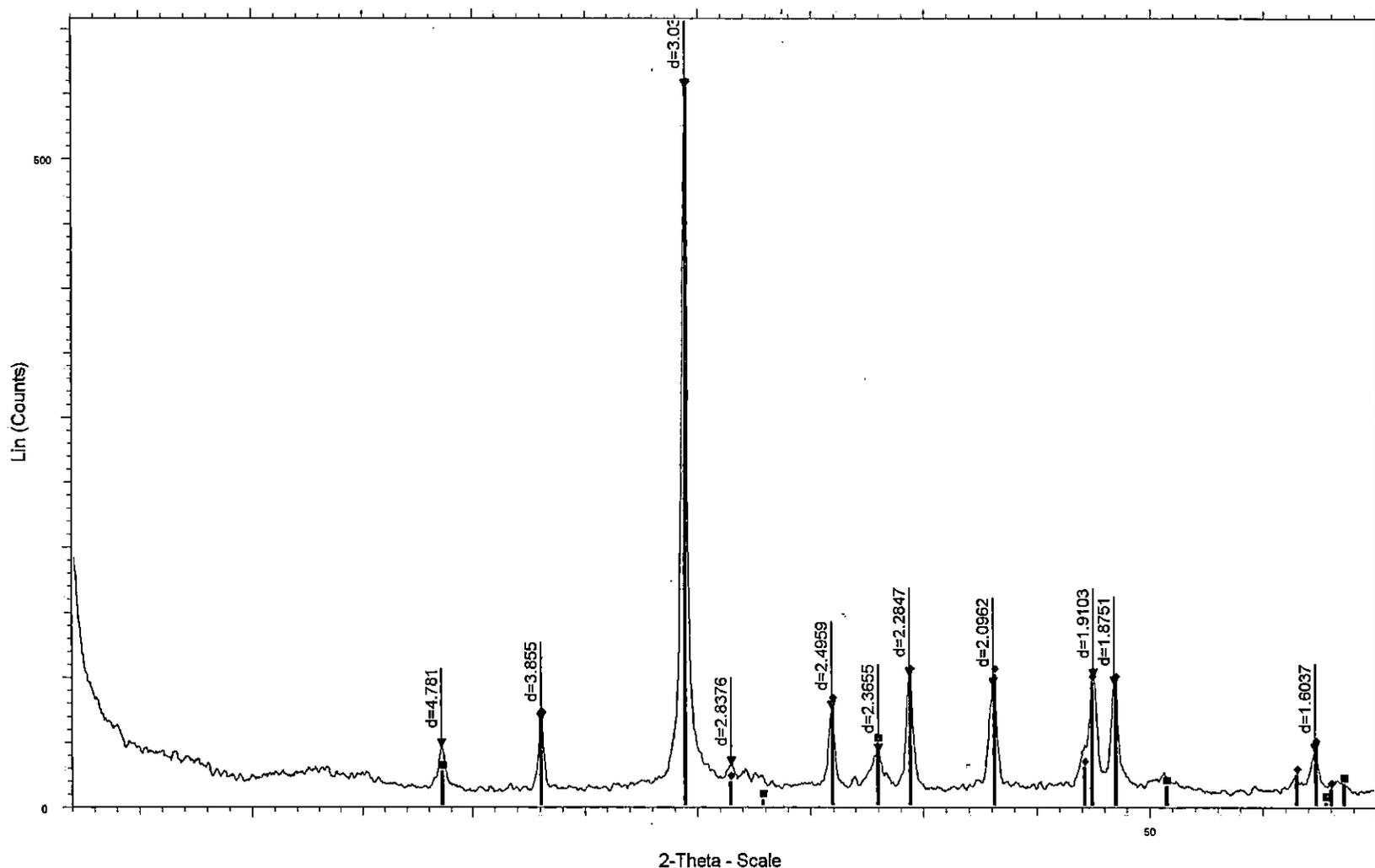
● 05-0586 (*) - Calcite, syn - CaCO₃ - Y: 100.00 % - d x by: 1.000 - WL: 1.54056

TR-11 FLOCULO M2C SECADO AL HORNO TANQUE DE SEDIMENTACION m



TR-11 FLOCULO M2C SECADO AL HORNO TANQUE DE SEDIMENTACION m - File: TR-11 FLOCULO M-2C.RAW - Type: 2Th/Th locked - Start: 2.000 ° - End: 60.000 ° - Step:
05-0586 (*) - Calcite, syn - CaCO₃ - Y: 100.00 % - d x by: 1.000 - WL: 1.54056
07-0239 (l) - Brucite, syn - Mg(OH)₂ - Y: 12.50 % - d x by: 1.000 - WL: 1.54056

