

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR.

FACULTAD DE CIENCIAS NATURALES Y MATEMÁTICA.

ESCUELA DE FÍSICA.



Universidad de El Salvador

Hacia la libertad por la cultura

TRABAJO DE GRADUACION.

PROSPECCIÓN DE FLUJO DE CALOR EN EL ÁREA SUR – ESTE
DEL CAMPO GEOTÉRMICO DE AHUACHAPÁN.

PRESENTADO POR:

GERBER OVIDIO LUCHA FAJARDO.

LUDWIN ERNESTO MORAN TORRES.

PARA OPTAR AL GRADO DE:

LICENCIADO EN FÍSICA.

SAN SALVADOR, CIUDAD UNIVERSITARIA, SEPTIEMBRE DE 2003

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR.
FACULTAD DE CIENCIAS NATURALES Y MATEMÁTICA.
ESCUELA DE FÍSICA.



Universidad de El Salvador
Hacia la libertad por la cultura

TRABAJO DE GRADUACION.
PROSPECCIÓN DE FLUJO DE CALOR EN EL ÁREA SUR – ESTE
DEL CAMPO GEOTÉRMICO DE AHUACHAPÁN.

PRESENTADO POR:

GERBER OVIDIO LUCHA FAJARDO.

LUDWIN ERNESTO MORAN TORRES.

ASESOR: LIC. BENANCIO HENRIQUEZ MIRANDA.

SAN SALVADOR, CIUDAD UNIVERSITARIA, SEPTIEMBRE DE 2003

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR.

FACULTAD DE CIENCIAS NATURALES Y MATEMÁTICA.

ESCUELA DE FÍSICA.



Universidad de El Salvador

Hacia la libertad por la cultura

TRABAJO DE GRADUACION.

PROSPECCIÓN DE FLUJO DE CALOR EN EL ÁREA SUR – ESTE
DEL CAMPO GEOTÉRMICO DE AHUACHAPÁN.

PRESENTADO POR:

GERBER OVIDIO LUCHA FAJARDO.

LUDWIN ERNESTO MORAN TORRES.

F_____

ASESOR: LIC. BENANCIO HENRIQUEZ MIRANDA

SAN SALVADOR, CIUDAD UNIVERSITARIA, SEPTIEMBRE DE 2003

AUTORIDADES UNIVERSITARIAS.

RECTOR: Dra. MARIA ISABEL RODRIGUEZ.

SECRETARIO GENERAL: Lic. LIDIA MARGARITA MUÑOZ VELA

FISCAL GENERAL: Lic. PEDRO ROSALIO ESCOBAR

FACULTAD DE CIENCIAS NATURALES Y MATEMATICA.

DECANO(A): Lic. LETICIA PAUL DE FLORES.

SECRETARIO(A): Lic. MARTA NOEMI MARTINEZ DE ROSALES

DIRECTOR DE LA ESCUELA: MSc. ROSENDO PICHINTE ALVARENGA

CIUDAD UNIVERSITARIA, SEPTIEMBRE DE 2003

DEDICATORIA

A DIOS TODO PODEROSO: Por darme paciencia y sabiduría para lograr todos mis objetivos planeados hasta este momento.

A JESUS: Por ser mi amigo y hermano en los momentos más difíciles que he tenido en mi vida y estudios.

A MARIA: Por escucharme en los momentos más difíciles y darme sus sabios consejos para no desmayar en la vida.

A MI MADRE: Por estar siempre conmigo, por sus valiosos consejos para luchar en la vida por lo que nos proponemos, por todo el amor que me ha dado.

A MI PADRE: Por ser un buen amigo, por todo el cariño y amor que me ha dado, por sus consejos valiosos para seguir en la vida y ser un hombre de provecho.

A MI LINDA ESPOSA: Por darme todo su amor, cariño, ternura y paciencia; ella siempre me aconseja que no me dé por vencido en la vida, que siempre luche por lo que quiero, por que ella estará conmigo en las buenas y en las malas.

A MIS HERMANAS.

MIS ABUELOS.

MIS SUEGROS.

**MIS TIAS.
Y DEMAS FAMILIA**

Y AMISTADES.

LUDWIN ERNESTO MORAN TORRES

A DIOS TODO PODEROSO:

Por darme la vida, la fuerza interior para vencer obstáculos y poder alcanzar la meta.

A MI MADRE:

Por darme la vida, el cariño y el apoyo constante que tan importante fue para alcanzar el triunfo.

A MI PADRE:

Por ser un ejemplo, por sus consejos, y por impulsarme a lograr el objetivo.

A MI ESPOSA:

Por apoyarme en todo momento de mi vida.

A MIS HIJOS / AS:

Herbert, Elicena, Nelson y Mercedita, por ser la razón de mi existencia y de mis sacrificios.

A MIS HERMANOS:

Yuri y Marlene por apoyarme en todo momento.

MIS AMIGOS Y DEMAS FAMILIA:

GERBER OVIDIO LUCHA FAJARDO

AGRADECIMIENTOS

- A Lic. Benancio Henríquez:** Por habernos asesorado el presente trabajo de investigación, aún en su tiempo libre.
- A MSc. Tomás Soriano:** Por sus asesorías y observaciones realizadas de manera objetiva en la parte de Conductividad térmica y que ayudaron mucho en la realización del presente trabajo. Por el préstamo del equipo Sonda Aguja y computadora.
- A Lic. Raúl Alvarenga:** Por sus observaciones realizadas de manera muy objetiva y que ayudaron a la redacción del presente trabajo
- A Dra. Dina Larios de López:** Por sus asesorías, observaciones y préstamo del equipo de flujo de calor, para la realización de este trabajo.
- A Ing. Julio Guidos
Y Lic. Pedro Santos:** Por permitirnos utilizar las instalaciones del Campo geotérmico de Ahuachapán y equipo de transporte este trabajo, para la realización de este trabajo.
- A los compañeros y
Amigos de la SECF:** Muy especialmente a: Luz de María Méndez, Américo Mejía y Oscar Olmedo
- A los compañeros y
Amigos de La Escuela de Física:** Muy especialmente a Lic. Marco Antonio Ayala, Lic. Guillermo Morán, MSc. Víctor Cortés, Lic. Nelson Cedillos, Lic. Oscar Amaya, Tomás Caprín.
- A los compañeros y
Amigos de GESAL:** Lic. José Rivas, Julio Castellón, María Inés y Luis Henríquez.

