

11
248



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE INGENIERIA

POSIBILIDADES DE DESARROLLO GEOTERMICO
EN BERLIN. EL SALVADOR. CENTRO AMERICA

T E S I S

PRESENTADA A LA FACULTAD DE INGENIERIA
DE LA

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

P O R :

ALVARO ELOIN JIMENEZ DIAZ BARRIGA

COMO PARTE DE LOS REQUISITOS
PARA OBTENER EL GRADO DE:
INGENIERO GEOLOGO

MEXICO, D. F.

1993

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



UNAM – Dirección General de Bibliotecas Tesis Digitales Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS © PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis está protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

RESUMEN:

El presente es un trabajo sobre las posibilidades de desarrollo de un campo geotérmico ubicado en la República de El Salvador, mismo que se conoce con el nombre de Berlín. Para determinar sus características, se realizaron varios estudios dentro de las disciplinas de la Geoquímica, Geofísica y Geología.

En lo que corresponde a la geoquímica, se determinó que la mayoría de las aguas presentes son del tipo bicarbonato, encontrándose además, algunas con características de mezcla entre las de origen superficial y otras de circulación profunda, por lo que se definieron tres tipos:

- a) Bicarbonato sódico-cálcicas
- b) Débilmente alcalinas
- c) Sulfatadas ácidas

Esto llevó a definir, asimismo, 3 acuíferos, siendo el más profundo el que alimenta a los pozos productores.

En lo que respecta a los gases, se encontraron relaciones indicativas de las condiciones a

profundidad y se determinó que la fumarola "El Hoyón", ubicada al S de los actuales pozos perforados, es la más representativa del yacimiento en superficie.

Finalmente, los estudios geotermométricos dan para el campo una temperatura de alrededor de los 300°C.

De los estudios geofísicos el resultado más importante fue el proporcionado por los perfilamientos eléctricos, mismo que nos da unas anomalías de 10 ohms-metro y 20 ohms-metro, para la zona del yacimiento.

En cuanto a la geología, los pozos perforados dieron la posibilidad, mediante el estudio de los núcleos, de determinar la litología de los mismos, estableciendo la secuencia estratigráfica presente en el área.

Por último, el estudio de los minerales de alteración, así como también las inclusiones fluídas, llevaron a la representación del modelo de la distribución del fluido hidrotermal que nos muestra la disminución de la temperatura hacia la superficie y la descarga del yacimiento hacia el N de los pozos perforados.

INDICE

RESUMEN	i
INDICE	iii
LISTA DE FIGURAS	iv
AGRADECIMIENTOS	v
CAPITULO I. INTRODUCCION	1
CAPITULO II. GENERALIDADES	3
CAPITULO III. GEOQUIMICA	7
CAPITULO IV. GEOFISICA	21
CAPITULO V. GEOLOGIA	26
CAPITULO VI. CONCLUSIONES	54
BIBLIOGRAFIA.....	58

INDICE DE FIGURAS

NUMERO DE FIGURA	DESCRIPCION	PAGINA
FIGURA II.1.	... Localización del área	4
FIGURA III.1.	... Actividad fumarólica	8
FIGURA III.2.	... Diagrama triangular	11
FIGURA III.3.	... Isorrelación CO ₂ /H ₂ S	15
FIGURA III.4.	... Isorrelación H ₂	17
FIGURA III.5.	... Geotemperatura	19
FIGURA IV.1.	... Resultado de los sev	22
FIGURA IV.2.	... Resultado gravimétrico	24
FIGURA V.1.	... Fisiografía del área	27
FIGURA V.2.	... Ubicación geotectónica	29
FIGURA V.3.	... Génesis de las cadenas	30
FIGURA V.4.	... Mapa geológico regional	33
FIGURA V.5.	... Ubicación de pozos profundos	39
FIGURA V.5.1...	Sección A - A'.....	40
FIGURA V.5.2...	Sección B - B'.....	41
FIGURA V.6.	... Paragénesis de la mineralogía	48
FIGURA V.6.1...	Distribución de las zonas	49
FIGURA V.7.	... Modelo de caldera	51
FIGURA VI.1.	... Modelo de la distribución	56

CAPITULO I

INTRODUCCION

Ya en el siglo pasado se había reportado actividad fumarólica en el área de Berlín, pero viene a ser en el año de 1966, cuando se realiza el primer estudio de recursos geotérmicos en la República de El Salvador como proyecto conjunto C.E.L.(Comisión Ejecutiva Hidroeléctrica del Río Lempa)-O.N.U. (Organización de las Naciones Unidas) y como parte del mismo, se realizan en el área de Berlín las primeras investigaciones orientadas a evaluar este recurso energético.

Diez años más tarde, nace el proyecto geotérmico de la zona de Berlín y posteriormente, se efectúan levantamientos geológicos con el objeto de determinar que tipo de unidades litoestratigráficas se encuentran en el área.

De 1978 a 1981, como resultado de los estudios de viabilidad, se perforan seis pozos profundos, de los cuales 4 han resultado buenos productores y 1 es escaso productor, dichos pozos se definen como: TR-1; TR-2; TR-3; TR-4; TR-5; Y TR-9; con los que, además, se obtuvo la litología a profundidad.

El objeto del presente trabajo, es el de examinar los diversos datos proporcionados por los estudios realizados en el área y por los resultados de la perforación de los pozos profundos, para con esta información, determinar el posible desarrollo geotérmico de la zona.

CAPITULO II

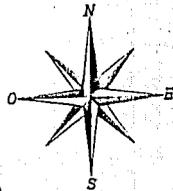
GENERALIDADES

El Salvador es la menor de las repúblicas de América Central y la única que no tiene salida al Océano Atlántico. Limita al N-NW con Guatemala; al N-NE con Honduras y al S con el Océano Pacífico, encontrándose a los $13^{\circ}10'$ - $14^{\circ}25'$ de latitud Norte y $87^{\circ}40'$ - $90^{\circ}10'$ de longitud Oeste (Fig.II.1.).

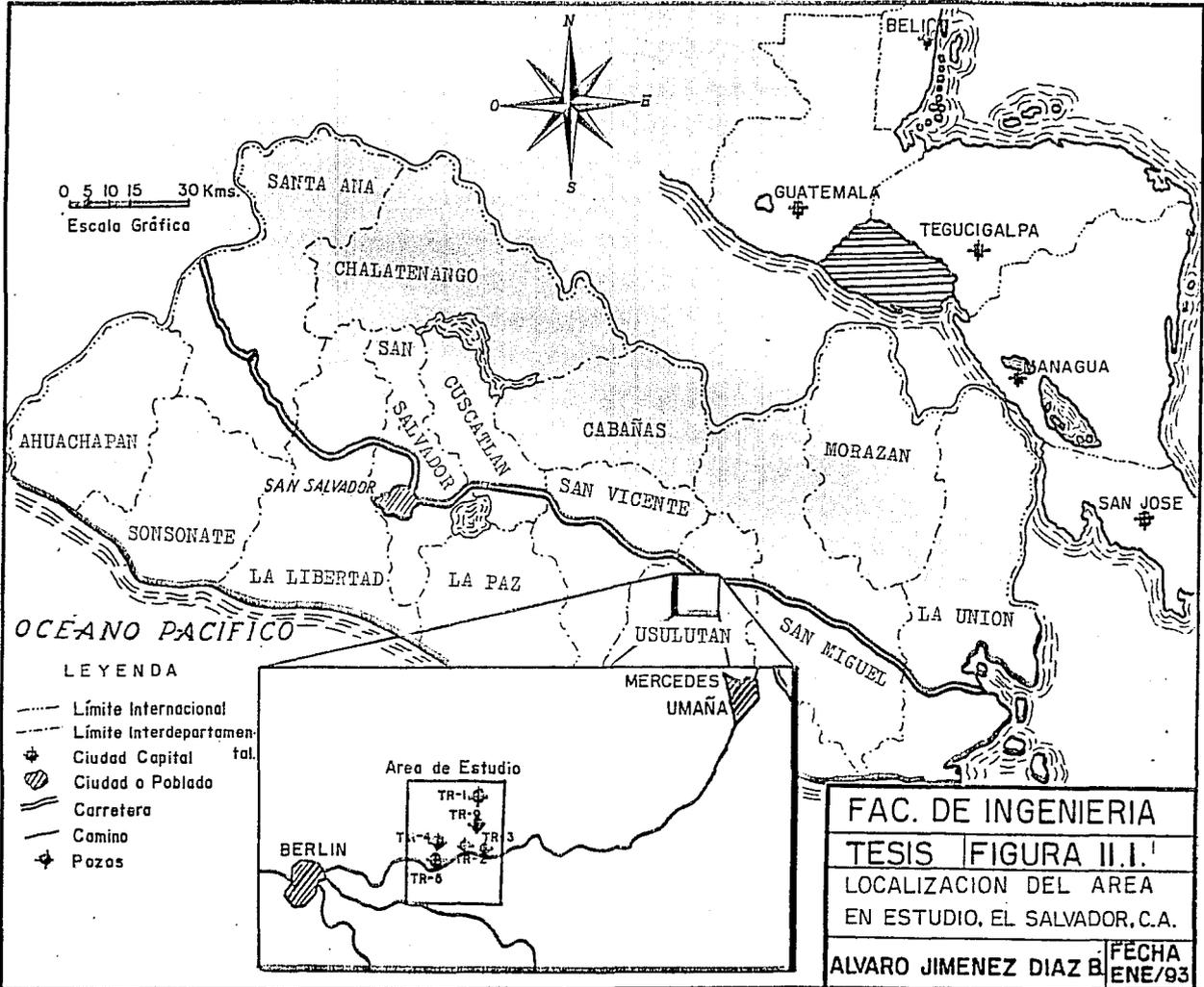
En El Salvador se distinguen dos unidades de relieve bien diferenciadas:

a) La llanura costera, con una anchura de 75 a 100 km y con una suave pendiente transversal formada por depósitos aluviales recientes. Junto a la costa se ha formado una serie de albúferas y lagunas interiores. Dicha costa, que tiene una extensión de 300 km, recibe el nombre de Costa de Bálsamo.

b) La región montañosa, ocupa una gran parte del país y es una zona de activo vulcanismo con grandes mantos de lava y materiales del terciario y cuaternario.



0 5 10 15 30 Kms.
Escala Gráfica



El clima también es diferente en ambas regiones: tropical lluvioso en la región costera y templado en la vertiente de las serranías. Junto a la costa las lluvias son muy abundantes (2,000 mm) y están motivadas por fenómenos monzónicos locales y por el frente intertropical. Posee dos estaciones bien diferenciadas: <<verano>>, que corresponde a la temporada seca y de temperaturas más bajas, e << invierno >>, estación lluviosa con las temperaturas más altas. Las temperaturas fluctúan entre los 25°C - 28°C, con escasa oscilación anual y con la altitud se hacen más agradables.

Los ríos son cortos, torrenciales y de carácter regular, el más importante es el Río Lempa (300 km). Existen numerosos lagos de origen volcánico y los mayores son el Ilopango, el Guija y el Coatepeque, estos últimos ocupando antiguos cráteres. La selva tropical y extensos pastos de tipo sabana con asociaciones vegetacionales xerofitas ocupan la llanura costera; en tanto que en el interior, en contacto con la serranía, se inicia una faja de bosques tropicales.

Por lo que corresponde al área de estudio, recibe el nombre de Berlín y se localiza en la región SE de la República de El Salvador. El acceso es por medio de la Carretera Panamericana, misma que pasa a 8 km, por el poblado de Mercedes Umaña, que se ubica a 150 km de la capital del país. El área se encuentra al NW del poblado del mismo nombre.

