

MINISTERIO DE MINAS Y ENERGIA

PROYECTO GEOTERMICO CHILES CERRO NEGRO

ICEL

1983



MINISTERIO DE MINAS Y ENERGIA

Instituto Colombiano de Energía Eléctrica

SUBGERENCIA TECNICA

División de Fuentes Alternas de Energía

1000 353,792.8
I 125 P
Fase II
1983

72

PROYECTO GEOTERMICO CHILES - CERRO NEGRO

Fase I Etapa de Prefactibilidad

INFORME PRELIMINAR

PARTICIPANTES

Ing. Eutimio Becerra
Geólogo Edinson Lozano
Geólogo Luis Cruz
Ing. Luis Victoria

BOGOTA, DICIEMBRE DE 1983



Instituto Colombiano de Energía Eléctrica

I N D I C E

Página.

| | | |
|---------|--|----|
| 1. | <u>INTRODUCCION</u> | 1 |
| 1.1 | ORGANIZACION DEL PROYECTO | 2 |
| 1.2 | AREA DE ESTUDIO | 3 |
| 1.3 | METODOLOGIA | 5 |
| 1.3.1 | <u>Búsqueda de Fluidos Geotérmicos de Alta Entalpía en Regiones Volcánicas</u> | 5 |
| 2. | <u>GEOVULCANOLOGIA</u> | 8 |
| 2.1 | MARCO GEOLOGICO REGIONAL | 8 |
| 2.1.1 | <u>Características del Volcanismo Reciente en Colombia.</u> | 12 |
| 2.2 | GEOLOGIA DEL AREA DEL PROYECTO CHILES - CERRO NEGRO. | 13 |
| 2.2.1 | <u>Basamento Pre- Terciario.</u> | 14 |
| 2.2.2 | <u>Sedimentos Terciarios.</u> | 15 |
| 2.2.3 | <u>Secuencia Volcánica Pliocena</u> | 15 |
| 2.2.4 | <u>Actividad Volcánica Cuaternaria.</u> | 17 |
| 2.2.5 | <u>Sistema Volcánico Chiles -Cerro Negro.</u> | 19 |
| 2.2.5.1 | Chiles I y Cerro Negro I | 20 |
| 2.2.5.2 | Chiles II | 21 |
| 2.2.5.3 | Cerro Negro II | 23 |
| 2.2.5.4 | Relación entre Ambos Episodios | 24 |
| 2.2.5.5 | Chiles III y Cerro Negro III | 25 |



| | | Página |
|---------|---|--------|
| 2.2.6 | <u>Sistema Volcánico Cumbal.</u> | 26 |
| 2.2.6.1 | Cumbal I | 26 |
| 2.2.6.2 | Cumbal II | 29 |
| 2.2.6.3 | Cumbal III | 30 |
| 2.2.6.4 | Cumbal IV | 31 |
| 2.2.7 | <u>Volcán Nasate.</u> | 31 |
| 2.3 | EXPLOSIONES HIDROTÉRMICAS. | 32 |
| 2.3.1 | <u>Generalidades</u> | 32 |
| 2.3.2 | <u>Criterios para su Reconocimiento</u> | 33 |
| 2.3.3 | <u>Ocurrencia</u> | 33 |
| 2.3.4 | <u>Descripción</u> | 34 |
| 2.3.4.1 | Cráter de Lagunas Verdes | 34 |
| 2.3.4.2 | Cráter de Aguas Hediondas. | 37 |
| 2.3.4.3 | Cráter de El Tambo | 38 |
| 2.3.5 | <u>Estratigrafía y Cronología</u> | 38 |
| 2.3.6 | <u>Profundidad de la Explosión Hidrotermal</u> | 39 |
| 2.3.7 | <u>Episodio de Fracturamiento Previo.</u> | 40 |
| 2.3.8 | <u>Actividad Hidrotermal e Implicaciones Geotérmicas.</u> | 41 |
| 2.4 | ALTERACION HIDROTÉRMICA. | 42 |
| 2.4.1 | <u>Generalidades.</u> | 42 |
| 2.4.2 | <u>Zonas de Alteración Hidrotermal y su Significado Geotérmico.</u> | 43 |
| 2.4.3 | <u>Alteración Hidrotermal en superficie.</u> | 47 |
| 2.4.3.1 | Naturaleza de los Fluidos Alterantes. | 47 |



| | Página |
|---|--------|
| 2.4.3.2 Estimación de la Duración y Edad de la Actividad Térmica . | 48 |
| 2.4.3.3 Alteración Hidrotermal como Instrumento de Mapeo | 49 |
| 2.4.4 <u>Resistencia a la Meteorización de las Rocas Al-</u> <u>teradas Hidrotermalmente</u> | 49 |
| 2.4.5 <u>Alteración Hidrotermal en el Area del Proyecto</u> | 50 |
| 2.4.6 <u>Naturaleza de la Alteración Hidrotermal</u> | 51 |
| 2.4.7 <u>Alteración Hidrotermal y Estructuras</u> | 53 |
| 2.4.8 <u>Alteración Hidrotermal Superficial como Guía Geo</u> <u>térmica</u> | 55 |
| 2.5 TECTONICA | 56 |
| 2.5.1 <u>Identificación de las Estructuras</u> | 56 |
| 2.5.2 <u>Fallamiento de Rumbo NNE-SSW y NE-SW</u> | 60 |
| 2.5.2.1 Falla Chiles - Cumbal | 60 |
| 2.5.2.2 Falla de Tufiño | 62 |
| 2.5.2.3 Falla de Mayasquer | 63 |
| 2.5.2.4 Falla Cerro Negro - Nasate | 64 |
| 2.5.2.5 Falla de Guachúcal | 64 |
| 2.5.3 <u>Fallamiento de Rumbo WNW-ESE y NW-SE</u> | 64 |
| 2.5.3.1 Falla Chiles Sur | 64 |
| 2.5.3.2 Falla Chiles - Cerro Negro | 66 |
| 2.5.3.3 Falla Chiles Norte | 66 |



| | Página |
|--|--------|
| 2.5.3.4 Falla Nasate | 67 |
| 2.5.3.5 Falla Río Blanco | 67 |
| 3. <u>ASPECTOS HIDROGEOLOGICOS.</u> | 68 |
| 3.1 COMPORTAMIENTO DE LAS UNIDADES LITOLÓGICAS | 69 |
| 3.2 ESQUEMA HIDROGEOLOGICO GLOBAL | 70 |
| 4. <u>GEOQUIMICA.</u> | 71 |
| 4.1 DESCRIPCIÓN DEL PRESENTE TRABAJO | 71 |
| 4.1.1 <u>Análisis de Campo y Laboratorio</u> | 71 |
| 4.1.2 <u>Fase de Interpretación</u> | 72 |
| 4.2 CALIDAD DE DATOS | 76 |
| 4.2.1 <u>Balance Iónico</u> | 76 |
| 4.2.2 <u>Comentario General a los Análisis Comparativos.</u> | 83 |
| 4.3 CLASIFICACION QUIMICA DE LAS AGUAS | 86 |
| 4.3.1 <u>Generalidades</u> | 86 |
| 4.3.2 <u>Diagramas de Lagelier - Ludwig</u> | 90 |
| 4.3.3 <u>Diagramas de Correlación K/Na y Ca/Mg</u> | 99 |
| 4.3.4 <u>Conclusiones Relacionadas con los Tipos Químicos de Aguas</u> | 102 |
| 4.4 CONSIDERACIONES GEOTERMOMETRICAS | 105 |
| 4.4.1 <u>Fundamentos Teóricos</u> | 107 |



Instituto Colombiano de Energía Eléctrica vi

| | | Página |
|----|---------------------|--------|
| 6. | <u>CONCLUSIONES</u> | 136 |
| 7. | <u>BIBLIOGRAFIA</u> | 143 |

F I G U R A S

GEOVULCANOLOGIA

| | | Página |
|----------|--|--------|
| Figura 1 | Mapa de Localización | 4 |
| Figura 2 | Mapa de las Provincias Geológicas | 9 |
| Figura 3 | Mapa Geovulcanológico , Escala 1:62.500 (en Anexo 1). | |
| Figura 4 | Esquema del Cráter de Explosión Hidro- termal de Lagunas Verdes | 36 |
| Figura 5 | Mapa de Alteración Hidrotermal del Area del Proyecto (en Anexo 1). | |
| Figura 6 | Esquema Tectónico del Area de los Volca nes Chiles , Cerro Negro y Cumbal . | 59 |
| Figura 7 | Cortes Geológicos : A - A ¹ (Incluye volcanes Chiles y Cumbal) (en Anexo 1) B - B ¹ (Incluye volcanes Chiles y Cerro Negro) (en Anexo 1) | |

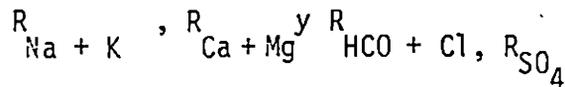


| | | |
|----------|---|-----|
| Figura 8 | Modelo Geotérmico Preliminar de los Volcanes Chiles y Cerro Negro . | 129 |
|----------|---|-----|

GEOQUIMICA

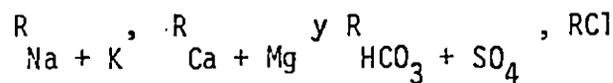
| | | |
|------------|--|----|
| Figura 4.1 | Diagrama de Langelier - Ludwig (L.L.1) $R_{Na + K}$, $R_{Ca + Mg}$ y R_{HCO} , $R_{SO} + Cl$ | 91 |
|------------|--|----|

| | | |
|------------|---|----|
| Figura 4.2 | Diagrama de Langelier - Ludwig (L.L.2) | 93 |
|------------|---|----|



| | | |
|------------|---|----|
| Figura 4.3 | Diagrama de Correlación entre SO_4 y $HCO_3 + Cl$ que es equivalente a una sección cualquiera de la pirámide de L.L., con traza horizontal en el diagrama plano de L.L.2. | 95 |
|------------|---|----|

| | | |
|------------|--|----|
| Figura 4.4 | Diagrama de Langelier - Ludwig (L.L.3) | 97 |
|------------|--|----|



| | | |
|------------|--|----|
| Figura 4.5 | Diagrama de Correlación entre $Na + K + Cl + Mg + HCO_3 + SO_4$ que es equivalente a la sección A - B de L.L.3 | 98 |
|------------|--|----|

| | | |
|------------|---|-----|
| Figura 4.6 | Diagrama de Correlación entre K y Na con las Isotérmicas del Geotermómetro correspondiente. | 101 |
|------------|---|-----|



Instituto Colombiano de Energía Eléctrica viii

| | Página |
|-------------|--|
| Figura 4.7 | Diagrama de Correlación entre Mg y Ca. 103 |
| Figura 4.8 | Diagrama de Correlación SiO_2 -T 115 |
| Figura 4.9 | Diagrama de Correlación entre K y Na con Isotérmicas del Geotermómetro correspondiente. 117 |
| Figura 4.10 | Diagrama de Correlación entre K y Ca con las Isotérmicas del Geotermómetro correspondiente. 118 |
| Figura 4.11 | Diagrama de Correlación entre Na y Ca con las Isotérmicas del Geotermómetro correspondiente. 119 |
| Figura 10 | Mapa de ubicación de las Manifestaciones Termales y frías . (En Anexo I) |

T A B L A S

| | |
|--------------|---|
| Tabla 4.1 | Resultados Cuantitativos de los Análisis Químicos de Laboratorio de los Constituyentes Principales. (Concentraciones en ppm). 73 |
| Tabla 4.2(a) | Concentraciones de los 7 Constituyentes Fundamentales (Aniones y Cationes) en equivalentes /Litro. 78 |
| Tabla 4.2(b) | Concentraciones de los 7 Constituyentes Fundamentales (Aniones y Cationes) en equivalentes /Litro. Compactado. 81 |



| | | |
|-----------|---|-----|
| Tabla 4.3 | Suma Catiónica - Suma Aniónica. Desviaciones Porcentuales (%DEV) | 84 |
| Tabla 4.4 | Valores de Reacción de los 7 Constituyentes Fundamentales. | 88 |
| Tabla 4.5 | Tipos Químicos de Aguas. | 106 |
| Tabla 4.6 | Estimativos de Temperatura a profundidad basados en las Ecuaciones correspondientes a cada Geotermómetro. | 124 |



I N T R O D U C I O N

Como resultado del Reconocimiento Geotérmico a nivel Nacional desarrollado mediante convenio de Cooperación con la Organización Latinoamericana de Energía, OLADE en 1981, se identificaron las zonas que presentan mejores posibilidades para el desarrollo geotérmico, determinando sus prioridades desde el punto de vista técnico. Dentro de las áreas identificadas como de gran prioridad se encuentra la de Chiles Cerro Negro en la frontera con el Ecuador.

Previamente en 1980 el Instituto Ecuatoriano de Electrificación INECEL, conjuntamente con OLADE desarrollaron un inventario geotérmico en el vecino país, definiendo como una de las áreas prioritarias, la de Tufiño, limítrofe con Colombia y correspondiendo complementariamente a la mencionada, de Chiles - Cerro Negro.

Por esta coincidencia afortunada, se vió la conveniencia de realizar la exploración conjuntamente Colombia y Ecuador firmándose el " Convenio de Cooperación Técnica para la Exploración Geotérmica del Area Fronteriza de Chiles-Cerro Negro-Tufiño " en 1982 entre los dos Gobiernos. El Instituto Colombiano de Energía Eléctrica ICEL, designado como la Institución colombiana ejecutora ,



I N T R O D U C I O N

Como resultado del Reconocimiento Geotérmico a nivel Nacional desarrollado mediante convenio de Cooperación con la Organización Latinoamericana de Energía, OLADE en 1981, se identificaron las zonas que presentan mejores posibilidades para el desarrollo geotérmico, determinando sus prioridades desde el punto de vista técnico. Dentro de las áreas identificadas como de gran prioridad se encuentra la de Chiles Cerro Negro en la frontera con el Ecuador.

Previamente en 1980 el Instituto Ecuatoriano de Electrificación INECEL, conjuntamente con OLADE desarrollaron un inventario geotérmico en el vecino país, definiendo como una de las áreas prioritarias, la de Tufiño, limítrofe con Colombia y correspondiendo complementariamente a la mencionada, de Chiles - Cerro Negro.

Por esta coincidencia afortunada, se vió la conveniencia de realizar la exploración conjuntamente Colombia y Ecuador firmándose el " Convenio de Cooperación Técnica para la Exploración Geotérmica del Area Fronteriza de Chiles-Cerro Negro-Tufiño " en 1982 entre los dos Gobiernos. El Instituto Colombiano de Energía Eléctrica ICEL, designado como la Institución colombiana ejecutora ,



ha desarrollado durante el presente año la fase I de la prefactibilidad, que incluye investigaciones geovulcanológicas, geoquímicas e hidrogeológicas, descritas en el presente documento.

Para el desarrollo de esta fase I se ha contado con la asesoría de OLADE, la cual envió a finales de 1982 a uno de sus técnicos para evaluar sobre el terreno la situación vulcanológica del proyecto geotérmico binacional Chiles-Cerro Negro - Tufiño. Como consecuencia de esta evaluación OLADE elaboró un informe vulcanológico en el cual se incluyó una programación de las investigaciones complementarias del mismo género, para ser desarrolladas, en el área del proyecto.

1.1 ORGANIZACION DEL PROYECTO.

El proyecto geotérmico binacional Chiles-Cerro Negro - Tufiño lo está desarrollando el ICCEL por intermedio de la División de Fuentes Alternas de Energía y con la participación de su filial CEDENAR, mediante contrato suscrito entre esa Entidad y el ICCEL.

Para el desarrollo de la fase I de la etapa de prefactibilidad ha intervenido directamente el siguiente personal técnico .:

Ing. EUTIMIO BECERRA REYES. Jefe de la División de Fuentes Alternas de Energía.

Geólogo. EDINSON LOZANO Jefe del Proyecto Geotérmico



Instituto Colombiano de Energía Eléctrica -3-

Geólogo LUIS E. CRUZ G. Geólogo del Proyecto.
Ing. LUIS H. VICTORIA Geoquímico del Proyecto.

El acometimiento de los estudios se ha desarrollado con sede en Ipiales donde ICCEL utiliza en alquiler una casa - campamento para todos los propósitos relacionados con las investigaciones geotérmicas que han sido concebidas para esta etapa de estudios

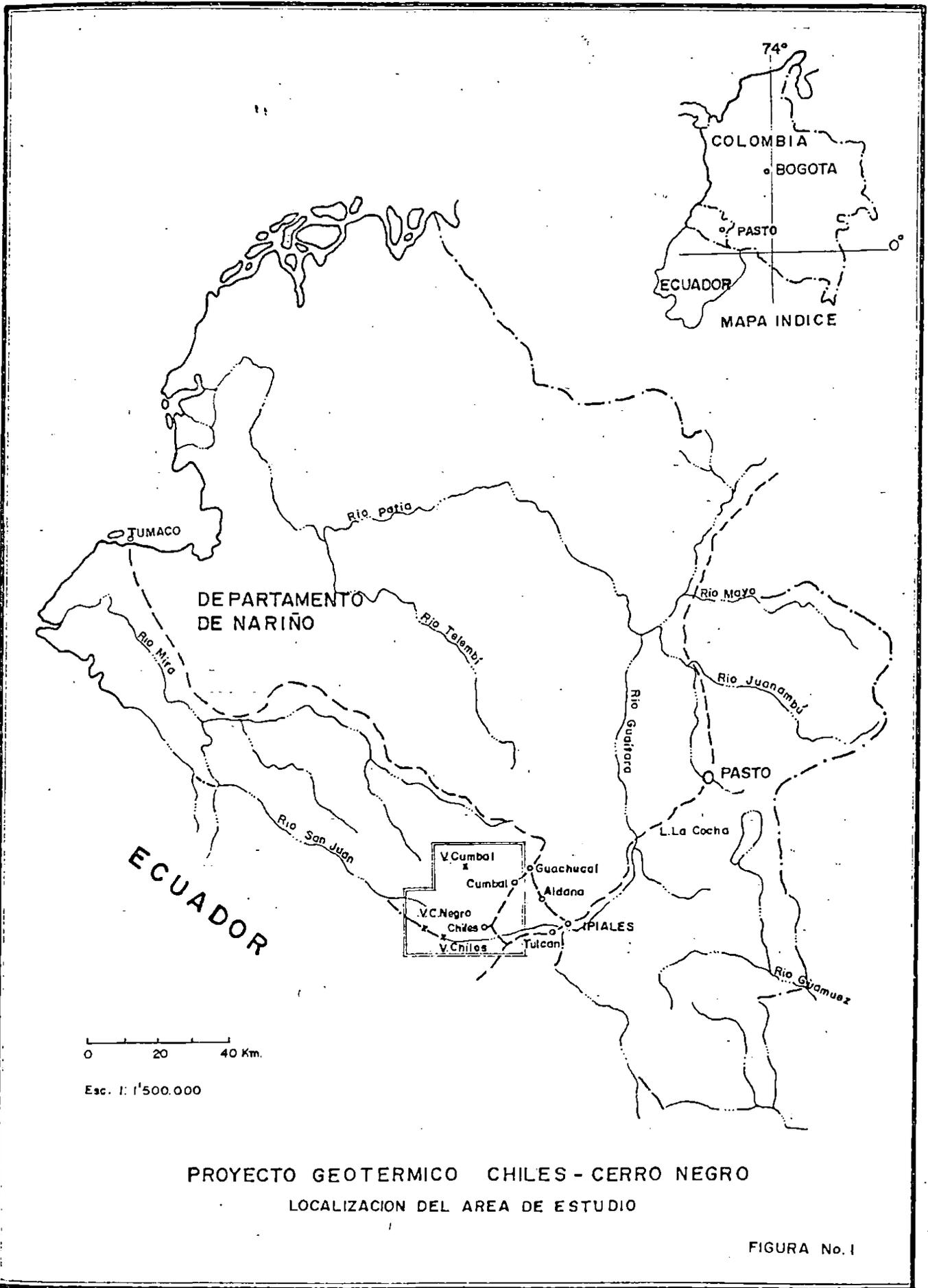
La casa campamento también es utilizada por el personal de OLADE e INECEL que interviene en el proyecto.

1.2

AREA DE ESTUDIO.

El área total de estudio del proyecto geotérmico binacional Chiles-Cerro Negro - Tufiño es de 1800 Km² e incluye territorios de Colombia y Ecuador. La parte Colombiana cubre unos 900 Km², tiene forma aproximadamente rectangular, faltando incluir su esquina NW, debido a la inexistencia de bases topográficas y fotografías aéreas de ese sector. Los 900 Km² del área Colombiana son el objeto de este estudio (Ver figura 1).

Además de los volcanes Chiles y Cerro Negro, el área incluye también el volcán Cumbal que en la etapa de reconocimiento mostró atractivos geotérmicos destacados y el estudio del cual puede aportar grandes co





nocimientos para el entendimiento vulcano estructural, hidrogeológico y en general geotérmico del proyecto binacional.

1.3- METODOLOGIA

La metodología desarrollada en esta fase corresponde a la recomendada por OLADE (Documento No.1, 1978), la cual se orienta particularmente a la búsqueda de campos geotérmicos de alta entalpía en regiones volcánicas.

1.3.1 Búsqueda de Fluidos Geotérmicos de Alta Entalpía en Regiones Volcánicas.

Esta búsqueda de orienta específicamente a la determinación de los elementos fundamentales para el delineamiento de un modelo de campo geotérmico, como se establece en el alcance de la metodología de OLADE, los cuales son :

- Una fuente de calor localizada en los niveles someros de la corteza terrestre, con capacidad térmica suficiente como para calentar un volumen importante de rocas dispuestas en sus cercanías.
- Un acuífero térmico o reservorio que permita la circulación de fluidos geotérmicos a poca profundidad de la superficie



Instituto Colombiano de Energía Eléctrica -6-

para ser alcanzados por perforaciones de profundidad moderada.

- Un área de recarga que permita la percolación de agua meteórica, con calentamiento progresivo durante su descenso hacia el reservorio.
- Una sobrecapa impermeable, lo suficientemente potente para impedir la disipación del calor por convección y del escape de los fluidos hacia la superficie.

La fuente de calor se relaciona con una masa de magma de alta temperatura ubicada en el interior de la corteza terrestre en intrusiones en curso de enfriamiento o " cámaras magmáticas " de alimentación de un volcán.

La formación de cámaras magmáticas de suficiente capacidad térmica para calentar un gran volumen de rocas encajantes, requiere condiciones tectónicas favorables, como el cruce de fallas o el basculamiento de bloques fallados que formen trampas tectónicas apropiadas, donde el magma en ascenso reposa y produce su diferenciación. De tal manera es importante investigar las relaciones entre estructuras volcánicas y lineamientos tectónicos con el objeto de reconocer a poca profundidad la presencia de cuerpos magmáticos calientes. La persistencia de la actividad volcánica a través del tiempo y la presencia de productos volcánicos



Instituto Colombiano de Energía Eléctrica -7-

fuertemente diferenciados son elementos favorables para estimar su presencia en un largo período de tiempo . En muchos casos las cámaras magmáticas alimentan grandes volcanes centrales que son estructuras volcánicas alrededor de una chimenea central, formados por productos de diferente composición que se conectan genéticamente a través de cristalización fraccionada.

El reservorio lo constituyen rocas de una alta permeabilidad sean porosas o intensamente fracturadas.

Para que muestre sus atractivos económicos debe estar formado por un volumen considerable de rocas y localizado dentro de un sistema hidrogeológico capaz de permitir una recarga suficiente de agua.

La identificación de un reservorio es uno de los objetivos más difíciles en la exploración de un campo geotérmico, debido a la presencia de espesas cubiertas volcánicas superficiales que dificultan la observación directa de las capas potencialmente atractivas para almacenar grandes cantidades de fluidos.

De todas maneras la evaluación de un reservorio geotérmico (profundidad, naturaleza litológica, estructura) requiere del empleo de métodos geofísicos, tales como gravimetría, magnetometría y geoelectrica.)



Como el reservorio debe estar cubierto por rocas impermeables, sean sedimentarias con impermeabilidad primaria (arcillas, margas, depósitos lacustres) ó rocas sedimentarias o volcánicas que en parte han sido impermeabilizadas por el efecto de la circulación de fluidos termales (self-sealing), establecer su presencia cerca de la superficie, es esencial para definir la conveniencia de emplear en las sucesivas fases de la exploración geotérmica, pozos de medida de gradiente térmico los cuales son útiles, solo si son ejecutados en terrenos donde la temperatura no está alterada por la circulación de acuíferos someros.

2. GEOVULCANOLOGIA

2.1 MARCO GEOLOGICO REGIONAL.

Las provincias geológicas en Colombia (Fig.2) las podemos dividir a " groso modo " como sigue.:

1. Llanuras costeras tanto en la Costa Atlántica como en la Costa Pacífica, las cuales están constituidas predominantemente por formaciones sedimentarias.
2. Cordillera Occidental que incluye rocas metasedimentarias del grupo Dagua (sedimentos pelágicos y areniscas turbidíticas) cubiertas por el grupo Diabásico (basaltos, depósitos piroclásticos) todos de edad cretácica. Estos grupos geológicos están recubiertos en el sur

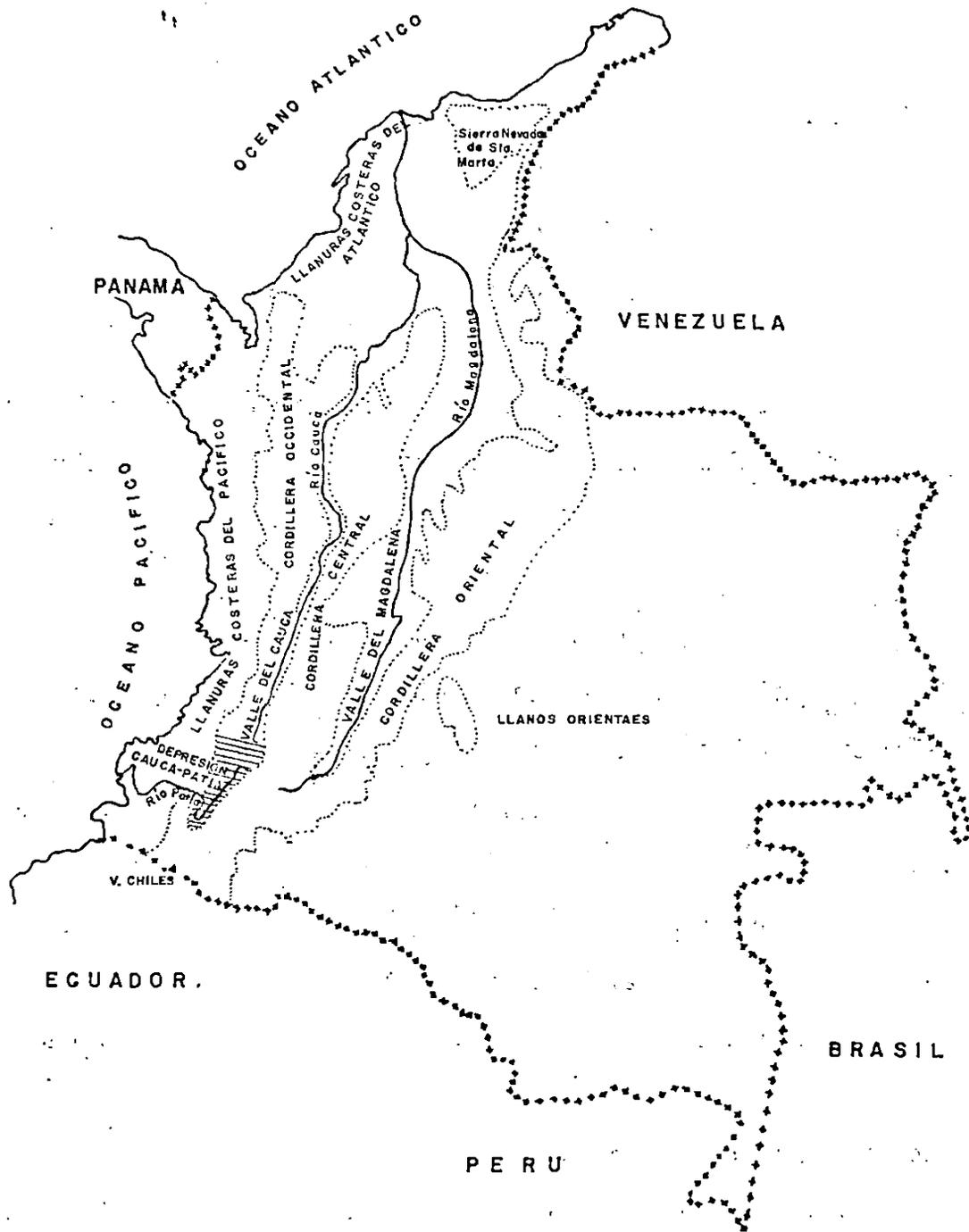
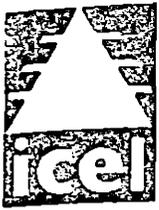


FIGURA Nº 2

0 50 100 150km.
 ESCALA = 1: 6.277.777

| | | |
|--|-----|--------------------|
| icel | | |
| DIVISION DE FUENTES ALTERNAS | | Proy.: No. |
| MAPA DE LAS PROVINCIAS GEOLOGICAS | | |
| Dibujo: e.s.g. | No. | Fecha: 30-11-83 |



del país, (Nudo de Pasto), por rocas volcánicas plio-cuaternarias.