LUDWIN ERNESTO MORAN TORRES Y GERBER OVIDIO LUCHA FAJARDO

INDICE

	Pág.
RESUMEN.	viii
INTRODUCCION.	ix
CAPITULO 1	
CONDUCCION TERMICA.	
1.1 INTRODUCCION.	1
1.2 CONDUCCIÓN TÈRMICA EN LA CORTEZA TERRESTRE.	1
1.3 ECUACIÒN PARA LA DISTRIBUCIÒN DE LA TEMPERATURA EN LA TIERRA.	3
1.3.1 ECUACIÒN GENERAL DE CONDUCCIÒN DE CALOR.	3
CAPITULO 2	
FLUJO DE CALOR CONDUCTIVO.	
2.1 INTRODUCCION.	8
2.2 FLUJO DE CALOR TERREESTRE Y CIRCULACION HIDROTERMAL.	9
2.3 METODOS DE MEDICION DEL FLUJO DE CALOR SUPERFICIAL.	9
2.4 CONDUCTIVIDAD TERMICA Y GRADIENTE TERMICO.	12
2.5 CORRECCIONES DIURNAS Y ESTACIONALES. LEY DE FOURIER,	13
2.6 VARIACIONES DIURNAS Y ANUALES.	15
2.7 FLUJO DE CALOR CONDUCTIVO EN FALLAS.	17
2.7.1 PATRONES DE FLUJO DE CALOR CONDUCTIVO.	17

2.7.2 PATRONES DE FLUJO DE CALOR CONVESTIVO.	18
--	----

CAPITULO 3

CONDUCTIVIDAD TERMICA DE LOS SUELOS.

3.1 INTRODUCCION.	20
3.2 CONDUCTIVIDAD TERMICA.	21
3.2.1 LA CONDUCTIVIDAD TERMICA DE LOS SUELOS.	21
3.3 METODOS PARA LA MEDICION DE LA CONDUCTIVIDAD TERMICA.	22
3.3.1 RELACIONES EMPIRICAS.	22
3.3.2 SERIES TEMPORALES DE TEMPERATURA EN LOS SUELOS.	24
3.3.3 USO DE SENSORES DE FLUJO DE CALOR Y MEDICION DE GRADIENTE	25
3.3.4 METODO DE LA SONDA AGUJA.	25
3.3.4.1 FUNDAMENTACION TEORICA.	26

CAPITULO 4

CAMPO GEOTERMICO DE AHUACHAPAN.

4.1 INTRODUCCION.	33
4.2 SISTEMA GEOTERMICO.	33
4.2.1 CARACTERISTICAS DEL SISTEMA GEOTERMICO.	34
4.3 ESTUDIOS GEOVULCANOLOGICOS.	42
4.4 INTERPRETACION DE LOS EVENTOS VOLCANICOS.	47
4.5 GEOLOGIA ESTRUCTURAL.	50
4.6 ESTUDIO GEOLOGICO EN LA ZONA SURESTE DEL CAMPO GEOTERMICO DE AHUACHAPAN.	52

4.6.1 DESCRIPCION DE LA ZONA DE ESTUDIO	52
4.6.2 ESTRATIGRAFIA Y LITOLOGIA	54
4.6.3 ESTRUCTURAS Y PERMEABILIDAD	57
CAPITULO 5	
PROCEDIMIENTO DE INVESTIGACION.	
5.1 INTRODUCCION.	61
5.2 HIPOTESIS.	61
5.3 VARIABLES.	61
5.4 UNIVERSO Y MUESTRA.	62
5.5 INSTRUMENTOS.	63
5.5.1 DESCRIPCION DEL EQUIPO.	63
5.6 MEDICION DE VARIABLES Y PROCESAMIENTO	65
CAPITULO 6	
DISCUSION Y ANALISIS RESULTADOS	
6.1 INTRODUCCION	71
6.2 MAPA DE FLUJO DE CALOR CONDUCTIVO	71
6.3 PERFILES DE FLUJO DE CALOR CONDUCTIVO	73
6.4 CORRELACION DE MAPA Y PERFILES DE FLUJO DE CALOR CONDUCTIVO CON ESTRUCTURAS GEOLOGICAS	77
6.5 MAPA RESUMEN DE INFORMACION	79

