

7-VES
1506
E82r
1995
Ej.3

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



"RECONOCIMIENTO GEOQUIMICO
DEL AREA DE CONCHAGUA,
DEPARTAMENTO DE LA UNION"

TRABAJO DE GRADUACION PRESENTADO POR:

Mario Enrique Estrada Muñoz

Luis Alonso Rodríguez Herrera

15100990
15100990

PARA OPTAR AL TITULO DE

INGENIERO QUIMICO

MAYO DE 1995



SAN SALVADOR

EL SALVADOR

CENTRO AMERICA

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

TRABAJO DE GRADUACION PREVIO A LA OPCION AL TITULO DE

INGENIERO QUIMICO

"RECONOCIMIENTO GEOQUIMICO DEL AREA DE
CONCHAGUA, DEPARTAMENTO DE LA UNION"

PRESENTADO POR:

Mario Enrique Estrada Muñoz
Luis Alonso Rodríguez Herrera

TRABAJO DE GRADUACION APROBADO POR:



COORDINADOR: LIC. VICTOR MANUEL SEGURA LEMUS

ASESOR: LIC. JOSE ALONSO MARTINEZ MALTEZ

SAN SALVADOR, MAYO DE 1995

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR



RECTOR : DR. FABIO CASTILLO FIGUEROA

SECRETARIO : LIC. JUSTO ROBERTO CAÑAS

FACULTAD DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA


DECANO : ING. JOAQUIN ALBERTO VANEGAS AGUILAR

SECRETARIO : ING. JOSE RIGOBERTO MURILLO CAMPOS

ESCUELA DE INGENIERIA QUIMICA

DIRECTORA




M. Sc. DELMY DEL CARMEN RICO PEÑA

AGRADECIMIENTOS

Se desea agradecer de la manera más sincera al Coordinador del presente estudio, Lic. Víctor Manuel Segura Lemus, y al Asesor del mismo, Lic. José Alonso Martínez Maltez, ya que de no ser por la gran experiencia aportada, en el dominio del análisis químico y del reconocimiento geoquímico respectivamente, no sería posible la terminación tan exitosa del mismo. Al Lic. José Alonso Martínez en especial se agradece la orientación brindada inclusive lejos de cualquier responsabilidad remunerada.

Además se extiende el agradecimiento a los asesores puntuales nombrados por GEOCEL para colaborar con el desarrollo del proyecto, Ing. Marvin Martínez, Lic. Guillermo Cacao e Ing. Elizabeth Mayén, ya que definitivamente sus conocimientos y dominio en el área de la geotermia, así como su buena disposición y voluntad hacia el proyecto, han sido imprescindibles a lo largo de todo el estudio.

Se agradece de manera muy particular al Ing. Fidel Serrano, por haber sido tan fino en su atención con los autores de este estudio en la facilitación de toda la logística de carácter técnico, que en definitiva sirvió de base para el sustento de todo el estudio.

Los autores del presente trabajo de graduación desean agradecer además a todo el personal técnico que labora en el laboratorio del Centro de Investigaciones Geotérmicas (CIG) de GEOCEL, ya que sin su esmero en el tratamiento analítico de las muestras colectadas el desarrollo del mismo no hubiese sido posible.

Se expresa un sincero agradecimiento a todas las personas involucradas en las actividades de GEOCEL, y que no han sido mencionadas anteriormente.

Además los autores hacen expresivo el agradecimiento a las siguientes personas, por su colaboración y apoyo brindado a lo largo de todo el proyecto, y que además colaboraron de diversas formas con el mismo:

Ing. Delmy del Carmen Rico Peña
Ing. Juan Rodolfo Ramirez Guzmán
Ing. Daniel Buenaventura Mejía
Ing. Eduardo Enrique García
Ing. Alicia Haydee Fuentes
Sr. Juan Rodolfo Mendoza
Lic. Patricia Castro Fuentes
Br. Marlon Rodolfo Castro Fuentes
Br. Noé Zenón Rodríguez
Br. René Gómez Pineda
Br. Carlos Ernesto Zelaya
Br. Mario Ernesto Nolasco Duarte
Br. Francisco Arturo Soto
Br. Oscar Enrique Ascencio
Br. Jesús Gonzálo Borja
Br. Samuel García Figueroa
Br. Angel Alberto Carranza
Srita. Sandra Recinos
Familia Estrada Muñoz
Familia Rodríguez Herrera

LOS AUTORES

DEDICATORIA

AL CREADOR: Por haberme permitido lograr este gran objetivo, por no abandonarme en los momentos más críticos de mi vida universitaria, por permitirme la capacidad de superar todos los obstáculos que se me presentaron y que no dudo se van a seguir presentando.

A MI QUERIDA MADRE: Ana Lidia, por haber sido siempre mi inspiración, por quererme como una gran madre y por alimentar mi espíritu con su cariño y sacrificio tan grande; por ser mi único gran apoyo y por que siempre me ha transmitido seguridad.

A MI PADRE: Mario Enrique, por saberme educar y guiar desde pequeño, por que a pesar de tantos problemas nunca me dejó de expresar lo mucho que espera de mí. Por todo lo grande que nos une, he aquí una muestra.

A TODOS Y CADA UNO DE MIS HERMANOS: Martha Evelyn, María de los Angeles, Ana Patricia, Hugo Ernesto y Grisel Esmeralda, por que aunque somos tan diferentes somos tan unidos, por que siempre me han brindado su comprensión y apoyo, expresándome lo importante que soy para todos y eso es un motivo que me impulsa a superar lo logrado.

A MIS SOBRINITAS: Claudia Lorena y Grisel Alejandra, por iluminar de alegría la oscuridad de mis problemas, por sus travesuras, por su respeto.

A MIS TIOS: Lupita y Pedro Miguel, por su enorme y sincero apoyo, por brindarme auxilio incondicional cuando lo he necesitado.

A MIS PRIMOS: Luis Carlos y Nelson Mauricio, por ser mis modelos como personas y como profesionales.

A MI DEMAS FAMILIA.

A MI COMPANERO: Luis Alonso, por haberme soportado tanto durante toda la carrera, por haberme demostrado paciencia, por su apoyo y confianza, por transmitirme sus ideas y valores, por su amistad.

A MIS COMPANERAS Y AMIGAS: Ana Melida, Karla Lisette, Carmen Alicia y Lucy, por su apoyo, confianza, amistad y por brindarme seguridad en mis momentos de mayor debilidad.

A MIS AMIGOS: Dustin Crespín, Guillermo Osorio y Mirna Lorena Alias por confiar en mi capacidad, por su compañía y amistad.

A TODOS LOS MIEMBROS

DE LA ESCUELA DE INGENIERIA QUIMICA: Docentes y Estudiantes, por su confianza permanente.

MARIO ENRIQUE ESTRADA.

DEDICATORIA

A NUESTRO SEÑOR, DIOS TODOPODEROSO: Por darme siempre la paciencia, voluntad, protección y las fuerzas necesarias para lograr culminar de una manera exitosa mi carrera profesional.

A MIS QUERIDOS PADRES: Carlos Rodríguez Cea y Ana Clelia Herrera de Rodríguez, por la confianza que siempre tuvieron en mí, el amor y el apoyo que me han dado durante la carrera, y no sólo en mi carrera sino en toda mi vida, además porque siempre han estado junto a mí y no me han dejado sólo ante nada, ésto es la muestra de cuanto los quiero.

A MIS QUERIDOS HERMANOS: Carlos Alberto, Jorge Ernesto, Ana Esperanza y Ramón Antonio, por el amor y apoyo que siempre me han dado desde que era pequeño, el aliento que siempre me brindaron para seguir adelante y porque son el mejor ejemplo a imitar siempre por el más pequeño de los cinco hermanos.

EN GENERAL A TODA MI FAMILIA: Que siempre estuvo pendiente y confió en mí.

A MI COMPANERO DE TESIS: Porque ha sido siempre como un hermano y me ha enseñado tanto.

A LA FAMILIA ESTRADA MUÑOZ: Madre y hermanos de Mario Enrique, que nos brindaron sincero apoyo y me acogieron como parte de ellos.

A MI HERMOSA Y QUERIDA NOVIA: Por ser aquella persona que me brinda comprensión y apoyo en todo momento.

A UN GRAN AMIGO: Oscar Armando Quintanilla, por darme ánimos y brindarme su amistad.

A MIS COMPANEROS Y AMIGOS: De la Escuela de Ingeniería Química, por haber confiado en mi y por darme apoyo en todo momento.

EN GENERAL A TODOS LOS MIEMBROS DE LA ESCUELA DE INGENIERIA QUIMICA.

LUIS ALONSO RODRIGUEZ HERRERA.

RESUMEN

La energía geotérmica o energía interna de La Tierra, es y será una alternativa para que el hombre logre remediar la escasez energética que día a día vive.

Para el aprovechamiento de dicha energía se han llevado a cabo investigaciones a nivel mundial, en áreas donde la anomalía geotérmica se presenta superficialmente generando fuga de fluidos calientes o demostrando de otra forma la manifestación de la energía terrestre.

Es necesario mencionar que El Salvador a través de los años, ha desarrollado proyectos geotérmicos para poder aprovechar la energía terrestre explotable económicamente, obteniéndose éxito de la producción de energía eléctrica, aún cuando este tipo de energía puede tener otros usos como la balneología, en la industria, recuperación de químicos, etc. Los proyectos más importante en el país son Ahuachapán y Berlín en los cuales se ha logrado producir electricidad, aunque existen otros sitios en estudio.

Como parte de la investigación de las áreas geotérmicas que no han sido estudiadas por la institución encargada de realizar dichas investigaciones en El Salvador, que es la Comisión Ejecutiva Hidroeléctrica del Río Lempa (CEL), mediante la Gerencia División de Recursos Geotérmicos (GEOCEL), se llevó el presente Trabajo de Graduación denominado "RECONOCIMIENTO GEOQUIMICO DEL AREA DE CONCHAGUA, DEPARTAMENTO DE LA UNION", en busca de fuentes alternativas de energía en nuestra región.

La primera fase de un proyecto geotérmico es el Reconocimiento y una de las disciplinas geocientíficas involucradas dentro de este

estudio es la Geoquímica, que aporta información fundamental acerca del recurso, principalmente la temperatura profunda. De ahí que las etapas en que se llevó a cabo el Reconocimiento Geoquímico del Área de Conchagua fueron las siguientes: Trabajo de Campo, Análisis Químico, Procesamiento e Interpretación de los Resultados y por supuesto se incluyen algunas Conclusiones y Recomendaciones.

En lo concerniente al trabajo de campo, se llevó a cabo un inventario de fuentes (frías y termales), pozos domésticos y fumarolas en el área de estudio, obteniéndose principalmente que las manifestaciones de la anomalía geotérmica se encuentran a la orilla de la costa, específicamente en Punta La Virgen, Punta Chiquirín, Playitas y El Cágano. En estos lugares antes mencionados y otros identificados durante el inventario se llevó a cabo el muestreo de las fuentes mencionadas.

Los análisis químicos de las muestras colectadas se llevaron a cabo en los laboratorios de GEOCEL, específicamente en el Centro de Investigaciones Geotérmicas (CIG). Las especies químicas que se determinaron en las muestras de aguas fueron Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Cl^- , HCO_3^- , SO_4^{2-} , SiO_2 , B, etc. En gases se realizó la determinación de CO_2 , CH_4 , H_2S , NH_3 , N_2 , H_2 , etc; aunque es necesario mencionar que el resultado del análisis de gases no fué de mucha utilidad por problemas de contaminación en las muestras por aire atmosférico en el momento del muestreo de los mismos.

Después del análisis químico, se procesó e interpretó los resultados del mismo; inicialmente se hizo una clasificación de las muestras de aguas mediante los métodos de Piper, D'amore-Scandiffio-Panichi y el contenido relativo de Cl^- , HCO_3^- y SO_4^{2-} , obteniéndose como puntos más representativos los pozos domésticos P3, P4 y P7, y las fuentes termales FT5, FT6 y FT9 ya que pertenecen al tipo de aguas Sódico-Cloruradas, que son características de las aguas geotérmicas. Con la selección de las fuentes antes mencionadas se determinaron las características cuantitativas del campo de Conchagua

donde de acuerdo a los métodos usados (Modelos de Mezcla de Sílice y Cl, Diagrama Na-K-Mg y Geotermómetro Na-K-Ca) se estimó una temperatura entre 160 y 200 °C para el reservorio del campo geotérmico del área de Conchagua.

Habiéndose hecho una estimación de la temperatura se encontró mediante las relaciones entre los componentes o especies químicas en solución en las muestras colectadas que la zona de ascenso de los fluidos en forma más directa desde el reservorio hasta la superficie es la de Punta Chiquirín, las demás zonas se pueden considerar que se encuentran sobre los márgenes del reservorio. las relaciones utilizadas fueron Na/K, Na/Ca, Cl/SO₄, Cl/Mg, Na/Mg y con los datos obtenidos del análisis químico de los gases se empleó la relación CO₂/H₂S.

Con todo lo anterior se planteó el esquema geotérmico preliminar para el área de Conchagua, estableciéndose que las posibles zonas de recarga hídrica para éste se dan por las aguas del Golfo de Fonseca y agua meteórica que se infiltra por el costado Oriental del volcán de Conchagua y desde la Isla Zacatillo ubicada en el mismo Golfo de Fonseca.

Habiéndose cubierto los objetivos del trabajo, se hicieron las recomendaciones necesarias para la conclusión del estudio de reconocimiento y para comenzar la siguiente fase del proyecto geotérmico (Prefactibilidad).

I N D I C E G E N E R A L

CONTENIDO	PAGINA
INTRODUCCION.....	xxiv
1.0 Energía Geotérmica.....	1
1.1 La Energía Geotérmica.....	3
1.1.1 Areas y Campos Termales.....	5
1.2 Estructura de los Campos Geotérmicos Hidrotermales.....	7
1.3 Usos Alternativos de la Energía Geotérmica.....	9
1.3.1 La Balneología.....	11
1.3.2 Servicio Doméstico.....	11
1.3.3 Calefacción Doméstica.....	12
1.3.4 Cultivos Agrícolas y Cría de Animales.....	12
1.3.5 La Industria.....	12
2.0 Geodinámica de la Tierra.....	15
2.1 La Tectónica de Placas.....	15
3.1.1 Los Límites entre las Placas.....	18
2.2 Situación Geológica Actual de América Central.....	20
2.3 Dinámica y Estructura Geológica del Golfo de Fonseca.....	22
3.0 El Desarrollo de la Energía Geotérmica en El Salvador.....	26
3.1 El Desarrollo de Ahuachapán.....	26
3.2 El Desarrollo de Berlín.....	27
3.3 El Desarrollo de San Vicente.....	28
3.4 Otras Areas en Desarrollo.....	28

CONTENIDO	PAGINA
4.0 El Proyecto Geotérmico.....	31
4.1 Desarrollo del proyecto Geotérmico.....	31
4.1.1 Exploración.....	31
4.1.1.1 Etapa de Reconocimiento.....	31
4.1.1.2 Etapa de Prefactibilidad.....	33
4.1.1.3 Etapa de Factibilidad.....	34
4.1.2 Explotación.....	35
4.1.2.1 Etapa de Desarrollo.....	35
4.1.2.2 Etapa de Explotación.....	36
5.0 Reconocimiento Geoquímico.....	38
6.0 Inventario Realizado Durante el Reconocimiento	
Geoquímico del Area de Conchagua.....	43
6.1 Metodología Empleada para	
Realizar el Inventario.....	43
7.0 Muestreo de Manantiales y Fumarolas	
Localizadas en el Area de Conchagua.....	46
7.1 Muestreo de Agua en	
Manantiales Fríos y Termales.....	47
7.1.1 Metodología de Muestreo de	
Manantiales en el Campo.....	47
7.2 Muestreo de Gases en Fumarolas.....	51
7.2.1 Actividades Previas al	
Muestreo de Fumarolas.....	52
7.2.2 Metodología del Muestreo	
de Fumarolas en el Campo.....	55
8.0 Análisis Químico de las Muestras	
Colectadas en el Area de Conchagua.....	62
8.1 Análisis Químico de Fluidos de Fuentes, Pozos	
Domésticos y Fumarolas.....	62

CONTENIDO	PAGINA
8.1.1 Espectrofotometría de Absorción Atómica.....	63
8.1.1.1 Instrumentación de Absorción Atómica.....	63
8.1.2 Elementos Analizados.....	64
8.1.2.1 Análisis de Sodio.....	65
8.1.2.2 Análisis de Potasio.....	66
8.1.2.3 Análisis de Calcio.....	67
8.1.2.4 Análisis de Magnesio.....	68
8.1.2.5 Análisis de Silicio.....	68
8.2 Cromatografía.....	69
8.2.1 Cromatografía Iónica.....	69
8.2.1.1 Teoría de Columna.....	71
8.2.1.2 Instrumentación del Cromatógrafo de Iones.....	71
8.2.1.3 Reactivos.....	72
8.2.1.4 Procedimiento de Análisis.....	73
8.2.1.5 Cálculos.....	74
8.2.2 Cromatografía de Gases.....	75
8.2.2.1 Principio de la Cromatografía de Gases.....	75
8.2.2.2 Metodología de Aplicación de la Técnica.....	76
8.2.2.3 Análisis de Estándar y Muestra.....	76
8.3 Potenciometría.....	78
8.3.1 Determinación de Alcalinidad.....	78
8.3.1.1 Principio del Método.....	78
8.3.1.2 Reactivos.....	79
8.3.1.3 Electrodo Utilizados.....	79
8.3.1.4 Procedimiento de Análisis.....	79
8.3.1.5 Cálculos.....	80
8.3.2 Análisis de Cloruros.....	81
8.3.2.1 Principio del Método.....	81

CONTENIDO	PAGINA	
8.3.2.2	Reactivos.....	81
8.3.2.3	Electrodos Utilizados.....	82
8.3.2.4	Procedimiento de Análisis.....	82
8.3.2.5	Cálculos.....	83
8.3.3	Medición de pH.....	83
8.3.3.1	Principio del Método.....	83
8.3.3.2	Procedimiento de Medición.....	84
8.3.4	Determinación de Acido Sulfhídrico.....	84
8.3.4.1	Principio del Método.....	85
8.3.4.2	Reactivos.....	85
8.3.4.3	Procedimiento de Análisis.....	86
8.3.4.4	Cálculos.....	87
8.3.5	Determinación de Dióxido de Carbono.....	87
8.3.5.1	Principio del Método.....	87
8.3.5.2	Reactivos.....	88
8.3.5.3	Procedimiento de Análisis.....	88
8.3.5.4	Cálculo.....	89
8.3.6	Determinación de Amoníaco, en Vapor	
	Condensado.....	89
8.3.6.1	Principio del Método.....	89
8.3.6.2	Reactivos.....	90
8.3.6.3	Procedimiento de Análisis.....	90
8.3.6.4	Cálculos.....	91
8.4	Espectrofotometría Visible.....	92
8.4.1	Análisis de Boro, Método del Carmin.....	93
8.4.1.1	Principio del Método.....	93
8.4.1.2	Material y Equipo.....	93
8.4.1.3	Reactivos.....	93
8.4.1.4	Procedimiento de Análisis.....	94
8.4.2	Análisis de Boro, Método de la Curcumina....	94
8.4.2.1	Principio del Método.....	95
8.4.2.2	Material y Equipo.....	95

CONTENIDO

PAGINA

8.4.2.3	Reactivos.....	95
8.4.2.4	Procedimiento de Análisis.....	96
8.4.3	Determinación de Sulfatos.....	96
8.4.3.1	Principio del Método.....	96
8.4.3.2	Material y Equipo.....	97
8.4.3.3	Reactivos.....	97
8.4.3.4	Procedimiento de Análisis.....	97
9.0	Resultados del Análisis Químico.....	99
10.0	Técnicas para la Interpretación del Análisis de Aguas y Gases en la Exploración Geotérmica.....	102
10.1	Técnicas de la Interpretación de los Constitu- yentes de la Fase Líquida (Muestras de Agua).....	103
10.1.1	Diagrama de Piper.....	103
10.1.2	Diagrama de D'amore, Scandiffio y Panichi.....	112
10.1.3	Contenido Relativo de Cl^- , SO_4^{2-} y HCO_3^- ...	120
10.1.4	Métodos Gráficos para la Estimación de la Temperatura Profunda.....	125
10.1.4.1	El Diagrama Na-K-Mg.....	125
10.1.4.2	Modelo de Mezcla Sílice-Entalpía.....	130
10.1.4.2.1	Diagrama Sílice-Entalpía.....	132
10.1.4.3	El Modelo de Mezcla Cloruro-Entalpía.....	136
10.1.4.4	Otro Modelo de Mezcla: La Relación Cl-t.....	140
10.1.5	Geotermometría.....	143
10.1.5.1	El Geotermómetro Na-K-Ca.....	143
10.1.5.2	El Geotermómetro Na-K-Ca-Mg.....	145

CONTENIDO	PAGINA
10.1.6 Las Relaciones entre los Componentes.....	148
10.2 Técnicas de Interpretación de los Componentes de la Fase Gaseosa.....	154
11.0 Conclusiones y Recomendaciones.....	157
11.1 Conclusiones obtenidas acerca de las condiciones Hidrogeoquímicas que presenta el Campo de Conchagua.....	157
11.2 Recomendaciones para la Posible Etapa de Prefactibilidad.....	161
12.0 Referencias Bibliográficas.....	164
13.0 Referencias Personales.....	167
Apéndice 1	
CALCULO DE LAS CONCENTRACIONES DE LOS GASES A PARTIR DE LOS RESULTADOS DE LA CROMATOGRAFIA DE GASES.....	170
Apéndice 2	
GLOSARIO DE TERMINOS GEOTERMICOS.....	175
Apéndice 3	
EJEMPLOS DE CALCULO PARA ALGUNAS DE LAS ECUACIONES UTILIZADAS.....	178

I N D I C E D E F I G U R A S

FIGURA	PAGINA
1.1 Capas Concéntricas de La Tierra.....	2
1.2 Zonas Principales de Terremotos en el Mundo.....	3
1.3 Modelo Estructural de un Campo Geotérmico.....	10
2.1 Principales Placas Litosféricas.....	17
2.2 Movimiento de las Placas de la Corteza Terrestre.....	19
2.3 Ubicación Geotectónica de El Salvador.....	23
3.1 Areas Geotérmicas estudiadas en El Salvador.....	30
7.1 Microtitulación Realizada para la Determinación de Alcalinidad, Durante el Muestreo de Manantiales.....	49
7.2 Procedimiento de Filtrado de Agua, Durante el Muestreo de Manantiales.....	50
7.3 Ampolla con Un Sólo ROTAFLO utilizada para la toma de Muestra Alcalina en Fumarolas.....	53
7.4 Ampolla con Doble ROTAFLO utilizada para la toma de Muestra Acida en Fumarolas.....	54
7.5 Procedimiento de Muestreo de Gases en Fumarolas.....	57
7.6 Procedimiento para la toma de la Muestra Acida desde Fumarolas.....	59
7.7 Ubicación de Puntos Muestreados en el Area de Conchagua.....	61
8.1 Cromatograma Generado Durante el Análisis de Especies Aniónicas.....	70

FIGURA	PAGINA
10.1 Diagrama Propuesto por Piper para la Clasificación Química de Muestras de Agua.....	104
10.2 Forma de Plotear las Muestras de Agua en el Diagrama de Piper.....	107
10.3 Diagrama de Piper para las Fuentes Frías Muestreadas en el Area de Conchagua.....	108
10.4 Diagrama de Piper para los Pozos Domésticos Muestreados en el Area de Conchagua.....	110
10.5 Diagrama de Piper para las Fuentes Termales Muestreadas en el Area de Conchagua.....	111
10.6 Clasificación de Aguas Según D'amore-Scandiffio-Panichi para las Fuentes Frías del Área de Conchagua.....	116
10.7 Clasificación de Aguas Según D'amore-Scandiffio-Panichi para los Pozos Domésticos del Area de Conchagua.....	117
10.8 Clasificación de Aguas Según D'amore-Scandiffio-Panichi para las Fuentes Termales del Area de Conchagua.....	118
10.9 Diagrama HCO_3^- - SO_4 -Cl propuesto por Giggenbach para la Clasificación de Muestras de Agua.....	123
10.10 Diagrama Na-K-Mg propuesto por Giggenbach para la Determinación de la Temperatura Profunda.....	129
10.11 Modelo de Mezcla Sílice-Entalpía para las Muestras colectadas en Conchagua.....	135
10.12 Modelo de Mezcla Cloruro-Entalpía para las Muestras Tomadas en Conchagua.....	138
10.13 Modelo de Mezcla Cloruro-Temperatura, Válido para el Sistema identificado en Conchagua.....	142
10.14 Relación Na/K para las muestras más importantes del Area de Conchagua.....	150

FIGURA	PAGINA
10.15 Relación Na/Ca para las muestras más importantes del Area de Conchagua.....	151
10.16 Relación Cl/SO ₄ para las muestras más importantes del Area de Conchagua.....	152
10.17 Relación Cl/Mg para las muestras más importantes del Area de Conchagua.....	153
10.18 Relación Na/Mg para las muestras más importantes del Area de Conchagua.....	154
10.19 Relación CO ₂ /H ₂ S para las muestras de gases colectadas en el Area de Conchagua.....	156
11.1 Modelo Preliminar del Campo de Conchagua.....	156

I N D I C E D E T A B L A S

TABLA	PAGINA
1.1	Requerimientos Aproximados de Temperatura de los Fluidos Geotérmicos para Aplicaciones Diferentes a la Generación Eléctrica..... 14
6.1	Información Obtenida sobre las Manifestaciones Reconocidas en el Area de Conchagua..... 44
8.1	Relación entre el Volumen Gastado en cada Etapa de Titulación, para cada Especie Alcalina presente en la Muestra..... 80
9.1	Quimismo de las Muestras Colectadas en el Area de Conchagua..... 100
9.2	Porcentajes de Gases Presentados en los Escapes de Vapor Muestreados en el Area de Conchagua... 101
10.1	Concentraciones de las Especies Químicas Utilizadas en el Diagrama de Pípper Expresadas en mEq/L..... 105
10.2a	Datos Ploteados en el Diagrama de Pípper para los Cationes..... 106
10.2b	Datos Ploteados en el Diagrama de Pípper para los Aniones..... 106
10.3	Valores para los Parámetros que Requiere la Clasificación de D'amore-Scandiffio-Panichi..... 115
10.4	Quimismo de las Muestras Seleccionadas basados en la Clasificación de Aguas..... 120

TABLA	PAGINA
10.5 Porcientos Relativos de $\text{HCO}_3\text{-SO}_4\text{-Cl}$ para las Muestras colectadas en el Area de Conchagua.....	121
10.6 Sumario de Resultados Obtenidos de la Clasificación de Aguas realizada a las Muestras Tomadas en el Area de Conchagua.....	124
10.7 Porcientos Relativos de Na-K-Mg para las Muestras Colectadas en el Area de Conchagua.....	128
10.8 Constantes para las Ecuaciones Usadas en el Modelo de Mezcla de Sílice.....	132
10.9 Datos para el Modelo de Mezcla Sílice-Entalpía.....	134
10.10 Datos para el Modelo de Mezcla Cloruro-Entalpía.....	137
10.11 Datos para el Modelo de Mezcla Cloruro-Temperatura.....	141
10.12 Resultados de la Aplicación del Geotermómetro NA-K-Ca, la última Columna Resulta de la Corrección por Magnesio.....	147
10.13 Relaciones entre Componentes como Geoindicadores.....	149
10.14 Relación $\text{CO}_2/\text{H}_2\text{S}$ para las Muestras de Gases Colectadas en el Area de Conchagua.....	155

INTRODUCCION

Las necesidades energéticas del hombre le han acompañado desde su aparición en el planeta y éste ha buscado obtenerla a partir de muchas fuentes; la obtención de calor a partir de la quema de la leña ha solventado muchas necesidades tales como la cocción de los alimentos, la calefacción en época invernal, etc. Con la revolución industrial y la aparición de la máquina de vapor se llegó a desarrollar, de manera acelerada, las necesidades energéticas industriales. Otra fuente energética de gran importancia es la quema de combustibles fósiles, ésta ha venido a permitir un mayor desarrollo de las actividades industriales desde diversos puntos de vista y actualmente su empleo es inevitable.

Dentro de las necesidades de energía no sólo se deben considerar las necesidades de energía mecánica o calorífica, ya que para el desarrollo normal de toda actividad humana es necesario contar con la energía eléctrica y afortunadamente sus fuentes de obtención son muy diversas; en El Salvador se cuenta con la capacidad de obtener electricidad por medio de tres vías particulares: La hidroeléctrica, la térmica y la geotérmica. Mayoritariamente las necesidades de dicha forma de energía se satisfacen gracias al recurso hidroeléctrico y al recurso térmico, aunque desafortunadamente las condiciones actuales indican una disminución gradual del potencial energético de éstas fuentes, esto se debe a que se están sobrepasando los límites técnicos para el primer caso (ya que disminuye año tras año el caudal del río Lempa) y económicos para el segundo caso (debido al encarecimiento de los combustibles fósiles). Lo más grave de la situación actual y futura es que la demanda de electricidad aumenta a pasos agigantados.

Desde que se implementó la generación de electricidad en nuestro país, se ha identificado, con dicha actividad, a la Comisión Eje-

cutiva Hidroeléctrica del Río Lempa (CEL) y con la crisis energética planteada se ha puesto cada vez un mayor interés al recurso geotérmico, con el único fin de obtener energía eléctrica. Actualmente CEL estudia los recursos geotérmicos del país por medio de su Gerencia División de Recursos Geotérmicos (GEOCEL).

El desarrollo geotérmico nacional es tal que se cuenta ya con dos campos geotérmicos productores (Ahuachapán y Berlín) y actualmente existen varias áreas en vías de desarrollo (Chinameca, Chipilapa, San Vicente, Coatepeque, etc.).

La explotación geotérmica se desarrolla sistemáticamente en cinco etapas, de esta manera se busca eliminar riesgos técnicos y económicos de la misma explotación. Dentro del desarrollo de cada etapa el Ingeniero Químico es protagonista importante, principalmente en las primeras etapas (reconocimiento y prefactibilidad), aunque en cada etapa se suelen involucrar otras disciplinas geocientíficas.

La Universidad de El Salvador y en particular la Escuela de Ingeniería Química de la Facultad de Ingeniería y Arquitectura, dentro del objetivo de formar Ingenieros Químicos que sean útiles al país acordó con CEL, y específicamente con GEOCEL, hechar a andar un proyecto que conlleve a enriquecer el desarrollo geotérmico del país; como producto de dicho convenio se presenta un documento que posee en forma bastante completa las actividades a desarrollar en un RECONOCIMIENTO GEOQUIMICO, y tal estudio se ha llevado a cabo en el AREA DE CONCHAGUA, departamento de La Unión. Con dicho proyecto se pretende establecer la existencia de un sistema hidrotermal factible de explotar, además de determinar preliminarmente la probable temperatura de los fluidos en el interior de la corteza.

Se ha incluido, además, en el presente informe una pequeña explicación acerca del origen y estructura del recurso geotérmico factible de ser explotado.

1.0. ENERGIA GEOTERMICA.

Prácticamente cuando el hombre apareció en la Tierra ya los fenómenos asociados a la manifestación del contenido energético del planeta eran catastróficos, y éste ha tenido que convivir con ellos a través de su historia. Actualmente no se puede estimar un valor concreto de dicha energía, pero con seguridad se puede afirmar que llega al grado de considerarse relativamente ilimitado; se supone un valor del orden de 3×10^{27} Kcal [9]. Es muy fácil mencionar que dicha cifra podría asegurar toda una era en disponibilidad energética, pero realmente, de este total energético lo técnicamente utilizable por el hombre sólo es la diez milésima parte.

Existen varias formas reconocidas de las manifestaciones de energía de la Tierra dependiendo de las condiciones geológicas, tectónicas e hidrológicas de la corteza terrestre, algunas de ellas son: campos geopresurizados, cámaras de magma, rocas calientes secas, campos hidrotermales, etc.

De acuerdo a estudios realizados [9], el planeta distribuye toda su energía a través de varias capas concéntricas-esféricas, desde su núcleo; dicha distribución varía debido a la densidad y composición de cada una de dichas capas. En la Figura 1.1 se propone que el núcleo de la Tierra es hierro solidificado por la alta presión litostática, con una densidad y espesor igual a 11.5 gr/cm^3 y 1350 Km respectivamente; rodeando a ésta se supone una capa de líquido con una densidad y espesor de 10.2 gr/cm^3 y 2100 Km respectivamente; luego tenemos, el manto con espesor de 2900 Km y una densidad variando desde 5.7 hasta 3.3 gr/cm^3 ; externamente se considera a la corteza, dividida en dos subcapas, la continental (densidad de 2.7 gr/cm^3 y espesor de 35 Km) y la oceánica (densidad de 3.0 gr/cm^3 y

espesor de 10 Km). Para cada una de dichas capas la temperatura varía desde 6000 °C aproximadamente en el núcleo interno, hasta unos 600 °C en el manto, siendo menor aún en la corteza [7,9].

A la zona que separa el manto de la corteza se le conoce como la discontinuidad de Mohorovicic (nombre que lleva por su descubridor yugoeslavo), o por brevedad, de "Moho" (ver Figura 2.2). En esta zona se produce un cambio súbito en la velocidad de las ondas de los terremotos, lo cual indica un cambio correspondiente en la composición y en el estado físico del material [9].

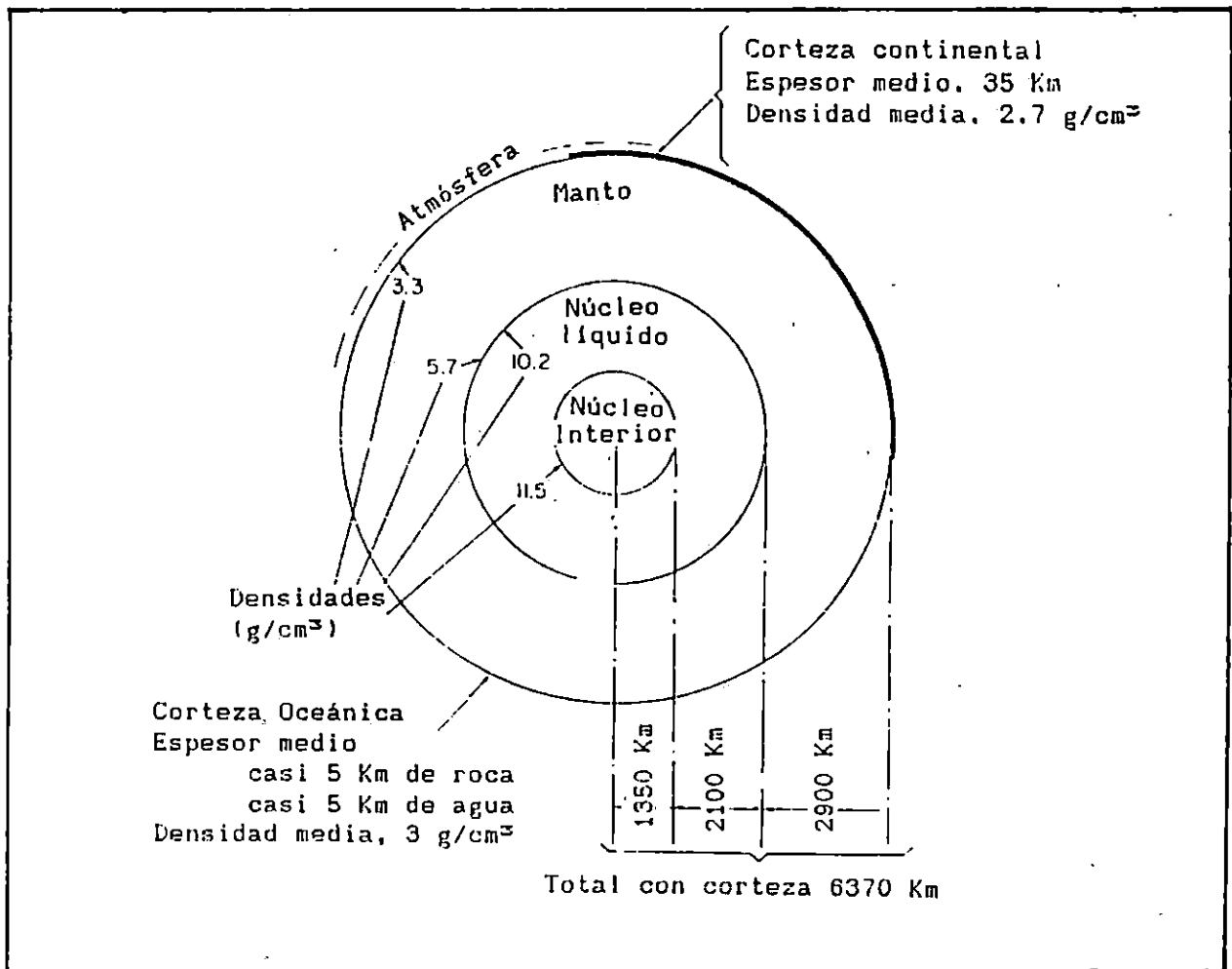


Figura 1.1 Capas Concéntricas de la Tierra [9].

1.1. La Energía Geotérmica.

La energía interna de La Tierra no se manifiesta en toda la superficie del planeta, como podría pensarse. Se han localizado sitios específicos superficiales que presentan una anomalía térmica, y a la ubicación de estos sitios se les denomina "Cinturón Sísmico". La localización de las manifestaciones térmicas, del calor interno de

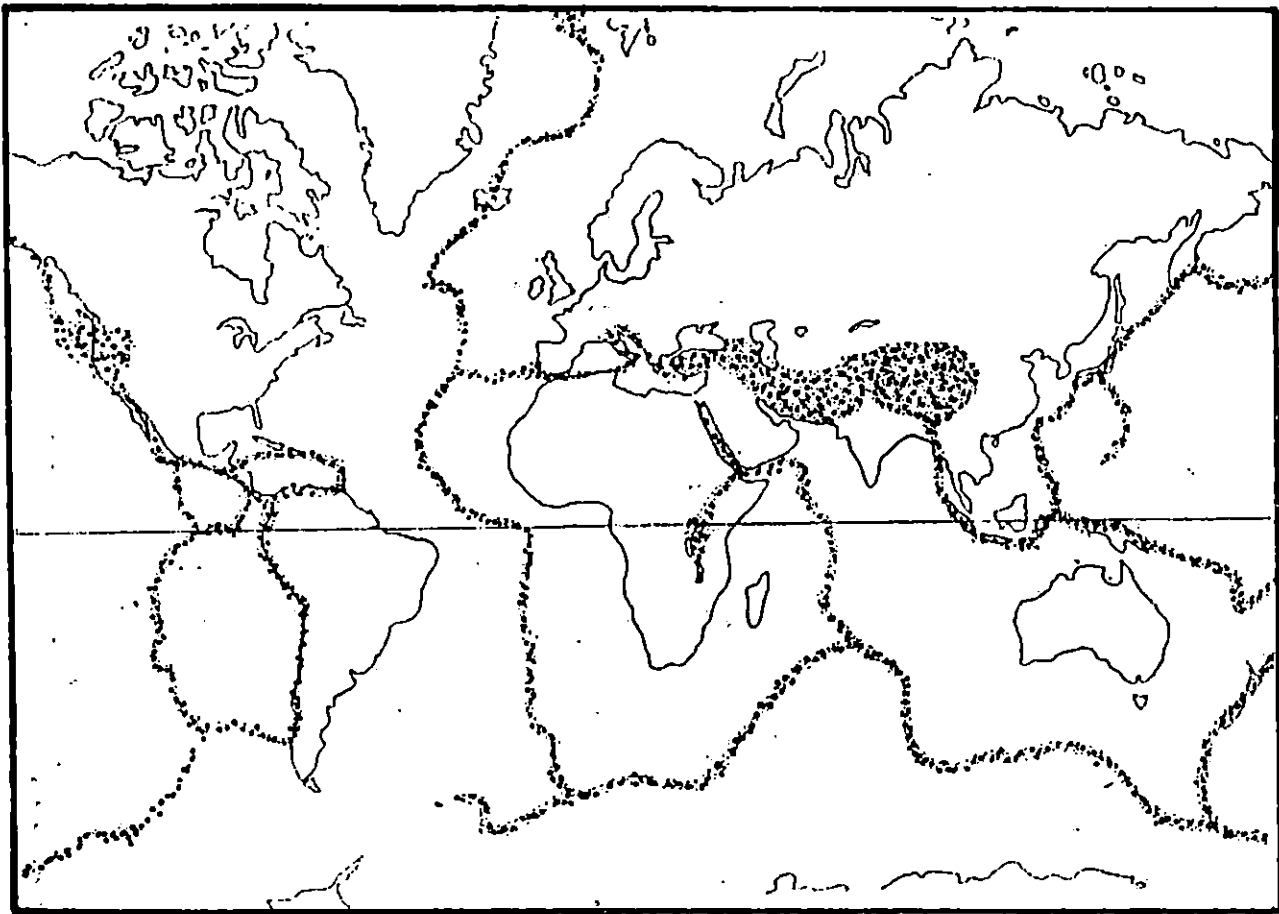


Figura 1.2. Zonas Principales de Terremotos en el Mundo (las zonas marcadas representan los sitios de mayor sismicidad) [9].

La Tierra, coincide con los más destructivos terremotos a nivel mundial (Figura 1.2): provocados por el movimiento de la corteza que plantea la Tectónica de Placas [9] (ver Capítulo 2.0).

Existen muchos factores que permiten que el flujo de calor desde el núcleo de La Tierra cambie de lugar a lugar, modificándose la fuerza guiadora para la formación de anomalías geotérmicas, algunos de ellos son [7,9]:

- a. Alta diferencia en el flujo de calor superficial regional.
- b. Alta diferencia en la concentración de elementos radioactivos en el suelo.
- c. Baja conductividad térmica del suelo.
- d. Intrusiones magmáticas jóvenes.
- e. Circulación hidrotermal.

Algunos de estos factores son influenciados a su vez por [9]:

- a. Corrientes convectivas de fluidos a altas temperaturas.
- b. Reacciones exotérmicas en la corteza.
- c. Fricción entre capas debido a fallamientos.
- d. Calor latente liberado por la cristalización del magma.
- e. Calor liberado por el decaimiento radioactivo en el interior de la Tierra.

La energía geotérmica se puede definir entonces como la energía almacenada en las rocas y en los fluidos que se encuentran en el interior de La Tierra, y su presencia es producto del calor interno de la misma [7].

Actualmente la recuperación de dicha energía depende del grado de posibilidad (carácter técnico) y permisibilidad existente (carácter económico) y solamente es explotable aquella forma en sistema hidrotermal, que es una manifestación relativamente rara, en la cual existen formaciones rocosas permeables que contienen fluidos calientes los cuales se extraen para aplicaciones beneficiosas al hombre. Muy probablemente en un futuro puedan aprovecharse otras formas de energía geotérmica, con altos contenidos de calor, mediante tecnologías en proceso de perfeccionamiento [9].

Las formas de energía geotérmica identificadas hasta ahora son muy características, éstas son [7,9]:

- a. Campos Geopresurizados, que existen a grandes profundidades (principalmente al sur de Estados Unidos y Hungría), implicando elevadísimos costos de perforación.
- b. Cámaras de Magma, su temperatura varía desde los 600 hasta los 1300 °C de temperatura, y no se ha dominado el problema de dichas condiciones térmicas.
- c. Rocas Calientes Secas a Moderada Profundidad, ya se ha extraído calor con éxito técnico (Los Alamos, Nuevo México, Estados Unidos), pero aún no se ha intentado su explotación a nivel comercial [9].
- d. Rocas Calientes Secas a Grandes Profundidades, una vez dominados los problemas para las rocas calientes secas a moderada profundidad, éstas serán accesibles al vencer el elevado costo de perforación profunda.

Si al menos la cuarta parte de toda la energía geotérmica pudiera aprovecharse en un futuro, con mucha seguridad los problemas energéticos actuales estarían solucionados, y es por ello que el hombre se empeña en desarrollar la tecnología requerida para aprovecharla al máximo.

1.1.1. Areas y Campos Termiales.

La experiencia del hombre con las manifestaciones térmicas superficiales le ha ayudado a identificar un recurso geotérmico con posibilidades de explotación, así se ha establecido una forma de clasificar las áreas superficiales del planeta basados en su gradiente térmico [7,9]:

- a. Areas No Termiales, con gradientes que van desde 10 hasta 40 °C por kilómetro de profundidad, que equivale a un flujo de calor aproximado de 1.434×10^{-2} cal/m²-s.

- b. Areas Semitermales, con gradientes de 70 a 80 °C por kilómetro de profundidad y con un flujo de calor equivalente a unos 3.43×10^{-2} cal/m²-s.
- c. Areas Hipertermales, con gradientes muchas veces mayores que las áreas no termales y por lo tanto su flujo calorífico también será mayor.

Como ya se mencionó el recurso geotérmico explotable económicamente es aquel recurso hidrotermal que sólo se encuentra en ciertos puntos del Cinturón Sísmico, abarcando una pequeña fracción de la superficie terrestre. Las áreas térmicas que se encuentran asociadas a estratos rocosos con poca o nula permeabilidad no podrán explotarse económicamente [9], pero si éstas se asocian a rocas permeables que permitan el alojamiento de fluidos entonces se conocen como "Campos Térmicos". Estas áreas se caracterizan por que los fluidos (agua, vapor y gases) transportan el calor, desde las profundidades de la corteza o el manto, hasta la superficie y como se requiere tanto de la roca caliente como de los fluidos, a menudo se les denomina campos hidrotermales.

Los campos térmicos se clasifican de la siguiente forma, de acuerdo a la condición de los fluidos extraídos al explotarlos [7,9]:

- a. Campo Semitermal (Baja Entalpía), capaz de producir agua hasta con 180 °C en los cuales no hay ebullición, incluso durante la perforación.
- b. Campo Termal (Alta Entalpía):
 - b.1. Campo Húmedo (dominado por agua), produce agua presurizada a una temperatura mayor de 200-250 °C, inicialmente son totalmente de agua pero existe ebullición luego de una extensa explotación.
 - b.2. Campos Secos (dominado por vapor), producen vapor saturado o ligeramente sobresaturado a presiones arriba de la atmosférica.

1.2. Estructura de los Campos Geotérmicos Hidrotermales.

En párrafos anteriores se mencionó que los campos hidrotermales son la única forma de energía geotérmica explotable comercialmente, en la actualidad, y que desafortunadamente son muy raros, incluso en los sitios ubicados en el Cinturón Sísmico. Definitivamente su rareza relativa lo hace un recurso natural muypreciado y codiciado alrededor de todo el planeta.

El modelo estructural de un campo hidrotermal explica su rareza. Dicho modelo ha venido depurándose a través de los años, en virtud de las experiencias obtenidas durante su estudio y propone que los campos hidrotermales se presentan bajo ciertas condiciones hidrológicas y geológicas, las cuales deben coincidir en forma simultánea, a ésto precisamente se debe lo poco observables en la superficie terrestre [7,9].

De acuerdo con este modelo, la estructura de un campo hidrotermal se basa en cinco elementos principales [7,9]:

- a. Una fuente de calor.
- b. Una capa de lecho rocoso.
- c. Un acuífero o zona de roca permeable fracturada capaz de retener una gran cantidad de agua o vapor, o ambos.
- d. Una fuente, para restablecer el agua perdida, ya sea en forma natural o artificial.
- e. Una capa sello para evitar la pérdida de calor o fuga del mismo fluido a la atmósfera.

Como se podrá observar, no puede esperarse que tal combinación de elementos se presente con gran frecuencia, sobre todo teniendo características tan poco comunes entre sí, tal como se presenta a continuación.

La fuente de calor, casi únicamente puede constituirla una intrusión magmática en la corteza, debido al movimiento cortical en zo-

nas de debilitamiento, tal como lo propone la Tectónica de Placas. Esta intrusión se aloja en el cuerpo de la corteza y tiene el efecto de reducir el espesor de la cubierta cortical térmicamente aislante. A lo anterior se debe el que los campos hidrotermales se encuentren muy ligados a zonas con vulcanismo reciente [7].

El lecho rocoso, tiene la función de conducir el calor hasta el sitio de alojamiento de los fluidos (acuífero). Usualmente forma parte de la corteza a profundidades de 2 a 5 Km, por lo cual tiende a soportar grandes presiones litostáticas de manera que todo fisuramiento causado por tensiones mecánicas es comprimido, principalmente las horizontales pues son las que soportan la mayor presión, que se genera por el peso de la roca, dándole características impermeables. Existe la posibilidad de que las fisuras verticales persistan a pesar de dichas presiones, dando lugar a que gases magmáticos o vapores lleguen al acuífero [7].

El acuífero, constituido por una formación conteniendo suficiente material permeable saturado en sus poros con los fluidos para proporcionar suficiente agua a pozos y fuentes. Para el caso de los campos geotérmicos al acuífero se le llama "reservorio" y generalmente su permeabilidad se debe a un fisuramiento o fracturamiento intenso en rocas de baja dureza, causado por elevadas tensiones mecánicas inducidas por actividad volcánica reciente.