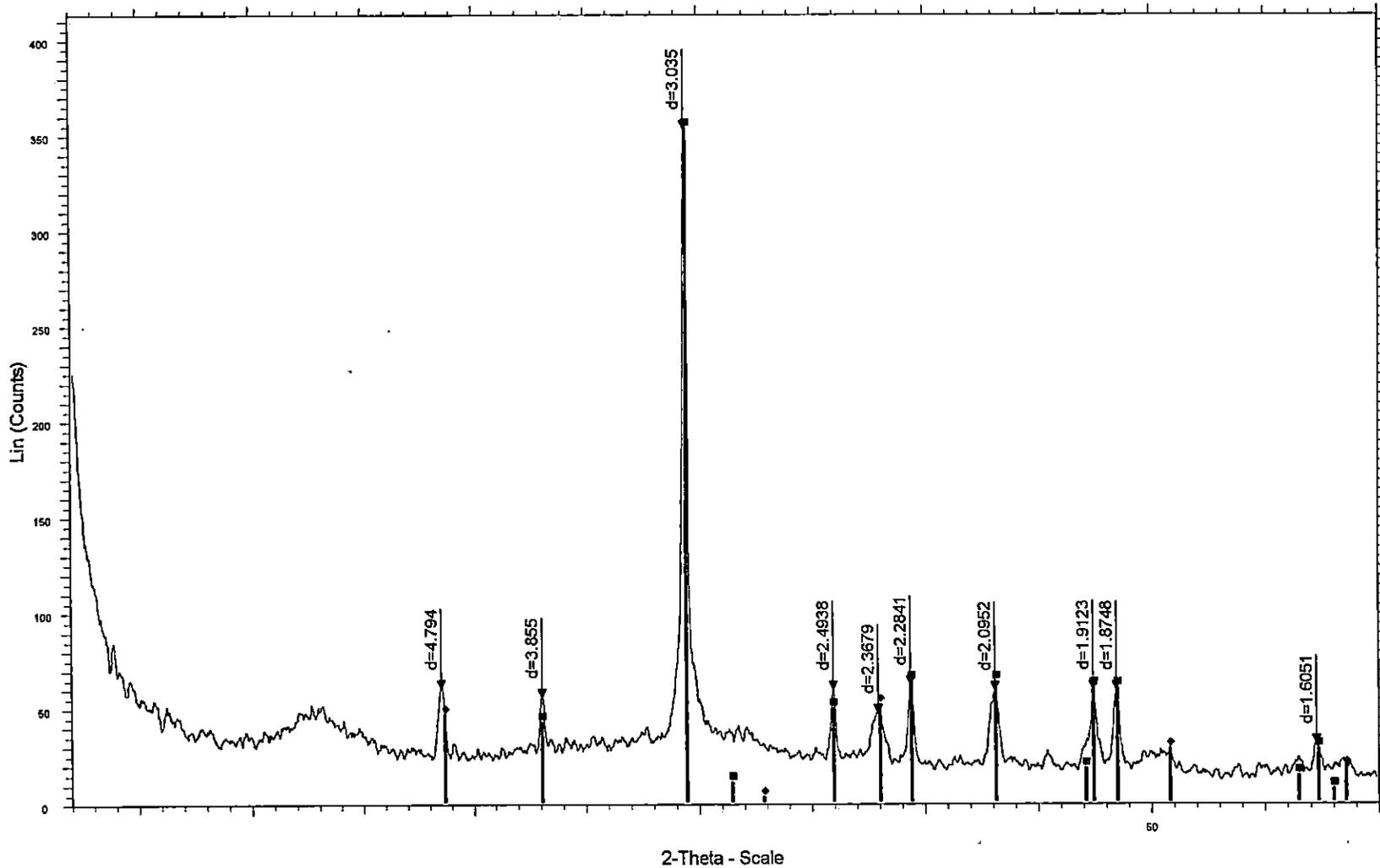
TR-11 TANQUE DE SEDIMENTACION M-2 CON AGUA muestra total



TR-11 TANQUE DE SEDIMENTACION M-2 CON AGUA muestra total - File: TR-11 FLOCULO AGUA M-2.RAW - Type: 2Th/Th locked - Start: 2.000 ° - End: 60.000 ° - Step: 0.020
44-1482 (D) - Brucite, syn - $Mg(OH)_2$ - Y: 8.33 % - d x by: 1.000 - WL: 1.54056
05-0586 (*) - Calcite, syn - $CaCO_3$ - Y: 100.00 % - d x by: 1.000 - WL: 1.54056

7 °C = 110 °C

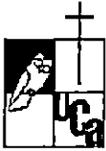
TR-11 FLOCULO SIN HCL M2 SECADO AL HORNO TANQUE DE SEDIMENT