CAPITULO 7
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

7.1 CONCLUSIONES 81

7.2 RECOMENDACIONES 81

BIBLIOGRAFIA. 83

INDICE DE FIGURAS Y TABLAS

	Pág.
<u>FIGURAS.</u>	
CAPITULO 1	
Figura 1 Trozo cilíndrico.	2
Figura 2 Flujo de calor unidireccional.	4
CAPITULO 2	
Figura 3 Onda de temperatura vrs.tiempo a una profundidad de 2cm.	13
Figura 4 Ondas de Temperatura para las profundidades de 2, 70 y 92cm en sol.	16
Figura 5 Esquema de falla modelo.	17
Figura 6 Patrones de flujo de calor en el plano de una falla y perpendicular a ella. Flujo conductivo	18
Figura 7 Patrones de flujo de calor en el plano de una falla y perpendicular a ella. Flujo convectivo.	19
CAPITULO 3	
Figura 8 Diagrama del equipo de la Sonda Aguja.	26
CAPITULO 4	
Figura 9 Representación esquemática de un sistema geotérmico ideal.	35
Figura 10 Modelo Geológico Conceptual Campo Geotérmico de Ahuachapán.	39
Figura 11 Esquema Geológico de los eventos magmáticos Pre – Caldéricos. del Campo Geotérmico de Ahuachapán	44
Figura 12 Esquema Geológico del Evento Caldéricos. del Campo Geotérmico de Ahuachapán	45
Figura 13 Esquema Geológico del vulcanismo post - Caldérico. del Campo Geotérmico de Ahuachapán	46

Figura 14 Mapa Geológico Campo Geotérmico Ahuachapán – Chipilapa.	49
Figura 15 Mapa estructural regional del Campo Geotérmico de Ahuachapán.	51
Figura 16 Sistemas de fallas que presenta la zona Sur – Este del Campo Geotérmico de Ahuachapán	53
Figura 17 Área de estudio para flujo de calor en la zona Sur – Este del Campo Geotérmico de Ahuachapán.	54
Figura 18 Patrones de los datos estructurales medidos en el campo, ubicados sobre un mapa del área de estudio.	59

CAPITULO 5

Figura 19 Zona de estudio en el área sur – este del Campo Geotérmico de Ahuachapán.	62
Figura. 20. Data Loger, marca HOBO	63
Figura.21 Termómetro DUAL Marca BARNANT	63
Figura 22 Circuito del Equipo Sonda aguja, para la medición de conductividad térmica	64
Figura 23 Estación Base	65
Figura 24 Línea de temperatura base obtenida a través de una correlación lineal del programa EXCEL 97, para una profundidad de 2 cm	67

CAPITULO 6

Figura 25 Mapa de flujo de calor conductivo para la zona sur – este del campo geotérmico de Ahuachapán	72
Figura 26 Ubicación de los perfiles de flujo de calor, zona sur – este del Campo geotérmico de Ahuachapán.	74
Figura 27 Mapa de ubicación de perfiles de flujo de calor conductivo y correlación con estructuras geológicas.	76
Figura 28 Mapa de correlación de flujo de calor y estructuras geológicas Campo geotérmico de Ahuachapán	78
Figura 29 Mapa Ubicación de zona propuesta para explotación Campo geotérmico de Ahuachapán.	80

TABLAS

Tabla 1 Resumen sobre la litología y estructuras encontradas en los núcleos de perforación de los pozos AH-33B, AH-34, AH-34B, AH-35 A y AH-35B.	56
Tabla 2 Resumen de promedios de buzamientos para los diferentes grupos.	58
Tabla 3 Parte de los datos colectados por la estación base para una profundidad de 2cm, en las cercanías del Campo Geotérmico de Ahuachapán.	66
Tabla 4 Parte de los datos colectados en las estaciones termométricas para las profundidades de 70 y 2cm, en la zona SE del Campo Geotérmico de Ahuachapán	68
Tabla 5 Parte de los datos colectados por el equipo de medición de conductividad térmica en la zona SE del campo geotérmico de Ahuachapán.	69

RESUMEN

El presente proyecto de investigación, como requisito para optar al grado de licenciatura en física, se desarrolló en un área de 6 Km.² de la parte Sur – Este del campo geotérmico de Ahuachapán, con el objetivo de determinar el flujo de calor conductivo de la zona y áreas probables para futuras perforaciones.

Este estudio se realizó entre las fechas del 30 de Abril y el 24 de mayo de 2002 para la captura de datos; su procesamiento e interpretación en los restantes meses del 2002 y parte del 2003.

Se realizaron mediciones de temperatura en una estación base a profundidades de 2, 30 y 70 cm, y en estaciones termométricas a 2 y 70 cm, cada 200 – 300m de distancia. A partir de los cuales se determinó el flujo de calor conductivo por medio de la ley de Fourier

$$Q = - K \Delta T / \Delta Z.$$

Los datos fueron procesados por medio del programa EXCEL 97, y el mapa y perfiles de flujo de calor conductivo se elaboraron con el programa SURFER 7.0, los cuales se interpretaron de manera cualitativa y correlacionándolos con las estructuras geológicas de la zona de estudio.

Los resultados del análisis cualitativo establecen lo siguiente:

De las áreas de mayor anomalía de flujo de calor conductivo), es la zona comprendida entre las fallas Buena Vista y La Planta, la que se recomienda como probable zona de interés para futuras perforaciones, por presentar un valor anómalo mayor a las otras zonas (0.65 W / m²) y encontrarse entre dos estructuras probablemente activas.

INTRODUCCION

Como parte de la expansión del campo geotérmico de Ahuachapán, por medio de GESAL S.A. de C.V., se planteó, el estudio de la zona Sur Este de este campo. Dentro de los métodos geofísicos propuestos para el estudio de la zona, se planteo el método de flujo de calor conductivo, el cual es presentado en el presente trabajo.

Al conjunto integrado por la fuente de calor, la capa sello, la recarga, descarga y el reservorio con su patrón de flujo se le denomina sistema geotérmico.

Cuando un sistema es explotable comercialmente, se desarrollan una serie de instalaciones superficiales las cuales junto con el sistema geotérmico constituyen lo que se denomina campo geotérmico.