La fuente de recarga, necesaria para reemplazar las pérdidas del fluido, provocadas por la naturaleza (manifestaciones en forma de fumarolas, fuentes termales, lodos hirvientes, etc.) o por el hombre (mediante la perforación de pozos), para mantener así el balance hidrológico del sistema. Se reconocen al menos tres tipos de recarga de un campo hidrotermal [9]:

- a. Meteórica, proveniente de la precipitación pluvial sobre la superficie y del derretimiento de la nieve o hielo invernal.
- b. Magmática, originada por los vapores desprendidos durante la cristalización del magma.

- c. **Aguas Atrapadas**, son aguas capturadas por formaciones rocosas en épocas muy antiguas.

El agua meteórica llega al acuífero por fisuras existentes en formaciones impermeables o cuando alguna formación permeable aflora a la superficie. Este tipo de agua constituye hasta el 90% de la recarga comparada con las otras fuentes.

La **capa sello**, tiene como función el prevenir la fuga de calor o vapor a la superficie, es una formación rocosa impermeable. Su origen puede deberse a varios fenómenos como la depositación de rocas impermeables durante la evolución geológica de la región, sellamiento de fracturas o poros por escape continuo de fluidos en épocas antiguas (debido al depósito continuo de minerales o a la caolinización causada por la alteración hidrotermal), o talvez como resultado de un efecto térmico sobre la roca fracturada [9].

Podrá observarse ahora que efectivamente las condiciones que deben prevalecer para la presencia del recurso geotérmico, explotable técnica y comercialmente, son muy específicas. Esto da lugar a la poca presencia observada para el recurso, alrededor del mundo.

Esquemáticamente esta estructura así conformada, para la representación de un campo hidrotermal, puede mostrarlo la Figura 1.3.

1.3. Usos Alternativos de la Energía Geotérmica.

En los países de la región, casi invariablemente se observa que la orientación de la explotación de los diferentes campos geotérmicos, se ha dado hacia la generación de energía eléctrica, sin duda el mejor beneficio de los recursos geotérmicos es el de la generación de electricidad en forma comercial. A nivel mundial sin embargo se han podido emplear los fluidos extraídos en un sin número de formas

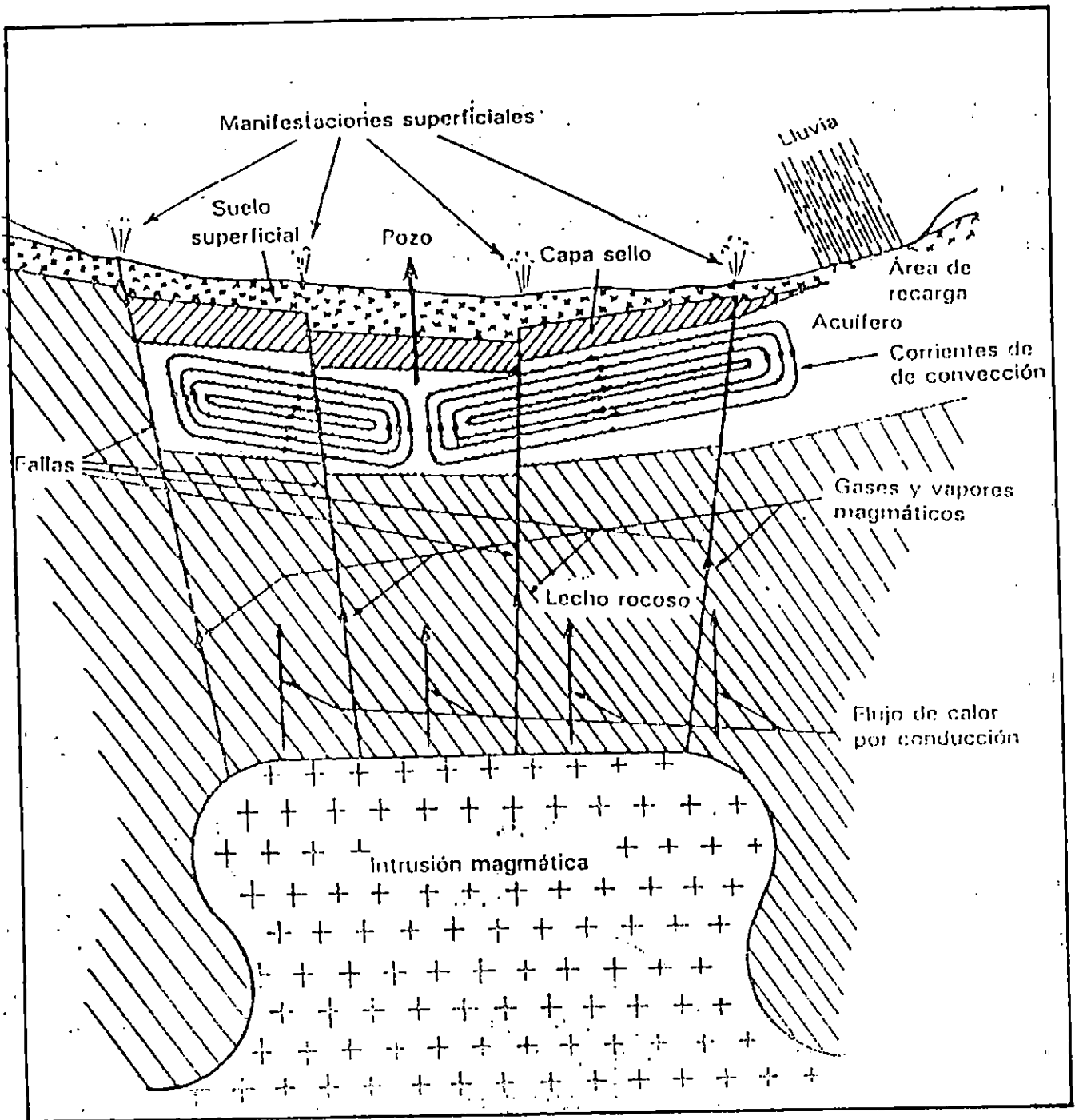


Figura 1.3. Modelo Estructural de un Campo Geotérmico [9].

alternativas a la generación de electricidad, estos usos son muy diversos ya que el hombre requiere de fluidos calientes en muchas de sus actividades. A continuación se hace una breve descripción de de los usos más importantes identificados a nivel mundial.

1.3.1. La Balneología.

A pesar que el hombre siempre ha tenido precaución con las manifestaciones de la energía de la Tierra, como lo son los volcanes por ejemplo, siempre ha demostrado interés por aquellas manifestaciones menores como las fuentes termales. Desde eras antiguas las diferentes civilizaciones han explotado los beneficios de dichas manifestaciones, así los romanos, griegos, mexicanos, japoneses, maories y muchos otros pueblos han utilizado las fuentes termales para el aseo y la higiene, muy a pesar que éstas presentan generalmente desprendimiento de gases con olor desagradable. Por otra parte como el agua caliente resulta un buen relajante para los músculos cansados, se popularizó desde hace mucho el uso de "baños calientes". Se sostiene que el tomar estos baños resulta beneficioso por que dichas aguas tienen propiedades curativas y profilácticas [9]. En Europa y en muchas otras partes del mundo existen lugares acondicionados para la visita de personas inválidas o hipocondríacas, o por aquellas que llegan con el único objetivo de tener un baño relajante.

1.3.2. Servicio Doméstico.

En muchas partes cercanas a manifestaciones termales naturales se emplean dichos fluidos para las actividades domésticas, utilizándoles para el aseo personal, para el lavado de ropa o de alimentos como verduras, incluso es muy frecuente utilizar el calor de dichos manantiales para la cocción de los alimentos [9]. Después de un adecuado tratamiento a los fluidos, éstos incluso podrían emplearse

con fines de consumo humano, como agua potable [21].

1.3.3. Calefacción Doméstica.

Aquellos países que poseen estación invernal han podido implementar un sistema de calefacción, utilizando el calor de los fluidos geotérmicos. Esto se ha logrado con un rotundo éxito en países como Estados Unidos, Japón, Islandia, Nueva Zelanda y muchos otros [8], para que cada día el empleo de fluidos geotérmicos en esta actividad se vaya incrementando [9].

1.3.4. Cultivos Agrícolas y Cría de Animales.

En aquellas regiones del planeta que el clima es completamente negativo para el cultivo de ciertas hortalizas, el recurso geotérmico representa una solución viable. Mediante el calentamiento de las paredes de los invernaderos, en Islandia se ha logrado el cultivo de especies vegetales que de no ser así tendrían que importarse, incluso en países como Turquía se han empleado aguas geotérmicas para irrigar los campos de cultivo y al parecer hasta han mejorado las cosechas desde entonces [9]. Para el caso de cría de animales se cuenta con la experiencia de varios países, Estados Unidos, Italia, Nueva Zelanda y Japón no sólo han utilizado el recurso geotérmico en el cultivo de vegetales sino han logrado la cría de animales como peces y gallinas, incubación de huevos, producción de leche, calentamiento de suelos, entre otros usos.

1.3.5. La Industria.

Para hablar del empleo del recurso geotérmico en la industria, se debe contar con una gran cantidad de información acerca de los requerimientos de energía de las diferentes industrias.

Para cada una de las áreas industriales existen diferentes formas de empleo de los fluidos geotérmicos de acuerdo al contenido calórico de éstos. Así para la **industria química** podría emplearse calor geotérmico en la obtención de sales de sodio y magnesio del agua de mar, extracción de minerales (Litio, Bromo y Cloruros) de los mismos fluidos, recuperación de Azufre elemental de manantiales y fumarolas, fermentación de melazas para producir alcohol etílico, producción de amoníaco, producción de ácido sulfúrico, entre otros [9]. Además, la alta cantidad de componentes químicos en los fluidos condiciona otro posible uso, el cual es la recuperación de químicos de los mismos fluidos; un ejemplo de tal recuperación de los constituyentes del agua geotérmica es el de Sílice [21], puede recuperarse aproximadamente 4000 TM/año, de un flujo aproximado de 250 litros/seg en la canaleta de desagüe. Esta gran cantidad de Sílice obtenida puede ser usada para diferentes fines [23], la industria del vidrio, material adsorbente, aislantes térmicos, pigmentos para pinturas, etc.

Otra industria muy importante sin duda a nivel mundial, la **industria alimenticia** puede ser beneficiada con empleo de calor geotérmico, con una amplia gama de líneas de producción que requieren calor tal como la producción de azúcar de caña, producción de café instantáneo, de leche en polvo, enlatado de frutas y jugos, secado de alimentos (pescado y cultivos) [7]. De esta manera se pueden mencionar muchas otras industrias como la de textiles, la de plásticos, la de cerveza, la de aceites de semilla de algodón, etc.

La Tabla 1.1 muestra la importancia tan grande del estudio y explotación del recurso geotérmico. Por lo tanto tomando en cuenta todos los aspectos que rodean al fenómeno de la geotermia, los usos potenciales del mismo, la conformación estructural de los campos geotérmicos y las características que manifiestan su presencia, es necesario llenar ciertos vacíos existentes en su comprensión total, relacionados con su origen, su localización invariablemente próxima a volcanes recientemente activos, sólo así se podrán comprender

realmente lo valioso que resulta contar con dicho recurso.

Para lograr lo anteriormente expuesto deberán conocerse los efectos causados por el enfriamiento del planeta, desde tiempos muy remotos hasta el presente, sobre la corteza terrestre y que directamente provoca la existencia del recurso geotérmico que está al alcance del hombre.

Tabla 1.1. Requerimientos Aproximados de Temperatura de los Fluidos Geotérmicos para Aplicaciones Diferentes a la de Generación de Energía [8].

Aplicación	T °C	Condición
Evaporación de Soluciones de Alta Concentración	180	Vapor Saturado
Refrigeración por Absorción de Amoníaco	180	Vapor Saturado
Secado de Tierras Diatomáceas	170	Vapor Saturado
Enlatado de Alimentos	140	Vapor Saturado
Evaporación en la Refinación de Azúcar	130	Vapor Saturado
Secado de Pescado	100	Agua Caliente
Calentamiento de Espacios	80	Agua Caliente
Cría de Animales y Calefacción de Invernaderos	60	Agua Caliente
Cultivo de Hongos y Balneología	50	Agua Caliente
Albercas de Natación	30	Agua Caliente
Cultivo de Huevos y Cría de Peces	20	Agua Caliente

2.0. GEODINAMICA DE LA TIERRA.

Desde hace mucho tiempo se ha podido observar, alrededor de todo el mundo, los cambios geológicos ocurridos como consecuencia del enfriamiento de la Tierra y su núcleo. El hombre en su afán de explicar y comprender la dinámica de este fenómeno observable superficialmente ha venido proponiendo ideas al respecto que resultan aceptables parcialmente. Sin ninguna duda la mejor y más aceptable explicación es aquella teoría que conceptualmente supone a nuestro planeta como una gran masa en constante enfriamiento desde su superficie, esto se verifica desde hace millones de años; se menciona que la superficie está formada por placas que "flotan" sobre una capa semifluida, a una temperatura muy superior a la de dicha superficie [9].

2.1. La Tectónica de Placas.

Inicialmente, la propuesta de la Tectónica de Placas surgió como una teoría y que sustancialmente se basó en la idea anteriormente expuesta. Actualmente, debido a las pruebas obtenidas y gracias al adelanto tecnológico, se considera a dicha idea como la mejor explicación a los fenómenos geológicos asociados a la tectónica y focos de sismicidad, localizados en puntos específicos alrededor de todo el planeta. [9].

Se considera que efectivamente todos los continentes se encuentran moviéndose en distintas direcciones, tal como lo expone la Tectónica de Placas.

Diversos autores propusieron [1], que desde hace algunos millones de años, los continentes se encuentran moviéndose a la deriva, a una velocidad que varía en unos pocos centímetros al año. Alguien planteó la idea que inicialmente todos los continentes estaban unidos en una sola masa terrestre y que, debido a un fenómeno cataclísmico inexplicablemente comenzaron a separarse [1,9]; Así, se explica el casual encaje entre Norteamérica y Europa, Suramérica y África, etc. Si lo anterior se debe a la "deriva continental", esto implica que efectivamente la corteza terrestre está segmentada y flota sobre una superficie semifluida (el manto terrestre), del mismo modo que lo hacen los cubos de hielo sobre un recipiente con agua.

Tomando como válida la propuesta de la Tectónica de Placas, se han reconocido un total de nueve grandes placas que son: Pacífica, Norteamericana, Suramericana, Africana, Euroasiática, Australoíndica, Antártica, Nazca y Arabiga [1,9] (Figura 2.1). Para la identificación de estos grandes segmentos se han afrontado muchos problemas, suponiendo que los límites de éstas son zonas de marcada sismicidad no se puede delimitar aquellas regiones con sismicidad débil. Se ha optado por suponer que aquellas grandes placas originan otras más pequeñas, en regiones donde existe un conflicto dinámico por aproximarse unas a otras [1].

Muchos aspectos planteados por la Tectónica de Placas, explican fenómenos geológicos que actualmente se observan, como por ejemplo, en el Océano Pacífico las placas identificadas se encuentran constituidas por corteza oceánica exclusivamente, mientras el resto de las placas están compuestas por corteza oceánica y continental. Los bloques continentales de las placas mixtas son el resultado de la soldadura de placas existentes anteriormente [1,8], que durante su movimiento se han unido, comportándose geodinámicamente como una sola placa.

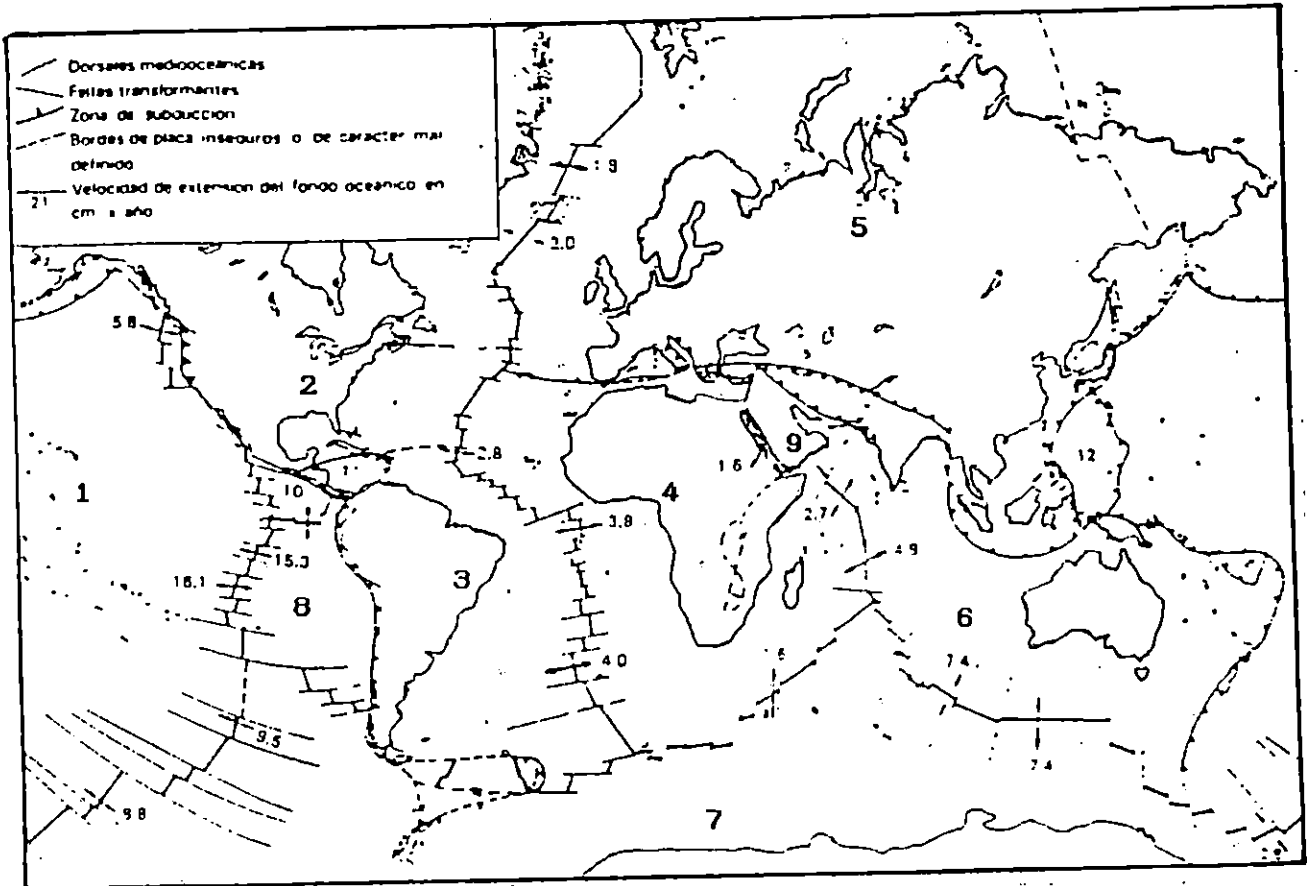


Figura 2.1. Principales Placas Litosféricas [9]:

1. PACÍFICA, 2. NORTEAMERICANA, 3. SURAMERICANA,
4. AFRICANA, 5. EUROASIÁTICA, 6. AUSTRALOÍNDICA,
7. ANTÁRTICA, 8. DE NAZCA, 9. ARÁBIGA.

Estas suturas definidas para las placas mixtas son completamente pasivas en cuanto a sismicidad. El ejemplo más ilustrativo del fenómeno antes explicado es, la sutura formada por la unión de la India con Asia, representada por la elevación del Himalaya; este proceso aún se está consumando, y esto se deduce de la sismicidad residual detectada en la región.

2.1.1. Los Límites entre las Placas.

En forma general la delimitación de las placas reconocidas (así como las microplacas), son clasificadas en tres categorías: Destructivas, constructivas y pasivas [1].

Los límites constructivos, constituidos por las dorsales oceánicas, son los puntos que originan la creación de nueva corteza. Los límites destructivos, corresponden a las zonas de los bordes continentales y es donde la litósfera es consumida por el fenómeno de la subducción. Los límites pasivos, no provocan creación o destrucción de corteza, simplemente las placas se deslizan unas respecto de otras a lo largo de las llamadas fallas transformales. Muy frecuentemente estos límites se presentan simultáneamente, el mecanismo geodinámico que propone la Tectónica de Placas resulta concentrado en estos límites, de esta forma se explica el movimiento a la deriva de la fragmentada corteza [1].

El material caliente que procede del manto busca salir a la superficie, lo hace rompiendo la corteza en un punto de debilidad que, por lo general corresponde a la corteza oceánica. Dicho material al enfriarse pasa a formar parte de la corteza, en éstos ejes de formación de litósfera se encuentran los límites constructivos y se les denomina ejes de las dorsales. La nueva corteza formada en dichas dorsales empuja horizontalmente a la corteza ya existente, así se provoca el desplazamiento de la corteza oceánica en ambas direcciones a partir de la dorsal. Este fenómeno es uniforme a lo largo de todo el eje dorsal, sólo puede afectarse por el efecto de las fallas transformales [1,9].

Estos movimientos, formados por las dorsales, provocan grandes esfuerzos en los límites destructivos, localizados en los puntos donde se han unido la corteza continental y la oceánica, de las placas mixtas, por ser zonas débiles [9]. En dichas zonas los esfuerzos son contrarios direccionalmente, la corteza continental moviéndose

en una dirección (tal vez forzada por un fenómeno similar) y la oceánica en otra obligada por la dorsal. Para liberar dichos esfuerzos se originan los fenómenos de subducción, debido a estos esfuerzos se fragmenta la corteza en los puntos ya mencionados y, la corteza continental menos densa cabalga sobre la oceánica de mayor densidad, esta última se introduce en el manto bajo la continental por el fenómeno de subducción, originando una intensa fricción que acaba por fundir la roca, así es como se explican las intrusiones magmáticas (volcanismo) observadas generalmente cercanas a zonas de subducción (Figura 2.2) [1,14].

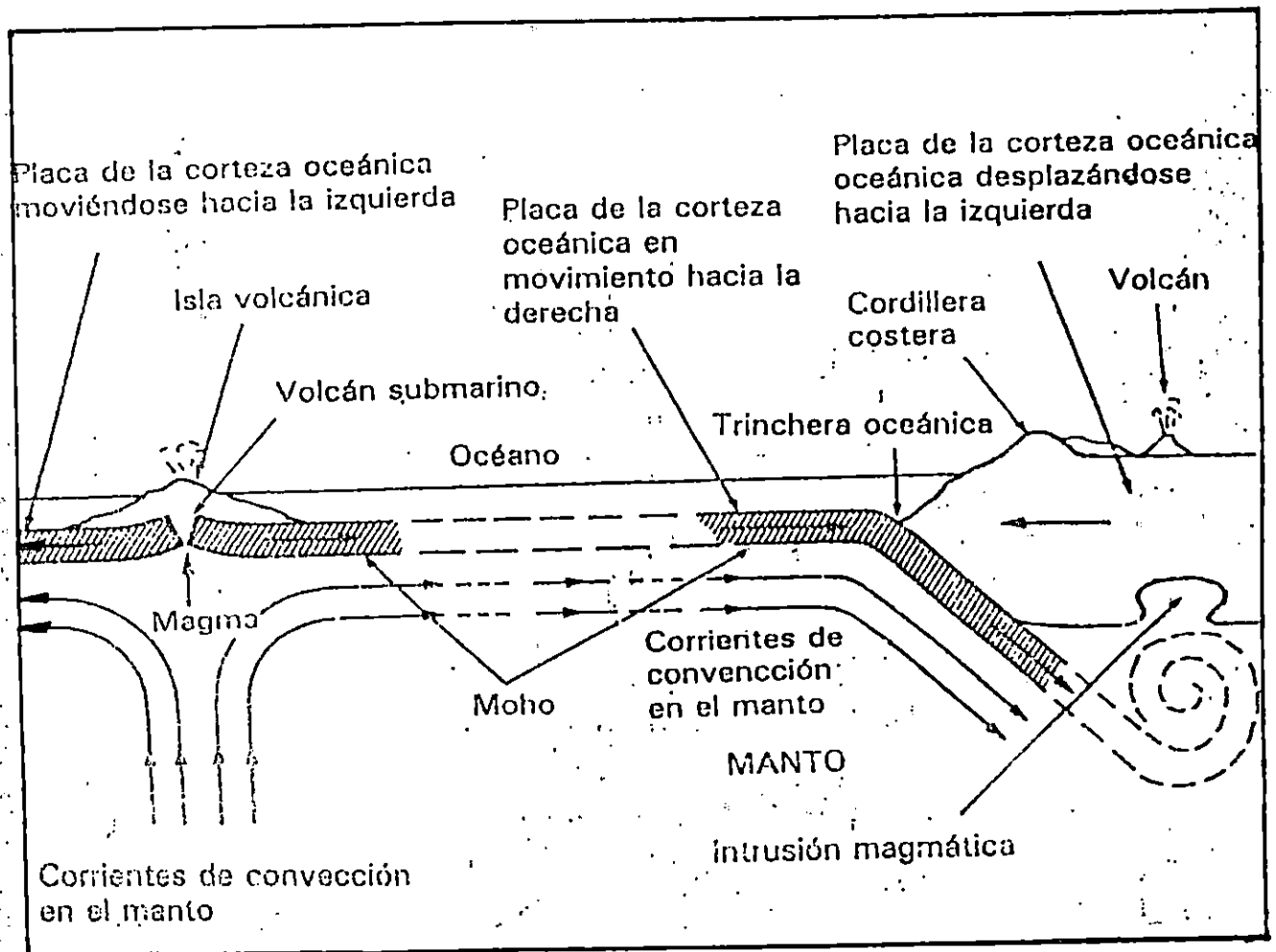


Figura 2.2. Movimiento de las Placas de la Corteza Terrestre [9].

Todo lo anteriormente expuesto, los fenómenos constructivos y destructivos actuando simultáneamente, muestran un fenómeno convectivo permanente en el manto terrestre. Por un lado ascendiendo en las dorsales y algunos miles de años después, descendiendo de nuevo a través de las trincheras o fosas formadas por la corteza oceánica al doblarse hacia abajo en el proceso de subducción.

Los procesos convectivos en el manto y corteza terrestre son los que, directamente, provocan los fenómenos geodinámicos observados en la misma superficie del planeta [1]. En estos fenómenos es que se basa la idea de la Tectónica de Placas.

2.2. Situación Geológica Actual de América Central.

Luego de conocer lo expuesto por la Tectónica de Placas, puede saberse que aquellos fenómenos geodinámicos de subducción son bordes activos, denominados así por los fenómenos sísmicos y magnéticos registrados. Estos bordes activos, pueden ser continentales como las costas Pacíficas de Suramérica o bien, pueden ser oceánicas, como las costas Pacíficas de Asia [9].

Siendo conocedores del intenso vulcanismo y destructivos sismos registrados para la región de América Central, cabe la pregunta ¿Qué está ocurriendo alrededor nuestro?, la explicación geológica se plantea de la siguiente manera: Actualmente existen varias grandes placas entrando en conflicto geodinámico por su aproximación, la de Pacífica, la de Nazca y las placas americanas [1,14]. Se han originado, debido a esto, dos microplacas denominadas como placa de Cocos y placa del Caribe. La primera ubicada frente a la costa pacífica de América Central y la segunda en el Océano Atlántico, en el Caribe, sobre la que se ubica América Central.

De acuerdo a los mapas actuales del istmo, la zona de subducción se encuentra en la denominada Fosa Mesoamericana, la cual se extiende

desde las islas Las Tres Marias (México) hasta la península de Nicoya (Costa Rica). Se cree que se inició en el final del Terciario, tomando su actual condición ya en el Cuaternario. El simple hecho de existir subducción de la placa de Cocos bajo la del Caribe desencadena un sin número de efectos geológicos, algunos de los más sobresalientes se describen a continuación [1]:

La Depresión Central. Quizás sea la más importante estructura sobre la placa del Caribe. Esta se subdivide en la Fosa Interior y en la Fosa Central [7]. La Fosa o Graben Central es una estructura de unos 20 Km de ancho y atraviesa El Salvador de Occidente a Oriente, eventualmente cruza el Golfo de Fonseca y luego se adentra en Nicaragua. A lo largo de dicho graben y en su margen Sur se encuentran los principales volcanes activos del Cuaternario. Es asiento de terremotos moderados, someros y de gran poder destructivo, que han asolado El Salvador desde tiempos históricos [14].

La Cadena Volcánica Pacífica. Ubicada al borde Sur del Graben Central y es una continuación de Cinturón Volcánico Circunpacífico [7]. Obviamente ésta tiene una estrecha relación con la Fosa Mesoamericana, como ya se explicó el fenómeno de subducción origina grandes esfuerzos de fricción y por consiguiente elevadísimas temperaturas que funden la roca, así se originó el magma Cuaternario.

La Inclinación Continental hacia el Caribe. Se ha observado un marcado drenaje de las aguas continentales en dirección del Caribe, la mayoría de los ríos de la región fluyen en esta dirección. Esto se debe a que el movimiento de América Central hacia el Pacífico durante el Cuaternario, en el cual se supone inició la subducción de la placa de Cocos, evidentemente ha ocasionado el levantamiento de la costa Pacífica y la inclinación regional del continente hacia el Caribe [14].

Aparte de los fenómenos antes mencionados, asociados a la formación de la Fosa o Trinchera Mesoamericana, se conocen otros hechos meno-

res. Las diferencias en las posiciones y rumbos de los alineamientos volcánicos activos, los contrastes morfológicos y la distribución sísmica, lleva a suponer que Centroamérica se encuentra rodeada de fallamientos en la cortezas y que han acabado por segmentarla [14], éstos presentan una orientación perpendicular a la dirección de la Fosa.

De acuerdo a esta hipótesis, dos de dichos segmentos abarcan totalmente a Centroamérica desde la Península de Nicoya hasta el Occidente de Guatemala. Cada uno de los mencionados segmentos se ven separados a su vez por fracturas transversales, precisamente una de las ideas propuestas menciona que dos de estas fracturas atraviesan El Salvador [14]; así estaríamos ubicados en un sólo segmento muy definido y que sigue el mismo rumbo que la Fosa Mesoamericana. Una de estas fracturas transversales pasa por el Golfo de Fonseca y la otra territorialmente hasta alcanzar el Volcán de Santa Ana.

2.3. Dinámica y Estructura Geológica del Golfo de Fonseca.

Definitivamente lo anterior es posible y podría explicar un hecho geológico curioso, la presencia de vulcanismo reciente en la parte Norte del Golfo de Fonseca, donde no es muy probable su existencia, ya que el vulcanismo Cuaternario (reciente) debe estar localizado al menos en el mismo golfo, siguiendo el Graben Central por su borde Sur. Es lógico pensar que su presencia se debe al fracturamiento de la placa Caribe sobre el Golfo de Fonseca, tal y como lo menciona la hipótesis antes planteada. Es muy probable que dicha fractura se deba al debilitamiento provocado por la curvatura direccional de la Fosa Mesoamericana (Figura 2.3), debida a su vez por la diferente velocidad de desplazamiento continental de los segmentos supuestos. Resulta entonces, muy conveniente asociar a este fracturamiento con todo aquel vulcanismo reciente rodeando al Golfo de Fonseca.

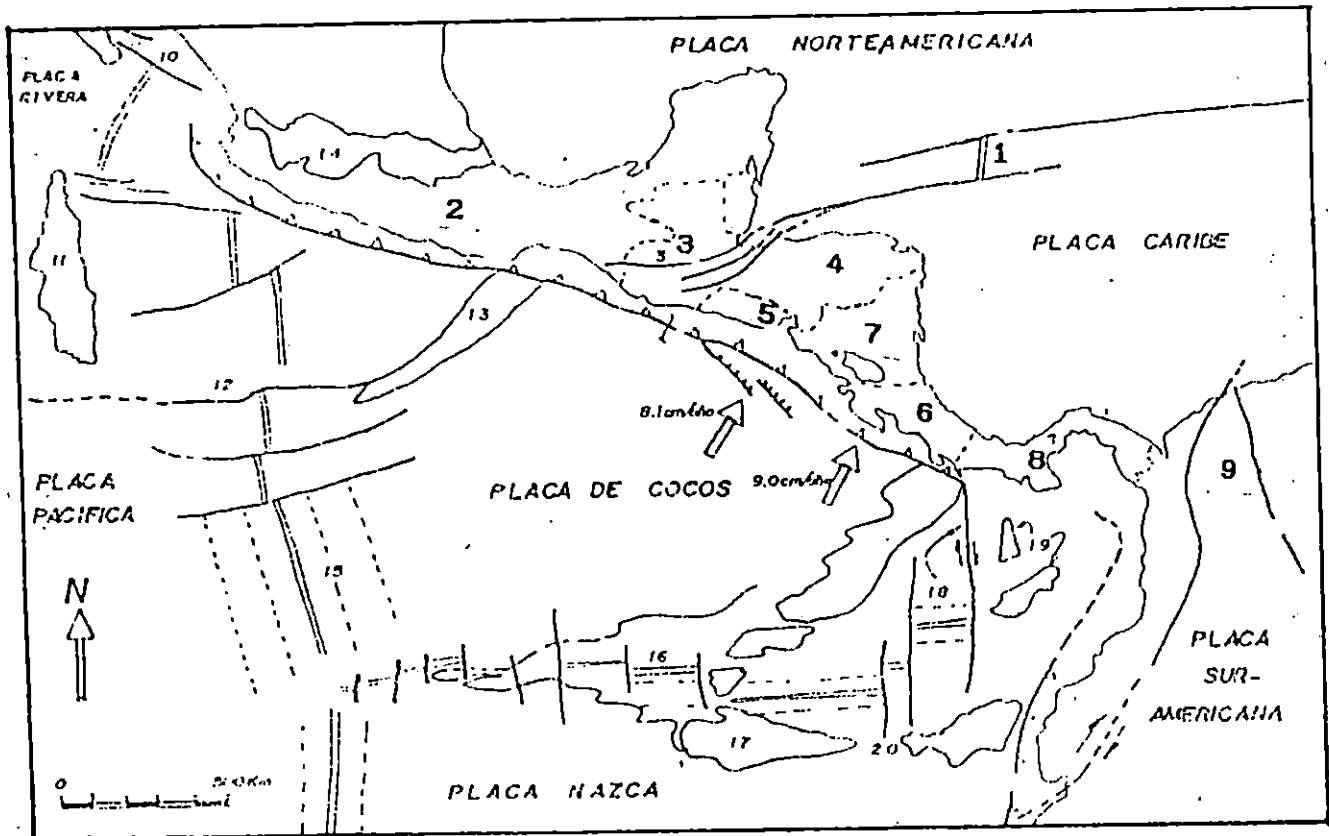
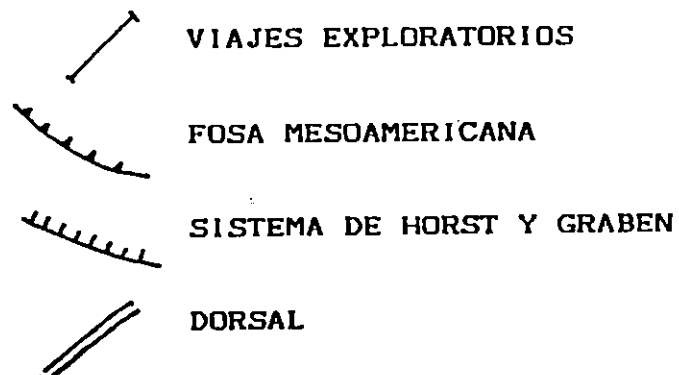


Figura 2.3. Ubicación Geotectónica de El Salvador [14].

1. DORSAL DE CAIMAN, 2. MEJICO, 3. GUATEMALA,
4. HONDURAS, 5. EL SALVADOR, 6. COSTA RICA,
7. NICARAGUA, 8. PANAMA, 9. COLOMBIA.



El aspecto más representativo de lo antes expuesto es la similar naturaleza del volcán de Conchagua en El Salvador y el volcán Cosiguina en Nicaragua [10], además de la naturaleza volcánica de las islas localizadas en el mismo golfo.

Para el interés nuestro, el volcán de Conchagua ubicado en el margen Occidental del Golfo de Fonseca, al Sur de la misma ciudad de La Unión en el Oriente del país, se encuentra descrito estructural y geológicamente desde hace mucho [13]. Se ha clasificado dicha formación como del tipo de Estrato-Volcán; El nombre es dado al total de su estructura, formada por dos picos, al Occidente se encuentra el Cerro del Ocote y al Oriente el Cerro Bandera, ambos con una altura de 1250 msnm y 1170 msnm respectivamente [13].

Respecto a su actividad eruptiva existen diversas opiniones, algunas mencionando erupciones y posibles cráteres, y otros opinando que dichos cráteres no son más que formaciones producto de la erosión, que dicho sea de paso es muy marcado el efecto de este fenómeno en todo el macizo. Las posibles erupciones se menciona que ocurrieron en los años de 1868 y 1947 [13]. La fractura principal que atraviesa de Norte a Sur el volcán de Conchagua, ha provocado la separación de su cima en los dos picos mencionados y aún continúa su asentamiento; lo anterior se concluye debido a la frecuencia de pequeños temblores sentidos en la región en años recientes.

En cuanto a su petrografía, se han tomado muestras de varios puntos rodeando el volcán, todas estas rocas son andesitas hipersténicas, con fenocristales de plagioclasa, hiperstena y un poco de augita. Ocasionalmente se han encontrado trazas de olivino [13]. Como podrá notarse entonces su petrografía es muy típica de las rocas ígneas, expulsadas en algún momento desde el interior de La Tierra, lo cual está fuertemente asociado con la energía interna del planeta ya que un vulcanismo reciente podría haber originado el recurso geotérmico.

Definitivamente, con todo lo anterior, el volcán de Conchagua está asociado a la geodinámica del Golfo de Fonseca lo cual denota una zona activa geológicamente. Basados en las condiciones de esta región así planteadas y en las requeridas para la presencia del recurso geotérmico, resulta muy probable que se piense en realizar un estudio preliminar proyectado inicialmente, a evaluar la posibilidad de explotar exitosamente un recurso de esta naturaleza, dicho estudio podría comprender al menos las primeras etapas de un proyecto geotérmico, dependiendo de los resultados de cada una de ellas.

3.0. EL DESARROLLO DE LA ENERGIA GEOTERMICA EN EL SALVADOR.

En 1953, CEL inicia los primeros estudios de los recursos geotérmicos del país. Se programaron las investigaciones preliminares y la perforación de pozos con profundidad entre 100 y 300 metros [2].

A finales de 1968 habían sido perforados cinco pozos con profundidades entre 600 y 1400 metros, localizados en distintas áreas geotérmicas (Ahuachapán, Berlín y San Vicente). El pozo de Ahuachapán (AH-1) mostró tener un caudal de fluidos, presión y temperatura, apropiadas para la generación de la energía eléctrica [2].

3.1. El Desarrollo de Ahuachapán.

Dentro de los años de 1968 y 1971 se perforan cinco pozos más en el área de Ahuachapán, resultando productivos tres de éstos (AH-5, AH-6 y AH-7), comprobándose una potencia eléctrica obtenible de 17 MW [2].

En 1972, se inició la perforación de seis pozos en Ahuachapán que tenía como fines estudiar la posibilidad de reinyección de las aguas residuales, y además se pretendía encontrar el vapor necesario para hechar a andar el primer grupo de pozos que fueran capaces de producir 30 MW de potencia, esto se logró con la perforación del pozo AH-4 en 1973 y que fué un buen productor (12 MW). [2].

En junio de 1975 comienza a generar el primer grupo de 30 MW; debi-

do al éxito logrado por la primera unidad y la crisis del petróleo, en agosto de 1976 comienza a generar un segundo grupo de 30 MW y en febrero de 1980 comienza a generar el tercer grupo, de 35 MW [2].

En la década de los 80 por diferentes limitaciones, no se pudieron realizar las perforaciones adicionales para la producción el vapor y para la reinyección que habieran permitido mantener la capacidad operativa de la Central Geotérmica de 95 MW, por lo que dicha capacidad se redujo en un 50 % [2].

Desde 1990 se realizan con el Banco Interamericano para el Desarrollo (BID) actividades que han culminado a la fecha, con la factibilidad de estabilizar la producción del campo a un nivel cercano a la capacidad instalada [2].

3.2. El Desarrollo de Berlín.

En la década de los 70 se realizaron estudios y perforaciones de pozos exploratorios que culminaron exitosamente con una capacidad productiva de aproximadamente 28 MW. La guerra civil de la década de los 80, no permitió sin embargo el normal desarrollo y aprovechamiento del campo en la producción eléctrica. No obstante entre 1985 y 1990, la CEL logró instalar dos unidades "bocapozo" de 5 MW, utilizando dos de los pozos productores disponibles, iniciando de esta forma la generación eléctrica de este campo [2].

Desde 1990 se realizan con el BID actividades que han culminado con la factibilidad de instalar una Central a Condensación de 2x25 MW [2].

En el año de 1992, como parte del Programa de Reconstrucción Nacional, se elaboró un proyecto adicional para instalar una tercera unidad de 5 MW que permita utilizar otro de los pozos productores disponibles en la generación eléctrica, el proyecto entró en eje-

cución en 1993 [2].

Entre 1993 y 1994, como parte del Proyecto Bocapozo de Berlín se ejecutó la perforación de los pozos de reinyección TR-14 y TR-8, quedando pendiente el montaje de las correspondientes líneas de reinyección. Se programó para Febrero de 1995 la producción/reinyección en los pozos TR-14 y TR-1, la producción del pozo TR-2 y esperar la recuperación térmica del pozo TR-9 para poder conocer su potencial como productor; para dicha fecha se tendrán las conexiones finales de los pozos TR-14 y TR-8, para la reinyección de los fluidos residuales.

3.3. El Desarrollo de San Vicente.

En la década de los 70 se realizó la exploración del área a nivel de una prefactibilidad geotérmica, culminando en 1981 con la perforación de un pozo exploratorio de 1300 metros que interceptó un probable reservorio a una temperatura de 230 °C y con la localización de la zona de interés sobre la falda Norte y Nor-Este del volcán de Chinchontepec [2].

En 1992, en el marco del Programa de Reconstrucción Nacional, se elaboró el proyecto para continuar la exploración del área a nivel de detalle que permita evaluar la factibilidad del desarrollo y el aprovechamiento en la generación eléctrica y el proyecto entró en ejecución en 1993 [2].

3.4. Otras Areas en Desarrollo.

En el área de Coatepeque entre 1986 y 1989 se realizaron estudios geocientíficos de reconocimiento en la parte Centro-Occidental del país, con mayor alcance alrededor de la caldera del lago donde se encontró condiciones generales de un área geotérmica. Una zona de

mayor interés se identificó vecina al Oeste del lago, y otras dos hacia el Norte y hacia el Este (Ciudad Arce), planificándose realizar tres perforaciones exploratorias (de aproximadamente 2000 metros de profundidad) que permitan una mayor evaluación [2].

En el área de Chipilapa al igual que su vecina Ahuachapán al Oeste, es un área investigada desde la década de los 60. Se tiene indicadores positivos sobre un posible recurso de aprovechamiento comercial, incluida una producción de los pozos que se perforaron en la parte Norte del área, sin embargo estos fluidos son de bajo contenido energético requiriéndose una mayor aproximación a la fuente de calor. Los trabajos realizados corresponden a una exploración de detalle a nivel de factibilidad geotérmica, no estando concluida aún [2].

En el área de Chinameca se exploró hasta el nivel de prefactibilidad (cuatro pozos exploratorios) en la década del 70, pero las temperaturas encontradas a gran profundidad resultaron aún inferiores a los 200 °C, no siendo por ello proseguido [2].

En términos generales, las áreas que han sido exploradas (incluyendo las investigadas a un nivel preliminar) se muestran en la Figura 3.1, en ella se presentan las de mayor importancia en la línea volcánica de la Era Terciaria y de la Era Cuaternaria.

Manantiales Calientes

- 1- Durazneño
- 2- Los Toles
- 3- Los Salitres
- 4- San Lorenzo
- 5- Playón - El Salitre
- 6- La Ceiba
- 7- Caiuco
- 8- Coatepeque
- 9- Agua Caliente
- 10- San Vicente
- 11- Ocajuelo - Lempa
- 12- Parras Lempa
- 13- San Simón
- 14- Las Burras
- 15- Jucuapa
- 16- Chuanameca
- 17- Chilanguera
- 18- CONCHAGUA**
- 19- Metapán
- 20- Texistepeque
- 21- Agua Caliente
- 22- Ocajuelo
- 23- El Salitre
- 24- Nombre de Jesús
- 25- Carolina
- 26- San Isidro
- 27- Santa Rosa
- 28- El Sauce

SIMBOLOGIA:
 ○ Manifestaciones Hidrotermales
 ● Pozos Calientes
 ☆ Fumarolas

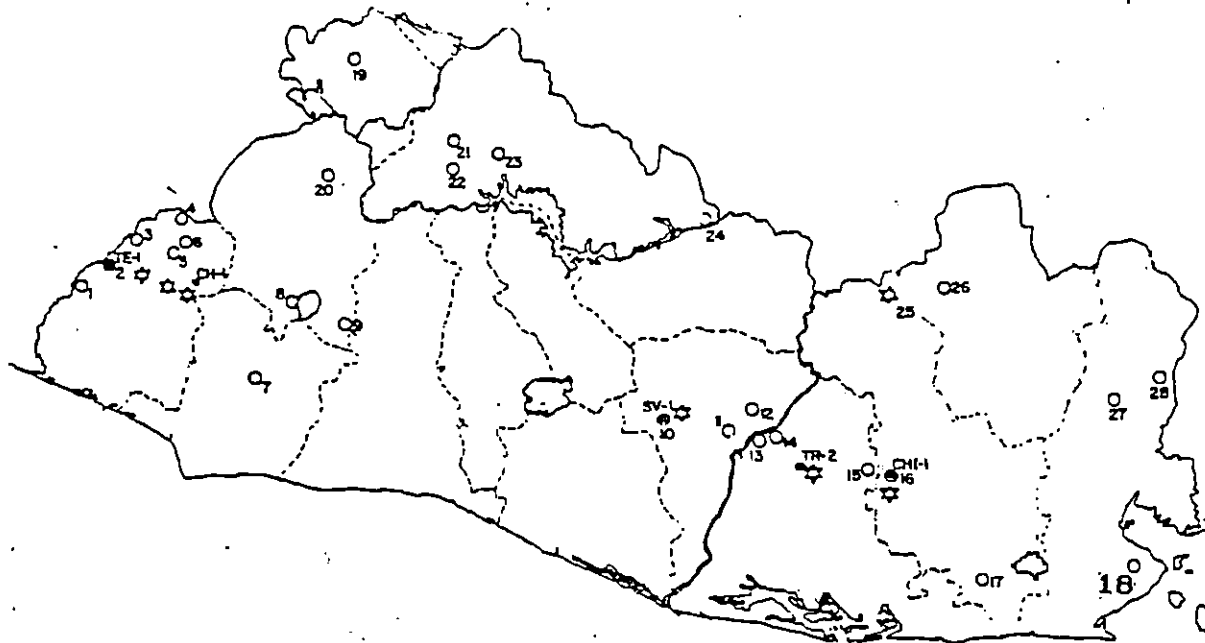


Figura 3.1. Areas Geotérmicas Estudiadas en El Salvador [21].

4.0. EL PROYECTO GEOTERMICO.

El proyecto geotérmico se desarrolla mediante la ejecución satisfactoria de determinadas etapas que buscan conseguir, la utilización del calor de la Tierra de tal forma que éste se puede emplear de diferente manera para el beneficio del hombre, explotándolo racionalmente.

4.1. Desarrollo del Proyecto Geotérmico.

La ejecución de un proyecto geotérmico tipo, se divide en dos etapas y cada una de éstas se divide a la vez en sub-etapas; así se tiene que la primera etapa llamada exploración, está constituida por las sub-etapas del reconocimiento, la prefactibilidad y la factibilidad; la segunda etapa es llamada etapa de explotación y también está subdividida, en desarrollo y explotación [18].

4.1.1. Exploración.

El objetivo de la etapa de exploración es identificar el yacimiento del recurso geotérmico, incluyendo una estimación del potencial como recurso energético, para la determinación del posible uso de los fluidos extraídos del mismo.

4.1.1.1. Etapa de Reconocimiento.

Esta etapa consiste en la evaluación preliminar de los recursos geotérmicos, en especial aquellos susceptibles a ser aprovechados

con fines de generación eléctrica, identificando las áreas de mayor interés para plantear de manera más concreta las líneas de acción a seguir en la siguiente sub-etapa de la exploración, llamada **prefactibilidad**. Todo lo anterior se consigue con la participación de diferentes disciplinas geocientíficas entre las cuales tenemos a la **hidrogeología**, la **geoquímica** y la **geovulcanología**. En cada una de estas especialidades se trabaja independientemente para la obtención de resultados y conclusiones, al final cada especialista con su criterio las confronta con las del resto y así se obtienen puntos en común acerca de la manifestación superficial explorada [18].