3. Depresión Cauca - Patía, profundo surco sedimentario que hacia el sur se desvanece a causa del volcanismo reciente.
4. Cordillera Central, integrada por rocas paleozoicas metamorfizadas (esquistos, neises) que parecen ser una prolongación hacia el norte de las rocas del basamento Ecuatoriano.

Estas rocas se encuentran intruídas por granodioritas y granitos mesozoicos, y en la mitad meridional se encuentran cubiertas por una potente secuencia de lavas subhorizontales y por edificios volcánicos cuaternarios.

La presencia de manifestaciones volcánicas recientes en esta cordillera fué una guía favorable para insistir en la búsqueda, durante la etapa de reconocimiento, de áreas geotérmicamente atractivas.

5. Cordillera Oriental, constituída predominantemente por rocas paleozoicas débilmente metamorfizadas, rocas sedimentarias continentales jurásicas y terciarias y rocas sedimentarias marinas de edad cretácica.



En el departamento de Boyacá y particularmente en la zona de Paipa-Iza, donde las manifestaciones termales son muy atractivas desde el punto de vista geotérmico, el dominio geológico corresponde a rocas sedimentarias cretácicas y terciarias acompañadas de pequeñas apófisis de rocas de origen volcánico.

6. Valle del Magdalena, amplísima depresión controlada estructuralmente por una semifosa de orientación Norte - Sur, la cual está rellena por depósitos sedimentarios terciarios y cuaternarios.
7. Valle del Cauca, depresión intercordillerana rellena con sedimentos producto de la erosión de las cordilleras adyacentes.

Predominan areniscas y arcillolitas de color gris verdoso de edad terciaria.

8. Llanos Orientales, donde afloran rocas precámbricas del escudo - Guayanés cubiertas por sedimentos terciarios. Las rocas precámbricas incluyen migmatitas, neises y granulitas.



Instituto Colombiano de Energía Eléctrica -12-

De la Ciudad de Pasto hacia el sur la situación morfológica estructural muestra claras similitudes con la planteada en el Ecuador, donde predomina la presencia de una gran macizo montañoso recorrido longitudinalmente por un callejón central (Depresión Interandina) a ambos lados del cual se alinean cadenas montañosas matizadas por elevados volcanes cuaternarios. De Pasto hacia el norte aparece una clara diferenciación en los fenómenos morfológicos por el nacimiento de la Cordillera Oriental y acentuándose la identificación de los macizos montañosos que quedan separados por profundos valles interandinos (Cauca y Magdalena). Es importante anotar que en Colombia pueden diferenciarse claramente dos grandes dominios geológicos, separados por la falla de Romeral localizada hacia el flanco occidental de la Cordillera Central.

- a.- El Oriente Andino que constituye la corteza continental y
- b.- Occidente Andino donde se manifiesta la corteza oceánica.

2.1.1. Características del Volcanismo Reciente en Colombia.

El volcanismo reciente en Colombia es enteramente de naturaleza calcoalcalina en donde los elementos más básicos constituyen rocas andesíticas, no encontrándose hasta el momento rocas de composición basáltica.



Sin embargo, existe diferencia entre el volcánismo reciente de la Cordillera Central y el observado al sur de una zona cercana a Pasto, definida por una gran fractura de dirección NW-SE provisionalmente denominada "Transcurrente Patía-Putumayo" y la cual debe corresponder a un cambio en el comportamiento de la placa de Nazca (probablemente una variación en la inclinación del plano de Benioff.) En efecto, al Sur de la "Transcurrente Patía-Putumayo" el frente volcánico experimenta un desplazamiento hacia el W (Eje Chiles-Cumbal - Azufral), ubicándose en el límite oriental de la Cordillera Occidental. Este sector presenta características estructurales similares a las observadas en el Ecuador, con una Depresión Interandina rellena de materiales plio-cuaternarios. La variación química más importante entre las rocas volcánicas recientes del dominio Andino de Colombia se refiere al contenido de potasio. En este caso de igualdad de edad y de contenido de SiO_2 , se verifica que el contenido de K_2O se incrementa en los volcánes situados a mayor distancia de la fosa del borde continental del Pacífico.

2.2

GEOLOGIA DEL AREA DEL PROYECTO CHILES - CERRO NEGRO.

En el área del proyecto Geotérmico Chiles - Cerro - Negro están



involucradas rocas de edad paleozóica hasta reciente. Las rocas pre-terciarias están constituidas esencialmente por sedimentos de tipo "flysch," lavas toleíticas y esquistos. Las rocas terciarias están constituidas por depósitos sedimentarios y rocas volcánicas de predominio lávico.

2.2.1 Basamento Pre- Terciario.

- a.- Grupo Cretácico, formado por rocas sedimentarias que incluyen lutitas negras y verdes con intercalaciones de grauvacas grises, todas, las cuales han sufrido metamorfismo de tipo dinámico, e incluidas dentro del grupo Dagua.
Al grupo anterior lo acompañan lavas toleíticas con niveles de "pillows" pertenecientes al grupo Diabásico.
Este grupo cretácico aflora hacia la parte occidental del área de estudio en el flanco W de la Cordillera Occidental y son también visibles en el Ecuador en la Depresión Chota-Mira.
- b.- Grupo Paleozoico, constituido por esquistos y neises pertenecientes al grupo Cajamarca, los cuales afloran hacia el oriente de la Depresión Interandina y cuyo contacto con el grupo Cretácico no está claramente definido. Este contacto definiría el paso de una corteza de tipo continental hacia el oriente.



Como las rocas de tipo metasedimentario y esquistoso del basamento pre-terciario constituyen un porcentaje dominante con respecto a los niveles volcánicos toleíticos, el comportamiento hidrogeológico del conjunto sería prácticamente el del conjunto metasedimentario y esquistoso que normalmente es de baja permeabilidad marcando por lo tanto el límite inferior del campo geotérmico.

2.2.2. Sedimentos Terciarios:

Son materiales formados por la destrucción de los cordones de montañas que delimitan el Graben Interandino, depositados en la misma depresión y constituidos por rocas de granulometría variable, como conglomerados, areniscas, y lutitas, pertenecientes a la formación Nariño.

Afloran en el surco transversal Chota-Mira en el Ecuador, donde su límite inferior es una discordancia angular sobre pizarras negras correspondientes al grupo Dagua y el límite superior es transicional hacia la secuencia vulcano-sedimentaria pliocena.

2.2.3 Secuencia Volcánica Pliocena.

Hacia el bloque occidental de la Depresión Interandina debajo del domi



Instituto Colombiano de Energía Eléctrica -16-

nio de los volcanes Chiles y Cerro Negro, aparece una espesa secuencia de lavas que en algunos sitios supera los 1000 metros de espesor a la cual se le ha asignado una edad pliocena. También esta presente hacia el bloque oriental pero en forma de planchas mas delgadas.

Esta secuencia efusiva tabular ha sido erosionada y aplanada a partir de lo que en su época debió ser una cadena volcánica compleja, constituida por numerosos edificios individuales emplazados muy probablemente en la intersección de fallas longitudinales y transversales donde es muy común encontrar horizontes aglomeráticos y brechoides resultado de los esfuerzos tectónicos ejercidos en las rocas preexistentes. Hacia el occidente la secuencia lávica tabular eventualmente se pone en contacto fallado con la serie de tipo flysch, mediante una o varias fallas de orientación aproximada NNE, ó NE.

Las lavas pliocenas muestran predominantemente una composición andesítica con contenido importante de piroxeno y en menor cantidad aparecen también andesitas olivínicas y anfibólicas.

La edad de estas rocas se ha establecido mediante dataciones radiométricas efectuadas en muestras de la secuencia lávica, durante el reconocimiento desarrollado por OLADE - INECEL, en 1980.

Las edades arrojadas han sido de 4.78 ± 0.5 M.A., para una localidad



ubicada al SW del volcán Chiles, en el área del proyecto y de 3.46 ± 0.10 M.A. en un sitio ubicado en el macizo de Andachagua, al SE - de Ibarra, (Ecuador) fuera del área de estudio (Navarro, et al, 1980 informe inédito.)

Las rocas pliocenas están muy poco desarrolladas en el bloque oriental (Cordillera Central) de la Depresión Interandina, manifestándose como delgadas planchas lávicas cortadas por fallas longitudinales, como puede observarse en la mina de piedra localizada en la variante de Macas que se desprende de la carretera Ipiales- Guachucal. No han sido identificadas con exactitud los equivalentes piroclásticos de la actividad eruptiva pliocena, por lo cual se presume que la actividad glacial los pudo convertir en depósitos morrénicos y lahares ubicados en las partes alejadas de los centros de erupción.

2.2.4 Actividad Volcánica Cuaternaria.

La actividad volcánica cuaternaria ha dado lugar al desarrollo de edificios que muestran diferentes grados de evolución, incluyendo estratovolcánes de evolución simple donde predominan las andesitas piroxénicas - y/o olivínicas, como también aparatos de evolución compleja cuyos componentes alcanzan a incluir niveles de composición riolítica.



La falta de dataciones radiométricas hace difícil asignar con precisión una edad definida para las diferentes unidades efusivas observadas.

Como punto de partida asumimos que el límite inferior de los sistemas volcánicos cuaternarios lo constituye una superficie erosiva discordante en los depósitos lávicos pliocenos, la cual adicionalmente pudo sufrir un leve basculamiento hacia el E como consecuencia de los fenómenos distensivos que generaron el Graben Interandino cuaternario, y propició la actividad eruptiva en esta misma época geológica.

Se consideran edificios con edad pliocena inferior, los que han perdido completamente su forma cónica original, donde su centro de emisión puede ser inferido por la presencia de formas circulares ensanchadas - por actividad glacial y rodeados por productos efusivos con disposición periclinal.

Los aparatos volcánicos del plioceno medio se encuentran geomorfológicamente mejor conservados que los del piso precedente, mostrando valles glaciales con disposición predominantemente radial, que nos señalan con claridad su centro de emisión.

Los edificios volcánicos del plioceno superior - holoceno tienen su



morfología original bien preservada y los productos eruptivos se adaptan al relieve actual.

2.2.5 Sistema Volcánico Chiles - Cerro Negro.

Localizado en el bloque occidental de la Depresión Interandina (Cordillera Occidental) y está constituido por los volcanes Chiles y Cerro Negro con 4.768 y 4.470 m.s.n.m. respectivamente, ambos tienen una forma cónica y la línea fronteriza Colombo - Ecuatoriana pasa - por sus cumbres.

Una fractura de orientación WNW-ESE pone en comunicación a los aparatos volcánicos, lo que nos sugiere su comunicación con una cámara magmática única que alimentaría a ambos volcanes, lo cual se refuerza por la similitud de los productos emitidos por ellos.

Las aberturas eruptivas de los volcánes las constituyen cráteres somitales con profundas depresiones en los cuales es notoria la intensa alteración hidrotermal en los bordes, producto de la actividad fumarólica y en general de los fluidos emitidos en épocas previas a la actuación de un probable fenómeno freatomagmático.

Los productos efusivos nos representan diferentes episodios de la acti



Instituto Colombiano de Energía Eléctrica -20-

vidad eruptiva, separados entre sí por períodos más o menos largos de calma en que la actividad glacial ha erosionado parcialmente el edificio anterior.

La actividad glacial ha desempeñado un importante papel en el transporte de los productos piroclásticos los cuales son escasos en cercanías de los edificios volcánicos, pero se presume su existencia por la abundante presencia de depósitos morrénicos y lahares dispuestos en la periferia de los mismos edificios.

.2.5.1 Chiles I y Cerro Negro I.

Se pueden observar hacia los bordes del edificio volcánico, tanto en la carretera Ecuatoriana que va de la población de Tufiño a Maldonado como en la carretera Colombiana que cruza por el pié del flanco norte del volcán Chiles. Esta plancha lávica se encuentra disectada por la actividad glacial, en donde es común que los valles glaciales coincidan con zonas de fractura por donde ascienden las manifestaciones termales o se relacionen con zonas de alteración hidrotermal y fenómenos de explosión freáticos particularmente cuando las fracturas se cruzan y afectan esta unidad litológica.

Los productos efusivos pertenecientes a este nivel vulcanológico corres



ponden a lavas que tienen poca variación composicional e incluyen solamente andesitas piroxénicas. Cuando son afectadas por alteración se observa desde una leve desvitrificación de la matriz hasta una franca transformación en minerales de arcilla de las plagioclasas y del material que constituye la matriz, observándose además en algunos sitios un claro estado de silificación, como ocurre en Lagunas Verdes, en la carretera Ecuatoriana que va a Maldonado, al Sur del Volcán Chiles, - donde además es muy claro un fenómeno de deposición de brechas producto de una explosión freática.

Para el caso de Cerro Negro I, los productos lávicos son mucho menores que para los del Chiles I.

Estos depósitos eruptivos descansan directamente sobre la secuencia lávica pliocena a través de una discordancia erosiva muy fuerte. Los materiales predominantes son andesitas piroxénicas.

2.2.5.2 Chiles II

El edificio volcánico de Chiles II está constituido por lavas exclusivamente, procedentes de un centro de emisión situado en el circo somital. Los productos emitidos muestran la siguiente secuencia.:



- a. Lavas iniciales de composición dacítica con estructura fluidal bien definida, extendidas hacia el E y NE.
- b. Continuación de la efusión mediante lavas de composición dacíandesítica con anfíbol y con presencia también de estructuras fluidales indicándonos su gran viscosidad.
- c. Se manifiesta el carácter básico de las lavas mediante el derrame de lavas piroxénicas por los flancos SW, S y SE, las cuales alcanzaron mayor distancia por su mayor fluidez cubriendo los productos anteriores.
- d. La efusión concluyó con la emisión de lavas finales de composición andesítica con olivino, volumétricamente poco importantes.

La secuencia lávica descrita más arriba nos sugiere una diferenciación magmática continua donde los productos emitidos inicialmente se muestran menos densos que los dispuestos tardíamente, sugiriéndonos fenómenos de estratificación en una cámara magmática somera.

Los productos piroclásticos de este período no se conocen a pesar de la fuerte viscosidad y el contenido de volátiles muy alto en las lavas iniciales, sin embargo esto se explica por las condiciones subglaciales de la deposición; lo cual dió lugar a la formación de lahares y morrenas a partir de los depósitos piroclásticos iniciales.



La edad de esta unidad efusiva no está bien definida y se espera que en la subsiguiente etapa de estudio sea establecida mediante medidas radiométricas, particularmente K/Ar.

2.2.5.3 Cerro Negro II.

La emisión de los productos de Cerro Negro II estuvo precedida de un largo período de inactividad donde la erosión, producto de la actividad glacial, ensanchó el cráter de Cerro Negro disponiéndolo hacia el norte. Esta circunstancia prevaleció durante la emisión de los productos de Cerro Negro II, lo cual se pone de presente por la aparición de depósitos lávicos de este período, orientados hacia el norte y noroeste, descansando directamente sobre la secuencia lávica pliocena, alcanzando los materiales muy fluídos el basamento mesozoico.

Los productos piroclásticos no están presente en cercanía del edificio volcánico de Cerro Negro II, por razones de la actividad glacial, pero depósitos de " ash flow " han sido reportados hacia el flanco occidental de la cordillera en el valle del Río Caimacan (Almeida comunicación oral). El depósito es de naturaleza dacítica y aparentemente corresponde a los primeros productos emitidos. Lavas de composición dacítica a dací-andesítica con anfíbol se encuentran localizadas encima del depósito de



"ash flow", como se ve, el margen de variación con respecto a la de Chiles II es mucho más estrecho.

2.2.5.4 Relación entre ambos Episodios.

Como la composición de los productos de ambos episodios volcánicos revelan un grado semejante de diferenciación, es muy probable que la cámara magmática de alimentación de ambos volcanes sea única.

En el episodio Cerro Negro II, la erupción se interrumpió con el desalojo de los materiales más diferenciados. Para el caso de Chiles II la evacuación incluyó los niveles más profundos en la cámara magmática.

En este sentido, el Cerro Negro II tuvo como productos iniciales y finales dacitas y daciandesitas respectivamente, mientras que el Chiles II incluyó en sus productos finales andesitas piroxénicas y olivínicas.

El volumen total de los productos emitidos para Cerro Negro II y Chiles II, sin incluir los productos piroclásticos es del orden 2.2 Km^3 .

Como se observa en el mapa geológico incluido en el informe (Figura 3) los volcanes Chiles y Cerro Negro están localizados en una falla transversal de orientación ESE, lo mismo que el panecillo de Tufiño que es



de composición andesítica ácida.

La intersección de estas fallas transversales con fallas longitudinales ha permitido la manifestación en superficie de estos centros de emisión .

2.2.5.5 Chiles III y Cerro Negro III

La actividad eruptiva posterior a los eventos del Chiles II y Cerro Negro II se limitó a depósitos piroclásticos probablemente de tipo freatomagmático.

En Chiles III han ocurrido pequeñas explosiones cerca de la cumbre dando lugar a pequeños cráteres de fondo plano con anillo constituido por fragmentos de rocas persistentes y una pequeña cantidad de escorias juveniles dentro de matriz areno-limosa. Depósitos de " Ash Flows " son observables hacia el flanco sur del Chiles. cerca de Laguna Verdes las cuales se disponen discordantemente sobre los flujos lávicos del Chiles II perteneciendo indiscutiblemente al evento del Chiles III.

El Cerro Negro III se manifiesta primeramente por un flujo de bloques que descendió por el valle de salida del volcán, como producto de su actividad explosiva. Los materiales observados pertenecen predominantemente a las lavas pliocenas con una alteración hidrotermal muy leve.



Los posibles depósitos freatomagmáticos tienen naturaleza diferente de los depósitos freáticos (hidrotermales) identificados en el área del proyecto. La naturaleza de estos últimos se discutirá en el numeral 2.3 de este informe.

2.2.6 Sistema Volcánico Cumbal.

Es el que ofrece mayor persistencia en su actividad eruptiva a través del tiempo, estimándose su iniciación a partir del pleistoceno inferior hasta épocas subactuales. En este sentido se han establecido cuatro eventos eruptivos que hemos llamado Cumbal I, II, III, y IV.

Aunque no existen medidas radiométricas para rocas dentro del dominio del Cumbal, sus edades se han estimado a partir del estado de conservación geomorfológica observable en los diferentes edificios volcánicos. Así, el edificio volcánico del Cumbal I ha sido sometido a los procesos erosionales de la actividad glacial con mayor intensidad que los edificios subsiguientes, estando mejor conservado el edificio del Cumbal III donde sus productos lávicos han sido levemente retocados por la actividad glacial.

2.2.6.1 Cumbal I



Es el evento eruptivo más antiguo perteneciente al sistema Cumbal, el cual aparentemente debió iniciarse en el pleistoceno inferior con la emisión de enormes cantidades de productos lávicos y piroclásticos a juzgar por las dimensiones del colapso caldérico producido con posterioridad a este evento eruptivo el cual tiene una sección ligeramente elíptica elongada hacia el NE con 17 Km. de diámetro mayor por 12 de diámetro menor.

Los productos lávicos emitidos por este evento, presentes dentro del dominio areal del colapso caldérico, aparecen predominantemente como afloramientos angostos y bastante alargados, con aristas muy destacadas y dispuestas de manera subradial alrededor del edificio actual del Cumbal III (Ver mapa geovolcanológico, figura 3.)

Hacia los bordes de la caldera, los afloramientos lávicos describen una morfología arqueada, dispuestos de manera alargada y a veces discontinua.

Todos los restos de este evento volcánico observados en superficie muestran aristas muy pronunciadas producto de la intensa actividad glacial y a excepción de la secuencia lávica presente hacia la paratorienta del borde caldérico perteneciente a este mismo evento



eruptivo, gran parte de las unidades efusivas están sepultadas por una espesa cubierta de morrenas presente hacia la parte periférica del edificio volcánico por encima de los 3.200 m.s.n.m. y por depósitos laháricos observables a cotas inferiores.

Parece que luego de la actividad piroclástica se aprovechó la situación depresiva a lo largo de la falla del Río Blanco, propiciándose un canal de desagüe con orientación NW-SE por donde se evacuó el material asociado a la fusión glacial.

Simultáneamente (o un poco posterior) al colapso caldérico hubo reactivación en la falla de Rioblanco produciéndose basculamiento en su bloque SW, esto creó una situación propicia para que la erosión glacial actuara mas efectivamente en este bloque SW y se destacara morfológicamente el bloque NE en relación con el resto del fenómeno de colapso. La depresión creada entre el bloque NE de la falla y el actual edificio volcánico del Cumbal III fué aprovechada para la formación de la actual laguna Cumbal.

Productos piroclásticos como tales, no son observables en el dominio del volcán Cumbal, la mayoría de los cuales indudablemente fueron convertidos en morrenas y lahares.



Las muestras de productos efusivos tomadas en algunos sitios, indican la presencia de andesitas piroxénicas lo cual no necesariamente sugiere un grado bajo de evolución magmática en los productos eruptivos de este evento. Más bien, el gran volumen de productos emitidos tanto efusivos como piroclásticos nos indicaría lo contrario, sugiriendo la presencia de una cámara magmática somera y químicamente evolucionada.

Con posterioridad al fenómeno de colapso caldérico, hubo ascenso de material fundido probablemente de naturaleza ácida lo cual dió lugar al emplazamiento de domos hacia las partes marginales de la estructura caldérica como puede observarse hacia la parte NE de la misma.

2.2.6.2 Cumbal II.

Este evento eruptivo ocurrió probablemente en el pleistoceno medio, aprovechando la zona de debilidad creada por la intersección de la falla Cerro Negro - Nasate con el borde caldérico del Cumbal I.

Como consecuencia de la actividad eruptiva se desarrolló un estratovolcán relativamente pequeño el cual sufrió también colapso caldérico al finalizar el evento, siendo actualmente visible una depresión circular de 4 Km de diámetro en donde sus productos lávicos han sido sometidos a



la acción glacial pero indudablemente con menor intensidad que en la mayoría de los pertenecientes al evento del Cumbal I

Sus productos piroclásticos son difícilmente identificables y la mayoría de los cuales han debido convertirse en morrenas y lahares.

Los productos lávicos se muestran poco evolucionados con la presencia de andesitas piroxénicas.

2.2.6.3 Cumbal III

En el pleistoceno superior se reactivó el fenómeno eruptivo dando lugar actualmente al edificio volcánico del Cumbal, el cual constituye un estratovolcán de forma cónica alcanzando los 4.764 mts. de altura y con sección ligeramente elíptica orientada en dirección NE-SW. Posee al menos unos dos bocas eruptivas orientadas probablemente a la largo de una fractura también NE-SW.

Inicialmente hubo emisión de lavas bastante fluídas que incluyeron principalmente andesitas piroxénicas las cuales alcanzaron grandes distancias a partir de su centro de erupción. Estas lavas cubren parcialmente y de manera discordante los productos eruptivos del Cumbal I.

Afloramientos de la secuencia lávica de la fase inicial del Cumbal III



Instituto Colombiano de Energía Eléctrica -31-

son observables en cercanías de la población de Cumbal.

Luego de las andesitas piroxénicas, fueron emitidas lavas más viscosas de composición andesítica con anfíbol las cuales alcanzaron distancias menores a partir de su centro de emisión.

La variación composicional de los productos emitidos (59-61% de SiO_2) desde andesitas con piroxeno a andesitas con anfíbol, se interpreta como un ascenso inicial del magma desde las partes más profundas de la corteza lo cual dió lugar a la emisión de andesitas piroxénicas, con mayor fluidez. Posteriormente el material fundido se ubicó en una cámara magmática somera donde inició su proceso de diferenciación emitiendo lavas menos fluídas, de composición andesítica con anfíbol.

2.2.6.4 Cumbal IV

En el holoceno la actividad del Cumbal probablemente se ha manifestado por erupciones freatomagmáticas, con el desarrollo de fenómenos de deslizamiento en masa los cuales están presentes en los flancos del edificio volcánico.

2.2.7 Volcán Nasate.



De su edificio volcánico (pleistoceno inferior) solamente quedan los restos efusivos fuertemente erodados por la actividad glacial y dispuestos periclinalmente alrededor de un cráter de hundimiento identificable por la persistente alteración hidrotermal que lo bordea y contribuye a identificar su abertura central orientada hacia el sur. Sus productos incluyen andesitas piroxénicas y olivínicas sugiriendo su naturaleza poco evolucionada.

Es notorio que la actividad glacial ha convertido los productos efusivos en una plancha lávica en donde se destaca la alta relación de la anchura sobre la altura.

2.3 EXPLOSIONES HIDROTERMALES.

2.3.1 Generalidades.

Las explosiones hidrotermales ocurren cuando el agua sobrecalentada a poca profundidad se " flashea " en vapor, superando la presión litológica confinante, eyectando material sólido, agua y vapor. Por definición el magma no interviene directamente en dichos fenómenos hidrotermales.

Consideraremos la explosiones freáticas originadas por el mismo mecanismo que producen las explosiones hidrotermales.



2.3.2 Criterios para su Reconocimiento.

Los criterios geológicos que se han seguido para su reconocimiento en el campo son :

- a.- Diámetro del cráter de explosión, comunmente modesto (10 metros hasta algunos cientos de metros.)
- b.- Ausencia de material magmático juvenil.
- c.- Abundante presencia de rocas hidrotermalizadas en los productos eyectados.
- d.- Fumarolas activas o presencia de alteración hidrotermal dentro del cráter.

2.3.3 Ocurrencia.

Al menos tres cráteres de explosión hidrotermal han sido reconocidos en el área del proyecto.:

- En Lagunas Verdes, al sur del Volcán Chiles.
- Cerca a la fuente termal de Aguas Hediondas.
- En el Tambo, sitio localizado a unos 4 Km. al Occidente de la terminación de la carretera que va a " La Puerta."

El cráter más destacado es el de Lagunas Verdes el cual alcanza los 500 metros de diámetro con depósitos muy claros de brechas de explosión hidrotermal.



Instituto Colombiano de Energía Eléctrica -34-

Los de Aguas Hediondas y de el Tambo son de diámetro más modesto pero con depósitos típicos asociados a esta clase de fenómeno.

Todos los cráteres de explosión hidrotermal en el área del proyecto están asociadas a zonas de fallamiento en sitios donde son abundantes los depósitos glaciales.

Fuera de los tres cráteres hidrotermales antes mencionados no se han identificado más ya que la escasez de vías de acceso y la vegetación muchas veces impiden su identificación.

2.3.4 Descripción.

El mejor expuesto de los cráteres es el de Lagunas Verdes, debido particularmente al corte de la carretera que va a la población de Maldonado.

Los cráteres de Aguas Hediondas y El Tambo son quizás los más parecidos a los cráteres observados en algunos campos geotérmicos de Nueva Zelanda, el cráter de El Tambo es el de menos fácil acceso.

2.3.4.1 Cráter de Lagunas Verdes.

Tiene un diámetro aproximado de unos 500 metros, y las Lagunas Verdes



Instituto Colombiano de Energía Eléctrica -35-

dispuestas encima de la depresión producida por la explosión hidrotermal. El cráter está localizado en el flanco sur del volcán Chiles (Ver figura 3), es muy notoria su alteración hidrotermal en su parte norte.

Los depósitos de brechas están muy pobremente sorteados con bloques angulares muy grandes hasta de un metro de diámetro. Gran parte de los cantos están embebidos en una matriz areno-limo-arcillosa, conteniendo arcilla hidrotermal, sin componentes magmáticos identificados en las eyecciones. Los bloques eyectados están por regla general alterados hidrotermalmente consistiendo particularmente de andesita, calcedonia y brechas silicificadas.

Su espesor puede alcanzar unos 60 metros en su parte norte. En su flanco sur en cercanías de las lagunas, el espesor disminuye sustancialmente por causa particularmente de la erosión glacial que ha retocado el depósito enmascarándose un poco por la vegetación y las aguas de las lagunas. Aquí el espesor no supera los 10 metros.

En el material de pre-erupción hidrotermal se han reemplazado los fenocristales de plagioclasa por cuarzo y eventualmente por adularia.