TR-11 FLOCULO SIN HCL M2 SECADO AL HORNO TANQUE DE SEDIMENT - File: TR-11 FLOCULO SIN HCL M-2.RAW - Type: 2Th/Th locked - Start: 2.000 ° - End: 60.000 °
05-0586 (*) - Calcite, syn - CaCO₃ - Y: 100.00 % - d x by: 1.000 - WL: 1.54056
07-0239 (l) - Brucite, syn - Mg(OH)₂ - Y: 14.58 % - d x by: 1.000 - WL: 1.54056

ANEXO 5

Pruebas de conductividad Térmica



Universidad Centroamericana

José Simeón Cañas

Departamento de Ciencias Energéticas y Fluídicas

Apartado Postal (01) 168 - San Salvador, El Salvador. C. A. Teléfono 273 7888, Fax 273 8140.

Reporte:
DETERMINACIÓN DEL
COEFICIENTE DE CONDUCTIVIDAD TÉRMICA
DE UNA MUESTRA

Presentado a:
Carlos Baltazar Hernández Murga

Estudio desarrollado por:
Departamento de Ciencias Energéticas y Fluídicas
a través del laboratorio de Transferencia de Calor

Ing. Mario Chávez
Responsable del laboratorio

San Salvador, 22 de noviembre de 2000

1.0 Introducción

El término aislamiento térmico se refiere a aquel material que disminuye o reduce el flujo de calor. El calor es energía que fluye debido a una diferencia de temperatura. Siempre que dos regiones se encuentren a temperatura diferente, existirá un flujo de energía, en forma de transferencia de calor, entre ellas. El calor puede fluir a través de tres mecanismos básicos: conducción, convección y radiación. Generalmente, estos tres mecanismos están presentes simultáneamente en todos los procesos de transferencia de calor que se dan en la naturaleza. Cada uno de estos mecanismos puede darse en estado estable, o en estado transiente. Estado estable significa que el flujo de calor permanece constante a medida transcurre el tiempo, o en otras palabras, el flujo de calor es independiente de la variable tiempo. Estado transiente significa que el flujo de calor cambia en función del tiempo.

Dependiendo de la geometría y la distribución de temperatura en los cuerpos a través de los cuales fluye el calor podemos asumir para su análisis un flujo de energía en una dimensión, en dos dimensiones, o en tres dimensiones.

2.0 Determinación del Coeficiente de Conductividad Térmica

El presente experimento se centra en la determinación del coeficiente de conductividad térmica de una muestra obtenida por floculado de aguas residuales, basándose en el mecanismo de transferencia de calor por conducción en estado estable y en una dimensión. Esto significa que se cuantificará la cantidad de calor que es capaz de pasar a través de un cuerpo, caracterizándose el flujo de calor por ser siempre constante e independiente del tiempo, y dirigido siempre en una dirección determinada. Bajo estas condiciones, el flujo de calor puede cuantificarse por medio de la Ley de Conducción de Calor de Fourier, la cual se expresa matemáticamente a continuación:

$$q = -k A \frac{\Delta T}{\Delta x}$$

Donde:

q = Flujo de calor medido en Watts

k = Coeficiente de conductividad térmica del material. Es una propiedad del material

A = Area perpendicular al flujo de calor.

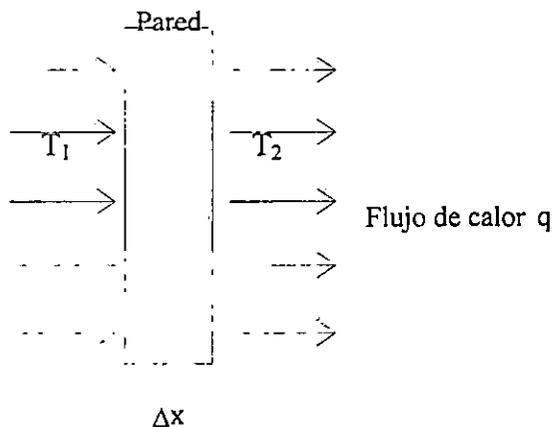
ΔT = Diferencia de temperatura entre los puntos donde se da el flujo de calor.

Δx = distancia entre los puntos donde se da el flujo de calor.