CAPITULO III

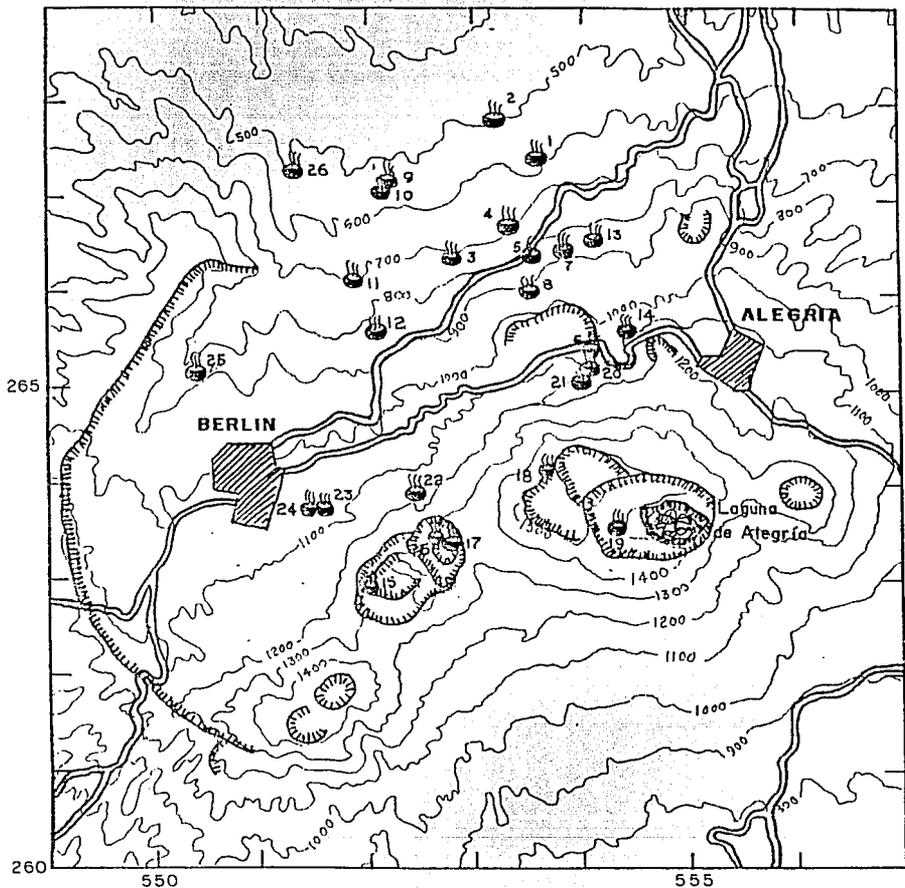
GEOQUIMICA

El área de Berlín se encuentra ubicada en una zona de intensa actividad fumarólica (Fig.III.1.), gracias a dicha actividad, ha sido posible realizar muestreos; tanto de agua, como de gases. El resultado del análisis de esta información, sirve para visualizar las características del campo a profundidad.

Así pues, las aguas que emergen en la zona de estudio han sido agrupadas en función de sus características, para poder diferenciarlas en su posible procedencia con base en su composición química.

III.1. A G U A.

Se ha encontrado que la mayoría de las aguas que afloran en el área son del tipo bicarbonatadas (HCO_3^-). Existen, además, algunas aguas con características de mezcla del tipo bicarbonatadas de procedencia superficial con otras del tipo



LEYENDA

- ~500 Curva de nivel
- Carretera
- Poblados
- Colapsos
- Cráteres
- Fumarola
- 1. El Bálsamo
- 2. El Zapotillo
- 3. El Tranadorcito
- 4. El Tranador
- 6. Las Vueltas de San Juan
- 8. La Corriente
- 13. La Joyona
- 15. El Pinal
- 16. La Cruz
- 17. El Hoyón
- 18. Colmenera
- 19. Laguna Alegria
- 20. Miravalle
- 24. El Potrero
- 25. El Calaboz
- 26. Trujillo

Las fumarolas: 5, 7, 9, 10, 11, 12, 14, 20, 21 y 23 carecen de nombre.

Escala 1: 50,000

FACULTAD DE INGENIERIA

TESIS FIGURA III.I.

ACTIVIDAD FUMAROLICA

ALVARO JIMENEZ DIAZ B

FECHA
ENE/93

cloruro-sódicas de circulación profunda. Por lo tanto, la clasificación a la que se llegó es la siguiente:

III.1.a. Bicarbonato Sódico-Cálcicas.

De acuerdo a su composición, se presume que son de origen superficial y subsuperficial, temperatura de afloramiento que oscila entre los 26°C y 36°C, bajas conductividad eléctrica y salinidad, pH neutro y un contenido promedio de sílice entre los 95 y 125 ppm y cuya característica principal es un alto contenido del anión bicarbonato.

III.1.b. Débilmente Alcalinas.

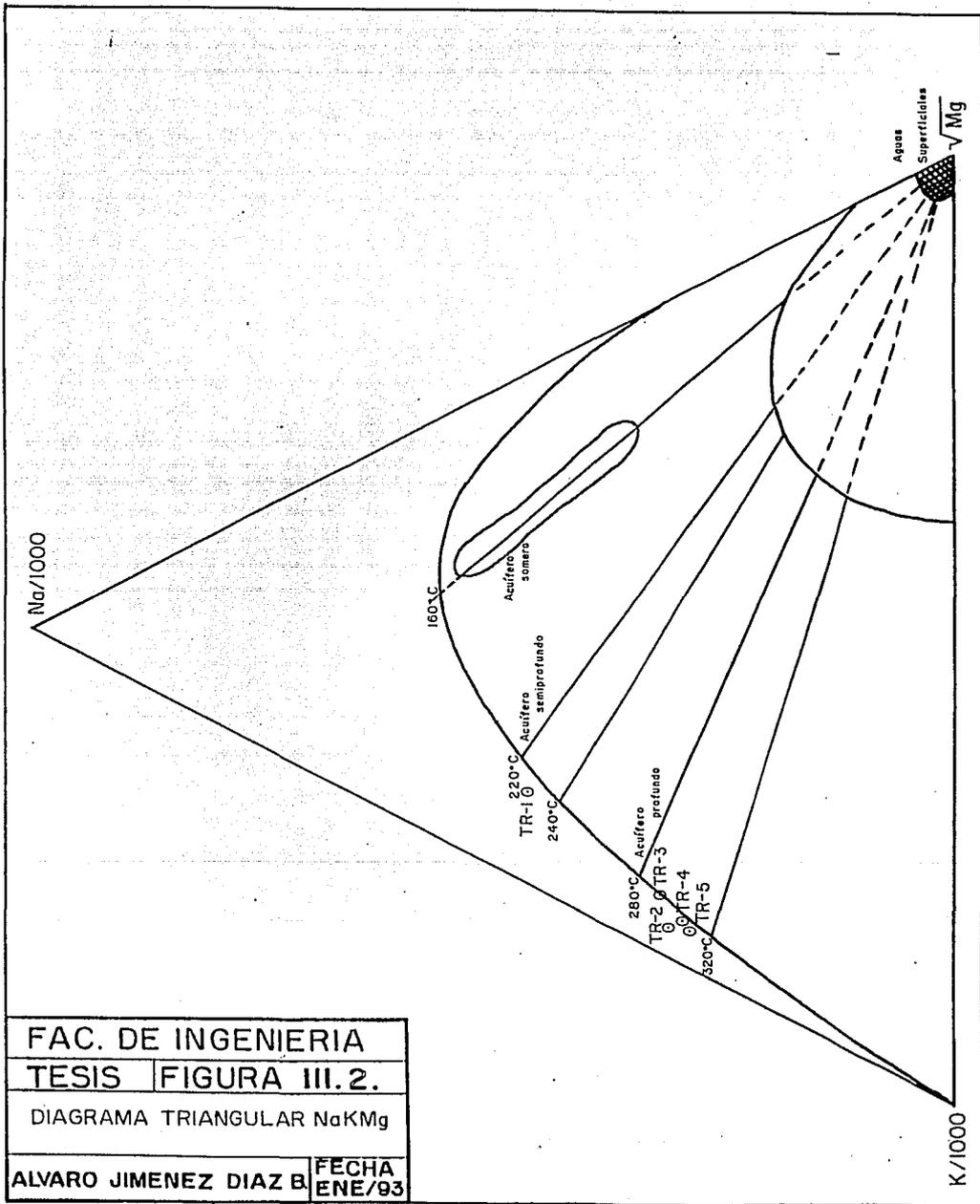
Poseen un pH ligeramente alcalino, con cantidades equiparables de bicarbonatos y cloruros, siendo el catión predominante el sodio con un contenido de sílice relativamente bajo, alta conductividad y baja concentración de sulfatos, se puede decir que este tipo es una mezcla de agua termal profunda con agua de procedencia subsuperficial.

III.1.c. Sulfatadas Acidas.

Presentan como anión predominante el ión sulfato y el calcio como catión de mayor abundancia relativa con pH ácido, alta concentración de sílice, alta temperatura de afloramiento y bajo contenido de cloro y boro. Este tipo de aguas, emergen como condensados en zonas de actividad fumarólica, que provienen de la elevación del vapor de aguas subterráneas profundas.

De la composición química de los distintos tipos de agua y a fin de confirmar la existencia de los sistemas que se manifiestan en el área de estudio, fue elaborado un diagrama triangular (Fig.III.2.), donde se aprecia claramente la existencia de tres sistemas diferentes que alimentan los acuíferos interceptados por los pozos del área:

a> Uno somero o superficial con una temperatura aproximada de 160°C y una salinidad mayor a los 1600 ppm.



FAC. DE INGENIERIA

TESIS FIGURA III. 2.

DIAGRAMA TRIANGULAR NaKMg

ALVARO JIMENEZ DIAZ B.

FECHA
ENE/93

b> Otro semiprofundo con una temperatura que varía entre 220°C y 240°C y una salinidad de 6600 ppm.

c> El último, profundo con una temperatura que oscila entre los 280°C - 300°C y una salinidad que va de 8553 a 10138 ppm.

Por lo tanto, se puede concluir que las aguas de fuentes y pozos domésticos, no son representativas del acuífero salino profundo que alimenta a los pozos productores del campo.

III.2. G A S.

Por lo que corresponde al estudio de los gases, existen algunas relaciones que son indicativas de las condiciones a profundidad, tales como: gas/vapor (G/V); dióxido de carbono/hidrógeno (CO₂/H₂); dióxido de carbono/ácido sulfhídrico (CO₂/H₂S) y ácido sulfhídrico/hidrógeno (H₂S/H₂). Estos parámetros pueden utilizarse para comparar y predecir una conexión más directa con el acuífero profundo de donde proviene el vapor emanado por las fumarolas.

Ahora bien, dentro del área fumarólica, existen algunas fumarolas cuya composición parece indicar que los gases que expelen provienen de acuíferos someros calentados por la condensación del vapor proveniente de mayor profundidad. Dichas fumarolas no se tomaron en cuenta en el análisis final en el aspecto geoquímico.

Los datos observados en las fumarolas, parecen indicar que el principal proceso que controla la variación en la composición química, es el de la remoción selectiva del H₂S por interacciones roca-agua para formar piritas (cuya existencia se ha comprobado en los núcleos y recortes de los pozos productores del campo), así se producirán los diversos grados de remoción del H₂S que ha sufrido el vapor original en su prolongado ascenso hacia la superficie, como resultado de la expansión en múltiples etapas.