El presente estudio exploratorio utilizó como universo el campo geotérmico de Ahuachapán, el cual se localiza a 103 Km al Oeste de San Salvador, en el flanco Sur del Graben Centroamericano y al Norte del complejo volcánico Apaneca – Cuyanausul. Como muestra la zona localizada al sur – este del campo geotérmico de Ahuachapán, entre las coordenadas Lambert 309000 – 311000 m latitud Norte y 412000 - 414000 longitud Este, con una extensión aproximada de 6 Km².

La importancia de realizar un estudio de flujo de calor en áreas geotérmicas como la de Ahuachapán, se debe a que son sistemas fracturados, donde los fluidos se mueven a través de fallas y fracturas, transportando el calor advectivamente (calor transportado por fluido en movimiento). Este transporte genera gradientes de temperaturas hacia la superficie, que correlacionado con las estructuras geológicas, permite identificar fallas o zonas permeables en el campo, que pueden constituirse en áreas de interés para la explotación geotérmica.

Por eso, como objetivo principal planteado para esta investigación fue: La determinación de la magnitud y distribución de la anomalía térmica en el área Sur – Este del campo geotérmico de

Ahuachapán, para identificar fallas y áreas permeables, de interés para la explotación del recurso geotérmico. Y la hipótesis planteada fue que: existe una alta probabilidad de que la Anomalía térmica observada en la zona Sur – Este del campo Geotérmico de Ahuachapán sea de importancia para la extensión del campo Geotérmico de Ahuachapán.

Para el cálculo de flujo de calor conductivo, a partir de la Ley de Fourier, se realizaron las mediciones de las siguientes variables:

Conductividad térmica: el tiempo (min.), Voltaje (V), resistencia (Ω), profundidad (m), temperatura ($^{\circ}\text{C}$) y corriente (A).

Gradiente térmico: tiempo (min.), Profundidad (m) y temperatura ($^{\circ}\text{C}$).

Los datos obtenidos se procesaron de la siguiente manera:

A cada una de las series de datos registrados por la estación base a las profundidades de 2, 30 y 70 cm, se les calculó la temperatura base (línea de tendencia) por medio del programa EXCEL 97. Con este resultado se determinó el factor de corrección para cada medida registrada por la estación base.

Para los datos de los 57 puntos termométricos, a las profundidades de 2 y 70 cm el procesamiento de los datos se realizó en una hoja del programa EXCEL 97 de la siguiente manera: las temperaturas medidas en cada estación termométrica fueron corregidas por medio de la siguiente expresión:

$$\textit{Temperatura corregida} = \textit{Temperatura medida} - \textit{Factor de corrección}$$

Con los valores de las temperaturas corregidas, se calcularon los valores de los gradientes térmicos entre las profundidades de 2 y 70 cm para cada estación termométrica.

Para los datos de conductividad térmica el procesamiento de estos datos, consistió en graficar los valores de temperatura vrs. Logaritmo natural del tiempo, y el cálculo del valor promedio de la conductividad térmica de la zona de estudio.

Los valores de flujo de calor conductivo para cada estación termométrica fueron calculados a

partir de la ley de Fourier $Q = - K \Delta T / \Delta Z$, después de realizadas las respectivas correcciones a las temperaturas medidas en las estaciones termométricas y calculado el valor promedio de la conductividad térmica. A partir de estos datos se elaboró el mapa y los perfiles de flujo de calor conductivo por medio del programa SURFER 7.0, para su respectivo análisis cualitativo.

La estructura del presente trabajo de investigación se planteó de la siguiente manera:

- Los capítulos 1, 2 y 3 se desarrolla en forma general la fundamentación teórica base, sobre conducción térmica, flujo de calor conductivo y conductividad térmica de los suelos.
- En el capítulo 4, se desarrollan las características geológicas del campo geotérmico de Ahuachapán y de la zona de estudio.
- El capítulo 5, es el desarrollo del procedimiento de investigación utilizado para el estudio de flujo de calor conductivo, en la zona sur – este del campo geotérmico de Ahuachapán.
- En los capítulos 6 y 7, se desarrollan el análisis de los resultados obtenidos en una forma cualitativa, a partir del mapa y perfiles de flujo de calor conductivo. Además se desarrollan las conclusiones y recomendaciones a partir del capítulo 6.

Dentro de las limitantes encontradas en la presente investigación se pueden mencionar:

- El no contar con el equipo necesario para la instalación de una estación de sol, para corregir los datos de temperatura realizados en la condición sol – sombra.
- Falta de sondas termométrica y termómetros digitales, para agilizar la captura de datos en las estaciones termométricas.
- El tipo de material de la zona de estudio, que no permitió alcanzar la profundidad inicial de 92 cm y agilizar la captura de datos.

La presente investigación tuvo como principales alcances:

- Delimitar la zona de mayor anomalía de flujo de calor conductivo.
- Generar una metodología de trabajo, para futuros estudios en otras áreas de interés para la explotación geotérmica.

- Si la zona propuesta en este estudio es corroborada, como zona anómala, entonces esta área contribuirá a la generación de mayor energía eléctrica.
- Corroborar la probable existencia de fallas activas dentro de la zona de estudio

CONDUCCIÓN TÉRMICA.

1.1 INTRODUCCIÓN.

La generación de energía calorífica en la corteza terrestre se da debido a diferentes factores entre los cuales podemos mencionar los siguientes: decaimientos de minerales radioactivos, reacciones químicas, fricción, presión mecánica, etc.; pero los mecanismos más importantes de generación de calor hacia la superficie terrestre son la tectónica de placas y ciertos procesos físicos que dan lugar a la formación y flujo de magma lo cual crea volcanes y calienta formaciones geológicas.