Esta ecuación puede utilizarse para cuantificar la transferencia de calor a través de una pared plana. La variable **k** definida como el **Coefficiente de Conductividad Térmica**, es una medida de la capacidad del material para dejar pasar el calor a través de él. Entre mayor sea el valor de k, para una misma diferencia de temperatura ΔT , mayor será la cantidad de calor que puede atravesar el cuerpo. Entre menor sea el valor de k, más difícil será para el calor atravesar el cuerpo para el mismo valor de ΔT . Esto significa que los materiales aislantes térmicos tienen valores de k pequeños, mientras que los conductores térmicos tienen valores de k grandes. El coeficiente de conductividad térmica tiene unidades de $\frac{\text{Watts}}{\text{m} \cdot ^\circ\text{C}}$, y físicamente significa la cantidad de Watts que pueden atravesar una pared que tenga un metro cuadrado de área, un metro de espesor y cuyas superficies tengan una diferencia de temperatura de 1°C .

Es práctica común en la industria de la refrigeración y aire acondicionado que para la clasificación del rendimiento de los aislantes térmicos, se utilice el término llamado Resistencia Térmica (R). La resistencia térmica se define a partir de la siguiente ecuación: $q = \frac{1}{R} A \Delta T$,

por lo tanto, $R = \frac{A \Delta T}{q}$. La resistencia térmica tiene unidades de $\frac{\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}}{\text{W}}$. Un buen aislante térmico tiene una resistencia térmica elevada. Esquemáticamente, el fenómeno de la conducción de calor unidimensional y sus variables se muestra a continuación:

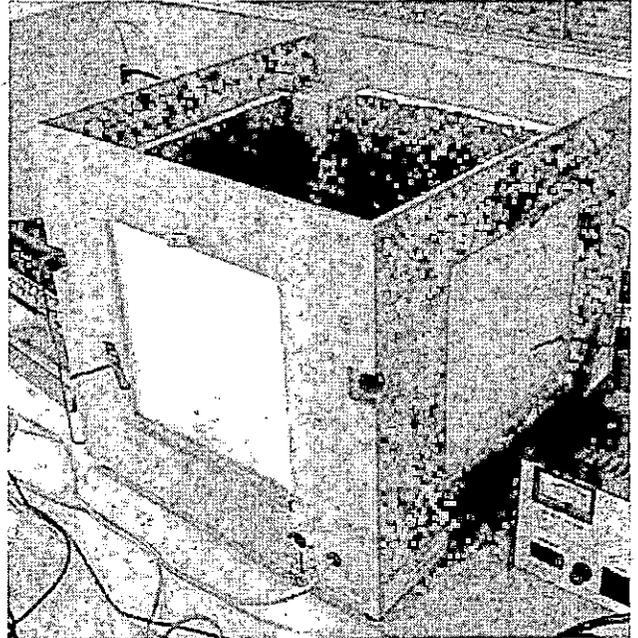


3.0 Procedimiento experimental

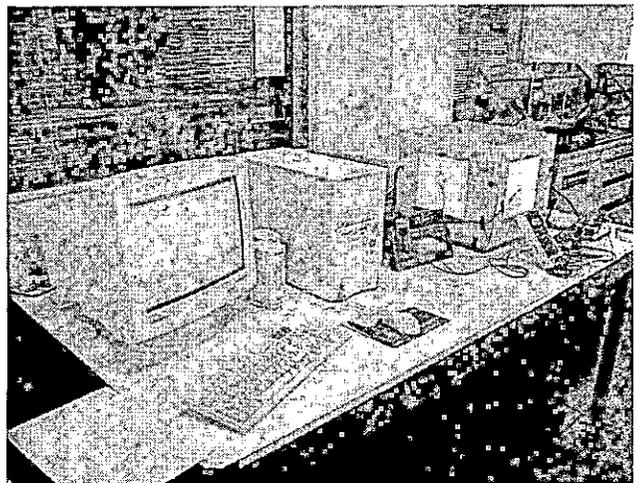
El procedimiento para determinar la conductividad térmica y la resistencia térmica se hace con la ayuda de la caja térmica, la cual tiene forma de cubo con cuatro ventanas en sus caras laterales, en las cuales se ubican las muestras de material a caracterizar. La caja térmica contiene en su interior, una fuente de calor, la cual se puede controlar para mantener una temperatura constante en su interior o para mantener una potencia constante.

Para este caso la fuente de calor se ajusta para mantener una potencia constante (flujo de calor constante).