En algunos fragmentos el vidrio ha sido alterado a cuarzo hidrotermal

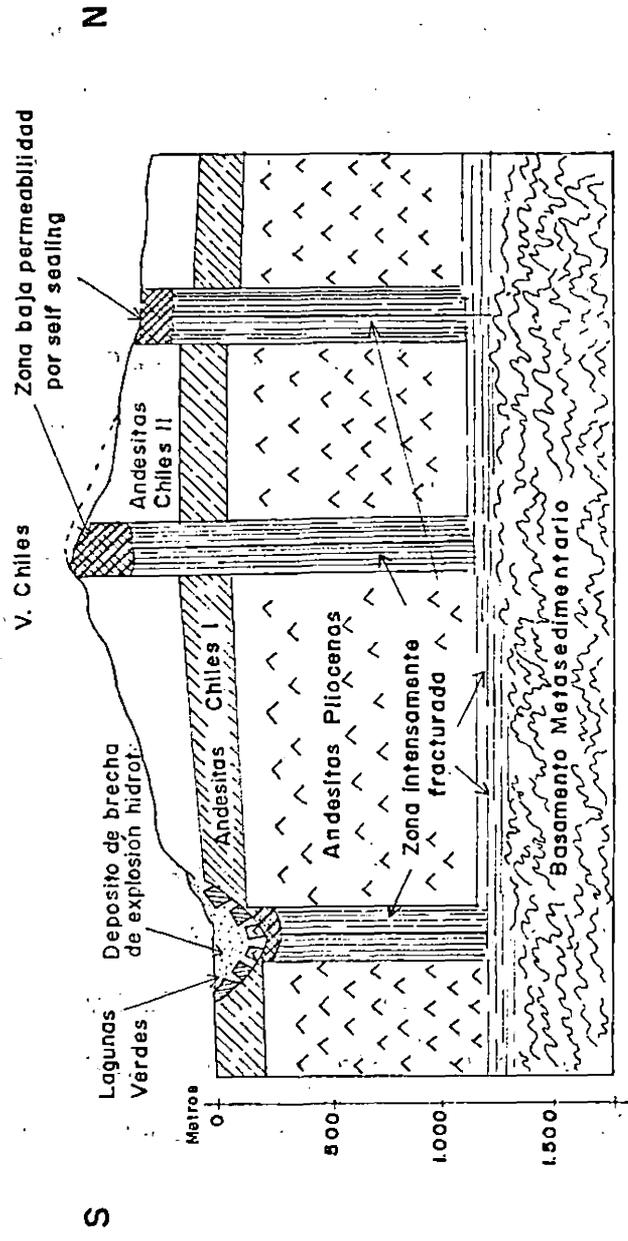


Fig. No. 4

Esquema del Cráter de Explosión Hidrotermal de Lagunas Verdes



finamente cristalino y a pequeños paquetes de arcilla. Los fenocristales máficos fueron reemplazados por illita y pirita diseminada. La alteración hidrotermal encontrada en las eyecciones es mucho más intensa que la de los cráteres de Aguas Hediondas y El Tambo.

Las fracturas en los clastos son de menos de un milímetro hasta un centímetro de espesor y están rellenas con matriz silíceá. Los clastos están separados, intruídos y cementados por una matriz pobremente sortada y constituida por cuarzo finamente cristalino y fenocristales primarios más grandes (parcialmente reemplazados por adularia y cuarzo secundario.)

2.3.4.2 Cráter de Aguas Hediondas..

Localizado en las proximidades de la fuente termal de Aguas Hediondas (Ver figura 3). Es un cráter pequeño de unos 12 metros de diámetro, y 5 de profundidad con restos de alteración hidrotermal de tipo ácida en sus paredes. Solo es claramente visible su flanco oriental, ya que el occidental ha sido destruido por la erosión.

Los clastos eyectados están claramente silicificados por actividad hidrotermal, pero no fueron identificados fragmentos hidrotermalizados con fracturas rellenas de silice,.



Instituto Colombiano de Energía Eléctrica -38-

Los fragmentos son de andesita con sus fenocristales de plagioclasa comunmente reemplzados por illita pero su grado de alteración no alcanza a los del depósito del cráter precedente.

2.3.4.3 Cráter de El Tambo.

Localizado a unos 400 metros al W de la terminación de la carretera que va a "La Puerta" en cercanías del sitio El Tambo, (ver figura 3), tiene unos 10 metros de diámetro y 12 de profundidad, sus paredes son verticales y su alteración hidrotermal se manifiesta por una intensa silicificación en los fragmentos de andesita y restos de una actividad fumarólica producto de una alteración hidrotermal ácida.

El fenómeno se encuentra localizado en un área con espesos depósitos glaciales y asociado a alineamientos tectónicos.

2.3.5 Estratigrafía y Cronología.

Todos los depósitos de explosión hidrotermal están dispuestos encima de depósitos glaciales lo que indica al menos, que estos depósitos han jugado un papel importante, en el sentido de contribuir al confinamiento de los acuíferos calientes someros que intervienen en el de



Instituto Colombiano de Energía Eléctrica -39-

sarrollo del fenómeno.

No se han observado niveles piroclásticos interestratificados con los depósitos de explosión hidrotermal lo cual también se dificulta por el estado de conservación de los mismos, por lo tanto una columna estratigrafica correspondería a una secuencia monótona de cantos y bloques hidrotermalizados dentro de una matriz areno-limo-arcillosa bastante compactada.

Aunque es necesario desarrollar una investigación de mas detalle para establecer la presencia de niveles apropiados que permitan la datación de los depósitos por métodos de C^{14} , a juzgar por su estado de conservación deben tener menos de una o dos decenas de miles de años.

2.3.6 Profundidad de la Explosión Hidrotermal.

Todos los cráteres observados están localizados en zonas de fallamiento y algunos asociados al cruce de fallas (cráter de Lagunas Verdes).

Teniendo en cuenta el diámetro de los diferentes cráteres de explosión hidrotermal, la explosión más profunda ocurrió en Lagunas Verdes a una profundidad que pudo alcanzar 250 metros y afecta tanto a rocas de Chile I como a rocas pliocenas, siendo difícil su diferenciación debido al



estado de alteración en que se encuentran los depósitos eyectados y por la similaridad tanto estructural como mineralógica de ambas unidades litológicas (ver figura 4.)

2.3.7 Episodio de Fracturamiento Previo.

Los bloques brechados, fuertemente silicificados y recementados tienen mucha similaridad con muestras de este tipo observados en campos geotérmicos de otras localidades (Waiotapu y Broadland en Nueva Zelanda)

Este fenómeno ha sido adscrito a fracturamiento hidráulico, sugiriendo que los fluidos hidrotermales se acumularon en los planos de fallas normales donde la diferencia entre los gradientes de las presiones hidrostática y litostática produce un empuje hacia arriba de los fluidos geotérmicos dentro de las fracturas asociadas con fallas.

El incremento gradual de la presión transmitida desde abajo superará la presión hidrostática local incrementándose a la vez la presión de poros adyacentes a las fisuras. Cuando los fluidos exceden tanto los esfuerzos comprensivos a través de las fracturas, como la resistencia tensional de la roca, entonces ocurre una rápida distensión en la falla sea por movimiento tectónico o inducido por fracturamiento hidráulico.



El incremento del volúmen disponible para los fluídos almacenados en el plano de falla causa un abrupto descenso de la presión en las fracturas y la sobrepresión inducida en la roca adyacente expande las fi-suras de las paredes produciendo brechamiento angular. Las altas veloci-dades de los fluídos del plano de falla procuran rellenar rápidamente el espacio que ha sido creado y a la vez transportar fragmentos tanto hacia arriba como alrededor de él y posteriormente redepositarlos como brechas de intrusión.

Tales brechas fracturadas hidráulicamente pueden ocurrir en los planos inclinados de fallas o extenderse verticalmente hacia arriba formando ramales.

2.3.8 Actividad Hidrotermal e Implicaciones Geotérmicas.

Los depósitos de brechas de explosión demuestran que la intensa actividad hidrotermal ocurrió a profundidades someras. La alteración hidro-termal superficial en los alrededores de los cráteres de explosión hi-drotermal es relativamente insignificante en el presente día.

Además la explosión hidrotermal al menos en Lagunas Verdes que es más significativa, sugiere que las fisuras de fallamiento que permiten la alimentación desde profundidad, han sido casi comp^letadas (cos.



El incremento del volumen disponible para los fluidos almacenados en el plano de falla causa un abrupto descenso de la presión en las fracturas y la sobrepresión inducida en la roca adyacente expande las fisuras de las paredes produciendo brechamiento angular. Las altas velocidades de los fluidos del plano de falla procuran rellenar rápidamente el espacio que ha sido creado y a la vez transportar fragmentos tanto hacia arriba como alrededor de él y posteriormente redepositarlos como brechas de intrusión.

Tales brechas fracturadas hidráulicamente pueden ocurrir en los planos inclinados de fallas o extenderse verticalmente hacia arriba formando ramales.

2.3.8 Actividad Hidrotermal e Implicaciones Geotérmicas.

Los depósitos de brechas de explosión demuestran que la intensa actividad hidrotermal ocurrió a profundidades someras. La alteración hidrotermal superficial en los alrededores de los cráteres de explosión hidrotermal es relativamente insignificante en el presente día.

Además la explosión hidrotermal al menos en Lagunas Verdes que es la más significativa, sugiere que las fisuras de fallamiento que permitían la alimentación desde profundidad, han sido casi completamente selladas



Instituto Colombiano de Energía Eléctrica -42-

al presente día, permitiendo solo el escape de una poca cantidad de H_2S de origen volcánico asociado a manifestaciones de tipo ácido.

Para el caso del cráter de explosión de Aguas Hediondas, el cual es mucho más pequeño que el de Lagunas Verdes, el sellamiento por deposición mineral afectó niveles más someros y la falla asociada a la explosión pudo haber sido reactivada, lo que se pone de manifiesto por las sustanciales emanaciones de fluídos en el manantial de Aguas Hediondas y Aguas Negras.

En definitiva, aunque se puede esperar una baja permeabilidad en los niveles someros de los sitios de las explosiones hidrotermales, es posible que en los niveles más profundos por donde haya el ascenso de los fluídos, correspondiendo a las partes más fracturadas de las lavas pliocenas, la situación de permeabilidad tienda a modificarse completamente.

2.4 ALTERACION HIDROTERMAL.

2.4.1 Generalidades.

La alteración hidrotermal resulta de la interacción de los minerales que forman las rocas con los iones presente en los fluídos geotérmicos.



Instituto Colombiano de Energía Eléctrica-43-

Debido a la diferencia entre las condiciones magmáticas y el nuevo ambiente creado por los fluidos geotérmicos, estos últimos inestabilizan a los minerales primarios de origen magmático, creando reacciones químicas que procuran un nuevo equilibrio. En este sentido la alteración de los minerales primarios da lugar a una nueva fase denominada "minerales hidrotermales".

Los cambios químicos y mineralógicos que ocurren en las rocas están íntimamente relacionados y se manifiestan por el reemplazamiento de los fenocristales primarios por varios minerales hidrotermales.

2.4.2 Zonas de Alteración Hidrotermal y su Significado Geotérmico

Los fenómenos de interacción entre las rocas y los fluidos hidrotermales circulantes tienen una gran importancia práctica. De hecho, se sabe desde hace tiempo que la cobertura impermeable de algunos de los más importantes campos geotérmicos del mundo (por ej.: The Geysers en California), ha sido producida por fenómenos de sellamiento y alteración de rocas primarias permeables por parte de soluciones hidrotermales (self sealing). Por el contrario, los mismos fenómenos hidrotermales, en condiciones físico-químicas diferentes, pueden actuar en sentido opuesto, transformando rocas originalmente impermeables en materiales duros, compactos, frágiles y por lo tanto susceptibles de ad-



Instituto Colombiano de Energía Eléctrica -44-

quirir permeabilidad por fracturación.

El estudio de la paragénesis de los minerales hidrotermales, las cuales reflejan las condiciones físico-químicas que las han generado, pueden permitir el conocimiento de estas condiciones y representan una clave importante para la comprensión de los mecanismos de formación de los campos geotérmicos naturales.

Un estudio de los pozos geotérmicos de varias localidades en el mundo ha puesto en evidencia que todos los campos de alta entalpía están caracterizados por una zonación vertical de los minerales hidrotermales, los cuales forman paragénesis "standar". De arriba a abajo se encuentran las siguientes zonas.:

1. Zona argilítica, superficial.
2. Zona filítica.
3. Zona filítico - propilítica.
4. Zona propilítica.

La paragénesis fundamental de la zona argilítica está constituida por minerales arcillosos tales como caolinita, illita, montmorillonita.

Existe una faja de transición a la sucesiva zona filítica con una característica y progresiva disminución, hasta la desaparición de



Instituto Colombiano de Energía Eléctrica -45-

caolinita y montmorillonita y aparición con progresivo desarrollo de la sericita-moscovita y de la clorita, fases que junto con la illita, constituyen la paragénesis fundamental de esta zona. Con toda probabilidad existe una barrera térmica entre las zonas argilítica y filítica. La transición de esta última parte tiene lugar generalmente a temperaturas de 120 - 150 °C.

En algunos pozos, en la zona filítica adquieren importancia relevante las zeolitas, que están presentes en cantidad suficiente como para constituir una zona que puede ser definida filíco-zeolítica.

En la zona filítico-propilítica (zona de transición, con todas las implicaciones que tal término comporta) se asiste a la aparición y desarrollo de epidota, albita, adularia y cuarzo que junto con la illita clorita y con la sericita, constituyen la paragénesis fundamental de esta zona.

La temperatura de la zona filítico-propilítica se sitúa entre 200 y 250°C

El cominzo de la zona propilítica se produce, en general a temperaturas de unos 250°C. y esto independientemente de los muchos factores (composición del fluido y de la roca encajante, ambiente físico-químico) específicos de cada sistema.



Instituto Colombiano de Energía Eléctrica -46-

A este propósito hay que hacer notar que la aparición de la epidota y su sucesivo desarrollo en la zona propilítica (junto con las otras fases características de esta zona) tiene un valor de indicador termométrico empírico (T.200-250⁰C.).

La transición a la zona propilítica puede ser considerada, siempre empíricamente, una isoterma (T.250⁰C). El desarrollo franco de la zona propilítica se alcanza a temperaturas mayores de 240⁰C. La paragénesis fundamental de ésta zona está formada por fases tales como epidota, albita, adularia, cuarzo, anfíbol, piroxeno monoclinico y granate.

En el interior del sistema geotérmico, la zona argilítica y la filítica caracterizadas por difusión de filosilicatos representan la cobertura impermeable; la zona propilítica, caracterizada por rocas endurecidas a causa de su interacción con los fluidos hidrotermales (y por lo tanto potencialmente permeables por fracturación.); corresponden de a los horizontes productivos (reservorio). La función de la zona filítico-propilítica, zona de transición como se ha dicho, deberá ser valorada en cada caso.



2.4.3 Alteración Hidrotermal en Superficie.

En las áreas con interés geotérmico es muy común encontrar sitios de descarga de los fluidos, rodeados por áreas alteradas hidrotermalmente. Esta alteración puede cubrir áreas que van desde casi cero hasta varios kilómetros (Parque Nacional de Yellowstone en EE.UU.)

La alteración hidrotermal en superficie es una gran guía para el estudio y mapeo ya que nos ayuda a entender la naturaleza de un sistema geotérmico.

2.4.3.1 Naturaleza de los Fluidos Alterantes.

La alteración superficial se puede usar para deducir la naturaleza y composición cualitativa de los fluidos descargados desde los manantiales calientes o fumarolas. Por ejemplo, áreas donde los fluidos son gases calientes, los centros de emisión se rodearán de azufre nativo, sales solubles de amonio y eventualmente boratos. Donde los fluidos son del tipo sulfato ácido, como los que producen los lodos hirvientes, se depositarán sulfatos minerales. Estos son particularmente, anhidrita, alunita, montmorillonita y minerales de arcilla del grupo caolín (principalmente caolinita o haloisita y ocasional -



Instituto Colombiano de Energía Eléctrica -48-

mente dickita), asociación incluida dentro de la zona argilítica. Muchos ejemplos de alteración de caolín son de color rosado debido a la presencia de hematita finamente diseminada.

Aguas cloruradas alcalinas si son suficientemente calientes permiten la precipitación de sílica amorfa.

Manantiales más fríos ricos en carbonatos comunmente pueden precipitar grandes cantidades de carbonato de calcio a medida que el gas carbónico escapa de los fluidos al alcanzar la superficie.

2.4.3.2 Estimación de la Duración y Edad de la Actividad Térmica.

Los sistemas geotérmicos no son estáticos y el reconocimiento de antiguas descargas puede ser importante para estudiar esos que están activos en el presente,. La alteración superficial nos puede proporcionar un registro en los cambios de la actividad superficial el cual puede llegar a muchos años atrás, como ocurre con el campo geotérmico de Ngawha en Nueva Zelandia. Un cambio brusco en la composición de los fluidos térmicos que llegan a la superficie se debe reflejar en la alteración hidrotermal quizás evidenciado por la zonación mineral o química. Para el caso de los depósitos de sílica amorfa, estos mues



Instituto Colombiano de Energía Eléctrica -49-

tran cambios en su estructura superficial o bandeamientos aunque esto último puede ser causado por fluctuaciones en la temperatura.

En lo que respecta a la edad de la alteración superficial, es algunas veces difícil de determinarla aunque existen algunos métodos que pueden ser aplicados si aparecen condiciones favorables para ello, como puede ser el C^{14} (si permanecen restos de plantas incorporados en la alteración), o también la tefracronología que puede utilizarse para las dataciones relativas de los eventos de alteración.

2.4.3.3 Alteración Hidrotermal Como Instrumento de Mapeo.

Usualmente el área alterada es mucho más grande que el tamaño de las manifestaciones termales descargadas, de esta manera el mapeo de las zonas alteradas nos ofrecen indicaciones del tamaño de un campo geotérmico y la posición de muchos rasgos geológicos y estructurales muy importantes.

2.4.4 Resistencia a la Meteorización de las Rocas Alteradas Hidrotermalmente

Los minerales hidrotermales se meteorizan, química y físicamente a intensidades variables aunque esto es difícil de establecer en antiguas zonas de descarga. Muchos depósitos fumarólicos son altamente



Instituto Colombiano de Energía Eléctrica -50-

solubles y pueden desaparecer durante las primeras lluvias, mientras los depósitos de sílice son muy resistentes a la erosión. Estos a la vez pueden desarrollar una baja cristalización.

Una secuencia aproximada de resistencia a la meteorización, en orden creciente sería :

Sales solubles.

Arcillas de caolín

Anhidrita, pirita.

Calcita, aragonito

Depósitos de sílica

De tal manera la alteración asociada con fumarolas o manantiales ácidos sulfatados es preservada por períodos mas cortos que esa formada de las aguas alcalinas cloruradas.

Por otra parte los depósitos de sílica se forman solo en superficie mientras que los productos de la alteración ácida penetran mucho dentro de la roca, debajo de la superficie del terreno.

2.4.5 Alteración Hidrotermal en el Area del Proyecto.

En el área del proyecto la alteración hidrotermal se manifiesta en superficie con mucha intensidad en los alrededores de los volcanes Chiles y Cerro Negro; en el interior de los cráteres de ambos volcanes y define



la forma estructural casi destruída por la actividad glacial del cráter del volcán Nasate. Se destaca así mismo en el dominio del volcán Cumbal hacia el límite noroccidental del área de estudio.

Adicionalmente aparece en los sitios del cruce de fallas hacia los alrededores de los edificios volcánicos de Chiles y Cerro Negro contribuyendo a definir los límites en superficie, del campo geotérmico. (Ver figura 5.)

La alteración en superficie en el área del proyecto es prácticamente el resultado de la actividad fumarólica y de la deposición de sílica amorfa en zonas de debilidad estructural.

2.4.6 Naturaleza de la Alteración Hidrotérmal.

La identificación de los minerales producto de la alteración hidrotérmal en superficie, se ha efectuado mediante el difractor de rayos X

La alteración hidrotérmal más común se asocia a la actividad fumarólica y de aguas ácidas sulfatadas, las cuales se forman a partir de los vapores que se desprenden en profundidad desde aguas cloruradas del reservorio y se condensan posteriormente cerca de la superficie.



Instituto Colombiano de Energía Eléctrica -52-

Alteración asociada con actividad fumarólica es común en los bordes de los cráteres de los volcanes Chiles y Cerro Negro, donde los gases de azufre y otros gases volcánicos han alterado completamente los minerales primarios de la roca a minerales de arcilla con posible deposición de azufre nativo y otros minerales secundarios que pudieron eventualmente ser evacuados por disolución.

La alteración ácida sulfatada es muy común hacia las partes altas de la cordillera tanto en territorio Colombiano como Ecuatoriano que es particularmente destacada en los sitios de corte de las carreteras, tanto en la Ecuatoriana que va a Maldonado como en la Colombiana que pasa por el flanco norte del volcán Chiles.

En los sitios donde hay emanaciones de aguas cloruradas es muy común la deposición de sílica amorfa como ocurre en los manantiales termales de Aguas Hediondas y Aguas Negras en territorio Ecuatoriano.

Estos manantiales han depositado " sílice amorfa " particularmente el de Aguas Negras, donde son observables diferentes niveles de "silica sinter ", algunos de los más jóvenes incluyen restos de vegetación de tipo pasto de páramo y los depósitos más antiguos muestran indicios de baja cristalización. Métodos de C^{14} pueden esclarecer la edad de estos depósitos de " silica sinter " y así definir la actividad en el



Instituto Colombiano de Energía Eléctrica -53-

tiempo de estos manantiales termales, unos de los mas representativos en el área del proyecto.

La alteración fumarólica y la asociada con los vapores ácidos sulfatados han dado lugar a la formación de minerales arcillosos como la motmorillonita y a los del grupo del caolín, deposición de ópalo y eventualmente alunita.

Todos estos minerales han contribuido a taponar los conductos preexistentes que permitieron la circulación de los fluidos, de tal manera que en los sitios donde era evidente una clara permeabilidad de la roca, ésta ha sido reemplazada por el fenómeno precisamente contrario, dando lugar con su impermeabilidad al fenómeno de "sealf sealing". Los minerales asociados como su significado dentro del ámbito geotérmico, hacen incluir esta clase de alteración dentro de una zona argilítica.

2.4.7 Alteración Hidrotermal y Estructuras

Las zonas de alteración hidrotermal se manifiestan principalmente en el cruce de fallas en cercanías de los edificios volcánicos del Chiles y Cerro Negro, hacia la parte somital de los mismos y delimitando el -



Instituto Colombiano de Energía Eléctrica -54-

contorno estructural de antiguos cráteres y formas de colapso de antiguos volcánes (Ver figura 5.). El seguimiento de las zonas de alteración ha sido de particular importancia en la definición de fallas y estructuras asociadas con la actividad volcánica en diferentes épocas geológicas, así, muchas manifestaciones estructurales que pueden ser medianamente identificables usando fotografías aéreas, se muestran muchas veces destacados en el campo por la presencia de los diferentes fenómenos de alteración. Esto ha sido de gran utilidad para distinguir alineamientos relacionados con fallamientos y formas circulares asociadas tanto a antiguos colapsos caldéricos, como a antiguos cráteres de erupción.

De hecho, la presencia o ausencia de manifestaciones termales recientes, sus productos de alteración y la activación de fenómenos estructurales está estrechamente relacionada.

Fallamientos activos nos proporcionan una situación favorable para el ascenso de fluidos y sus manifestaciones en superficie, tanto en manantiales termales como en forma de depósitos relacionados con esos manantiales.

Un claro ejemplo son los manantiales de Aguas Hediondas y Aguas Negras



Instituto Colombiano de Energía Eléctrica 55-

donde los depósitos de "silica sinter" nos sugieren una gran actividad en el tiempo al menos para la falla transversal Chiles- Cerro Negro que pasa por Aguas Hediondas y atraviesa la parte somital de los volcanes Chiles y Cerro Negro.

Situaciones más claras se presentan para los alineamientos estructurales con orientación aproximada NNE-SSW, donde la alteración asociada a aguas ácidas sulfatadas taponan las fracturas y enmascara su actividad en épocas recientes.

2.4.8 Alteración Hidrotermal Superficial como Guía Geotérmica.

La presencia de alteración hidrotermal superficial asociada con el grupo de fallas es una guía apreciable en la consecución de fluidos a profundidad.

Esto ha sido de mucha utilidad en campos geotérmicos en varias partes del mundo (campo geotérmico de Wairakei en Nueva Zelanda) donde éste fenómeno produce fragilidad en la roca propiciando su fracturamiento secundario, lo cual contribuye a la acumulación de grandes cantidades de fluidos geotérmicos. Lógicamente se necesita definir si ha habido reactivaciones o actividad reciente en las fallas involucradas.



Instituto Colombiano de Energía Eléctrica 56-

2.5 TECTÓNICA.

La zona de estudio se localiza dentro del dominio Andino donde las tres cordilleras colombianas no aparecen todavía bien definidas.

La característica tectónica más destacada es la presencia de la Depresión Interandina que la constituye un graben relativamente estrecho con una orientación aproximada NNE, y que es la prolongación hacia el sur de la Depresión Cauca - Patía.

La Depresión Interandina separa las cordilleras Occidental y Central las cuales empiezan claramente a definirse al norte a partir de la denominada " Transcurrente Patía - Putumayo " que es una gran zona de fractura de orientación NW-SE. El fallamiento es uno de los aspectos tectónicos más importantes en el área, aunque también aparecen fenómenos de colapso caldérico, los cuales inciden positivamente en el estudio geotérmico.

2.5.1 Identificación de las estructuras.

Para la identificación de las estructuras se han utilizado fotografías aéreas a escala 1: 62.500, las cuales han servido de base para el trabajo de gabinete y su posterior identificación en el campo.



Instituto Colombiano de Energía Eléctrica -57-

Se han tenido en cuenta los siguientes detalles :

- Lineamientos topográficos.
- Cambios bruscos en la actitud de las rocas presentes, particularmente volcánicas.
- Presencia de bloques erráticos dentro de una unidad de roca.
- Efectos de metamorfismo dinámico, localmente con formación de nuevos minerales.
- Alineamiento en las zonas de alteración hidrotermal y de manifestaciones termales.
- Presencia de formas circulares, especialmente las relacionadas con los eventos volcánicos mas recientes y con las explosiones hidrotermales.

El área de estudio puede considerarse que está enmarcada dentro de dos sistemas de fallas importantes y casi perpendiculares entre sí.

El primer sistema tiene una orientación NNE-SSW y lo constituye entre otras la falla Chiles - Cumbal que une ambos volcanes, la falla de Tufiño que delimita el borde occidental del graben y cuyo seguimiento tanto en el campo como en las fotografías aéreas a veces resulta difícil por la espesa cubierta de depósitos glaciales y fluvio-glaciales y la falla o sistema de fallas de Mayasquer que se hace presente hacia la parte occidental del área de estudio.



Instituto Colombiano de Energía Eléctrica-58-

El segundo sistema de orientación NWW-ESE ó NW- SE está identificado por las fallas de Chiles Sur, Chiles Norte , Nasate y Río Blanco.

Existen además sistemas menores de fallamiento o satélites de los anteriores.

En adelante solo se describirán las fallas que tengan particular incidencia dentro del sistema geotérmico y especialmente las relacionadas con la presencia de focos emisivos.

En este estudio es importante destacar que la mayor parte de ellos están asociados con fallas longitudinales que son cortadas por fallas - transversales.

No sobra recalcar que la gran mayoría de las fracturas no permiten medir sus desplazamientos relativos y frecuentemente resulta aún complicado determinar el sentido mismo del desplazamiento por la extensa cobertura volcánica reciente, por los productos de glaciación y porque los grupos estratigráficos afectados no están perfectamente determinados en cuanto a espesor, posición de las diferentes unidades, etc.