Los objetivos generales del estudio de reconocimiento son [18]:

- a. Evaluar preliminarmente las posibilidades geotérmicas a nivel regional.
- b. Identificar las áreas de interés geotérmico.
- c. Definir un esquema geotérmico preliminar de cada área identificada y seleccionar los más atractivos para la ejecución del estudio de prefactibilidad.
- d. Elaborar un programa de exploración para la etapa de prefactibilidad, dirigido a las áreas de mayor interés geotérmico.

Para alcanzar los objetivos antes mencionados, el reconocimiento se lleva a cabo en varias fases, que son [9]:

- a. Recopilación de la información existente sobre la región en estudio.
- b. Evaluación de la información recopilada y ejecución de investigaciones de campo.
- c. Interpretación de los estudios, integración de resultados y definición de áreas de interés geotérmico.
- d. Preparación del programa para la etapa de prefactibilidad. Para la elaboración del programa en forma completa se debe contar con los resultados obtenidos por todos los geocientíficos involucrados en el reconocimiento.

4.1.1.2. Etapa de Prefactibilidad.

Se continúa la investigación con el fin de detallar la información que permita inferir con mayor certeza la existencia del yacimiento en el área de interés seleccionada y preparar su verificación con pozos de múltiple propósito [18].

Esta etapa persigue identificar y determinar, con trabajos de superficie realizados por la geohidrología, geología, geoquímica y geofísica, la posible existencia de un sistema geotérmico en el subsuelo del área de interés (seleccionada y delimitada en el respectivo reconocimiento), estas investigaciones superficiales pueden verse apoyadas por la perforación de pozos de gradiente o de propósito múltiple, de tal manera que el riesgo de continuar la exploración con perforaciones profundas sea bastante reducido [18].

Los objetivos generales de la Prefactibilidad son [18]:

- a. Optimizar el esquema preliminar del área geotérmica estudiada, donde se debe aportar la siguiente información: Presencia de una anomalía térmica a niveles superficiales de la corteza, extensión y profundidad del posible yacimiento, presencia y características de la capa sello, sistema de circulación hídrica y caracterización eventual del yacimiento.
- b. Determinar sitios alternos para la perforación de pozos exploratorios profundos. Esta localización estará basada en criterios técnico-científicos.

Para lograr cubrir los abjetivos, el estudio de prefactibilidad se lleva a cabo en las siguientes fases [18]:

- a. Revisión, evaluación y síntesis de la información existente.
- b. Investigación geocientífica de campo y de laboratorio.
- c. Integración de la información y elaboración del modelo geotérmico más probable del yacimiento.
- d. Perforación de pozos de gradiente y/o de múltiple propósito.
- e. Integración de la información geocientífica de superficie y

la obtenida por la perforación de los pozos en un modelo refinado del yacimiento.

- d. Evaluación preliminar del potencial energético y preparación de un documento de proyecto para la etapa de factibilidad.

4.1.1.3. Etapa de Factibilidad.

El estudio de factibilidad consiste en la caracterización y comprobación de la existencia de un yacimiento geotérmico comercial, la evaluación del potencial geotérmico del área proyectada y el diseño preliminar de los posibles sistemas de utilización de los recursos descubiertos. Los objetivos antes planteados serán alcanzados a través de perforaciones exploratorias profundas, estudios geocientíficos adicionales, estudios de ingeniería de yacimientos y finalmente un análisis técnico-económico de los posibles esquemas de utilización [17].

Durante esta etapa es donde se definen las características y el potencial del yacimiento geotérmico, la capacidad propuesta para la Central Geotérmica a construir, las obras de apoyo requeridas para el suministro del fluido a la misma y el ciclo óptimo de conversión de energía [17].

En base a las características anteriores, en esta etapa quedarán propuestos los esquemas de desarrollo y de manejo del Campo. Los distintos escenarios de explotación, optimizados por medio del modelo conceptual y numérico, serán utilizados para definir los esquemas de explotación [17].

El diseño básico de la Central deberá quedar también establecido durante esta etapa, al igual que los criterios de diseño de los diferentes subsistemas de apoyo que componen el sistema Campo-Central, esto incluye el diseño que será adoptado para los pozos de producción, inyección y observación. Se debe presentar también

algunos comentarios sobre los costos involucrados en esta etapa, así como la organización de recursos humanos y físicos [17].

4.1.2. Explotación.

La etapa de explotación tiene como objetivo la explotación y el mantenimiento del recurso para que tenga una vida útil larga y además sea económicamente explotable.

4.1.2.1. Etapa de Desarrollo.

Identificado el recurso geotérmico, esta etapa comprende la continuación de la perforación iniciada en la Factibilidad, además la ejecución de estudios geocientíficos complementarios de detalle, la evaluación precisa del yacimiento, la extracción del fluido geotérmico y la construcción de una Central generadora de electricidad o de uso directo del calor geotérmico [19].

El complementar la perforación de pozos, para poder extraer el fluido del subsuelo, está condicionado por los estudios geocientíficos realizados, durante la construcción de los pozos. Las disciplinas geocientíficas que intervienen en la evaluación de las características y resultados obtenidos de perforación son las que se han mencionado en las etapas anteriores. Dado que en esta etapa la perforación, es para iniciar la explotación del recurso, es necesario perforar pozos productores, subsistemas de apoyo Campo-Central, la construcción de la Central, con todas las condiciones requeridas para la producción de energía [18,19].

La etapa de desarrollo es el nexo entre la factibilidad y la explotación de un proyecto geotérmico, aquí se puede establecer las conclusiones concretas del potencial, con los primeros resultados de la producción de los pozos y la Central.

4.1.2.2. Etapa de Explotación.

Esta etapa tiene por objetivo mantener generando la Central a su máxima capacidad y con la mayor economía posible.

Comprende las actividades que se deben desarrollar, tanto en el Campo como en la Central, además, involucra el manejo del fluido geotérmico desde su extracción del yacimiento hasta la conversión de energía eléctrica [19].

En la parte del Campo es necesario describir los aspectos de operación y mantenimiento que se recomienda aplicar en los pozos, los sistemas de manejo de los fluidos y de sus obras complementarias, y el monitoreo continuo del campo. Se deberán realizar estudios de apoyo para asegurar el funcionamiento del proyecto durante su vida útil, los criterios para la perforación de los pozos de reposición y la estructura organizacional [19].

En la parte de la Central Geotérmica se tratan los aspectos de la operación y mantenimiento de los sistemas que la integran, usando los criterios correspondientes al respecto. Es necesario desarrollar actividades continuas en los sistemas y puntos claves a vigilar. Hay que hacer énfasis en aquellos aspectos particulares de la explotación geotérmica [19].

La operación y mantenimiento del Campo y la Central involucra actividades continuas que se desarrollan desde la puesta en operación de ésta, hasta que se decide clausurarla.

Debido a las características dinámicas de los proyectos geotérmicos, se deberá mantener un análisis y evaluación constante de los resultados obtenidos en la explotación del yacimiento, por lo que se requiere del apoyo de un grupo de ingeniería [19].

De acuerdo a todo lo antes dicho, la base del proyecto geotérmico

son los resultados obtenidos en la etapa de reconocimiento, donde dentro de ésta el geoquímico aporta información fundamental, como la estimación de la temperatura profunda, patrones generales de circulación (posibles zonas de recarga, zonas de flujo ascendente directo y lateral, etc.). Además de esto resulta ser una de las etapas de más bajo costo de todo el proyecto [19].

Es necesario mencionar que toda explotación de un recurso geotérmico trae como consecuencia la posibilidad de dañar, con contaminación superficial, otras fuentes acuíferas; para minimizar dicha posibilidad se ha de tomar en cuenta el impacto ambiental, consecuencia de la extracción de los fluidos prácticamente desde el inicio del proyecto geotérmico. La razón de lo anterior es que los fluidos, extraídos, se encuentran cargados con una gran cantidad de especies químicas que pueden ser dañinas para muchas formas de vida, inclusive el hombre. La mejor técnica de protección ambiental es quizá el ensayo de la reinyección dentro del subsuelo, de los fluidos geotérmicos, por medio de la perforación de pozos destinados para dicha actividad.

5.0. EL RECONOCIMIENTO GEOQUIMICO.

En el objetivo fundamental de un estudio de reconocimiento regional que es la integración de un inventario de las áreas termales, los estudios geoquímicos juegan un papel importante puesto que, proveen una estimación de las temperaturas en el subsuelo de una determinada área por medio de la aplicación de diversas técnicas (geotermómetros y modelos de mezcla), así como información cualitativa sobre la extensión de cada sistema hidrotermal [18].

Para poder alcanzar lo antes dicho, la geoquímica realiza las siguientes actividades [18]:

a. Trabajo de Gabinete.

El estudio puede partir de una definición de áreas de interés, basada en la información geológica recopilada sobre las anomalías termales en la región en estudio.

Puede también que existan datos sobre estudios geoquímicos previos, los cuales dependiendo de la calidad de los análisis químicos realizados, podrían proveer información inicial importante.

Una vez integrada esta información inicial y teniendo a disposición laboratorios para análisis químicos, el estudio geoquímico pasa a la siguiente actividad [18].

b. Trabajo de Campo.

b.1. Selección de Sitios para la Toma de Muestras.

El muestreo para la etapa de reconocimiento geoquímico, generalmente será limitado (entre 20 y 25 muestras de a-

guas). Las muestras serán tomadas de las manifestaciones hidrotermales de mayor temperatura (manantiales y pozos domésticos) y fumarolas, así como de aguas no termales (manantiales fríos, pozos domésticos, ríos, lagunas, etc.) [18].

Dependiendo de la cantidad de información previa disponible, podría ser necesario la exploración preliminar de la zona para llevar a cabo una adecuada selección de puntos de muestreo, con el fin de evitar la duplicación de actividades.

En cada manifestación visitada, se toma nota de su temperatura, pH, el flujo estimado, los depósitos sólidos y la apariencia general de la manifestación hidrotermal y/o fría. Su localización se marca en un mapa y se elabora un dibujo esquemático que describa su forma y sus características, de tal manera que resulte posible la localización de todos y cada una de los puntos para otros muestreos confirmatorios o estudios subsecuentes [18].

b.2. Muestreo de Aguas y Manantiales.

Esta actividad se debe llevar a cabo con precaución para asegurar la calidad de información derivable del análisis químico. Las muestras colectadas son: Una sin tratamiento químico y la otra filtrada-acidificada, en envases plásticos con una capacidad de 500 ml. El objetivo de la acidificación es prevenir la posible precipitación de sales de los cationes en solución. Debe evitarse la acidificación sin previa filtración debido a que ésto podría llevar a la disolución de materia que se encuentra en suspensión, y ésto alteraría el quimismo natural de la muestra agua. En el momento del muestreo es necesario medir las características antes mencionadas, propias de la manifestación, además de la conductividad y alcalini-

dad [18].

b.3. Muestreo de Vapor en Fumarolas.

En las áreas termales que presentan manifestaciones en forma de fumarolas, se deberá tomar muestras de vapor para el análisis de gases. El vapor se deberá condensar a través de un serpentín que no admita fugas de ninguna especie, colectándolo en ampollas de más o menos 300 ml de capacidad. Las muestras a tomar en el campo son: vapor condensado neutro (que consiste en provocar la condensación del vapor expulsado por la fumarola), vapor condensado alcalino (en el cual la ampolla donde se colecta el vapor contiene una solución de NaOH 4N) y vapor condensado ácido (la ampolla donde se colecta el vapor contiene una solución de ácido bórico al 2 % p/v) [18,24].

Las ampollas utilizadas en el muestreo deberán prepararse previamente en el laboratorio (ver Capítulo 7).

c. Análisis Químico.

El analista químico deberá trabajar en coordinación con el geoquímico responsable del proyecto y que realiza el muestreo, y ambos deberán discutir sobre las especies químicas que se deberán analizar. Parte del equipo de muestreo del geoquímico podrá ser proporcionado o seleccionado por el encargado del laboratorio de análisis químico [18].

Antes de llevar a cabo los análisis, el responsable deberá ser informado por el geoquímico sobre la naturaleza de las muestras colectadas. Esta cooperación es conveniente puesto que contribuirá a la obtención de resultados de análisis más exactos y mantendrá informado al geoquímico sobre las limitaciones de estos resultados, además de las repercusiones sobre la interpretación [18].

Los análisis más importantes a realizar son:

c.1. Aguas: pH, conductividad, alcalinidad, Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , HCO_3^- , Cl^- , CO_3^{2-} , SO_4^{2-} , F^- , PO_4^{3-} , NO_3^- , NO_2^- , SiO_2 , Al, B, Li, As, etc.

c.2. Vapor: CO_2 , H_2S , H_2 , CH_4 , N_2 , NH_3 , Ar, He, CO, etc.

d. Procesamiento e Interpretación de Resultados.

El principal aporte del estudio geoquímico durante la etapa de reconocimiento, es la estimación de la temperatura en el subsuelo en una determinada área termal, mediante la aplicación de geotermómetros ya sea de gases o de aguas. Estas son relaciones semiempíricas o empíricas que permiten el cálculo aproximado de la temperatura subsuperficial del sistema geotérmico profundo y son función de la concentración de determinados constituyentes químicos ya sea en aguas (iones o sólidos disueltos) o en el vapor (gases) [18,8].

Durante la etapa de reconocimiento, además de la estimación de las temperaturas subsuperficiales, la geoquímica puede permitir la obtención de otro tipo de información. Mediante el uso de modelos de mezcla se puede inferir también la temperatura del subsuelo. Además haciendo uso de los constituyentes químicos de las aguas, se puede hacer una clasificación de éstas, hacer un patrón preliminar de circulación de las mismas, determinar zonas de ascenso de vapor, flujo lateral, ebullición, carga y descarga [8].

e. Integración Geocientífica.

La investigación geoquímica proveerá una estimación de la temperatura del yacimiento para cada área termal explorada en la región bajo estudio. Para las principales áreas geotérmicas identificadas, podrá también proveer una estimación cualitativa del tamaño del sistema hidrotermal y un esquema general de su estructura. Esta información, integrada y complementada con la provista por otras disciplinas geocientíficas aplicadas en

el estudio de reconocimiento, servirá para llevar a cabo la jerarquización preliminar de las áreas termales de acuerdo a su probable potencial, para su ulterior exploración en detalle [18].

En el proceso de síntesis de la información se deberá prestar atención a la concordancia entre los esquemas propuestos por cada disciplina, en forma especial habrá que poner atención en [18]:

- e.1. La coincidencia en la probable ubicación de la fuente de calor.
- e.2. La coincidencia en las estimaciones de la calidad del recurso geotérmico, es decir el potencial que se presenta para la generación eléctrica.
- e.3. La coincidencia en la ubicación de la actividad termal.
- e.4. La coincidencia en los posibles límites geológico y estructurales del sistema hidrotermal.
- e.5. La coincidencia en el esquema preliminar propuesto por la geoquímica con los demás esquemas.

Además de todas estas actividades, se deben de tomar en cuenta factores como incidencia socio-económica de un proyecto geotérmico en la zona de estudio, ambientales, vías de acceso, etc [18].

f. Preparación de un Programa de Actividades para la Etapa de Prefactibilidad.

Como conclusión de la etapa de reconocimiento se prepara un programa de estudios de prefactibilidad para las áreas de mayor interés. Se diseñará un programa de actividades exploratorias geoquímicas de forma general para esta etapa [18].

El objetivo del programa será ratificar la interpretación sobre la existencia de un yacimiento geotérmico.

6.0. INVENTARIO REALIZADO DURANTE EL RECONOCIMIENTO GEOQUIMICO DEL AREA DE CONCHAGUA.

El inventario de manifestaciones de agua o vapor, constituye una actividad que tiene por objetivo evitar el exceso de esfuerzos y gastos innecesarios durante el muestreo de los puntos escogidos. Básicamente consiste en una exploración preliminar del área que se pretende reconocer. Esta actividad es necesario realizarla al inicio de todo reconocimiento exploratorio, especialmente cuando no existe registro de información de las manifestaciones hidrotermales y las características principales de dichos afloramientos, tal como es el caso del reconocimiento geoquímico del área de Conchagua.

6.1. Metodología Empleada para Realizar el Inventario.

Para el inventario de las manifestaciones existentes en los alrededores del volcán de Conchagua (La Unión), fue necesario visitar y recorrer la zona comprendida en el cuadrante 2655 IV. De acuerdo a la metodología sugerida en la literatura [8], se debe contar previamente con un mapa geográfico de la región que se pretende explorar, lo más específico posible con respecto a su escala (para el caso se usó una escala de 1:25,000). En este mapa se fueron ubicando de manera simbólica cada una de las manifestaciones localizadas durante la exploración preliminar. Además, para cumplir los objetivos de esta actividad, debe acompañarse el mapa antes mencionado por todos los datos de identificación para cada afloramiento, los cuales deben ser llevados cuidadosamente ordenados en un cuaderno de campo, para una mayor utilidad en el momento de un posible muestreo.

Tabla 6.1. Información Obtenida sobre las Manifestaciones reconocidas en el Area de Conchagua.

No.	IDENTIFICACION	T °C	CAUDAL L/s	NIVEL msnm [*]	LATITUD [*]	LONGITUD [*]
1	P1	28	---	150.0	240.60	629.80
2	FF1	29	0.5	70.0	241.50	630.40
3	FT1	40	0.6	70.0	241.90	630.50
4	FT2	42	0.2	70.0	242.00	630.40
5	P2	30	---	75.0	241.90	630.10
6	FF2	32	0.5	60.0	240.05	630.00
7	FF3	29	---	200.0	240.38	629.40
8	FF4	33	0.7	100.0	240.30	629.92
9	FT3	85	---	0.0	240.20	630.55
10	FV1	---	---	0.0	240.15	630.60
11	FV2	---	---	0.0	240.10	630.60
12	FF5	25	---	755.0	241.00	626.30
13	FF6	22	---	940.0	240.60	625.40
14	FT4	95	---	0.0	238.40	629.00
15	FT5	42	0.3	0.0	238.40	629.10
16	FV3	---	---	0.0	238.40	629.10
17	FF7	30	0.5	50.0	238.45	629.00
18	FF8	29	0.002	300.0	239.20	628.55
19	FF9	21	0.02	970.0	239.05	625.05
20	FF10	28	1.0	570.0	237.60	624.50
21	FF11	---	---	---	237.80	623.60
22	FF12	25	0.05	430.0	241.66	628.05
23	FT6	---	---	0.0	242.15	631.90
24	FT7	94	---	0.0	241.90	631.50
25	P3	34	---	2.0	241.90	631.70
26	P4	39	---	2.0	241.95	631.70
27	P5	33	---	126.0	243.80	629.70
28	P6	37	---	21.0	242.20	630.00
29	FT8	42	---	0.0	243.70	630.10
30	FT9	---	---	0.0	243.80	629.90

FF: Fuente Fria $t < 40$ °C
 FT: Fuente Termal $t > 40$ °C
 P: Pozos Domésticos
 FV: Fuentes de Vapor o Fumarolas

°C: Grados Centígrados
 L/s: Litros por Segundo
 msnm: Metros sobre el
 nivel del Mar

* Ver Figura 7.7

La información que debe obtenerse de cada manifestación, debe ser aquella que permita obtener un criterio de selección y discriminar aquellos puntos que no representen interés para la exploración geotérmica. Se recomienda obtener principalmente la siguiente información para cada punto visitado [8,17]: Temperatura, caudal estimado, coordenadas geográficas, sin faltar observaciones referentes a las características del afloramiento y la vía de acceso más factible.

El inventario realizado en el área de Conchagua fué realizado en un período de 15 días. La Tabla 6.1 muestra la información más importante derivada de la visita realizada a la región antes mencionada. Se clasificó cada una de las manifestaciones de acuerdo a sus condiciones y naturaleza, así se puede mencionar que aquellas manifestaciones que presentaron una temperatura menor de 40 °C se clasificó como Fuente Fría (FF), si la temperatura medida era mayor de dicho valor entonces se anotaba como Fuente Termal (FT); como un grupo separado se consideró a los Pozos Domésticos (P) y a las fumarolas (FV) debido a su naturaleza.

Para el caso de las fuentes o manantiales, se consideró una temperatura de 40 °C debido a que la temperatura ambiental imperante en esa época del año (primeros días de Abril) oscila alrededor de dicho valor, posiblemente esta situación sería diferente en otra época del año.

7.0 MUESTREO DE MANANTIALES Y FUMAROLAS LOCALIZADAS EN EL AREA DE CONCHAGUA.

En esta etapa se tiene la fase más crítica de todo el estudio de reconocimiento, se debe tener mucho cuidado en la toma de las muestras ya que de éstas se deberá obtener la información requerida por la fase del procesamiento e interpretación geoquímica. Cuanto mayor representativas sean las muestras de fluidos, de manantiales y de fumarolas, más acertados serán los resultados obtenidos al final del reconocimiento geoquímico.

Anteriormente se ha mencionado que la actividad de muestreo debe ser antecedida por un inventario de manantiales (fríos y termales) y de fumarolas. Las manifestaciones de la anomalía térmica de la región, localizadas y elegidas para el muestreo, deberán ser visitadas con el objeto de tomar muestras de fluidos, ya sea de agua o de gases de acuerdo a cada caso.

Los criterios de selección para los manantiales (fríos y termales) y pozos domésticos a muestrear en el área de Conchagua, de acuerdo al Departamento de Exploraciones Geotérmicas de GEOCEL, son principalmente el termalismo, caudal relativo de los fluidos y el acceso.

A continuación se muestran las actividades realizadas durante el muestreo, basadas principalmente en la metodología recomendada por la literatura [8,17,31], incluyendo ciertas variantes sugeridas por la experiencia misma del personal encargado de dicha actividad por parte de GEOCEL, y por las condiciones de cada afloramiento en particular.

7.1. Muestreo de Agua en Manantiales Fríos y Termales.

Deberá tomarse en cuenta que todos los manantiales se encuentran fuera de equilibrio químico, por lo cual se ha mencionado que esta actividad debe realizarse con mucho cuidado.

Las medidas de precaución deberán comenzar mucho antes de llegar al sitio de muestreo, es decir desde la preparación y limpieza de todo el material y el equipo a utilizar en el campo. Por ejemplo los frascos plásticos en los cuales se colocarán las muestras de agua, deberán ser debidamente lavados con Acido Nitríco diluido (0.1 % v/v). Además de los frascos deberá prepararse y calibrarse el equipo portátil de mediciones físicas, químicas y físicoquímicas de las muestras, lo anterior incluye medidores de pH, de Conductividad eléctrica, de temperatura y de Alcalinidad [3,24].

7.1.1. Metodología de Muestreo en Manantiales en el Campo.

De acuerdo a la distribución de puntos marcados en el mapa de la región, durante la fase del inventario, se planifica el recorrido que se llevará a cabo durante la jornada de trabajo, determinándose las rutas de acceso que permitan optimizar al máximo la actividad en cuanto a los factores tiempo y esfuerzo humano [18].

Cuando lo anterior ha sido superado puede iniciarse el transporte del personal y del equipo para iniciar el muestreo. Prácticamente el procedimiento seguido para la toma de muestras de fluidos desde los manantiales es el mismo, sin importar la naturaleza en cuanto a su termalismo, salvo aquellas improvisaciones necesarias de acuerdo a las características propias de cada manifestación, respecto a su facilidad para el muestreo y la estimación del caudal.

El material, reactivos y equipo de muestreo mínimo requerido para las actividades de campo son los siguientes [3]:

- Embudo Büchner.
- Papel Filtro.
- Goteros.
- Mangueras Plásticas.
- Conductivímetro Digital de baterías.
- Microburetas.
- Viñetas y Marcadores.
- Indicador Anaranjado de Metilo.
- Bomba de Vacío Manual.
- Matraz Kitasato.
- Micropipetas (1000 μ L).
- Termómetro Digital.
- Potenciómetro Digital de baterías.
- Frascos Plásticos.
- Agua Desionizada.
- HCl 0.01 N y Concentrado.
- Microbureta.

Extracción de Fluidos del Manantial: Una vez ubicados en el lugar del afloramiento se debe discutir la mejor forma de tomar un volumen suficiente del fluido, por lo general 1.5 o 2 litros suelen ser suficientes ya que los frascos a contener la muestra tienen una capacidad de 500 ml y son dos de éstos para cada manantial los requeridos [31]. La extracción puede realizarse utilizando un recipiente plástico, preferentemente con una capacidad mayor que la antes mencionada.

Medición de Propiedades Físicas, Químicas y Fisicoquímicas: Cuando se ha extraído dicho fluido, es necesario inmediatamente obtener una medición de la temperatura, en caso que la muestra provenga de un afloramiento termal deberá dejarse enfriar luego de medir la temperatura. A continuación se procede a la medición de las propiedades fisicoquímicas (Conductividad y pH), así como el contenido de especies alcalinas mediante una microtitulación por cuadruplicado (tomando un volumen de muestra igual a 1 ml con una micropipeta portátil), utilizando Anaranjado de Metilo como indicador y HCl 0.01 N como titulante (Figura 7.1).

Toma de la Muestra: Luego de lo anteriormente expuesto, se procede a filtrar una cantidad de aproximadamente 1.5 litros del fluido, considerando un exceso de 500 ml por una posible pérdida durante el

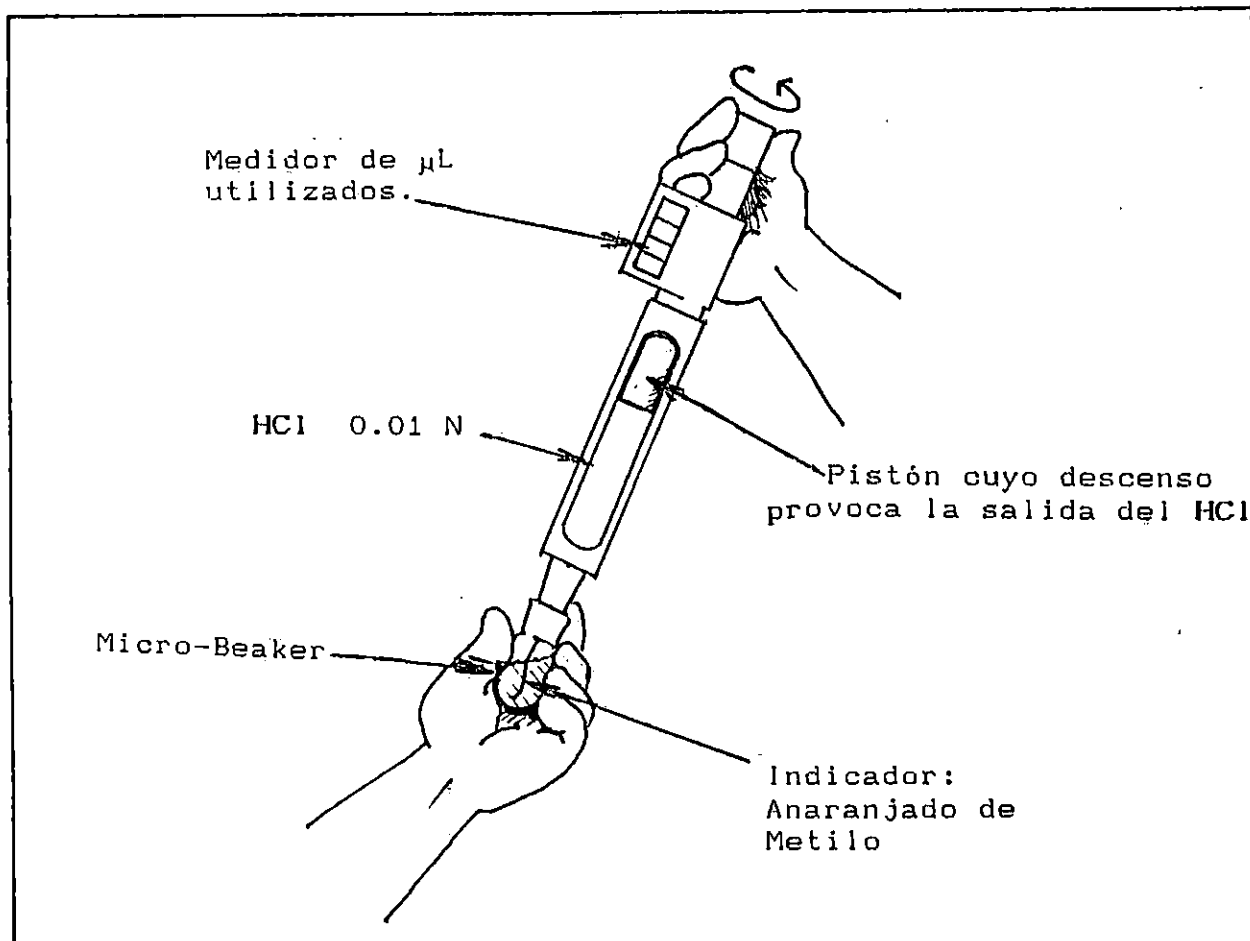


Figura 7.1. Microtitulación Realizada para la Determinación de la Alcalinidad, durante el Muestreo de Manantiales.

llenado de los frascos. La filtración se lleva a cabo haciendo uso de un embudo Büchner, en el cual se colocará el medio filtrante (papel filtro Whatman 40) y de un matraz Kitasato.

Para facilitar y acelerar el procedimiento de filtrado se emplea una pequeña bomba manual de vacío, que se adapta al Kitasato mediante una manguera plástica (Figura 7.2). A continuación de la filtración se coloca una cantidad de 500 ml del filtrado en cada uno de los dos frascos destinados a contener las muestras para cada manantial visitado, uno de ellos debe ser acidificado (añadiendo 5 gotas aproximadamente de HCl concentrado) para regular el pH de la

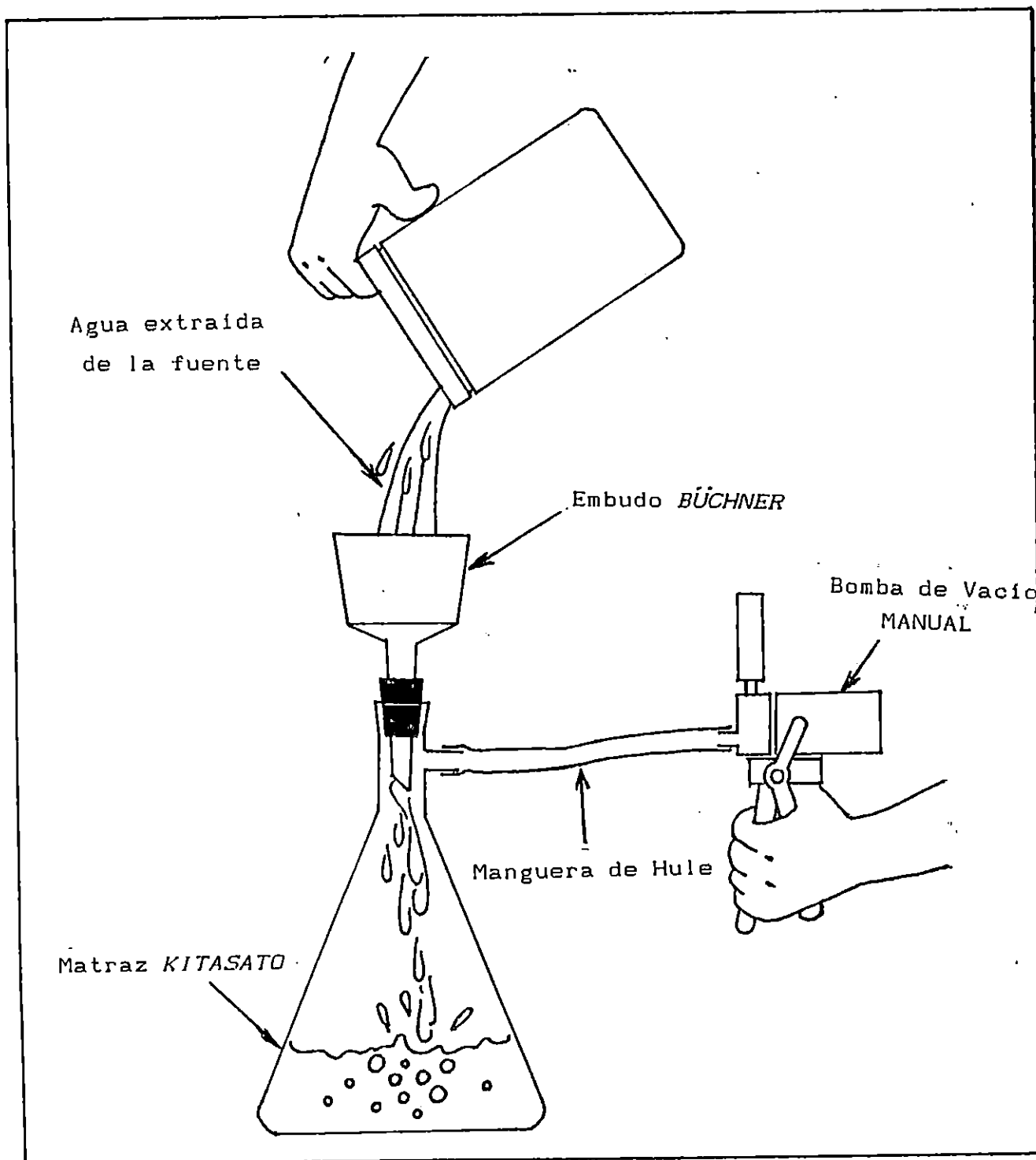


Figura 7.2. Procedimiento de Filtrado de Agua, durante el Muestreo de Manantiales.

muestra [31], hasta un valor abajo de 3.0, ésto se hace con el objeto de evitar la posible precipitación de sales de Ca^{2+} , Mg^{2+} y otros cationes, así como la polimerización de la Sílice [25]. Es necesario evitar la acidificación mencionada cuando la muestra no ha sido filtrada ya que ésto ocasionaría la disolución de materia en suspensión.

Algunas aclaraciones necesarias para la realización de un buen muestreo, son por ejemplo [31]:

- a. Cada frasco destinado a contener la muestra hasta el momento del análisis químico debe ser previamente enjuagado con el fluido de la fuente, ésto con el objeto de evitar cualquier contaminación involuntaria de los fluidos a contener.
- b. Debe rotularse con una viñeta cada frasco, en la cual debe anotarse toda la información que identifica a cada fuente como lo es la temperatura de la muestra, la temperatura ambiente (que debe determinarse al momento de visitar cada sitio de muestreo), pH, conductividad, código de identificación del afloramiento, fecha, alcalinidad o volumen obtenido en la microtitulación y cualquier observación necesaria (como el nombre del sitio, que aparece en el mapa geográfico).
- c. Para cada fuente o pozo doméstico se ha mencionado que se colectan dos muestras, una acidificada y la otra sin acidificar, en la viñeta se coloca "FA" y "FU" respectivamente para su posterior uso en el laboratorio de análisis químico, además debe anotarse en la misma la temperatura del manantial (o pozo), temperatura del ambiente, Conductividad eléctrica, pH, fecha del muestreo, identificación de la fuente (o pozo) y cualquier observación necesaria.

7.2. Muestreo de Gases en Fumarolas.

Una de las manifestaciones de la "Anomalía Geotérmica" observada en los campos geotérmicos está constituida por las fugas de gases o

vapores del subsuelo, a estas manifestaciones se les conoce con el nombre de "fumarolas" y debido a las condiciones del fluido expulsado (como gas o vapor, o ambos) las consideraciones para su muestreo deben ser de mayor cuidado.

Debe tomarse en consideración un alto grado de precaución, durante el muestreo en fumarolas, principalmente por la elevada temperatura que presentan estos gases o vapores y para obtener información confiable, derivada del análisis químico, debe evitarse al máximo la contaminación por mezcla de los gases con el aire atmosférico y para lo cual deben seguirse las recomendaciones dadas a continuación [24].

7.2.1. Actividades previas al Muestreo de Fumarolas.

Previamente a la visita del lugar o lugares definidos para el muestreo, tanto de fumarolas como de manantiales, deberá planificarse cuidadosamente las actividades a realizar antes de ir al campo, éstas van a depender en gran medida de las características observadas en las manifestaciones, durante la etapa del inventario. Para el muestreo en fumarolas debe seguirse, en general, la metodología mostrada a continuación [24]:

- a. Realizar la planificación de todo el trabajo de campo.
- b. Definir la lista del material y equipo requerido para llevar a cabo la actividad, previendo hasta el último inconveniente. Por lo general esta lista debe contener como mínimo el siguiente material y equipo:

- Ampollas ROTAFLO (Figura 7.3 y 7.4).	- Embudos Metálicos de diferente tamaño.
- Bomba Manual para Vacío.	- Sombrilla Grande.
- Mangueras de Hule.	- Hielera.
- Termómetro Digital.	- Implementos para Excavar.

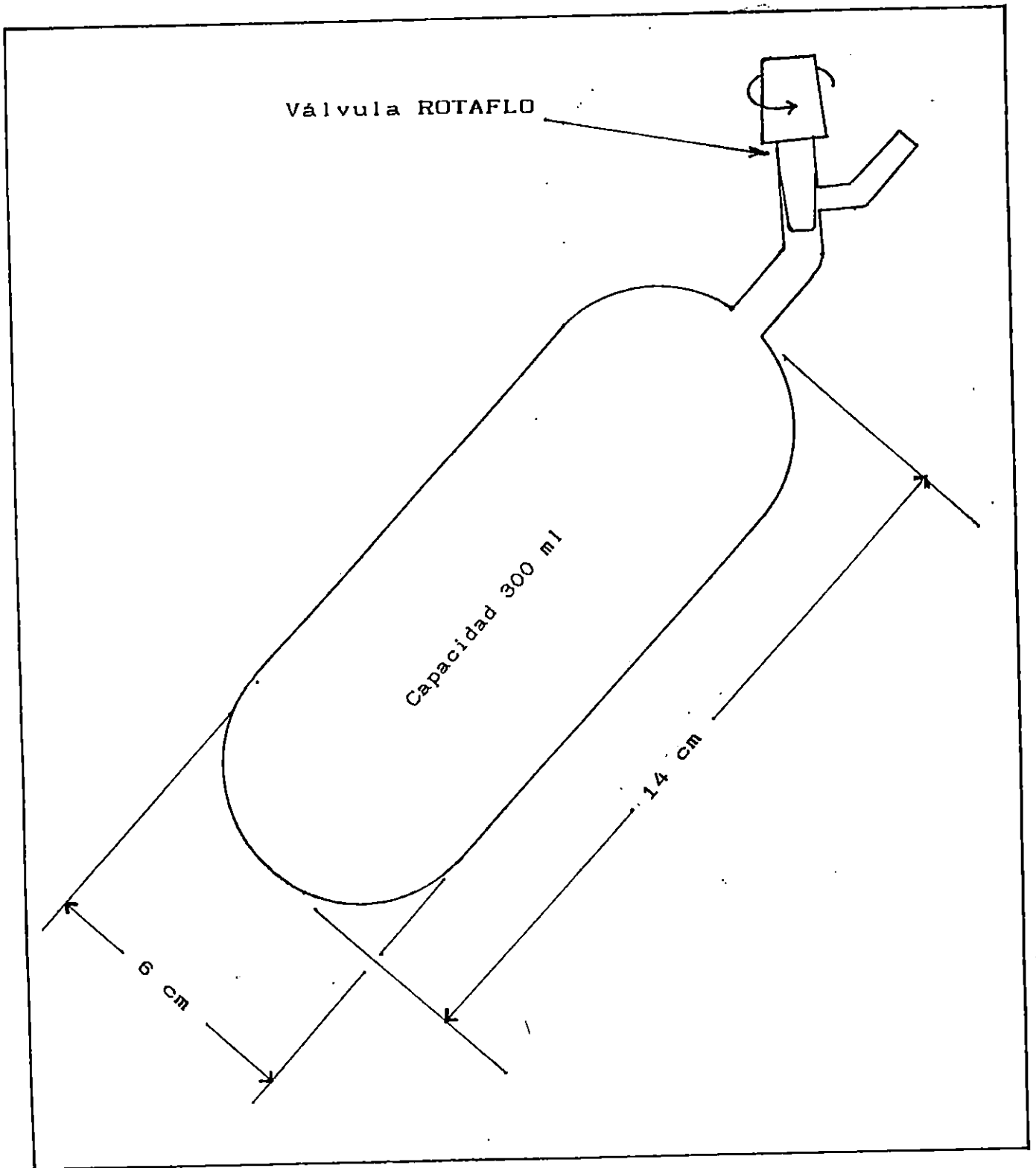


Figura 7.3. Ampolla con Un Sólo ROTAFLO para el Muestreo en Fumarolas.

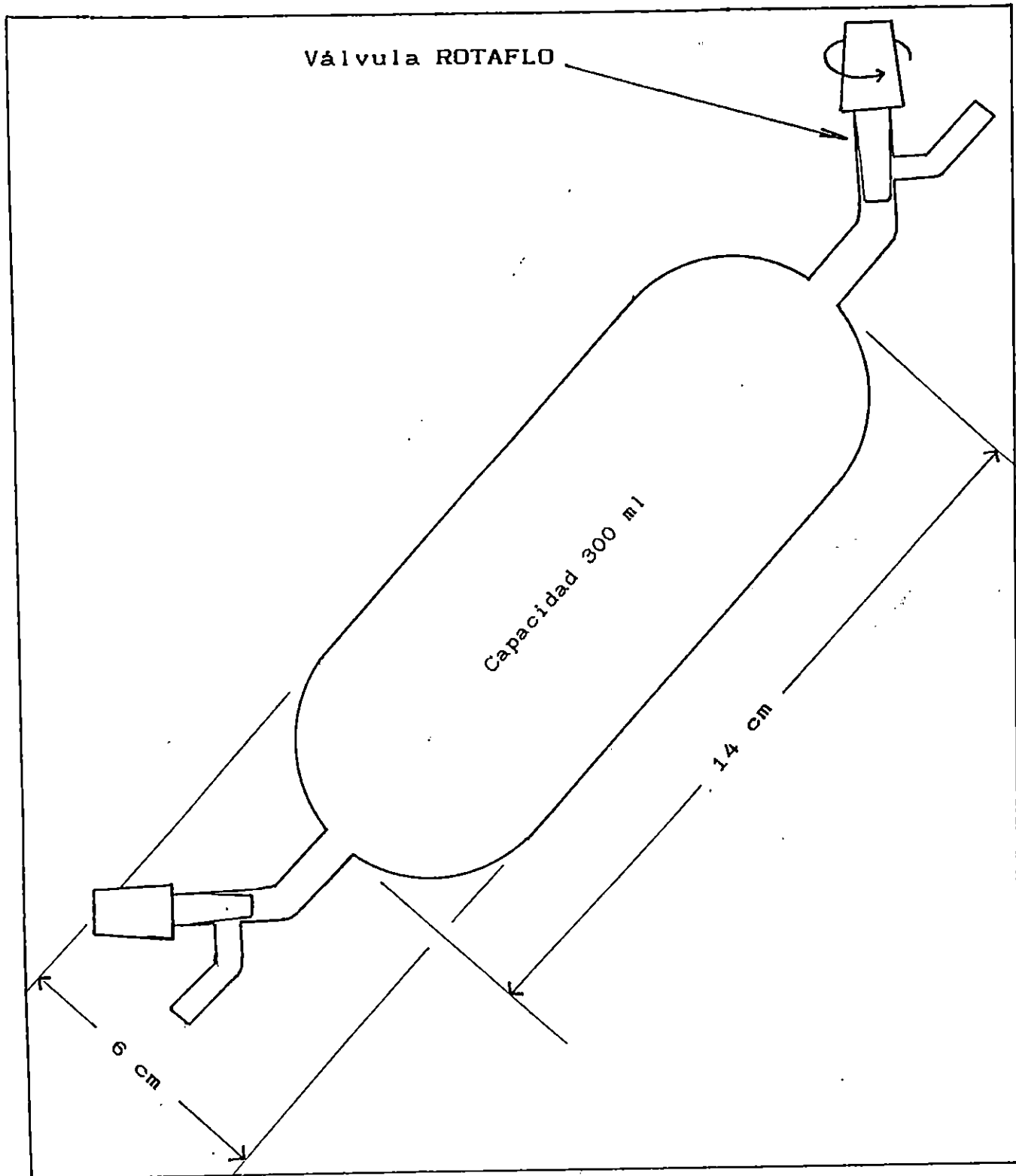


Figura 7.4. Ampolla con Doble ROTAFLO para el Muestreo en Fumarolas.

- c. Asegurar que todo el material, plástico o de vidrio, a utilizar en el campo se encuentre perfectamente limpio y en la cantidad necesaria que asegure la disponibilidad de ellos, en el momento de necesitarlos en el campo.
- d. Practicar un vacío (entre 758 y 760 mm Hg) a las ampollas limpias, pesarlas y determinar su volumen exacto para el caso de que éstas sean nuevas (si las ampollas han sido usadas anteriormente este dato ya es conocido), colocar un volumen de 50 ml de NaOH 4N (disolver 160 g en un litro de agua desionizada) en algunas de las ampollas y en igual número un volumen de 50 ml de H_3BO_3 2% p/v (disolviendo 20 g en un litro de agua desionizada). Luego de haber colocado las soluciones antes mencionadas se debe practicar nuevamente un vacío equivalente al primero y al final se pesan las ampollas, con todo y la solución [24].
- e. Cargar el vehículo (pick-up) con todo el equipo.

7.2.2. Metodología del Muestreo de Fumarolas en el Campo.

Antes de iniciar las actividades propias del muestreo se debe hacer una revisión al mapa obtenido durante el inventario de localización de las manifestaciones, con el objeto de optimizar el acceso a las fumarolas y evitar pérdida de tiempo [18].

Una vez determinadas las mejores rutas de acceso a cada manifestación y en el momento de trasladarse al campo se debe obtener cierta cantidad de hielo, el cual se utiliza para provocar una rápida condensación de los vapores colectados en cada fumarola. Si la actividad se extiende por varios días, el hielo debe ser obtenido a diario.

Acondicionamiento de la Fumarola: El muestreo se inicia con un reconocimiento y evaluación de las características del afloramiento, sólo así se pueden establecer las acciones necesarias para acondi-

cionar el lugar en cuanto al ajuste del equipo de toma de muestras. Para esta actividad se requiere de herramientas de excavación como palas, barras, picos, etc. En caso de ser necesario, se debe colocar una sombrilla "playera" que pueda proteger al personal de muestreo de los rayos solares [24].

Instalación del Equipo: Una vez acondicionado el lugar, se procede a instalar el equipo de colección de los vapores comenzando con la colocación del embudo metálico sobre la fumarola. El tamaño del embudo a utilizar va a depender del diámetro de la manifestación misma. Debe sellarse toda la periferia del embudo, con tierra o lodo, de la manera más hermética posible y luego es necesario dejar un espacio de tiempo para permitir el desalojo del aire encerrado en el embudo, ésto debe hacerse antes de proceder a colocar el resto del equipo, con ello se evita la contaminación de la muestra con aire atmosférico.

La Toma de Muestras: Cuando se ha purgado lo suficiente, se coloca en la boca del embudo una manguera de hule con el objeto de poder instalar las ampollas de muestreo. Las muestras a coleccionar suelen ser de tres tipos diferentes, cada una destinada a realizar el análisis químico de diferentes especies químicas.

a. La Muestra Alcalina:

Se instala una ampolla conteniendo la solución de NaOH 4N, asegurándose que el acople de la manguera y la boca de la ampolla quede ajustado para evitar la contaminación de la muestra con aire. Colocar la ampolla en la posición mostrada en la Figura 7.5, así se obliga a los vapores a que burbujeen en el seno de la solución. Una vez colocada la ampolla en esta posición se abre la válvula que permite el paso de los fluidos provenientes de la fumarola. Para evitar el sobrecalentamiento de la ampolla se debe introducir en un recipiente conteniendo agua fría con hielo. El tiempo considerado para la colección de la muestra va a depender del flujo que presente la fumarola, puede variar desde unos pocos minutos hasta 4 horas.