Se prepara el equipo cargando cuatro muestras del material, de 25 cm x 25 cm, en las ventanas de la caja, se colocan ocho termocuplas (cuatro para las caras interiores y cuatro para las caras exteriores) para medir las temperaturas de las caras. Se programa el sistema de adquisición de datos para tener lecturas de temperatura, voltaje y corriente cada dos minutos. Se cierra la caja térmica y se enciende la fuente de calor. Se espera que el sistema estabilice y se comienza a recolectar datos



Caja térmica



Caja térmica y equipo de medición

4.0 Datos

Los datos promedio obtenidos en las mediciones son:

Diferencia de temperatura	ΔT	28.54 °C	
Área total de las muestras	A	0.25 m ²	
Corriente eléctrica	I	0.26 A	
Diferencia de potencial	V	236.02 V	
Espesor de las muestras	L	0.021875 m	

5.0 Resultados

En base a estas mediciones obtenemos:

		SI	Ingles
Flujo de calor, Q	= V*I	62.065 W	
Coefficiente de conductividad, k	= (Q*L)/(A*ΔT)	0.19 W/m °C	0.11 BTU/(pie °F h)
Resistencia térmica, R	= A*ΔT/Q	0.115 m ² °C/W	0.653 pie ² h °F/BTU

6.0 Observaciones

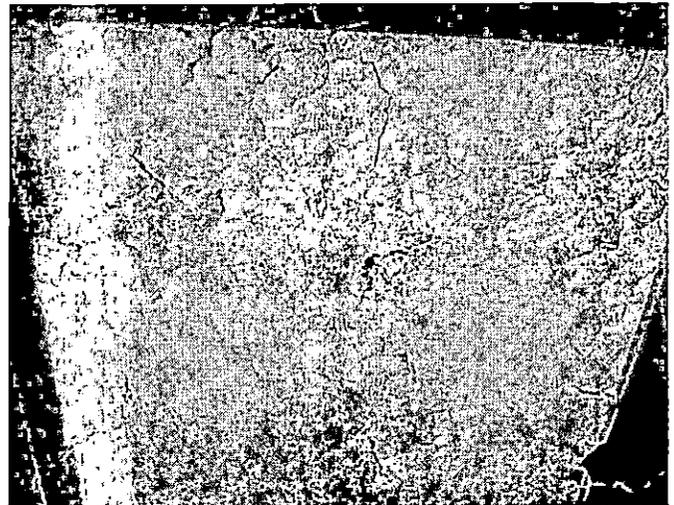
Las muestras proporcionadas son placas de dos materiales, uno de ellos para dar soporte mecánico. Esto hace que la medición obtenida no sea de la propiedad del material sino propiedad de la muestra proporcionada.



Se observan los dos materiales que forman la placa.

El valor obtenido, es válido para la temperatura promedio de la prueba, en este caso 150 °C.

Las muestras inicialmente estaban húmedas, durante la etapa de calentamiento estas se secaron y sufrieron un proceso de descascaramiento, algunas en mayor grado que otras.



Se observa el descascaramiento de la placa después de secarse en el proceso de calentamiento

ANEXO 6

**Resultados del Análisis de Probabilidad
de Incrustación de Calcita
por Medio del Software Watch 3.**

RESULTADOS DEL ANÁLISIS DE PROBABILIDAD DE INCRUSTACIÓN DE CALCITA POR MEDIO DEL SOFTWARE WATCH 3 (3 g/L).

Al observar los resultados del análisis Químico del sobrenadante obtenido en la dosificación de 3 g/L de Hidróxido de Calcio, se planteó la necesidad de investigar si el incremento observado en la concentración de Calcio, podría originar incrustación de Calcita al interior del pozo reinyector TR-11A por lo que se optó por utilizar el software WATCH 3, para la estimación de índices de incrustación, desarrollado por Stefan Arnorsson y Sven Sigurdsson, Instituto de ciencia, universidad de Islandia y Hördur Svavarsson, investigador independiente.

Los resultados se presentan en la Tabla 1 y la Figura 1.

Tabla 1. Resultados obtenidos del análisis con el Software WATCH 3 dosificación 3 g/L.

Temperatura	Calcita	Sílice amorfa
100	2.499	-2.474
95	2.479	-2.474
90	2.458	-2.473
85	2.439	-2.473
80	2.421	-2.473
75	2.404	-2.475
70	2.389	-2.477
65	2.376	-2.479
60	2.363	-2.485
50	2.343	-2.501
40	2.331	-2.528