Las grandes fracturas en general dejan clara expresión morfológica (Chiles - Cumbal, Chiles - Cerro Negro, Chiles- Sur, Chiles- Norte)

LEYENDA

-  Cráter
-  Caldera
-  Falla

ESCALA GRAFICA

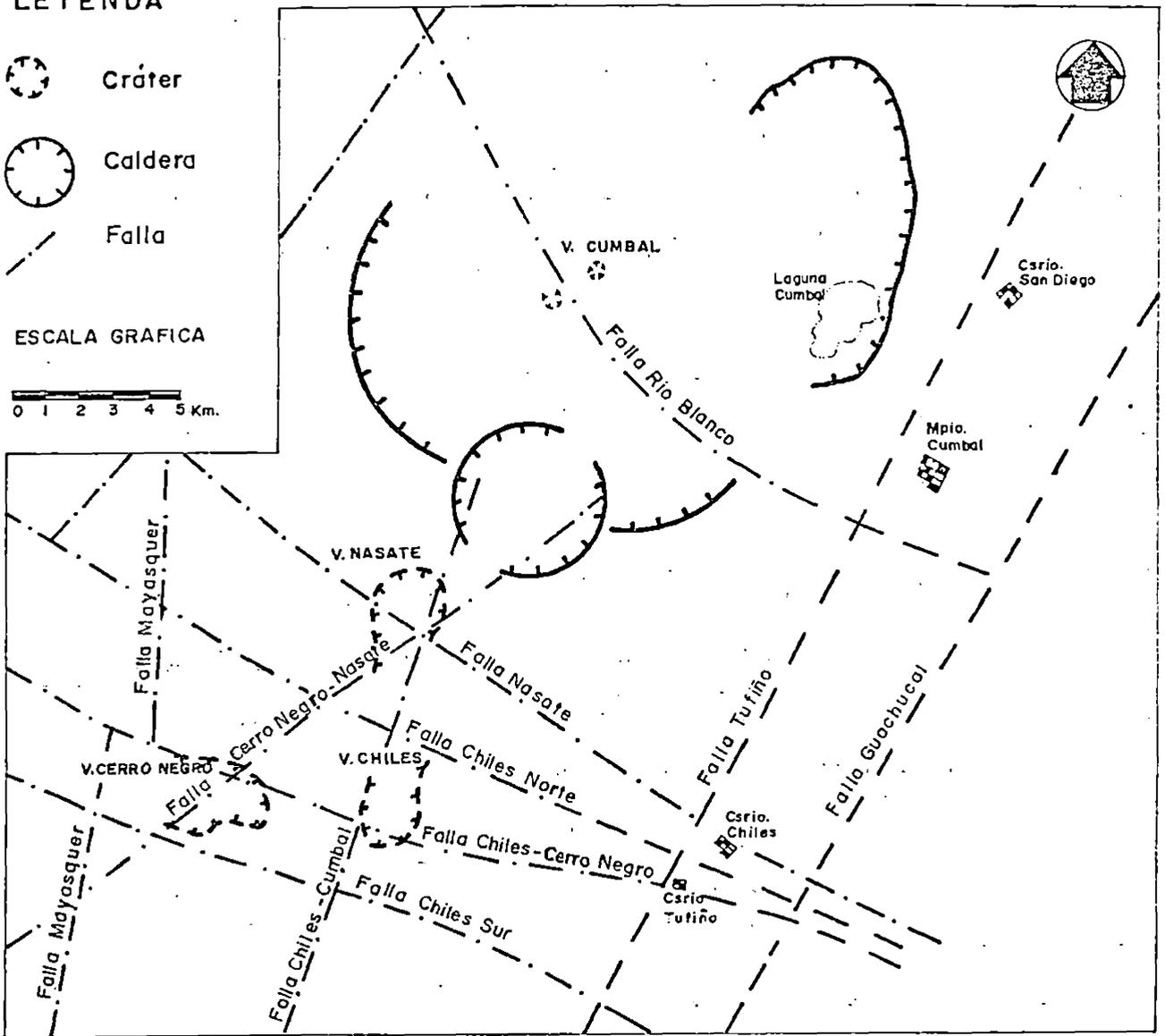
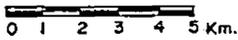


FIGURA No. 6

ESQUEMA TECTONICO DEL AREA DE LOS VOLCANES
CHILES - CERRO NEGRO - CUMBAL



presentan rocas fracturadas y cizalladas, alteración hidrotermal y fenómenos de brechamiento, mientras que las menores solo presentan algunas de estas características., estando marcadas principalmente por claros alineamientos fotogeológicos.

2.5.2 Fallamiento de Rumbo NNE-SSW y NE - SW.

2.5.2.1 Falla Chiles - Cumbal.

Esta falla une el cráter de depresión del volcán Chiles con el borde del colapso caldérico perteneciente al Cumbal I. Tiene una orientación NNE-SSW y atraviesa además un antiguo cráter perteneciente a un edificio volcánico antiguo erodado por la alteración glacial y perteneciente al volcán Nasate. La falla corta longitudinalmente las aberturas de ambos edificios volcánicos, notándose que mientras la actual abertura del Chiles está orientada hacia el norte, la del Nasate lo está hacia el sur. Esta falla se prolonga hacia el sur del volcán Chiles en territorio de la República del Ecuador. Su seguimiento ha sido efectuado especialmente mediante fotografías aéreas y en el terreno puede ser identificada por ser la responsable de una intensa alteración hidrotermal de carácter ácido en la carretera ecuatoriana que va a Maldonado y posiblemente relacionada con una extinta actividad fumarólica. En el flanco



Instituto Colombiano de Energía Eléctrica -61-

norte del volcán Chiles puede ser detectada tanto por la intensa alteración hidrotermal como por el alineamiento de manantiales termales. En el dominio del área del volcán Nasate su trazado se establece por la presencia de una intensa zona de alteración hidrotermal antigua.

El cambio de una actividad termal activa a extinta a lo largo de la falla nos establece un límite (aunque puntual) en la parte norte del campo geotérmico Chiles - Cerro Negro, lo cual se pone de manifiesto al pasar del dominio del edificio volcánico reciente del Chiles II al relativamente antiguo de Nasate.

Ya en cercanías del volcán Cumbal su trazado queda truncado por la presencia de varias formas circulares relacionadas con fenómenos de colapso caldérico.

Esta falla afecta particularmente la secuencia lávica pliocena y aparentemente no produce ningún efecto en los eventos efusivos del Chiles II.

En este sentido, aparece como una falla relativamente antigua pero que indudablemente ha jugado un gran papel en el desarrollo de los edificios volcánicos del Chiles, Nasate y Cumbal cuando ha sido cruzada por las fallas transversales más jóvenes.



Su orientación NNE sigue el alineamiento de las fallas regionales identificadas mas al norte como la de Romeral y Palestina las cuales se les ha asignado un movimiento dextralateral.

2.5.2.2 Falla de Tufiño.

Localizada al oriente de la falla precedente, tiene una orientación NNE-SSW, y su trazado al norte de la población delChiles resulta muy difícil debido a la espesa cubierta de material de depósito glacial.

En el campo se identifica porque afecta el domo de Tufiño en cercanías de la población del mismo nombre. Un buen afloramiento de este domo se ha puesto de manifiesto en la carretera que va de Tufiño a Maldonado, donde la roca aparece intensamente fracturada, en una cantera que actualmente está en explotación.

Al norte del Cumbal su presencia se sugiere por la disposición morfológica de la secuencia lávica al oriente de la Laguna Cumbal cuyo borde NNE aparentemente coincide con su trazado. Probablemente corresponde a un sistema de fallas en escalón inclinadas hacia el este, en vez de una simple fractura, constituyendo el actual límite occidental de la Depresión Interandina.



Instituto Colombiano de Energía Eléctrica -63-

2.5.2.3 Falla de Mayasquer.

Similar a la situación que plantea la falla precedente, ésta puede interpretarse como un sistema de fallas en escalón con su plano inclinado hacia el oeste y constituyendo aparentemente el límite occidental del horst donde se disponen los aparatos volcánicos de Chiles, Cerro Negro y Cumbal.

Este sistema de fallas tiene una orientación NNE-SSW, aunque eventualmente cambia a NE-SW. Su identificación se ha hecho mediante alineamiento fotogeológico principalmente, aunque también se ha detectado en la carretera que conduce a Maldonado, afectando unidades lávicas pliocenas donde es común observar depósitos aglomeráticos y brechoides en la zona de dominio de las fallas, con deposición de calcita secundaria. En esta zona es común además encontrar derrumbes alineados.

La falla afecta particularmente las lavas pliocenas sin afectar la secuencia eruptiva reciente de Cerro Negro II.

Esta falla ha sufrido desplazamientos laterales por efecto de la falla transversal de Chiles - Cerro Negro, por lo tanto, es más antigua que ésta última.



2.5.2.4 Falla Cerro Negro - Nasate.

Identificada mediante estudio fotogeológico por alineamiento topográfico y de quebradas. Tiene una orientación NE-SW y une los volcanes Cerro Negro y Nasate, alcanzando el área del colapso caldérico que afectó el Cumbal II.

2.5.2.5 Falla Guachuca1.

Tiene una orientación NNE-SSW, y su trazado ha sido definido solo mediante alineamiento fotogeológico.

Al sur del área de estudio sigue un alineamiento paralelo con el río Carchi y algunas quebradas menores, pero de los alrededores del municipio de Cumbal hacia el norte su trazado es completamente inferido.

Más que a una sola falla, corresponde a un sistema de fallamiento en escalón, con sus bloques inclinados hacia el oeste...

2.5.3 Fallamiento de Rumbo WNW-ESE y NW-SE

2.5.3.1 Falla Chiles Sur.



Instituto Colombiano de Energía Eléctrica -65-

Tiene una orientación aproximada WNW-ESE, su trazado es algo curvo, y es una de las fallas que más claramente se manifiesta sobre el terreno.

Corta el flanco sur del edificio volcánico del Chiles y sigue paralela al río Chilma hacia el W, donde se manifiesta tanto por el alineamiento del mismo río como por zonas de derrumbes donde las unidades de roca se muestran muy fracturadas y con algunos niveles comunmente mi-tonitizados.

Entre los edificios volcánicos del Chiles y Cerro Negro corta algunas fallas longitudinales y sistemas menores de fracturas cuya intersección ha creado el ambiente propicio para el ascenso de fluidos hidrotermales que han alterado y taponado la roca huesped y a la vez delimitando lateralmente el campo geotérmico.

La falla afecta hasta las rocas más jóvenes del edificio volcánico del Chiles, dando lugar a zonas de inestabilidad, particularmente en el sitio de Lagunas Verdes, donde esta fractura creó ambiente favorable para el desarrollo del fenómeno de explosión hidrotermal, como ocurre en el depósito de brecha hidrotermal alrededor de las lagunas. Adicionalmente la falla permite el ascenso de fluidos termales que actualmente se manifiestan en forma de manantiales calientes.



Instituto Colombiano de Energía Eléctrica -66-

2.5.3.2 Falla Chiles - Cerro Negro.

Tiene un trazado WNW-ESE, el cual es subparalelo al de la falla anterior y une la parte somital de los volcanes Chiles y Cerro Negro.

Ha sido identificada por alineamiento fotogeológico y en el terreno es la responsable de las manifestaciones termales de Aguas Hediondas, Aguas Negras y otras aledañas a los termales de El Indio. Afecta también el domo de Tufiño en cercanías de la población del mismo nombre y también a rocas pliocenas y cuaternarias. Su trazado al occidente del volcán Cerro Negro sigue la trayectoria del Río Caimacan y en esta zona desplaza la falla de Mayasquer hacia el Este confirmando su movimiento con desplazamiento lateral.

2.5.3.3 Falla Chiles Norte.

Pasa por el flanco norte del edificio volcánico del Chiles y como la mayoría de las fallas transversales, afecta hasta las lavas más recientes presentes en el área de estudio.

Su orientación se acerca al NW-SE, pero sigue siendo subparalela a las descritas con anterioridad. Su intersección con la falla longitudinal Chiles - Cumbal da lugar a la aparición de una intensa zona de altera-



ción hidrotermal y de manifestaciones termales en superficie.

Hacia el norte del volcán Cerro Negro su seguimiento en el terreno se hace relativamente fácil por abundantes deslizamientos a lo largo del río Mayasqueñ y por la presencia de un pequeño cráter de explosión hidrotermal asociado a la falla en cercanías del sitio El Tambo.

Al oriente del volcán Chiles es difícil su seguimiento por la cubierta de depósito glacial, aunque puede manifestarse por el alineamiento de algunas manifestaciones termales en superficie.

2.5.3.4 Falla Nasate.

Su identificación se ha hecho mediante alineamiento fotogeológico de ríos y quebradas.

Tiene una orientación aproximada NW-SE y corta el cráter del volcán Nasate. Sigue una orientación subparalela a las fallas transversales que están presentes en el área.

2.5.3.5 Falla Río Blanco.

Atraviesa el cono volcánico del Cumbal con una orientación NW-SE.



Su trazado es arqueado y particularmente hacia el SE se manifiesta por el alineamiento del río Blanco y de algunas manifestaciones termales.

Al cruzar por la parte somital del volcán, separa dos de sus pequeños cráteres actuales, creando a la vez una gran acumulación de material de derrubio, particularmente en su flanco SE por encima de los 3500m.s.n.m.

Su presencia al menos a partir del pleistoceno inferior debió crear una depresión topográfica de orientación NW-SE, la cual fué aprovechada como conducto para la evacuación del material glacial y su posterior deposición en la Depresión Interandina y áreas aledañas a la estructura caldérica.

3. ASPECTOS HIDROGEOLOGICOS.

En el área de estudio la información hidrogeológica existente es bastante escasa, de tal manera que los datos pluviométricos están recogidos en puntos muy distantes entre sí y normalmente abarcando períodos cortos.

Sin embargo, de acuerdo con lo observado en el campo, se intentará la elaboración de un esquema hidrogeológico cualitativo, útil para la interpretación de la circulación tanto del agua meteórica como de los flujos geotérmicos. En este sentido se ha tenido en cuenta la naturaleza li



Instituto Colombiano de Energía Eléctrica -69-

tológica de las diferentes unidades estratigráficas relacionándolas con la morfología y tectónica existente en el área.

3.1 COMPORTAMIENTO DE LAS UNIDADES LITOLÓGICAS.

El basamento preterciario (esquistos, neises, sedimentos plegados de tipo flysch) constituye prácticamente el substrato impermeable de la cadena Andina, incluyendo también en este horizonte impermeable los sedimentos continentales de la Formación Nariño. Estas unidades litológicas definen el límite inferior de la prospección geotérmica.

Suprayaciendo el substrato impermeable se encuentra la secuencia pliocena constituida por lavas con disposición tabular y localmente aglomerados (particularmente en zonas de fallamiento) que en algunos sitios supera los 1000 metros de espesor.

Las lavas conservan su carácter frágil y por fracturación distensiva pueden alcanzar una permeabilidad secundaria bastante elevada.

La secuencia pliocena está parcialmente cubierta por el volcánico cuaternario con sus productos lávicos dispuestos en estratovolcánes más o menos desmantelados por la erosión glacial en donde la permeabilidad sigue pautas similares a la de la secuencia lávica pliocena.



Instituto Colombiano de Energía Eléctrica -70-

Las morrenas glaciales dispuestas en la zona de cumbres, normalmente tienen una matriz de granulometría fina que impide la circulación rápida del agua comportándose como un acuitardo y favoreciendo la recarga lenta pero constante del sistema.

3.2 ESQUEMA HIDROGEOLOGICO GLOBAL

Las partes más elevadas de la cordillera corresponden a las cumbres de los aparatos volcánicos.

La fracturación de estos sitios es bastante acentuada la cual va acompañada de la presencia de cráteres y conductos volcánicos y por las precipitaciones de agua meteórica, contribuyen a crear un ambiente propicio para la infiltración del agua en el subsuelo. Se forman así dos direcciones de flujo dirigidas hacia los flancos de la cordillera (hacia el este y hacia el oeste). La mayor parte de las aguas de este esquema tendría que circular por el interior de la serie lávica que forma el substrato inmediato de los volcanes. Se formarían de esta manera, acuíferos tanto en el interior de la secuencia lávica más antigua (pliocena) como con el contacto entre las lavas y las rocas del basamento metamórfico donde es máximo el contraste de permeabilidad.

Los circuitos principales corresponderán a las zonas interesadas por una tectónica transversal a la cadena andina.



Instituto Colombiano de Energía Eléctrica -71-

4. G E O Q U I M I C A . -

En desarrollo de esta fase I de prefactibilidad, se ubicaron y recolectaron 28 muestras termales y frías en un área de 900 Km², se efectuaron análisis de campo para cada una de las muestras termales y posteriormente análisis de laboratorio en la Universidad Nacional de Colombia - (Bogotá) para lo cual se siguió la metodología sobre análisis químicos para fluidos geotérmicos que aplica el laboratorio " Servicios Geológicos " (S.G.) de San Salvador (El Salvador.)

4.1. DESCRIPCION DEL PRESENTE TRABAJO

4.1.1 Análisis de Campo y Laboratorio.

Dentro de la fase de prefactibilidad se recolectaron 28 muestras de agua, pertenecientes a aguas termales en su mayoría y aguas frías.

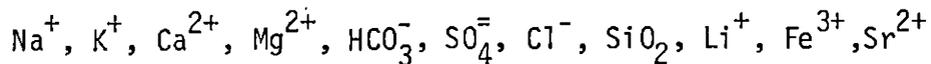
Las aguas frías constituyen seis (6) muestras de la Laguna Cumbal y una (1) obtenida en la región de "La Ceja ", extremo NW del volcán Cerro Negro.

Paralelamente al muestreo se ejecutaron en el campo (in situ) las siguientes medidas: temperatura ambiente, temperatura del agua, caudal, conductividad eléctrica específica y PH (utilizando PH-Metro y papel universal.)



Además de estas determinaciones se elaboró un historial de las fuentes muestreadas haciendo énfasis en un esbozo planimétrico, descripción de acceso, utilización actual de la fuente y otras informaciones (Ver Anexo 2).

Las 28 muestras recolectadas fueron llevadas al laboratorio de química analítica de la Universidad Nacional y durante los meses de Agosto, Septiembre y Octubre/83 se determinaron en ppm las siguientes especies químicas :



Los resultados analíticos están contenidos en la tabla 4.1.

Quedaron pendientes las determinaciones en ppm de B, NH₄, H₂S, Rb, Cs, CO₂, etc.

4.1.2 Fase de Interpretación.

Los diagramas de Langelier-Ludwig, que incluyen sus secciones transversales y los diagramas binarios de correlación son de gran utilidad para clasificar las aguas del área de estudio, la utilización de los cuales corresponde a la primera etapa de interpretación.

TABLA 4.1

RESULTADOS CUANTITATIVOS DE LOS ANALISIS QUIMICOS DE LAS AGUAS.
Concentraciones de los Constituyentes principales en p. p. m.

| No. Muestra | Na | K | Ca | Mg | HCO ₃ ⁻ | Cl ⁻ | SO ₄ ⁼ | SiO ₂ |
|-------------|-------|-----|-------|-------|-------------------------------|-----------------|------------------------------|------------------|
| 1 | 102,2 | 39 | 86,3 | 47,5 | 34 | 138 | 661 | 50 |
| 2 | 112,3 | 33 | 91,0 | 71,8 | 341 | 111 | 504 | 76 |
| 3 | 127,0 | 33 | 119,5 | 108,3 | 611 | 124 | 482 | 34 |
| 4 | 80,0 | 29 | 61,0 | 45,5 | 613 | 70 | 304 | 62 |
| 5 | 87,00 | 30 | 95,0 | 66,3 | 680 | 67 | 180 | 34 |
| 6 | 102,4 | 32 | 132,0 | 67,0 | 694 | 75 | 192 | 74 |
| 7 | 28,30 | 6,0 | 369,0 | 43,96 | 107 | 6 | 1.085 | 32 |
| 8 | 31,40 | 7,0 | 389,0 | 42,0 | 172 | 9 | 1.194 | 18 |
| 9 | 24,08 | 5,0 | 311,0 | 33,0 | 79 | 5 | 882 | 30 |
| 10 | 24,04 | 6,0 | 327,0 | 37,0 | 97 | 6 | 912 | 38 |
| 11 | 51,40 | 7,0 | 202,0 | 82,0 | 696 | 4 | 354 | 42 |
| 12 | 29,30 | 6,0 | 77,5 | 34,8 | 332 | 4 | 138 | 40 |

| No. Muestra | Na | K | Ca | Mg | HCO ₃ ⁻ | Cl ⁻ | SO ₄ ⁼ | SiO ₂ |
|-------------|-------|------|-------|-------|-------------------------------|-----------------|------------------------------|------------------|
| 13 | 24,71 | 8,0 | 81,0 | 43,0 | 524 | 8 | 62 | 48 |
| 14 | 237,0 | 17,0 | 187,0 | 114,0 | 745 | 355 | 728 | 56 |
| 15 | 216,0 | 19,0 | 252,0 | 157,0 | 1.015 | 241 | 470 | 32 |
| 16 | 95,70 | 9,0 | 139,0 | 72,5 | 455 | 118 | 292 | 48 |
| 17 | 223,0 | 17,0 | 150,0 | 71,0 | 871 | 212 | 356 | 58 |
| 18 | 4,93 | 1,50 | 6,70 | 2,95 | 53 | 2 | 1 | 12 |
| 19 | 4,76 | 1,40 | 6,29 | 2,90 | 51 | 3 | 2 | 12 |
| 20 | 4,66 | 1,40 | 6,16 | 2,88 | 51 | 2 | 4 | 12 |
| 21 | 55,70 | 7,0 | 129,0 | 44,0 | 698 | 15 | 48 | 22 |
| 22 | 12,75 | 2,00 | 43,7 | 13,0 | 178 | 5 | 46 | 18 |
| 23 | 45,40 | 12,0 | 523,8 | 85,0 | - | 21 | 1.536 | 30 |
| 24 | 70,50 | 19,0 | 332,0 | 68,0 | - | 298 | 1.362 | 110 |
| 25 | 5,23 | 1,50 | 5,54 | 3,16 | 52 | 6 | 4 | 14 |

| No. Muestra | Na | K | Ca | Mg | HCO ₃ ⁻ | Cl ⁻ | SO ₄ ⁼ | SiO ₂ |
|-------------|-------|------|-------|-------|-------------------------------|-----------------|------------------------------|------------------|
| 26 | 5,06 | 1,40 | 5,26 | 3,08 | 53 | 6 | 5 | 14 |
| 27 | 5,16 | 1,40 | 6,06 | 2,90 | 53 | - | 3 | 12 |
| 28 | 648,0 | 44,0 | 602,5 | 239,0 | 2.142 | 1.154 | 1.500 | 46 |



Instituto Colombiano de Energía Eléctrica -76-

Las aguas se reagrupan en distintos tipos químicos relacionándolas con los procesos geoquímicos que las originan en profundidad.

Como segunda etapa de interpretación se tienen las consideraciones geotermométricas, con los cuales se puede hacer una estimación de la temperatura a profundidad teniendo en cuenta los diferentes tipos químicos de aguas, los cuales pueden relacionarse con fenómenos de mezcla, precipitaciones, etc.

Una tercera etapa de interpretación es el estudio de la distribución espacial de la temperatura y de las sustancias de mayor interés geotérmico como los indicadores de fuga de vapor (NH_4^+ , B, CO_2) e indicadores de líquidos geotérmicos (B, Li^+).

4.2 CALIDAD DE LOS DATOS.

4.2.1 Balance Iónico.

Una evaluación de la calidad de los datos obtenidos en los análisis químicos es el cálculo de la suma de los cationes SUM CAT y de la suma de aniones SUM AN, considerando los equivalentes / Litro como unidad de medida de concentración; los cationes y aniones tenidos en



Instituto Colombiano de Energía Eléctrica-77-

cuenta para este balance iónico son : $\text{Na}^+, \text{K}^+, \text{Ca}^{2+}, \text{Mg}^{2+}, \text{HCO}_3^-, \text{SO}_4^{2-}, \text{Cl}^-$.
La tabla 4.2 (a,b) registra las concentraciones de los 7 constituyentes fundamentales en equivalentes / Litro.

La Desviación Porcentual indica cuanto se aleja cada análisis químico (por muestra) de la condición del balance iónico, suma AN = Sum CAT, y está representada así :

$$\% \text{ DEV} = \frac{\text{SUM AN} - \text{SUM CAT}}{(\text{SUM AN} + \text{SUM CAT}) / 2} \times 100$$

El Balance Iónico es una forma muy amplia de evaluación sobre la calidad de los datos analíticos, puesto que puede resultar que en una muestra de agua exista un anión y un catión en exceso comparativamente con los otros; Es este el caso en que el método retoma únicamente la calidad de las determinaciones de estas especies químicas ó de otra forma de las especies químicas en consideración.

El Balance Iónico solo se aplica sobre los elementos ó constituyentes mayores pero no proporciona ninguna información sobre la calidad de los análisis de los constituyentes menores.

En relación a la Desviación Porcentual ya sea significativa o no sig-

TABLA 4.2 (a)

CONCENTRACIONES DE LOS CONSTITUYENTES FUNDAMENTALES EN EQUIV/LITRO

| | CATIONES | | | | ANIONES | | |
|----|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|-------------------------------|------------------------|------------------------------|
| | Na | K | Ca | Mg | HCO ₃ ⁻ | Cl ⁻ | SO ₄ ⁼ |
| 1 | 4.4 x 10 ⁻³ | 10 x 10 ⁻⁴ | 2.1 x 10 ⁻³ | 1.9 x 10 ⁻³ | 5.6 x 10 ⁻⁴ | 3.9 x 10 ⁻³ | 6.9 x 10 ⁻³ |
| 2 | 4.9 x 10 ⁻³ | 8.4 x 10 ⁻⁴ | 2.3 x 10 ⁻³ | 2.9 x 10 ⁻³ | 5.6 x 10 ⁻³ | 3.1 x 10 ⁻³ | 5.2 x 10 ⁻³ |
| 3 | 5.5 x 10 ⁻³ | 8.4 x 10 ⁻⁴ | 3.0 x 10 ⁻³ | 4.4 x 10 ⁻³ | 1.0 x 10 ⁻² | 3.5 x 10 ⁻³ | 5.0 x 10 ⁻³ |
| 4 | 3.5 x 10 ⁻³ | 7.4 x 10 ⁻⁴ | 1.5 x 10 ⁻³ | 1.9 x 10 ⁻³ | 1.0 x 10 ⁻² | 2.0 x 10 ⁻³ | 3.2 x 10 ⁻³ |
| 5 | 3.8 x 10 ⁻³ | 7.7 x 10 ⁻⁴ | 2.4 x 10 ⁻³ | 2.7 x 10 ⁻³ | 1.1 x 10 ⁻² | 1.9 x 10 ⁻³ | 1.9 x 10 ⁻³ |
| 6 | 4.4 x 10 ⁻³ | 8.2 x 10 ⁻⁴ | 3.3 x 10 ⁻³ | 2.7 x 10 ⁻³ | 1.1 x 10 ⁻² | 2.1 x 10 ⁻³ | 2.0 x 10 ⁻³ |
| 7 | 1.2 x 10 ⁻³ | 1.5 x 10 ⁻⁴ | 9.2 x 10 ⁻³ | 1.8 x 10 ⁻³ | 1.7 x 10 ⁻³ | 1.7 x 10 ⁻⁴ | 1.1 x 10 ⁻² |
| 8 | 1.4 x 10 ⁻³ | 1.8 x 10 ⁻⁴ | 9.7 x 10 ⁻³ | 1.7 x 10 ⁻³ | 2.8 x 10 ⁻³ | 2.5 x 10 ⁻⁴ | 1.2 x 10 ⁻² |
| 9 | 1.0 x 10 ⁻³ | 1.3 x 10 ⁻⁴ | 7.7 x 10 ⁻³ | 1.3 x 10 ⁻³ | 1.3 x 10 ⁻³ | 1.4 x 10 ⁻⁴ | 9.2 x 10 ⁻³ |
| 10 | 1.0 x 10 ⁻³ | 1.5 x 10 ⁻⁴ | 8.1 x 10 ⁻³ | 1.5 x 10 ⁻³ | 1.6 x 10 ⁻³ | 1.7 x 10 ⁻⁴ | 9.5 x 10 ⁻³ |
| 11 | 2.2 x 10 ⁻³ | 1.8 x 10 ⁻⁴ | 5.0 x 10 ⁻³ | 3.4 x 10 ⁻³ | 1.1 x 10 ⁻² | 1.1 x 10 ⁻⁴ | 3.7 x 10 ⁻³ |
| 12 | 1.3 x 10 ⁻³ | 1.5 x 10 ⁻⁴ | 1.9 x 10 ⁻³ | 1.4 x 10 ⁻³ | 5.4 x 10 ⁻³ | 1.1 x 10 ⁻⁴ | 1.4 x 10 ⁻³ |

| | Na | K | Ca | Mg | HCO ₃ ⁻ | Cl ⁻ | SO ₄ ⁼ |
|----|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|-------------------------------|-----------------------|------------------------------|
| 13 | 1.1×10^{-3} | 2.0×10^{-4} | 2.0×10^{-3} | 1.8×10^{-3} | 8.6×10^{-3} | 2.2×10^{-4} | 6.4×10^{-4} |
| 14 | 1.0×10^{-2} | 4.3×10^{-4} | 4.7×10^{-3} | 4.7×10^{-3} | 1.2×10^{-2} | 10.0×10^{-3} | 7.6×10^{-3} |
| 15 | 9.4×10^{-3} | 4.8×10^{-4} | 6.3×10^{-3} | 6.4×10^{-3} | 1.7×10^{-2} | 6.8×10^{-3} | 4.9×10^{-3} |
| 16 | 4.2×10^{-3} | 2.3×10^{-4} | 3.5×10^{-3} | 3.0×10^{-3} | 7.4×10^{-3} | 3.3×10^{-3} | 3.0×10^{-3} |
| 17 | 9.7×10^{-3} | 4.3×10^{-4} | 3.7×10^{-3} | 2.9×10^{-3} | 1.4×10^{-2} | 6.0×10^{-3} | 3.7×10^{-3} |
| 18 | 2.1×10^{-4} | 3.8×10^{-5} | 1.7×10^{-4} | 1.2×10^{-4} | 8.7×10^{-4} | 5.6×10^{-5} | 1.0×10^{-5} |
| 19 | 2.0×10^{-4} | 3.6×10^{-5} | 1.5×10^{-4} | 1.2×10^{-4} | 8.4×10^{-4} | 8.4×10^{-5} | 2.1×10^{-5} |
| 20 | 2.0×10^{-4} | 3.6×10^{-5} | 1.5×10^{-4} | 1.1×10^{-4} | 8.4×10^{-4} | 5.6×10^{-5} | 4.2×10^{-5} |
| 21 | 2.4×10^{-3} | 1.8×10^{-4} | 3.2×10^{-3} | 1.8×10^{-3} | 1.1×10^{-2} | 4.2×10^{-4} | 5.0×10^{-4} |
| 22 | 5.5×10^{-4} | 5.1×10^{-5} | 1.1×10^{-3} | 5.3×10^{-4} | 2.9×10^{-3} | 1.4×10^{-4} | 4.8×10^{-4} |
| 23 | 2.0×10^{-3} | 3.1×10^{-4} | 1.3×10^{-2} | 3.5×10^{-3} | - | 5.9×10^{-4} | 1.6×10^{-2} |
| 24 | 3.1×10^{-3} | 4.8×10^{-4} | 8.3×10^{-3} | 2.8×10^{-3} | - | 8.4×10^{-3} | 1.4×10^{-2} |
| 25 | 2.3×10^{-4} | 3.8×10^{-5} | 1.4×10^{-4} | 1.3×10^{-4} | 8.5×10^{-4} | 1.7×10^{-4} | 4.2×10^{-5} |
| 26 | 2.2×10^{-4} | 3.6×10^{-5} | 1.3×10^{-4} | 1.2×10^{-4} | 8.7×10^{-4} | 1.7×10^{-4} | 5.2×10^{-5} |

| | Na | K | Ca | Mg | HCO ₃ ⁻ | Cl ⁻ | SO ₄ ⁼ |
|----|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|-------------------------------|----------------------|------------------------------|
| 27 | 2.2×10^{-4} | 3.6×10^{-5} | 1.5×10^{-4} | 1.2×10^{-4} | 8.7×10^{-4} | - | 3.1×10^{-5} |
| 28 | 2.8×10^{-2} | 1.1×10^{-3} | 1.5×10^{-2} | 9.8×10^{-3} | 3.5×10^{-2} | 3.2×10^{-2} | 1.6×10^{-2} |