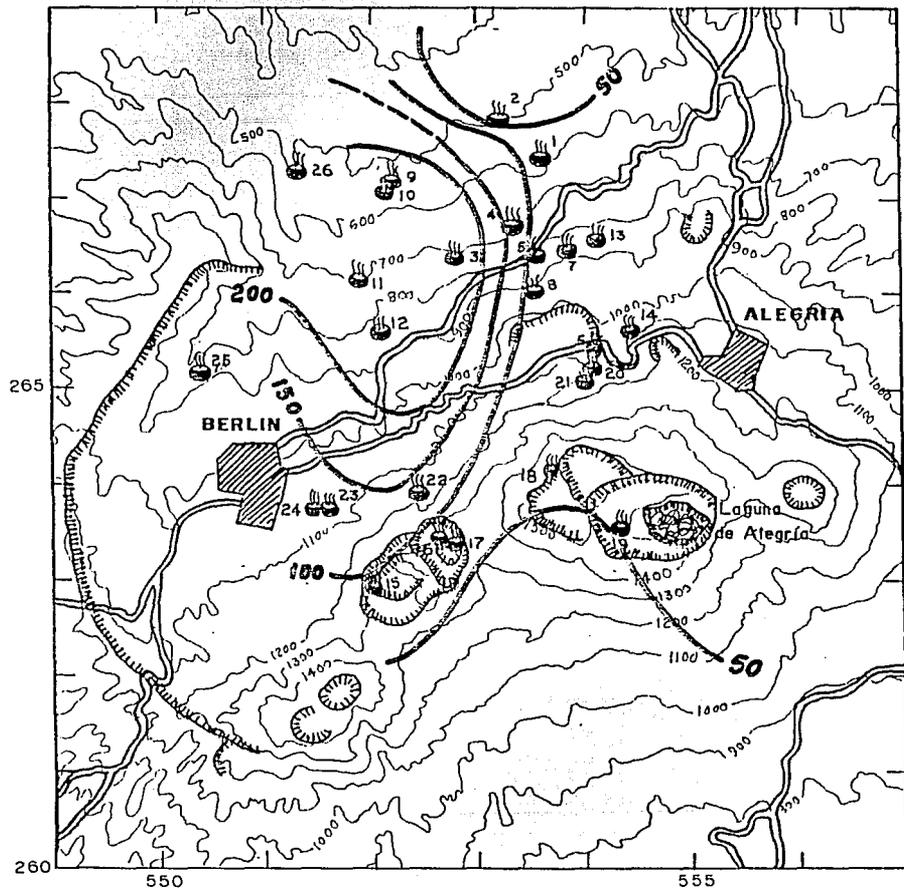
Si se toma en cuenta que la razón CO₂/H₂S aumenta con la disminución de la temperatura en sistemas geotérmicos y su valor tiende a ser más bajo, cuanto más directa es la conexión con la

fuelle de alimentación profunda, se tiene que el gas analizado en la fumarola "El Hoyón" (definida con el número 17) es, probablemente, el que más representa la composición gaseosa del reservorio profundo.

III.3. ANALISIS DE LAS RELACIONES GASEOSAS.

III.3.a. DIOXIDO DE CARBONO / ACIDO SULFIDRICO (CO₂ / H₂S) (FIG.III.3)

Cuando el vapor sube a la superficie, desde su alimentación, sufre cambios en su presión y en su temperatura que producen flasheos y condensaciones durante su ascenso a través de los canales que confinan su salida, modificando su composición original, principalmente la de gases de naturaleza reactiva (CO₂, H₂S, y H₂), efecto que se traducirá primordialmente en la remoción del H₂S. De esta forma, las fumarolas que presentan menores valores para la relación CO₂/H₂S, podrían estar indicando una ubicación más cercana ó una alimentación más directa del yacimiento que lo genera.



LEYENDA

-  Curva de nivel
-  Carretera
-  Poblados
-  Colapsos
-  Cráteres
-  Fumarola
- 1. El Bálsamo
- 2. El Zapotillo
- 3. El Tronadorcito
- 4. El Tronador

- 6. Las Vueltas de San Juan
- 8. La Corriente
- 13. La Joyona
- 15. El Pinal
- 16. La Cruz
- 17. El Hoyón
- 18. Colmenera
- 19. Laguna Alegria
- 20. Miravalle
- 24. El Potrero
- 25. El Calaboz
- 26. Trujillo

Las fumarolas: 5, 7, 9, 10, 11, 12, 14, 20, 21 y 23 carecen de nombre.

Escala 1: 50,000

FACULTAD DE INGENIERIA

TESIS FIGURA III.3

ISORRELACION CO₂/H₂S

ALVARO JIMENEZ DIAZ B

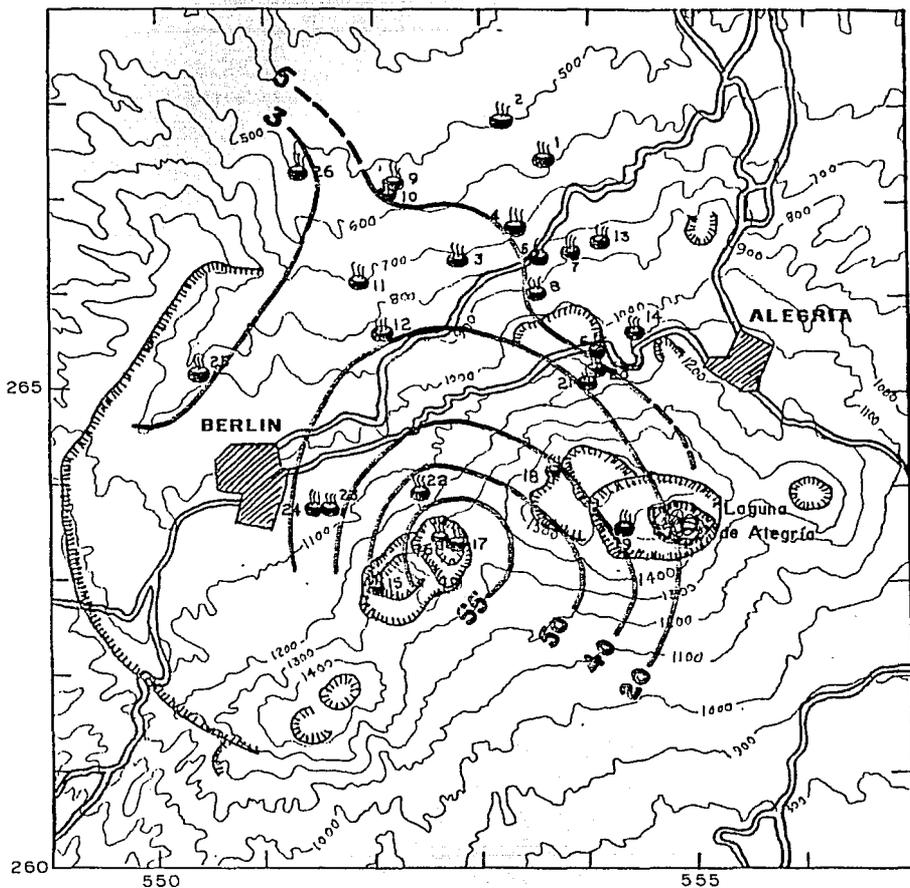
FECHA
ENE/93

III.3.b. G A S / V A P O R (G/V)

Al igual que el proceso indicado en el párrafo anterior, el vapor al ascender hacia la superficie como resultado de los flasheos y condensaciones, reduce la cantidad de vapor original, por lo que se concentra la cantidad total de gases en él, lo que provoca una modificación a la relación G/V, la que aumenta entre mayor sea su lejanía o menor su conexión directa con la fuente de alimentación.

III.3.c. H I D R O G E N O (H₂) (FIG.III.4)

Si se toma en consideración que el hidrógeno es uno de los gases más volátiles presentes en el vapor de las fumarolas y que su baja solubilidad en el agua a altas temperaturas, así como su generación en el ambiente mineralógico hidrotermal obedece a reacciones químicas donde las constantes de velocidad son dependientes de la temperatura, entonces se puede utilizar su concentración para delimitar la posible fuente de calor del sistema.



LEYENDA

-  Curva de nivel
-  Carretera
-  Poblados
-  Colapsos
-  Cráteres
-  Fumarola

- 6. Las Vueltas de San Juan
- 8. La Corriente
- 13. La Joyona
- 15. El Pinal
- 16. La Cruz
- 17. El Hoyón
- 18. Colmenera
- 19. Laguna Alegria
- 20. Miravalle
- 24. El Potrero
- 25. El Calaboz
- 26. Trujillo

Las fumarolas: 5, 7, 9, 10, 11, 12, 14, 20, 21 y 23 carecen de nombre.

Escala 1:50,000

FACULTAD DE INGENIERIA

TESIS FIGURA III.4.

ISORRELACION H_2

ALVARO JIMENEZ DIAZ B

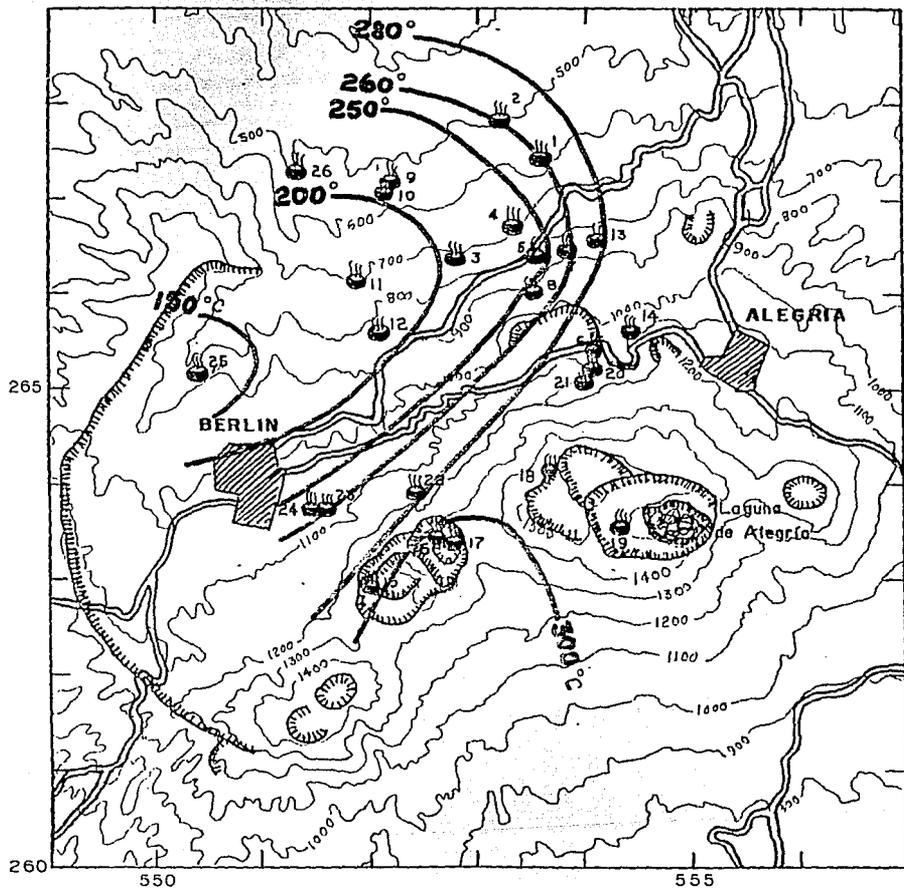
FECHA
ENE/93

Así pues, la distribución del contenido de H₂ pareciera indicar que la localización de la fuente calórica se encuentra precisamente debajo del edificio volcánico, prácticamente en el centro del fallamiento circular que originó la caldera de lo que fue el antiguo volcán de Berlín.

La mayor emanación de hidrógeno se presenta en la fumarola "El Hoyón", con una clara tendencia a disminuir en forma radial en dirección NE de dicho centro de efusión, lo que puede ser indicativo de una posible dirección en cuanto a la circulación del fluido en el campo.

III.4. G E O T E M P E R A T U R A. (FIG.III.5)

El geotermómetro de gases (D'Amore, et al, 1984) aplicado a las descargas de las fumarolas del área de Berlín, indica temperaturas a profundidad del orden de los 310°C para aquellas ubicadas a mayor altitud y menor de 140°C para la de menor altitud, de esta manera, se presenta una distribución de geotemperaturas con un patrón parecido al que fue



LEYENDA

- ~500~ Curva de nivel
- Carretera
- Poblados
- Colapsos
- Cráteres
- Fumarola
- 1. El Bálsamo
- 2. El Zapotillo
- 3. El Tronadorcito
- 4. El Tronador

- 6. Las Vueltas de San Juan
- 8. La Corriente
- 13. La Joyan
- 15. El Pinal
- 16. La Cruz
- 17. El Hoyón
- 18. Colmenera
- 19. Laguna Alegría
- 20. Miravalle
- 24. El Potrero
- 25. El Calaboz
- 26. Trujillo

Las fumarolas: 5, 7, 9, 10, 11, 12, 14, 20, 21 y 23 carecen de nombre.