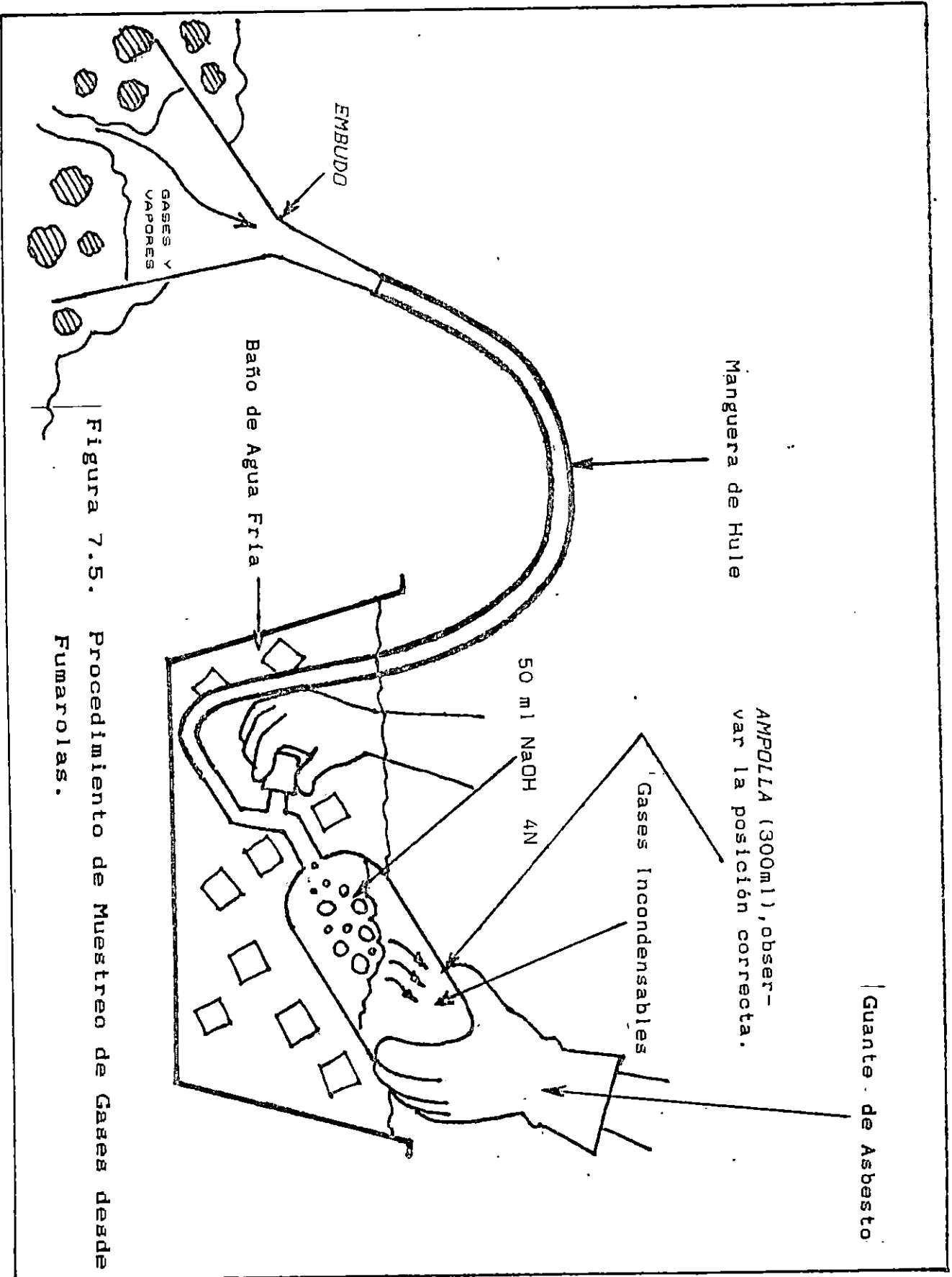


Figura 7.5. Procedimiento de Muestreo de Gases desde Fumarolas.

Para nuestro caso particular, el tiempo de muestreo fué muy diferente en cada fumarola muestreada, así en Playitas el tiempo de muestreo consumió unas 2.5 horas y en los otros sitios (Chiquirín y El Cágano) el tiempo requerido fué mucho menor. Para este tipo de muestreo debe usarse exclusivamente ampollas con un sólo ROTAFLO (Figura 7.3), se debe a que este tipo de muestreo es usado para el análisis de gases incondensables y condensables de naturaleza ácida, éstos deben quedar atrapados dentro de la ampolla sin lugar a fugas [24].

El condensado obtenido de la manera antes planteada se utiliza en el laboratorio para la determinación de CO_2 y H_2S [1]. Además, los gases incondensables colectados se analizan en el laboratorio por medio de la cromatografía de gases, esto incluye N_2 , H_2 , CH_4 , Ar, etc.

b. La Muestra Acida:

El procedimiento a seguir para la muestra ácida es exactamente el mismo descrito anteriormente, con la diferencia que la ampolla no contiene NaOH sino H_3BO_3 con una concentración de 2% p/v aproximadamente. Para este caso se emplean ampollas con dos ROTAFLO (Figura 7.4), ya que éstas permiten utilizar la otra válvula para instalar una pequeña bomba de vacío y así se facilita mucho el flujo de vapores dentro de la ampolla (ver Figura 7.6), obteniéndose mucho más condensado, el cual es de interés ya que se utiliza en el laboratorio para la determinación del NH_3 [3].

c. La Muestra Neutra:

La mecánica a seguir para la obtención de este tipo de muestra es la misma, lo único es que la ampolla no necesariamente debe ser ROTAFLO y además no se coloca solución alguna en ella ya que lo único que interesa es la obtención del vapor condensado. El condensado obtenido en esta muestra se utiliza en la determinación de SiO_2 y del pH de dichos vapores [3].

Al final del muestreo de cada fumarola debe hacerse algunas mediciones necesarias, tal como la temperatura de las vapores expulsados por la manifestación y la temperatura ambiente, éstos datos deben anotarse acompañados de observaciones, la identificación de cada fumarola, fecha del muestreo y cada frasco además debe rotularse con el sitio de su procedencia.

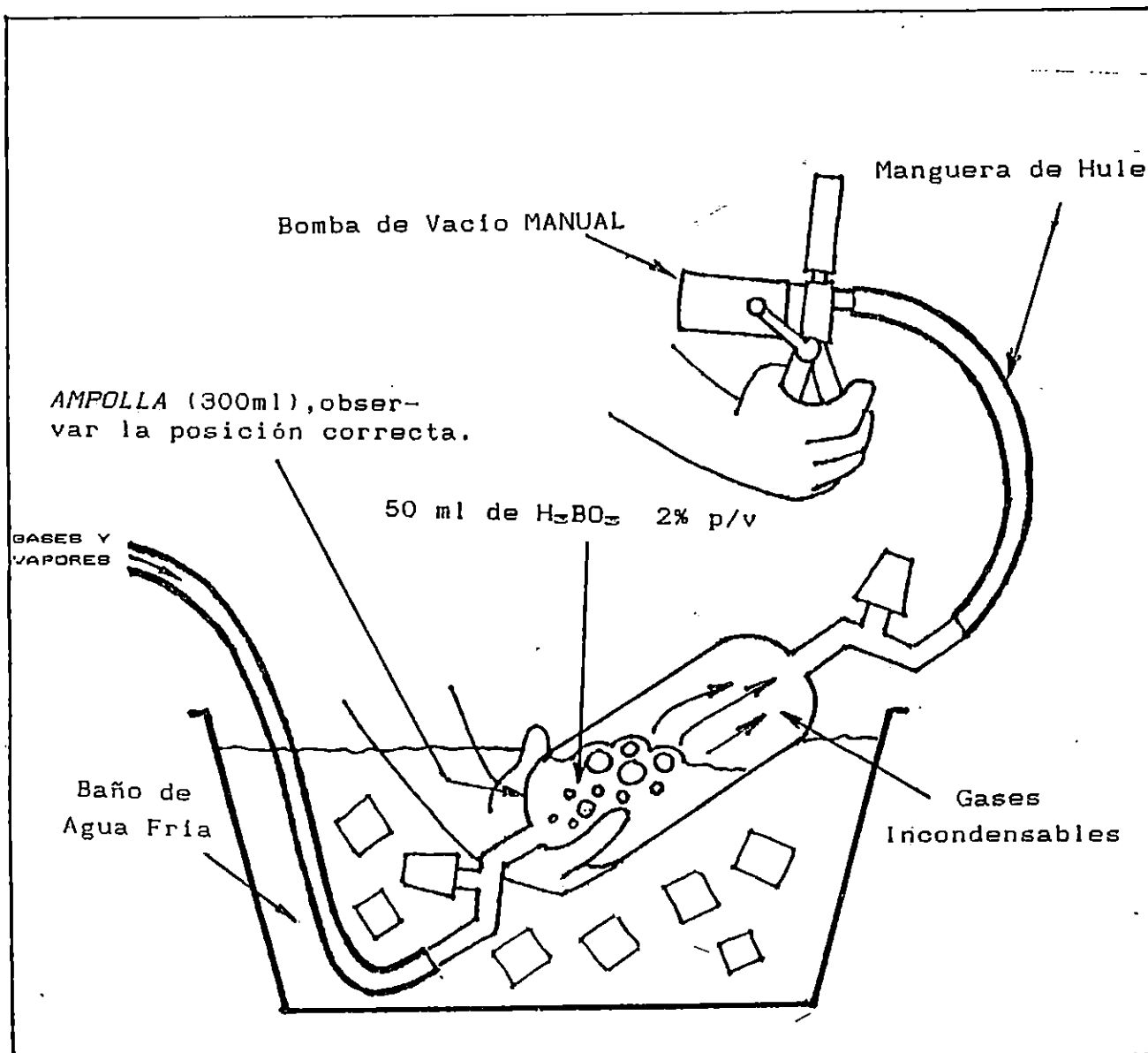
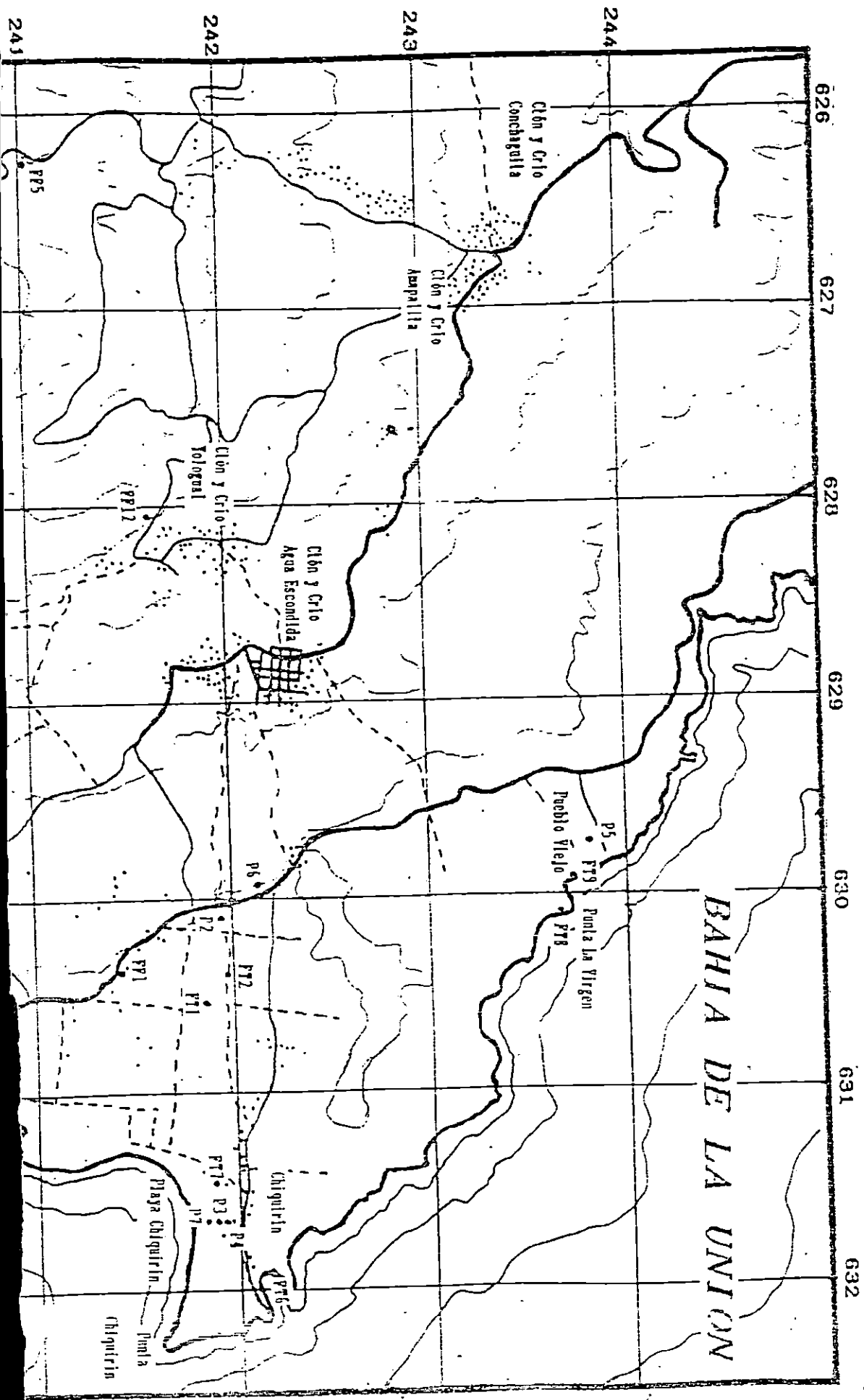


Figura 7.6. Procedimiento para la toma de la muestra Ácida desde fumarolas.

La distribución de los puntos muestreados en los alrededores del volcán Conchagua se muestran en la Figura 7.7, en dicha figura se presenta la identificación de cuatro tipos diferentes de manifestaciones: las Fuentes Frías, representadas como (FF#); los Pozos Domésticos representados como (P#); las Fuentes Termales que se representan por (FT#); y las Fumarolas o Fugas de Vapor, representadas por (FV#).

Como se podrá observar, la mayor parte de Fuentes Termales se encuentran localizadas en las cercanías de la costa; las Fumarolas localizadas en la zona son muy pocas, aunque es importante para el estudio haber identificado algunas de ellas.



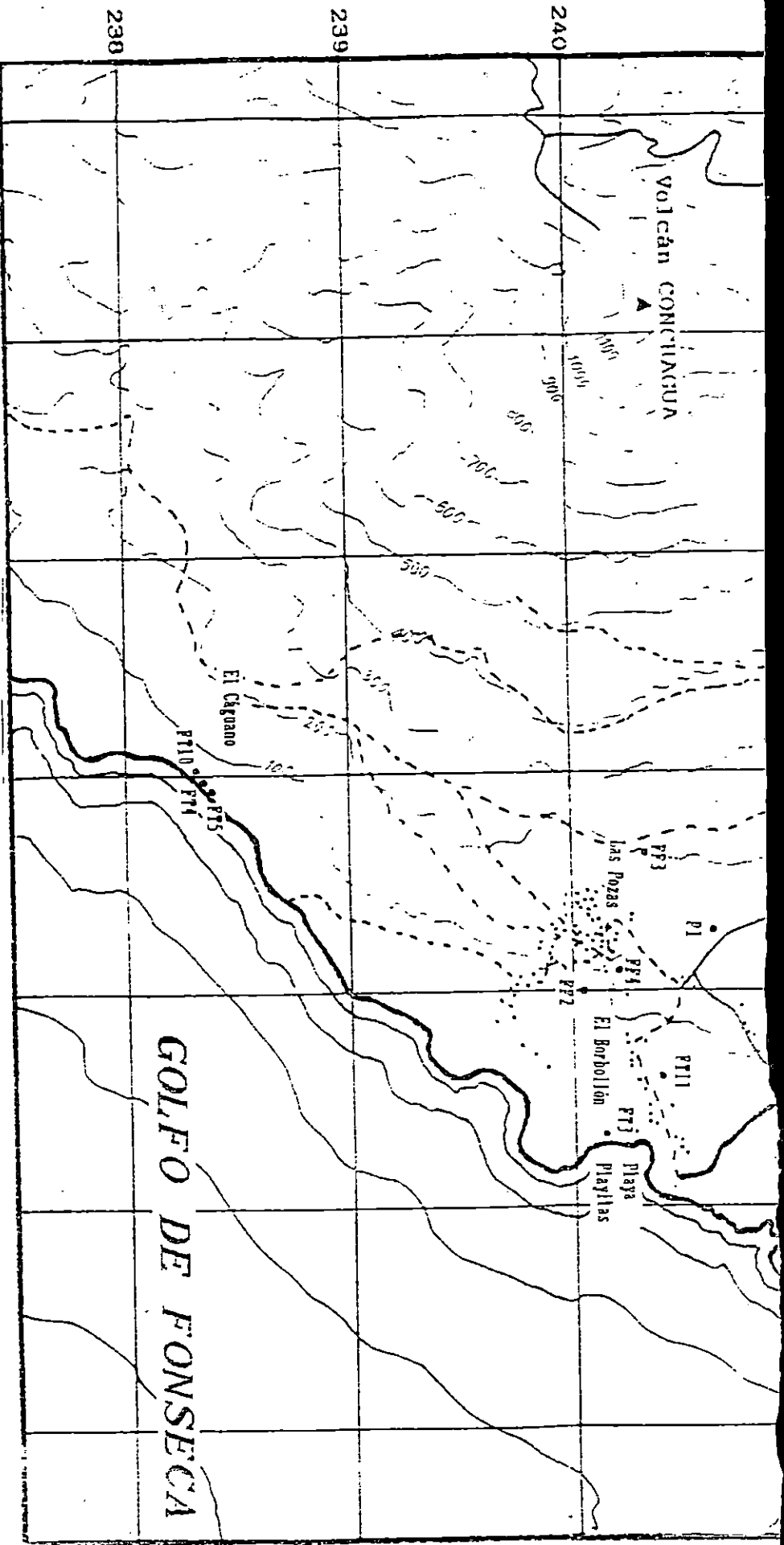


Figura 7.7 Ubicación de los Puntos Muestreados en el Area de Conchagua [*].

* Instituto Geográfico Nacional "Ingeniero Pablo Arnoldo Guzmán", (Septiembre de 1988), República de El Salvador, Hoja 2655 IV
 Escala 1:25000, Primera Edición

8.0. ANALISIS QUIMICO DE LAS MUESTRAS COLECTADAS EN EL AREA DE CONCHAGUA.

La principal importancia del análisis químico en todo estudio de reconocimiento geoquímico, es que permite desarrollar una clasificación de los fluidos que facilita la caracterización del campo. Mediante el quimismo de los fluidos expulsados por cada manantial, o cada fumarola, es posible determinar en forma preliminar el esquema geotérmico del campo, ya sea en forma cualitativa o en forma cuantitativa.

Se ha mencionado anteriormente que durante la etapa de muestreo de los fluidos deberá tenerse mucho cuidado, sobre todo minimizando una posible contaminación de ellos, y así tendrá mayor confiabilidad la información obtenida del análisis químico.

Las muestras colectadas en el área de Conchagua fueron confiadas para el análisis químico a los Laboratorios del Centro de Investigaciones Geotérmicas (CIG) de GEOCEL.

8.1. Análisis Químico de Fluidos de Fuentes, Pozos Domésticos y Fumarolas.

Las técnicas de análisis químico utilizadas regularmente, en el Centro de Investigaciones Geotérmicas (CIG), para la cuantificación de cada especie química se plantean a continuación.

8.1.1. Espectrofotometría de Absorción Atómica [3,11,25].

La cantidad de energía absorbida cuando un haz de luz a una determinada longitud de onda que pasa a través de una nube de átomos libres o en estado fundamental, es el concepto básico para el desarrollo de la metodología de absorción atómica. Los átomos libres en estado fundamental al absorber dicha energía en forma de luz pasarán a estados altos de energía, pues sus electrones serán excitados a orbitales superiores. La medición de la cantidad de luz absorbida determina en forma cuantitativa la cantidad del elemento presente. El uso de fuentes especiales para producir la luz de cada elemento químico específico y la cuidadosa selección de la longitud de onda permite cuantificar el elemento de interés en presencia de otros.

La nube de átomos requeridos para la medición por absorción atómica es producida al suministrarle suficiente energía a la muestra para disociar los componentes químicos en átomos libres, este proceso se realiza, colocando una solución de la muestra a una llama, a un horno de alta temperatura, a un vapor frío, etc, alineado a la fuente de luz.

Bajo estas condiciones propias, la mayoría de átomos se mantendrán en la forma de energía básica y serán capaces de absorber luz a una longitud de onda que procede de una lámpara, de cátodo hueco o sin cátodo.

8.1.1.1. Instrumentación de la Absorción Atómica [3,11].

Cada espectrofotómetro de absorción atómica debe tener al menos tres componentes básicos: Fuente de luz (lámpara), celda de muestra (llama) y un medio de medición de luz específica (monocromador y fototubo multiplicador).

La fuente de luz requiere que emita agudas líneas atómicas del elemento a ser determinado. Una de las fuentes usadas más ampliamente es la lámpara de cátodo hueco. Estas lámparas son diseñadas para emitir espectros atómicos de un elemento particular y las lámparas específicas son seleccionadas para su uso dependiendo del elemento a ser determinado. La selección de una fuente específica y una longitud de onda particular en esa fuente es lo que permite la determinación de un elemento seleccionado en presencia de otros. La luz aislada por el monocromador es dirigida al detector, el cual sirve como el ojo del instrumento. Este es el fototubo multiplicador, el cual produce una corriente eléctrica dependiendo de la intensidad de luz recibida. La corriente eléctrica desde el fotomultiplicador es entonces ampliada y procesada por los instrumentos electrónicos para producir una señal. Esta señal puede ser procesada para producir una lectura directamente en unidades de concentración o de otro tipo.

La muestra en solución es aspirada a través del nebulizador y "atomizada" (como un fino aerosol) dentro de una cámara de mezcla. Aquí la muestra como aerosol es mezclada con el combustible y el gas oxidante y conducida a la cabeza del quemador donde la combustión y la formación de los átomos libres ocurre en la llama formada.

8.1.2. Elementos Analizados [3].

De acuerdo a la rutina seguida en los laboratorios del CIG (GEO-CEL), los elementos analizados por la técnica de la espectrofotometría de absorción atómica son los siguiente: Sodio, Potasio, Calcio, Magnesio, Silicio, entre otros. El equipo utilizado es el Perkin-Elmer 3100.

A continuación se presenta el desarrollo de la técnica empleada para la determinación de cada una de las especies mencionadas, aunque es necesario aclarar que cada una de las técnicas de análi-

sis presentadas corresponde a la información proporcionada al respecto por el personal del Centro de Investigaciones Geotérmicas de GEOCEL.

8.1.2.1. Análisis de Sodio (Na^+) [3,25].

a. Preparación de la Solución Estándar de Sodio: La solución estándar tiene una concentración de 1000 ppm. Para obtener esta solución se disuelven 2.542 g de NaCl, en agua desionizada y luego aforar a un litro con el mismo tipo de agua. A partir de esta solución, así preparada, se extraen alicotas que permitan la preparación de soluciones patrones diluidas (25,75,150 ppm), con el objeto de obtener la curva de calibración del elemento. Sus concentraciones dependerán de la concentración de dicho elemento en las muestras a analizar.

b. Acondicionamiento del Equipo: Se requiere que el equipo se encienda 30 minutos antes de cada análisis para permitir su estabilización. Es necesario llevar el equipo a las condiciones óptimas de operación, que se resumen en las siguientes especificaciones:

Corriente de lámpara:	10 mA
Longitud de Onda:	298.3 - 300.5 nm
Presión del Combustible:	8 - 10 psi
Presión del Oxidante:	40 - 75 psi
Flujo del Combustible:	10.2 L/min
Flujo del Oxidante:	33.46 L/min
Oxidante-Combustible:	Aire-Acetileno

c. Procedimiento de Análisis: Afortunadamente el equipo de absorción atómica con que se cuenta en el CIG presenta una gran ventaja de análisis, su operación es controlada por un sistema de computación adaptado al resto del equipo y su programación se vuelve bastante mecánica. Los pasos principales de su operación se resumen en lo siguiente:

- c.1. Introducir el número de réplicas del análisis.
- c.2. Introducir la concentración de los patrones en la memoria del equipo, medir su concentración real y luego recalibrar dichos valores, ésto con el objeto de permitir al computador la construcción de la curva de calibración.
- c.3. Medir la concentración del elemento en la(s) muestra(s).
- c.4. Solicitar los valores de concentración al equipo, debido a que la curva de calibración construida permita obtener su valor en unidades de concentración en forma directa.
- c.5. Si es necesario debe utilizarse una dilución de la muestra y luego tomar en cuenta su valor en el cálculo final.

B.1.2.2. Análisis de Potasio (K^+) [3,25].

- a. Preparación de la Solución Estándar de Potasio: La solución estándar también tiene una concentración de 1000 ppm. Para obtenerla se disuelven 1.907 g de KCl en agua desionizada y luego diluir a un litro. A partir de esta solución se preparan las soluciones patrones diluidas (5,15,30 ppm), con el objeto de obtener la curva de calibración del potasio.
- b. Acondicionamiento del Equipo: Al igual que lo indicado en el análisis de Sodio se requiere que el equipo se encienda 30 minutos antes de cada análisis. Es necesario llevar el equipo a las condiciones óptimas de operación, que se resumen en las siguientes especificaciones:

Corriente de lámpara:	12 mA
Longitud de Onda:	386.6 nm
Presión del Combustible:	8 - 12 psi
Presión del Oxidante:	40 - 75 psi
Flujo del Combustible:	8.8 L/min
Flujo del Oxidante:	27.4 L/min
Oxidante-Combustible:	Aire-Acetileno

- c. Procedimiento de Análisis: Se debe seguir exactamente los pasos indicados en el literal "c" del numeral 8.1.2.1.

8.1.2.3. Análisis de Calcio (Ca^{2+}) [3,25].

- a. Preparación de la Solución Estándar de Calcio: La solución estándar tiene una concentración de 500 ppm. A 1.249 g de CaCO_3 Estándar Primario agregar 50 ml de agua desionizada. Agregar gota a gota un volumen mínimo de HCl (aproximadamente 10 ml), para efectuar la completa solución del carbonato. Diluir a un litro en agua desionizada. A partir de esta solución preparar las soluciones patrones diluidas (5,15,30 ppm), con el objeto de obtener la curva de calibración del calcio.

- b. Acondicionamiento del Equipo: Al igual que lo indicado en el análisis de Sodio se requiere que el equipo se encienda 30 minutos antes de cada análisis. Es necesario llevar el equipo a las condiciones óptimas de operación, que se resumen en las siguientes especificaciones:

Corriente de lámpara:	10 mA
Longitud de Onda:	214 - 218 nm
Presión del Combustible:	8 - 12 psi
Presión del Oxidante:	40 - 75 psi
Flujo del Combustible:	8.8 L/min
Flujo del Oxidante:	22.15 L/min
Oxidante-Combustible:	Aire-Acetileno

- c. Procedimiento de Análisis: Se debe seguir exactamente los pasos indicados en los análisis anteriores, es decir los indicados en el literal "c" del numeral 8.1.2.1.

8.1.2.4. Análisis de Magnesio (Mg^{2+}) [3,25].

- a. Preparación de la Solución Estándar de Magnesio: La solución estándar tiene una concentración de 1000 ppm. Cuidadosamente disolver 1 g de cintas de magnesio en un volumen mínimo de HCl (1+1). Diluya a un litro con HCl 1 % v/v. A partir de esta solución se preparan las soluciones patrones (5,15,30 ppm).
- b. Acondicionamiento del Equipo: Al igual que lo indicado en el análisis de Sodio se requiere que el equipo se encienda 30 minutos antes de cada análisis. Las condiciones óptimas de operación son las siguientes:

Corriente de lámpara:	10 mA
Longitud de Onda:	285 nm
Presión del Combustible:	8 - 12 psi
Presión del Oxidante:	40 - 75 psi
Flujo del Combustible:	8.1 L/min
Flujo del Oxidante:	25.38 L/min
Oxidante-Combustible:	Aire-Acetileno

- c. Procedimiento de Análisis: Se debe seguir exactamente los pasos indicados en los análisis anteriores.

8.1.2.5. Análisis de Silicio (Si) [3,25].

- a. Preparación de la Solución Estándar de Silicio: Se debe preparar una solución estándar que tenga una concentración de 1000 ppm. Para obtener esta solución fusionar 0.2139 g de SiO_2 con 2 g de Na_2CO_3 en un crisol de Platino. Disolver la mezcla con agua desionizada, transferirla en un frasco volumétrico de 100 ml y aforar. A partir de esta solución se preparan las soluciones patrones diluidas (25,75,50 ppm).

- b. Acondicionamiento del Equipo: Al igual que lo indicado en los análisis anteriores se requiere que el equipo se encienda 30 minutos antes de cada análisis. Las condiciones óptimas de operación son las siguientes:

Corriente de lámpara:	40 mA
Longitud de Onda:	252 nm
Presión del Combustible:	8 - 12 psi
Presión del Oxidante:	30 - 40 psi
Flujo del Combustible:	7.4 L/min
Flujo del Oxidante:	13 L/min
Oxidante-Combustible:	N ₂ O-C ₂ H ₄

- c. Procedimiento de Análisis: Se debe seguir exactamente los pasos indicados en los análisis anteriores, la única diferencia es que el valor de concentración obtenido corresponde a la cantidad de Silicio, deberá hacerse la transformación a concentración de Sílice total multiplicando por la relación de peso moleculare de SiO₂ respecto al de Si.

8.2. Cromatografía.

8.2.1. Cromatografía Iónica [22].

La cromatografía iónica es usada para determinaciones rápidas y confiables de iones comunes con un pK menor de siete (tales como Sulfatos, Cloruros, Nitratos, etc.) tanto en sustancias simples como complejas.

Esta técnica es una combinación de intercambio iónico y detección conductimétrica para la caracterización y cuantificación de la concentración de los iones. El separador pelicular de la columna (fase estacionaria) proporciona alta resolución (grado de separación selectiva de los componentes de una muestra) y eficiencia en la separación de especies iónicas a moderadas presiones .

La separación de las especies iónicas de la muestra es el resultado de la diferencia relativa de afinidad de los iones para su fijación en los sitios activos de la columna. Las especies con más alta afinidad con el material de empaque de la columna presentan un tiempo de retención mayor, y como ésto es característico para cada una de ellas es posible identificarlas de acuerdo a su tiempo de retención.

La columna supresora se encuentra involucrada en un número de reacciones químicas importantes. Una reacción es la conversión de la alta Conductividad eléctrica del eluente a una forma de más baja conductividad.

La Conductividad eléctrica, es generalmente, siempre una función de la concentración acuosa de las especies iónicas y este principio es

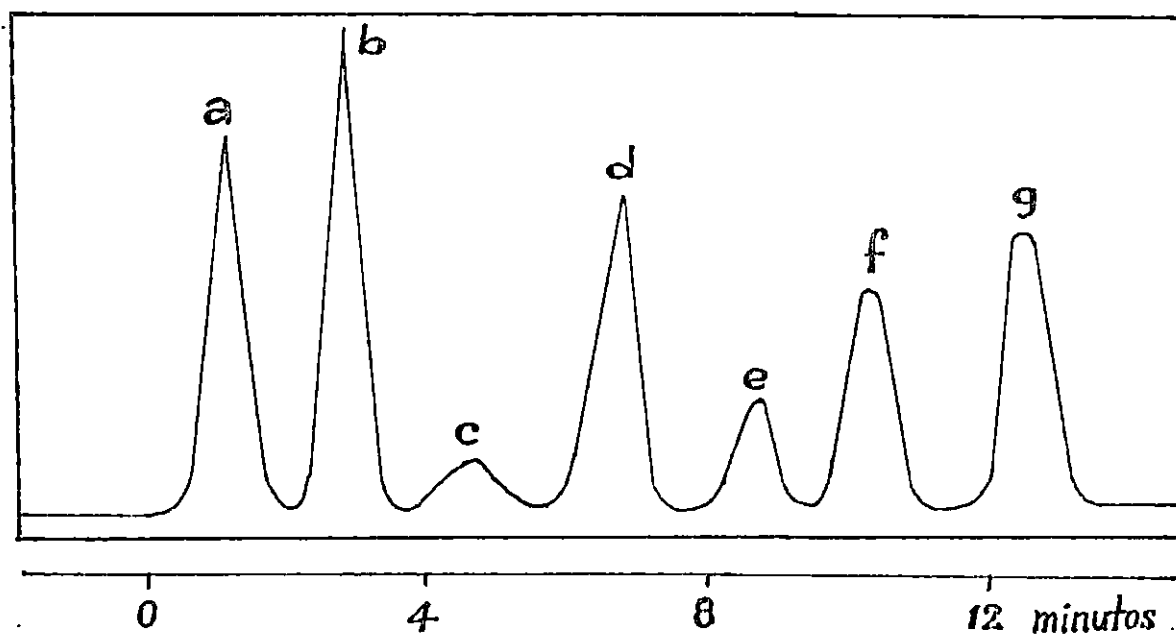


Figura 8.1. Cromatograma generado durante el análisis de especies aniónicas [22]: a. F^- , b. Cl^- , c. NO_2^- , d. PO_4^{3-} , e. Br^- , f. NO_3^- , g. SO_4^{2-} .

mejor aplicado a bajas concentraciones, que son a las que trabaja la cromatografía iónica y en base a la Conductividad eléctrica es que se cuantifica un ión; la caracterización de cada especie se basa en la selectividad particular, respecto al material de empaque de la columna.

El resultado de un análisis por cromatografía iónica genera un cromatograma que es la base para la determinación de iones buscados, la Figura 8.1 muestra la presentación típica de un cromatograma generado durante el análisis de aniones.

8.2.1.1. Teoría de la Columna [3].

La columna analítica es la parte fundamental de la cromatografía iónica; y que se define como un tubo relativamente angosto de diámetro, que está empacado con materiales cromatográficos, usualmente una resina (poliestireno) o un material de sílice, y en la cual se lleva a cabo la separación selectiva de los componentes de la muestra. La propiedad esencial de una columna es que ésta tenga buena resolución, es decir una gran capacidad de separar un componente del otro.

Una de las características de todas las columnas de intercambio iónico es que poseen alta eficiencia a moderadas presiones, ésta característica es función de muchos parámetros de la resina los cuales deben ser optimizados para la selección de cada empaque, algunos de estos parámetros son el material, el tamaño de partícula, capacidad de intercambio iónico, etc.

8.2.1.2. Instrumentación del Cromatógrafo de Iones [3].

Los componentes del cromatógrafo utilizado en el CIG (DIONEX 2000i) son básicamente los siguientes:

- a. **Precolumna:** Columna ubicada antes de la columna separadora, se utiliza principalmente para proteger a ésta. Las precolumnas actualmente es una versión corta de la columna separadora, la cual sirve como filtro para las partículas o ciertos constituyentes orgánicos que pasan a través del eluyente y de la alícuota de la muestra.
- b. **Columna Separadora:** Columna empacada de baja capacidad pelicular con resina de intercambio iónico.
- c. **Columna Supresora:** Columna empacada de alta capacidad con resina de intercambio iónico.
- d. **Detector:** Celda de conductividad eléctrica equipada con un medidor de lectura de 0 a 1000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ en escala lineal.
- e. **Bomba:** Con una capacidad y un flujo constante de 2 a 5 ml/min, y una presión de 200 a 700 psi.
- f. **Integrador:** Integra el área bajo la curva del cromatograma.

8.2.1.3. Reactivos [3,26].

A continuación se mencionan los reactivos utilizados en esta técnica analítica y los procedimientos para la obtención de cada uno de ellos.

- a. **Eluyente:** Disolver 0.9409 g de NaHCO_3 y 0.9327 g de Na_2CO_3 en agua desionizada y llevar a un volumen de cuatro litros.
- b. **Solución Regenerante del Supresor:** Diluir 5.09 g (2.75 ml) de Ácido Sulfúrico calidad reactivo en agua desionizada y luego llevar a un volumen de cuatro litros.
- c. **Solución Patrón de Bromuros (1000 ppm):** Secar aproximadamente 2 g de Bromuro de Sodio por seis horas a 150°C y colocar en un desecador. Disolver 1.2877 g de sal seca en agua y llevar a un litro.
- d. **Solución Patrón de Cloruros (1000 ppm):** Secar Cloruro de Sodio por una hora a 600°C y colocar en un desecador. Disolver 1.6484 g de sal seca en agua y aforar a un litro.
- e. **Solución Patrón de Fluoruros (1000 ppm):** Disolver 2.21 g de

Fluoruro de Sodio en agua y llevar a un litro.

- f. Solución Patrón de Nitratos (1000 ppm): Secar aproximadamente 2 g de Nitrato de Sodio a 150°C por 24 horas. Disolver 1.37 g de sal seca en agua desionizada y aforar a un litro.
- g. Solución Patrón de Nitritos (1000 ppm): Colocar aproximadamente 2 g de Nitrito de Sodio en un beaker de 125 ml y secar a peso constante (cerca de 24 horas) en un desecador que contenga ácido sulfúrico concentrado. Disolver 1.4998 g de sal seca en agua y aforar a un litro.
- h. Solución Patrón de Sulfatos (1000 ppm): Secar Sulfato de Sodio durante una hora a 105°C y colocar en un desecador. Disolver 1.479 g de sal seca en agua y aforar a un litro.
- i. Solución Patrón de Fosfatos (1000 ppm): Disolver 1.433 g de Fosfato dehidrogenado de Potasio (KH_2PO_4), en agua desionizada y diluir a 1000 ml.

A partir de las soluciones patrones se prepara una solución estándar, la cual se inyecta al cromatógrafo (en forma manual). Dicha solución debe contener un máximo de concentración para cada elemento las siguientes cantidades: Cloruros 15 ppm, Fluoruros 5 ppm, Nitritos 50 ppm, Bromuros 30 ppm, Nitratos 30 ppm, Sulfatos 50 ppm, Fosfatos 30 ppm.

8.2.1.4. Procedimiento de análisis [3,26].

- a. Preparación de las muestras: A todas las muestras se les debe dar un tratamiento previo al análisis que consiste en la filtración (con un filtro de 0.2 μm) y se debe hacer burbujear a través de la muestra Nitrógeno o Helio, para poder eliminar el Ácido Sulfhídrico remanente en la misma.
- b. Procedimiento analítico: Antes de introducir los estándares al equipo de cromatografía iónica, debe existir un equilibrio total en el sistema de bombeo del eluente a través de todas las

columnas. Las condiciones de operación del cromatógrafo son:

Eluente: 0.0028 M de NaHCO_3 /0.022M de Na_2CO_3
Regenerante: 0.1 M de H_2SO_4
Flujo: 2.5 ml/min
Presión: 560 psi
Conductividad: 20 $\mu\text{S/cm}$
Precolumna: HPIC-AG3 (material de relleno).
Columna: HPIC-AS3 (material de relleno).
Supresor: AMMS-1 (material de empaque).
Temperatura: 25 °C

Los estándares se introducen en el lugar de inyección utilizando una jeringa de plástico, inyectando un mililitro de muestra, a continuación el estándar es arrastrado al interior del sistema mediante el flujo del eluente. Posteriormente es conducido a través de las columnas donde se separan los aniones del estándar y una vez llevada a cabo la separación, la muestra entra en la celda de conductividad eléctrica para interpretar la presencia y dimensión de la cantidad de componentes presentes, al mismo tiempo que su señal eléctrica es enunciada al integrador electrónico, el cual realiza la conversión automática de la señal cromatográfica a la forma numérica y así cuantifica el área del pico, al igual que los tiempos de retención y los despliega en un cromatograma. El cromatograma completo obtenido para un estándar o muestra, y tiempo de retención identifica al anión y el área del pico correlaciona la concentración del anión con la de los estándar. Al concluir la inyección de los estándares se construye una curva de calibración y se continúa con el análisis de las muestras, procediendo de igual forma.

8.2.1.5. Cálculos.

Afortunadamente el equipo de cromatografía iónica, disponible en el

laboratorio del CIG, está provisto de un integrador que proporciona la información de la concentración de cada elemento analizado directamente en unidades de concentración, mediante un programa colocado en su memoria. Debido a la facilidad de obtener respuesta en cuanto a la concentración y el tiempo de retención de cada especie analizada, sobre todo en un corto tiempo (algunos minutos), este equipo se vuelve de una gran utilidad práctica para la cuantificación de aniones.

8.2.2. Cromatografía de Gases [3,25].

La implementación de la técnica de cromatografía de gases a la cuantificación química de los fluidos geotérmicos, permite, mediante el proceso de separación de la muestra de gases geotérmicos, identificar los componentes volátiles presentes en la muestra de vapor; y sirve de apoyo para clasificar los fluidos, estimar la temperatura del reservorio, dilucidar fenómenos de mezcla en el subsuelo y otros procesos que se dan en un yacimiento geotérmico.

8.2.2.1. Principios de la Cromatografía de Gases [3].

Este método es una técnica analítica utilizada en la separación, identificación y medida de los componentes de una mezcla, al ser arrastrados por un gas inerte através de un tubo relleno de un material adecuado (columna).

El tiempo de retención en la columna es específicamente característico para cada sustancia y pueden ser empleados datos de tiempo de retención para la determinación de éstos en una mezcla de componentes.

Los elementos constitutivos del cromatógrafo de gases (Perkin-Elmer Sigma 115) son:

- a. Gas de arrastre: Obliga que la muestra circule por el sistema, el flujo del gas de arrastre recomendado es de 30 ml/min.
- b. Sistema de muestreo: Permite introducir la muestra al sistema en forma adecuada.
- c. Columna: Efectúa la separación misma de los componentes de la mezcla.
- d. Detector: Indica la presencia de los componentes.
- e. Registrador: Proporciona el resultado de la operación del equipo.

8.2.2.2. Metodología de Aplicación de la Técnica [3,24].

Se basa en el hecho que la cantidad determinada de la sustancia es directamente proporcional al área del pico obtenido en el cromatograma y que corresponde a dicha sustancia. Se debe encontrar el valor del área-pico y un factor de proporcionalidad que permita determinar la concentración.

Existen varios métodos para calcular el área de los picos, siendo entre los más empleados los directos que usan un sistema electrónico o electromecánico para efectuar la integración del pico resultante.

8.2.2.3. Análisis de Estándar y Muestra [3,24].

Una vez que el sistema está listo para operar se procede a analizar el estándar y la muestra. Usualmente los estándares se obtienen certificados, desde Estados Unidos, en cilindros individuales o en mezclas de composición conocida, como por ejemplo: Ar 2.011 %, He 1.974%, H₂ 4.834%, CH₄ 2.003%, N₂ el resto [24].

Se coloca el cilindro de la mezcla de estándar, uniéndolo por una manguera al sistema de inyección diseñado y construido para que

funcione con el conjunto cromatográfico [24].

Se hace vacío al sistema operando las válvulas que están en el sistema de vacío hasta obtener una presión de 700 mm Hg y se cierra la válvula que da al vacío.

Se llena el sistema de inyección con el estándar hasta alcanzar una presión de 200 mm Hg y se cierra la válvula de entrada del estándar, luego se inyecta la alícuota que será analizada después de ingresar y ser separada en sus componentes, en la columna conectada al detector y al registrador.

A continuación se descarta el residuo del estándar, haciendo nuevamente el vacío. Se coloca luego la ampolla de muestra por medio de una manguera al sistema de inyección y se hace vacío, una vez alcanzado los 700 mm Hg de presión se estabiliza el sistema y se procede a introducir la muestra, hasta obtener la presión total que trae el espacio libre de la ampolla (muestra alcalina), una vez tomada la lectura de presión se inyecta la muestra y el aparato registra las señales de área que se tomarán en el cálculo final.

Después que salen las señales y son registradas en el cromatograma, se evacúa el sistema haciendo vacío y se coloca otra muestra igual que la anterior.

El computador del cromatógrafo utilizado en el CIG arroja como resultado el valor del área correspondiente al pico característico de cada elemento, a continuación se debe procesar esta información para poder expresarla en unidades de concentración. Los cálculos de este último paso del análisis se facilitan mediante la corrida de un programa de computadora en lenguaje BASIC, diseñado por el personal encargado del área cromatográfica [24] del laboratorio en mención (Apéndice 1); dicho programa solicita la información generada por el cromatógrafo de gases y la procesa para obtener la concentración en mmol/100 moles de vapor, para cada especie presente

en los vapores expulsados por las fumarolas.

8.3. Potenciometría.

La aplicación de técnicas potenciométricas en la determinación química de elementos resulta muy versátil, debido a lo apropiado de su aplicación en una gran variedad de determinaciones. En los laboratorios del CIG se emplean técnicas potenciométricas en varias determinaciones, como lo son la cuantificación de Cloruros, de la Alcalinidad, Acido Sulfhídrico, Dióxido de Carbono y de pH.

8.3.1. Determinación de Alcalinidad [3,27].

8.3.1.1. Principio del método.

La Alcalinidad es la capacidad cuantitativa de un medio acuoso para reaccionar con los iones Hidrógeno. Por lo general la Alcalinidad de las aguas es producida por Hidróxidos, Carbonatos y Bicarbonatos. Estos se determinan por titulación con una solución valorada de un ácido fuerte hasta su punto de equivalencia usando un medidor de pH.

En una titulación potenciométrica una celda galvánica se forma por inmersión de un par de electrodos en solución para ser analizados. La fuerza electromotriz (fem) de esta celda es entonces seguida como una función del volumen del reactivo agregado; rápidos cambios en el potencial, que suceden en el punto de equivalencia indica el final de la titulación. En resumen, el equipo utilizado en una titulación potenciométrica requiere: Un dispositivo para la medición del potencial con su respectivo electrodo [27].

El punto de equivalencia puede determinarse mediante una inspección a partir del punto de inflexión de la curva de titulación y es el

punto que corresponde a la máxima velocidad de cambio en la fuerza electromotriz de la celda por unidad de volumen del titulante añadido.

El punto equivalencia puede determinarse con mayor precisión graficando los valores sucesivos del cambio de la "fem" de la celda en función del incremento de titulante en el punto de inflexión.

8.3.1.2. Reactivos [3].

- a. Acido Sulfúrico 0.01 N: Se parte de un titrisol 0.1 N de Acido Sulfúrico, se afora en un balón de un litro, del cual se extraen 50 ml y se afora en un balón de 500 ml.
- b. Buffer pH 7 y pH 4: Se disuelve un pastilla del buffer en un beaker de 100 ml con 75 ml más o menos de agua desionizada y luego se pasa a un balón de 100 ml y aforar.

8.3.1.3. Electrodo utilizados [3].

- a. pHmeter 26 Radiometer.
- b. K-401 Electrodo de Calomel.
- c. G-202C Electrodo de vidrio con su adaptador.

8.3.1.4. Procedimiento de análisis [3,27].

- a. Independientemente del origen del agua a analizar (agua de mar, descarga de pozos, descarga de manantiales, pozos domésticos, etc.) la alicuota a tomar es de 25 ml.
- b. Los 25 ml se colocan en un beaker de 100 ml (para que los electrodos, pipeta y agitador queden sumergidos en la muestra).

- c. Se coloca la muestra en el equipo y se le da agitación durante 3 a 5 minutos.
- d. Luego proceder a hacer la lectura del pH.
- e. En la determinación de la Alcalinidad, si el valor del pH de la muestra es mayor de 8.3 se titula hasta un pH de 8.3, se anota el volumen gastado y se continúa la titulación hasta un pH de 3.8; si es menor de 8.3 se lleva a directamente hasta 3.8. Dichos valores de pH son los respectivos valores de equivalencia de los cambios de equilibrio químico.
- f. El volumen gastado en la titulación hasta 8.3 es el dato de "P" y el de 3.8 corresponde a "T" (ver Cálculos). El valor de P indica el volumen gastado en convertir todo el Carbonato en Bicarbonato; el valor de T es el volumen gastado en la conversión de todo el Carbonato y Bicarbonato a Dióxido de Carbono, es decir neutralización de la Alcalinidad total.

8.3.1.5. Cálculos [3].

Tabla 8.1. Relación entre el Volumen gastado a en cada etapa de la Titulación, para cada especie alcalina presente en la muestra [3].

Resultado de la Titulación.	Alcalinidad Hidróxido como CaCO_3 .	Alcalinidad Carbonato como CaCO_3 .	Alcalinidad Bicarbonato como CaCO_3 .
$P = 0$	0	0	T
$P < 1/2 T$	0	2 P	$T - 2 P$
$P = 1/2 T$	0	2 P	0
$P > 1/2 T$	$2 P - T$	$2 (T - P)$	0
$P = T$	T	0	0

donde: P = Alcalinidad de la fenoftaleína.
T = Alcalinidad total.

$$\text{Alcalinidad, ppm CO}_3 = \frac{\text{ml Acido Gastado} \cdot N \cdot 30010}{\text{ml de muestra}} \quad \text{Ec. 8.1}$$

$$\text{Alcalinidad, ppm HCO}_3 = \frac{\text{ml Acido Gastado} \cdot N \cdot 61020}{\text{ml de muestra}} \quad \text{Ec. 8.2}$$

El ácido gastado en la titulación se define mediante la Tabla 8.1, de acuerdo a la mezcla resultante.

8.3.2. Análisis de Cloruros (Cl⁻) [3,27].

8.3.2.1. Principio del método.

Los iones Cloruros disueltos en un medio acuoso reaccionan con Nitrato de Plata en presencia de Nitrato de Potasio (para lograr el efecto del ión común), lográndose la reacción con la precipitación del Cloruro de Plata.

Tal como se explicó para la metodología de la Alcalinidad potenciométricamente, ésta es aplicable a la determinación de Cloruros. Este método es aplicable a muestras de agua con un contenido mayor de 10 ppm de Cl⁻.

8.3.2.2. Reactivos [3].

- a. Nitrato de Plata (AgNO₃) 0.01 N: Se parte de un titrisol 0.1 N de AgNO₃. Se toman 50 ml y se llevan a un balón de 500 ml a la marca. Colocar en un frasco ámbar.
- b. Cloruro de Sodio (NaCl) 0.01 N: Se parte del titrisol de NaCl 0.1 N.

- c. Nitrato de Potasio (KNO_3): Pesar 52.4 g del reactivo, agregar una cantidad de agua desionizada y colocar en "hot plate" con temperatura y agitación, enfriar y aforar a un balón de 200 ml.

8.3.2.3. Electrodo Utilizados [3].

- a. K-601 electrodo de referencia (Calomel).
- b. P-4011 electrodo de plata-sulfato de plata.