TABLA 4.2 (b)

CONCENTRACIONES DE LOS CONSTITUYENTES FUNDAMENTALES EN EQUIVALENTES POR LITRO

| | Na | K | Ca | Mg | HCO ₃ ⁻ | Cl ⁻ | SO ₄ ⁼ |
|----|-----|-----|-----|-----|-------------------------------|-----------------|------------------------------|
| 1 | 444 | 105 | 214 | 194 | 565 | 394 | 694 |
| 2 | 494 | 845 | 234 | 294 | 564 | 314 | 524 |
| 3 | 554 | 845 | 304 | 444 | 103 | 354 | 504 |
| 4 | 354 | 745 | 154 | 194 | 103 | 204 | 324 |
| 5 | 384 | 775 | 244 | 274 | 113 | 194 | 194 |
| 6 | 444 | 825 | 334 | 274 | 113 | 214 | 204 |
| 7 | 124 | 155 | 924 | 184 | 174 | 175 | 113 |
| 8 | 144 | 185 | 974 | 174 | 284 | 255 | 123 |
| 9 | 104 | 135 | 774 | 134 | 134 | 145 | 924 |
| 10 | 104 | 155 | 814 | 154 | 164 | 175 | 954 |
| 11 | 224 | 185 | 504 | 344 | 113 | 115 | 374 |
| 12 | 134 | 155 | 194 | 144 | 544 | 115 | 144 |
| 13 | 114 | 205 | 204 | 184 | 864 | 225 | 645 |
| 14 | 103 | 435 | 474 | 474 | 123 | 103 | 764 |

| | Na | K | Ca | Mg | HCO ₃ ⁻ | Cl ⁻ | SO ₄ ⁼ |
|----|-----|-----|-----|-----|-------------------------------|-----------------|------------------------------|
| 15 | 944 | 485 | 634 | 644 | 173 | 684 | 494 |
| 16 | 424 | 235 | 354 | 304 | 744 | 334 | 304 |
| 17 | 974 | 435 | 374 | 294 | 143 | 604 | 374 |
| 18 | 215 | 386 | 175 | 125 | 875 | 566 | 106 |
| 19 | 205 | 366 | 155 | 125 | 845 | 846 | 216 |
| 20 | 205 | 366 | 155 | 115 | 845 | 566 | 426 |
| 21 | 244 | 185 | 324 | 184 | 113 | 425 | 505 |
| 22 | 555 | 516 | 114 | 535 | 294 | 145 | 485 |
| 23 | 204 | 315 | 133 | 354 | - | 595 | 163 |
| 24 | 314 | 485 | 834 | 284 | - | 844 | 143 |
| 25 | 235 | 386 | 145 | 135 | 855 | 175 | 426 |
| 26 | 225 | 366 | 135 | 125 | 875 | 175 | 526 |
| 27 | 225 | 366 | 155 | 125 | 875 | - | 316 |
| 28 | 283 | 114 | 153 | 984 | 353 | 323 | 163 |

Datos Compactados

Ej. 444 = 44×10^{-4} Equiv / Litro



Instituto Colombiano de Energía Eléctrica -83-

nificativa, no es indicativo que los análisis sean ó no de buena calidad.

Las Desviaciones Porcentuales de cada muestra recolectada y analizada se presentan en la Tabla 4.3

Los inconvenientes anteriores (Balance Iónico) tienen solución con los análisis de control de cada uno de los constituyentes para tener en forma real una mayor confiabilidad sobre los resultados.

4.2.2 Comentario General a los Análisis Comparativos.

Como se comentó en el párrafo anterior los Análisis de Control son muy importantes para la evaluación de los datos analíticos; generalmente se recomienda evaluar los constituyentes mayores a saber : Ca^{2+} , Na^+ , K^+ , HCO_3^- , SO_4^- , SiO_2 , Cl^- , Mg^{2+} , Li^+ , B y NH_4^+ .

Estos Análisis de Control toman como base los resultados de los análisis químicos obtenidos en diferentes laboratorios en conjunto con los de laboratorio de campo, esto relacionado a una muestra recolectada en igual sitio y época. Estos análisis son requeridos por los cambios que ocasionan cada uno de los constituyentes, ya sea por la variación de temperatura, PH, período distante entre recolección y análisis de labo-

TABLA 4.3

SUMA CATIONICA - SUMA ANIONICA
DESVIACIONES PORCENTUALES (% DEV)

| No. Muestra | Suma Anionica | Suma Cationica | % DEV |
|-------------|---------------|----------------|-------|
| 1 | 1.1 E - 02 | 8.5 E - 03 | 25.64 |
| 2 | 1.4 E - 02 | 1.1 E - 02 | 24.00 |
| 3 | 1.8 E - 02 | 1.4 E - 02 | 25.00 |
| 4 | 1.5 E - 02 | 7.6 E - 03 | 65.48 |
| 5 | 1.5 E - 02 | 9.7 E - 03 | 42.91 |
| 6 | 1.5 E - 02 | 1.1 E - 02 | 30.77 |
| 7 | 1.3 E - 02 | 1.2 E - 02 | 8.00 |
| 8 | 1.5 E - 02 | 1.3 E - 02 | 14.28 |
| 9 | 1.1 E - 02 | 1.0 E - 02 | 9.52 |
| 10 | 1.1 E - 02 | 1.1 E - 02 | 4.72 |
| 11 | 1.5 E - 02 | 1.1 E - 02 | 30.76 |
| 12 | 6.9 E - 03 | 4.7 E - 03 | 37.93 |

| No. Muestra | Suma Anionica | Suma Cationica | % DEV |
|-------------|---------------|----------------|-------|
| 13 | 9.5 E - 03 | 5.1 E - 03 | 60.27 |
| 14 | 3.0 E - 02 | 2.0 E - 02 | 39.53 |
| 15 | 2.9 E - 02 | 2.3 E - 02 | 23.78 |
| 16 | 1.4 E - 02 | 1.1 E - 02 | 24.00 |
| 17 | 2.4 E - 02 | 1.7 E - 02 | 34.14 |
| 18 | 9.4 E - 04 | 5.4 E - 04 | 54.05 |
| 19 | 9.4 E - 04 | 5.1 E - 04 | 59.31 |
| 20 | 9.4 E - 04 | 5.0 E - 04 | 61.11 |
| 21 | 1.2 E - 02 | 7.6 E - 03 | 44.89 |
| 22 | 3.5 E - 03 | 2.2 E - 03 | 45.61 |
| 23 | 1.6 E - 02 | 1.9 E - 02 | 17.14 |
| 24 | 2.2 E - 02 | 1.5 E - 02 | 37.83 |
| 25 | 1.1 E - 03 | 5.4 E - 04 | 68.29 |
| 26 | 1.1 E - 03 | 5.1 E - 04 | 73.29 |
| 27 | 9.0 E - 04 | 5.3 E - 04 | 51.74 |
| 28 | 8.3 E - 02 | 5.4 E - 02 | 42.33 |



ratorio, utilización de envases inadecuados (sobre todo para gases), precipitación, oxidación, etc.

Los Análisis de Control son en alto grado representativos ya que son indispensables para la correcta evaluación de los datos hidrogeoquímicos y en particular para el estudio de los geotermómetros.

4.3 CLASIFICACION QUIMICA DE LAS AGUAS.

4.3.1 Generalidades.

La clasificación química de las aguas es la primera etapa de interpretación que se realiza con los datos analíticos de los siete constituyentes fundamentales : Ca, Mg, Na, HCO_3 , SO_4 , Cl y K obtenidos de los análisis químicos de laboratorio.

Para la clasificación de las aguas se utilizan los Diagramas de Langelier - Ludwig que se construyen con base en los valores de reacción (1)

- (1) El término " Valor de Reacción " es corriente para los valores porcentuales de las Concentraciones de los 7 Constituyentes, considerando $\text{SUM CAT} = \text{SUM AN} = 50$. Los Valores de Reacción se indican con una R y el simbolo de la especie química así :



$$R_{Na} = \frac{[Na]}{SUM\ CAT} * 50 \qquad R_{SO_4} = \frac{[SO_4]}{SUM\ AN} * 50$$

La Tabla 4.4 registra los valores de reacción de todos los constituyentes y la salinidad total.

Los Valores de Reacción (R) de los cationes y los R de los aniones pueden ser reagrupados entre sí con el fin de condensar toda la información en dos únicas variables, que junto con la salinidad total permiten representar estos datos químicos en un espacio de 3 dimensiones, que se considera como una pirámide abierta cuyo eje es la salinidad. El diagrama plano Langelier - Ludwig puede ser considerado como una sección cualquiera perpendicular al eje, sobre la cual están proyectados todos los puntos del espacio composicional considerado.

Además de los diagramas de Langelier - Ludwig (L.L.) se tienen las secciones generalizadas a la pirámide de L.L. que ayudan a clasificar las aguas en base al contenido de las sustancias disueltas.

Este método clasificativo presenta las siguientes ventajas.:

- Considerar todas las muestras de agua conjuntamente.

TABLA 4.4

VALORES DE REACCION DE LOSSIETE CONSTITUYENTES FUNDAMENTALES Y SALINIDAD

| No. Muestra | Na | K | Ca | Mg | HCO ₃ ⁻ | SO ₄ ⁼ | Cl ⁻ | SALINIDAD |
|-------------|-------|------|-------|-------|-------------------------------|------------------------------|-----------------|------------|
| 1 | 25,88 | 0,59 | 12,35 | 11,18 | 2,54 | 31,36 | 17,72 | 2,0 E - 02 |
| 2 | 22,27 | 3,82 | 10,45 | 13,18 | 20,00 | 18,57 | 11,07 | 2,5 E - 02 |
| 3 | 19,64 | 3,00 | 10,71 | 15,71 | 27,78 | 13,89 | 9,72 | 3,2 E - 02 |
| 4 | 23,03 | 4,86 | 9,87 | 12,50 | 33,30 | 10,67 | 6,66 | 2,3 E - 02 |
| 5 | 19,58 | 3,96 | 12,37 | 13,91 | 36,67 | 6,33 | 6,33 | 2,5 E - 02 |
| 6 | 20,00 | 3,72 | 15,00 | 12,27 | 36,67 | 6,67 | 7,00 | 2,6 E - 02 |
| 7 | 5,00 | 0,62 | 38,33 | 7,50 | 6,54 | 42,30 | 0,65 | 2,5 E - 02 |
| 8 | 5,38 | 0,69 | 37,31 | 6,53 | 9,30 | 40,00 | 0,83 | 2,8 E - 02 |
| 9 | 5,00 | 0,65 | 38,50 | 6,50 | 5,91 | 41,82 | 0,63 | 2,1 E - 02 |
| 10 | 5,45 | 0,68 | 36,82 | 6,81 | 7,27 | 43,18 | 0,77 | 2,2 E - 02 |
| 11 | 10,00 | 0,82 | 22,73 | 15,45 | 36,67 | 12,33 | 0,36 | 2,6 E - 02 |
| 12 | 13,83 | 1,60 | 20,21 | 14,90 | 39,13 | 10,14 | 0,79 | 1,2 E - 02 |
| 13 | 10,78 | 1,96 | 19,60 | 17,64 | 45,26 | 3,36 | 1,15 | 1,5 E - 02 |
| 14 | 25,21 | 1,00 | 11,85 | 11,85 | 20,27 | 12,83 | 16,89 | 4,9 E - 02 |

| No. Muestra | Na | K | Ca | Mg | HCO ₃ ⁻ | SO ₄ ⁼ | Cl ⁻ | SALINIDAD |
|-------------|-------|------|-------|-------|-------------------------------|------------------------------|-----------------|-------------|
| 15 | 20,80 | 1,06 | 13,94 | 14,16 | 29,61 | 8,53 | 11,84 | 5,1 E - 02 |
| 16 | 19,10 | 1,04 | 15,90 | 13,64 | 26,43 | 10,71 | 11,78 | 2,5 E - 02 |
| 17 | 28,53 | 1,26 | 10,88 | 8,53 | 29,17 | 7,70 | 12,50 | 4,1 E - 02 |
| 18 | 19,44 | 3,52 | 15,74 | 11,11 | 46,27 | 0,53 | 2,97 | 1,5 E - 02 |
| 19 | 19,60 | 3,53 | 14,70 | 11,76 | 44,68 | 1,11 | 4,46 | 1,5 E - 03 |
| 20 | 20,00 | 3,60 | 15,00 | 11,00 | 44,68 | 2,23 | 2,97 | 1,4 E - 03 |
| 21 | 15,79 | 1,18 | 21,05 | 11,84 | 45,83 | 2,08 | 1,75 | 2,0 E - 02 |
| 22 | 12,50 | 1,16 | 25,00 | 12,04 | 41,43 | 6,85 | 2,00 | 5,7 E - 02 |
| 23 | 5,26 | 0,81 | 34,21 | 9,21 | - | 50,00 | 1,84 | 3,5 E - 02 |
| 24 | 10,33 | 1,60 | 27,67 | 9,33 | - | 31,81 | 19,09 | 3,7 E - 02 |
| 25 | 21,29 | 3,52 | 12,96 | 12,03 | 38,64 | 1,90 | 7,72 | 1,6 E - 03 |
| 26 | 21,56 | 3,53 | 12,74 | 11,76 | 39,54 | 2,36 | 7,72 | 1,6 E - 03 |
| 27 | 20,75 | 3,40 | 14,15 | 11,32 | 48,33 | 1,72 | - | 1,4 E - 03 |
| 28 | 25,92 | 1,02 | 13,89 | 9,07 | 21,08 | 9,63 | 19,27 | 13,7 E - 02 |



- Referir la composición de las aguas a sales presentes en la naturaleza, representadas en las aristas de la pirámide de L.L.
- Identificar fenómenos de solución de estas sales, relacionadas con mezcla entre aguas con características químicas diferentes, etc.

4.3.2 Diagramas de Langelier - Ludwig y Secciones Relativas.

Los Diagramas de Langelier - Ludwig para la clasificación de las aguas del área de estudio fueron construidos con las parejas catiónicas $R_{Na} + R_K$ y $R_{Ca} + R_{Mg}$ variando las reagrupaciones entre los aniones así : Fig. 4.1 con R_{HCO_3} y $R_{Cl} + R_{SO_4}$, L.L.1, Fig 4.2 R_{SO_4} y R_{HCO_3} R_{Cl} , L.L.2, Fig. 4.4 R_{Cl} y $R_{HCO_3} + R_{SO_4}$, L.L.3

El Diagrama L.L.1 (Fig. 4.1) se caracteriza por :

- La mayor parte de las aguas muestreadas se presentan en el cuadrante SE conformado en gran parte por bicarbonatos y metales alcalino-térreos (Ca + Mg) dando formación a aguas bicarbonatadas alcalino-térreas, a este grupo se suman las muestras 4 y 17.

De 28 muestras analizadas, 17 se hallan en este grupo ó sea aproximadamente el 60% del muestreo.

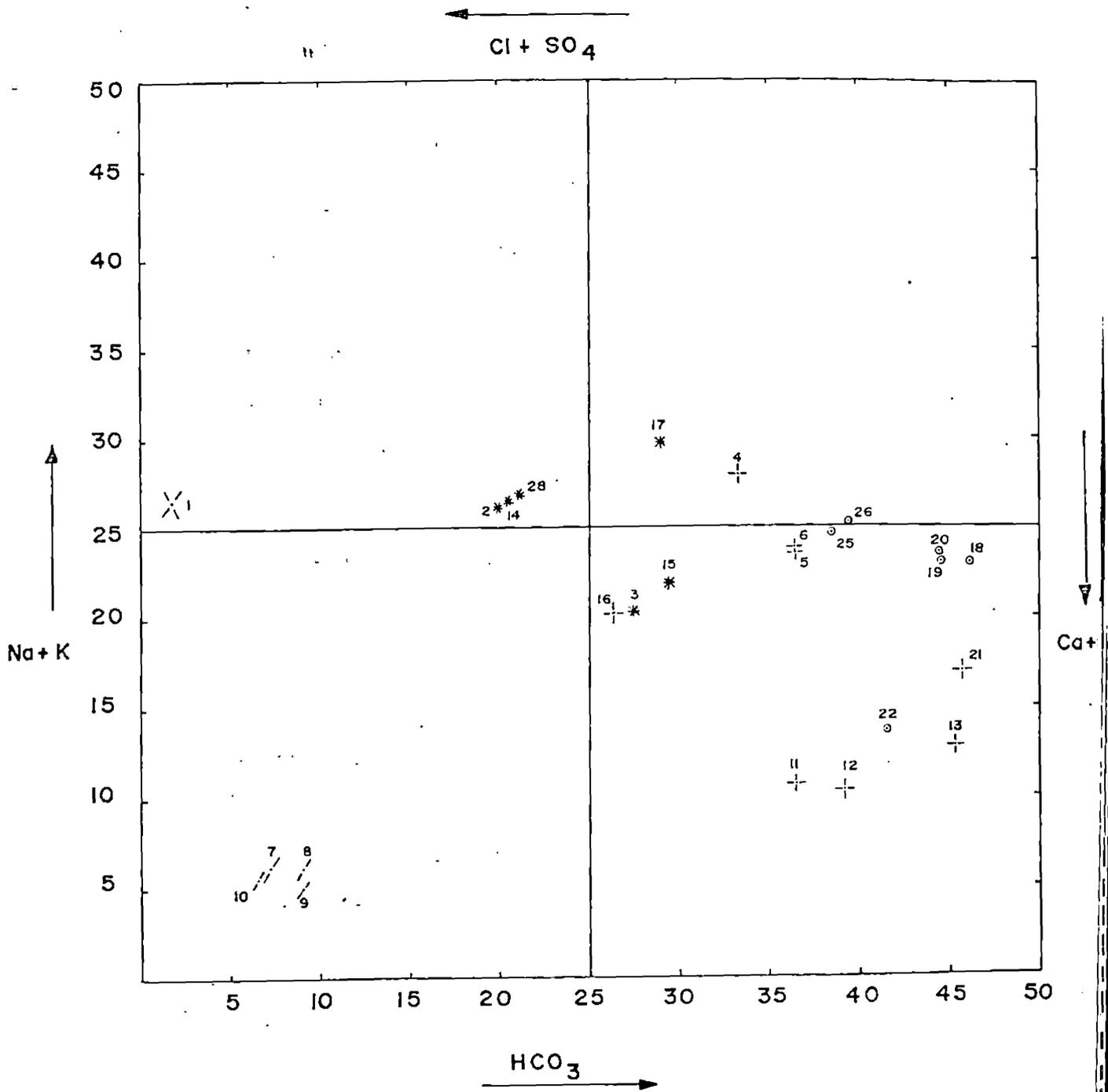


FIG: 4.1. - DIAGRAMA L.L.I



Instituto Colombiano de Energía Eléctrica -32-

- En el cuadrante Sw se localizan las muestras 7,8,9,y 10 tienen tendencia a aguas cloruradas - sulfatadas con máxima concentración de metales alcalino - terreos (Ca+Mg).
- Las muestras 1,2,14,y 28 se hallan localizadas en el cuadrante NW de las aguas cloruradas- sulfatadas con mayor tendencia alcalina (Na + K), sobre todo la muestra 1.

En el Diagrama L.L.2 (fig.4.2) se puede observar que las muestras 7,8,9 y 10 quedan involucradas en el mismo cuadrante SW de L.L.1 pero con características de sulfatos con gran contenido de metales alcalino-térreos . Estas muestras pueden ya ser definidas como Sulfatadas alcalino - térreas.

La muestra 1 continúa en el cuadrante NW, ahora correspondiente a las aguas sulfatadas alcalinas aún con tendencia a cloruradas. La alineación de esta muestra tiene mayor tendencia a formar sulfatos con los metales alcalinos que con los alcalino-térreos.

En este diagrama las muestras del cuadrante de las aguas bicarbonatadas alcalino - térreas en L.L.1 se presentan de igual manera, con lo que se puede concluir que estas aguas son del tipo de aguas antes expuesto.

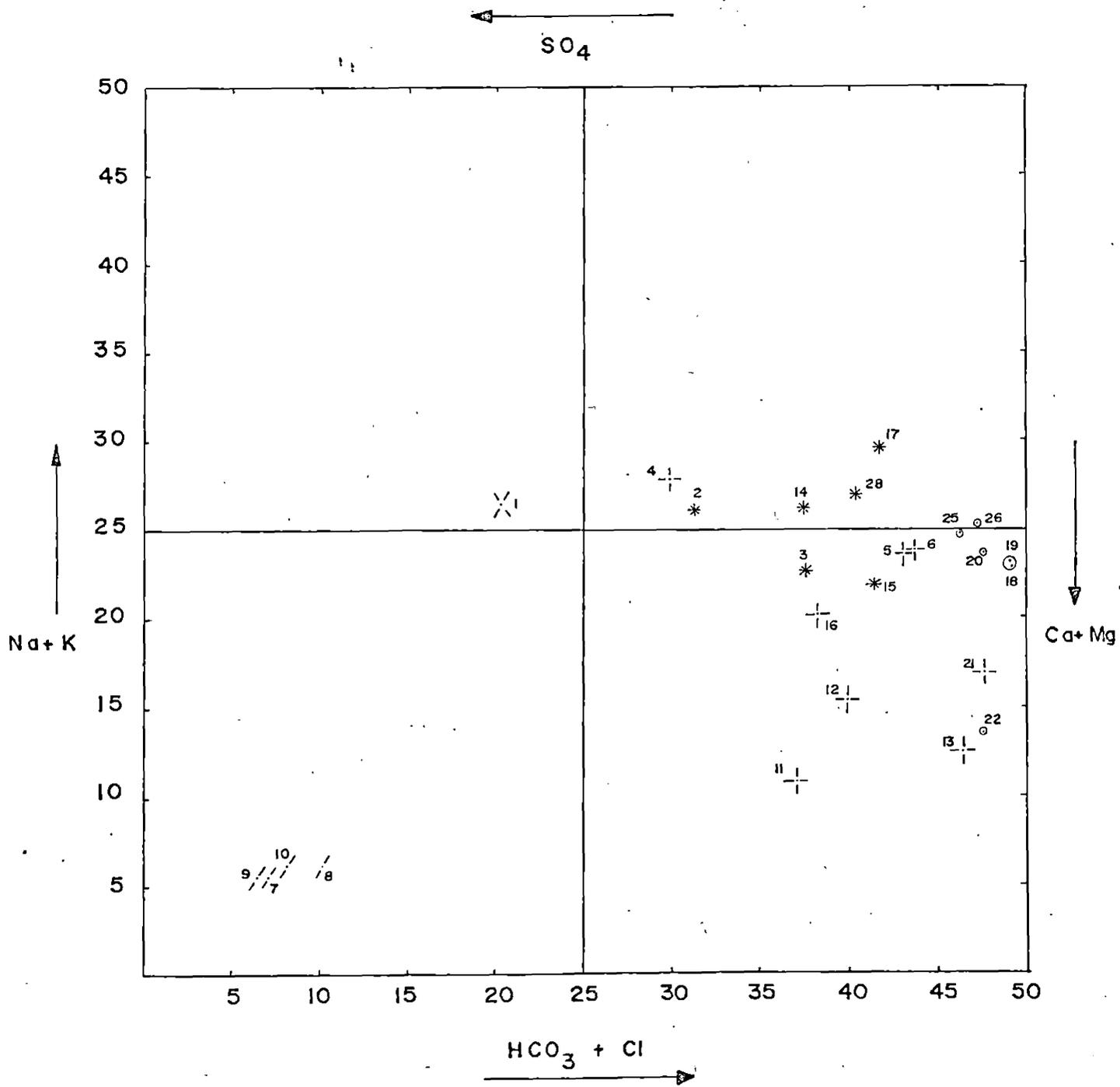


FIG. 4.2.- DIAGRAMA L.L. 2



Instituto Colombiano de Energía Eléctrica -94-

Las muestras 2, 14, y 28 se desplazan hacia el cuadrante de las aguas bicarbonatadas - cloruradas de tipo alcalino. La muestra 28 se aprecia en este diagrama como un tipo de agua conformado por aguas Bicarbonatadas y aguas cloruradas (Alcalinas)!

A partir de este diagrama se obtiene el Diagrama de correlación entre SO_4 y $HCO_3 + Cl$ (fig.4.3) que es equivalente a una sección cualquiera de la pirámide de L.L. con traza horizontal en el Diagrama plano de - L.L.2.

En este diagrama se puede observar claramente el alineamiento de las aguas sulfatadas con el eje de SO_4 presentes con salinidades entre 21 y 28 meq/Litro.

Se observa otro alineamiento por parte de las aguas Bicarbonatadas alcalino - térreas con respecto al eje $HCO_3 + Cl$ con diferentes salinidades a saber :

- Baja salinidad pertenecen a este grupo las muestras 18,19,20,22,25, 26 y 27 con salinidad 6 meq/Litro.
- Media salinidad al cual pertenecen las muestras 4,5,6,11,12,13,16,y 21 con salinidad comprendida entre 6 y 26 meq/Litro.