Escala 1: 50,000

FACULTAD DE INGENIERIA	
TESIS	FIGURA III. 5.
GEOTEMPERATURA (°C)	
ALVARO JIMENEZ DIAZ B	FECHA ENE/93

encontrado en la relación $\text{CO}_2/\text{H}_2\text{S}$ y G/V, en otras palabras, se observa un incremento de temperatura hacia las zonas Sur-Este y Sur-Oeste del campo; así como también hacia la zona Nor-Este del mismo; ubicándose, coincidentalmente, la zona de mayor temperatura con la de mayor concentración de H_2 en el área de estudio, es decir, en los alrededores de la fumarola "El Hoyón".

CAPITULO IV

GEOFISICA

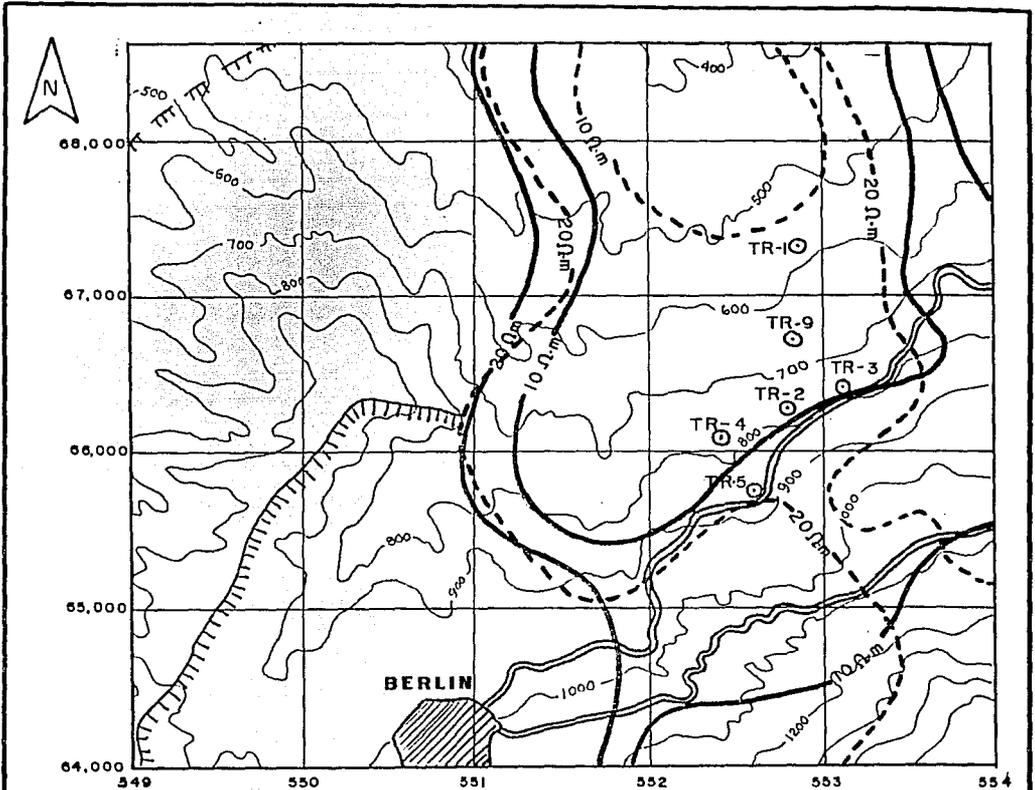
Los estudios geofísicos realizados en el área de Berlín fueron de tres tipos a saber:

IV.1. G E O E L E C T R I C A .

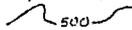
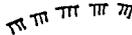
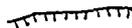
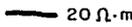
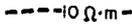
Para el estudio en esta disciplina, se llevaron a cabo dos campañas:

IV.1.a. Perfilamientos Eléctricos.

Para la ejecución de los sondeos, fue usado un dispositivo Schlumberger perfecto con espaciamiento entre los electrodos $AB/2 = 500$ m y $AB/2 = 1000$ m sobre un área de 300 km², a lo largo de caminos vecinales, delimitándose las áreas de anomalías de resistividad aparente (contornos de 10 y 20 ohmios-metro) (Fig.IV.1.). En general se encontró consistencia entre la anomalía de 20 ohmios-metro y el área del reservorio



LEYENDA

-  500 GURVA DE NIVEL
-  POBLADO
-  CAMINO
-  LIMITE CALDERA
-  COLAPSO
-  POZOS
- CURVAS DE ISO-RESISTIVIDAD
 -  20 Ω·m -- AB/2 = 1000 m
 -  10 Ω·m -- AB/2 = 500 m

FAC. DE INGENIERIA	
TESIS FIGURA IV.1.	
RESULTADO DE LOS SONDEOS ELECTRICOS VERTICALES (SEV)	
ALVARO JIMENEZ DIAZ B.	FECHA ENE/93

comprobada por los pozos; sin embargo, los datos básicos son incompletos hacia el Sur y Sur-Este del área perforada.

IV.1.b. Sondeos Eléctricos Verticales.

En este estudio también se usó un arreglo del tipo Schlumberger con un espaciamiento entre electrodos $AB/2 = 3000$, sobre una cuadrícula topográfica que cubre una área de 100 km². En virtud de que este tipo de arreglo no corresponde para una profundidad como la que tiene el campo y además se presentó una alteración por efectos electromagnéticos, esto propicia que los resultados sean inadecuados para usarlos en la interpretación del sistema.

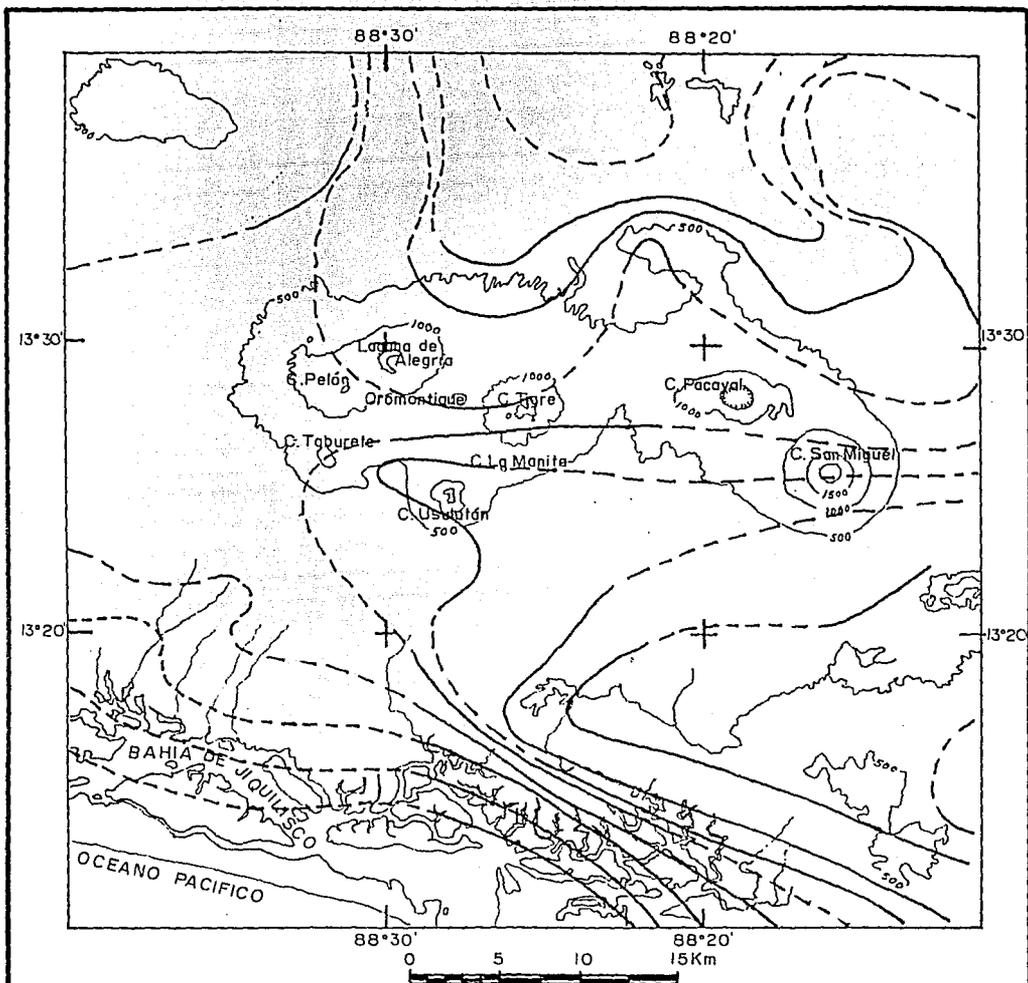
IV.2. GRAVIMETRÍA.

Se realizaron levantamientos gravimétricos con los que se cubrió una área de 300 km², obteniéndose un mapa <sin correcciones> de la anomalía simple de

Bouguer (Fig.IV.2.), donde se identifica el límite del graben central.

IV.3. M A G N E T O M E T R I A.

Se ejecutó una campaña de magnetometría, pero los datos no fueron concluidos y por lo mismo no han sido utilizados. De cualquier manera, este tipo de estudios ya no se considera importante para el desarrollo del yacimiento, sobre todo tomando en cuenta los datos ya conocidos.



LEYENDA

-  CURVA DE NIVEL
-  ANOMALIAS DE BOUGER
-  CRATER

FAC. DE INGENIERIA	
TESIS	FIGURA IV.2.
RESULTADO DE LOS ESTUDIOS GRAVIMETRICOS	
ALVARO JIMENEZ DIAZ B.	FECHA ENE/93

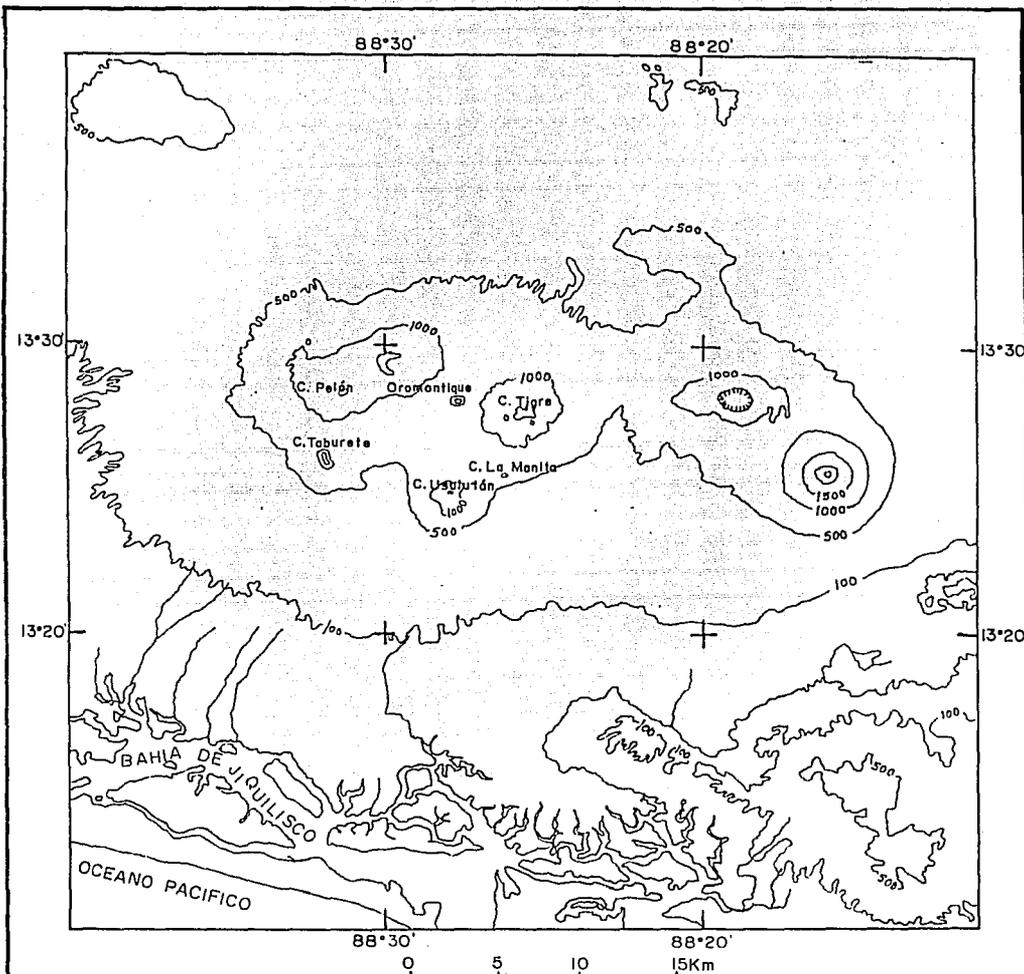
CAPITULO V

GEOLOGIA

V.I. FISIOGRAFIA.