La energía calorífica conducida hacia la superficie terrestre, que se genera ya sea por un proceso de subducción (colisión e introducción de una placa por debajo de otra) o por la separación de la corteza debido al movimiento divergente de las placas (el magma asciende a través de la litosfera y se derrama en la superficie); puede ser almacenada en las rocas o en acuíferos a varios kilómetros de profundidad.

Esta energía conducida hacia la roca o acuíferos es la fuente principal para un sistema geotérmico que puede presentarse como: fumarolas, manantiales hidrotermales, suelos calientes y humeantes, lodos hirvientes, geysers, etc.

En este capítulo se desarrolla la base matemática a partir de la cual se realizará la investigación sobre flujo de calor.

1.2 CONDUCCIÓN TÉRMICA EN LA CORTEZA TERRESTRE.

Consideremos un trozo cilíndrico de la corteza terrestre de longitud L y sección transversal A donde las caras se mantienen a temperaturas diferentes T_1 y T_2 ($T_1 > T_2$).

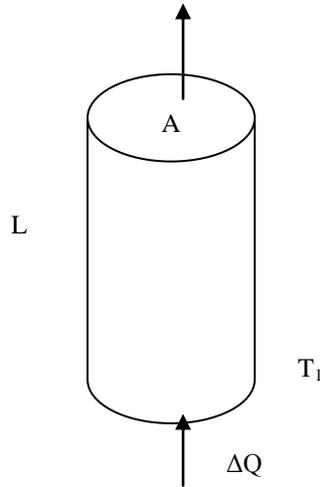


Fig.1 Trozo cilíndrico de la corteza terrestre

Sea ΔQ el calor que fluye perpendicularmente a las caras de la sección cilíndrica en un tiempo Δt dado, y ΔT la diferencia de temperatura, la cual se mantiene aproximadamente constante a lo largo del trozo cilíndrico. La experiencia demuestra que ΔQ es proporcional a Δt y al área A de la sección transversal para una diferencia de temperaturas ΔT dada, y además ΔQ es proporcional a $\frac{\Delta T}{L}$ para valores de Δt y de A dados, siempre que ΔT y L sean pequeños. Es decir que:

$$\Delta Q \propto \frac{\Delta T}{L}, \text{ aproximadamente.}$$

De acuerdo a lo anterior se concluye que la cantidad de calor ΔQ fluyendo a través del trozo cilíndrico de la corteza terrestre durante un tiempo t esta dado por la ecuación siguiente:

$$\Delta Q = -A t K \frac{\Delta T}{L} \quad (1)$$

Donde:

K : es una constante de proporcionalidad que depende del material, la cual es llamada conductividad térmica del material.

ΔT : Gradiente de temperatura.

A : sección transversal.

t : tiempo.

L: longitud de la sección transversal.

La Ec. (1) también se puede escribir de la siguiente manera:

$$Q = -K \frac{\Delta T}{L} \quad (2)$$

Donde Q representa la cantidad de calor fluyendo a través de un área A durante un tiempo

t, $(\frac{\Delta Q}{At})$.

En el caso de un cilindro infinitesimal de longitud dL a través del cual hay una diferencia de temperatura dT , obtenemos la ley fundamental de la conducción de calor, en la que el flujo de calor vertical Q (en la dirección z) queda determinado por:

$$Q_{cond.z} = -K \frac{dT}{dL} \quad (3)$$

Donde:

K : Conductividad térmica del material del suelo.

$\frac{dT}{dL}$: Gradiente de temperatura.

El signo menos indica que el calor fluye en la dirección en la que disminuye la temperatura.

De acuerdo con la Ec. (2), la Ec. (3) puede escribirse también de la siguiente manera:

$$\frac{dQ'}{dt} = -KdA \frac{dT}{dL} \quad (4)$$

Donde:

$\frac{dQ'}{dt}$: Flujo de calor por unidad de tiempo.

1.3 ECUACIÓN PARA LA DISTRIBUCIÓN DE LA TEMPERATURA EN LA TIERRA.

1.3.1 ECUACIÓN GENERAL DE CONDUCCIÓN DE CALOR.

Consideremos un cubo infinitesimal de dimensiones dx , dy y dz . El cubo de volumen elemental $dv = dx \, dy \, dz$ recibe una cantidad diferencial de calor dQ'_1 a través de su cara inferior $dx \, dy$ en un intervalo de tiempo dt . En el mismo tiempo dQ'_2 abandona el lado superior. Suponiendo que todas las caras están aisladas menos la inferior y la superior.