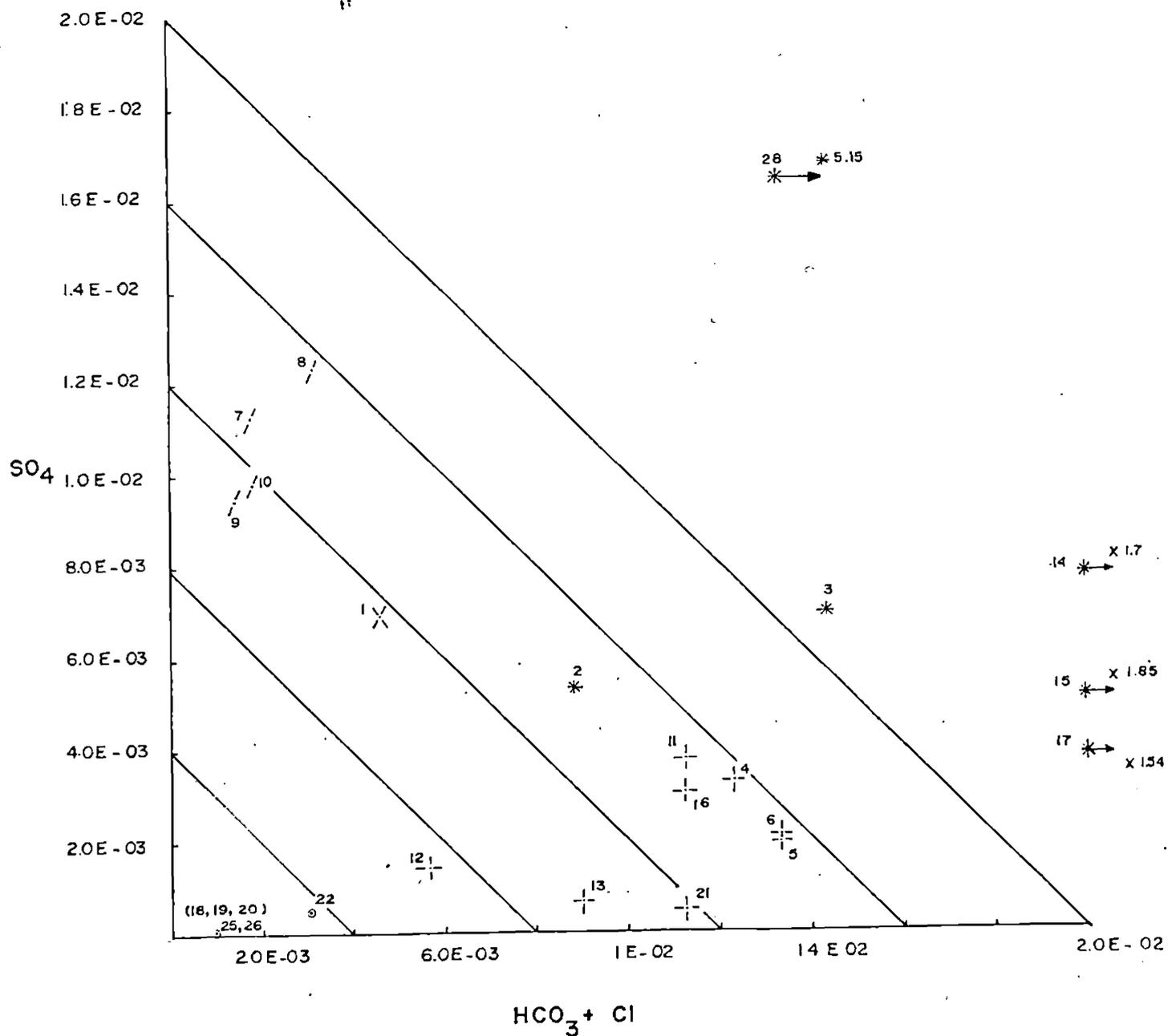
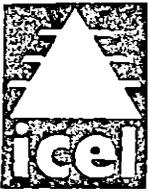


FIG. 4.3 DIAGRAMA DE CORRELACION ENTRE SO_3 Y $HCO_3 + Cl$ QUE ES EQUIVALENTE A UNA SECCION CUALQUIERA DE LA PIRAMIDE DE L.L., CON TRAZA HORIZONTAL EN EL DIAGRAMA PLANO DE L.L. 2.



Instituto Colombiano de Energía Eléctrica -96-

- Alta salinidad al cual pertenecen las muestras 14,15,y 17 con salinidad mayor a 26 meq/Litro (49,51 y 41 /Litro respectivamente,)

Este diagrama presenta un grupo alineado con relación al eje $\text{HCO}_3 + \text{Cl}$ conformado por las muestras 1,2 y 3 con salinidades entre 20 y 32 meq/Litro; la muestra 1 tiene su tendencia a sulfatada y la 2 y 3 como Bicarbonatada alcalino- térrea como se anotó en el diagrama anterior, con lo que se puede concluir que la muestra 1 es del tipo sulfatado - alcalino y las muestras 2 y 3 al grupo Bicarbonatados alcalino- térreas mezcladas.

La muestra 28 en este diagrama muestra la gran tendencia a mostrarse como un tipo de agua conformado por Bicarbonatada y clorurada, que puede integrarse a las Bicarbonatadas alcalino-térreas de alta salinidad. En el diagrama L.L.3 (fig.4.4) las muestras forman un conglomerado en el cuadrante SE alineados con respecto al eje A-B; que va desde B con carbonatos y sulfatos de calcio y Mg hasta A con cloruros de Sodio y Potasio.

Este diagrama muestra la tenencia de las muestras 1 y 28 a estar asociada a mezclas con agua clorurada.

A partir de este diagrama se obtiene la figura 4.5 correspondiente al

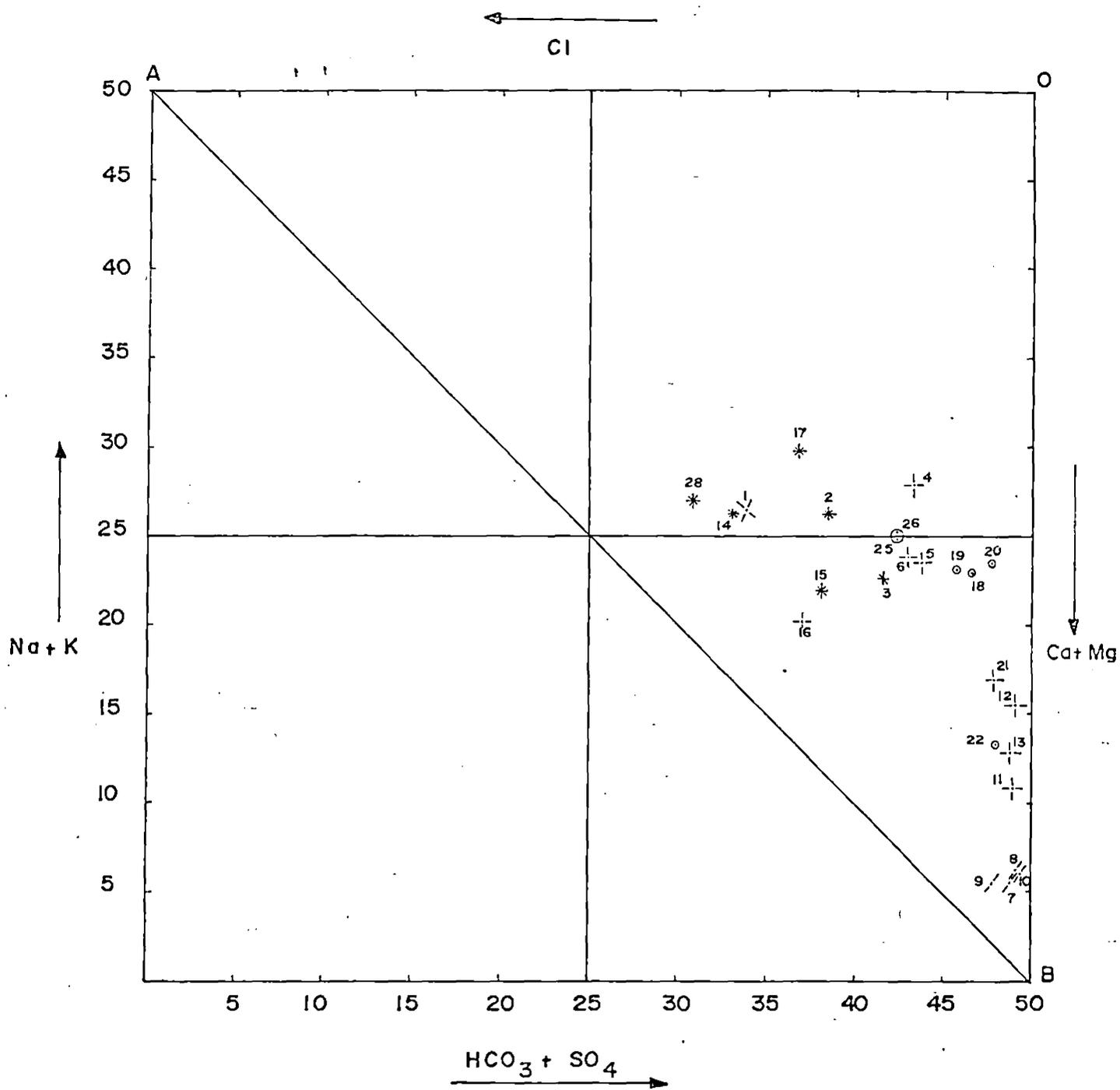


FIG. 4. 4 DIAGRAMA L.L. 3

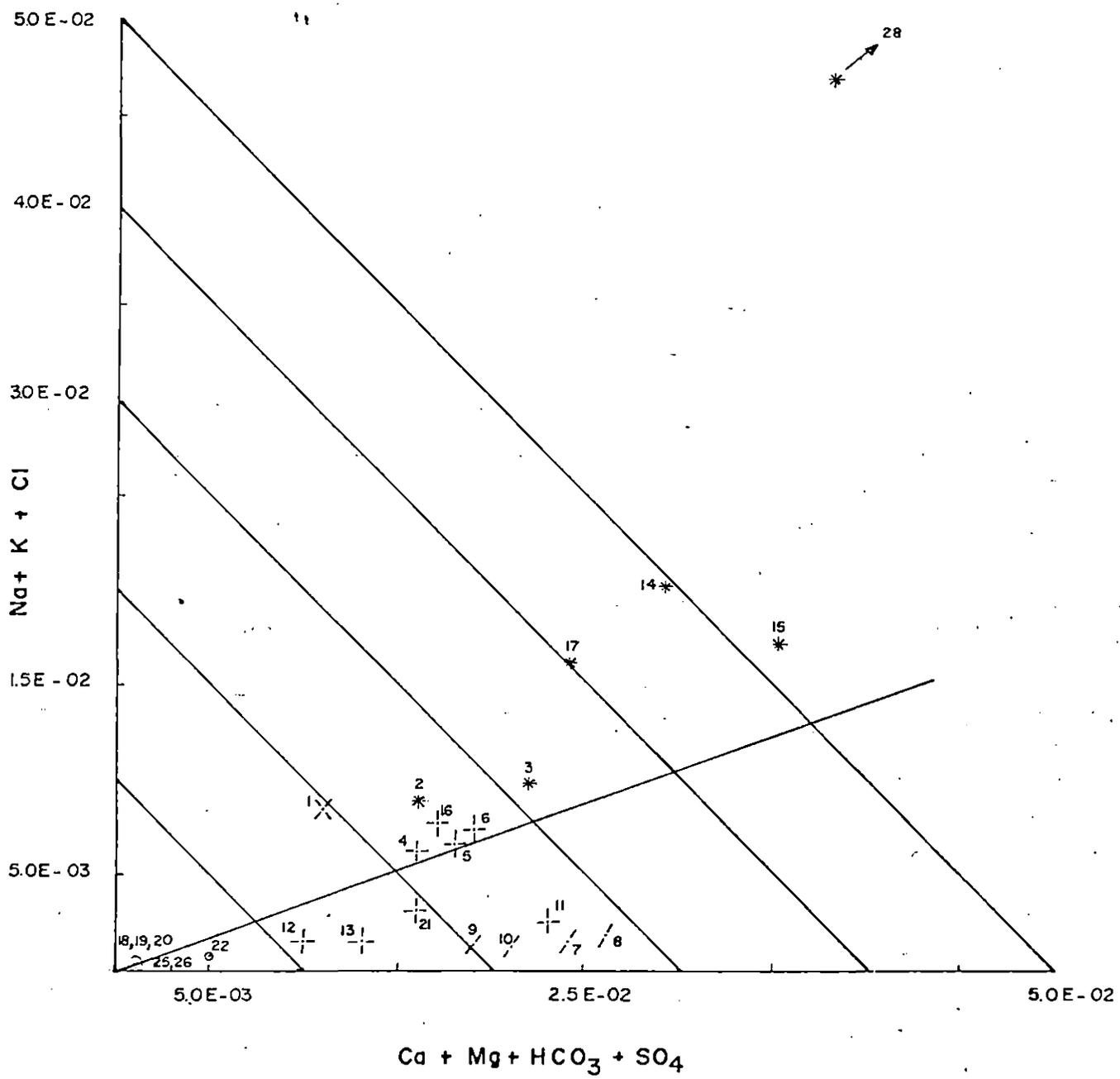


FIG. 4. 5 DIAGRAMA DE CORRELACION ENTRE Na + K + Cl Y Ca + Mg + HCO₃ + SO₄ QUE ES EQUIVALENTE A LA SECCION A - B DE L.L.3



Instituto Colombiano de Energía Eléctrica -99-

Diagrama de Correlación entre $Na + K + Cl$ y $Ca + Mg + HCO_3 + SO_4$, que equivale a la sección A O B.

En este diagrama se observa que las únicas aguas que tienden a contaminarse con aguas cloruradas son algunas Bicarbonatadas como 2,3,14, 15,17,28 y sulfatadas como la 1.

Toda la información anterior definir los siguientes tipos de agua.:

- Bicarbonatadas alcalino- térreas de baja, media y alta salinidad. Algunas de alta salinidad con contaminación de aguas cloruradas.
- Sulfato alcalino - térreas.
- Sulfato alcalina con contaminación de aguas cloruradas alcalinas.

4.3.3 Diagramas de Correlación K/Na y Ca/Mg:

Los Diagramas de Correlación sirven de complemento para la clasificación elaborada anteriormente, con los diagramas de Langelier - Ludwig,.

Estos se construyen con base en las concentraciones (Equivalentes/ Litro) de los metales alcalinos (K-Na) y alcalino - térreas (Ca-Mg) obtenidos de los análisis químicos de laboratorio realizados sobre las muestras recolectadas en el área de estudio.



Instituto Colombiano de Energía Eléctrica -100-

En el diagrama K-Na (Figura 4.6) se observa : El tipo de aguas Bicarbonatadas alcalino - térreas se encuentran sobre la misma isoterma del geotermómetro correspondiente 350°C , es decir, con una relación $\text{Na}/\text{K}=6$; solamente las muestras 11 y 21 se alejan de estas características a tal punto de ubicarse en este esquema entre las isotermas de 200 y 300°C .

Existe un caso muy particular con las muestras 14,15,16 y 17 que fueron clasificadas dentre de este tipo, pero en este diagrama se localizan bastante aisladas (con una mayor cantidad de sodio con respecto a los demás) entre las isotermas de los geotermómetros correspondientes a $150 - 200^{\circ}\text{C}$, parece que formaran un tipo químico diferente de aguas - pero lo más probable es que estén contaminados con otras aguas de composición diferente a las que forman el grupo que se halla sobre la isoterma de 350°C , además hay que anotar que regionalmente son diferentes y que fueron tenidas en cuenta como Bicarbonatadas alcalino-térreas de alta salinidad.

Las muestras 7, 8, 9 y 10 forman otra alineación conformada por aguas sulfatadas - alcalino - térreas ubicadas sobre la isoterma del geotermómetro correspondiente a 300°C , es decir, con una relación $\text{Na}/\text{K}=8$.

Las muestras 1 y 28 que posiblemente están asociadas a mezclas con aguas cloruradas alcalinas se presentan en este diagrama en posiciones bastante distintas, la muestra 1 se reafirma con mayor cantidad de K-

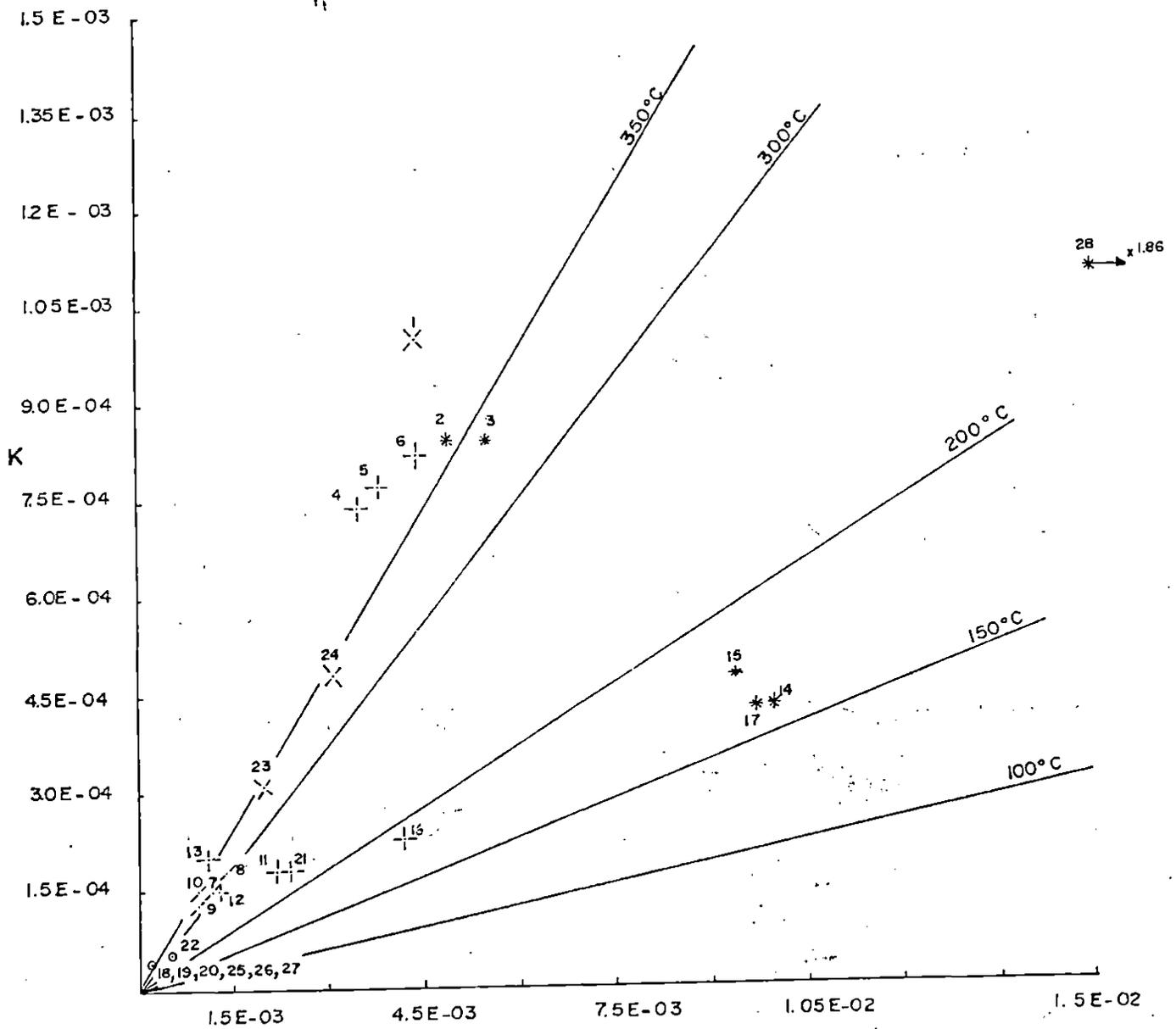


FIG. 4.6 DIAGRAMA DE CORRELACION ENTRE K Y Na CON LAS ISOTERMAS DEL GEOTERMOMETRO CORRESPONDIENTE.



Instituto Colombiano de Energía Eléctrica -102-

comparativamente con sodio y se halla ubicada por encima de la isoterma de 350°C . Mientras que la muestra 28 contiene más cantidad de Na que de K y se asocia a la isoterma de 150°C .

El diagrama de Mg/Ca(figura 4.7) muestra claramente que las aguas se disponen a lo largo de 2 líneas, la primera alineación, paralela al eje Mg, hace referencia a las aguas Bicarbonatadas alcalino-térreas y la segunda conformada por las muestras 7,8,9 y 10 alineadas casi paralelamente al eje Ca pertenecientes a las aguas sulfatadas alcalino-térreas.

Las correlaciones existentes entre estos diagramas de correlación confirman las conclusiones hechas anteriormente sobre los tipos químicos aguas existentes dentro del área de estudio.

4.3.4 Conclusiones de los Tipos Químicos de Aguas.

Dentro del área de estudio se recolectaron 28 muestras entre frías (6) y termales (22) las cuales fueron clasificadas anteriormente.

Las aguas del grupo Bicarbonatadas alcalino-térreas se subdividieron según su salinidad en baja, media y alta.

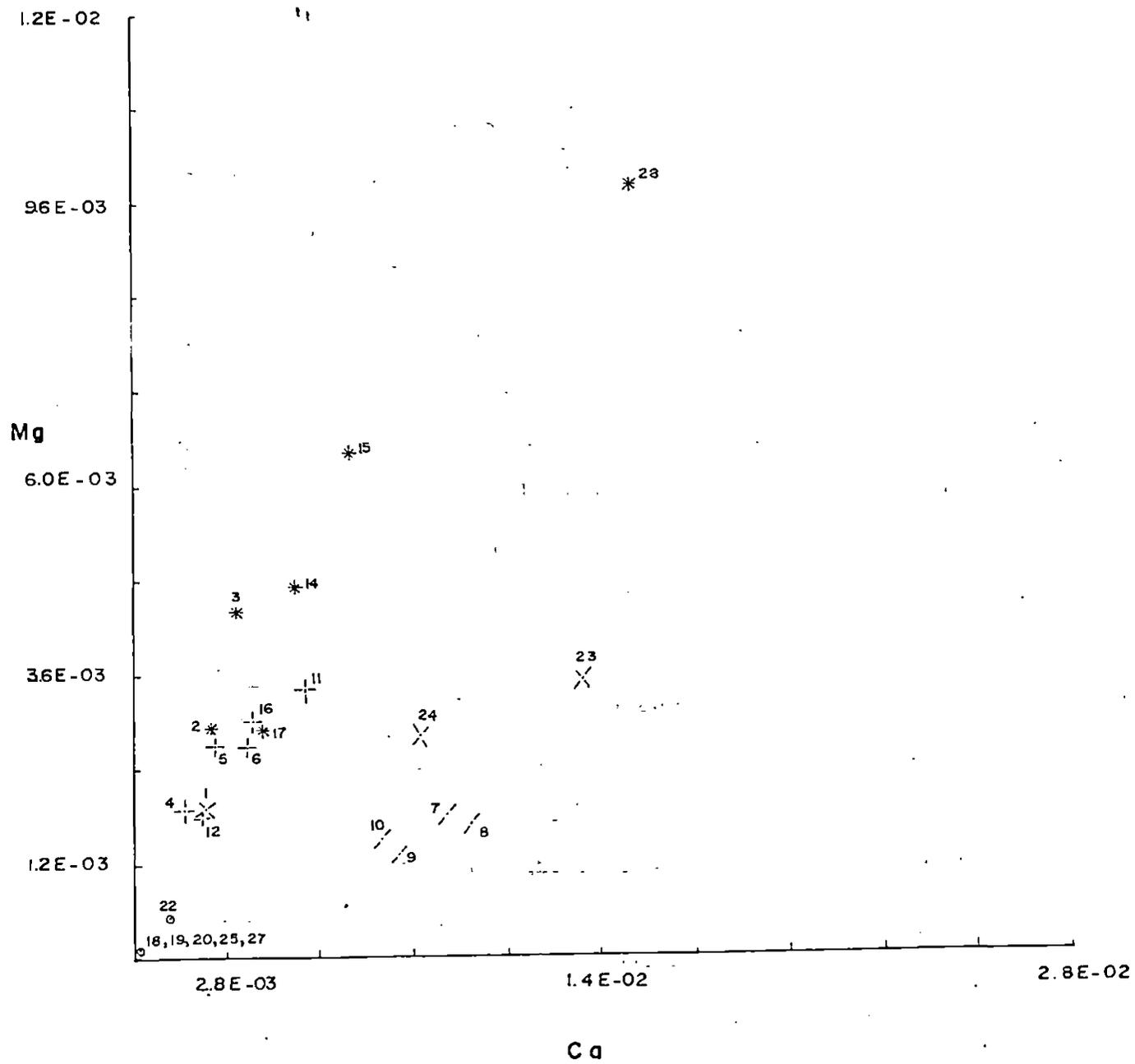


FIG. 4.7. DIAGRAMA DE CORRELACION ENTRE Mg Y Ca.



Instituto Colombiano de Energía Eléctrica -104-

Las aguas de baja salinidad están constituidas por las aguas superficiales (mezcla de agua meteórica y freática) relacionadas a circuitos hidrogeológicos someros.

Las aguas de media y alta salinidad son anómalas térmicamente y sus características composicionales hacen pensar que pertenecen a circuitos hidrogeológicos más profundos en los cuales hay interacción roca - agua asociada a áreas con alto flujo de calor ó a interacción del agua con gases calientes ricos en CO_2 que asciende desde zonas más profundas:

Las aguas sulfatadas alcalino - térreas pueden haberse desarrollado u originado ya sea por lixiviación de rocas hidrotermalizadas; ó a interacción de aguas freáticas Bicarbonatadas alcalino - térreas con gases volcánicos ricos en H_2S , luego a nivel superficial se oxida para formar H_2SO_4 que causa desplazamiento de los Bicarbonatos con formación de CO_2 y adquisición del carácter sulfático de las aguas .

Al tipo químico sulfato- alcalino pertenecen las aguas ácidas de las muestras 1,23, y 24.

La muestra 1 con características de PH = 5.03, salinidad = 20 meq/Litro y T = 51.5°C.



Las muestras 23 y 24 con PH = 3.5 - 4.5, T = 31 - 42^oC. y salinidad = 35 - 37 meq/Litro respectivamente.

Las aguas correspondientes a estas muestras deben haberse formado por la mezcla de aguas ácidas con aguas cloruradas provenientes del reservorio. Las aguas ácidas probablemente se han formado por la lixiviación del agua meteórica sobre el material alterado hidrotermalmente.

Dentro del área de estudio no hay muestras representativas pertenecientes a circuitos hidrogeológicos profundos, pero sí hay muestras Bicarbonatadas alcalino - térreas (2,3,28) y sulfatadas alcalinas (1) y con indicios de leve contaminación con aguas cloruradas alcalinas.

La Tabla 4.5 sintetiza las características de los tipos químicos encontrados, salinidad, temperatura, situación hidrogeológica, simbolo utilizado en los diagramas, número de muestras y simbolo utilizado en el mapa.

4.4

CONSIDERACIONES GEOTERMOMETRICAS.

TABLA 4.5

TIPOS QUIMICOS DE AGUAS

| TIPO QUIMICO | Sub-grupo | SALINIDAD (meq /L) | TEMPERATURA (°C) | SITUACION HIDROGEOLOGICA | SIMBOLO GRAFICO | No. DE MUESTRAS | SIMBOLO EN EL MAPA |
|------------------------------------|-----------------|--------------------|------------------|--|-----------------|-----------------|--------------------|
| BICARBONATO ALCALINO TERREAS | Baja Salinidad | 1.4 - 6 | 14 | Circuitos Someros | ○ | 7 | ○ |
| | Media Salinidad | 12 - 26 | 20 - 40 | Circuitos más profundos que interactúan con gases calientes ricos en CO ₂ o áreas con alto flujo de calor. | + | 8 | ⊕ |
| | Alta Salinidad | 41 - 137 | 14.2 - 32.4 | | * | 6 | ⊕ |
| SULFATADAS ALCALINO TERREAS | — | 21 - 28 | 16.8 - 22.7 | Circuitos someros que interactúan con gases volcánicos ricos en H ₂ S. Lixiviación de rocas hidrotermalizadas. | / | 4 | ● |
| SULFATADAS ALCALINAS | — | 20 - 37 | 31 - 51.5 | Circuitos someros de aguas bicarbonatadas con adición de H ₂ SO ₄ (Oxidación del H ₂ S) | x | 3 | ● |



4.4.1 Fundamentos Teóricos.

4.4.1.1. Geotermómetros de Sílice.

Este geotermómetro se ha utilizado ampliamente y es probablemente el indicador químico más confiable para estimación de temperaturas de acuíferos térmicos en sistemas de manantiales que están caracterizados por depósitos de sílica sinter y agua cerca del punto de ebullición.

Los diversos minerales en que se presenta la sílice (sílice amorfa, cuarzo, etc.) poseen una solubilidad que varía ampliamente con respecto a la temperatura. Algunos investigadores han realizado estudios teóricos y experimentales sobre este geotermómetro tratando de solucionar los problemas que presentan, entre ellos están : Kennedy (1950), Alexander Heston e Iler (1954), Okamoto, Okura y Goto (1957), Vanlier y otros (1960), Bodvarsson (1960), Morey y otros (1962) Fournier y Rowe (1962-1964), Mahon (1966) y Arnorsson (1975).