El plano de la región (Fig.V.1), muestra las formas principales del relieve. Estas corresponden principalmente a edificios volcánicos del Neógeno-Cuaternario, en los que destacan los cerros: El Pelón, Taburete, Usulután, La Manita, El Tigre y Oromontique, conformando una estructura semi-circular con elevaciones promedio de 1500 msnm. Las elevaciones listadas se distinguen claramente de los productos piroclásticos y detríticos que los circundan. Las formas predominantes del relieve son:

- a) La Cadena Volcánica Cuaternaria, con alturas de 1500 a 2000 msnm, que sutura el borde occidental del Graben Central.
- b) La Depresión o Graben Central de El Salvador, localizada al N de la cadena volcánica.
- c) La Planicie Costera al S del área de estudio.



ESCALA 1:300,000

LEYENDA

-  500 CURVA DE NIVEL
-  CRATER

FACULTAD DE INGENIERIA

TESIS FIGURA V.I.

FISIOGRAFIA DEL AREA

ALVARO JIMENEZ DIAZ B

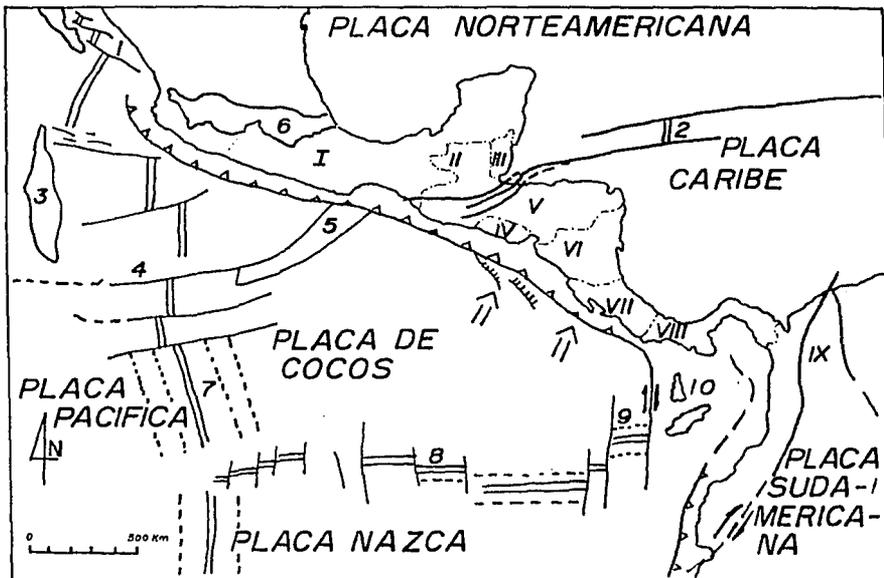
FECHA
ENE/93

V.II. HIDROGRAFIA.

El sistema de drenaje en la zona de estudio, está gobernado por la cuenca hidrológica del Río Lempa, que desemboca sus aguas en el Océano Pacífico. El río capta todas las aguas de ríos y arroyos intermitentes del flanco N de la cadena volcánica y hacia el S, los ríos desembocan en la Bahía de Jiquilisco y Río San Miguel.

V.III. GEOLOGIA REGIONAL.

La República de El Salvador se encuentra ubicada en el extremo W de la llamada Placa Caribe, misma que se halla subducida por la Placa de Cocos (Fig.V.2), esta subducción ha propiciado que se formen las dos cadenas volcánicas que están presentes en la zona (Fig.V.3). Por un lado, en el Terciario, el ángulo de subducción es más agudo y los esfuerzos de compresión provocan la primer cadena, en tanto que en el Cuaternario hay una distensión en los esfuerzos, lo que propiciará el afallamiento y posterior caída en bloques del



- | | |
|--------------------------------|-----------------|
| 1. ZONA DE FRACTURAS DE TAMAYO | I. MEXICO |
| 2. DORSAL DE CAIMAN | II. GUATEMALA |
| 3. MONTES MATEMATICOS | III. BELICE |
| 4. FRACTURAS DE CLIPPERTON | IV. EL SALVADOR |
| 5. SERRANIAS DE TEHUANTEPEC | V. HONDURAS |
| 6. EJE NEOVOLCANICO | VI. NICARAGUA |
| 7. DORSAL DEL PACIFICO ESTE | VII. COSTA RICA |
| 8. DORSAL DE COLON | VIII. PANAMA |
| 9. ZONA DE FRACTURAS DE PANAMA | IX. COLOMBIA |
| 10. SERRANIAS DE COIBA | |

SIMBOLOGIA

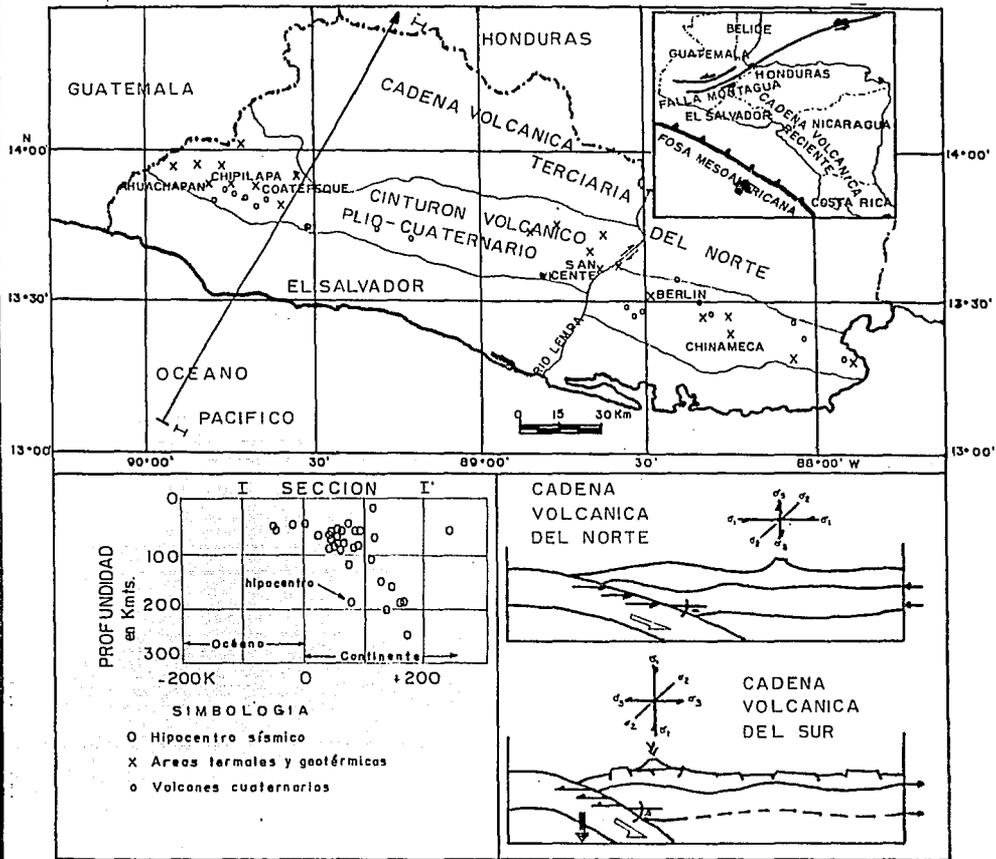
- FOSA MESOAMERICANA
- SISTEMA DE HORST Y GRABEN
- DORSAL
- MOVIMIENTO RELATIVO DE PLACAS

FACULTAD DE INGENIERIA

TESIS FIGURA V.2.

UBICACION GEOTECTONICA
DE EL SALVADOR

ALVARO JIMENEZ DIAZ B. FECHA
ENE/93



Mapa de localización tectónica del área en estudio en El Salvador. La Sección I-I' muestra la actividad sísmica a lo largo de la línea, esto explica la formación de las cadenas volcánicas Norte y Sur (González P. et al 1993).

FACULTAD DE INGENIERIA
TESIS FIGURA V.3.

GENESIS DE LAS CADENAS
VOLCANICAS NORTE Y SUR

ALVARO JIMENEZ DIAZ B. FECHA
ENE/93

material antiguo formando el graben y las calderas y aunado a esto la abertura del ángulo de subducción dará como resultado que se forme la segunda cadena volcánica.

El campo de Berlín, se encuentra en el mismo Graben Central. Este graben conforma una estructura regional que cruza todo el país y corre paralela a la línea de costa. Sus flancos están definidos por fallas normales Este-Oeste, que cortan a las rocas más antiguas de la región: la Formación Bálsamo. El Graben Central se divide en dos regiones mayores:

- a) La zona occidental, en la que se incluyen los complejos volcánicos de Ahuachapán, Coatepeque, San Salvador, Ilopango y San Vicente.
- b) La zona oriental, integrada por los complejos volcánicos de Berlín y San Miguel.

El límite natural entre las dos regiones es el Río Lempa, que en esta zona presenta una dirección casi N - S, cuyo cauce labra las rocas del basamento.

La zona oriental del Graben Central está formada por dos complejos volcánicos importantes:

- A> El Complejo Volcánico de Berlín-El Tigre-Usulután, con estructuras volcánicas que se alinean formando un semicírculo.
- B> El Complejo Volcánico de San Miguel, al que se relacionan las estructuras de San Miguel, El Pacayal y Ojo de Agua (Fig.V.4)

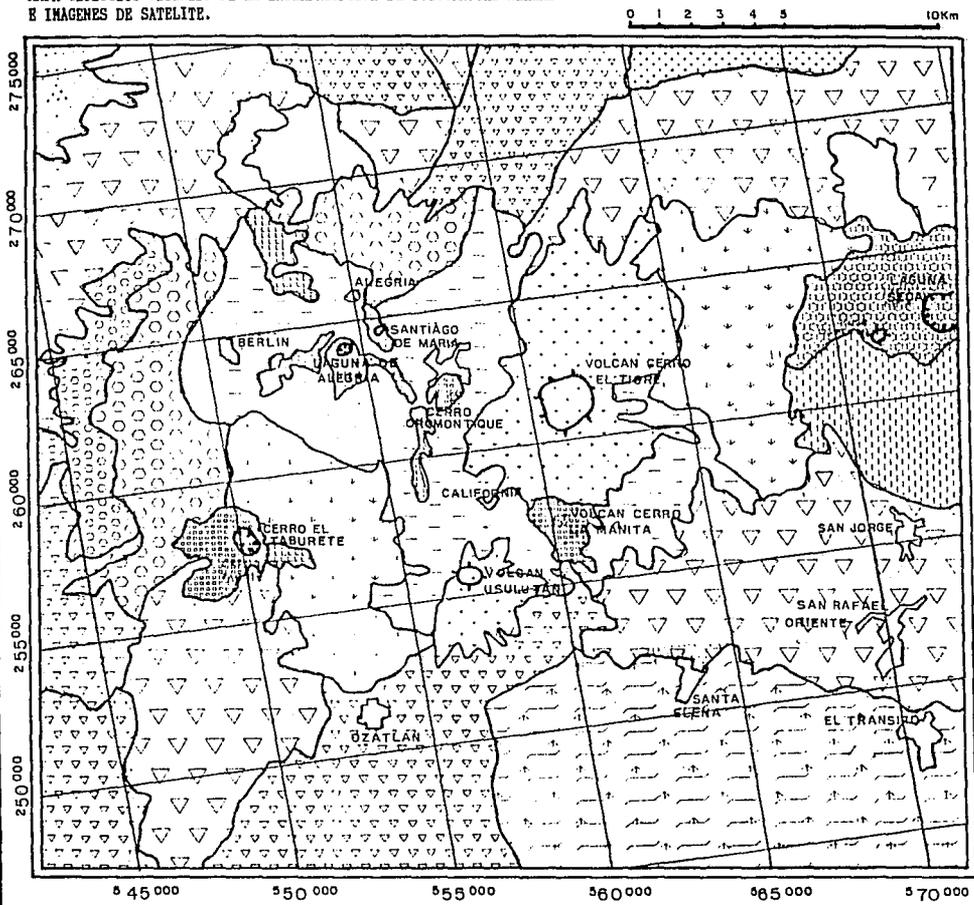
V.III.1. Basamento.