**IS de calcita y sílice amorfa del agua residual, luego de la floculación con cal
Pozo TR-11A(3 g/l)**

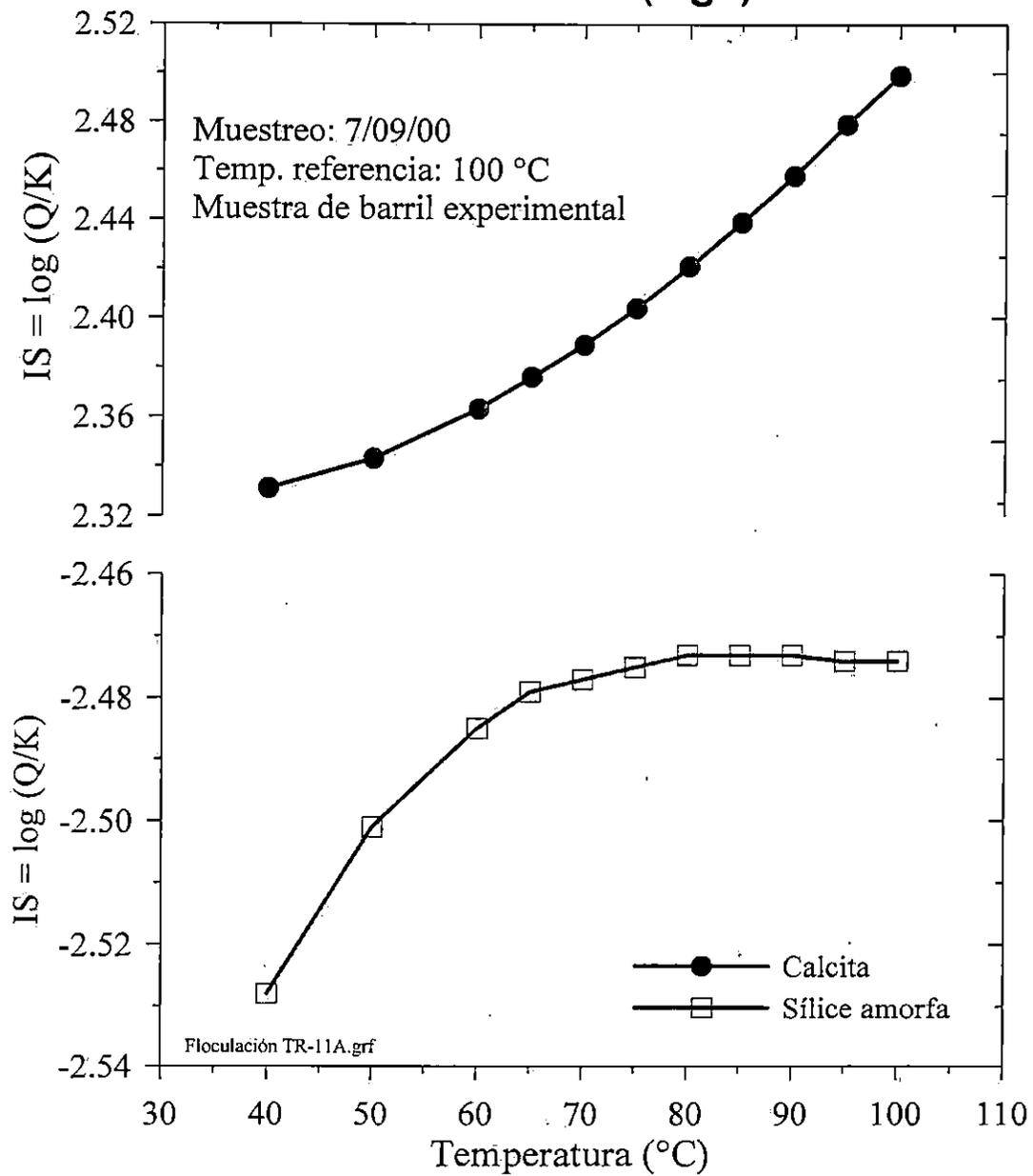


Figura 1. Resultados generados del análisis de incrustación de Calcita utilizando el Software WATCH 3.

RESULTADOS GENERADOS DEL ANÁLISIS DE INCRUSTACIÓN DE CALCITA UTILIZANDO EL SOFTWARE WATCH 3 (1,5 g/L).

Del análisis de estos resultados se pudo concluir que existe la posibilidad de que se gener una incrustación de Calcita al dosificar 3 g/L de Hidróxido de Calcio, aunque esta incrustación se esperaba que fuese mínima. Por lo que se decidió extrapolar los datos obtenidos en la experimentación para determinar la dosificación que genere una concentración de Sílice remanente de alrededor de 200 ppm, determinándose la concentración de 1,5 g/L, por lo que se volvió a analizar por medio del Watch las predicciones calculadas, los resultados de este análisis se presentan en la Tabla 2 y Figura 2.

Tabla 2. Resultados obtenidos del análisis con el Software WATCH 3 dosificación 1,5 g/L.