El utilizar los geotermómetros (sílice amorfa, cuarzo etc.) indiscriminadamente conllevan a obtener resultados erróneos. En base a considera-



Instituto Colombiano de Energía Eléctrica -108-

ciones empíricas, teóricas y experimentales realizados por anteriores investigadores se ha llegado a afirmar que el mineral que controla la concentración de sílice disuelta a bajas temperaturas en la sílice amorfa, mientras que a temperaturas por encima de 150°C . la controla el cuarzo.

A temperaturas por arriba de 220°C . son raramente aplicados cualquiera de estos geotermómetros ya que el re-equilibrio por encima de esta temperatura es rápido y la sílica se precipita en flujos ascendentes, produciendo análisis químicos errados y por consiguiente estimativos de temperatura de profundidad no confiables.

El cuarzo controla el contenido de sílice disuelta en las aguas de los sistemas hidrotermales y en aguas que interactúan con rocas intrusivas ácidas. La sílice disuelta proporciona estimativos de temperatura a profundidad, relativamente precisas cuando se considera el agua producida por los pozos geotérmicos.

La casi independencia de la solubilidad de los polimorfos de la sílice respecto a la fuerza iónica y el PH, permite utilizar estas funciones de la temperatura como geotermómetros en los sistemas geotérmicos.

Cuando se utiliza el geotermómetro de cuarzo hay que tener en consi-



Instituto Colombiano de Energía Eléctrica -109-

deración los siguientes apartes :

- El rango de temperatura de trabajo (0 - 220°C.)
- Los efectos de separación de vapor.
- La posible y/o precipitación de sílice antes de la recolección de la muestra.
- La posible precipitación de sílice después de la recolección de la muestra debido a una preservación impropia.
- Control de la sílica acuosa.
- Efecto del PH sobre la solubilidad del cuarzo y
- Disolución posible de agua caliente con agua fría antes de alcanzar la superficie .

4.4.1.2 Geotermómetros basados en las Relaciones entre Iones Metálicos.

Na/K , $\sqrt{Ca/K}$ y \sqrt{Ca} / Na .

Muchos investigadores han notado la variación del sodio y el potasio en aguas naturales geotermales como una función de la temperatura entre ellos están : White, 1965, 1970, Ellis and Mahon, 1967, Ellis 1970, - Fournier and Truesdell, 1970, 1973 y Mercado en 1970.

El geotermómetro en base a la relación sodio-potasio es bien recomendado para aguas cloruradas alcalinas en un rango de temperaturas de



Instituto Colombiano de Energía Eléctrica -110-

180 - 350⁰C. Este método es poco confiable en aguas de alto contenido de calcio y de baja temperatura ($\leq 100^{\circ}\text{C}.$) ó en lugares donde se presenten depósitos travertinos.

La mayor ventaja de estas relaciones catiónicas (Na/K) es que son menos afectadas por disolución con agua meteórica (ó freática) ó separación de vapor.

Sobre este geotermómetro. (Na/K) han trabajado ampliamente Fournier y Truesdell, los cuales desarrollaron investigaciones a tal punto de lograr la ecuación siguiente para estimativos de temperatura de acuíferos térmicos.

$$T^{\circ}\text{C.} = \frac{855.6}{\text{Log} (\text{Na} / \text{K}) + 0.8573} - 273$$

En 1973, Fournier y Truesdell, con algunas investigaciones de tipo geoquímico manifestaron que las funciones de temperaturas empíricas pueden ser definidos también por el calcio, es decir, por las relaciones $\sqrt{\text{Ca}/\text{K}}$ y $\sqrt{\text{Ca}/\text{Na}}$ y de esta manera utilizar una combinación lineal de las funciones de temperatura establecidos por cada relación individual. Este método tiene el inconveniente que la información alcanzada por las relaciones individuales se pierde al combinar las diversas funciones de temperatura en una sola función. Además, no hay evidencias del que el uso de la función de temperatura compuesta tenga ventajas sobre la utilización de las fun -



Instituto Colombiano de Energía Eléctrica -111-

ciones separadas Na/K, $\sqrt{\text{Ca}/\text{K}}$ y $\sqrt{\text{Ca}/\text{Na}}$.

Tonani (1980) ha identificado ecuaciones de temperatura relacionadas a parejas catiónicas Na/K, $\sqrt{\text{Ca}/\text{K}}$ y $\sqrt{\text{Ca}/\text{Na}}$ que son funciones equivalentes a la función compuesta Na-K -Ca de Fournier y Truesdell.

Las ecuaciones son las siguientes :

$$T_{\text{Na/K}}(\text{oC.}) = \frac{833.3}{\text{Log} (\text{Na/K}) + 0.55} - 273$$

$$T_{\sqrt{\text{Ca}/\text{K}}} (\text{oC.}) = \frac{1930}{\text{Log.} (\sqrt{\text{Ca}/\text{K}}) + 2.92} - 273$$

$$T_{\sqrt{\text{Ca}} / \text{Na}} (\text{oC.}) = \frac{1096.7}{\text{Log} (\sqrt{\text{Ca}/\text{Na}}) + 2.37} - 273$$

Las concentraciones son expresadas en equivalentes / Litro.

Las evidencias experimentales y de campo sobre los silicatos, especialmente los feldspatos, los que controlan la concentración de calcio son mucho más escasas que las del sodio y potasio, y difícilmente decisivas.



Instituto Colombiano de Energía Eléctrica -112-

Como las reacciones que involucran al calcio son sensibles al dióxido de carbono (CO_2), es posible que las funciones empíricas del calcio están relacionadas a su potencial químico en los carbonatos.

La dispersión limitada de los valores de entalpía para los enlaces químicos entre iones en los silicatos (ó sólidos de coordinación similar), corrobora el concepto de que las funciones de temperatura sean ampliamente uniformes para cada especie química en ambientes naturales diferentes.

Estas funciones de temperatura se complican cuando no coexiste el equilibrio roca - agua ó cuando se presentan mezclas, ya sea con agua de mar o aguas freáticas. Por tanto, para tener confiabilidad sobre los resultados geotermométricos se hace necesario estudiar y exponer la mayor cantidad de evidencias que cobijen el proyecto en estudio. Los modelos que mejor condicionan este aporte son : Interacción roca-agua y los modelos de mezcla, que son aplicables teniendo en cuenta :

- La probabilidad de que exista equilibrio roca - agua.
- Posibilidad de aplicación de ecuaciones de temperatura específicas para el ambiente considerado.
- Presencia de fenómenos de mezcla entre diferentes tipos de agua, y
- Presencia de procesos de precipitación de fases sólidas por fenómenos diversos.



Instituto Colombiano de Energía Eléctrica -113-

El geotermómetro Na - K - Ca que fué trabajado por Fournier y Truesdell como un sola función de la temperatura y que en 1980 es reemplazado por geotermómetros basados en las relaciones entre iones metálicos Na/K, $\sqrt{\text{Ca}/\text{K}}$ y $\sqrt{\text{Ca}} / \text{Na}$ tiene como ecuación general para estimativos de temperatura a profundidad de acuíferos térmicos.

$$T^{\circ}\text{C} = \frac{1647}{\text{Log} (\text{Na}/\text{K}) + B \text{Log} (\sqrt{\text{Ca}} / \text{Na}) + 2.24} - 273$$

Procedimiento de Cálculo.

- 1.- Expresar las concentraciones de las especies disueltas en unidades de molaridad.
- 2.- Calcular $\text{Log} (\sqrt{\text{Ca}/\text{Na}})$; si este valor es negativo calcular Log. K^* para $B = 1/3$ y estimar la temperatura.
- 3.- Si $\text{log} (\text{Ca}/\text{Na})$ es positivo, calcular Log K^* para $B = 4/3$ y determinar si la temperatura en la figura 4.7 a. es superior o inferior a 100°C ; si es mayor recalcular Log K^* utilizando $B = 1/3$ y utilizar este valor para estimar la temperatura. De otra manera,



usar $B = 4/3$ para estimar la temperatura.

$$\text{Log } K^* = \text{Log} (\text{Na/K}) + B \text{Log} (\sqrt{\text{Ca/Na}}).$$

En donde K^* es la constante de equilibrio para todas las reacciones involucrando fases acuosas y sólidas de Na, K y Ca.

4.- Recalcular.

4.4.2 Aplicaciones.

4.4.2.1 Geotermómetro de la Silice.

La figura 4.8 muestra el Diagrama de Correlación SiO_2 - temperatura ; adjunta a este se han elaborado las Curvas de Solubilidad de la Silice Amorfa y Cuarzo de acuerdo con sus ecuaciones que a continuación se presentan :

SILICE AMORFA.

$$\text{SiO}_2\text{ppm} = \text{Ant} - \text{Log} \left(4.52 - \frac{731}{T + 273} \right)$$

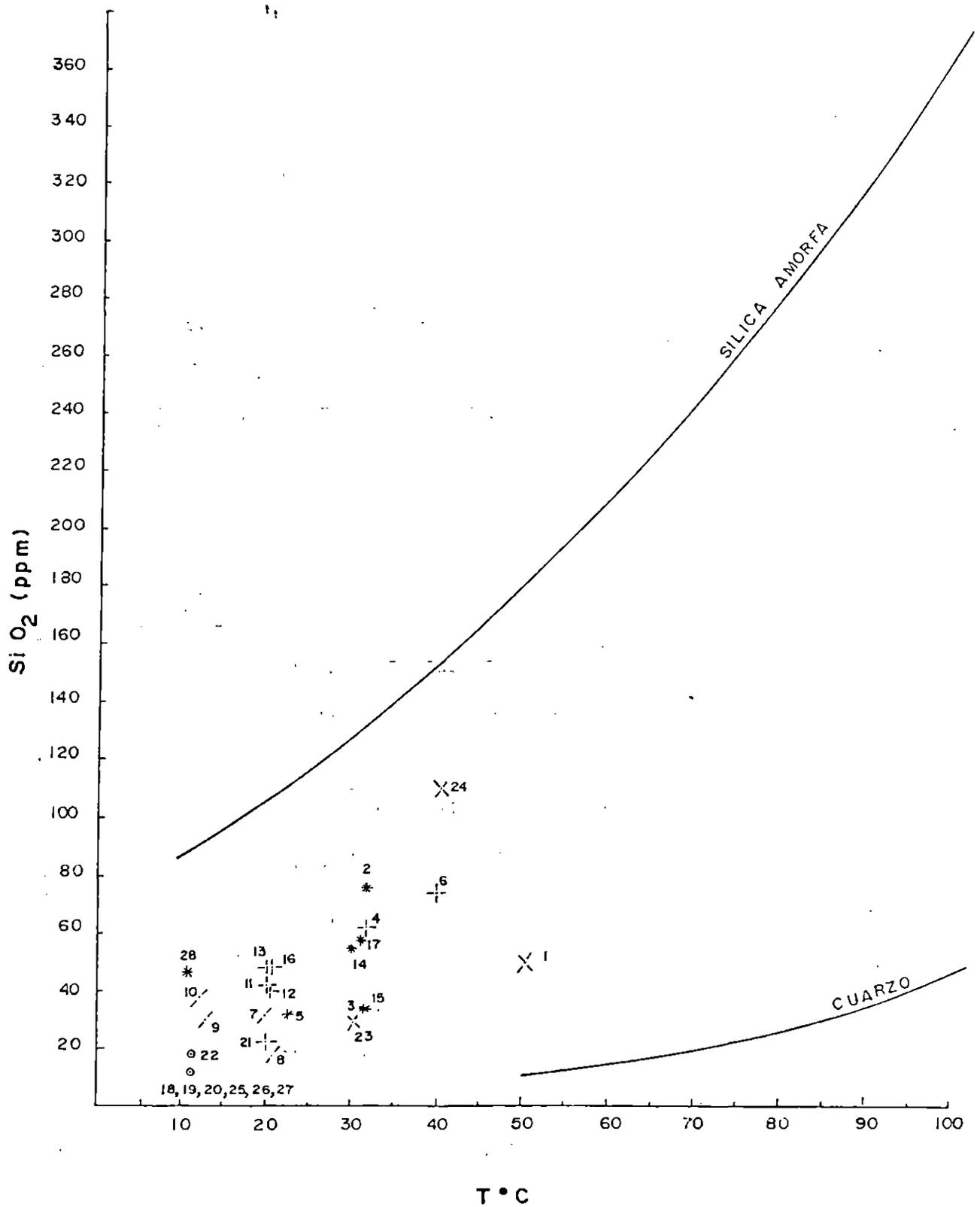


FIG. 4.8 DIAGRAMA DE CORRELACION SiO₂-T



CUARZO

$$\text{SiO}_2 \text{ ppm} = \text{Ant} - \text{Log} \left(5.768 - \frac{1.533.5}{T+273} \right)$$

En este diagrama la mayoría de las fuentes termales se encuentran en una fase intermedia entre las curvas de solubilidad, tanto de la sílice amorfa como el cuarzo, pero con mayor tendencia a estar dominadas por el cuarzo como se observa en las muestras 1,3,5 y 23 y otras con mayor tendencia a estar controladas por sílice amorfa como las muestras 28, 2, 6,24.

En forma concreta no se sabe cual de las dos fases es que controla el contenido de sílice,.

4.4.2.2 Geotermómetros basados en las relaciones entre Iones Metálicos :

Na/K , $\sqrt{\text{Ca/K}}$ y $\sqrt{\text{Ca/Na}}$.

Las figuras (4.9) (4.10) y (4.11) muestran los Diagramas de Correlación K/Na , $\text{K}/\sqrt{\text{Ca}}$ y $\text{Na}/\sqrt{\text{Ca}}$ respectivamente con sus Isotermas representativos de los Geotermómetros.

Dichos Isotermas se construyeron en base a las antes mencionadas ecuaciones propuestas por Tonani (1980).:

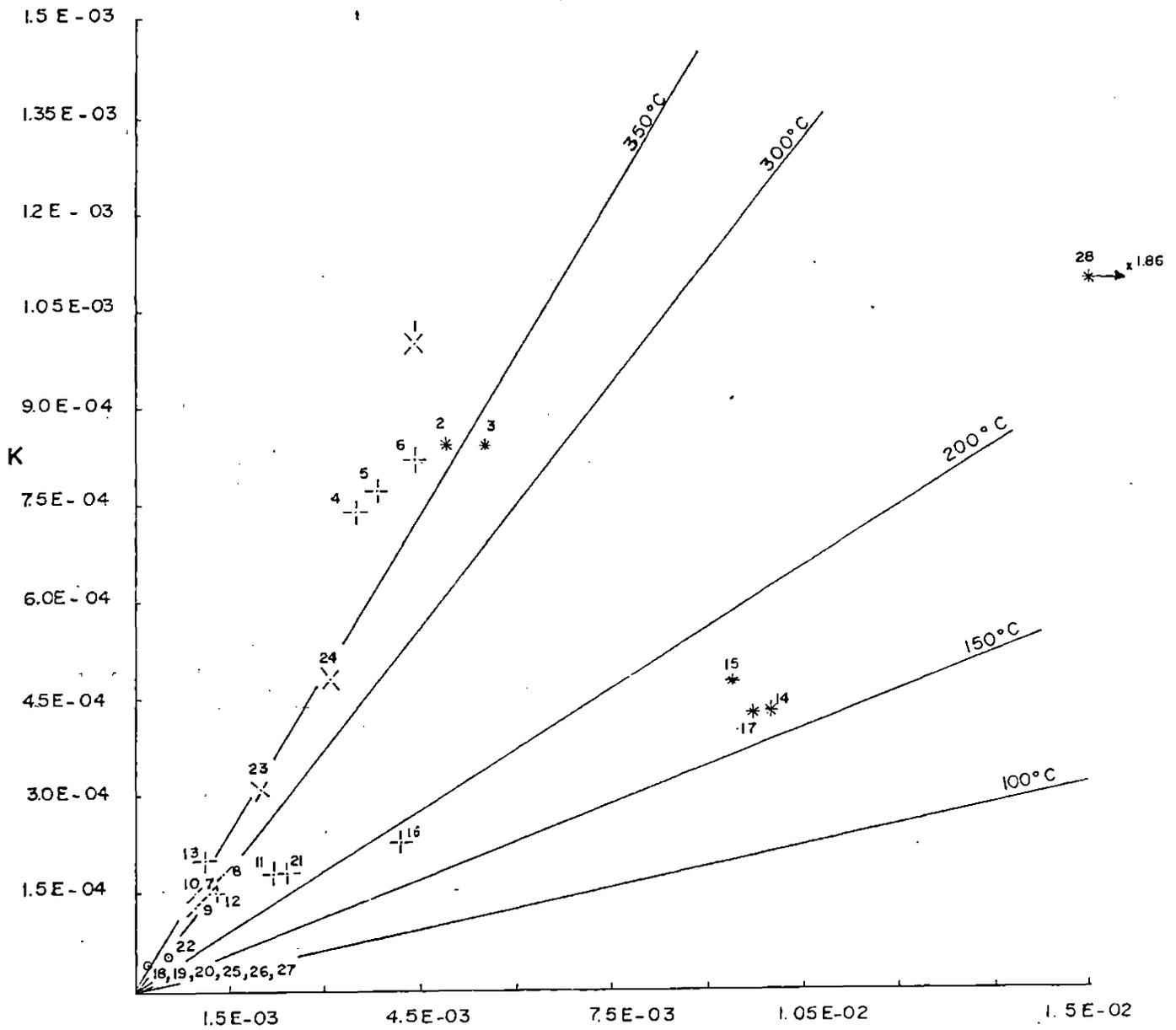


FIG. 4.9 DIAGRAMA DE CORRELACION ENTRE K Y Na CON LAS ISO-
 TERMAS DEL GEOTERMOMETRO CORRESPONDIENTE.

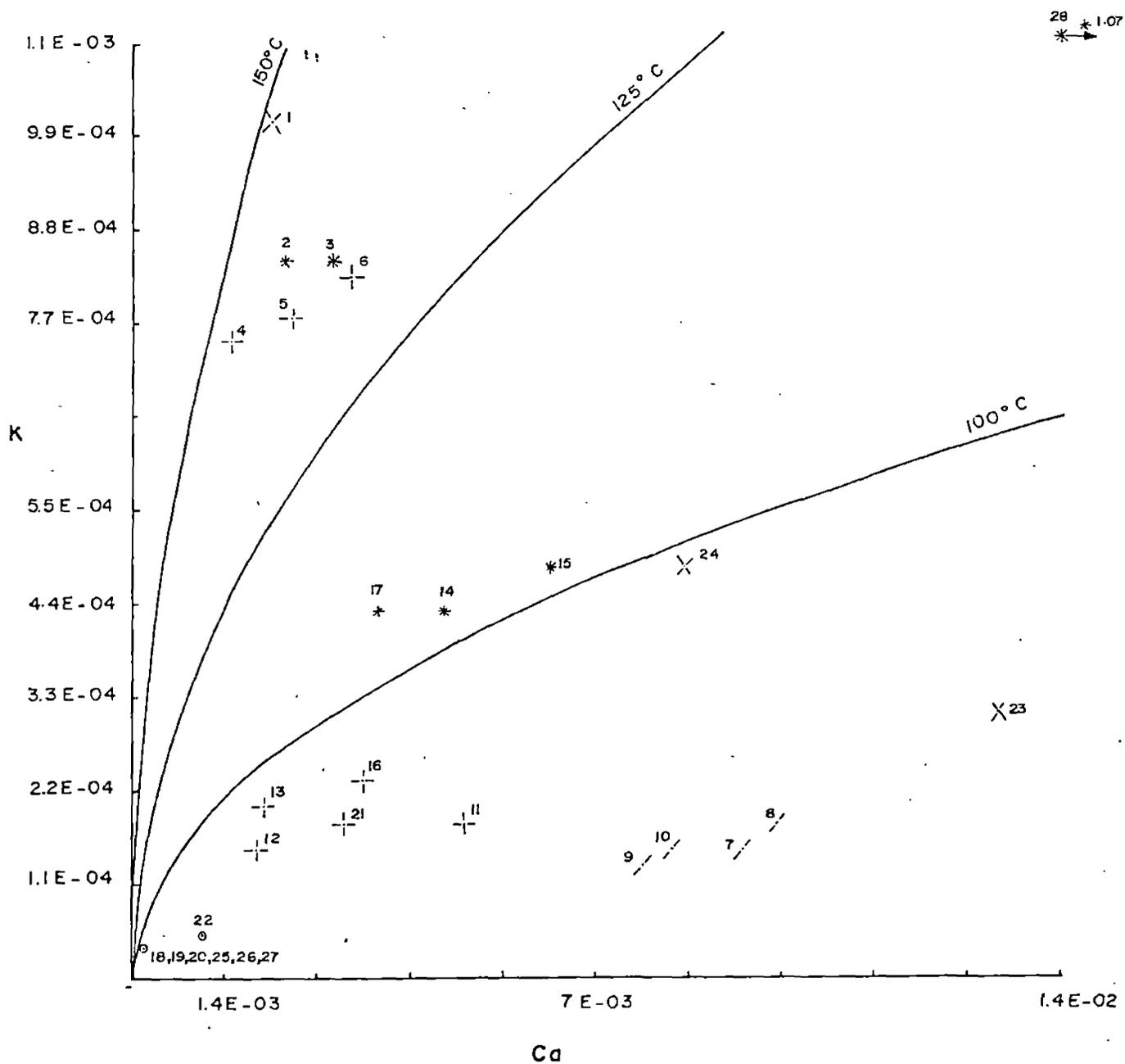


FIG. 4:10 DIAGRAMA DE CORRELACION ENTRE K. Y Ca. CON LAS ISOTERMAS DEL GEOTERMOMETRO CORRESPONDIENTE.

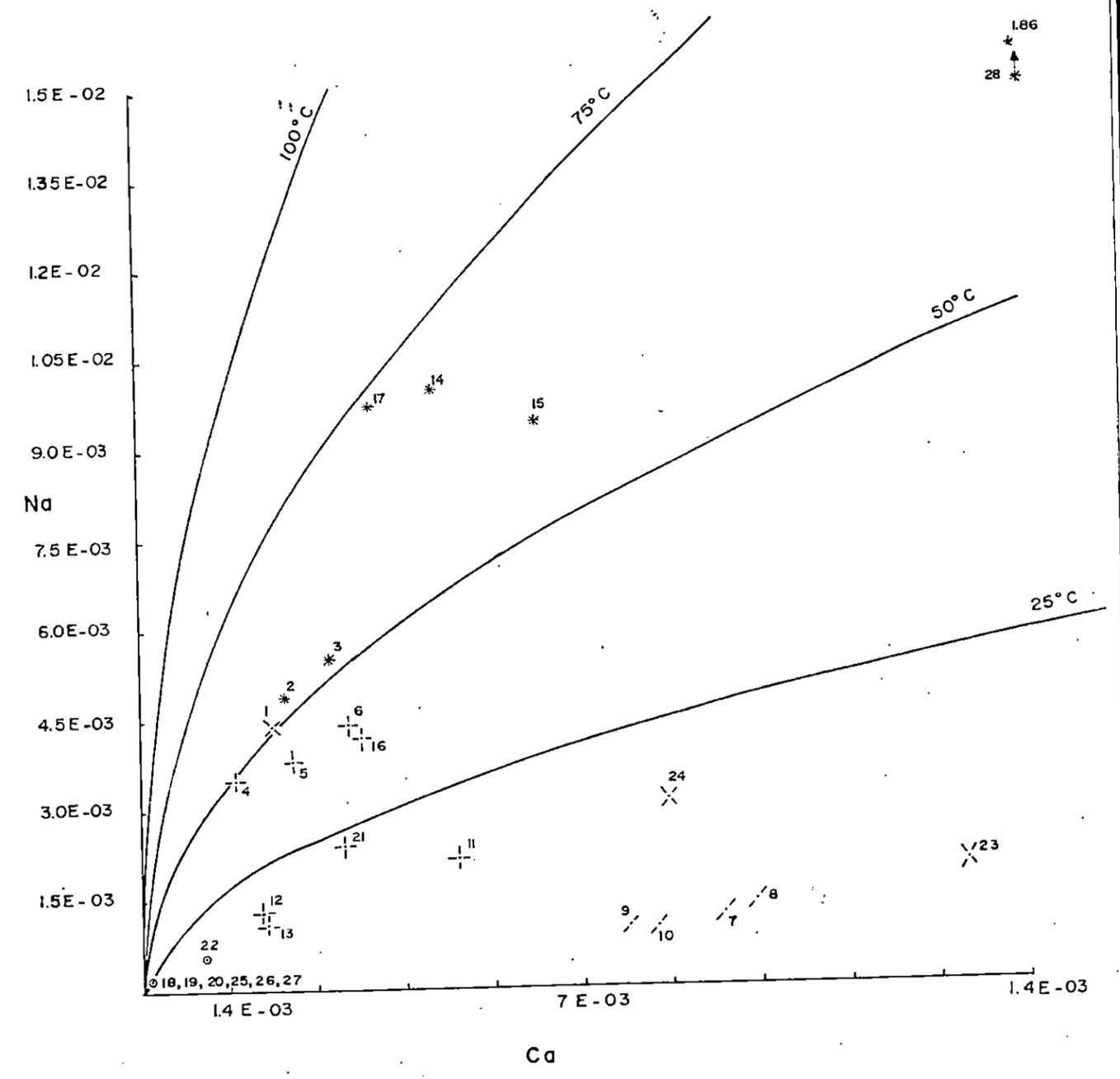


FIG. 4.11 DIAGRAMA DE CORRELACION Na - Ca CON LAS ISOTERMAS DEL GEOTERMOMETRO CORRESPONDIENTE



Instituto Colombiano de Energía Eléctrica-120-

$$T^{\circ}C = \frac{833.3}{\text{Log} (\text{Na/K}) + 0.55} - 273$$

$$T^{\circ}C. = \frac{1930}{\text{Log} (\sqrt{\text{Ca/K}}) + 2.92} - 273$$

$$T^{\circ}C = \frac{1096.7}{\text{Log} (\sqrt{\text{Ca/Na}}) + 2.37} - 273$$

Analizando la posición de cada una de las muestras en los 3 diagramas de correlación se observa. :

- Las aguas Bicarbonatadas alcalino-térreas 2,3,4,5,6 tienen consistencia en el sentido de que en los 3 diagramas permanecen agrupadas; en el diagrama K/Na se encuentran cerca de la isoterma de 350^oC, en el diagrama K/√Ca entre las isotermas de 125 y 150^oC, y en el diagrama Na/√Ca sobre la isoterma de 50^oC.

A este grupo de aguas se une la muestra No.1 a pesar de haber sido considerada como sulfatada - alcalina.

Las muestras 14,15,y 17 pertenecientes al mismo tipo de agua presentan concordancia a nivel de grupo en los 3 diagramas.:



Instituto Colombiano de Energía Eléctrica -121-

K/Na Isotermas entre 150 y 200⁰C.

K/ $\sqrt{\text{Ca}}$ Isotermas entre 100 y 125⁰C.

Na/ $\sqrt{\text{Ca}}$ Isotermas entre 50 y 75⁰C.

Las muestras Bicarbonatadas alcalino-térreas 11,12,13,y21 y las aguas freáticas (superficiales) 18,19,20,25,26,y 27 conforman un alineamiento sobre la misma isoterma en los 3 diagramas.:

K/Na Entre las isotermas de 200 y 300⁰C.

K/ $\sqrt{\text{Ca}}$ alrededor de la isoterma de 50⁰C.

Na/ $\sqrt{\text{Ca}}$ por debajo de la isoterma de 25⁰C.

- El otro grupo de aguas tipo sulfatadas alcalino - térreas que se presentan agrupadas (muestras 7,8,9 y 10) tienen la siguiente relación de temperaturas geotermométricas.

K/Na sobre la isoterma de 300⁰C.

K/ $\sqrt{\text{Ca}}$ por debajo de la isoterma de 50⁰C.

Na/ $\sqrt{\text{Ca}}$ por debajo de la isoterma de 25⁰C.

4.4.2.3 Geotermómetros de Silice, Sodio- Potasio y Sodio -Potasio-Calcio basados en sus ecuaciones respectivas.



Instituto Colombiano de Energía Eléctrica -122-

En el aparte 4.5.2 se trataron las aplicaciones de los geotermómetros en base a Diagramas de Correlación, sin tener en cuenta las ecuaciones generalizadas que se presentan para cada geotermómetro específicamente, como las expresadas en el aparte 4.5.1 (Fundamentos teóricos Geotermométricos.)

Así, para evaluar el geotermómetro de Silice se supone que su solubilidad es controlada por el Cuarzo, cuya ecuaciones son :

$$(1) \quad T^{\circ}\text{C} = \frac{1533.5}{5.768 - \text{Log SiO}_2} - 273$$

$$(2) \quad T^{\circ}\text{C} = \frac{1315}{5.205 - \text{Log SiO}_2} - 273$$

Donde: La concentración de SiO_2 está en ppm.