Las rocas del basamento se conocen en los límites N y S del Graben Central, fuera de la zona de estudio. Los únicos afloramientos se detectan en el sector NE de la hoja, al N de la población de Chinameca, al N de la carretera Panamericana. La litología de la zona corresponde a rocas efusivas básicas.

V.III.2. Rocas Piroclásticas Antiguas.

Con este nombre se ha designado a un conjunto de

MAPA GEOLOGICO OBTENIDO DE LA INTERPRETACION DE FOTOGRAFIAS AEREAS
E IMAGENES DE SATELITE.



- 1 Basamento; 2 Piroclasto Antigo; 3 Piroclasto Antigo Afallado;
4 Piroclasto Antigo No Afallado; 5 Andesitas; 6 Andesitas y Escorias Andesíticas Proxinales; 7 Andesitas y Escorias Andesíticas Distales; 8 Piroclastos Proxinales (explosión Caldera de Berlin); 9 Piroclastos Distales; Piroclastos Hervideros; Epiclastitas; 12 Brechas Basálticas; 13 Basaltos; 14 Depósitos Aluviales; 15 Piroclastos Freato-magmáticos; 16 Unidad no Clasificada.

FAC. DE INGENIERIA
TESIS FIGURA V.4.
MAPA GEOLOGICO REGIONAL
ALVARO JIMENEZ DIAZ B. FECHA
ENE/93

materiales vulcanoclásticos y piroclásticos que rellenan profusamente al Graben Central. Los materiales están descritos como piroclastitas ácidas, epiclastitas volcánicas y localmente efusiones ácidas. Las diferentes unidades se clasifican de la siguiente forma:

1. Piroclasto antiguo.

Sin drenaje superficial y topografía suave. Su distribución incluye la planicie que se extiende al S del volcán de Usulután.

2. Piroclasto antiguo no afallado.

Con poco drenaje, topografía suave. Se extiende al S del volcán El Taburete y al W de Ozatlán. Las mismas características se observan en la zona N de las inmediaciones de Jucuapa y Chinameca, así como algunos afloramientos al S de la población de El Triunfo.

3. Piroclasto antiguo afallado.

Con drenaje denso y bien marcado. Al N la unidad aflora en las cercanías de Mercedes Umaña, mientras que al S aparece cerca de San Agustín.

V.III.3. Complejo Volcánico Berlín-Tigre-Usulután.

(CVB)

El CVB está formado por la caldera de Berlín, por los estratovolcanes de Usulután y Cerro El Tigre y por los conos cineríticos de Cerro La Manita, Oromontique, Volcán Laguna de la Alegría, Cerro Pelón, Las Palmas y El Taburete (FIG.V.1.).

La Caldera de Berlín se localiza en el borde NW del CVB. La estructura principal es un elipsoide, cuyo diámetro mayor presenta una orientación NE-SW, con dimensiones aproximadas de 6 x 3 kms. Su litología está conformada por andesitas, escorias y cenizas andesíticas, piroclastos y basaltos. Las unidades litológicas obtenidas dentro del CVB son:

1. Andesitas.

Rocas de poco drenaje. Su afloramiento ocurre en todo el interior de la caldera y en el interior del alineamiento que definen las estructuras volcánicas mayores del CVB, formando el sustrato local sobre el que se edifican tales volcanes (El Tigre, Usulután y Taburete).

2. Andesitas y escorias andesíticas proximales.

Unidad con drenaje radial bien definido. Forma las estructuras volcánicas mayores de Cerro El Tigre y volcán Usulután. Está compuesta de alternancia de andesitas, cenizas y escorias andesíticas.

3. Andesitas y escorias andesíticas distales.

Unidad con drenaje moderado. Se localiza en las faldas de los volcanes de Cerro El Tigre y Usulután. Su composición es de andesitas, cenizas y escorias andesíticas.

4. Piroclastos proximales.

Unidad con drenaje radial bien marcado. Aflora a partir del borde W de la caldera de Berlín y seguramente se relaciona con la explosión de la misma. Cubre discordantemente a las unidades: piroclastos antiguos no afallados; piroclastos antiguos afallados y a las andesitas.

5. Piroclastos distales.

Unidad con drenaje moderado, poco marcado. Se

localiza en la ladera W de la caldera, en sus partes bajas, en continuidad horizontal con la unidad anterior.

6. Basaltos.

Ausencia de drenaje y poca extensión superficial. Se presenta en forma de derrames a partir de cráteres bien definidos. Sus principales afloramientos se localizan en el borde E de la caldera y su litología es de brechas y derrames basálticos. Es sobre esta unidad en donde se han perforado los pozos geotérmicos exploratorios.

7. Depósitos aluviales. Unidad con drenaje y topografía suaves. Se encuentra a lo largo del cauce del Río Lempa.

V.IV. GEOLOGIA LOCAL.

Las lavas postcaldéricas de la zona de la Laguna de la Alegría, enmascaran el flanco E de la caldera de Berlín y cubren los productos piroclásticos de la misma, por lo que, localmente,

sólo afloran lavas basáltico-andesíticas de los últimos derrames emanados del flanco E de la caldera, en intersección con una gran falla regional (Berlín-Alegría de orientación NE-SW).

V.V. GEOLOGIA SUBTERRANEA.

La secuencia estratigráfica encontrada en los pozos del área de estudio de Berlín (FIGS.V.5.), corresponde a una serie alterna de lavas, tobas y piroclastos, así pues, el resultado petrográfico es el siguiente:

a> Basalto.

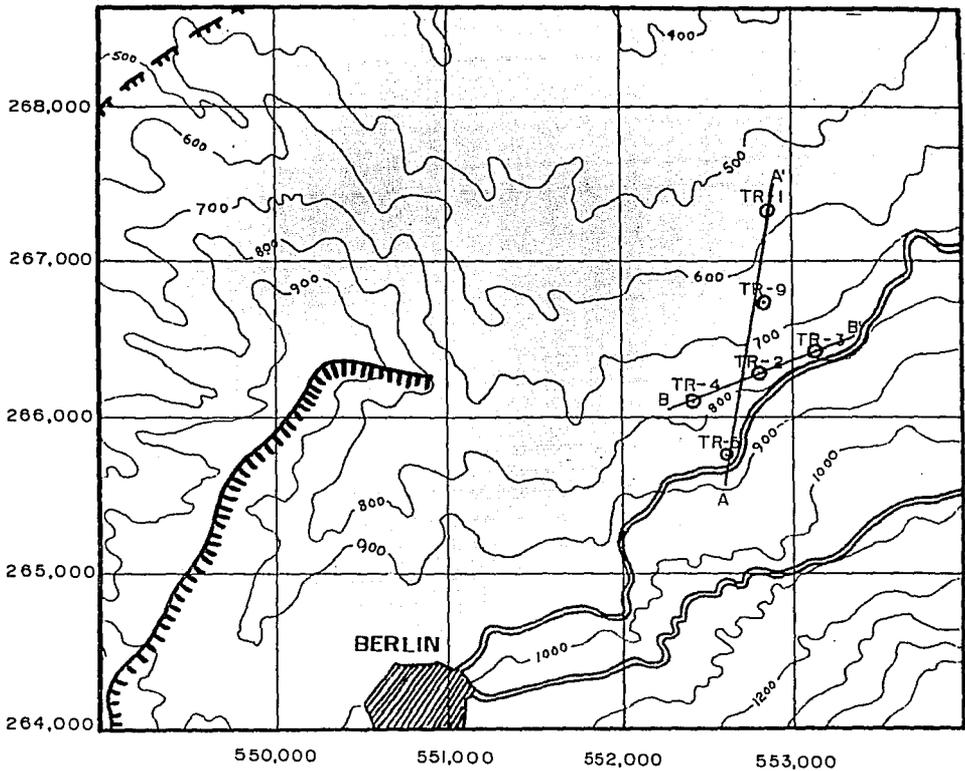
Esenciales: labradorita, bitownita, augita, hiperstena y pigeonita.

Accesorios: olivino.

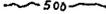
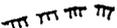
b> Andesita Basáltica.

Esenciales: labradorita, andesina, hiperstena y augita.

Accesorios: zircón, apatito y olivino.



LEYENDA

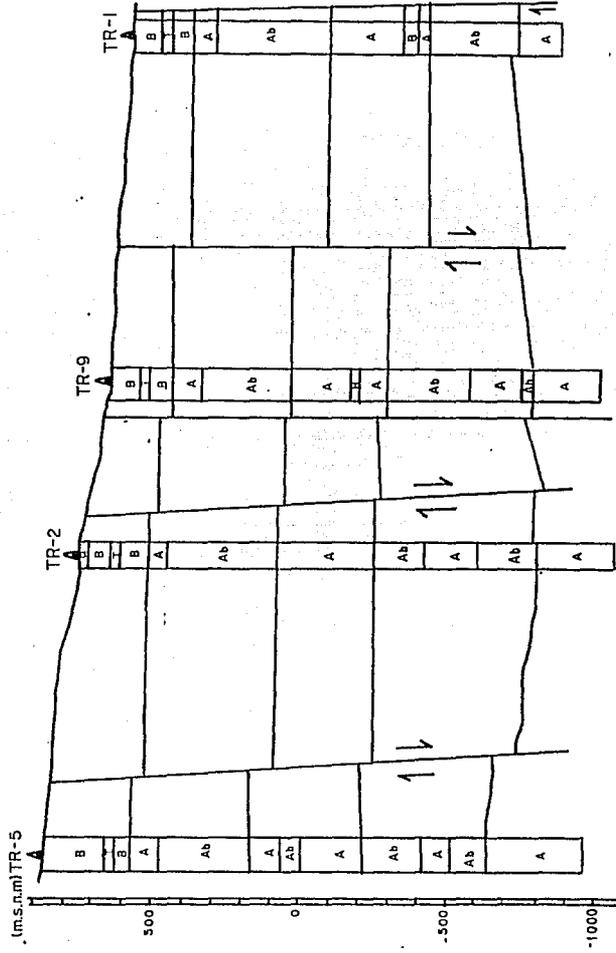
-  CURVA DE NIVEL
-  CAMINOS
-  POZOS
-  POBLADO
-  COLAPSO
-  CALDERA