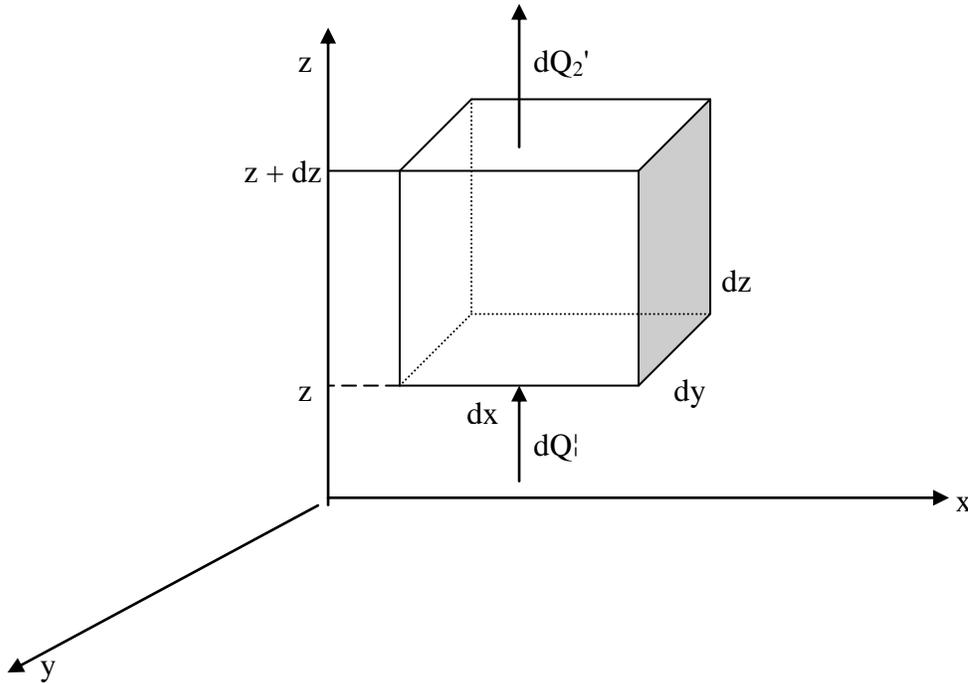


Fig. 2 Flujo de calor unidireccional.

En estas condiciones pueden darse los siguientes casos:

a) Almacenamiento de calor: $dQ'_1 > dQ'_2$:

En este caso el cubo absorbe calor.

b) Depleción de calor: $dQ'_2 > dQ'_1$:

Para este caso el cubo cede calor.

c) $dQ'_1 = dQ'_2$

El cubo sólo transporta calor.

Analizaremos en forma general el caso en que: $dQ'_2 > dQ'_1$.

De acuerdo con la Ec. (4), $\frac{dQ'}{dt} = -KdA \frac{dT}{dz}$, el calor que entra por la cara inferior viene dado

por:

$$\frac{dQ'_1}{dt} = Kdx dy \left(-\frac{\partial T}{\partial z} \right) \quad (5)$$

El gradiente de temperatura $-\frac{\partial T}{\partial z}$ puede variar, ya sea con el tiempo o con la posición del cubo. La variación de $-\frac{\partial T}{\partial z}$ como función de z únicamente es:

$$\left(\frac{\partial \left(\frac{\partial T}{\partial z} \right)}{\partial z} \right)$$

Sobre la distancia dz de z a $z + dz$, si $dQ'_2 > dQ'_1$, el cambio total en el gradiente de temperatura será:

$$\left(\frac{\partial \left(\frac{\partial T}{\partial z} \right)}{\partial z} \right) dz$$

La ecuación anterior también puede escribirse así:

$$\left(\frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) dz$$

Entonces a z el gradiente es $-\frac{\partial T}{\partial z}$, y a $z + dz$ el gradiente de temperatura es:

$$-\frac{\partial T}{\partial z} - \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} dz$$

Entonces dQ'_2 a la salida del cubo y en la misma forma que Ec. (5) está dado por:

$$\frac{dQ'_2}{dt} = Kdx dy \left(-\frac{\partial T}{\partial z} - \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) \quad (6)$$

De la cual:

$$\frac{dQ'}{dt} = \frac{dQ'_1}{dt} - \frac{dQ'_2}{dt} = Kdx dy \left(\frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) dz \quad (7)$$

El cambio de temperatura por unidad de tiempo del cubo será $\frac{dT}{dt}$ y en el intervalo de tiempo

dt será dado por $\left(\frac{dT}{dt}\right)dt$ grados. Como el análisis se basó en un cubo de volumen elemental, es necesario definir el calor específico volumétrico, C_v , obtenido multiplicando el calor específico c por la densidad ρ del material del cubo.

Para elevar el volumen $dx dy dz$ por $\frac{dT}{dt} dt$ grados, requiere un cambio de calor en el cubo de:

$$C_v = \frac{dQ'}{dt} = \rho c dx dy dz \frac{\partial T}{\partial t} \quad (8)$$

Combinando las ecuaciones Ec. (7) y Ec. (8) para $\frac{dQ'}{dt}$ obtenemos:

$$c \rho dx dy dz \frac{\partial T}{\partial t} = K dx dy \left(\frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) dz$$

De la cual:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{K}{c\rho} \left(\frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) \quad (9)$$

Donde:

$$\frac{K}{\rho c} : \text{es la difusividad térmica.}$$

Si se quita el aislante del cubo, de manera que el calor viaje a través de los ejes x, y, z la Ec. (9) se transforma en:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{K}{c\rho} \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) \quad (10)$$

De donde:

$$K \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) = \rho c \frac{\partial T}{\partial t} \quad (11)$$

La ecuación anterior puede escribirse de la siguiente manera:

$$K \nabla^2 T = \rho c \frac{\partial T}{\partial t} \quad (12)$$

La cual es la ecuación general de Fourier o ecuación general de conducción de calor.

La Ec. (12) se puede escribir también de la manera siguiente:

$$\begin{aligned}\frac{K}{\rho c} \nabla^2 T &= \frac{\partial T}{\partial t} \\ a \nabla^2 T &= \frac{\partial T}{\partial t}\end{aligned}\tag{13}$$

Donde:

$$a = \frac{K}{\rho c}$$

Cuando el flujo de calor hacia adentro y hacia fuera del cubo es igual, $dQ'_2 = dQ'_1$ (estado estable), T no varía con el tiempo, y $\frac{dT}{dt} = 0$ en la Ec. (9) $\frac{\partial T}{\partial z}$ es una constante y $\frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = 0$, la Ec. (6) se reduce a la ecuación:

$$\frac{dQ'}{dt} = -KdA \frac{dT}{dz}\tag{14}$$

Donde $dx dy = dA$.

Sustituyendo $\frac{dQ'}{dt}$ por dQ , la ecuación del estado estable es:

$$dQ = -KdA \frac{dT}{dz}\tag{15}$$

La ecuación anteriormente deducida es la misma Ec. (4) la cual usaremos para realizar nuestro estudio de flujo de calor.