La ecuación (1) asume: Enfriamiento para procesos adiabáticos. ascenso rápido de fluidos y altos volúmenes de descarga.

La ecuación (2) asume: Ascenso lento de fluido y bajos volúmenes de descarga.

El geotermómetro de Sodio - Potasio tiene la ecuación siguiente para estimativos de temperatura a profundidad.



Instituto Colombiano de Energía Eléctrica -123-

$$T^{\circ}\text{C.} = \frac{855.6}{\text{Log (Na/K) + 0.8573}} - 273$$

Donde: La relación Na/K se realiza en concentración de ppm.

El geotermómetro Na-K-Ca posee la ecuación siguiente, la cual es combinación lineal de las funciones de temperatura establecidas por cada relación individual.

$$T^{\circ}\text{C.} = \frac{1647}{\text{Log. (Na/K) + B Log (} \sqrt{\text{Ca/Na) + 2.24}} - 273$$

Donde : Las relaciones entre los iones metálicos se desarrollan en unidades de Molaridad.

Su procedimiento de cálculo se muestra en el parte 4.5.1.2

La Tabla 4.6 muestra las diferentes temperaturas estimadas a profundidad por cada geotermómetro basados en las ecuaciones anteriores; haciendo referencia a las fuentes termales más representativas del área de estudio.

4.4.3 Conclusiones Geotermométricas.-

TABLA 4.6

Estimativos de Temperatura a profundidad
basados en las Ecuaciones correspondientes a cada Geotermómetro

| Muestra No. | SILICE Ec. 1 | SILICE Ec. 2 | SODIO - POTASIO | SODIO-POTASIO CALCIO |
|-----------------------|-----------------|-----------------|--------------------|-------------------------|
| MFAH - 1 | 104 | 102 | 398 | 238.5 |
| MFAN - 2 | 122 | 123 | 343 | 233.1 |
| MFAL - 3 | 89 | 85 | 320 | 191.0 |
| MChC ₁ - 4 | 113 | 112 | 386 | 233.8 |
| MChC ₂ - 5 | 89 | 85 | 375 | 226.1 |
| MChBI - 6 | 120 | 121 | 355 | 219.2 |

Nota : Temperaturas Estimadas en $\frac{0}{C}$.



Instituto Colombiano de Energía Eléctrica -125-

En base a estas consideraciones expuestas, obtenidas a partir de los Diagramas de Correlación K/Na , K/\sqrt{Ca} , y Na/\sqrt{Ca} , se puede llegar a las conclusiones siguientes :

- a.- Las aguas Bicarbonatadas alcalino-térreas 11,12,13,21,18,19,20, 25,26 y 27 se hallan en un NO equilibrio roca-agua, sin descartar que las muestras 11,12,y 13 estén supremamente asociadas a Aguas freáticas en mayor cantidad y se presenten en superficie muy diluidas.
- b.- Las aguas Bicarbonatadas alcalino-térreas de los grupos (2,3,4,5.6) y (14,15,16.17) presentan diferencias de temperaturas entre los geotermómetros muy parecidos, lo cual podría asociarse o interpretarse como una tendencia al equilibrio con rocas feldespáticas a profundidad.
- c.- La muestra 1 que fué clasificada como sulfatada alcalina con una leve tendencia a clorurada - alcalina presenta mayor discrepancia entre los geotermómetros de K/Na , y K/\sqrt{Ca} en relación con el grupo de aguas del literal (b).

Esta muestra puede estar asociada a un fenómeno de mezcla con una



Instituto Colombiano de Energía Eléctrica -126-

agua clorurada alcalina que puede provenir de un acuífero térmico somero o directamente del reservorio profundo.

- d.- Las muestras 7,8,9,10 asociadas como aguas sulfatadas alcalino-térreas presentan las mayores diferencias entre las evaluaciones geotermométricas relacionados a situación de NO - Equilibrio a profundidad.

Estas características se explican como consistentes con relación a las hipótesis genéticas : Lixiviación de rocas hidrotermalizadas que aportarían la adición de sulfatos alcalino-térreos ó de otra forma mediante cambio de Bicarbonatos por sulfatos permaneciéndolo invariables los cationes, esto se daría por el ingreso de H_2S y su oxidación a H_2SO_4 .

- e.- De acuerdo con las temperaturas estimadas a profundidad utilizando las ecuaciones correspondientes a cada geotermómetro en las fuentes termales más representativas del área de estudio (Tabla 4.6) se puede observar :

El geotermómetro de sílice aporta resultados bastante bajos que posiblemente sean producto de contaminación con aguas frías (meteó-



Instituto Colombiano de Energía Eléctrica -127-

ricas o freáticas) ó tratamiento de la muestra durante el período campo - laboratorio. Estos datos han sido obtenidos suponiendo que el cuarzo controla la solubilidad de la Sílice, detalle que es significativo en este tipo de cálculo.

El geotermómetro Sodio-Potasio presenta el caso contrario al de sílice, es decir , con temperaturas un poco altas que hacen creer en la poca confiabilidad acerca de esta geotermómetro.

Las temperaturas estimadas a profundidad con el Geotermómetro - Sodio - Potasio- Calcio parecen ser las de mayor confiabilidad dada la concordancia que se presenta entre sus temperaturas, (Tabla 4.6) y su distribución en los diferentes Diagramas de Correlación mostrados anteriormente; su temperatura promedio estimada a profundidad es 224°C .



5. ASPECTOS GEOTERMICOS.

A continuación se exponen las consideraciones geotérmicas para el sistema Chiles - Cerro Negro y para el sistema Cumbal, destacando que el primero cuenta hasta la fecha con una información geovulcanológica y geoquímica comparativamente más abundante.

5.1 SISTEMA CHILES - CERRO NEGRO.

5.1.1 Fuente de Calor.

El carácter evolucionado del episodio II de ambos volcanes nos indica su conexión con una cámara magmática somera y probablemente única. Este evento eruptivo no culminó con un colapso caldérico sugiriendo que el líquido desalojado durante la erupción fué reemplazado por magma procedente de los niveles profundos de la corteza.

La cifra poco elevada del volúmen de los productos emitidos durante el evento II del Chiles y Cerro Negro debe ser sustancialmente incrementada a juzgar por la ausencia de material piroclástico en cercanías de los edificios volcánicos emitido durante la fase explosiva del evento. El carácter subglacial de la explosión convirtió este material piroclás

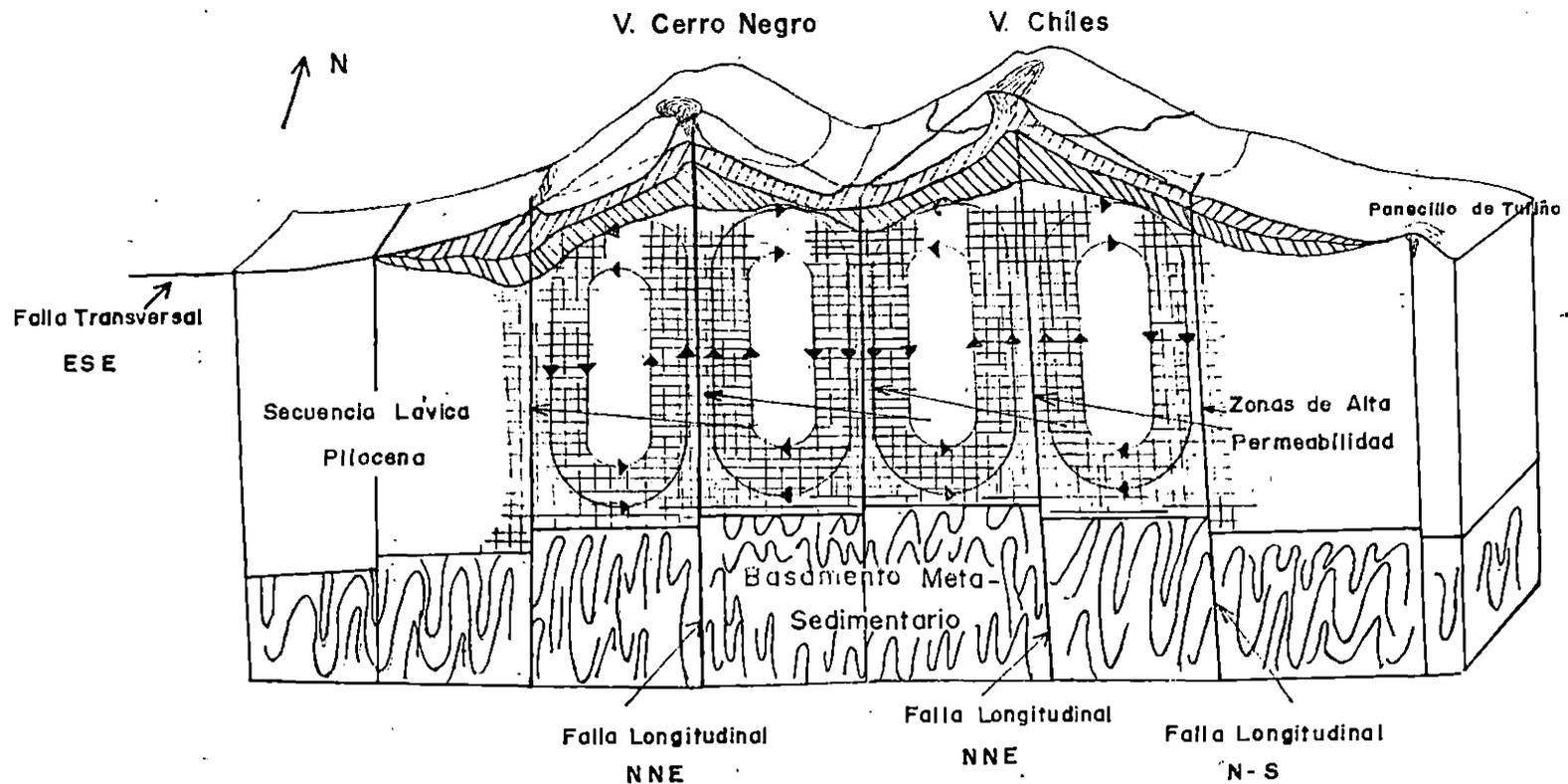


FIGURA No. 8

MODELO GEOTERMICO PRELIMINAR DE LOS VOLCANES

CHILES Y CERRO NEGRO

(Permeabilidad Secundaria y Confinamiento por Self - Sealing)





tico en morrenas y lahares.

De lo anotado anteriormente se desprende que debe existir en el sistema Chiles - Cerro Negro una cámara magmática somera de amplias dimensiones para que se comporte como una fuente de calor significativa.

5.1.2 Reservorio.

La secuencia lávica pliocena sobre la cual se apoyan los productos eruptivos del Chiles y Cerro Negro tiene un espesor que en algunos sitios supera los 1000 metros y con características de fragilidad y permeabilidad secundaria muy acentuadas para que se comporte como un reservorio geotérmico económicamente atractivo.

Adicionalmente la situación tectónica observable en el área de estudio favorece el desarrollo de una permeabilidad secundaria por fracturamiento en donde se destaca el fallamiento en bloques producido por la intersección de las fallas longitudinales de orientación aproximada NNE-SSW con las transversales ESE-WNW lo cual acentúa la fisuración en las zonas de cruce y facilita la recarga del sistema hidrogeológico profundo.

Por otra parte, existen fuentes termales principalmente alineadas so-



Instituto Colombiano de Energía Eléctrica -131-

bre las zonas de fallamiento transversal las cuales resultan de la mezcla de aguas calientes que ascienden directamente del reservorio con aguas meteóricas frías.

Zonas de alteración hidrotermal particularmente destacadas en los sitios de cruce de fallas nos indican el ascenso de fluidos calientes desde profundidad.

Depósitos de brechas de explosión hidrotermal en cercanías de los edificios volcánicos que afectan inclusive rocas pliocenas, nos sugieren la presencia de acuíferos térmicos someros alimentados desde reservorios mas profundos.

Todo lo anterior nos conduce a suponer la presencia en profundidad de un reservorio geotérmico con dimensiones atractivas, el cual puede ser aprovechado con perspectivas económicas.

5.1.3 Capa Sello.

La alteración hidrotermal en superficie es frecuente en las rocas eruptivas presentes en cercanías de los edificios volcánicos Chiles y Cerro Negro particularmente en las zonas de cruce de fallas afectando a todos



los niveles estratigráficos, pero particularmente a la secuencia lávica pliocena y desarrollando un típico fenómeno de self-sealing el cual confinaría el sistema geotérmico.

La alteración hidrotermal observable en el área es de tipo ácido con la presencia de minerales de arcilla (montmorillonita , caolinita) y minerales del grupo de los sulfatos (alunita, yeso,) como también de tipo alcalina con la presencia de " silica sinter ",

La zona argilítica del sistema hidrotermal está constituida por la alteración hidrotermal ácida y alcalina que en la practica hace las veces de cubierta confinante o de autosellamiento.

Por otra parte, la estrecha relación existente entre alteración hidrotermal y fallamiento es una situación particularmente favorable desde el punto de vista geotérmico ya que si nos suponemos un fallamiento subvertical el cubrimiento areal del reservorio estaría configurado por el delineamiento y unión de las diferentes localidades donde se manifiesta la alteración hidrotermal en superficie (Ver figura 5.)

5.2 SISTEMA CUMBAL.



Instituto Colombiano de Energía Eléctrica -133-

5.2.1 Fuente de Calor.

Grandes volúmenes de material eruptivo fueron emitidos en el área del volcán Cumbal en el pleistoceno inferior lo cual se manifiesta por las grandes dimensiones del colapso caldérico (17 Km de diámetro mayor por 12 de diámetro menor) asociado a ese evento volcánico .

Todavía son visibles en superficie los restos lávicos erodados por la glaciación, los depósitos morrénicos aledaños al actual edificio volcánico y los grandes depósitos laháricos al NW y SE del mismo edificio, pertenecientes a la actividad del pleistoceno inferior del Cumbal. Esto supone una intensa actividad explosiva asociada al fenómeno eruptivo.

Las reactivaciones posteriores del sistema Cumbal en el pleistoceno medio y superior, las variaciones en el quimismo de sus productos emitidos en el pleistoceno superior (59-61% de SiO_2) sugieren una evolución magmática en el tiempo, como para suponer actualmente una cámara magmática somera lo suficientemente voluminosa la cual se comportaría como una fuente de calor capaz de producir una gran anomalía térmica.

5.2.2 Reservorio.



Instituto Colombiano de Energía Eléctrica -134-

La secuencia lávica pliocena con sus características de continuidad lateral y vertical, fragilidad y permeabilidad, constituye una unidad litológica ideal como reservorio geotérmico.

Particularmente en el área del Cumbal el elemento permeabilidad debe ser muy destacado debido al gran fracturamiento que pudieron inducir en las rocas pliocenas los colapsos caldéricos del pleistoceno inferior y medio respectivamente. El colapso caldérico del pleistoceno inferior indudablemente afectó grandes volúmenes de roca a juzgar por su cubrimiento areal (17 Km. x 12 Km) y su desplazamiento vertical.

El del pleistoceno medio, a pesar de tener dimensiones comparativamente menores que el precedente, reactivó las fisuras previamente formadas, creó nuevas e incrementó por su puesto la permeabilidad secundaria por fracturamiento.

Los eventos eruptivos subsiguientes han contribuido indudablemente a sostener esa situación de permeabilidad favorable.

Por otra parte, la intensa actividad fumarólica con gran cubrimiento areal, en las partes somitales del edificio volcánico nos sugieren



La presencia en profundidad de un sistema hidrotermal muy interesante.

Adicionalmente, existen manifestaciones termales localizadas a lo largo de la falla del Río Blanco que suponen la presencia de fluidos geotérmicos acumulados en profundidad.

En definitiva la situación vulcano - estructural, acompañada de los fenómenos termales nos sugieren la existencia en el área del volcán Cumbal de un reservorio geotérmico de amplias dimensiones como para permitir su explotación con fines económicos.

5.2.3 Capa Sello.

Un gran volumen de material emitido durante el evento eruptivo del Cumbal I y dispuesto encima de la secuencia lávica pliocena constituye tanto por su continuidad lateral como por su considerable espesor y comparativamente baja permeabilidad, una cobertura impermeable bastante efectiva. Similar comportamiento experimentan los productos eruptivos del Cumbal II localizados hacia el borde sur del colapso caldérico del Cumbal I, pero con menor cubrimiento areal.

Complementariamente, los depósitos laháricos, periféricos, al edi-



Instituto Colombiano de Energía Eléctrica -136-

ficio volcánico actual, constituyen una secuencia impermeable de gran espesor que contribuye al confinamiento del sistema geotérmico.

Por otra parte el estratovolcán de Cumbal III con su gran espesor de productos lávicos hace su aporte para hacer más efectivo el fenómeno confinante.

Las pocas manifestaciones termales observables durante esta etapa de investigación en el dominio del volcán Cumbal, las cuales prácticamente se reducen a unas 4 ó 5 fuentes de carácter ácido, aflorantes a lo largo de la falla del río Blanco, corroboran lo expuesto previamente.

En definitiva la capa sello para el sistema Cumbal la constituirían los productos eruptivos de los diferentes episodios del Cumbal y adicionalmente contribuirían los depósitos laháricos del Cumbal I, observables en la periferia del actual edificio del Cumbal.

6. CONCLUSIONES.

SISTEMA CHILES-CERRO NEGRO.



Instituto Colombiano de Energía Eléctrica -137-

Las conclusiones que se establecen para este sistema son el resultado del análisis de la información disponible, para llegar a la definición de un modelo geotérmico preliminar que sirva de base para la programación de la siguiente fase II de investigaciones vulcanológicas y geoquímicas detalladas, estudios geofísicos y la ejecución de perforaciones de diámetro reducido.

a.- Anomalía Térmica.

Las investigaciones vulcanológicas y geoquímicas desarrolladas hasta la fecha permiten establecer que en el área de los aparatos volcánicos Chiles y Cerro Negro existe una anomalía térmica regional muy importante.

Esta zona ha sido definida por una intensa actividad volcánica durante un período largo que abarca varios millones de años y que ha persistido hasta tiempos subactuales en los centros eruptivos.

La naturaleza de los volcánes Chiles y Cerro Negro, las características y distribución de las aguas termales y la tectónica de la región, todo lo cual se ha venido definiendo en esta fase I de trabajo, nos permitirán desarrollar un programa más efecti-



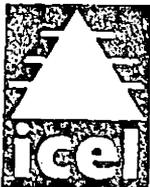
Instituto Colombiano de Energía Eléctrica -138-

vo de investigación geofísica el cual conjuntamente con el desarrollo paralelo de investigaciones detalladas vulcanológicas y geoquímicas, contribuirán a perfeccionar el modelo geotérmico preliminar que se ha propuesto.

De hecho, el máximo de la anomalía térmica tendría que coincidir con el eje volcánico activo Chiles - Cerro Negro, el cual disminuiría progresivamente al alejarse de los conos volcánicos. Lo anterior encuentra su confirmación, en la presencia de manifestaciones termales al alta temperatura (Aguas Hedionadas) en cercanías del cono volcánico del Chiles y de más baja temperatura (Aguas El Indio) en cercanías de Tufiño, un poco alejado del centro volcánico.

b.- Reservorio.

Las vulcanitas pliocenas presentes en el área muestran continuidad de afloramientos, considerable fracturamiento secundario y gran espesor, suficientes para contener importantes acuíferos con interés geotérmico. En efecto, la secuencia de las vulcanitas pliocenas alcanzan espesores que en algunos sitios pueden superar los 1000 metros con una permeabilidad media a alta depen -



Instituto Colombiano de Energía Eléctrica -139-

diendo de los fenómenos de fracturación.

c.- Capa Sello.

Un fenómeno de auto-sellamiento (self sealing) estaría confinando los fluidos geotérmicos en el reservorio impidiendo su escape hacia la superficie.

El fenómeno ha sido producido por el ascenso de fluidos geotérmicos hacia la superficie los cuales han alterado la roca huésped y depositado minerales secundarios. Todo esto ha contribuido al taponamiento de gran parte de las fracturas por donde se efectuó el ascenso, dando lugar finalmente al fenómeno de autosellamiento.

d.- Recarga.

Se efectúa por las partes más elevadas de la cordillera que corresponden a las cumbres de los aparatos volcánicos. En efecto, la fracturación en estos sitios es bastante acentuada la que acompañada de la existencia de conductos volcánicos y de los patrones de alineamiento tectónico, contribuyen a crear un ambiente propicio para la infiltración de agua en el subsuelo.



Instituto Colombiano de Energía Eléctrica -140-

Se formarán así dos patrones de flujo, hacia el este y hacia el oeste siguiendo los flancos de la cordillera. Circularían por el substrato inmediato de los volcánes, produciendo la recarga del sistema geotérmico.

SISTEMA CUMBAL.

Los cuatro eventos volcánicos identificados en el Sistema Cumbal y sus fenómenos de colapso caldérico asociados al Cumbal I y II, contribuyen a crear una situación particularmente favorable para el desarrollo de un sistema geotérmico económicamente atractivo.

Las ulteriores investigaciones vulcanológicas y geoquímicas detalladas, lo mismo que las geofísicas, todas previstas en la fase II de estudios, contribuirán a afinar la situación geotérmica del sistema Cumbal dentro del área del proyecto binacional.

a.- Anomalía Térmica.

Lo discutido para el sistema Chiles - Cerro Negro es también válido para el sistema Cumbal ya que la anomalía térmica identificada en el área es de carácter regional y afectaría a ambos



Instituto Colombiano de Energía Eléctrica-141-

sistemas volcánicos.

b.- Reservorio.

Se localizaría en las vulcanitas pliocenas como ocurre con el sistema Chiles - Cerro Negro.

Esta secuencia lávica que se caracteriza por su gran fragilidad debe estar muy fracturada a juzgar por los fenómenos de colapso caldérico que han venido ocurriendo tanto en el pleistoceno inferior como en el pleistoceno medio y por los patrones de fallamiento existentes. Esto daría lugar al desarrollo de una intensa permeabilidad secundaria por fracturamiento la cual cubriría al menos unos 125 Km², incluidos dentro del área del colapso caldérico.

c.- Capa Sello.

Los productos volcánicos emitidos por el Sistema Cumbal durante sus diferentes episodios eruptivos se pueden comportar como una espesa sobrecapa de baja permeabilidad, confinante del sistema geotérmico. En efecto, el volumen de los productos lávicos y piroclásticos emitidos durante el evento del pleistoceno inferior, fué de tal magnitud que ha sepultado completamente las lavas pliocenas dentro del dominio



del área de colapso.

Esto se ha visto favorecido por la posterior deposición de los productos emitidos durante los eventos del Cumbal II y III.

d.- Recarga.

Las consideraciones hidrogeológicas de recarga consideradas para el sistema Chiles - Cerro Negro siguen siendo válidas para el sistema Cumbal.

Parte de la recarga se efectuaría por las áreas más elevadas de la cordillera, es decir por las cumbres del sistema volcánico. La fracturación en estos sitios es bastante acentuada lo que acompañado de las precipitaciones de agua meteórica, contribuye a crear un ambiente propicio para la infiltración de agua en el subsuelo.

La Laguna Cumbal podría contribuir a la recarga, en este sentido su substrato de material de depósito glacial se comportaría como un acuífero regulando la infiltración del agua por el borde caldérico hasta alcanzar las partes más profundas de las secuencias lávicas.



B I B L I O G R A F I A

G E O V U L C A N O L O G I A

- ARANGO, J.L., PONCE, A., 1982. Mapa Geológico Generalizado del Departamento de Nariño. Escala 1:400.000. Ingeominas.
- ARANGO, J.L., PONCE, A., 1982. Reseña Explicativa del Mapa Geológico del Departamento de Nariño. Ingeominas. Informe 1818.
- BARRERO, D., 1979. Geology of the Central Western Cordillera, West of Buga and Roldanillo, Colombia. Publicaciones Geológicas Especiales de Ingeominas. Bogotá, Colombia, No.4, p.p. 1-75 .
- BROWNE, P.R.L., 1982. Hydrothermal Alteration .. Introduction to Geothermal Prospecting. University of Auckland, Geothermal Institute. New Zealand.
- DECKER, R. and DECKER, B., 1981. Volcanoes. W.H. Freeman and Company. San Francisco.
- GRINDLEY, G.W., 1963. Geology and Structure of Waitapu Geothermal Field. N.Z. DSIR. Bulletin 155. New Zealand.



ICEL, CHEC, 1983 . Macizo Volcánico del Ruíz, Investigación Geotérmica, Fase. II, Etapa A. Informe Final . Bogotá.

IRVING, E.M., 1971. La Evolución Estructural de los Andes mas Septentrionales de Colombia. Ingeominas. Volumen XIX, No.2.

LOZANO, E.A., 1981. Surface Alteration at the Waiotapu Geothermal Field, New Zealand. Project for Diploma in Energy Technology (Geothermal) - Report. Project Report No. GEOTHERM 81.10. New Zealand.

LLOYD, E.F., 1972. Geology and Hot Springs of Orakei Korako. New Zealand Geological Survey. Bulletin 85.

LLOYD, E.F., 1963. Thermal Activity at Waiotapu. New Zealand DSIR. Bulletin 155

NAIRN, I.A., SOLIA, W., 1980. Late Quaternary Hydrothermal Explosion Breccias at Kawerau Geothermal Field. New Zealand Bull. Volcanol. Vol 43 - 1 .

NAVARRO, J.M., ALMEIDA, E., AYALA, J., 1982. Geovulcanología del Norte del Ecuador y en Particular del Area de Tufiño. Informe Inédito OLADE - INECEL.

OLADE, INECEL, ICEL, 1983. Estudio de Prefactibilidad del Proyecto Binacional Chiles - Cerro Negro. Informe Final de la Misión de Evaluación Geovulcanológica. Ecuador - Colombia.



OLADE, ICEL, 1982. Estudio de Reconocimiento de los Recursos Geotérmicos de la República de Colombia. Informe final.

OLADE, ICEL, 1982. Estudio de Reconocimiento de los Recursos Geotérmicos de la República de Colombia. Informe de Geología Regional.

OLADE, ICEL, 1982. Estudio de Reconocimiento de los Recursos Geotérmicos de la República de Colombia. Informe Volcanológico.

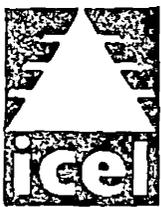
STEINER, A., 1977. The Wairakei Geothermal Area, North Island, New Zealand : Its Subsurface and Hydrothermal Rock Alteration. New Zealand Geological Survey, Bulletin 90.

STEINER, A., 1963. The Rocks Penetrated by Drill holes in the Waiotapu - Thermal Area and Their Hydrothermal Alteration. N.Z. DSIR. Bulletin 155.

STUDT, F.E., 1963. Waiotapu Hydrology. N.Z. DSIR. Bulletin 155

WHITTEN. D.G.A., BROOKS, J.R.V., 1979. A Dictionary of Geology. Penguin Book Warau Road, Auckland 10, New Zealand.

YAMASAKI, T., 1981. Geotectonics of Some Geothermal Field Associated with The Quaternary Volcanic Zone. Reserch Institute of Industrial Science. Kyushu University. Japan.



GEOQUIMICA

- ELLIS A.J. AND MAHON W.A.J., 1977. Chemistry and Geothermal Systems. Edited by Jesse Denton, Belton, Texas. The United States of America.
- FOURNIER. R., 1981. Application of Water Geochemistry to Geothermal Exploration and Reservoir Engineering. Geothermal Systems: Principles and Case Histories. Edited by L. Ryboch and L.J.P. Muffer.
- HENLEY R.W. MAHON W.A.J. AND TURNEY T.A., 1982 .Introduction to Geothermal Prospecting. Edited by the Geothermal Institute, University of Auckland, New Zeland.
- KOGA AKITO, 1981. Hydrothermal Geochemistry. Edited by the University of Kyushu, Japón.
- OLADE , 1978. Metodología de Exploración Geotérmica Fases de Reconocimiento y Prefactibilidad. Editada por OLADE. Quito, Ecuador.
- OLADE, GEOTERMICA ITALIANA Y CONTECOL, 1981. Estudio de Reconocimiento de los Recursos Geotérmicos de la República de Colombia. Informe Hidrogeoquímico.
- UNESCO , 1973 . Geothermal Energy. Edited by H. Chistipher H. Armstead, Paris .

MINISTERIO DE MINAS Y ENERGIA



01003987
BIBLIOTECA

Proyecto Geotérmico Chiles - Cerro
Negro/instituto Colombiano de Energía
Eléctrica

303.792 I597p Ej.1

CATALOGADO POR: HELP FILE LTDA

FECHA
RECIBIDO

PRESTADO A

FECHA
DEVUELTO