FACULTAD DE INGENIERIA
 TESIS FIGURA V.5

UBICACION DE POZOS PROFUNDOS

ALVARO JIMENEZ DIAZ B. FECHA
 ENE/93

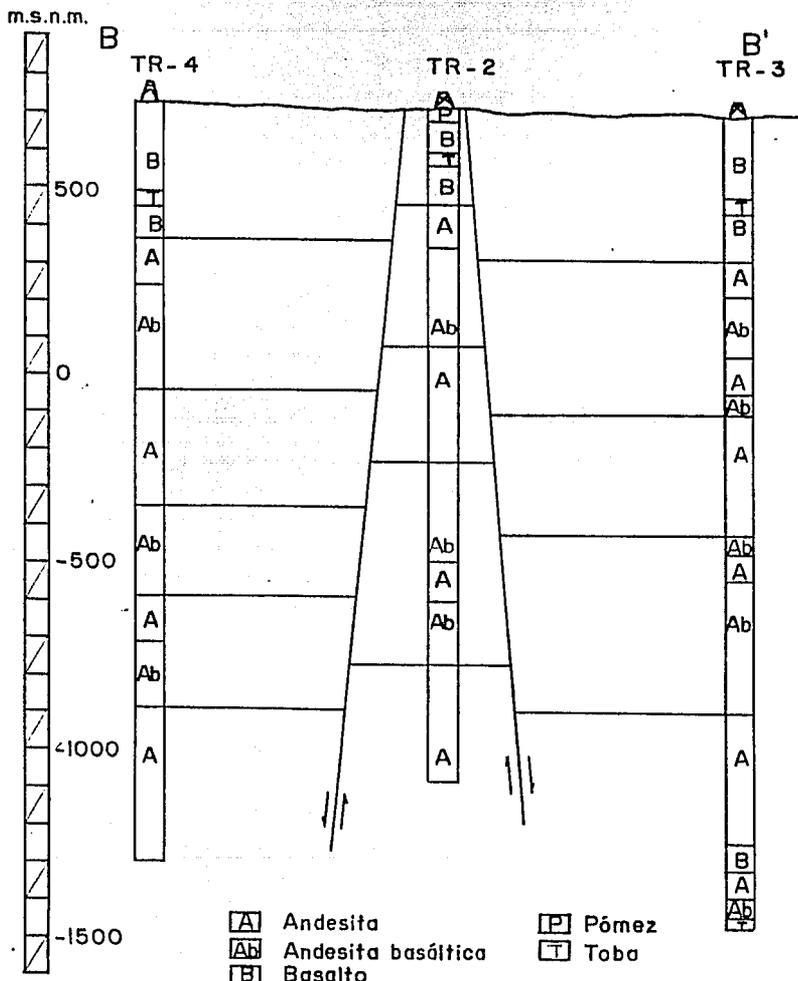
A'



- A Andesita
- Ab Andesita basáltica
- B Basalto
- P Pómez
- T Toba



FAC. DE INGENIERIA
 TESIS FIGURA V.5.1.
 SECCION GEOLOGICO-ESTRUC-
 TURAL A-A'. RUMBO NNE-SSW
 ALVARO JIMENEZ DIAZ B. FECHA
 ENE/93



FACULTAD DE INGENIERIA

TESIS FIGURA V.5.2.

SECCION GEOLOGICO-ESTRUC-
TURAL B-B' RUMBO SW-NE

ALVARO JIMENEZ DIAZ B. FECHA
ENE 793

c> Andesita.

Esenciales: andesina, augita e hiperstena.

Accesorios: zircón y apatito.

d> Toba Lítica.

Esenciales: fragmentos de roca, ceniza y vidrio

Accesorios: plagioclasas y piroxenos,

e> Pómez.

Esenciales: vidrio.

Accesorios: fragmentos de roca y plagioclasas.

V.VI. MINERALOGIA DE ALTERACION.

Se han encontrado relaciones interesantes entre los minerales secundarios que aparecen en los núcleos de perforación, dichas relaciones dan una idea más clara de la mecánica del yacimiento a profundidad y su comportamiento. Así pues, se han distinguido varios grupos o familias de minerales de alteración:

V.VI.1. Grupo de la sílice.

Dentro de este grupo, fueron observados el cuarzo, la calcedonia y el ópalo. El cuarzo se encuentra a partir de los 300 m en todos los pozos y la mayor concentración se da hacia los 400 m. Este mineral rellena cavidades junto con clorita, calcita, zeolitas (wairakita) y epidota.

Por su parte, la calcedonia y el ópalo están en niveles más superficiales del campo asociados a zeolitas de baja temperatura como estilbita y mordenita.

V.VI.2. Grupo de las cloritas.

Este grupo está ampliamente distribuido en todos los pozos, desde la superficie hasta los niveles más profundos. Los minerales observados han sido clinocloro, proclorita y pennina y no obstante su amplio espectro, presentan un cierto zoneamiento, ya que el clinocloro aparece en zonas someras; la proclorita en zonas intermedias; y la pennina a mayor profundidad.

Estos minerales rellenan cavidades y fracturas

junto a otros y pseudomorfizan a piroxenos y plagioclasas.

V.VI.3. Grupo de los carbonatos.

La calcita está distribuida en todos los pozos, pero es importante hacer ver que existen niveles muy marcados en donde su presencia se incrementa. Se presenta rellenando fracturas y cavidades y a niveles profundos, donde es abundante, está diseminada reemplazando a plagioclasas y piroxenos.

V.VI.4. Grupo de las zeolitas.

Los minerales vistos de este grupo son: estilbita, mordenita y wairakita, mismos que presentan un zoneamiento mineralógico definido. La estilbita, por ejemplo, se encuentra hacia las partes someras asociada con clorita, calcedonia y ópalo; la mordenita, por su lado, presenta una distribución similar, pero con una presencia más profunda, coexistiendo con los primeros cristales de wairakita.

V.VI.5. Grupo de la epidota.

Este tipo de minerales es de alta temperatura (mayor a 220°C), y se presenta hacia los niveles más profundos, se asocia con cuarzo, wairakita, clinozoisita y anhidrita. Se pudo observar que en los niveles más profundos y hacia el pozo TR-5, tiene una marcada abundancia, por lo que probablemente se trate de la zona donde se encuentra la fuente de calor.

V.VI.6. Sulfatos y micas.

La anhidrita se identifica de manera puntual en el pozo TR-3 por abajo de los 2100 m de profundidad, asociándose a la epidota y clinozoisita. La sericita está en todos los pozos a partir de los 100 mbnm y su abundancia se incrementa con la profundidad.

V.VI.7. Oxidos.

La formación de minerales opacos secundarios, al

igual que los transparentes, se debe a factores físico-químicos del fluido hidrotermal y a sus interacciones con la roca encajonante, por lo que será de gran ayuda su identificación en el conocimiento conceptual del campo geotérmico.

Así pues, se tiene que la hematita es el mineral opaco más distribuido en todos los pozos. Se halla pseudomorfizando a titanomagnetitas y piroxenos, así como, rellenando espacios vacíos.

V.VI.8. Pirita.

Este mineral, junto con la hematita, es de los minerales opacos más abundantes, ocurriendo las mayores concentraciones en los pozos TR-2 y TR-3.

V.VI.9. Minerales de cobre.

Se identificaron idaita, covelita y bornita en todos los pozos, pero sólo la calcopirita tiene una distribución regular, asociándose con la pirita y la hematita.

Las diferentes asociaciones paragenéticas fueron sintetizadas en una tabla (Fig.V.6.). Así fue posible determinar cuatro zonas paragenéticas en función de los rangos térmicos de los distintos minerales. De este modo, tenemos el siguiente resultado:

Zona I. Representada por estilbita, mordenita, calcedonia y ópalo, su temperatura es menor a los 180°C.

Zona II. Cuarzo, clorita, calcita, wairakita y pirita e incipiente aparición de epidota, con temperaturas de 180 a 240°C.

Zona III. Principalmente epidota acompañada por clorita, calcita, cuarzo, wairakita, sericita y sulfuros, con un rango térmico de 240 a 300°C.

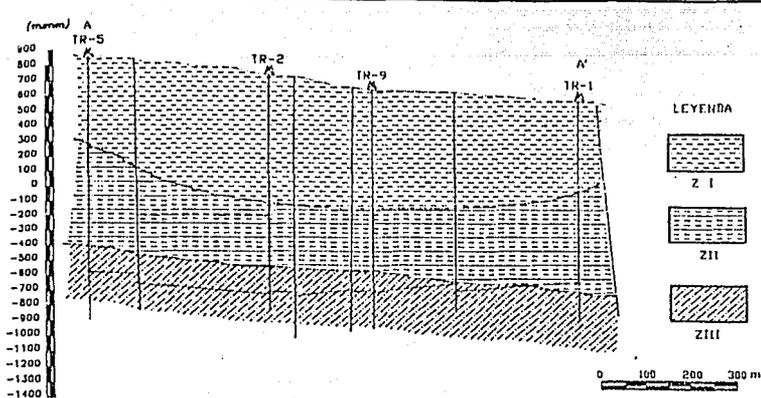
Zona IV. Epidota, anhidrita y primordialmente clinozoisita, con clorita, sulfuros de hierro, cuarzo y cobre.

Es importante señalar que los rangos térmicos fueron definidos con base en temperaturas medidas por medio de inclusiones fluidas en un estudio

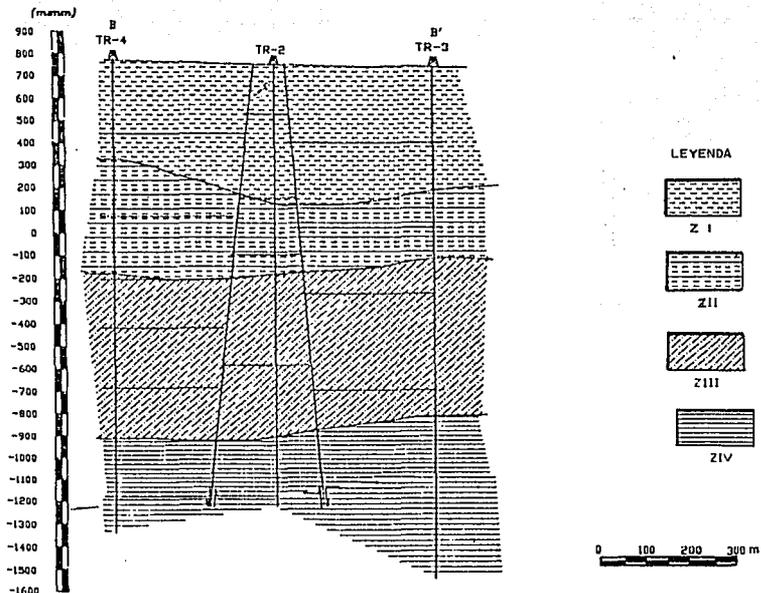
<180°C 180° - 240°C 240° - 280°C >280°C

ZONA MINERAL	I	II	III	IV
CALCITA				
CLORITA				
CUARZO				
HEMATITA				
PIRITA				
CALCEDONIA				
OPALO				
MORDENITA				
ESTILBITA				
WAIRAKITA				
CALCOPIRITA				
SERICITA				
EPIDOTA				
ANHIDRITA				
CLINOZOISITA				

FAC. DE INGENIERIA
 TESIS | FIGURA V. 6.
 PARAGENESIS DE LA MINERALOGIA
 DE ALTERACION.
 ALVARO JIMENEZ DIAZ B. | FECHA
 ENE/93



DISTRIBUCION DE ZONAS PARAGENETICAS EN LA SECCION A-A'.



DISTRIBUCION DE ZONAS PARAGENETICAS EN LA SECCION B-B'.

FAC. DE INGENIERIA

TESIS FIGURA V.6.1

DISTRIBUCION DE LAS ZONAS PARAGENETICAS SECCIONES A Y B

ALVARO JIMENEZ DIAZ B. FECHA
ENE/93

realizado por el Dr. Eduardo González Partida.

V.VII. EVOLUCION VOLCANICA.

Berlín es una zona activa con características vulcano-tectónicas y el efecto de la subducción se refleja en la composición de las lavas que son, predominantemente, andesitas de piroxeno, en el alineamiento de los centros volcánicos y en la orientación de las fracturas y fallas.

Esta intensa actividad tectónica provocó la formación de la llamada Caldera de Berlín, a este respecto, existen dos modelos que explican la formación de una caldera (FIG.V.7.); uno propuesto por Williams (1949) y otro por Smith y Bailey (1968).