CAPITULO 2

FLUJO DE CALOR CONDUCTIVO

2.1 INTRODUCCIÓN.

Cuando el objetivo buscado en la exploración es térmico, uno de los indicadores geofísicos usados para determinar el potencial geotérmico es las mediciones del flujo de calor y /o del gradiente de temperatura. El gradiente normal en áreas no termales puede variar entre 25°C/Km., y en las áreas termales superior a 100°C/ Km.

Para propósitos científicos el flujo de calor conductivo del terreno expresado en unidades de miliwatts por metro cuadrado (mw/m^2) constituye un parámetro térmico de mayor interés que el gradiente de temperatura. Según Ec. (2) el flujo de calor se obtiene multiplicando el gradiente vertical de temperatura por la conductividad térmica de la roca o suelo. En áreas continentales no termales el flujo de calor conductivo terrestre es de alrededor de $60 \text{ mw}/\text{m}^2$, y en áreas termales el flujo de calor puede ser varias veces mayor.

Para los mecanismos de conducción de calor deben considerarse las variaciones de temperatura diurnas y estacionales en la superficie del terreno, para realizar las correcciones debido a la radiación solar

Para corregir la temperatura a una profundidad Z y así relacionarla con la profundidad se instalan estaciones base para determinar las temperaturas diurnas.

Con la temperatura corregida a profundidades diferentes se puede encontrar el gradiente térmico y con la conductividad térmica del suelo medida, se puede encontrar el flujo de calor conductivo de la zona en estudio, utilizando la ley de Fourier (Ec. (4)).

2.2 FLUJO DE CALOR TERRESTRE Y CIRCULACIÓN HIDROTHERMAL.

Los modelos generales de circulación hidrotermal en la corteza de la Tierra pueden acomodar un rango de temperatura próximo a 0 grados cerca de la superficie hasta 1200°C (aproximadamente el valor de temperatura del "basalto solidus"). Las presiones correspondientes pueden ir de 0.1 MPa (presión atmosférica) a 1,000 MPa, la presión litostática aproximada a 40 Km. de profundidad. Sobre este rango de presión y temperatura, el agua puede existir como líquido, vapor o fluido supercrítico. El calor puede ser **advectivo**: transportado por el fluido en movimiento, y **conductivo**: transferido a través del medio roca-fluido (o suelo-fluido) debido a un gradiente de temperatura.

El término conducción se refiere a la transferencia de energía cinética, rotacional y vibracional de acuerdo a un gradiente de temperatura. La advección (o convección cuando el paso del fluido describe trayectorias cerradas) es generalmente más efectiva que la conducción como mecanismo de transferencia de calor.

2.3 MÉTODOS DE MEDICIÓN DEL FLUJO DE CALOR SUPERFICIAL.

La determinación de flujo de calor conductivo en suelos ha sido importante para los científicos de suelos que ocupan esa información para el balance energético del suelo que esta relacionado con el clima, la evaporación y evapotranspiración, etc. Obviamente también tiene aplicación en el balance energético en sistemas hidrotermales. Los métodos comúnmente usados para determinar el flujo de calor en suelos son los siguientes (Kimball y Jackson, 1975):

1) El método del medidor de flujo de calor.

Existen varios métodos para determinar el flujo de calor directamente. Uno es usando dos placas metálicas delgadas colocadas en la dirección perpendicular al flujo de calor. Donde se usa la diferencia de temperatura a través de las placas para determinar el flujo de calor. El equipo se calibra previamente con flujos de calor conocidos y se construye una curva de calibración. Los problemas con este método son los errores en la calibración y la interferencia del agua en la fase líquida y vapor.

2) El método calorimétrico.

Donde el flujo de calor es determinado considerando el cambio de calor en el perfil de suelo dividido en capas sucesivas durante un periodo de tiempo. El flujo de calor saliendo del tope de una capa de suelo Q_{hi-1} es igual al flujo entrando por la base de la capa Q_{hi} menos el cambio en calor por unidad de tiempo, ΔH_i :

$$Q_{hi-1} = Q_{hi} - \Delta H_i \quad (16)$$

El cambio de calor por unidad de tiempo se encuentra con la expresión:

$$\Delta H_i = C_i (\Delta Z_i) \left(\frac{\Delta T_i}{\Delta t} \right) \quad (17)$$

Donde C_i es la capacidad térmica volumétrica de la capa i -ésima, ΔZ_i es el espesor, y ΔT_i el cambio de temperatura por incremento de tiempo Δt . C_i se puede encontrar con mediciones de la densidad bruta y el contenido de agua de la capa i usando la ecuación propuesta por DeVries:

$$C_i = 0.46X_{mi} + 0.60X_{oi} + X_{wi} \quad (18)$$

Donde, X_{mi} , X_{oi} y X_{wi} ; son la fracción volumétrica de minerales, materia orgánica, y agua respectivamente, para la capa i . Debe notarse que en este método el flujo de calor a una profundidad conocida debe saberse antes de aplicar el método. Los científicos de suelos a

menudo asumen que el flujo de calor a 1 m es prácticamente cero (desprecian el flujo de calor del interior de la tierra, sólo les interesa las variaciones debidas al sol). Una dificultad grande de este método es que las variaciones de temperaturas en el metro superior del suelo son pequeñas, especialmente si el flujo de calor es normal.

3) El método de combinación.

En este método se colocan medidores de flujos (placas) a una profundidad de 5 a 10 cm y se encuentra el flujo de calor. Este se usa para calcular el flujo en las capas superiores utilizando el método calorimétrico. Este método todavía requiere el uso de los discos o placas que pueden condensar el agua y dar una determinación errada.