Temperatura	Calcita	Sílice amorfa
100	2.443	-1.409
95	2.420	-1.410
90	2.397	-1.410
85	2.376	-1.411
80	2.355	-1.412
75	2.334	-1.414
70	2.316	-1.416
65	2.299	-1.418
60	2.282	-1.421
50	2.253	-1.431
40	2.231	-1.445

**IS de calcita y sílice amorfa del agua residual, luego de la floculación con cal
Pozo TR-11A (Cal 1.5 g/l)**

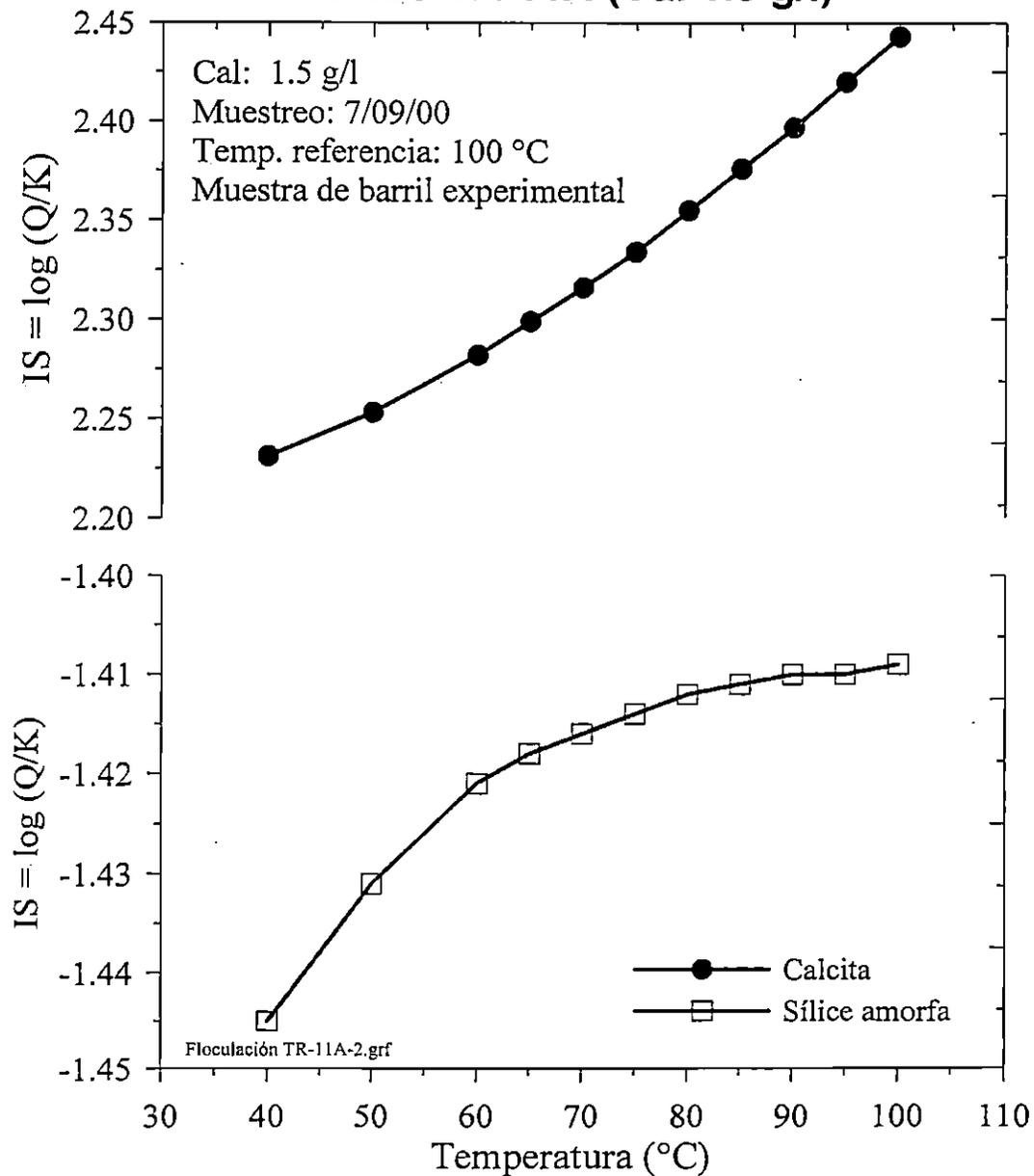


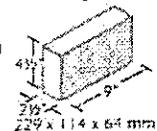
Figura 2. Resultados generados del análisis de incrustación de Calcita utilizando el Software WATCH 3.