8.3.2.4. Procedimiento de análisis [3,27].

- a. Cuando la muestra proviene de pozos domésticos, ríos y fuentes generalmente no se le hace dilución y en los cuales la metodología se aplica en forma directa, pero si son aguas geotérmicas o de mar se trabaja en general con un factor de dilución de 25 o menos. De la muestra, analizada en forma directa o con dilución, siempre se tomarán 5 ml, 25 ml de agua desionizada y 1 ml de Nitrato de Potasio.
- b. Estandarización de la solución titulante: Para encontrar la normalidad del Nitrato de Plata se estandariza con el Cloruro de Sodio 0.01 N (5 ml) al cual se le agrega 25 ml de agua desionizada más 1 ml de Nitrato de Potasio. De esta forma y el blanco encontramos la normalidad del AgNO_3 .
- c. Sumergir los electrodos en la muestra a ser analizada y dar agitación por 5 minutos.
- d. Calibrar el equipo y fijar el punto de equivalencia para Cloruros con el -112 mV.
- e. Titular y anotar el volumen gastado (al cual se resta el volumen gastado en la titulación del blanco).

8.3.2.5. Cálculos.

$$\text{Cloruros, ppm} = \frac{\text{ml Gastados AgNO}_3 \cdot N \cdot 35460}{\text{Volumen de muestra}} \quad \text{Ec. 8.3}$$

Donde N : Es la normalidad del Nitrato de Plata utilizado durante la titulación.

En caso de haber realizado alguna dilución se debe multiplicar por el factor de dilución toda la ecuación anterior.

8.3.3. Medición de pH [3].

8.3.3.1. Principio del método.

La escala del pH es una serie de números que expresan el grado de acidez o alcalinidad de una solución. El valor de esta expresión (Ec. 8.4) es dependiente de la cantidad de H^+ libres que es característica de las soluciones ácidas, cuanto más bajo es su valor indica un carácter más ácido; en el caso contrario se menciona a las soluciones alcalinas.

$$pH = -\text{Log}[H^+] = \text{Log}\left(\frac{1}{[H^+]}\right) \quad \text{Ec. 8.4}$$

Resulta más conveniente, en la práctica, expresar el carácter ácido, neutro o alcalino de una solución en términos del valor del pH que hacerlo en términos de la concentración de H^+ .

Su medición instrumentada se basa en el uso de una celda electroquímica, constituida por una semicelda de referencia cuyo potencial es conocido y otra semicelda cuyo potencial depende de la concen-

tración de H^+ ; ambos deben estar sumergidos en una solución de pH conocido y separados por una membrana delgada con la solución cuyo pH se pretende determinar. El potencial a través de este electrodo de vidrio es una función del pH de la solución por fuera de la membrana. El potenciómetro utilizado debe ser capaz de medir voltajes cuando menos de 0.01 voltio.

8.3.3.2. Procedimiento de medición [27].

- a. Preparación de los electrodos (de vidrio código G2026 y Calomel código K401) y montaje en los soportes ajustando su parte alta a su propio sostenedor, asegurar que éstos no toquen el fondo del beaker a ser utilizado.
- b. Humedecer el electrodo de vidrio al menos 6 horas en Acido Clorhídrico 0.1 N (si los electrodos son nuevos o poco usados).
- c. Lavar los electrodos sumergiendo la punta de éstos en un beaker con agua el cual debe agitarse constantemente. Séquelos con papel filtro.
- d. Calibrar el equipo con las soluciones buffer preparadas previamente (ver 8.3.1.2.b.).
- e. Efectuar la lectura para el pH de la muestra.

8.3.4. Determinación de Acido Sulfhídrico (H_2S) [3,28].

Las muestras alcalinas son extraídas de las ampollas de ROTAFLO, con las que se muestreó las fumarolas, y antes del análisis deberá medirse el volumen total de la solución alcalina y colocar en frascos etiquetados, la misma muestra se usa para la determinación del CO_2 .

8.3.4.1. Principio del método.

El Acido Sulfhídrico en soluciones ácidas es cuantitativamente oxidado a Azufre elemental por una solución de Iodo (0.01 N estándar) agregada en exceso. El exceso de Iodo es determinado por titulación con solución estándar de Tiosulfato de Sodio ($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$) 0.01 N.

Este método es aplicable a condensados provenientes de fumarolas, gases volcánicos y pozos geotérmicos, es decir que resulta de utilidad en todas las necesidades de análisis dentro del desarrollo de los proyectos geotérmicos.

8.3.4.2. Reactivos.

- a. Solución estándar de Iodo 0.01 N: Se parte del titrisol de Iodo 0.1 N (preparado en un frasco ámbar), diluir 10 ml en frasco volumétrico de 100 ml. Se debe almacenar en un frasco ámbar.
- b. Solución estándar de Tiosulfato de Sodio 0.01 N: Preparar en el momento una solución estándar de Tiosulfato de Sodio 0.1 N (titrisol), diluir 10 ml en frasco volumétrico de 100 ml.
- c. Acido Sulfúrico 0.1 N: En una probeta plástica colocar 200 ml de agua desionizada y luego agregar 2.77 ml de Acido Sulfúrico concentrado y trasladarlo con cuidado a un balón de 1000 ml, enfriar y aforar.
- d. Acido Sulfúrico 2 N: En una probeta plástica colocar 200 ml de agua y luego agregar 61 ml de Acido Sulfúrico concentrado y llevarlo a un balón de 1000, enfriar y luego aforar.
- e. Indicador de Almidón: Pesar 1 g de Almidón y antes de agregarlo al agua desionizada macerarlo y después agregarlo lentamente, dentro de un beaker, hasta un volumen de 100 ml de agua en ebullición.

8.3.4.3. Procedimiento de análisis [28].

a. Procedimiento previo.

- a.1. Agregar en un beaker 10 ml de solución de Iodo, 185 ml de agua desionizada y 5 ml de muestra, luego agitar la mezcla.
- a.2. Colocar la mezcla anterior sobre el agitador y poner los electrodos del potenciómetro.
- a.3. Titular con Acido Sulfúrico 2 N hasta llegar a un pH de 9, anotar el volumen; seguidamente agregar Acido Sulfúrico 0.1 N hasta llevar la solución a pH de 6, anotar el volumen gastado.

Este procedimiento se hace para determinar la cantidad de Acido Sulfúrico 2 N y 0.1 N que se va a utilizar al realizar el análisis de las muestras.

b. Determinación en las muestras.

- b.1. En un erlenmeyer de 250 ml se colocan 10 ml de solución de Iodo 0.01 N y se agrega la alícuota de Acido Sulfúrico 0.1 y 2 N encontrados como referencia al determinar el pH a la muestra; luego se lleva a un volumen de 200 ml con agua desionizada.
- b.2. A la mezcla anterior se le agrega una alícuota del condensado alcalino (que puede ser 10 ml, 5 ml o 1 ml de la muestra); con agitación suave y rotando el frasco de Iodo, después de agregar la muestra, se tapa el frasco y se deja reposar en la oscuridad por 5 minutos.
- b.3. Después de transcurrir los 5 minutos se procede a titular el Iodo en exceso con la solución de Tiosulfato de Sodio 0.01 N, agregándolo poco a poco hasta tener una solución de color amarillo débil y en este momento se agregan unas gotas de solución de Almidón, como indicador, el cual vi-
ra la solución al color azul, se sigue la titulación hasta desaparecer el color azul.

- b.4. Se anotan el volumen gastado de Tiosulfato de Sodio.
- b.5. El blanco se determina en un frasco de 250 ml, tomando una alícuota de 10 ml de solución de Iodo y no se debe agregar Acido Sulfúrico 2 N, luego se procede a titular la solución de Tiosulfato de Sodio.

8.3.4.4. Cálculos [3].

Para proceder al cálculo de H_2S en % p/p (Ec. 8.5) se requiere antes obtener la masa de condensado colectada durante el muestreo, esto se obtiene pesando la ampolla antes del muestreo e inmediatamente después de dicha actividad, conteniendo en ambos casos la misma cantidad de solución alcalina absorbente.

$$H_2S \text{ \% p/p} = \frac{(V_B - V_M)}{N} * N * 34.076 * \frac{V_C}{V_A} * 100 \quad \text{Ec. 8.5}$$

Donde:

- v_B = mililitros de Tiosulfato gastados en el blanco.
- v_M = mililitros de Tiosulfato gastados en la muestra.
- v_C = mililitros de condensado (volumen final de solución alcalina en la ampolla ROTAFLO).
- v_A = mililitros de muestra tomada (alícuota).
- W = mg de Condensado.
- N = Normalidad de la solución de Tiosulfato utilizada.

8.3.5. Determinación de Dióxido de Carbono (CO_2) [3,28].

8.3.5.1. Principio del método.

El gas ácido conocido como Dióxido de Carbono, retenido en una solución alcalina de Hidróxido de Sodio lo convierte en Carbonato, donde por titulación ácida realizada potenciométricamente se convierten todos los Carbonatos a Bicarbonatos, a un pH de 8.3; con-

tinuando la titulación, al llegar a un pH de 3.8, todos los Bicarbonatos son transformados a Dióxido de Carbono. Cualquier otro ácido débil presente reaccionará con los agentes alcalinos, por lo que el Acido Sulfhídrico debe eliminarse.

El procedimiento antes descrito es aplicable a muestras de condensados tomados para la determinación de contenido de CO_2 en el vapor de las fumarolas, es decir al presente en la muestra alcalina.

8.3.5.2. Reactivos [3].

- a. Acido Clorhídrico 0.1 N y 2 N (preparado con titrisol [24]).
- b. Nitrato de Plata 1 N (preparado con titrisol [24]).

8.3.5.3. Procedimiento de análisis [28].

- a. Agregar 10 ml de muestra en beaker de 250 ml, llevarlo a un volumen de 50 ml con agua desionizada.
- b. Adicionar unas gotas de Nitrato de Plata 1 N, para eliminar el Acido Sulfhídrico.
- c. Introducir electrodos del potenciómetro.
- d. Titular con Acido Clorhídrico 2 N, desde el pH original de la muestra hasta 9.5. Luego titular desde el pH de 9.5 hasta 8.3, con ácido clorhídrico 0.1 N (anotar esta lectura). Continuar la titulación hasta el valor de pH igual a 3.8, con HCl 0.1 N (leer el volumen de ácido 0.1 N gastado, para incorporarlo a la ecuación total).
- e. Se debe determinar el volumen de HCl que reaccionó con el NaOH que se encontraba en exceso, en la muestra alcalina. Este dato es importante al momento de calcular la cantidad de CO_2 real presente en la muestra.

8.3.5.4. Cálculo [3].

$$\% \text{ P/P } \text{CO}_2 = \frac{(V_{AM} - V_{AB})}{V_M} * N * 44.009 * \frac{V_C}{V_M} * 100 \quad \text{Ec. 8.5}$$

Donde: V_{AM} = mililitros de HCl gastados en la muestra desde 9.8 hasta 3.8 de pH.

V_{AB} = mililitros de HCl gastados desde 8.3 hasta 3.8 de pH.

V_M = mililitros de muestra.

V_C = mililitros de alicuota del condensado.

W = mg de Condensado.

N = Normalidad de la solución de HCl utilizado.

Al igual que el cálculo para la determinación de Acido Sulfhídrico, para el cálculo del porcentaje de CO_2 en los gases de cada fumarola debe considerarse el peso de condensado colectado, en igual forma que el caso anterior.

8.3.6. Determinación de Amoníaco (NH_3), en vapor condensado .

8.3.6.1. Principio del método [3].

El electrodo selectivo de Amoníaco usa una membrana hidrofóbica permeable sólo al gas, para separar la solución muestra de la solución interna (Cloruro de Amonio). El Amoníaco disuelto en la muestra es absorbido por la membrana cuando se sube el pH de la solución arriba de 11.0 con una base fuerte (NaOH 10 N). El NH_3 se difunde a través de la membrana el cual cambia el pH de la solución interna que es medido por el electrodo de pH del mismo electrodo específico.

Las muestras de agua se deben preservar con la adición de 1 ml de

Acido Sulfúrico concentrado por litro de éste a 4°C, el pH deberá ser de ± 2 . Si se usa preservación ácida hay que neutralizar la muestra con NaOH o con KOH inmediatamente antes de hacer la determinación.

Las muestras de gases son retenidas en Acido Bórico 2% p/v, con esto se logra preservar la muestra por lo menos 30 días.

8.3.6.2. Reactivos [3].

- a. Hidróxido de Sodio 10 M: Pesar 40 g de NaOH y disolver en 80 ml de agua desionizada, llevarlo a 100 ml en un balón volumétrico.
- b. Solución de Cloruro de Amonio 0.1 M: Secar el Cloruro de Amonio a 100°C durante una hora. Pesar 0.535 g, disolver en agua y llevar a 100 ml en balón volumétrico. Esta solución se utiliza para mantener activo el electrodo cuando no está en uso.
- c. Solución Estándar de Cloruro de Amonio 1000 ppm: Preparada a partir de titrisol [24,29].
- d. Los estándares a utilizar se preparan a partir del estándar anteriormente definido, en literal c), que son los siguientes: 10, 5, 1, 0.5, 0.1, 0.05 ppm.

8.3.6.3. Procedimiento de análisis [29].

Antes de iniciar el análisis deberá prepararse todo el equipo, esto incluye la calibración del potenciómetro (ORION Model 701a-Analizer) y la preparación de los electrodos. El procedimiento seguido se muestra a continuación:

- a. En un beaker de 150 ml se pipetea 50 ml de muestra.
- b. A cada 50 ml de estándar y muestra, que deberán estar a la misma temperatura, colocar un agitador magnético.
- c. Sumergir el electrodo, teniendo cuidado que no queden burbujas

- de aire sobre la membrana del electrodo.
- d. Agregar una cantidad de NaOH 10 M de manera que se alcance un pH entre 10 y 11.
 - e. Cuando el electrodo llega a su equilibrio, medir el potencial del electrodo, observar el logro del equilibrio de la curva en el registrador.
 - f. Preparar la curva de calibración con los estándares, usando papel semilogarítmico, graficando la concentración de miliequivalentes por litro (mEq/L) de NH_3 en el eje logarítmico, previa conversión de las unidades de concentración de los estándares de ppm a mEq/L, contra el correspondiente potencial del electrodo en mV.
 - g. Usando la medida del potencial de cada muestra, leer la correspondiente concentración de la curva estándar.

8.3.6.4. Cálculos [3].

En muestras de condensado geotérmico absorbido en Acido Bórico, reportar la concentración en milimoles de NH_3 por 100 moles de vapor. Las concentraciones de las muestras han sido obtenidas anteriormente.

$$\frac{\text{mmol NH}_3}{100 \text{ moles de vapor}} = X * \frac{V_T}{V_C} * 1.8 \quad \text{Ec. 8.6}$$

Donde: X = Es la concentración de Amoníaco en mEq/lt (determinado por el procedimiento antes planteado).
 V_T = Volumen total de condensado más volumen de NaOH.
 V_C = Volumen total de condensado menos volumen de Acido Bórico.

8.4. Espectrofotometría Visible [11].

La espectrofotometría comprende la determinación de la concentración basado en la capacidad de absorción de luz, de un sistema químico en estado de solución el cual posee color provocado.

El sistema químico que muestra un color y una capacidad de absorción, es nombrado coloreado, y por eso el término de análisis colorimétrico es usado frecuentemente a la medida de sistemas semejantes.

El principal problema práctico en la metodología de espectrofotometría es: 1) Preparar una solución coloreada; 2) La medida de la absorbancia de esta solución y compararla con soluciones coloreadas (patrones), mediante la ley de Beer-Lambert.

Si bien, algunos constituyentes tienen su propio color, es generalmente necesario desarrollar un color por la adición de uno o más reactivos. Tal es el caso del ión Permanganato (MnO_4^-) que tiene su propio color, contrario a lo que sucede con el ión Hierro II (Fe^{2+}) que es débilmente coloreado, al cual es necesario agregar un complejo tal como 1-10 Fenantrolina, formando un sistema adecuado para la determinación de cantidades muy pequeñas de Hierro.

Los componentes del espectrofotómetro visible utilizado en el CIG (Milton Roy Co. Spectronic 1201) son:

- a. Fuente de energía radiante.
- b. Aislador de bandas de energía radiante.
- c. Un sistema óptico para permitir el paso de un haz de luz que atravesase la solución muestra (coloreada).
- d. Un detector para la energía radiante no absorbida.
- e. Medidores de lectura.

Los espectrofotómetros modernos sustituyen con un prisma o una red con aparato dispersor, en lugar de filtros para el aislamiento.

8.4.1. Análisis de Boro (B), Método del Carmin [3,30].

8.4.1.1. Principio del método [3].

En presencia de Boro, una solución de Carmin o de Acido Carminico en Acido Sulfúrico concentrado, forma un complejo coloreado que varía de rojo brillante en ausencia de boro a rojo azulado o morado en presencia de éste.

Este método cubre la determinación de boro disuelto en cualquier tipo de agua, cuya concentración varía de 1.0 a 8.0 mg/lt. Las muestras con concentraciones menores serán tratadas con otro método y cuando las muestras se encuentren demasiado concentradas deberá hacerse la dilución correspondiente.

8.4.1.2. Material y Equipo.

El material o equipo mínimo necesario para el análisis cuantitativo de Boro, por este método es el siguiente:

- Espectrofotómetro VIS.
- Pipetas de 1, 2, 5 y 10 ml.
- Beaker de 20 y 100 ml.
- Frascos Erlenmeyer de 50 ml.
- Bureta de 100 ml.
- Balones de 100 y 1000 ml.

8.4.1.3. Reactivos [3].

- a. Solución estándar de Boro, con una concentración de 1000 ppm (ya viene certificado de casas fabricantes).
- b. Acido Clorhídrico concentrado.
- c. Acido Sulfúrico concentrado.

- d. Reactivo Carmín: Disolver 0.92 gr de Carmín y diluir en 1 litro de Acido Sulfúrico concentrado.
- e. Los estándar a usar en este método serán de 1.0, 4.0 y 8.0 ppm más uno o dos blancos. A partir de la solución estándar de 1000 ppm preparar un estándar de 100 ppm. Los estándar de trabajo se preparan tomando como base el ya preparado de 100 ppm haciendo las diluciones correspondientes.

8.4.1.4. Procedimiento de análisis [30].

- a. Pipetear 1 ml de la muestra, estándar y blanco conteniendo de 1.0 a 8.0 mg/lt y agregarlo en frasco libre de Boro.
- b. Agregar una gota de Acido Clorhídrico concentrado.
- c. Agregar con cuidado 5 ml de Acido Sulfúrico concentrado, mezclar.
- d. Adicionar 5 ml de reactivo Carmín, mezclar y dejar reposar por 45 min, luego dejar enfriar en un desecador conteniendo Silica Gel.
- e. Encender el espectrofotómetro 25 minutos antes del análisis y fijar la longitud de onda en 585 nm. Se debe calibrar el equipo, con los patrones y el blanco obtener la curva de calibración. Luego hacer las lecturas de las correspondientes concentraciones de las muestras.

Afortunadamente el espectrofotómetro con que se cuenta en el CIG presenta la ventaja de que automáticamente puede construir la curva de calibración, en la memoria, facilitando la obtención de los resultados en unidades de concentraciones de manera directa.

8.4.2. Análisis de Boro (B), Método de la Curcumina [3,30].

Debido a que el método para la determinación cuantitativa de Boro

por reacción con el reactivo Carmin se emplea para concentraciones de Boro mayor que 1.0 ppm, es necesario emplear otro método para cuando la concentración es menor que dicho límite, éste se basa en la reacción con Curcumina.

8.4.2.1. Principio del Método.

Cuando una muestra que contiene Boro se acidula en presencia de la Curcumina, se forma un producto de color rojo, denominado Rosocianina. La Rosocianina se separa por un disolvente (Acido Acético) y el color rojo se compara con los patrones espectrofotométricamente.

El método cubre la determinación de Boro disuelto en cualquier tipo de agua, cuya concentración varía de 0.01 a 1.0 mg/lt.

8.4.2.2. Material y equipo.

- Espectrofotómetro VIS.
- Centrífuga, siempre que la muestra presente turbidez.
- Pipetas de 0.5, 2, 5, y 10 ml.
- Beaker de 20 y 100 ml.
- Frasco Erlenmeyer de 50 ml de polietileno.
- Buretas de 50 y 100 ml.
- Balones de 100 y 500 ml.

8.4.2.3. Reactivos [3].

- a. Solución patrón de Acido Bórico (1000 ppm): Viene certificado de casas distribuidoras.
- b. Curcumina: Pesar 0.125 g de Curcumina, disolver en Acido Acético Glacial y llevar a un volumen de 100 ml.
- c. Reactivo ácido: Hacer una solución 1+1 de Acido Sulfúrico y

- Acido Acético Glacial, agitar vigorosamente hasta homogeneizar, dejar enfriar en baño de agua.
- d. Solución de Acetato de Amonio y Acido Acético Glacial: Pesar 25 g de Acetato de Amonio más 30 ml de Acido Acético Glacial y llevar a 100 ml en frasco volumétrico con agua desionizada.
 - e. Los estándares a usar serán de 0.1, 0.5 y 1 ppm, más uno o dos blancos.

8.4.2.4. Procedimiento de análisis [30].

- a. Pipetear 0.5 ml de muestra, estándar y blanco.
- b. Agregar 3 ml de solución Curcumina y agitar.
- c. Agregar 3 ml de reactivo Acido y agitar. Dejar reaccionar por una hora.
- d. Agregar 15 ml de Acetato de Amonio y Acido Acético Glacial.
- e. Inmediatamente después del paso anterior leer en el espectrofotómetro a 535 nm. Se debe encender el equipo 25 minutos antes del análisis, calibrar con los patrones y blanco y luego realizar las lecturas en las concentraciones de las muestras en ppm de Boro, haciendo uso de la curva de calibración construida en la memoria del equipo.

8.4.3. Determinación de Sulfatos (SO_4^{2-}) [3,30].

8.4.3.1. Principio del método.

Los sulfatos presentes en el agua reaccionan con el Cromato de Bario, formando Sulfato de Bario insoluble y liberando los iones de Cromato. El cromato se determina fotométricamente.

Este método se aplica a muestras de agua con contenidos de 10 a 120 ppm de Sulfatos. Aguas con contenidos más altos deben ser diluidos.

8.4.3.2. Material y equipo.

- Espectrofotómetro UV-VIS.
- Baño maría.
- Centrífuga.
- Frascos Erlenmeyer de 50 ml.
- Pipetas de 2, 5, 10 y 20ml.
- Buretas de 10 y 100 ml.
- Beaker de 100 y 250 ml.

8.4.3.3. Reactivos [3].

- a. Suspensión de Cromato de Bario: Diluir 10 ml de Acido Clorhídrico 1 N más 3 ml de Acido Acético Glacial en 100 ml de agua, agregar 2.5 g de Cromato de Bario purificado.
- b. Solución de Amonio más Calcio: Disolver 0.25 g de Carbonato de Calcio en una mínima cantidad de Acido Clorhídrico concentrado, hervir para expulsar el Anhídrido Carbónico. Agregar 45 ml de solución de Amoníaco (gravedad específica= 0.91) y diluir a 100 ml con agua desionizada.
- c. Alcohol Etilico 95%.
- d. Bromofenol Azul: Disolver 0.05 g en Alcohol Etilico al 20% v/v.
- e. Solución estándar de Sulfato (1000 ppm): Secar Sulfato de Potasio por una hora a 250-300°C. Pesar 1.816 g y diluir a un litro de agua desionizada.
- f. Partiendo de la solución patrón de 1000 ppm preparar estándar de 25, 50 y 100 ppm.

8.4.3.4. Procedimiento de análisis [3,30].

- a. Pipetear 5 ml de muestra, estándar y blanco en frasco Erlenmeyer de 50 ml.

- b. Agregar una gota de Azul de Bromofenol.
- c. Ajustar el pH, de la siguiente forma:
 - c.1. Muestras alcalinas, acidificar con Acido Clorhídrico 0.1 N a pH ligeramente ácido hasta lograr un color amarillo débil y agitar. Neutralizar con NaOH 0.1 N, hasta que el color de la solución cambie de amarillo a violeta.
 - c.2. Muestras ácidas, neutralizar con NaOH 0.1 N hasta que el color de la solución cambie de amarillo a violeta y agitar.
- d. Agregar 2 ml de suspensión de Cromato de Bario y agitar.
- e. Agregar 0.5 ml de Amonio más Calcio (con bureta) y agitar.
- f. Agregar 5 ml de Alcohol Etílico al 95%.
- g. Colocar en baño de maría a ebullición por tres minutos y dejar enfriar.
- h. Trasladar las soluciones del paso anterior a tubos especiales para centrifugar.
- i. Centrifugar, y luego decantar el sobrenadante a las celdas del espectrofotómetro para realizar cada lectura.
- j. Después del literal g) poner a calentar como mínimo 25 minutos el equipo. Fijar la longitud de onda en 400nm. Calibrarlo, con los patrones y blanco, realizar las lecturas de la concentración de las muestras en ppm de Sulfatos, haciendo uso de la curva de calibración.

9.0. RESULTADOS DEL ANALISIS QUIMICO REALIZADO EN LAS MUESTRAS COLEC- TADAS EN EL AREA DE CONCHAGUA.

A continuación se presentan los resultados obtenidos por los laboratorios del CIG, tanto en las muestras de gases como en las muestras de manantiales colectadas en el área de Conchagua:

Está de más mencionar que cada uno de los análisis efectuados a las muestras se llevó a cabo en la forma señalada anteriormente, y que precisamente se han mencionado aquellos análisis de rutina realizados por el CIG, dejando fuera aquellos análisis especiales, es decir que solamente se han descrito aquellas metodologías analíticas llevadas a cabo sobre las muestras obtenidas en el área de Conchagua, durante la etapa de muestreo.

Dentro del análisis químico en muestras de aguas, se consideraran resultados aceptables aquellos que presentan un desbalance iónico menor del 5%, ya que esto demuestra una consistencia global de dicho análisis. Para las muestras tomadas en Conchagua y analizadas en el CIG, su desbalance iónico fue menor del 5%. En las Tablas 9.1 y 9.2 se presenta el contenido químico de las muestras en la fase líquida y en la fase vapor, la última tomada en las fumarolas.

Tabla 9.1. Químismo de las Aguas Colectadas en el Area de Conchagua (Datos Reportados por los laboratorios de GEOCEL).

IDENTIFICACION de la Fuente	FECHA	Na ⁺ ppm	K ⁺ ppm	Ca ²⁺ ppm	Mg ²⁺ ppm	Cl ⁻ ppm	SO ₄ ²⁻ ppm	HCO ₃ ⁻ ppm	NO ₂ ⁻ ppm	F ⁻ ppm	Br ⁻ ppm	NO ₃ ⁻ ppm	SiO ₂ ppm	B ppm	pH LAB.	Temp. °C
FF1	23/5/94	11.70	2.10	30.30	13.60	4.29	4.70	171.0	ND	ND	ND	18.80	76.0	0.011	8.24	30.0
FF2	24/5/94	18.00	2.70	29.30	13.70	6.47	2.35	184.0	ND	ND	ND	2.98	72.0	0.002	8.27	32.3
FF3	24/5/94	10.80	1.70	30.00	11.00	4.24	6.40	163.0	ND	ND	ND	14.00	70.0	0.003	8.04	29.3
FF4	24/5/94	13.30	3.70	24.00	11.20	4.41	3.60	147.0	ND	ND	ND	11.10	74.0	0.003	8.06	33.2
FF5	6/6/94	12.00	2.00	36.40	13.60	6.00	16.02	73.0	ND	ND	ND	109.30	61.8	0.025	7.87	23.5
FF11	6/6/94	12.70	2.40	40.60	11.95	13.20	3.76	180.1	ND	ND	ND	4.46	72.6	0.015	7.87	28.6
FF12	6/6/94	10.30	1.40	26.00	10.60	8.00	4.00	128.0	ND	ND	ND	11.54	86.7	0.016	8.11	26.1
FT1	23/5/94	20.90	6.60	46.00	11.40	2.49	2.95	239.0	ND	ND	ND	8.11	85.0	0.014	8.28	39.5
FT2	23/5/94	19.80	6.60	44.70	12.10	4.69	6.45	231.0	ND	ND	ND	9.41	88.0	0.005	8.26	42.7
FT3	24/5/94	60.60	8.10	27.70	7.96	35.20	22.20	197.0	ND	0.4	ND	ND	64.0	0.070	8.23	88.4
FT4	26/5/94	43.60	6.40	39.20	16.80	62.90	37.80	168.0	ND	0.84	ND	0.86	64.0	0.012	8.22	49.7
FT5	26/5/94	884.00	61.00	63.00	73.70	1481.00	228.00	202.0	ND	ND	5.17	ND	53.0	0.460	8.06	88.0
FT6	23/5/94	5100	232.00	613.00	663.00	8632	964.00	70.7	ND	ND	ND	ND	170.0	6.670	7.69	89.4
FT8	7/6/94	13.60	2.00	17.00	7.00	9.00	7.00	98.0	ND	ND	ND	12.76	87.1	0.960	7.83	42.0
FT9	7/6/94	2960	160.00	372.00	460.00	5972	663.00	162.0	ND	2.3	ND	ND	89.2	3.800	8.00	60.2
FT10	26/5/94	18.60	4.10	63.60	17.40	6.55	10.60	272.0	ND	ND	ND	ND	77.0	0.460	8.06	98.0
FT11	7/6/94	18.00	6.00	32.00	12.00	4.00	3.00	183.2	ND	ND	ND	9.07	87.7	0.036	8.13	37.6
P1	24/5/94	8.70	1.80	28.00	10.70	2.48	4.05	180.0	ND	ND	ND	6.36	64.0	0.004	8.01	27.7
P2	23/5/94	18.00	4.00	26.00	8.00	6.00	6.10	142.0	0.38	ND	ND	8.11	68.0	0.014	7.99	30.4
P3	24/5/94	108.00	9.70	26.30	6.63	137.73	16.60	163.0	ND	0.01	ND	12.60	125.0	0.270	8.06	38.3
P4	24/5/94	86.00	10.80	13.10	1.16	61.90	21.10	112.0	ND	ND	ND	13.00	132.0	0.400	8.09	36.4
P5	7/6/94	84.20	8.10	103.00	23.62	317.00	27.20	88.1	ND	ND	1.06	15.80	82.6	0.339	7.91	36.8
P6	23/5/94	17.60	4.00	36.00	9.09	3.64	3.66	184.0	ND	ND	ND	8.65	82.0	0.008	8.28	33.3
P7	24/5/94	263.00	16.10	3.89	2.12	329.00	26.10	85.1	ND	0.28	1.38	10.00	123.0	1.060	7.91	43.9

NOTA: En la fuente FT7 se muestreo gases, por lo que no aparecen datos de su contenido químico en la fase líquida.

ND: No Detectable

Tabla 9.2. Porcentaje de Gases Presentes en los escapes de vapor muestreados en el Area de Conchagua (Datos Reportados por los laboratorios de GEOCEL).

LUGAR DE MUESTREO	FECHA	O ₂ % peso	N ₂ % peso	CH ₄ % peso	H ₂ S % peso	CO ₂ % peso	NH ₃ mmol/100 mol
CHIQUIRIN *	24/5/94	5.8	27.92	0.65	1.14	64.49	0.116
PLAYITAS	24/5/94	13.66	62.26	ND	0.13	23.95	0.299
		9.83	63.6	ND	0.19	26.38	ND
CAGUANO	25/5/94	13.84	63.2	ND	0.17	22.8	ND
		13.6	62.24	ND	0.22	23.94	ND

* Muestreo en la Fuente Termal identificada como FT7 en la cual se localizaron lodos hirvientes.

ND: No Detectable.

10.0. TECNICAS PARA LA INTERPRETACION DEL ANALISIS DE AGUAS Y GASES EN LA EXPLORACION GEOTERMICA.

Los constituyentes encontrados en los fluidos geotermicos pueden ser subdivididos en dos grupos de acuerdo al tipo de informacion que de ellos se obtienen.

Los quimicamente inertes son los constituyentes no reactivos y forman un grupo que pueden ser llamados trazadores. Idealmente, ellos podrian ser adicionados a las fases fluidas, estos no cambian su conformacion gequimica y de esta forma proporcionan una marca que permite determinar el origen de sus componentes [8].

Las especies quimicamente reactivas responden a cambios en su entorno en una forma controlada, formando un grupo potencialmente usado como un geoindicador [8].

Un ejemplo del primer grupo son por supuesto los gases nobles He y Ar, seguidos por los constituyentes "conservativos" comparativamente B, Cl, Li, Rb, Cs y Na. Las especies del segundo grupo, tales como Na, K, Ca, Mg y SiO₂, toman parte de las interacciones dependientes de la temperatura con estructuras rocosas de Aluminio Silicatos que son caracteristicas de los sistemas geotermales, o tambien pueden ser del tipo de H₂S, H₂, CH₄, CO₂, involucrados en el grupo dependiente de la temperatura y la presion del sistema del cual se originan [8].

10.1. Técnicas de la Interpretación de los Constituyentes de la Fase Líquida (Muestras de Agua).

La aplicación de técnicas químicas es una parte integral de cualquier programa de Exploración Geotérmica. Especialmente durante las etapas de reconocimiento y prefactibilidad, la Geoquímica proporciona información sobre las condiciones profundas del sistema geotérmico, que no son obtenidas por las técnicas geológicas y geofísicas.

10.1.1. Diagrama de Piper.

El método de Piper es muy sencillo basado en el contenido de aniones y cationes dominantes. Generalmente las aguas de origen geotérmica caen dentro del rango denominado Sódico-Clorurada. La clasificación de un tipo de agua se apoya en la localización del punto correspondiente a dicha muestra en el diagrama rómbico-triangular que se presenta en la Figura 10.1.

La metodología a seguir, consiste en primeramente convertir las concentraciones de las especies iónicas a unidades de mEq/L sucesivamente, luego se deben calcular los correspondientes porcentajes indicados, con base a un litro; este punto es graficado en el triángulo que corresponde a la composición catiónica (triángulo de la izquierda). Así mismo su composición aniónica determina el punto correspondiente en el triángulo de la derecha. Posteriormente, partiendo del punto de la izquierda y del de la derecha, se trazan rectas paralelas al lado respectivo del triángulo mayor y se encuentra el punto de intersección de ambas líneas en el diagrama rómbico. Este punto determinará el tipo de agua indicado para la zona correspondiente [12].

Aquellas muestras que al ser ploteadas en este diagrama, se ubican al centro de cada triángulo se denominan como agua mixtas-mixtas,

para la cual no hay un ión predominante [12].

El tipo o familia de aguas, se ilustra sobre un plano delimitando zonas con aguas de diferente composición. Para los diferentes casos las familias de aguas pueden determinar el origen de éstas. Ejemplo: Las aguas Sódico-Cloruradas pueden ser consecuencia directa de la contaminación del agua subterránea con agua de mar; el agua mixta-mixta, es una mezcla de aguas de diferente tipo en la cual no predomina ningún ión en especial.

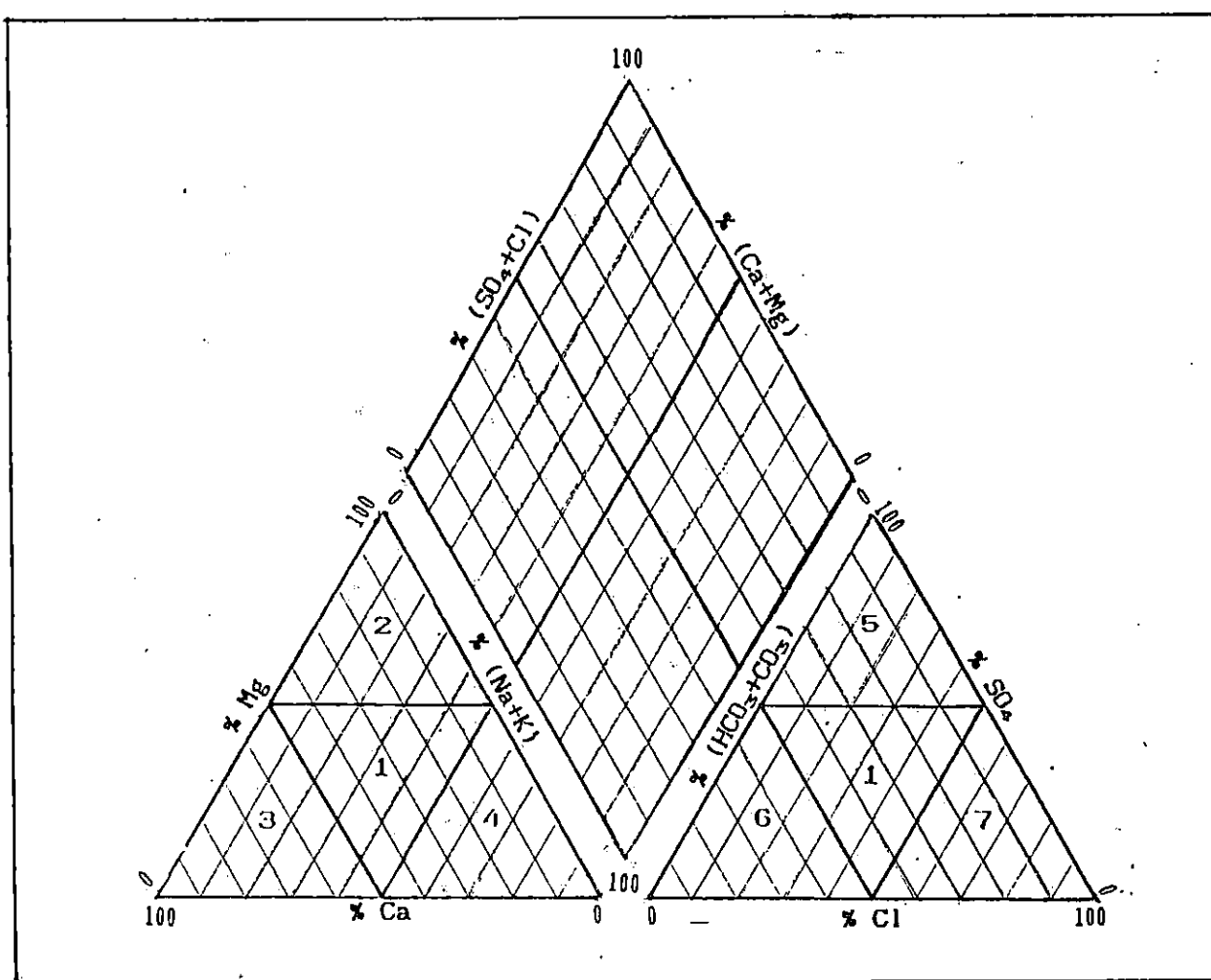


Figura 10.1. Diagrama Propuesto por Piper para la clasificación Química de Muestras de Agua.

1. AGUAS MIXTAS, 2. AGUAS MAGNESIANAS, 3. AGUAS CALCICAS, 4. AGUAS SODICAS, 5. AGUAS SULFATADAS, 6. AGUAS BICARBONATADAS, 7. AGUAS CLORURADAS.

Como ejemplo de lo anterior, el agua mixta-mixta, es una mezcla de aguas de diferente tipo en la cual no predomina ningún ión en especial; el agua Cálcico-Bicarbonatada, es producto de la disolución de rocas calizas por esta misma [12].

La Tabla 10.1 muestra las concentraciones de las especies químicas en las unidades requeridas para poderlas utilizar en el Diagrama de Piper, mEq/Lt; esta tabla se obtiene a partir de los datos presentados en la Tabla 9.1.

Tabla 10.1 Concentraciones de las Especies Químicas Utilizadas en el Diagrama de Piper expresadas en mEq/L.

IDENTIFICACION	Na ⁺ mEq/L	K ⁺ mEq/L	Ca ²⁺ mEq/L	Mg ²⁺ mEq/L	Cl ⁻ mEq/L	SO ₄ ²⁻ mEq/L	HCO ₃ ⁻ mEq/L
P1	0.38	0.05	1.15	0.88	0.07	0.08	2.13
P2	0.7	0.1	1.4	0.66	0.17	0.13	2.33
P3	4.74	0.25	1.41	0.46	3.88	0.33	1.49
P4	3.74	0.28	0.65	0.1	2.31	0.44	1.84
P5	3.66	0.23	5.39	1.94	0.09	0.57	1.44
P6	0.77	0.1	1.8	0.75	0.1	0.07	3.02
P7	11.44	0.39	0.2	0.17	9.28	0.52	1.39
FF1	0.51	0.05	1.51	1.11	0.12	0.1	2.8
FF2	0.7	0.07	1.46	1.13	0.15	0.05	3.02
FF3	0.47	0.04	1.5	0.9	0.12	0.11	2.51
FF4	0.58	0.09	1.2	0.92	0.12	0.07	2.41
FF5	0.52	0.05	1.82	1.12	0.17	0.33	1.2
FF11	0.55	0.06	2.03	0.97	0.37	0.08	2.95
FF12	0.45	0.04	1.25	0.86	0.23	0.08	2.1
FT1	0.91	0.15	2.3	0.94	0.07	0.06	3.92
FT2	0.86	0.14	2.23	1.0	0.13	0.11	3.79
FT3	2.63	0.21	1.38	0.65	0.99	0.46	3.23
FT4	1.89	0.14	1.96	1.3	1.77	0.79	2.75
FT5	38.44	1.3	2.64	6.06	41.2	4.71	3.31
FT6	221.77	5.93	30.59	46.3	277.29	20.07	1.16
FT8	0.59	0.05	0.85	0.58	0.23	0.15	1.57
FT9	128.28	4.09	18.56	39.47	168.43	13.59	2.49
FT10	0.80	0.1	2.68	1.43	0.16	0.22	4.46
FT11	0.78	0.13	1.6	0.99	0.11	0.06	3.0

Tabla 10.2a.

Datos Ploteados en el Diagrama de Piper para los Cationes, en base a $\%(\text{Na}+\text{K})+\%\text{Ca}+\%\text{Mg}=100$.

IDENTIFICACION	%(Na+K)	%Ca	%Mg
P1	17.39	46.76	35.85
P2	27.97	48.97	23.06
P3	72.69	20.58	6.75
P4	84.29	13.71	2.00
P5	34.69	48.01	17.30
P6	25.43	52.66	21.91
P7	96.94	1.63	1.43
FF1	17.66	47.48	34.86
FF2	22.81	43.60	33.60
FF3	17.60	51.36	31.04
FF4	24.11	42.90	32.99
FF5	16.33	51.78	31.88
FF11	16.98	56.06	26.96
FF12	18.64	48.08	33.28
FT1	24.64	53.51	21.85
FT2	23.74	52.73	23.52
FT3	58.32	28.40	13.28
FT4	38.40	37.01	24.59
FT5	82.03	5.46	12.51
FT6	74.76	10.04	15.20
FT8	31.09	41.05	27.86
FT9	69.52	9.75	20.73
FT10	18.10	53.43	28.48
FT11	26.06	45.70	28.24

$$\% \text{ Ca} = \frac{\text{Ca (mEq/L)}}{\sum \text{Cationes (mEq/L)}} * 100$$

Tabla 10.2b.

Datos Ploteados en el Diagrama de Piper para los Aniones, en base a $\%\text{Cl}+\%\text{SO}_4+\%(\text{HCO}_3+\text{CO}_3)=100$.

IDENTIFICACION	%Cl	%SO4	%HCO3
P1	3.04	3.69	93.27
P2	6.45	4.84	88.71
P3	57.92	4.94	37.14
P4	50.38	9.58	40.04
P5	4.26	26.97	68.77
P6	3.13	2.32	94.55
P7	82.88	4.67	12.46
FF1	4.00	3.24	92.76
FF2	4.79	1.52	93.69
FF3	4.37	4.10	91.53
FF4	4.77	2.80	92.43
FF5	9.96	19.63	70.41
FF11	10.94	2.30	86.76
FF12	9.38	3.46	87.16
FT1	1.73	1.52	96.75
FT2	3.28	2.81	93.90
FT3	21.20	9.87	68.93
FT4	33.38	14.81	51.81
FT5	83.71	9.56	6.73
FT6	92.89	6.72	0.39
FT8	11.60	7.49	80.90
FT9	91.28	7.37	1.35
FT10	3.25	4.56	92.18
FT11	3.55	1.97	94.48

$$\% \text{ Cl} = \frac{\text{Cl (mEq/L)}}{\sum \text{Aniones (mEq/L)}} * 100$$

Conociendo las concentraciones en mEq/L se procede al cálculo de los porcentajes indicados en la Figura 10.1, tanto para aniones como para cationes. Los porcentajes que resultan para las muestras colectadas en el área de Conchagua son mostrados en las Tablas 10.2a y 10.2b.

La forma en que se van ubicando cada punto se muestra esquemáticamente en la Figura 10.2.

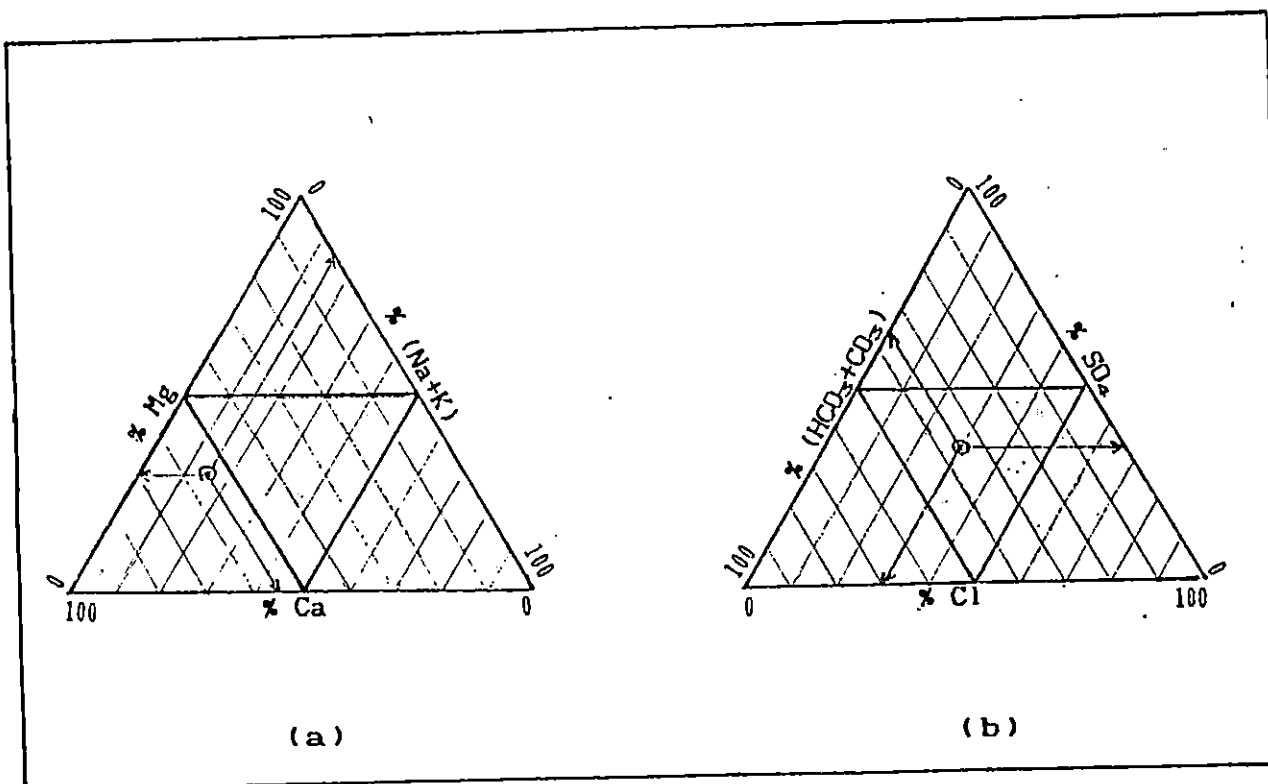


Figura 10.2. Forma de plotear las muestras de agua en el Diagrama de Piper: (a) Cationes, (b) Aniones.