Los dos modelos difieren entre si únicamente en el estado inicial de su formación. El primero sugiere la edificación de un aparato volcánico, mientras que Smith y Bailey proponen un hinchamiento o abombamiento general del área, mayor que el diámetro de la fractura concéntrica externa de la caldera. Subsecuentemente, en ambos casos, se

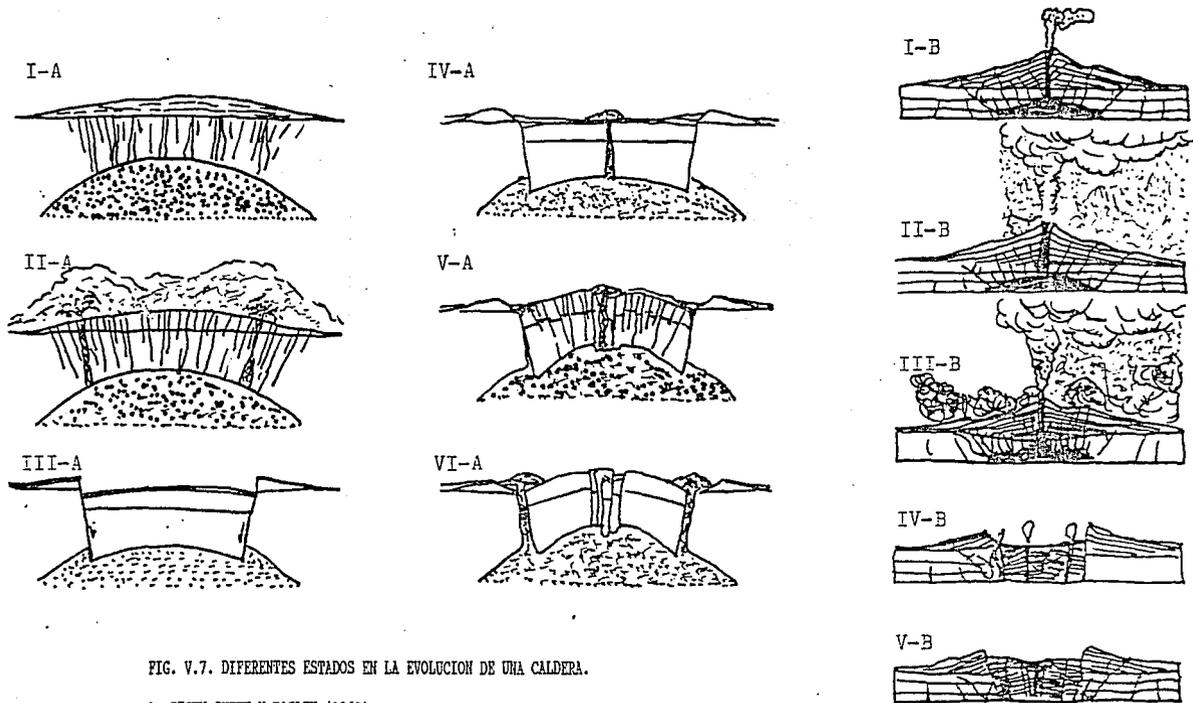


FIG. V.7. DIFERENTES ESTADOS EN LA EVOLUCION DE UNA CALDERA.

A. SEGUN SMITH Y BAILEY (1968).

I-A Tumescencia regional y generación de fracturas anulares. II-A Erupciones durante la formación de la caldera. III-A Formación de la caldera. IV-A Volcanismo prerresurgente y sedimentación. V-A Colapso resurgente. VI-A Reapertura de fracturas anulares y volcanismo asociado.

B. SEGUN WILLIAMS (1949).

I-B Antes de la erupción. II-B Erupción de material piroclástico (flujos de ceniza) por el conducto central. III-B Colapso de la erupción. La estructura volcánica comienza a hundirse en grandes bloques. IV-B Después de la erupción. V-B Último estado con nuevas erupciones en el piso de la caldera.

tiene la emisión de grandes volúmenes de material piroclástico (de caída y de flujos de ceniza), originando un vacío de la cámara magmática y como consecuencia provoca el colapso de la estructura en grandes bloques.

Frecuentemente, esta última puede estar acompañada de nueva actividad volcánica, la que surge a través de las fracturas concéntricas de la caldera, ó más bien, debido a la presión que se origina dentro de la cámara, se puede originar una caldera resurgente.

CAPITULO VI

CONCLUSIONES

El área estudiada en Berlín, El Salvador, ubicada al NW del poblado del mismo nombre, presenta características favorables para el desarrollo de un sistema geotérmico, tales como:

A> Productos volcánicos diferenciados en superficie, lo que demuestra la presencia de una cámara o cámaras magmáticas localizadas a profundidades someras.

B> Fallamientos normales, cruce de fallas, graben y caldera, que son estructuras tectónicas y volcánicas que favorecen el entrampamiento de fluidos geotérmicos a profundidad.

A través de los estudios geofísicos y geoquímicos corroborados por las perforaciones de los pozos profundos (TR-1, TR-2, TR-3, TR-4, TR-5 y TR-9) ha sido posible determinar la existencia de tres acuíferos:

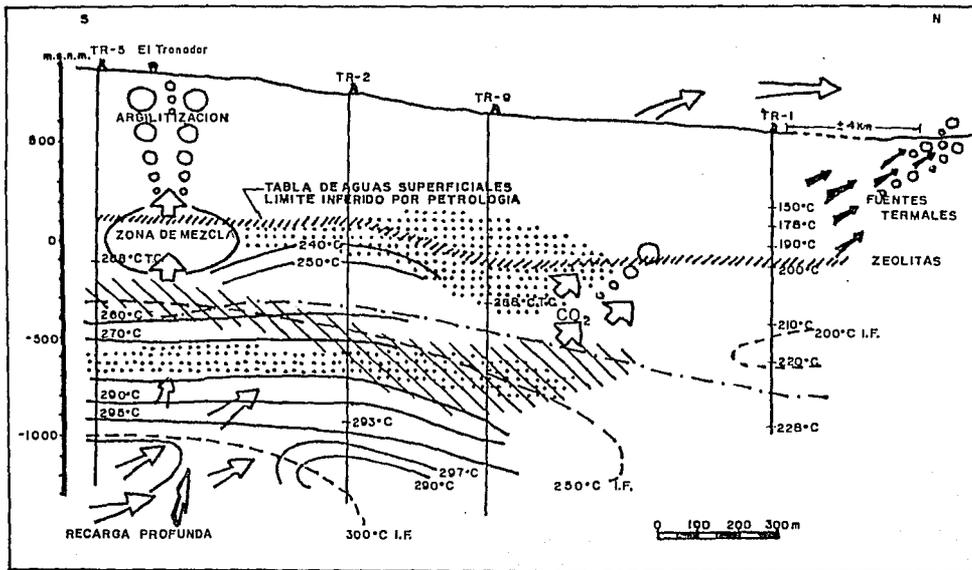
- a) Acuífero somero, con temperatura de 160°C y salinidad de 1638 ppm.
- b) Acuífero semiprofundo, ubicado a una cota promedio a nivel del mar con permeabilidad limitada y no generalizada en todo el campo. Con una temperatura de 220°C a 240°C y salinidad de 6649 ppm.
- c) Acuífero profundo o reservorio, con alta permeabilidad, compuesto por lavas andesíticas fracturadas. Temperatura de 280°C a 300°C y salinidad entre 8553 y 10138 ppm.

Basados en los diferentes estudios, se tiene una temperatura aproximada de 300°C para el reservorio y según la composición de los gases de las fumarolas, se encontró que la llamada "El Hoyón", es la que representa al reservorio en superficie. Si a esto añadimos los datos geofísicos de las anomalías registradas, se puede definir que la fuente calórica del sistema geotérmico, posible-

mente se localiza debajo del edificio volcánico en el centro del fallamiento circular que originó la caldera de Berlín.

Asimismo, el resultado del estudio petrográfico sobre los núcleos de los pozos perforados, establece la presencia de 4 zonas paragenéticas de los minerales secundarios lo que será de extrema ayuda en la determinación de la mecánica del yacimiento (FIG.VI.1.).

Por todo lo anteriormente expuesto, se puede concluir que la zona de estudio es muy favorable para la explotación comercial de la energía geotérmica. La experiencia de los muestreos llevados a cabo en los pozos perforados, así lo indica y sólo restarán estudios más profundos para determinar las dimensiones exactas del reservorio y su tiempo aproximado de explotación.



EXPLICACION

T.C. TUBERIA CIEGA

I.F. INCLUSION FLUIDA



5% DE CUARZO



10 AL 15% CALCITA



TEMPERATURAS
ACTUALES CEL



TEMPERATURAS POR
INCLUSIONES FLUIDAS



APARICION IMPORTANTE
DE EPIDOTA

FAC. DE INGENIERIA
TESIS FIGURA VI.I.

MODELO DE LA DISTRIBUCION
DEL FLUIDO HIDROTHERMAL

ALVARO JIMENEZ DIAZ B. FECHA
ENE/93

BIBLIOGRAFIA

Campos A., (1990). Síntesis de la geoquímica superficial del campo geotérmico de Berlín.

Informe: Sección de Geoquímica, Departamento de Exploración; Superintendencia de Exploración y Evaluación de Campos Geotérmicos. CEL, 46 p. (Inédito).

Campos A., (1991). Exploración geoquímica del campo geotérmico de Berlín, Usulután, El Salvador C.A. Departamento de Exploración Geotérmica. CEL, 35 p. (Inédito).

Campos A., (1991). Modelo conceptual preliminar del campo geotérmico de Berlín. Sección de Ingeniería de Reservorios y Geoquímica, Departamento de Exploración Berlín; Superintendencia de Exploración y Evaluación de Campos Geotérmicos, Gerencia de Geocel. CEL, 30 p. (Inédito).

CEL, (1986). Síntesis de actividades geocientíficas realizadas en el campo geotérmico de Berlín. Superintendencia de Investigación y Desarrollo de Campos. División de Recursos Geotérmicos, CEL, 38 p. (Inédito).

CEL, (1987). Localización del pozo de reinyección TR-6. Campo geotérmico de Berlín. Superintendencia de Investigación y Desarrollo de Campos. División de Recursos Geotérmicos. CEL, 46 p. (Inédito).

CEL, (1988). Campo geotérmico de Berlín - Fase I para la explotación a gran escala, División de Recursos Geotérmicos, Gerencia de Geocel. CEL, 53 p. (Inédito)

CEL, (1990). Síntesis geovulcanológica del campo geotérmico de Berlín. Sección Geovulcanología Departamento de Exploración, Superintendencia de Exploración y Evaluación de Campos Geotérmicos, Gerencia de Geocel. CEL, 44 p. (Inédito).

CEL, (1990). Informe de Interpretación de la Resistividad Eléctrica del campo geotérmico de Berlín. Sección de Geofísica, Departamento de Exploración; Superintendencia de Exploración y Evaluación de Campos Geotérmicos, CEL, 60 p. (Inédito).

D'Amore F., Scandiffio G., Panichi C. (1983). Some observations on the chemical classification of groundwaters. Geothermics, V. 12, N° 2/3, pp. 111-148.

Giggenbach W. F. (1986). Graphical techniques for the evaluation of water/rock equilibration conditions by use of Na, K, Mg and Ca contents of discharge waters. Proceedings 8th New Zealand Geothermal Workshop, pp. 37-43.

González E., Rentería D., Faz P., Torres V., (1992). Estudios Petrológicos del campo geo-

térmico de Berlín, El Salvador C.A. División Fuentes de Energía, Departamento de Geotermia, Instituto de Investigaciones Eléctricas, 90 p. (Inédito).

González E., Rentería D., Garduño V., Verma P., Torres V., Nieva D., Faz P., (1992). Structural Tectonic Analysis of Ahuachapán-Chilapa Geothermal Field, El Salvador. División Fuentes de Energía, Departamento de Geotermia, Instituto de Investigaciones Eléctricas, 5 p. (Inédito)

López L. J., (1992), Estudio de Imágenes y Cintas magnéticas de Satélite para la zona de Berlín El Salvador C.A., Instituto Tecnológico de Ciudad Madero, Tamaulipas, México. 80 p. (tesis inédita).

Morán O.G.N., (1989). Evaluación de la amenaza sísmica para el área Geotérmica de Berlín, El Salvador C.A. Universidad de Costa Rica, Facultad de Ciencias Básicas, Escuela Centroamericana de Geología. 74 p. (tesis inédita).

Zamora A. de, (1989). Actualización del informe sobre mineralogía de alteración secundaria del campo geotérmico de Berlín; Evolución Volcánica. Unidad de Petrografía, Centro de Investigaciones Geotérmicas. CEL. 22 p. (Inédito).