ANEXO 7

**Normas de dimensiones de
Ladrillos refractarios.**

teja y jamba rectangular

Rectangular



Teja No. 1



cuña



Canto No. 1



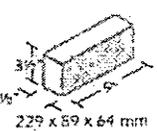
Circulo No. 1



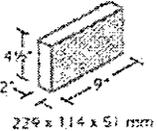
Punta No. 1



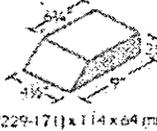
Mediano



No. 2



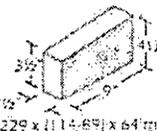
punta



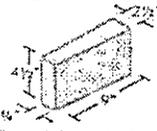
No. 2



No. 2



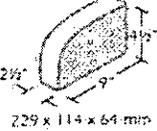
No. 1-X



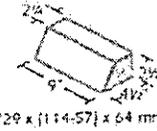
Chico



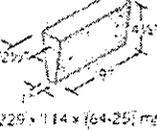
Jamba



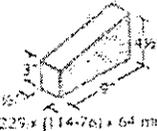
canto



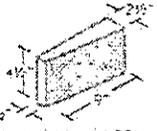
No. 3



No. 3



No. 2



serie de 3"		
forma	Milímetros	Pulgadas
Rectangular	229 x 114 x 76	9 x 4 1/2 x 3
Rectangular Mediano	229 x 89 x 76	9 x 3 1/2 x 3
Rectangular Chico	229 x 76 x 57	9 x 3 x 2 1/4
Teja	229 x 114 x 38	9 x 4 1/2 x 1 1/2
Dovela Circulo No. 1	229 x (114-101) x 76	9 x (4 1/2-4) x 3
Dovela Circulo No. 2	229 x (114-89) x 76	9 x (4 1/2-3 1/2) x 3
Dovela Circulo No. 3	229 x (114-76) x 76	9 x (4 1/2-3) x 3
Dovela Circulo No. 4	229 x (114-57) x 76	9 x (4 1/2-2 1/4) x 3
Dovela Canto No. 1	229 x 114 x (76-70)	9 x 4 1/2 x (3-2 3/4)
Dovela Canto No. 2	229 x 114 x (76-64)	9 x 4 1/2 x (3-2 1/2)
Dovela Canto No. 3	229 x 114 x (76-51)	9 x 4 1/2 x (3-1)
Dovela Canto No. 4	229 x 114 x (76-25)	9 x 4 1/2 x (3-2 1/4)
Dovela Punta No. 1	229 x 114 x (76-70)	9 x 4 1/2 x (3-2 3/4)
Dovela Punta No. 1-X	229 x 114 x (76-73)	9 x 4 1/2 x (3-2 3/4)
Dovela Punta No. 2	229 x 114 x (76-64)	9 x 4 1/2 x (3-2 1/2)
Dovela Punta No. 3	229 x 114 x (76-51)	9 x 4 1/2 x (3-2)
Salmer Cuña	229 x (114-38) x 76	9 x (4 1/2-1 1/2) x 3
Jamba	229 x 114 x 76	9 x 4 1/2 x 3
Salmer Punta	(229-160) x 114 x 76	(9-5 1/4) x 4 1/2 x 3
Salmer Canto	229 x (114-46) x 3	9 x (4 1/2-1 1/4) x 3

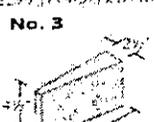
No. 4



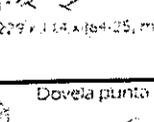
No. 4



No. 3



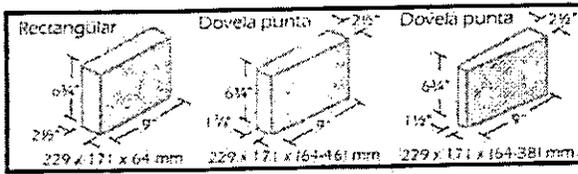
No. 4



Combinando estas piezas se pueden construir: BOVEDAS ARCOS ANILLOS y un sinnúmero de variantes.

Para las instalaciones que requieren formas de diseño particular pueden fabricarse todo tipo de piezas especiales.

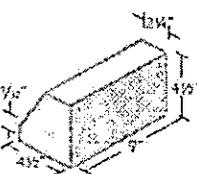
Es nuestro deseo que este catálogo sea una guía para la elección de los productos que requiere la industria. Ponemos a sus órdenes los servicios de nuestro Departamento Técnico para recomendaciones específicas.



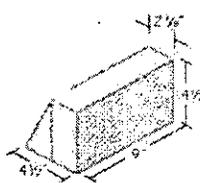
Las piezas de las series 229 x 171 x 64 mm, (9 x 6 1/2 x 2 1/4), 229 x 171 x 76 mm, (9 x 6 1/2 x 3) Se usan para romper juntas y obtener mejores construcciones refractarias.

Salmeres formados con piezas de la serie de 229 x 114 x 64 mm. (9 x 4 1/2 x 2 1/2")

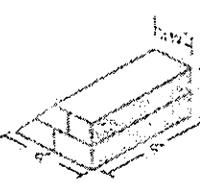
Salmeres Especiales



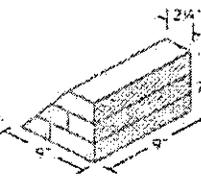
4160-A



4160-C



4160-B



4160-D