La Figura 10.3 representa la clasificación de aguas correspondiente a las Fuentes Frias muestreadas, para la cual se observa que FF5, FF3 y FF11 pertenecen al grupo de aguas Cálculo-Bicarbonatadas y el resto corresponden a la familia de las aguas Mixtas-Bicarbonatadas,

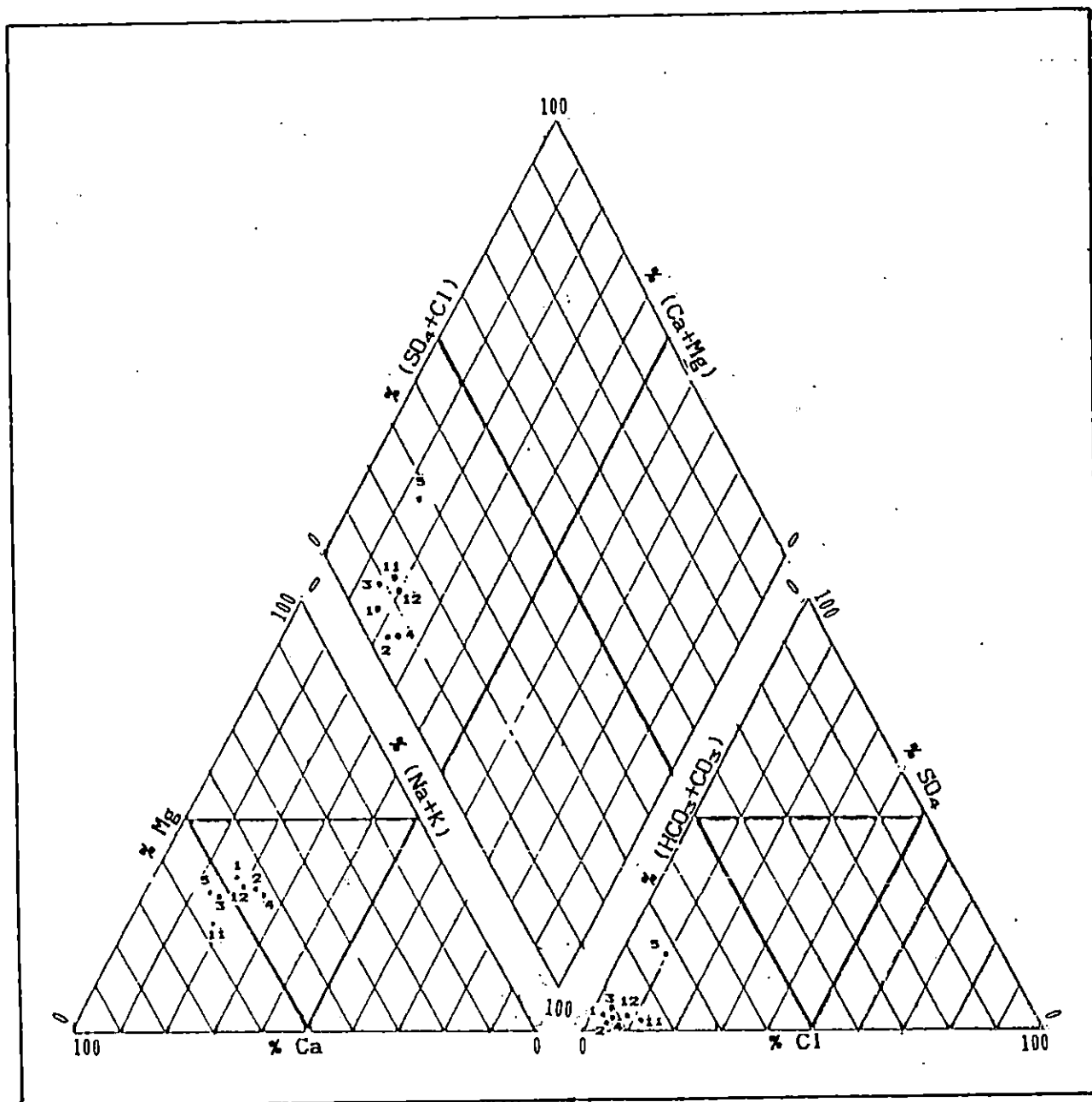


Figura 10.3. Diagrama de Piper para las Fuentes Frias muestreadas en el Area de Conchagua.

aunque la diferenciación es realmente mínima, dichas muestras están mutuamente agrupadas de acuerdo al quimismo que presentan.

Las aguas enriquecidas en Bicarbonatos son características de los acuíferos superficiales.

La Figura 10.4 muestra la ubicación de los Pozos Domésticos muestreados, dentro del Diagrama de Piper. Las muestras P6, es del tipo Cálcico-Bicarbonatada y se ubica muy cerca del tipo Mixta-Bicarbonatada al que pertenecen P1, P2 y P5. Las muestras P4, P3 y P7 se diferencian muy marcadamente de las ya mencionadas y se encuentran clasificadas como Sódicas-Cloruradas.

Lógicamente P1, P2, P5 y P6 se deben caracterizar como parte de acuíferos someros, caso contrario P3, P4 y P7 presentan un mayor interés geoquímico ya que además de ser Sódica-Cloruradas contienen cantidades bajas de Magnesio, característico de las aguas de origen geotérmico (ver segundo párrafo de la sección 10.1.5.2). Los Pozos Domésticos P3, P4 y P7 presentan temperaturas de muestreo de 36.3 °C, 36.4 °C y 43.9 °C y geográficamente se ubican prácticamente en el mismo punto (en los alrededores de Chiquirín, ver Figura 7.7).

Para las Fuentes Termal, en la Figura 10.5, se puede observar que FT1, FT2, y FT10 son del tipo Cálcicas-Bicarbonatadas; FT8 y FT11 son Mixtas-Bicarbonatadas, aunque se encuentran ubicadas muy cerca entre sí. La muestra colectada en FT4 pertenece al grupo Mixta-Bicarbonatada pero de forma tal que podría ser del tipo Mixta-Mixta ya que está cerca de la región establecida para tal tipo de agua. El agua de la Fuente Termal FT3 es típica del grupo Sódica-Bicarbonatada; y las aguas de FT5, FT6 y FT9 se ubican como parte del grupo Sódica-Cloruradas, conteniendo una cantidad relativamente baja de Magnesio, ésto sugiere una pequeña proporción de agua geotérmica profunda.

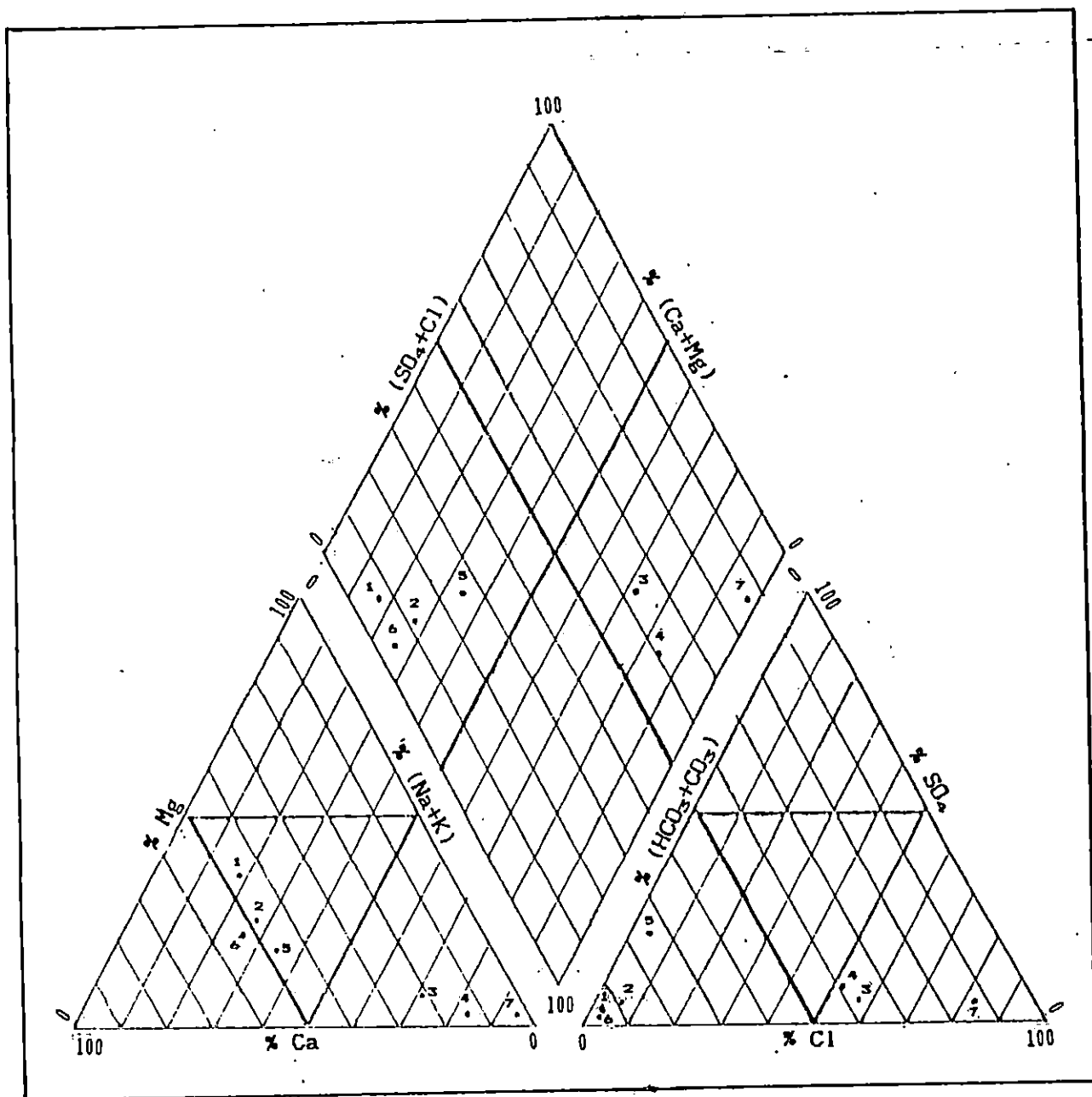


Figura 10.4. Diagrama de Piper para los Pozos Domésticos muestreados en el Area de Conchagua.

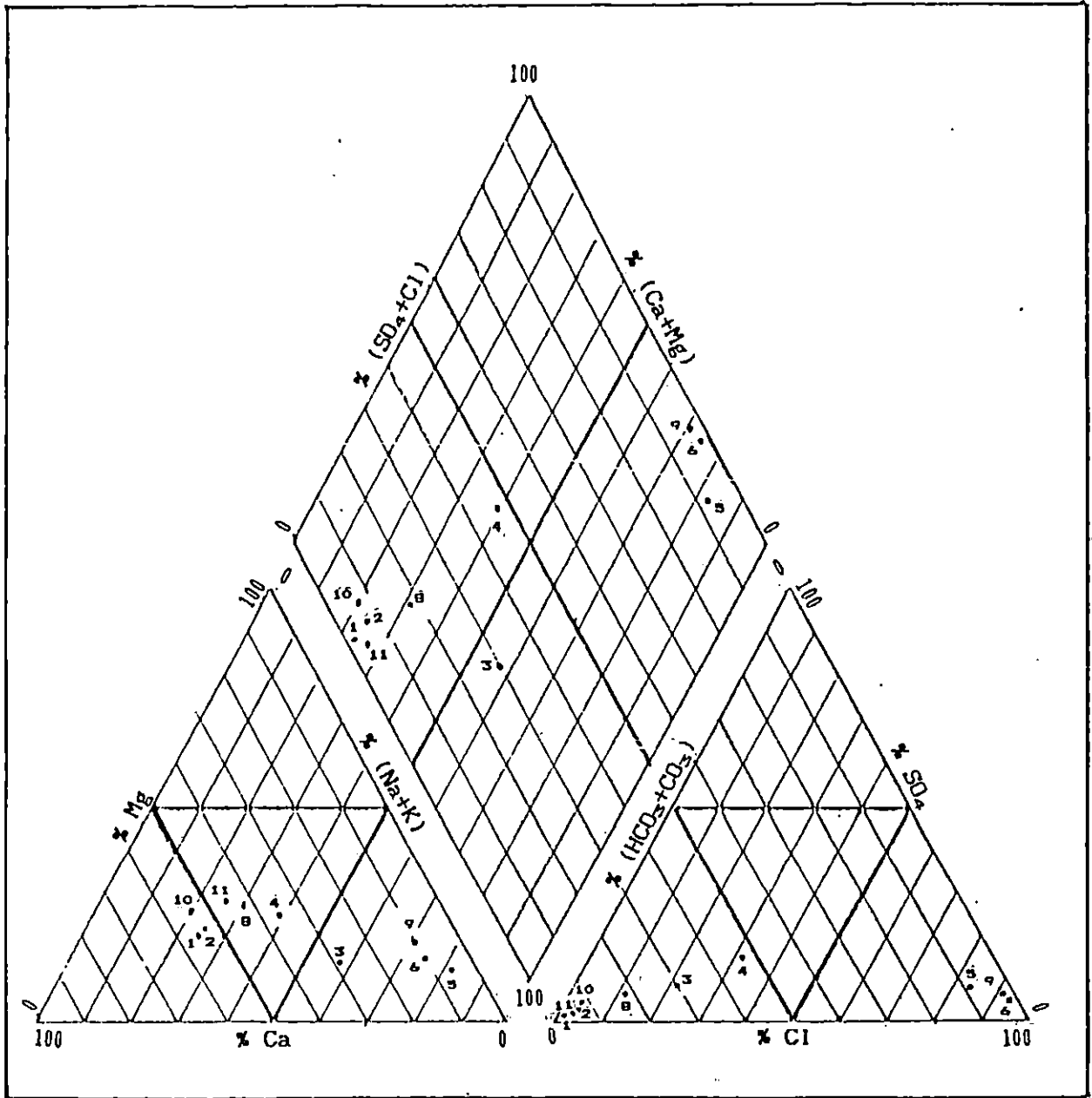


Figura 10.5. Diagrama de Pípper para las Fuentes Terma-
les muestreadas en el Area de Conchagua.

Un comportamiento como el mostrado por el quimismo de FT3 es realmente un poco raro, podría explicarse considerándola un producto de una mezcla de agua superficial fría (que aporta el contenido de Bicarbonato elevado), por la presencia del arroyo que origina FF2 y que pasa a pocos centímetros del afloramiento de FT3; agua de mar que llega a la fuente en cuestión durante la marea alta (que aportaría un elevado contenido de Sodio) y vapor que podría llegar a mezclarse bajo la superficie, pudiendo provenir de las fumarolas de Playitas que se encuentran a unos pocos metros, éstos últimos pueden provocar el termalismo elevado presentado por dicha fuente.

En resumen, de acuerdo a la clasificación de aguas propuesta por Piper, las muestras que presentan un mayor interés desde el punto de vista del estudio geoquímico son P3, P4, P7, FT5, FT6 y FT9, el resto de muestras presentan menos interés para la prospección geoquímica debido a la alta cantidad de Bicarbonatos que contienen y que son características típicas de las aguas superficiales.

10.1.2. Diagrama de D'Amore, Scandiffio y Panichi.

Con el uso de este diagrama se pueden distinguir los diferentes tipos de aguas, ya que proporciona información de los diferentes cruzamientos que ha tenido el agua durante su circulación ascendente hacia la superficie [5].

Este diagrama se encuentra basado en seis parámetros químicos, definidos por las especies presentes con mayor proporción en las muestras de aguas [5].

Todos los parámetros presentados a continuación son normalizados entre 100 y -100, $\Sigma(+)$ y $\Sigma(-)$ representan la suma de cationes y aniones respectivamente, expresados en concentraciones de mEq/L. Estos parámetros se presentan a continuación [5]:

a. Parámetro A:

$$A = \frac{(HCO_3 - SO_4)}{\Sigma(-)} 100 \quad \text{Ec. 10.1}$$

Este parámetro principalmente asiste a la distinción entre aguas circulando a través de terrenos calcáreos (minerales ricos en Ca) y aquellos circulando en rocas evaporíticas (son aquellas en las que se da la depositación de sales en la misma debido a la evaporación de los fluidos [31]).

b. Parámetro B:

$$B = \left(\frac{SO_4}{\Sigma(-)} - \frac{Na}{\Sigma(+)} \right) 100 \quad \text{Ec. 10.2}$$

Este parámetro discrimina entre aguas enriquecidas en Sulfatos y aguas enriquecidas en Sodio encontradas en terrenos sedimentarios.

c. Parámetro C:

$$C = \left(\frac{Na}{\Sigma(+)} - \frac{Cl}{\Sigma(-)} \right) 100 \quad \text{Ec. 10.3}$$

Este parámetro tiende a distinguir entre aguas derivadas de rocas o lavas, que vienen de series Carbonatos evaporíticos o de un basamento. Estos tipos de aguas tienen altas concentraciones de Sodio pero las formaciones tienen muy bajo contenido de Cloruros.

d. Parámetro D:

$$D = \left(\frac{Na-Mg}{\Sigma(+)} \right) 100 \quad \text{Ec. 10.4}$$

Permite distinguir aguas que han circulado sobre piedra Caliza Dolomitizada (Carbonato de Calcio y Magnesio).

e. Parámetro E:

$$E = \left(\frac{Ca+Mg}{\Sigma(+)} - \frac{HCO_3}{\Sigma(-)} \right) 100 \quad \text{Ec. 10.5}$$

Principalmente hace la distinción entre circulación en reservorios Carbonáticos y aquellos ricos en Sulfatos.

f. Parámetro F:

$$F = \left(\frac{Ca-Na-K}{\Sigma(+)} \right) 100 \quad \text{Ec. 10.6}$$

Este parámetro revela el incremento en la concentración de Potasio en las muestras de agua.

Al hacer uso de las ecuaciones anteriormente presentadas se obtienen los resultados que muestra la Tabla 10.3, para lo cual se emplea el quimismo de las muestras, especificado en los resultados de la etapa de análisis químico (ver Tabla 10.1). En dicha tabla se presentan solamente aquellas muestras que se diferencian del resto de su respectivo grupo, discriminando en un sólo tipo (P, FF y FT) aquellas que por su características se asumen de la misma familia de agua.

Las figuras que se presentan a continuación muestran el comportamiento de los puntos muestreados en el área de Conchagua.

Para el caso de las Fuentes Frías, FF representa en la Figura 10.6 a todas las fuentes que presentan un comportamiento químico similar (FF1, FF2, FF3, FF4, FF11 y FF12), de acuerdo con la técnica exploratoria en cuestión, ésto debido a la sobreposición de la gráfica obtenida para cada una de las muestra. Para fines prácticos se ha considerado a este grupo de fuentes como si fueran una sola (ya que el resultado obtenido sobre una será el mismo que el de las de-

más), ésto evita además el desorden de la gráfica y simplifica la interpretación del quimismo. De acuerdo a la figura, FF5 es una fuente fría que presentó una desviación de las demás, por esta razón se ha considerado de manera individual.

Tabla 10.3. Valores para los Parámetros que requiere la Clasificación de D'amore-Scandiffio-Panichi.

IDENTIFICACION	A	B	C	D	E	F
P3	31.29	-64.32	12.89	62.39	-8.81	-52.19
P4	29.17	-69.24	30.28	76.31	-22.61	-70.65
P7	7.66	-89.19	12.02	-92.38	-9.21	-95.33
FF5	25.12	-5.29	9.91	-17.09	49.11	35.61
FT3	59.19	-44.18	32.85	40.66	-27.33	-29.98
FT4	36.84	-20.88	2.46	11.15	9.94	-1.32
FT5	-2.84	-69.79	-4.35	66.85	11.24	-76.59
FT6	-6.33	-66.09	-20.08	57.61	24.86	-64.71
FT8	65.87	-21.54	17.83	0.48	-3.75	10.14
FT9	-6.02	-60.01	-23.91	46.64	29.13	-59.77
P	75.98	-15.17	19.78	-0.76	-7.97	22.7
FF	82.79	-15.14	11.84	-14.19	-5.23	28.5
FT	89.08	-17.34	17.08	-5.65	-14.75	28.29

Algunos autores [5], presentan una comparación entre los Diagramas de D'amore-Scandiffio-Panichi y los Diagramas de Piper, y de acuerdo a éstos la tendencia presentada por FF indica que éste grupo de muestras pertenece a la clasificación de agua Cálculo-Bicarbonatada.

Aunque FF5 también pertenece a este mismo grupo (Aguas Frías) se diferencia por un supuesto enriquecimiento en el contenido de Calcio o Magnesio (alto valor del parámetro E). La diferenciación que presenta FF5 puede ser causado por la distancia de separación

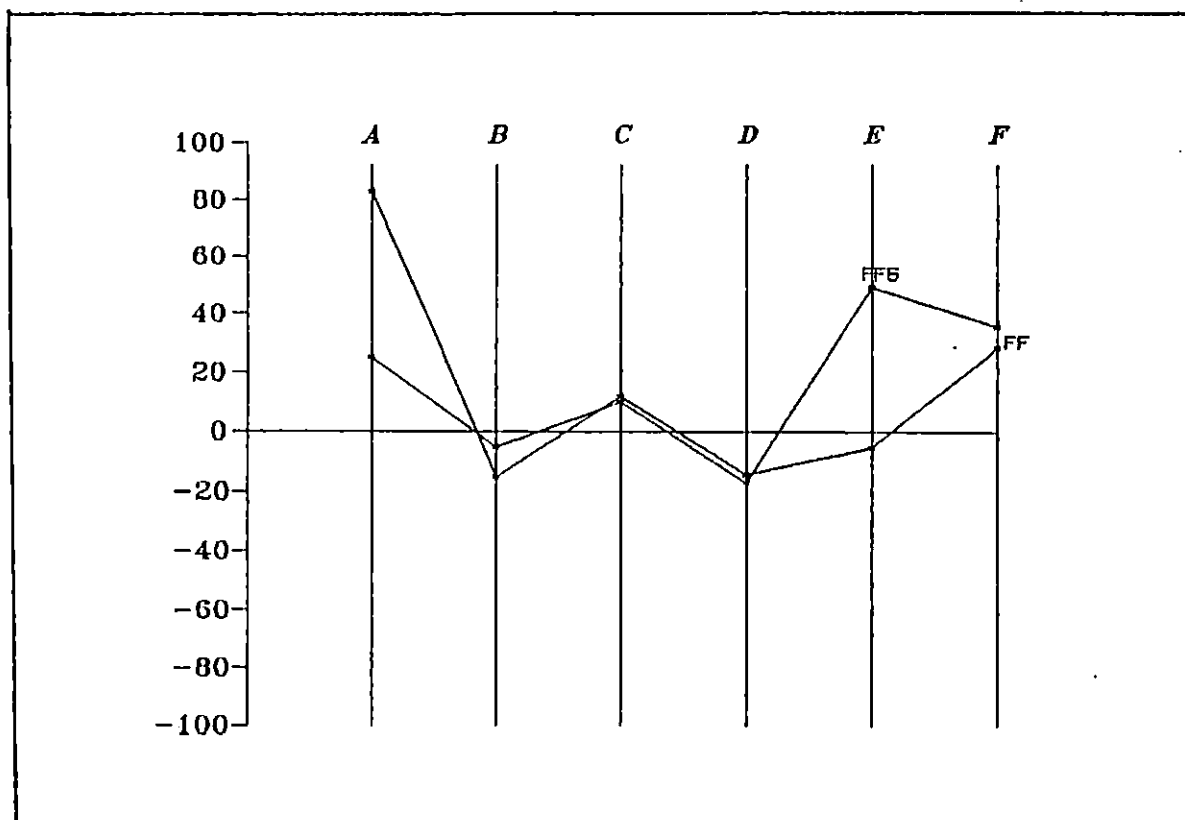


Figura 10.6. Clasificación de Aguas según D'more-Scan-diffio-Panichi para las Fuentes Frías del Area de Conchagua.

de dicha fuente del resto de Fuentes Frías muestreadas, además de encontrarse a una mayor altura sobre el volcán de Conchagua (ver Figura 7.7).

La Figura 10.7, presenta el caso de los Pozos Domésticos, en la cual P representa el grupo de los Pozos Domésticos con similar comportamiento químico (P1, P2, P5 y P6) y por lo cual se manejan como si se tratara de una sola muestra, análogo a las consideraciones hechas para FF en la Figura 10.6 buscando despejar y aclarar la fi-

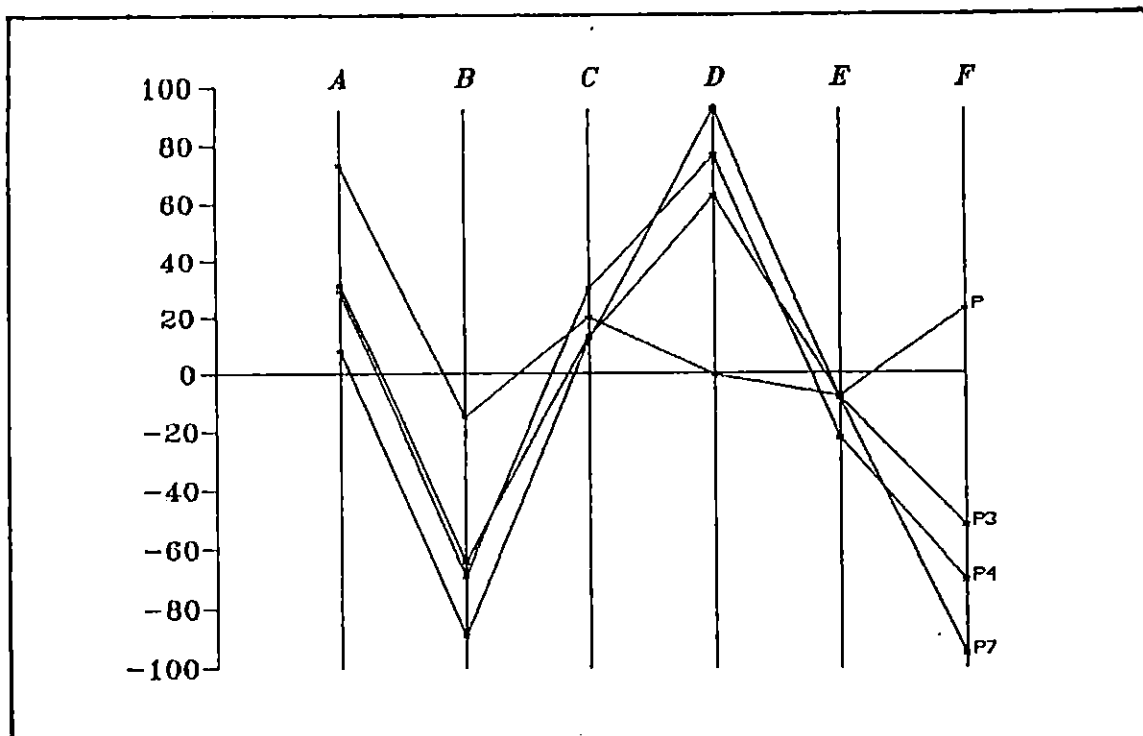


Figura 10.7. Clasificación de Aguas según D'Amore-Scandiffio-Panichi para los Pozos Domésticos del Área de Conchagua.

gura y su interpretación. Sin embargo P3, P4 y P7, de acuerdo a la misma figura, presentan tendencias diferentes a P y aunque similares entre sí.

Según la literatura [5] que compara al Diagrama de D'Amore-Scandiffio-Panichi con el Diagrama de Piper, se puede mencionar que el grupo P pertenece a la clasificación Cálculo Bicarbonatada. Diferente es el caso para P3, P4 y P7 que pertenecen al grupo clasificado como Sódico-Clorurada.

Para la aplicación de las demás técnicas geoquímicas se toman a P3, P4 y P7 como muestras individuales, éstas presentan un contenido relativo de Mg bajo y esta es una característica típica del agua geotérmica.

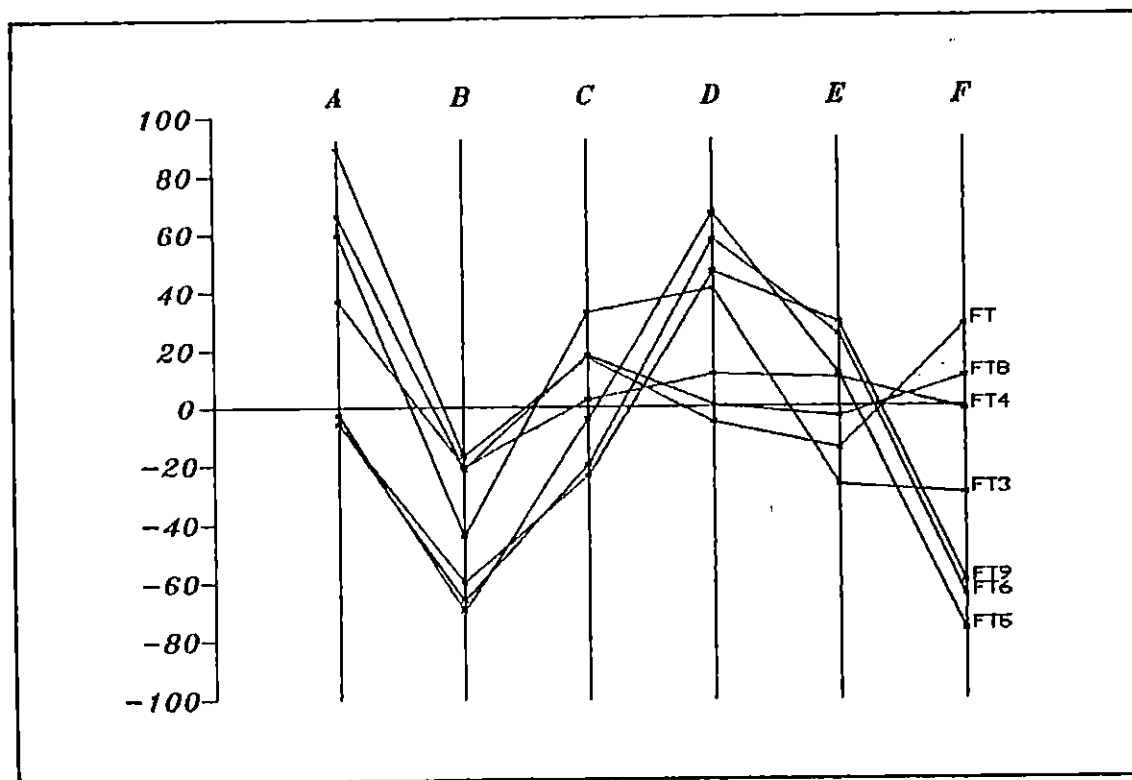


Figura 10.8. Clasificación de Aguas según D'more-Scandiffio-Panichi para las Fuentes Termales del Area de Conchagua.

La Figura 10.8, presenta el caso de los Fuentes Termales, en la cual FT representa al grupo de Fuentes Termales que poseen similar comportamiento químico (FT1, FT2, FT10 y FT11) y por lo tanto en adelante se tendrán las mismas consideraciones hechas con FF y P, con el objeto de simplificar y aclarar el manejo de la información derivable de las técnicas de interpretación aplicadas posteriormente. Sin embargo FT3, FT4, FT5, FT6, FT8 y FT9 presentan características diferentes a FT. La figura demuestra que FT5, FT6 y FT9 presentan una tendencia muy similar, observándose además que el resto muestran una tendencia más particular.

Basados en lo propuesto por la literatura [5], en que se compara el

Diagrama de Piper con el Diagrama de D'amore-Scandiffio-Panichi para la clasificación de manantiales, se puede mencionar que el grupo FT muestra un comportamiento típico de las aguas clasificadas como tipo Cálcico-Bicarbonatada. El resto de ellas no se apega a una clasificación específica de las propuestas por Piper, aunque pueden con alguna probabilidad asemejarse a alguna de ellas, como es el caso de FT5, FT6 y FT9 que pueden caracterizarse como aguas Sódico-Cloruradas, FT3 podría ser del tipo Sódico-Bicarbonatada, FT4 tiende a comportarse como agua Cálcico-Bicarbonatada y Sódica-Clorurada (Mixta) y FT8 se podría derivar de FT por medio de algún proceso que haya influido en su quimismo.

De acuerdo a lo mostrado en la clasificación de D'amore-Scandiffio-Panichi, la historia de circulación hidrológica de las aguas más importantes encontradas en Conchagua puede escribirse de la siguiente forma: Las aguas Sódico-Cloruradas representan aguas sujetas a una circulación profunda [5], probablemente en un basamento cristalino. Presentando más o menos la siguiente secuencia en su posible circulación, de acuerdo al valor de los parámetros mostrados en la Tabla 10.3, principalmente han circulado por terrenos sedimentarios y en piedra caliza no dolomitizada.

Las aguas Cálcico-Bicarbonatadas, son aguas superficiales por sus altos contenidos de Bicarbonatos y que han circulado en terrenos que contienen piedra Caliza dolomitizada[5]. De acuerdo al valor de sus parámetros son aguas circulando en terrenos calcáreos y enriquecidos en Potasio.

En la Tabla 10.4 se muestra el quimismo de aquellas aguas que presentan mayor interés geotérmico. Esta selección se fundamenta en todo lo anteriormente discutido (en la clasificación de aguas de Piper y de D'amore-Sacandiffio-Panichi). En adelante serán estas muestras las que se manejarán con mayor cuidado. Deberá observarse que en ella se ha incluido el quimismo del agua de mar [4], se ha identificado como AM y así se manejará también en adelante.

Tabla 10.4. Quimismo de las Muestras Seleccionadas Basados en la Clasificación de Aguas, por Piper y D'amore.

IDENTIFICACION de la Fuente	Na ⁺ ppm	K ⁺ ppm	Ca ²⁺ ppm	Mg ²⁺ ppm	Cl ⁻ ppm	SO ₄ ²⁻ ppm	HCO ₃ ⁻ ppm	SiO ₂ ppm	T °C
FF5	12	2	36.4	13.6	6	16	73	61.6	23.5
FT3	60.5	8.1	27.7	7.86	35.2	22.2	197	64	96.4
FT4	43.5	5.4	39.2	15.8	62.9	37.8	168	64	49.7
FT5	884	51	53	73.7	1461	226	202	53	98
FT6	5100	232	613	563	9832	964	70.7	170	88.4
FT8	13.6	2	17	7	8	7	96	87.1	40
FT9	2950	160	372	480	5972	953	152	89.2	50.2
P3	109	9.7	28.3	5.63	173.7	15.9	152	125	36.3
P4	86	10.9	13.1	1.16	81.9	21.1	112	132	36.4
P5	84.2	9.1	108	23.62	317	27.2	88.1	82.6	36.8
P7	263	15.1	3.99	2.12	329	25.1	85.1	123	43.9
AM	1525	415	375	1275	19100	2680	139	ND	30

10.1.3. Contenido Relativo de Cl⁻, SO₄²⁻ y HCO₃⁻ (Giggenbach).

La mayoría de las técnicas geoquímicas pueden con confianza ser aplicadas solamente para tipos especificados de fluidos con rangos limitados de composición. Por esta razón, la mayoría de los geotermómetros de solutos iónicos trabajan solamente si se han usado aguas con un balance iónico neutro conteniendo al Cloruro como ión predominante. Cualquier interpretación acerca del quimismo de las muestras de aguas geotermales da mejores resultados realizando una discriminación entre éstas, basándose en un método de clasificación inicial como los antes mencionados, lo anterior se recomienda con el objeto de determinar cuáles de ellas representan un mayor valor durante la exploración geotérmica. Un método más, que está basado en sus mayores contenidos aniónicos: Cloruros, Sulfatos y Bicarbonatos, se presenta a continuación [8].

La posición de un punto en diagramas triangulares es fácilmente obtenida calculando la suma de las concentraciones (en mg/Kg[≈]ppm como tal) de los tres constituyentes involucrados, haciendo uso de la

Tabla 8.2 o 10.4, para el caso [8]:

$$S = Cl + SO_4 + HCO_3 \quad \text{Ec. 10.7}$$

El próximo paso consiste en la evaluación del % Cl y el % HCO_3^- de acuerdo a:

$$\%Cl = \left(\frac{Cl}{S}\right) * 100 \quad \text{Ec. 10.8}$$

$$\%HCO_3 = \left(\frac{HCO_3}{S}\right) * 100 \quad \text{Ec. 10.9}$$

El resultado de evaluar las expresiones anteriores, empleándose el quimismo mostrado en la Tabla 10.4, en la cual AM es el contenido químico del agua de mar [4], se presenta a continuación en la Tabla 10.5.

Tabla 10.5. Porcientos Relativos de HCO_3^- , SO_4^{2-} y Cl^- para las muestras colectadas en el Area de Conchagua.

IDENTIFICACION	% HCO_3^-	% SO_4	% Cl
FF	93.79	3.85	2.36
FF5	76.83	6.31	16.86
P	94.56	2.2	3.24
P3	49.73	45.06	5.21
P4	52.04	30.09	17.87
P5	74.36	2.68	22.96
P7	19.38	74.91	5.71
FT	96.07	1.75	2.18
FT3	77.44	13.84	8.72
FT4	66.52	23.41	10.07
FT5	10.69	77.34	11.97
FT6	0.65	91.48	8.87
FT8	86.49	7.21	6.3
FT9	2.24	88.12	9.64
AM	0.9	87.9	11.2

La presentación de los datos en términos de estos diagramas triangulares tienen la ventaja de que proporcionan la oportunidad de dar un vistazo a los agrupamientos y tendencias del quimismo de las muestras colectadas en los manantiales, de esta forma se puede crear una idea preliminar de la posibilidad que existan procesos de mezcla en la región.

En muchas formas el diagrama triangular así planteado es muy parecido al diagrama propuesto por Piper para la clasificación de aguas, inclusive la manera de ubicar los puntos es similar a lo mostrado por la Figura 10.2.b del Diagrama de Piper. La mayor desventaja es el uso de la suma de los constituyentes, eliminando la información que podría proporcionar un componente en forma individual como geoindicador. Estos diagramas son solamente presentados como tales y no llevan a una discusión más profunda de los componentes del recurso o los procesos de formación de éste, así como tampoco de las correlaciones termodinámicas.

En este diagrama se presenta varios grupos de aguas tales como las volcánicas y las calentadas por vapor. La mayoría de las técnicas geoquímicas no son convenientes para la aplicación sobre aguas ácidas. El grupo más conveniente son las aguas neutras, con bajo contenido de Sulfatos, las aguas geotérmicas con alto contenido de Cloruros ubicadas a lo largo del eje Cl-HCO_3^- y terminando en la esquina de los Cloruros (Figura 10.9). En el caso de las aguas neutras, pero con alto contenido de HCO_3^- es necesario tomar en cuenta cierto cuidado en la aplicación de la mayoría de los "geoindicadores", ya que por lo general estas aguas provienen de los margenes más fríos y superficiales de acuíferos predominantes en líquido como en los predominantes en vapor.

Este diagrama no solo permite eliminar las aguas sin interés geotérmico, también puede proporcionar una señal inicial de las relaciones de mezcla o agrupamiento geográfico. Los altos contenidos de Sulfatos, aguas calentadas por vapor, son usualmente encontradas

sobre las partes más elevadas de un campo. El grado de separación entre los datos para las muestras con altos contenidos de Cloruros y aquellas ricas en Bicarbonatos proporciona una idea del posible origen de cada una de ellas; las que contienen altos contenidos de Cloruros pueden originarse de acuíferos profundos a elevadas temperaturas y aquellas con elevado contenido de Bicarbonatos generalmente se consideran originadas desde acuíferos superficiales.

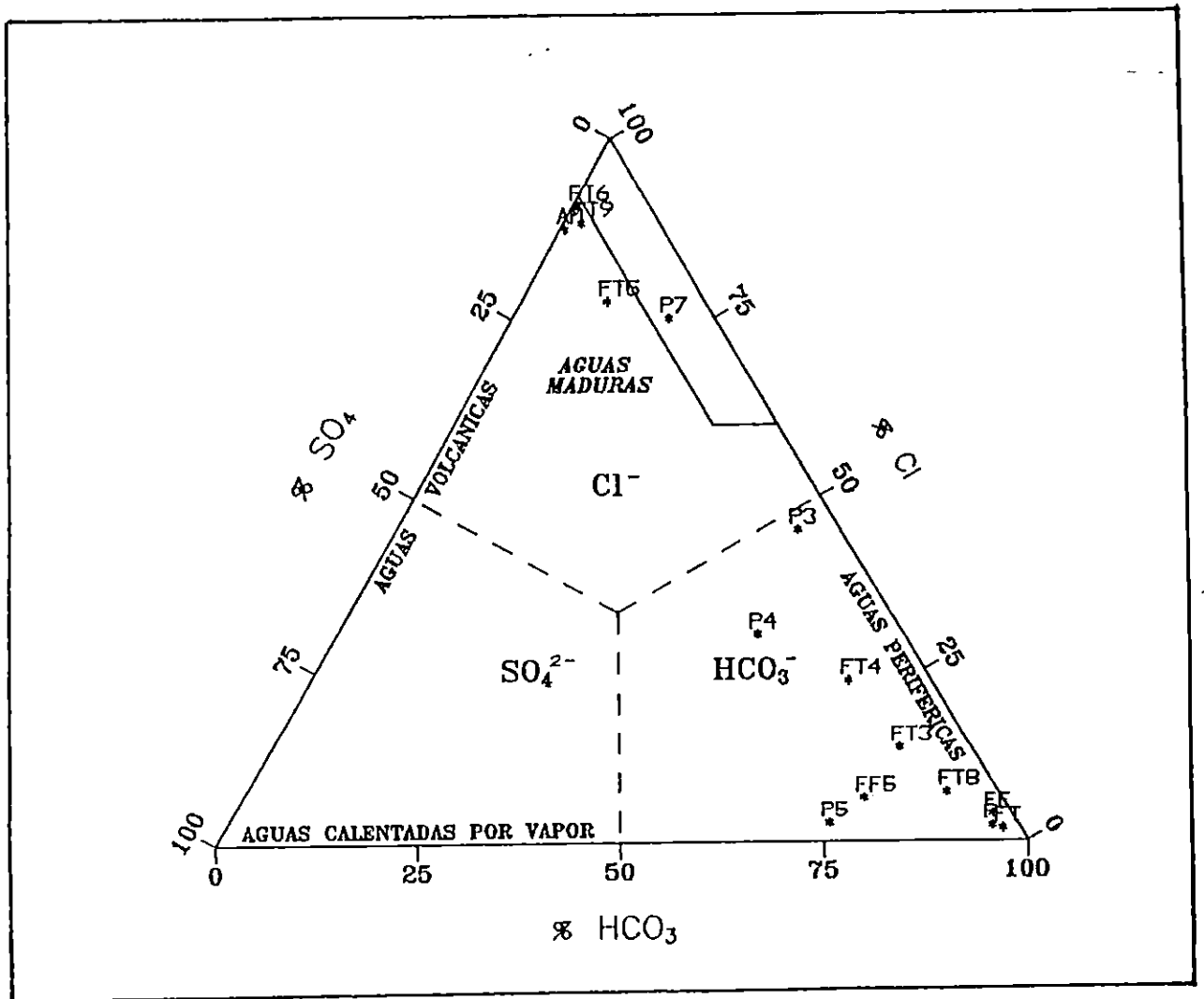


Figura 10.9. Diagrama HCO₃-SO₄-Cl propuesto por Giggensbach para la clasificación de Muestras de Aguas.

La Figura 10.9 presenta la distribución de las muestras tomadas en Conchagua, donde es evidente que P7, FT5, FT6 y FT9 tienden a confirmar el mayor interés geoquímico mostrado por los diagramas de Piper y de D'amore-Scandiffio-Panichi, presentados anteriormente. Se observa además que de nuevo P3 y P4 se separan del grupo de muestras, mostrando una tendencia hacia las muestras antes señaladas como de "mayor interés".

Observando con detenimiento la distribución de los puntos en el diagrama podría pensarse en que la vaga linealidad mostrada, desde el punto AM (que representa la ubicación del agua de mar [3], ver contenido químico en la Tabla 10.4) hasta el vértice del Bicarbonato, indica un proceso de mezcla posible de realizarse en la región.

En este diagrama FF, P y FT representan una consideración igual a la señalada en la clasificación según D'amore-Scandiffio-Panichi.

Tabla 10.6. Sumario de Resultados Obtenidos de la Clasificación de Aguas Realizada a las Muestras tomadas en el Area de Conchagua.

Naturaleza de la Fuente	Pipper	D'amore-Scandiffio & Panichi	Cl-SO ₄ -HCO ₃ (Giggenbach)
Pozos Domésticos	P3	P3	P3
	P4	P4	P4
	P7	P7	P7
Fuentes Termales	FT5	FT3	FT3
	FT6	FT4	FT6
	FT9	FT5	FT9
		FT6	
		FT8	
		FT9	

NOTA: Los tres métodos coinciden en que P3, P4, P7, FT5, FT6 y FT9 presentan un mayor interés Geoquímico.

Luego de haber realizado la clasificación de aguas, mediante el empleo de diversas técnicas, es posible observar que existen ciertas muestras a las cuales se debe tener en especial consideración. La Tabla 10.6 presenta un resumen de ésta clasificación realizada, de acuerdo a los tres métodos.

10.1.4. Métodos Gráficos para la Estimación de la Temperatura Profunda.

Las técnicas empleadas hasta ahora solamente permiten caracterizar cualitativamente el recurso buscado en los alrededores de Conchagua. Para poder determinar el interés geotérmico de la región, en términos cuantitativos, se requiere emplear técnicas orientadas a la predicción superficial de la temperatura profunda. Existen diversas técnicas, que se aplican tanto gráficamente como geotermométricamente, a continuación se detallan algunas de las más usadas en los estudios exploratorios, no sólo en la etapa de reconocimiento sino incluso también en la prefactibilidad.

10.1.4.1. El Diagrama Na-K-Mg.

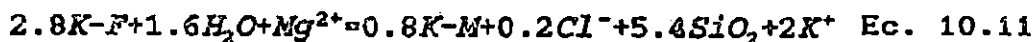
Los geotermómetros de solutos iónicos basados en los contenidos de Na-K y Na-K-Ca proporcionan una herramienta valiosa para la evaluación de las condiciones profundas de sistemas geotérmicos. La mayoría de los problemas en su uso aumentan al aplicarlos a muestras no recomendadas. Una eliminación inicial está basada en su pH ó a su contenido relativo de Cl^- , SO_4^{2-} y HCO_3^- que proporcionan una buena forma de evaluar su confiabilidad [8].

Recientemente se ha recomendado una técnica de indicación automática de lo apropiado de aplicar los geoindicadores de los solutos iónicos a las muestras de aguas. Está basada en esencia sobre la dependencia de dos reacciones con la temperatura [8]:



Ec. 10.10

y



Donde F =Feldespató y M =Mica.

Los contenidos de Na, K y Mg de aguas en equilibrio con esta agrupación son accesibles para una evaluación rigurosa. La dependencia teórica de la temperatura, con la concentración correspondiente pueden ser usadas para derivar dos geotermómetros [8]:

$$t_{kn} = \frac{1390}{(1.75 - L_{kn})} - 273$$

Ec. 10.12

y

$$t_{kn} = \frac{4410}{(14 - L_{kn})} - 273$$

Ec. 10.13

donde

$$L_{kn} = \log\left(\frac{K}{Na}\right)$$

Ec. 10.14

y

$$L_{kn} = \log\left(\frac{K^2}{Mg}\right)$$

Ec. 10.15

donde además la concentración en ambas ecuaciones está en mg/Kg[≈] ppm como tal.

Las aplicaciones individuales de las ecuaciones 10.12 y 10.13 frecuentemente proporcionan una temperatura de equilibrio aparente. Esto se puede explicar en términos de las diferentes velocidades de reajuste de las dos reacciones respecto a los cambios físicos del

medio encontrado por el agua durante su ascenso. Se ha encontrado que la ecuación 10.11 se reequilibra mucho más rápido y, usualmente da estimaciones de temperatura más bajas. Los valores de L_{Km} son muy sensibles a las mezclas de aguas ácidas (superficiales) que no están en equilibrio, mientras L_{Kn} es menos afectado por estos procesos de la superficie. Si se combinan las dos relaciones, se puede obtener un método que permita establecer el grado de equilibrio agua-roca (minerales) para ser evaluadas y eliminar las muestras no representativas [8].

El método está basado en el uso de diagramas triangulares. Debido al término no lineal K^2 , se toma la raíz cuadrada del contenido de Mg y las coordenadas de dicho diagrama se calculan de acuerdo a [8]:

$$S = \frac{Na}{1000} + \frac{K}{100} + \sqrt{Mg} \quad \text{Ec. 10.16}$$

$$\frac{Na}{1000} = \frac{Na}{10 \cdot S} \quad \text{Ec. 10.17}$$

$$\frac{Na}{1000} = \frac{Na}{10 \cdot S} \quad \text{Ec. 10.18}$$

La evaluación del geotermómetro Na-K-Mg se lleva a cabo para hacer uso del diagrama triangular que fué propuesto por Giggenbach (1988) y que se muestra en la Figura 10.10. Al plotear las descargas de los pozos como ha de esperarse, caen sobre la línea de equilibrio completo, a su respectiva temperatura profunda.

Todas las aguas que corresponden a manantiales están desviadas del equilibrio, orientadas hacia la esquina del contenido de Mg. Su posición indica solamente una pequeña caída en el valor de t_{Kn} , pero también un mayor decremento en t_{Km} . Esto refleja la mucho mayor rapidez con la que el geotermómetro K-Mg se ajusta a los cambios de temperatura comparada con el sistema Na-K. La diferencia en la lo-

calización de los pozos y los manantiales es probablemente una función del tiempo que tomó al agua su ascenso desde la profundidad hasta la superficie [8].

La ventaja de éstos diagramas para la evaluación preliminar de la correlación termodinámica y cinética, es la facilidad para la presentación de la ubicación de un gran número de muestras simultáneamente, permitiendo la delineación de tendencias de mezcla y agrupamiento.

La Tabla 10.7 muestra los datos ploteados en la Figura 10.10 y resultan de resolver las Ecuaciones 10.16, 10.17 y 10.18 empleando el quimismo de las muestras colectadas en el área de Conchagua (ver Tabla 10.4).

Tabla 10.7. Porcientos Relativos de Na-K-Mg para las Muestras colectadas en el Area de Conchagua.

IDENTIFICACION	% Mg ^(1/2)	% Na/1000	% K/100
FF	99	0.37	0.63
P, FT	98.04	0.7	1.26
P3	92.01	4.23	3.76
P4	84.67	6.76	8.57
P7	77.86	14.06	8.08
FT3	95.19	2.05	2.76
FT5	86.03	8.86	5.11
FT6	76.18	16.37	7.45
FT9	82.8	11.15	6.05
AM	69.6	22.3	8.1

De acuerdo a la Figura 10.10 la tendencia a ubicarse sobre una línea recta es más que evidente, por lo cual podría suponerse un proceso de mezcla. En la misma figura se muestra el resultado de la extrapolación de la línea que se supone siguen las muestras de Conchagua lo cual es bastante cierto considerando que el valor del

coeficiente de correlación es muy próximo a la unidad ($r=0.98$), lo cual resulta estadísticamente muy significativo; esta línea corta la curva de equilibrio en un valor aproximado de 180°C .

No necesariamente este valor de temperatura tiene que ser el valor para el reservorio, podría ser un poco menor o talvez, en el mejor de los casos mayor. El rango probable de temperatura debe ser determinado por medio de la confrontación con los resultados que se obtengan en otros métodos geoquímicos, incluyendo los geotermómetros.

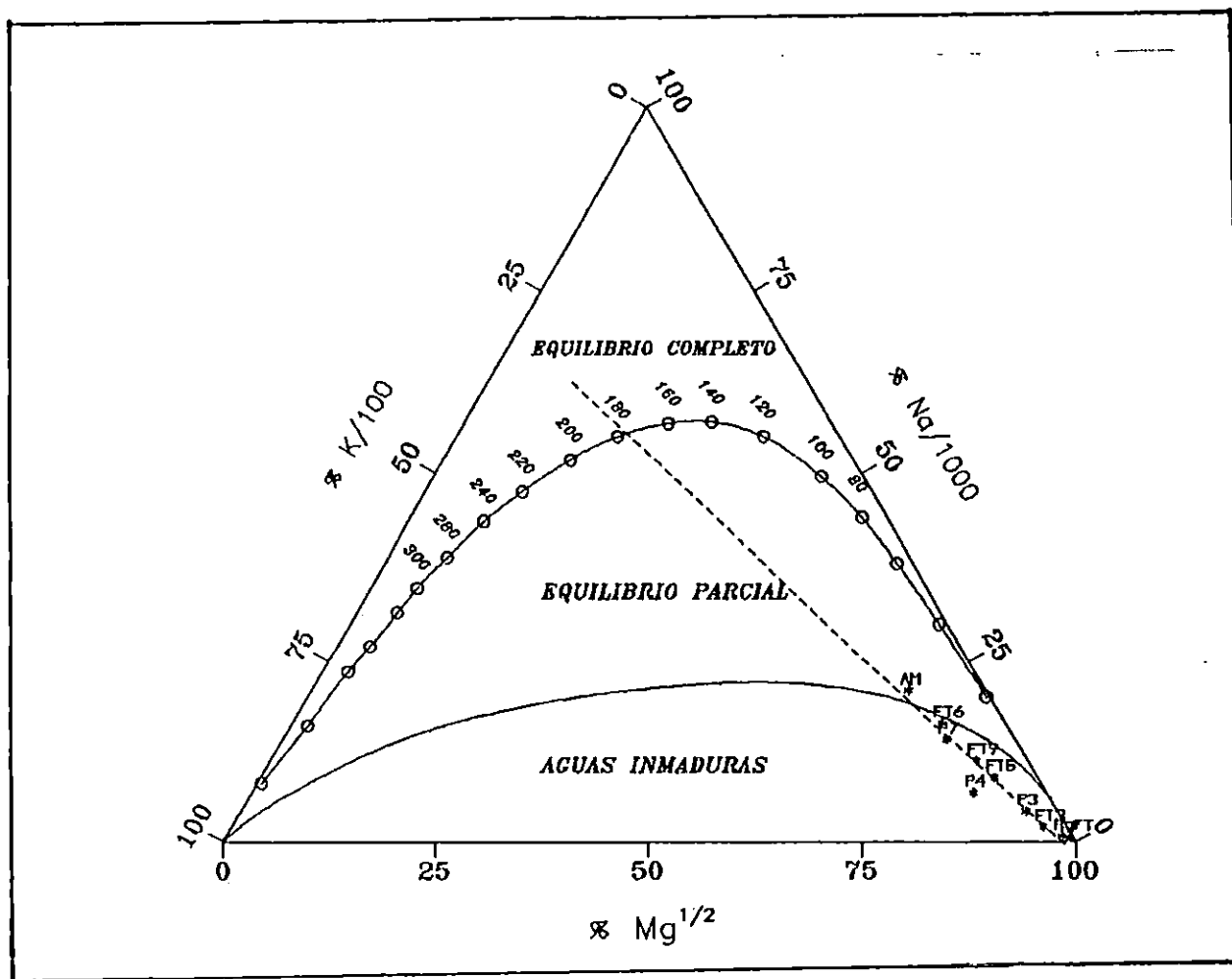


Figura 10.10. Diagrama Na-K-Mg propuesto por Giggenbach para la determinación de la Temperatura Profunda.

10.1.4.2. Modelo de Mezcla Sílice-Entalpía.

El empleo de los modelos de mezcla de Sílice requiere del uso, para su construcción, de un geotermómetro que ha sido derivado de una forma experimental por variaciones de la solubilidad de las diferentes especies de Sílice en agua, como una función de la temperatura y presión [15].

La reacción básica para la disolución de los minerales de la Sílice es:



en la mayoría de los sistemas geotérmicos las aguas profundas están en equilibrio con Cuarzo. La Calcedonia, Cristobalita y Sílice Amorfa debido a los muy bajos porcentos de conversión a Cuarzo en pH moderados y temperaturas altas, tienen su curva de solubilidad a temperaturas moderadas [15].

Los efectos de la presión en la solubilidad del Cuarzo son considerables únicamente cerca del punto crítico del agua. En el rango de temperaturas de la mayoría de sistemas, la solubilidad del Cuarzo es poco afectada por la presencia de sales disueltas [15].

Para la aplicación de relaciones de la solubilidad de Sílice con la temperatura se supondrá que no hay efecto de la presión, pH o salinidad y que la solubilidad es solamente dependiente de la temperatura [15].

Las ecuaciones que proporcionan de una manera muy aproximada la solubilidad en el equilibrio de la Sílice y sus diferentes especies en un rango de temperaturas desde 20 °C hasta 250 °C, incluyendo también un geotermómetro el cual proporciona la solubilidad del

Cuarzo en un rango desde 20 °C hasta 330 °C son las siguientes [6,15]:

$$t (^{\circ}\text{C}) = \frac{1309}{(9.19 - \text{Log}S)} - 273.15 \quad \text{Ec. 10.20}$$

Cuarzo sin pérdida de vapor.

$$t (^{\circ}\text{C}) = \frac{1522}{(5.75 - \text{Log}S)} - 273.15 \quad \text{Ec. 10.21}$$

Cuarzo con máxima pérdida de vapor.

$$t (^{\circ}\text{C}) = \frac{1032}{(4.69 - \text{Log}S)} - 273.15 \quad \text{Ec. 10.22}$$

Calcedonia

$$t (^{\circ}\text{C}) = \frac{1000}{(4.78 - \text{Log}S)} - 273.15 \quad \text{Ec. 10.23}$$

α-Cristobalita.

$$t (^{\circ}\text{C}) = \frac{781}{(4.51 - \text{Log}S)} - 273.15 \quad \text{Ec. 10.24}$$

β-Cristobalita

$$t (^{\circ}\text{C}) = \frac{731}{(4.52 - \text{Log}S)} - 273.15 \quad \text{Ec. 10.25}$$

Sílice Amorfa.

donde S es la concentración de Sílice en mg/Kg ≈ ppm como tal.

$$t (^{\circ}\text{C}) = C_1 + C_2S + C_3S^2 + C_4S^3 + C_5\text{Log}S \quad \text{Ec. 10.26}$$

donde de C_1 hasta C_5 son constantes dadas en la Tabla 10.8 [6].

En función de la ecuación 10.26 se derivan las ecuaciones para la construcción del diagrama de equilibrio Sílice-Entalpia.

Tabla 10.8. Constantes para las Ecuaciones usadas en el Modelo de Mezcla de Sílice [6].

i	Ai	Bi	Ci	Di
1	418.84	2035	-42.198	-3.5532
2	10.286	-5.0499	0.28831	0.146
3	-0.05092	0.057399	-0.00036686	-0.0004927
4	0.00026309	-0.00030726	3.1665E-07	1.2305E-06
5	-6.9303E-07	-7.9095E-07	77.034	-4.9421E-10
6	7.4566E-10	-8.6968E-10	---	---
7	-1209.8	1342.4	---	---
8	11.99	-13.298	---	---
9	-353.76	396.29	---	---

10.1.4.2.1. Diagrama Sílice-Entalpía.

Es más útil usar entalpías como coordenadas en vez de las temperaturas en los diagramas contra la concentración de la Sílice, por que las entalpías de las aguas al ser mezcladas se conservan ya que los efectos de los calores de dilución en este caso son despreciables, por lo que la temperatura no se conserva al mezclarse diferentes tipos de aguas. En la Figura 10.11 se muestra la solubilidad del Cuarzo en agua pura a la presión de vapor de la solución, graficado en función de la entalpía de la solución. Para aplicaciones prácticas, los fluidos de la mayoría de los reservorios son suficientemente diluidos, de tal manera que la entalpía del agua pura puede ser usada para la construcción de los diagramas Sílice-Entalpía [6].

Una ecuación que expresa la solubilidad del Cuarzo en agua a la presión de vapor de la solución como una función de la entalpía es la que se muestra a continuación [6]:

$$S = D_1 + D_2 H + D_3 H^2 + D_4 H^3 + D_5 H^4 \quad \text{Ec. 10.27}$$

donde S es la concentración de Silicio en mg/Kg (ppm como tal), H es la entalpía del agua en J/g y $D_1 \dots D_5$ son constantes que pueden encontrarse en la Tabla 10.8. Esta ecuación no debe usarse para una entalpía mayor de 1670 J/g (350 °C), las ecuaciones que expresan la entalpía del agua y vapor a la presión de vapor de la solución para un rango de 50-340 °C son:

$$L = A_1 + A_2 t + A_3 t^2 + A_4 t^3 + A_5 t^4 + A_6 t^5 + A_7 t^{-1} + A_8 t^{-2} + A_9 \text{Log}t \quad \text{Ec. 10.28}$$

y

$$G = B_1 + B_2 t + B_3 t^2 + B_4 t^3 + B_5 t^4 + B_6 t^5 + B_7 t^{-1} + B_8 t^{-2} + B_9 \text{Log}t \quad \text{Ec. 10.29}$$

donde t es la temperatura en °C, L y G son las entalpías del líquido y del vapor respectivamente, $A_1 \dots A_9$ y $B_1 \dots B_9$ son constantes dadas en la Tabla 10.8.

La entalpía para cuando la temperatura es menor de 50 °C se calcula por medio de la siguiente ecuación:

$$L = 4.1868t \quad \text{Ec. 10.30}$$

Ahora, los modelos gráficos pueden ser usados en manifestaciones termales o superficiales para determinar el grado de mezcla de diferentes aguas y la temperatura profunda de un sistema geotérmico. Esto se hace usando las concentraciones de Sílice disuelta y la entalpía (calculada a partir de la Ec. 10.28 y Ec. 10.30 en función de la temperatura) de las muestras de agua en un diagrama Sílice-

Entalpía. La Ec. 10.27 se emplea para la obtención de la curva de equilibrio Sílice-Entalpía.

La Tabla 10.9 muestra el valor de la entalpía para la temperatura de muestreo correspondiente a cada muestra colectada en Conchagua, a la vez se presenta el correspondiente contenido de Sílice (tomado de la Tabla 10.4).

Tabla 10.9. Datos para el Modelo de Mezcla Sílice-Entalpía.

IDENTIFICACION	Entalpía (J/g)	SiO ₂ (ppm)
FF	125.33	71.7
FF5	98.4	61.6
P	134.23	74.15
P3	152	125
P4	152.4	132
P7	183.8	123
FT	167.05	84.43
FT3	404.8	64
FT4	208	64
FT5	414	53
FT6	371.4	170
FT8	167.5	87.1
FT9	210.02	89.2

Algunas de los supuestos, que deben de hacerse para aplicar estos métodos gráficos son [15]:

- No existe pérdida de calor después de la mezcla.
- Que la Sílice inicial contenida en el reservorio sea controlado por la solubilidad del Cuarzo.
- No ocurra una deposición de la Sílice antes y después de la mezcla.

Estos métodos son aplicables a manifestaciones que no tengan pérdida de calor antes de mezclarse con aguas frías o no tenga pérdida de calor por separación de vapor antes de la mezcla [15].

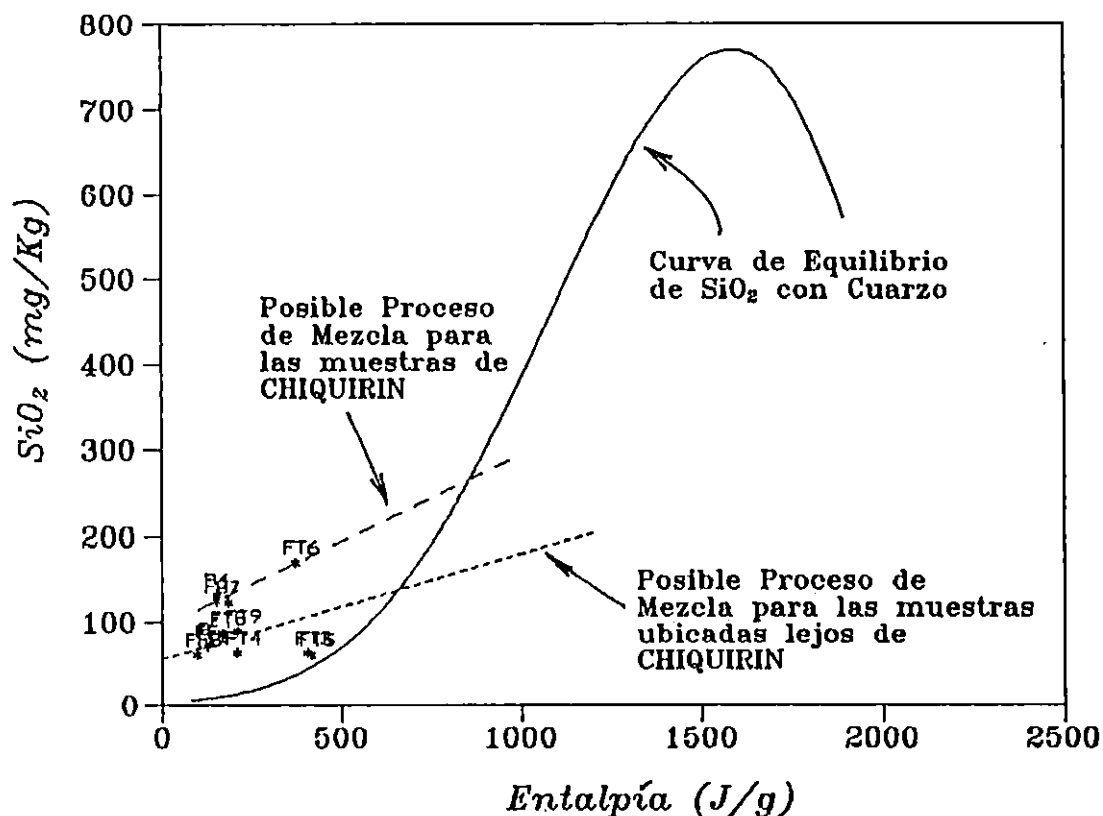


Figura 10.11. Modelo de Mezcla Sílice-Entalpía para las muestras colectadas en el Area de Conchagua.

La Figura 10.11 muestra el modelo de mezcla hipotético que probablemente se este verificando desde el reservorio hasta la superficie, originando las fuentes muestreadas en Conchagua.

En la figura se ha supuesto que se presentan dos procesos de mezcla, cada uno a diferente temperatura. La línea discontinua superior representa un probable mezclado, con aguas frías (probablemente agua de mar), y que origina las fuentes muestreadas en los

alrededores de Punta Chiquirín, con mucha seguridad los puntos siguen esa tendencia lineal ya que el coeficiente de correlación lineal es muy próximo a la unidad ($r=0.96$), lo cual indica una altísima significancia estadística. Dicho proceso de mezcla corta la línea de equilibrio con Cuarzo a una entalpía de aproximadamente 825 J/g (aproximadamente a 195 °C) y un contenido de SiO_2 de 290 ppm aproximadamente, éstas podrían ser las condiciones imperantes en el reservorio.

La segunda línea discontinua, la inferior, propone un segundo proceso de mezcla, que virtualmente origina todas las demás fuentes muestreadas, con la diferencia de que en este caso las condiciones profundas implican una menor entalpía (aproximadamente 700=aproximadamente 165 °C) y un contenido de SiO_2 de unos 170 ppm. La confianza para este proceso es bastante bajo, al calcular el coeficiente de correlación lineal se concluye que existen muchos puntos alejados de la distribución lineal ($r=0.47$), dicho valor muestra una pobre significancia estadística; la temperatura que predice este proceso de mezcla es entonces poco probable, podría ser mayor o menor.

En caso de tomar como válidas ambas suposiciones, se considera que las temperaturas más elevadas se encuentran en las cercanías de punta Chiquirín, las fuentes que siguen el proceso de mezcla originado a una menor temperatura, de acuerdo a la hipótesis planteada, pueden representar los márgenes del reservorio existente bajo la región.

10.1.4.3. El Modelo de Mezcla Cloruro-Entalpía.

Al igual que el modelo de mezcla SiO_2 -Entalpía, es posible el ensayo de hipótesis sobre posibles procesos de mezcla de las aguas geotérmicas con aguas de un origen más superficial. El contenido de Cloruros en las aguas geotérmicas usualmente es elevado, en ocasio-

nes arriba de 10,000 ppm. A diferencia del contenido de Sílice la concentración de Cloruros no depende de la temperatura del fluido, es decir no se puede obtener una relación dependiente de la temperatura, como las curvas de equilibrio de otros minerales. El contenido de Cloruros en los fluidos geotérmicos se ven solamente afectados por procesos de dilución o evaporación, principalmente [6].

Si se grafica, para cierto número de muestras, el contenido de Cloruros contra la entalpía del agua es posible determinar si éstos han sufrido algún tipo de proceso, de dilución o evaporación. Generalmente la tendencia de los puntos es a seguir una línea recta, lo cual implica un posible proceso de mezcla, provocando un descenso en concentración y en temperatura.

Para el caso de Conchagua, las muestras seleccionadas por su comportamiento de interés mostrado en los gráficos de clasificación de las aguas, las cuales han sido anteriormente discutidas, indican este comportamiento de alineamiento en la gráfica Cl-Entalpía (Figura 10.12).

Tabla 10.10. Datos para el Modelo de Mezcla Cloruro-Entalpía.

IDENTIFICACION	Entalpía (J/g)	Cl ⁻ (ppm)
FF	125.33	6.6
F5	98.4	6
P	127.6	4
P3	152	137.73
P4	152.4	81.9
P7	183.8	329
FT	167.05	4.19
FT4	208	62.9
FT6	371.4	4747.56
FT8	167.5	8
FT9	210.3	1096.95

Los datos graficados en la Figura 10.12 se muestran en la Tabla 10.10, el contenido de Cloruros se obtiene de la Tabla 10.4 (análisis químico) y el valor de la Entalpía se obtiene a la temperatura de afloramiento de cada fuente.

La Figura 10.12 muestra que, muy posiblemente el agua de mar, a una temperatura de 30 °C, punto AM cuyo quimismo se muestra en al Tabla 10.4, llega a una profundidad tal que alcanza la ubicación del reservorio (punto M), en la medida que llega a él comienza a calentarse y a diluirse. El calentamiento es obvio, se debe a una aproximación con la fuente de calor. La dilución, en términos de la cantidad de cloruros, se debe a la mezcla con los mismos fluidos que se mantienen en el reservorio, que generalmente poseen una concentración menor en cloruros que el agua de mar.

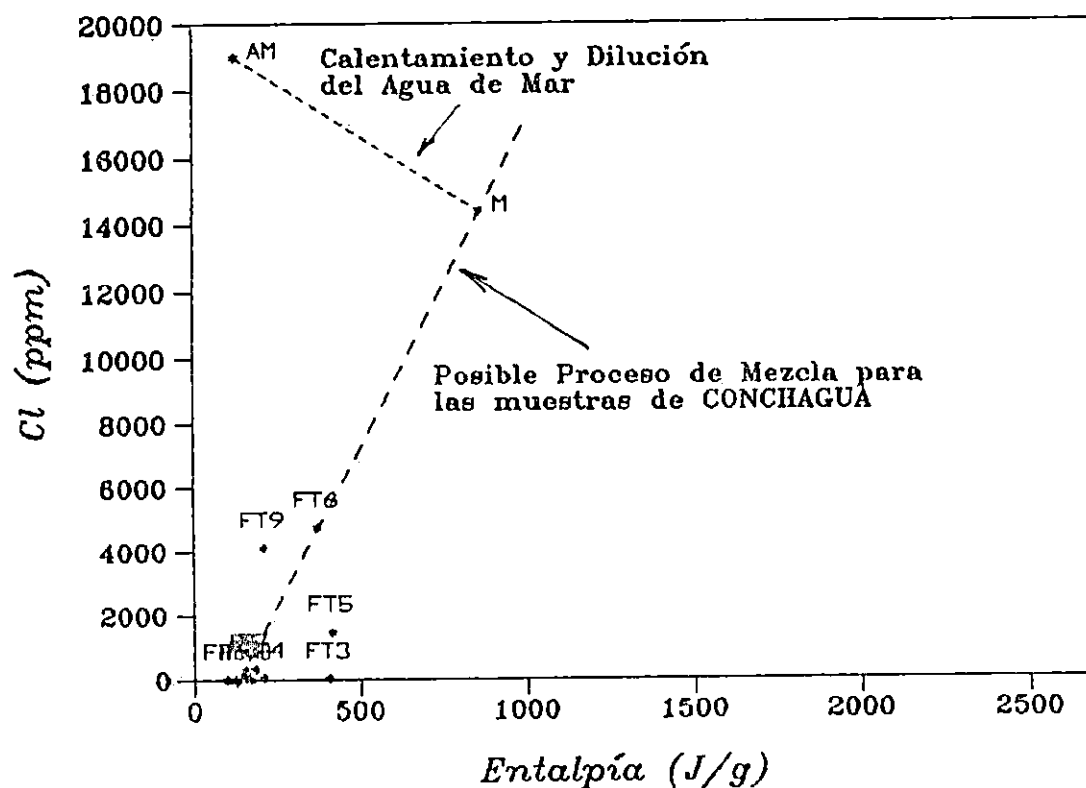


Figura 10.12. Modelo de Mezcla Cloruro-Entalpía para las muestras tomadas en Conchagua.

En la Figura 10.12 se ha ubicado el punto M, el cual supone que el reservorio se encuentra a una temperatura de 200 °C aproximadamente (unos 900 J/g). Desde el punto M los fluidos inician su viaje, partiendo del reservorio hasta la superficie, lo cual a la larga origina las fuentes muestreadas en el área de Conchagua. Durante el ascenso de los fluidos se ha supuesto que éstos se enfrían y diluyen al entrar en contacto con aguas más superficiales o con acuíferos someros.

La línea recta que muestra la distribución de las muestras, posee una buena confiabilidad (al igual que el proceso de mezcla supuesto) ya que el coeficiente de correlación lineal no se aleja mucho de la unidad ($r=0.92$), indicando una muy buena significancia estadística. Aunque debe mencionarse que para el cálculo de dicho parámetro no se consideró FT5 ni FT3, lo anterior debido al quimismo anormal que presentan y que se ha discutido anteriormente.

Si lo anterior resultara cierto, se puede afirmar que la temperatura profunda podría alcanzar los 200 °C.

Debe mencionarse que las muestras FT6 y FT9 han sido corregidas en su concentración de Cl^- debido a su contacto directo con el agua de mar en el punto de muestreo. Dicha corrección viene dada por la ecuación siguiente [15]:

$$Cl_{cor} = Cl_{muestra} * \left(1 - \frac{Cl_{muestra} - Cl_{super}}{Cl_{mar}}\right) \quad \text{Ec. 10.31}$$

donde Cl_{cor} es la concentración de Cl^- corregida, $Cl_{muestra}$ es la concentración de Cl^- reportados en la Tabla 10.4, Cl_{super} es la cantidad de Cl^- promedio en las Fuentes Frías y equivalente a 6.5 ppm y Cl_{mar} es un valor promedio para el agua de mar [4].

10.1.4.4. Otro Modelo de Mezcla: La Relación Cl-t.

Dentro de los modelos de mezcla se puede ensayar uno más, que permita corroborar los resultados obtenidos por medio de los otros métodos gráficos, anteriormente expuestos. Puede intentarse la construcción de un gráfico que se base en el uso del quimismo propio del campo de Conchagua.

Si se grafica el contenido químico de las muestras consideradas representativas del área, por ejemplo Na^+ contra Cl^- , es posible obtener una relación que gobierne (hipotéticamente) el contenido de Na^+ respecto al de Cl^- . De la misma manera se puede graficar el contenido de K^+ contra el de Cl^- y obtener igualmente una relación que prediga el contenido de K^+ respecto al de Cl^- .

Para el campo geotérmico de Conchagua, las relaciones antes mencionadas, Na-Cl y K-Cl, vienen dadas de la siguiente manera:

$$\text{Na}=0.507691\text{Cl}+46.1605 \qquad \text{Ec. 10.32}$$

y

$$\text{K}=0.0243769\text{Cl}+8.76629 \qquad \text{Ec. 10.33}$$

Las ecuaciones anteriores podrían resultar una buena aproximación al comportamiento del quimismo de la región y resultan válidas solamente para el campo de Conchagua o para aquellos que posean un quimismo similar al de éste. Las concentraciones vienen dadas en mg/Kg (ppm como tal).

Si se divide la concentración de Na por la de K se obtiene:

$$\frac{Na}{K} = \frac{0.507691Cl + 46.1605}{0.0243769Cl + 8.76629} \quad \text{Ec. 10.34}$$

Ahora es posible obtener una ecuación que permita evaluar, en forma indirecta, los contenidos de Cloruros respecto a la temperatura, empleando alguna de las relaciones geotermométricas que implique la relación Na/K, la ecuación propuesta por Fournier, por ejemplo trabaja en un rango mayor de 180 °C [15] si se es riguroso:

$$t, ^\circ C = \frac{1217}{1.483 - \text{Log}(Na/K)} - 273.15 \quad \text{Ec. 10.35}$$

Así para distintos valores de Cl en ppm, es posible encontrar: diferentes valores de Na/K y por lo tanto es posible encontrar distintos valores de temperatura.

Para nuestro caso, suponiendo valores de Cl⁻, calculando así los correspondientes valores para Na/K, se obtuvo diferentes valores de temperatura. Graficando Cl⁻ contra la temperatura se construye la gráfica de la Figura 10.13, en la cual se han ubicado las muestras colectadas en Conchagua, FT6 y FT9 se muestran ubicadas considerando la corrección por Cloruros de agua de mar. Los datos resultantes de este cálculo se muestra en la Tabla 10.11.

Tabla 10.11. Datos para el Modelo de Mezcla Cloruros-Temperatura

IDENTIFICACION	Temperatura (°C)	Cl ⁻ (ppm)
P3	36.3	137.73
P4	36.4	81.9
P7	43.9	329
FT4	49.7	62.9
FT5	98	1343.15
FT6	88.4	4744.42
FT8	40	8
FT9	50.2	4092.49

En la Figura 10.13 se observa una tendencia al alineamiento de ellos y si se supone un indicativo de mezcla de fluidos se puede extrapolar la línea recta, tal y como se muestra. La intersección con la curva Cl-t corresponde a un valor aproximado de 162 °C, de lo cual se deduce que este dato podría indicar el límite inferior de temperatura para el reservorio buscado.

Desafortunadamente el proceso de mezcla supuesto presenta una confiabilidad baja, el coeficiente de correlación lineal ($r=0.56$), indica que no todos los puntos se apegan a dicha tendencia lineal, es decir que no hay significancia estadística; ésto se debe probablemente a la gran cantidad de muestras de origen superficial que poseen un termalismo anormal.

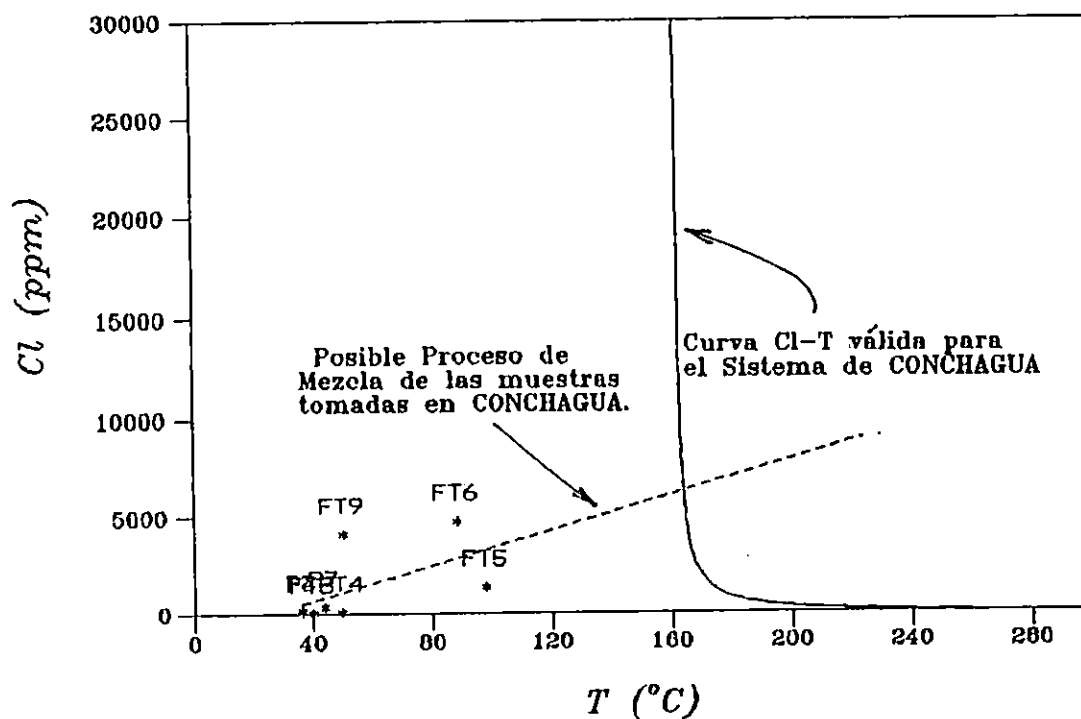


Figura 10.13. Modelo de Mezcla Cloruro-Temperatura, válido para e válido para el sistema identificado en Conchagua.

10.1.5. Geotermometría.

De acuerdo a los resultados obtenidos, después de la aplicación de los distintos métodos de clasificación de aguas propuestos, es válida la discriminación de ciertas muestras por ser consideradas como aguas de origen superficial, de esta forma se facilita más el trabajo, con puntos seleccionados y así procesar con más cuidado que si se manejaran demasiados datos. Basados en esto se aclara que a continuación solamente se presentaran aquellos puntos seleccionados por su mayor interés geoquímico.

Luego de ensayar el uso de muchas de las relaciones geotermométricas propuestas [16,17] se ha concluido, de acuerdo a los resultados anteriores que el geotermómetro que ofrece valores de temperatura más próximas a las indicadas con las diferentes técnicas geoquímicas antes planteadas, es sin duda el geotermómetro Na-K-Ca el cual se presenta a continuación.

10.1.5.1. El Geotermómetro Na-K-Ca.

Este geotermómetro fué desarrollado por Fournier y Truesdell en 1973 [15], para aguas con elevados contenidos de Calcio que ofrecen altas anomalías al calcular temperaturas por el geotermómetro Na-K.

Si bien el Ca^{2+} en solución en aguas naturales es controlado por la solubilidad de Calcio contenido en Carbonatos (y en ocasiones en Sulfatos) se ha encontrado que hay una clara tendencia dependiente de la temperatura cuando el $\text{Log}(f\text{Ca}/\text{K})$ y $\text{Log}(f\text{Ca}/\text{Na})$ son graficados [15,16].

Estas relaciones de Na-K-Ca fueron explicados en términos de las particiones de Calcio en las reacciones de Alumino-Silicatos, y por consiguiente la cantidad de Na y K disueltos es influenciada por la cantidad de Ca disuelto [7].

La ecuación empírica desarrollada es [15,16]:

$$t, ^\circ\text{C} = \frac{1647}{\text{Log}(\text{Na/K}) + \beta(\text{Log}(\sqrt{\text{Ca/Na}} + 2.06) + 2.47)} - 273 \quad \text{Ec. 10.36}$$

Las suposiciones en las cuales está basada esta relación son [14]:

- Hay un exceso de Silíce presente (Usualmente cierto).
- El Aluminio es conservado en la fase sólida (Usualmente se cumple, porque el Aluminio es extremadamente bajo en solución).
- Que en las reacciones agua-roca exista un balance de H^+ con OH^- .

Para la aplicación de este geotermómetro las condiciones del fluido deben ser consideradas y seguir el siguiente procedimiento:

- Calcular $\text{Log}(\sqrt{\text{Ca/Na}} + 2.06)$, donde la concentración de los cationes debe ser dada en mg/Kg (ppm como tal).
- Si $\text{Log}(\sqrt{\text{Ca/Na}} + 2.06)$ es positivo y $t < 100$ °C usar $\beta = 4/3$.
- Si el literal b no se cumple emplear $\beta = 1/3$.

El geotermómetro Na-K-Ca trabaja en el rango de aplicación del geotermómetro Na-K, pero generalmente también en el rango de 120-200 °C. Los cambios de concentración resultantes de procesos de ebullición y de mezcla o dilución afectarían la temperatura Na-K-Ca. El principal efecto de la ebullición es la fuga de CO_2 que puede provocar la precipitación de CaCO_3 (Calcita o Aragonita). La pérdida de Ca en solución generalmente se presenta para temperaturas altas de Na-K-Ca [7].

El efecto de la dilución es generalmente mínimo. En algunas aguas diluidas a alta temperatura conteniendo altas cantidades de CO_2 y en aguas con muy bajas concentraciones de Ca^{2+} el término $\beta \text{Log}(\sqrt{\text{Ca/Na}})$ puede presentar valores negativos o variables, bajo dichas condiciones es más recomendable la aplicación del geotermómetro Na-

K [15].

En la aplicación de este geotermómetro es necesaria una corrección por contenido alto de Mg en las muestras.

10.1.5.2. El Geotermómetro Na-K-Ca-Mg.

La presencia relativa de altos contenidos de Mg tiende a dar bajas temperaturas estimadas por el geotermómetro previamente descrito. Fournier y Potter introdujeron en él la corrección por la presencia del Mg en 1979 [16]. Acerca de este geotermómetro, Fournier, en 1990, hizo los siguientes comentarios:

"La concentración del Mg en fluidos geotérmicos decrece rápidamente al incrementar la temperatura y todos aquellos fluidos ricos en Mg, encontrados en descargas naturales tienen que originarse de una reacción agua-roca que se verifica a una temperatura relativamente baja. Además, el flujo de fluidos geotérmicos desde ambientes a elevada temperatura hasta otros a menor temperatura, parecerá recoger una cantidad considerable de Mg desde las rocas de los alrededores de manera relativamente fácil y rápida. Verdaderamente, aquellas aguas con bajas temperaturas pueden requerir la corrección por Mg para dar un estimado de temperatura correcto, pero una corrección por Mg aplicada a aquellas aguas con alta temperatura que acumulan Mg durante su ascenso estimaría una temperatura de reservorio bastante baja" [16].

La corrección por Mg para los manantiales parece que proporcionan buenos resultados solamente para aguas del tipo bicarbonatadas. La relación propuesta para la corrección por el Mg es la siguiente [16]:

$$t, ^\circ C = TNKC - DEL$$

Ec. 10.37

Donde para el calculo de TNKC (que es la temperatura evaluada por el geotermómetro Na-K-Ca) y para DEL se sigue el siguiente procedimiento [16]:

- a. Calcular la temperatura por medio del geotermómetro Na-K-Ca (TNKC). Si ésta es menor que 70 °C no se requiere la corrección por Mg.
- b. Calcular $R = \text{Mg} / (\text{Mg} + \text{Ca} + \text{K}) * 100$ (en Equivalentes). Si $R > 50$ no se requiere la corrección por Mg (ya que el agua proviene de ambiente frío).
- c. Calcular DEL (corrección por Mg para TNKC):
 - c.1. Si $5 < R < 50$ y t es la temperatura calculada por TNKC:

$$DEL = 10.66 - 4.7415R + 325.87 (\text{Log}R)^2 - 1.032 * 10^5 * \frac{(\text{Log}R)^2}{t} - 1.968 * 10^7 \frac{(\text{Log}R)^2}{t^2} + 1.605 * 10^7 \frac{(\text{Log}R)^2}{t^2} \quad \text{Ec. 10.38}$$

- c.2. Si $0.5 < R < 5$ y t es la temperatura calculada por TNKC:

$$DEL = -1.03 + 59.971 \text{Log}R + 145.05 (\text{Log}R)^2 - 36711 \frac{(\text{Log}R)^2}{t} - 1.67 * 10^7 \frac{\text{Log}R}{t^2} \quad \text{Ec. 10.39}$$

- c.3. Si $R < 0.5$ no se requiere de la corrección.

- d. Para el cálculo de R:

$$\text{Ca} = \text{Ca}(\text{ppm}) / (1000 * 20.04)$$

$$\text{K} = \text{K}(\text{ppm}) / (1000 * 39.102)$$

$$\text{Mg} = \text{Mg}(\text{ppm}) / (1000 * 12.156)$$

El algoritmo anterior indica que para la evaluación de la corrección por Magnesio se debe tener mucho cuidado, no siempre resulta recomendable su aplicación ya que no todos los tipos de aguas la requieren.

A continuación se presenta el resultado de evaluar la temperatura profunda por el geotermómetro Na-K-Ca.

Tabla 10.12. Resultados de la Aplicación del Geotermómetro Na-K-Ca, la última columna resulta de la Corrección por Mg.

IDENTIFICACION	T Na-K-Ca (°C)	T Na-K-Ca-Mg (°C)
P3	163.7	No se aplica
P4	184.97	No se aplica
P7	173.05	No se aplica
FT3	174.84	No se aplica
FT4	162.32	No se aplica
FT5	171.89	66.11
FT6	168.7	41.34
FT8	158.41	No se aplica
FT9	172.69	77.86

Al observar la Tabla 10.12 se concluye que como ya se mencionó, no es necesaria la aplicación de la corrección por Magnesio para todas las fuentes. Las fuentes FT5, FT6 y FT9 se presuponen anormales por su contenido de Magnesio, pero la explicación es que podría darse un arrastre de éste durante el ascenso de los fluidos a la superficie y no necesariamente porque provengan de un medio de baja temperatura (de acuerdo a los comentarios de Fournier). La conclusión anterior se debe a que la corrección por Magnesio indica que la temperatura de origen de dichas muestras es sumamente baja, es decir que provienen de un medio frío, lo cual contradice lo obtenido en todas las técnicas aplicadas anteriormente y en especial a la clasificación de aguas que indica que dichas fuentes pueden tener origen geotérmico.

Después de lo anterior se confirma que la temperatura profunda más confiable es la que indica el geotermómetro Na-K-Ca (160-185 °C), y por lo tanto la corrección por Magnesio pierde validez.

10.1.6. Las Relaciones entre los Componentes.

Como se ha considerado que el anión más importante en sistemas geotérmicos es sin lugar a dudas el cloruro, la relación de otros componentes respecto a la cantidad de cloruros podría proporcionar información importante respecto a la migración y procesos que afecten a los fluidos durante su ascenso hasta la superficie [15], aunque también resultan importantes, como geoindicadores, las relaciones de aquellos componentes dependientes de la temperatura.

Las relaciones son mejor calculadas como razones atómicas o moleculares, aunque las concentraciones podrían emplearse como una aproximación. Los valores de las razones pueden cambiar de un sistema hidrotermal a otro y su comparación no es válida, sólo tiene sentido la comparación de sus valores si las fuentes pertenecen al mismo sistema hidrotermal. En un área con una gran cantidad de manifestaciones, comparando el contorno de las razones entre componentes, éstas pueden ser utilizadas para definir un modelo de flujo, ya que éstas diferencian a las manifestaciones que han recorrido más rápidamente el camino de ascenso (ascenso directo) o que se han originado en terrenos con un termalismo elevado [15].

La relación Na/K: Bajos valores de esta razón muestran altas temperaturas, pero también bajos valores pueden indicar una migración directa del fluido a la superficie y por lo tanto razones altas indicarían una ruta de ascenso más indirecta permitiendo interacciones roca-agua [15].

La relación Na/Ca: Valores altos de esta razón indicarían altas temperaturas y un ascenso más directo del fluido a la superficie [15].

La relación Cl/SO₄: Si el valor de la razón Cl/SO₄ es alto generalmente indica altas temperaturas profundas o tal vez un movimiento de ascenso más directo, para algunas aguas superficiales o pe-

queñas manifestaciones una razón baja puede mostrar un calentamiento por vapor [15].

La relación Cl/Mg o Cl/(Mg+Ca): Altos valores indican una temperatura elevada y aguas muy poco diluidas. Puede indicar mezcla con agua de mar si es muy bajo [15].

La relación Na/Mg: Los altos valores generalmente se deben a una alta temperatura y en caso contrario, los bajos valores pueden ser causados por un proceso de mezcla con aguas más frías [15].

Tabla 10.13. Relaciones entre Componentes como Geoindicadores.

IDENTIFICACION	Na/K	Na/Ca	Cl/SO ₄	Cl/Mg	Na/Mg
P3	11.237	0.343	1.1	24.46	19.36
P4	7.89	0.832	0.62	70.6	74.14
P7	17.417	3.784	2.67	155.19	124.06
FF5	6	0.055	0.1	0.44	0.88
FT3	7.469	0.292	0.55	4.48	7.7
FT4	8.056	0.138	0.98	3.98	2.75
FT5	17.333	0.962	27.57	19.82	11.99
FT6	21.983	0.378	57.84	17.46	9.06
FT8	6.8	0.118	0.09	1.14	1.94
FT9	18.438	0.43	66.95	12.44	6.15

La Tabla 10.13 presenta los resultados obtenidos del cálculo de las relaciones entre componentes antes mencionados. Estos mismos datos se muestran graficados en las figuras siguientes.

De acuerdo con la Figura 10.14 el mayor valor de la relación Na/K corresponde a FT6, esto se podría explicar debido a la influencia ya mencionada del agua de mar; P3 y P4 reportan valores relativamente bajos, que pueden indicar una migración más directa del fluido a la superficie y temperaturas más elevadas, además que sus a-

guas son del tipo Sódico-Cloruradas (ver 10.1.1, 10.1.2 y 10.1.3) y de bajo contenido en Mg, es decir representan un mayor interés

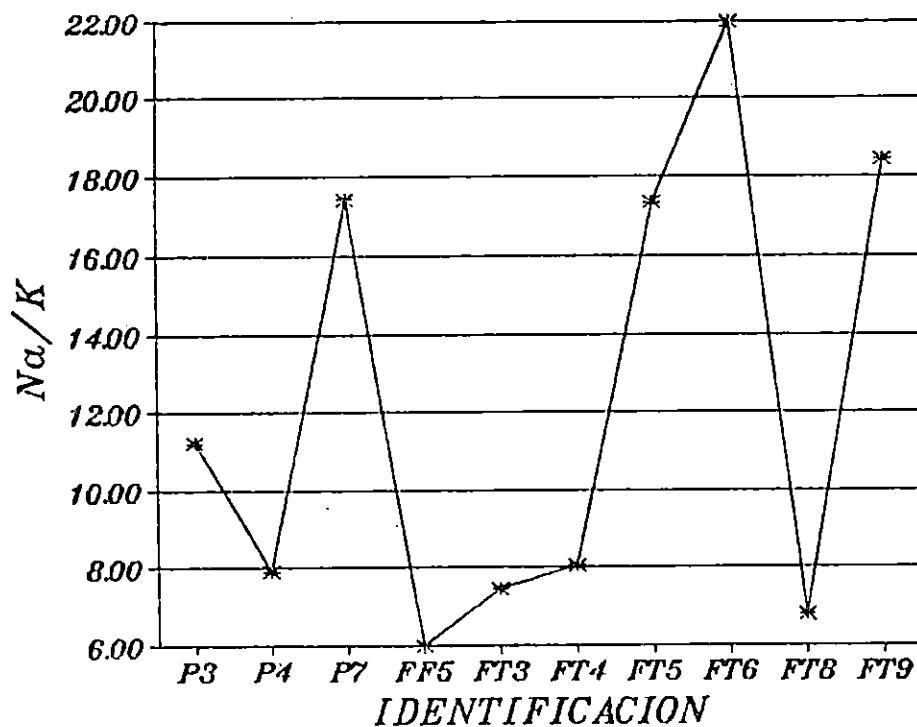


Figura 10.14. Relación Na/K para las muestras más importantes del Area de CONCHAGUA.

geotérmico. Los valores de las demás fuentes son mayores en relación a los de P3 y P4, aunque existen algunas que reportan valores más bajos que los de éstos. Para el caso, FF5, que aunque presenta un valor bajo se descarta la posibilidad de originarse en la profundidad, es de origen superficial de acuerdo a la clasificación de aguas y por la tanto no puede tomarse la relación Na/K como parámetro para determinar su interés geotérmico; FT4 y FT8 presentan valores bajos pero de acuerdo a la clasificación antes mencionada son aguas del tipo mixta-mixta y mixta-Bicarbonatada respectivamente y, no puede considerarse la posibilidad de que su migración sea muy directa.

La Figura 10.15. muestra el caso de la relación Na/Ca en la cual es P7 la muestra que reporta el mayor valor, que indica la mayor temperatura, los otros valores altos corresponden a P4 y FT5. Donde el pozo doméstico P4 se encuentra cerca y en la misma zona de P7, confirmando lo antes mencionado respecto a la ubicación de la temperatura más alta y una flujo más directa del fluido hacia la superficie. FT5 está lejos de la zona mencionada y podría estar influenciada por alguna corriente marina, esto por su alto contenido de Na.

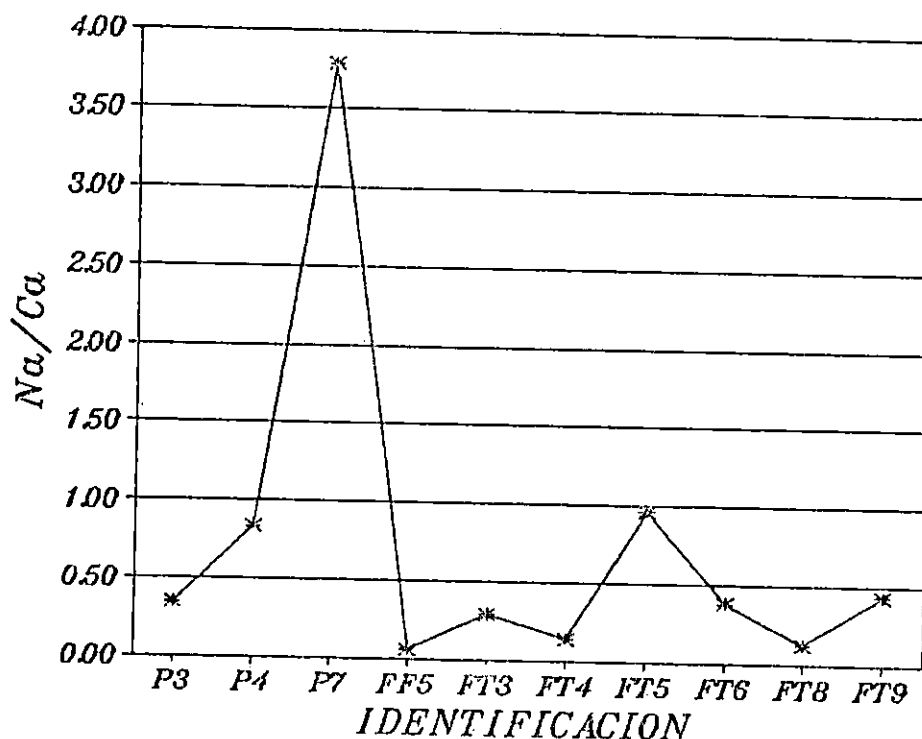


Figura 10.15. Relación Na/Ca para las muestras más importantes del Area de CONCHAGUA.

En cuanto a la relación Cl/SO₄ mostrada en la Figura 10.16 y discriminando las muestras que podrían presentar una posible influencia de agua de mar, FT5, FT6 y FT9 por su ubicación geográfica (ver

Figura 7.7), el que presenta el mayor valor es P7 nuevamente, corroborando su ubicación la zona de mayor interés para el reconocimiento.

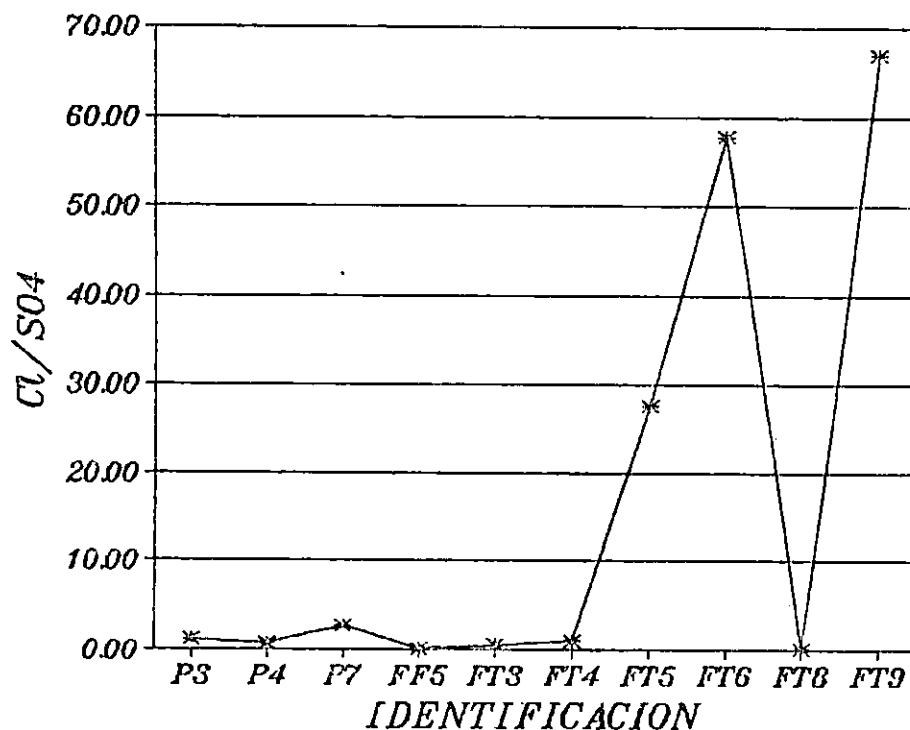


Figura 10.16. Relación Cl/SO₄ para las muestras más importantes del Areas de CONCHAGUA.

Ahora, en la Figura 10.17 se presenta la relación Cl/Mg y en ella se observa que la tendencia de dicha relación confirma que la zona en la que se ubica el pozo doméstico P7, en Punta Chiquirín, es realmente la que podría ser más importante para el reconocimiento por indicar un flujo menos lateral de los fluidos o en el mejor de los casos una elevada temperatura de origen de los mismos.

Debe notarse lo parecido entre la Figura 10.15 (que presenta la relación Na/Ca) y la Figura 10.17 (relación Cl/Mg), esto implica que realmente el quimismo de las muestras favorecen a los alrededores

de Chiquirín como área de interés geoquímico.

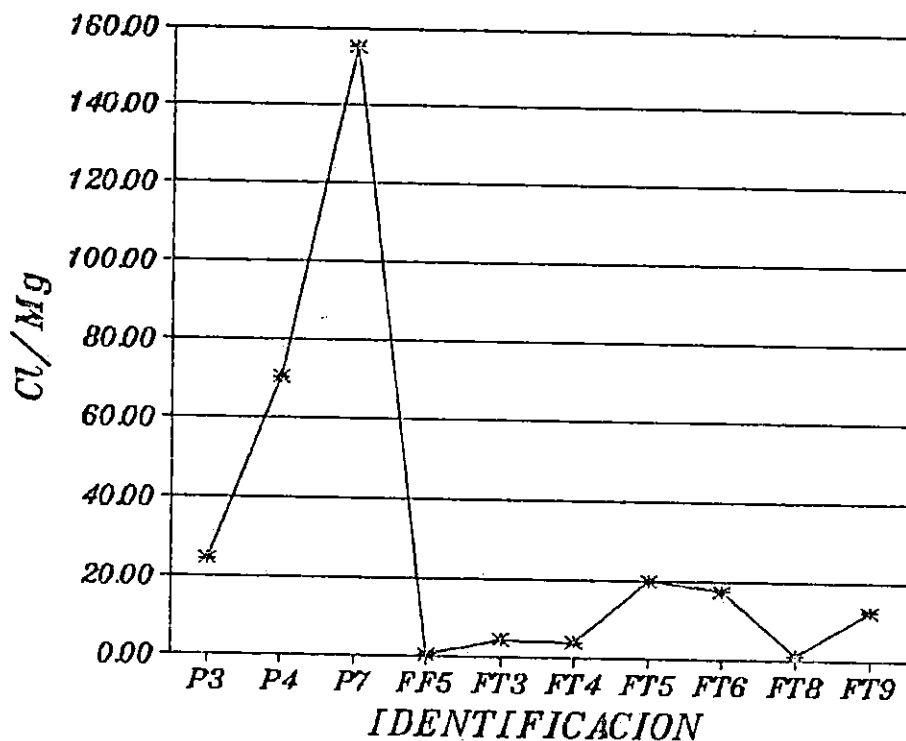


Figura 10.17. Relación Cl/Mg para las muestras más importantes del Area de CONCHAGUA.

La relación Na/Mg se presenta graficada en la Figura 10.18 y en ella también se puede observar que el valor más alto corresponde al pozo doméstico P7 y al igual que la relación Na/Ca, Cl/SO₄, Cl/Mg se menciona a la zona de ubicación de dicha muestra como la de mayor interés geoquímico de toda el área cubierta.

Se debe mencionar que además del pozo doméstico identificado como P7 también sobresale en importancia la Fuente Termal FT6, no por casualidad se encuentran ubicadas en la zona de Punta Chiquirín (ver Figura 7.7).

A continuación se presentan graficados los valores para la relación

Na/Mg y que ya han sido mostrados en la Tabla 10.13.

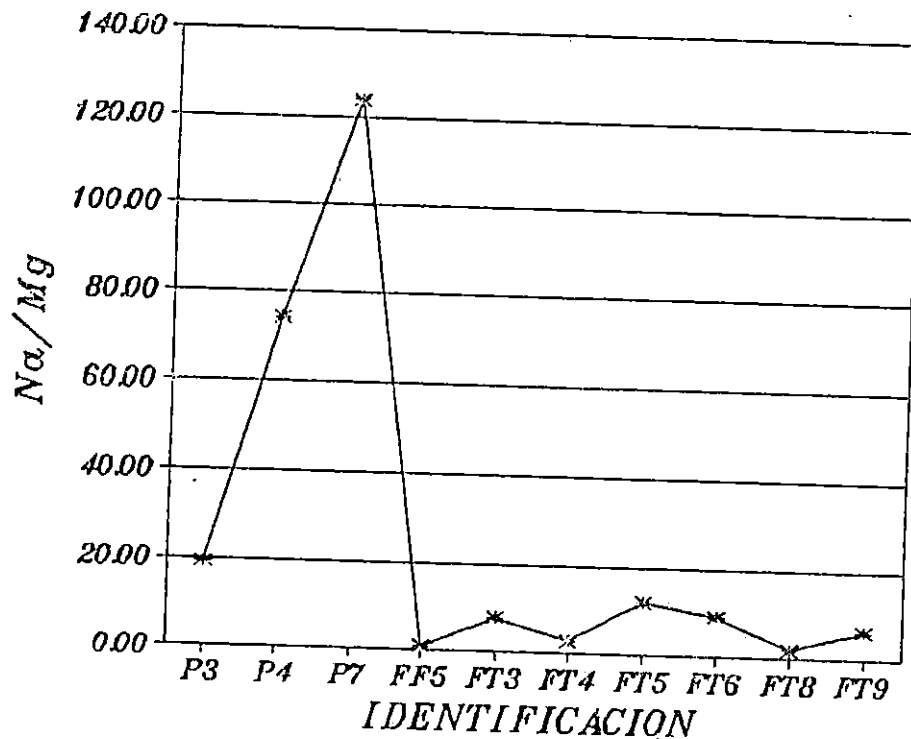


Figura 10.18. Relación Na/Mg para las muestras más importantes del Area de CONCHAGUA.

10.2. Técnicas de la Interpretación de los Constituyentes de la Fase Gaseosa.

El análisis de los componentes que constituyen la fase gas y que se manifiesta generalmente como fumarolas, resulta muy útil para la aplicación de técnicas geoquímicas diseñadas específicamente para su interpretación. Los métodos geoquímicos de interpretación para gases van desde gráficos hasta geotermométricos.

Desafortunadamente para el presente estudio no se cuenta con infor-

mación confiable del análisis de gases y que es muy obvio al observar los resultados reportados por el CIG. Los resultados del análisis indican problemas en el momento del muestreo, principalmente una contaminación de la muestra por aire atmosférico y una colección insignificante de condensado, resultando en un análisis que proporciona información muy incompleta. Por ésto no se considera prudente efectuar la aplicación de técnica alguna de interpretación cuantitativa del recurso.

Se ha intentado rescatar algo de la información del análisis de gases con el único objetivo de lograr confirmar alguno de los supuestos planteados hasta el momento, aunque sea tan solo de carácter cualitativo. Así pues, se ha logrado sacar provecho a la relación de ciertos componentes, específicamente CO_2 y H_2S , obteniéndose los resultados mostrados en la Tabla 10.14.

Tabla 10.14. Relación $\text{CO}_2/\text{H}_2\text{S}$ para las Muestras de Gases Colectadas en la Area de Conchagua.

IDENTIFICACION	LUGAR	CO_2 % mol	H_2S % mol	$\text{CO}_2/\text{H}_2\text{S}$	PROMEDIO
FT7	CHIQUIRIN	52.82	1.25	41.92	41.92
FV2	PLAYITAS	16.4	0.12	136.67	118.78
		18.16	0.12	100.89	
FV3	CAGUANO	15.53	0.16	97.06	89.53
		16.4	0.2	82	

Bajas relaciones de $\text{CO}_2/\text{H}_2\text{S}$ indican que la migración de los gases se verifica en forma directa desde el reservorio [15]. De acuerdo a la Tabla 10.14 la migración más directa se presenta en los alrededores de FT7 (ubicada en Chiquirín).

Es posible observar que en la tabla anterior se ha incluido la Fuente Termal FT7, el motivo es que en dicha fuente solamente se

tomó una muestra de gases. La fuente se presenta como un afloramiento de lodos hirvientes y desde la cual se desprenden gran cantidad de vapores, por lo cual fué posible el muestreo de gases.

La Figura 10.19, presentada a continuación, es una representación gráfica de los datos incluidos en la Tabla 10.14. y en la cual se observa con claridad que el valor más bajo corresponde a FT7 tal y como se ha mencionado.

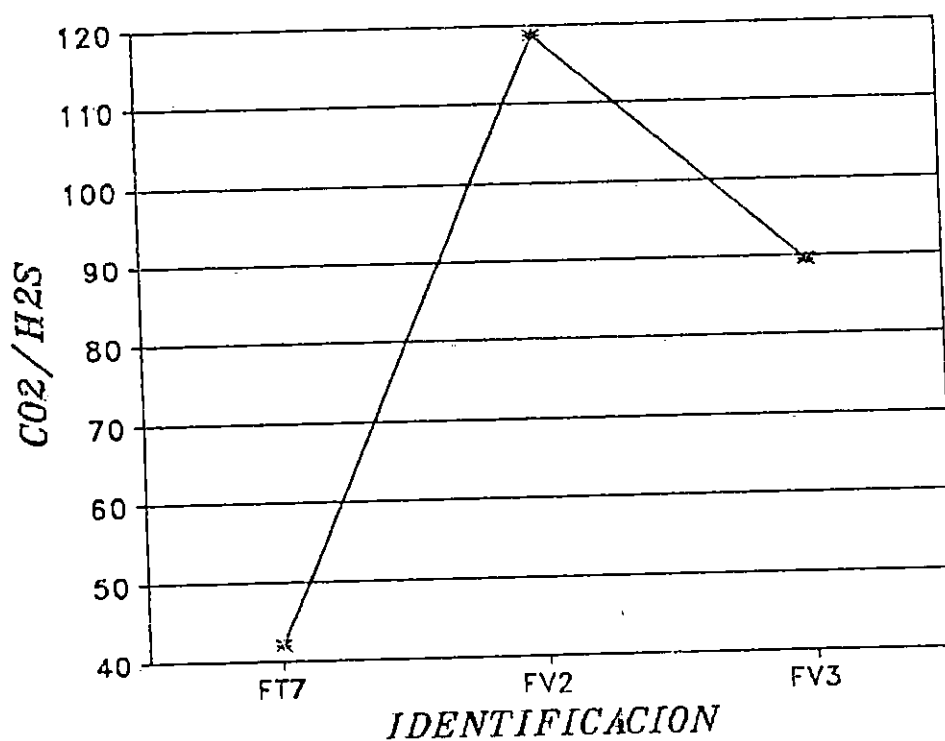


Figura 10.19. Relación CO_2/H_2S para las muestras de gases colectadas en el Area de CONCHA-GUA.

11.0. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

A continuación se presenta un resumen de los resultados obtenidos de todas las técnicas geoquímicas de interpretación ensayadas, con el objeto de concluir de manera más ordenada la idea de un modelo acerca del campo de Conchagua. Las recomendaciones que se presentan están orientadas a la terminación del estudio de reconocimiento y determinar los lineamientos a seguir para iniciar una posible etapa de prefactibilidad.

11.1. Conclusiones obtenidas acerca de las Condiciones Hidro-geoquímicas que presenta el Campo de Conchagua.

El estudio de reconocimiento geoquímico del área de Conchagua fué motivado por la observación de manifestaciones hidrotermales en la superficie, que rodea al volcán con el mismo nombre especialmente en su costado oriental. Lo anterior hace suponer que efectivamente existe un sistema hidrotermal bajo la región, y solamente falta su caracterización geoquímica y es lo que a continuación se presenta.

- a. De acuerdo a las diferentes Técnicas de Clasificación de Aguas practicadas, las muestras P3, P4, P7, FT5, FT6 y FT9 presentan un mayor interés geoquímico, principalmente por clasificarse como Sódico-Cloruradas. El resto de muestras corresponden a aguas de origen superficial, clasificadas como Cálcico-Bicarbonatadas y Mixtas (ver secciones 10.1.1., 10.1.2. y 10.1.3.).

Lo anterior indica que inicialmente pueden mencionarse tres zonas que presentan mayor interés, la zona de Chiquirín, El Cágano y Punta La Virgen (Figura 7.7), ya que las fuentes

muestreadas en dichos lugares son señaladas así por la clasificación de aguas.

- b. Todas las técnicas cuantitativas, gráficas y geotermómetros, predicen que muy probablemente la temperatura del reservorio buscado oscila entre los 160 °C y los 200 °C. Lo anterior se menciona con base en los resultados del geotermómetro Na-K-Ca, cuya corrección por Mg reporta temperaturas demasiado bajas respecto a lo indicado por los otros métodos, explicando su contenido en Mg como arrastrado por los fluidos durante su ascenso. Además de los resultados de los modelos de mezcla se añaden otros métodos gráficos (muy concordantes entre sí), que no se salen del rango de temperatura propuesto como probable.

Considerando los valores de temperatura anteriores, la literatura define al campo de Conchagua como un campo Semitermal de Baja Entalpía (ver sección 1.1.1), con temperaturas oscilando alrededor de 180 °C.

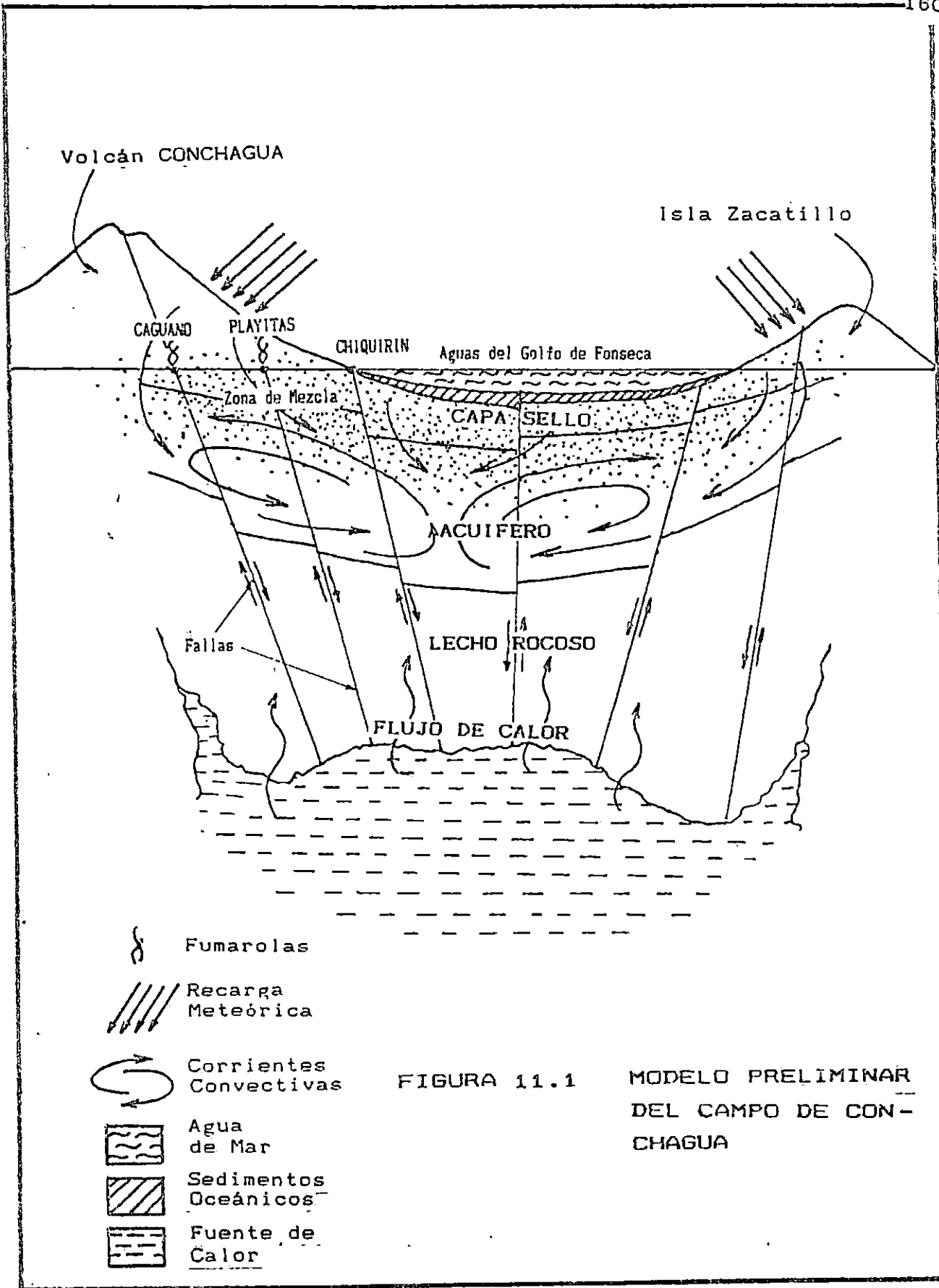
- c. Los resultados obtenidos por medio de las relaciones entre componentes, tanto en la fase líquida como en los gases, demuestran que es muy probable que la mayor temperatura y ascenso directo se encuentra ubicado muy cerca de Chiquirín, considerándose la posibilidad que los puntos más lejanos a dicho lugar se encuentran sobre los márgenes del reservorio, Figura 11.1. Se puede entonces decir que las temperaturas de dichos márgenes se aproximan al mínimo del rango propuesto (160 °C) y el máximo se encuentra en las proximidades de Chiquirín, dando lo anterior la validez a lo supuesto en el Modelo de Mezcla SiO₂-Entalpía (dos procesos de mezcla).
- d. Las posibles zonas de recarga se encuentran enmarcadas geográficamente en el sistema con las siguientes características: Una de ellas indica que en buen porcentaje el reservorio se recarga con las aguas del Golfo de Fonseca (Figura 11.1) y por

esta razón las muestras más próximas a la costa se ven influenciadas por el quimismo típico del agua de mar, el otro proceso de recarga implica una infiltración de agua lluvia desde lo más alto del Volcán de Conchagua y de la Isla Zaca-tillo, demostrado por el quimismo que presentan las muestras (inclusive algunas Fuentes Termales que se comportan, químicamente, como lo hacen las Fuentes Frías) ubicadas en puntos de mayor altitud y distantes de la costa.

De acuerdo al modelo hidrogeoquímico supuesto (Figura 11.1), existe mucha probabilidad que el reservorio se ubique bajo las aguas del Golfo de Fonseca y cuya extensión es por el momento desconocida.

- e. Si se considera la posibilidad que la recarga del reservorio se da en buena parte por agua meteórica, necesariamente las condiciones sub-superficiales del campo cambian de invierno a verano. Esto es observado por los lugareños de la región, que afirman que en invierno las Fuentes Termales tienden a aumentar su temperatura de afloramiento y las fumarolas también se ven afectadas; el caso de Playitas es un ejemplo de lo anterior, durante el inventario (en verano) se observó escape de vapor desde las fumarolas ubicadas en las cercanías y en el muestreo (en inicios del invierno) sólo existían lagunas sobre sus cráteres de escape.

La Figura 11.1, presentada a continuación, muestra un modelo acerca de lo que podría estar ocurriendo bajo la superficie del área en estudio. En ella se intenta dar un bosquejo que represente en forma gráfica todo lo anteriormente expuesto, aunque es importante mencionar que el esquema del recurso tiene carácter preliminar debido a la limitante que se tiene de contar solamente con información recopilada en la superficie. Es obvio que para refinar dicho modelo se requiere conocer la opinión del resto de geocientíficos involucrados dentro de la etapa del reconocimiento.



⌘ Fumarolas

/// Recarga Meteorica

↻ Corrientes Convectivas

~ Agua de Mar

/// Sedimentos Oceánicos

--- Fuente de Calor

FIGURA 11.1

MODELO PRELIMINAR DEL CAMPO DE CONCHAGUA

11.2. Recomendaciones para la Posible Etapa de Prefactibilidad.

Para terminar la etapa de reconocimiento se requiere la presentación de los lineamientos a seguir en la siguiente etapa de la exploración, la prefactibilidad. Dichos lineamientos deben ser orientados de tal forma que permita sacar provecho a la información obtenida durante el respectivo reconocimiento.

A continuación se presentan las recomendaciones consideradas, para lograr plantear los lineamientos antes mencionados.

- a. Antes de poder presentar un lineamiento específico de las actividades a seguir durante la siguiente etapa del proyecto geotérmico, se recomienda completar la etapa de reconocimiento mediante los estudios geológicos de la región. El aporte de dicha disciplina geocientífica se emplearía como soporte para ratificar, o rechazar, los resultados de este reconocimiento geoquímico.
- b. Se recomienda además, llevar a cabo una etapa exploratoria de muestreo, con el único objetivo de verificar los resultados que podrían carecer de confianza. Además es necesario intentar la obtención de muestras representativas de las fumarolas ubicadas en la zona, ya que como se ha visto las obtenidas previamente son muy poco confiables y por lo tanto de poco valor. Muy probablemente las condiciones de muestreo serán diferentes si éste se realiza en época seca.
- c. En la medida de lo posible, extender el estudio de reconocimiento hasta las diferentes islas del Golfo de Fonseca más próximas a Conchagua. Si el esquema propuesto resultara cierto es probable que existan manifestaciones hidrotermales en alguna de las islas del Golfo.

- d. Las zonas de mayor interés se localizan en la misma costa que rodea el volcán de Conchagua, se recomienda por lo tanto que como primera tarea para la prefactibilidad debe visitarse estos sitios. Los lugares más sobresalientes son: Pueblo Viejo, Punta Chiquirín, Playitas y El Cágano (ver Figura 7.7). Un posible muestreo de estos sitios puede servir para reconfirmar los resultados anteriormente discutidos.
- e. Intentar obtener muestras de manantiales, pozos domésticos y fumarolas, durante la época lluviosa y seca; ésto ayudaría a conocer el efecto de la recarga meteórica del sistema y así comprender el mecanismo de circulación hídrica del subsuelo, lo cual a larga llevaría a la obtención de un modelo capaz de aproximarse a la realidad del campo de Conchagua.
- f. Afortunadamente la zona en reconocimiento está localizada a pocos kilómetros de la ciudad de La Unión, con toda seguridad dicha ciudad puede considerarse para satisfacer todas las necesidades básicas que se presentan en el desarrollo de proyectos de esta naturaleza. Tanto el alojamiento como las provisiones y hasta la mano de obra puede ser obtenida fácilmente en la ciudad.
- g. Como parte de las recomendaciones últimas, se menciona la necesidad de asegurar la capacidad del personal encargado del muestreo en las zonas de mayor interés (antes señaladas), de preferencia que tengan amplia experiencia en dicha actividad. Para facilitar el transporte del personal y del equipo necesario para esta etapa se debe contar con un transporte efectivo en terrenos difíciles. Quizá las necesidades en cuanto al factor tiempo, para la ejecución de esta etapa del proyecto, no excedería de una semana considerando la reducción de los puntos a muestrear.

- h. Al final de las actividades antes mencionadas, enmarcadas hacia la confirmación de la existencia de un recurso hidrotermal y obtener una caracterización completa, deberán confrontarse los resultados que obtengan todos los geocientíficos involucrados en esta parte del proyecto.
- i. Indudablemente que una vez se completen las actividades antes planteadas se podría, con una gran seguridad acertar con las áreas de más importancia geotérmica, sólo entonces se proyectará el inicio de la perforación de pozos; los pozos exploratorios son los que implican menos riesgo económico y por lo tanto se recomendaría, sólo entonces, iniciar su perforación.
- j. De acuerdo a los resultados obtenidos, la literatura recomienda que para una temperatura profunda oscilando entre 180 y 200 °C el uso potencial del recurso identificado en la zona de Conchagua es muy variado (ver Tabla 1.1). Si se considera que la región de Conchagua es eminentemente pesquera (comercial y artesanal), sin duda los usos más importantes son en el secado de pescado y en la implementación de un sistema de refrigeración por absorción, tal y como lo recomienda la literatura citada para el caso.

12.0. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS.

1. Agueda Villar, José y otros. (1983). Geología. Segunda Edición. Editorial RUEDA. Madrid, España.
2. Campos, Tomás. (Agosto de 1994). Proyectos Geotermoeléctricos. Comisión Ejecutiva del Río Lempa (CEL). El Salvador.
3. Centro de Investigaciones Geotérmicas, Gerencia División de Recursos Geotérmicos (GEOCEL). (Marzo de 1993). Técnicas, Procedimientos de Muestreo y determinaciones Analíticas, Físicas e Isotópicas. Santa Tecla, El Salvador.
4. Comisión Ejecutiva Hidroeléctrica del Río Lempa, Laboratorios GEOCEL. (1987). Contenido Químico de las Aguas del Océano en la Descarga de la Canaleta de la Central Geotérmica de Ahuachapán. Santa Tecla, El Salvador.
5. D'amore F., Scandiffio G. & Panichi. (s/f). Some Observation on the Chemical Classification of Ground Waters.
6. Fournier, Robert O. (1991). Water Geothermometers Applied in to Geothermal Energy. Application of Geochemistry in Geothermal Reservoir Development. UNITAR Publication, CA, USA.
7. Fuentes Guevara, Reina Juana de Lourdes y otros. (1987). Análisis de las Posibilidades del Aprovechamiento Directo del Calor Geotérmico de Mediana y Baja Entalpía en El Salvador. Trabajo de Graduación Previa Opción al Título de Ingeniero Químico, Universidad Politécnica de El Salvador, San Salvador, El Salvador.

8. Giggenbach, W.F. & Goguel, R.L. (1989). Collection and Analysis of Geothermal and Volcanic Water and Gas Discharges. Chemistry Division, Department of Scientific and Industrial Research. Petone, New Zealand.
9. H. Armstead, H. Christopher. (1989). Energía Geotérmica. Editorial LIMUSA. México D. F., México.
10. Howell Williams, A. R. McBirney. (1969). Volcanic History of Honduras. University of California Press. United States of America.
11. Landaverde Quijada, Eduardo. (1982). Elaboración de un Cuaderno de Cátedra de Análisis Instrumental para Ingeniería Química. Trabajo de Graduación Previa Opción al Título de Ingeniero Químico, Universidad de El Salvador.
12. Lesser Ilades, Juan Manuel. (s/f). Hidrogeoquímica de las Aguas. II Curso Internacional de Geohidrología y Contaminación de Acuíferos, Facultad de Ingeniería, División de Educación Continua, Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM).
13. Meyer-Abich. (1956). Los Volcanes Activos de Guatemala y El Salvador (América Central). Anales del Servicio Geológico Nacional de El Salvador, Boletín No.3. El Salvador.
14. Morán Orellana. Guillermo Napoleón. (1989). Evaluación de la Amenaza Sísmica para el Area Geotérmica de Berlín, El Salvador, C.A. Tesis, Universidad de Costa Rica, Costa Rica.
15. Nicholson K. (s/f). Geochemistry of Geothermal Fluids: An Introduction. Geothermal Institute, University of Auckland, Auckland, New Zealand.

16. Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA). (1992). Estudios Geotérmicos con Técnicas Isotópicas y Geoquímicas en América Latina, Actas de una Reunión Final de Coordinación de Investigaciones Celebrada en San José, Costa Rica, 12-16 de Noviembre de 1990.
17. Organización Latinoamericana de Energía y Banco Interamericano de Desarrollo. (Septiembre, 1993). Guía para Estudios de Factibilidad Geotérmica. Quito, Ecuador.
18. Organización Latinoamericana de Energía y Banco Interamericano de Desarrollo. (Septiembre, 1993). Guía para Estudios de Reconocimiento y Prefactibilidad Geotérmica. Quito, Ecuador.
19. Organización Latinoamericana de Energía y Banco Interamericano de Desarrollo. (Septiembre, 1993). Guía para la Operación y Mantenimiento de Campos y Plantas Geotérmicas. Quito, Ecuador.
20. Rugamas Ramírez. (1982). Elaboración de un Cuaderno de Cátedra de Química Analítica Clásica para Ingeniería Química. Trabajo de Graduación Previa Opción al Título de Ingeniero Químico, Universidad de El Salvador.
21. Segura Lemus, Víctor Manuel. (1972). Tratamiento y Purificación de las Aguas de los Pozos Geotérmicos de Ahuachapán. Congreso Nacional de Ingeniería, Tomo II. San Salvador, El Salvador.
22. Smith, F. C. & Chan R. (s/f). Ion Chromatography. Critical Reviews in Anal. Chem. United States of America.

23. Solórzano Figueroa y Otros. (1976). Utilización de los Depósitos de Sílice Proveniente de Aguas Residuales de una Planta Geotérmica. Trabajo de Graduación Previa Opción al Título de Ingeniero Químico, Universidad de El Salvador.

13.0. REFERENCIAS PERSONALES.

24. Lic. Guillermo Cacao. (1994). Conversación Personal. Especialista en Cromatografía de Gases. Laboratorio del CIG, GEOCEL.
25. Lic. Julio César Chávez. (1994). Conversación Personal. Especialista en Espectrofotometría. Laboratorio del CIG, GEOCEL.
26. Lic. Aminta de Rodríguez. (1994). Conversación Personal. Especialista en Cromatografía de Iones. Laboratorio del CIG, GEOCEL.
27. Tec. Saúl Amílcar Jacinto. (1994). Conversación Personal. Encargado de Análisis Potenciométrico y Colorimétrico. Laboratorio del CIG, GEOCEL.
28. Tec. Aldo Valencia. (1994). Conversación Personal. Encargado de Análisis Potenciométrico y Colorimétrico. Laboratorio del CIG, GEOCEL.
29. Lic. Héctor Recinos. (1994). Conversación Personal. Encargado de Análisis Potenciométrico. Laboratorio del CIG, GEOCEL.

30. Tec. Jeannette Ascencio. (1994). Conversación Personal. Encargado de Análisis Colorimétrico. Laboratorio del CIG, GEOCEL.
31. Ing. Marvin Martínez. (1994). Conversación Personal. Geoquímico Asistente, Departamento de Exploración Geotérmica, GEOCEL.

A P E N D I C E S

APENDICE 1

CALCULO DE LAS CONCENTRACIONES DE LOS GASES A PARTIR DE LOS RESULTADOS DE LA CROMATOGRAFIA DE GASES.

Para el cálculo y reporte de las concentraciones de los gases, de acuerdo a los resultados obtenidos en el análisis químico del laboratorio se hace uso de un programa diseñado en el lenguaje BASIC [24]. Su funcionamiento se describe a continuación:

Inicialmente se introduce la siguiente información:

- Presión total en la Ampolla en mmHg (P1).
- Volumen total en ml (V1).
- Gramos de condensado (P2).
- Volumen del recipiente en ml (V2).
- Area del pico característico de Hidrógeno del estándar (A1).
- Area del pico característico de Nitrógeno del estándar (A2).
- Area del pico característico de Oxígeno del estándar (A3).
- Area del pico característico de Metano del estándar (A4).
- Area del pico característico de Argón del estándar (A5).
- Area del pico característico de Hidrógeno de la muestra (A6).
- Area del pico característico de Nitrógeno de la muestra (A7).
- Area del pico característico de Oxígeno de la muestra (A8).
- Area del pico característico de Metano de la muestra (A9).
- Area del pico característico de Argón de la muestra (A10).
- Concentración de CO_2 en mg/lt (C1).
- Concentración de H_2S en mg/lt (C2).
- Volumen de condensado en ml (VC).

Después de haber introducido la información anterior el programa, la procesa y aporta como resultado la concentración de los gases en las unidades de mmol del gas por cien moles de vapor. También calcula la suma de todos los gases (mmol de gas total/100 moles de vapor) y las relaciones CO_2/H_2 , $\text{CO}_2/\text{H}_2\text{S}$ y $\text{H}_2\text{S}/\text{H}_2$.

```
5:      "REM CALCULO G H A O N C C S N".
10:     DIM K (7), M (7), W (7), R (7) .
11:     FOR I = 1 TO 7
12:     READ K (I)
13:     NEXT I
14:     DATA 2.016, 28.014, 32.00, 16.04, 39.948, 44.011,34.08
15:     PRINT = L PRINT
20:     PRINT "$$$$$$$$$$$$$$$$$"
25:     PRINT "CROMATOGRAFO PE - SIGMA 115"
30:     PRINT "COLUMNNA ; SS, 12 PIES * 1/8 PULG."
40:     PRINT "EMPAQUE : T - M - 5 A, 60 - 80 MESH"
50:     PRINT "TEMPERATURA 50 C (DETECTOR Y COLUMNA ACTIVADA A
          300c)"
60:     PRINT "GAS PORTADOR : ARGON"
70:     PRINT "TIEMPO RETENCION: H 2 = 2.77 .MIN/100, N2 = 9.16
          MIN/100, CH4 = 13. MIN/100"
80:     PRINT "REFERENCIA : LAB. QUIM. CEL"Ñ
85:     PRINT
90:     INPUT "FECHA ?" ; F $
95:     PRINT "FECHA : " ; F $
100:    INPUT "MUESTRA # ? " ; M U
105:    PRINT "MUESTRA # " ; M U
110:    INPUT "LUGAR ? " ; L $
115:    PRINT "LUGAR : " ; L $
120:    PRINT
130:    INPUT "P 1 = ? " ; P 1 , " V 1 = ? ; V 1 , "P 2 = ? ;P2,
          "V 2 = ? " ; V 2.
140:    INPUT "A 6 = ? " ; A 6, "A 7 = ? " ; A 7, "A 8 = ?"; A 8,
          "A 9 = ? " ; A 9, " A 10 = ? " ; A 10
```

```

150: INPUT "C 1 = ? ; C 1, "C 2 = ? " ; C 2, "C 3 = ?" ; C 3
160: INPUT "D 1 = ? " ; D 1, "D 2 = ? " ; D 2, "V 6. = ? "; V 6
170: F 1 = 2.11/1.3324 : F 2 = 82.69/4.3829 : F 3 =
15.2/00.9287 : F 4 = 2.003/0.3121 : F 5 = 2.011/2.10
180: F 6 = F 2/F 1:F 7 = F 3/F 1:F 8 = F 4/F 1:F 9 = F 5/F 1
190: B 1 = A 7 * F 6:B 2 = A 8 * F 7:B 3 = A 9 * F 8:B 4 = A
10 * F 9
200: S = A 6 + B 1 + B 2 + B 3 + B 4 .
210: V 3 = (A 6/S) * 100 : V 4 = (B 1/S) * 100 : V 5 = (B 2/S)
* 100 : Q 1 = (B 3/S) * 100 : Q 2 = (B 4/S) * 100
220: P 3 = V 3 * P 1/100 : P 4 = V 4 * P 1/100 : P 5 = V 5 * P
1/100: P 6 = Q 1 * P 1/100 : P 7 = Q 2 * P 1/100
230: T = (( V 2 - V 1 ) + 15)/22.4
240: W (1) = P 3 * K (1)/760 * T + V 1 * 0.146/180
250: W (2) = P 4 * K (2)/760 * T + V 1 * 0.127/180
260: W (3) = 0.0
270: IF P 5 = 0.0 THEN GOTO 300
280: W (3) = P 5 * K (3)/760 * T + V 1 * 0.251/180
290: W (4) 0.0
300: IF P 6 = 0.0 THEN GOTO 330
310: W (4) = P 6 * K (4)/760 * T + V 1 * 0.277/180
320: W (5) = 0.0
330: IF P 7 = 0.0 THEN GOTO 350
340: W (5) = P 7 * K (5)/760 * T + V 1 * 0.275/180
350: W (6) = C 1 * V 1/1000
360: W (7) = C 2 * V 1/1000
370: Z = W (1) + W (2) + W (3) + W (4) + W (5) + W (6) + W (6)
+ W (7)
380: Z 1 = ( P 2 * 1000) - Z
390: FOR I = 1 TO 7

```

```
400: M (I) = W (I)/K (I)
410: NEXT I
420: FOR I = 1 TO 7
430: R (I) = M (I) * (1800000/ Z 1) * (V 1/ V 6)
440: NEXT I
450: Q 3 = 0.0
460: IF C 3 = 0.0 THEN GOTO 480
470: Q 3 = C 3 * (1.8/14) * (D 1/ D 2)
480: BEEP 2
490: USING "####.####"
500: PRINT "CONCENTRACION DE GASES MMOL / 100 H2O "
510: PRINT
520: PRINT " H 2 = " ; R (1)
530: PRINT " N 2 = " ; R (2)
540: PRINT " O 2 = " ; R (3)
550: PRINT " CH4 = " ; R (4)
560: PRINT " AR = " ; R (5)
570: PRINT "CO2 = " ; R (6)
580: PRINT "SH2 = " ; R (7)
590: PRINT "NH3 = " ; Q 3
600: IF R (3) = 0.0 THEN GOTO 620
610: G 1 = R (3) * 79/21 : G 2 = R (2) - G 1
620: PRINT "N2 CORREGIDO POR O2 = " ; G 2
630: G 3 = R (1) + R (2) + R (3) + R (4) + R (5) + R (6) +
R (7) + Q 3
640: G 4 = R (6)/R (1) : G 5 = R (6)/R (7) : G 6 = R (7)/R (1)
650: USING "####.####"
```

```
660: PRINT
670: PRINT " SUMA GAS = " ; G 3
680: PRINT " CO2/H2 = " ; G 4
690: PRINT " CO2/SH2 = " ; G 5
700: PRINT "SH2/H2 = " ; G 6
710: INPUT " OTRA CORRIDA ? " ; D $
720: IF (LEFT $ (D $ , 2) = "SI") THEN GOTO 15
730: END
```


APENDICE 2

GLOSARIO DE TERMINOS GEOTERMICOS.

1. Acuífero Somero: Alojamiento de agua en un lecho rocoso permeable, ubicado muy cerca de la superficie.
2. Andesitas: Lavas de las cuales la Plagioclasa (mineral de Aluminosilicatos, conteniendo cationes de Na y Ca) es el constitutivo predominante.
3. Anomalia Geotérmica: Manifestación del calor de La Tierra en la superficie de la corteza. Estas manifestaciones pueden ser los campos hidrotermales, rocas calientes, etc.
4. Augita: Minerales ferromagnesianos.
5. Basamento Cristalino: Estrato rocoso formado por lava cristalizada.
6. Dorsal Oceánica: Lugar donde se origina la nueva corteza. El magma rompe la corteza antigua y al enfriar constituye nueva corteza que sustituye a la anterior desplazándola en ambas direcciones, así se reponen la corteza que es consumida en los procesos de subducción.
7. Edificios Volcánicos: Levantamiento de la superficie cortical provocado principalmente por una intrusión magmática. Estas estructuras pueden llegar a constituir una salida para el magma que provoca la intrusión.
8. Fallas Transformales: Fallas originadas en dirección perpendicular a las dorsales, a través de ellas se desplazan unas pla-

cas respecto a otras pero no se provocan destrucción entre ellas. Se les conoce como límite pasivo entre placas.

9. Fenocristales de Plagioclasa: Grandes cristales de Plagioclasa.
10. Geotermómetro: Relación entre la temperatura y el contenido de especies iónicas en equilibrio. Generalmente son relaciones semi-empíricas.
11. Graben: Zona de afallamiento en forma de depresión en la corteza. La depresión se forma por el deslizamiento vertical de un bloque de corteza dentro de un misma placa.
12. Gradiente Térmico: Fuerza guiadora para el flujo de calor desde el interior de La Tierra hacia la superficie. Gracias a dicha fuerza guiadora ocurre el recurso geotérmico.
13. Hiperstenas: Mineral compuesto en su mayor porcentaje por Fe_2SiO_3 .
14. Intrusión Magmática: Cantidad de roca fundida (magma) que logra penetrar la corteza, desde el manto, reduciendo su espesor y buscando salir a la superficie. Generalmente las intrusiones magmáticas se manifiestan en la superficie por el levantamiento de estructuras volcánicas.
15. Límites entre Placas: Lugar de separación entre una placa y otra que puede identificarse como destructiva, constructiva o pasiva, dependiendo de su naturaleza tectónica.
16. Manifestación Hidrotermal: Anomalia geotérmica que se caracteriza por medio del escape de fluidos, a altas temperaturas, desde el interior de la corteza.

17. Olivino: Tipo roca constituida por Mg_2SiO_4 y Fe_2SiO_4 .
18. Pozo de Gradiente: Perforación realizada con el objeto de determinar el gradiente térmico de un área o región específica.
19. Pozo Productor: Pozo diseñado específicamente con el objeto de extraer los fluidos que proporcionen la potencia requerida para la producción de electricidad.
20. Pozos de Propósito Múltiple: Perforación que permite realizar una exploración completa, ya que proporciona información muy diversa tal como el gradiente térmico, estratigrafía geológica, petrografía, etc.
21. Presión Litostática: Presión generada por el peso de una columna de rocas, para un punto ubicado a una profundidad determinada.
22. Subducción: Fenómeno caracterizado por originar la destrucción de la corteza. Debido a los elevados esfuerzos mecánicos entre las placas la corteza se fractura, la fracción más densa se introduce de nuevo en el manto y la menos densa cabalga sobre la primera, provocando así el desplazamiento entre las placas originadas.

EJEMPLOS DE CALCULO PARA ALGUNAS DE LAS ECUACIONES UTILIZADAS

Antes de presentar ejemplo de algunas de los cálculos realizados es necesario definir qué los datos a emplear, en los ejemplos, corresponden al quimismo presentado por la Fuente Termal FT9. Se toma dicha fuente debido a su importancia como indicador geoquímico, mostrada en todas las técnicas de interpretación utilizadas. Por lo anterior es necesario observar las Tablas 9.1., 10.1. y 10.4. ya que éstas son las que proporcionan los datos del quimismo de cada fuente muestreada.

1. Diagrama de PIPPER.

De acuerdo a los datos químicos para FT9, mostrados en la Tabla 10.1, se toman en cuenta los siguientes datos:

$$Ca = 18.56, Na = 128.28, K = 4.09 \text{ y } Mg = 39.47$$

estas concentraciones vienen expresadas en mg/L, tal como lo exige el método. Debe aclararse que el cálculo mostrado corresponde única-mente al triángulo izquierdo de la Figura 10.5, es decir el de los cationes.

Se procede entonces a calcular los porcentajes relativos a los cationes involucrados en el método:

$$Suma = Ca + Na + K + Mg = 18.56 + 128.28 + 4.09 + 39.47$$

$$Suma = 190.4 \frac{mg}{L}$$

$$C = \left(\frac{Na}{\Sigma(+)} - \frac{Cl}{\Sigma(-)} \right) * 100 = \left(\frac{128.28}{190.4} - \frac{168.43}{184.51} \right) * 100 = -23.91$$

$$D = \left(\frac{Na-Mg}{\Sigma(+)} \right) * 100 = \left(\frac{128.28-39.47}{190.4} \right) * 100 = 46.64$$

$$E = \left(\frac{Ca+Mg}{\Sigma(+)} - \frac{HCO_3}{\Sigma(-)} \right) * 100 = \left(\frac{18.56+39.47}{190.4} - \frac{2.49}{184.51} \right) * 100 = 29.13$$

$$F = \left(\frac{Ca-Na-K}{\Sigma(+)} \right) * 100 = \left(\frac{18.56-128.28-4.09}{190.4} \right) * 100 = -59.77$$

Los valores calculados así se muestran en la Tabla 10.3 y se presentan graficados en la Figura 10.8.

3. Diagrama Triangular Na-K-Mg, propuesto por Giggenbach.

Para graficar en dicho diagrama triangular se debe primero obtener los porcentajes relativos de Na/1000, K/100 y \sqrt{Mg} , ésto se hace de la manera siguiente:

$$S = \frac{Na}{1000} + \frac{K}{100} + \sqrt{Mg} = \frac{2950}{1000} + \frac{160}{100} + \sqrt{480} = 26.46$$

$$\% \frac{Na}{1000} = \frac{Na}{10 \cdot S} = \frac{2950}{10 \cdot 26.46} = 11.15$$

$$\% \sqrt{Mg} = \frac{\sqrt{Mg}}{S} * 100 = \frac{\sqrt{480}}{26.46} * 100 = 82.8$$

$$\% \frac{K}{100} = 100 - \% \frac{Na}{1000} - \% \sqrt{Mg} = 100 - 11.15 - 82.8 = 6.05$$

Los datos utilizados para la evaluación de las ecuaciones anteriores se toman de la Tabla 10.4 y los resultados obtenidos se mues-

A continuación se calcula cada porcentaje, así:

$$\% \text{ Ca} = \frac{\text{Ca}}{\text{Suma}} * 100 = \frac{18.56}{190.4} * 100 = 9.75$$

$$\% \text{ Na+K} = \frac{\text{Na+K}}{\text{Suma}} * 100 = \frac{128.28+4.09}{190.4} = 69.52$$

$$\% \text{ Mg} = 100 - \% \text{ Ca} - \% (\text{Na+K}) = 100 - 9.75 - 69.52 = 20.73$$

Estos son los resultados que se han reportado en la Tabla 10.2.a. y plotados en la Figura 10.5.

2. Diagrama de D'amore-Scandiffio-Panichi.

Para la aplicación del método propuesto por D'amore, Scandiffio y Panichi es necesario el cálculo de seis parámetros, como ya se ha mostrado. Para el cálculo se requiere la concentración en mEq/L mostrados en la Tabla 10.1; se debe calcular primeramente la sumatoria de aniones y cationes, así:

$$\sum (-) = \text{Cl} + \text{HCO}_3 + \text{SO}_4 = 168.43 + 13.59 + 2.49 = 184.41 \text{ mEq/L}$$

$$\sum (+) = \text{Ca} + \text{Na} + \text{K} + \text{Mg} = 18.56 + 128.28 + 4.09 + 39.47 = 190.4$$

Ahora se procede al cálculo de cada uno de los parámetros, tal como se muestra a continuación:

$$A = \frac{(\text{HCO}_3 - \text{SO}_4)}{\sum (-)} * 100 = \frac{2.49 - 13.59}{184.51} * 100 = -6.02$$

$$B = \left(\frac{\text{SO}_4}{\sum (-)} - \frac{\text{Na}}{\sum (+)} \right) * 100 = \left(\frac{13.59}{184.51} - \frac{128.28}{190.4} \right) * 100 = -60.08$$

tran en la Tabla 10.7.

4. Geotermometría.

La evaluación del único geotermómetro presentado (Ec. 10.36) se realiza de la siguiente manera:

$$t, ^\circ C = \frac{1647}{\text{Log}(Na/K) + B(\text{Log}(\sqrt{Ca/Na}) + 2.06) + 2.47} - 273$$

$$t, ^\circ C = \frac{1647}{\text{Log}(2950/160) + \frac{1}{3}(\text{Log}(\sqrt{372/2950}) + 2.06) + 2.47} - 273$$

$$t, ^\circ C = \frac{1647}{1.266 + \frac{1}{3}(-2.1846 + 2.06) + 2.47} - 273 = 172.8$$

y de nuevo, para el cálculo de dicha expresión se emplean los datos reportados en la Tabla 10.4, los resultados se reportan en la Tabla 10.12.