4) El método del alineamiento nulo.

En este método, los puntos en los que el gradiente de temperatura se hace nulo se encuentran en gráficas de temperatura versus profundidad. De esa manera, se conoce a que profundidad se tendrá que $Q_{hi} = 0$. Este valor del flujo cero se utiliza en las capas superiores para encontrar el flujo de calor usando el método calorimétrico.

Este método también tiene aplicación solamente si el flujo de calor total es el que nos interesa (flujo de calor solar menos el flujo de calor del interior de la tierra). El punto nulo ocurre porque a cierta profundidad el incremento de temperatura producido desde arriba por flujo de calor solar y el flujo de calor del interior de la tierra producen una zona en la que no hay variación de temperatura. Este método no tiene aplicación en la exploración geotérmica.

De los métodos descritos anteriormente, los dos que tienen aplicación en mediciones geotérmicas son los métodos del gradiente de temperatura y el de medición directa de flujo de calor (calorímetro de Benseman).

5) El método del gradiente de temperatura.

Donde el flujo de calor Q se determina encontrando el gradiente de temperatura y la conductividad térmica del suelo K y usando la ley de Fourier:

$$Q = -K \left(\frac{dT}{dz} \right) \quad (19)$$

Este método se utilizara en la presente investigación para determinar Q .

A continuación se describe este método.

2.4 CONDUCTIVIDAD TÉRMICA Y GRADIENTE TÉRMICO.

En ambientes naturales, las propiedades térmicas es raro que sean homogéneas a través del suelo. El tipo de suelo, la composición del suelo, y el contenido de humedad afectan las propiedades térmicas y estas variables varían con la profundidad. El contenido de agua y aire son los constituyentes del suelo que pueden tener variaciones considerables diariamente. Estas variaciones (en las propiedades térmicas) pueden ocasionar cambios en el gradiente de temperatura y en el flujo de calor medido. Sin embargo, estas variaciones son difíciles de considerar en un programa de exploración térmica. Con el objeto de evitarlas, las campañas de flujo de calor se deben hacer en época seca, cuando el suelo mantiene una humedad mínima

Durante e inmediatamente después de un periodo de lluvia, existe una capa de agua que infiltra el suelo hasta que alcanza la tabla de agua. Durante el periodo de infiltración, hay transferencia de calor de los constituyentes del suelo hacia el agua que infiltra de modo que si el suelo esta más caliente en la superficie, puede haber transferencia hacia abajo. Esta capa de agua también impide el flujo de calor hacia arriba y además el flujo de gases.

2.5 CORRECCIONES DIURNAS Y ESTACIONALES. LEY DE FOURIER.

Si consideramos el flujo de calor a una profundidad somera donde todavía el flujo de calor solar no se ha disipado (menos de un metro) veremos que varía con la hora del día (ver Fig. 4). Esto se debe a que la transmisión de calor solar a los suelos varía durante el día. De la misma manera esto produce variaciones en la temperatura (fluctuaciones diarias y estacionarias).

A continuación se presenta la gráfica de una onda de temperatura vrs tiempo para una profundidad de 2 cm.

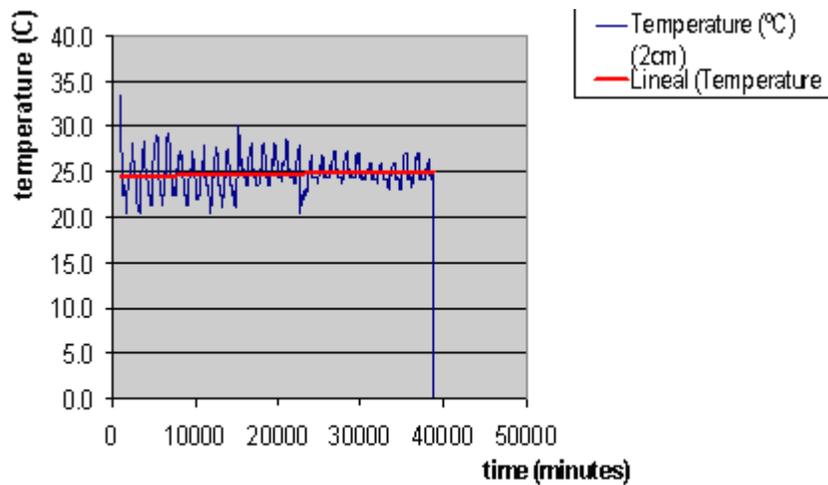


Fig. 3 Onda de temperatura vrs tiempo .a una profundidad de 2cm.

En esta señal se puede observar que durante el día, por el efecto solar, la temperatura aumenta del promedio (25° C), mientras que por la noche disminuye.

El calor puede transferirse en los suelos por medio de dos mecanismos: Convención y Conducción. En estos dos mecanismos, deben considerarse las variaciones de temperaturas diurnas y estacionales en la superficie. Si se asume que estas variaciones son periódicas, que la transferencia de calor es únicamente conductiva y que el campo es un sólido semi-infinito, la

solución para la Ec. (12) que representa la temperatura a cualquier profundidad dentro del suelo viene dada por:

$$T(z,t) = T_0 + aZ + \sum_{n=1}^{\infty} T_n \exp\left(-Z\left[\frac{nw}{2k}\right]^{\frac{1}{2}}\right) \cos\left(nwt - \varepsilon_n - Z\left[\frac{nw}{2k}\right]^{\frac{1}{2}}\right) \quad (20)$$

Esta ecuación es la solución de la Ec. (9).

Donde la temperatura superficial $T(0,t)$ esta dada por la serie de Fourier:

$$T(0,t) = T_0 + \sum_{n=1}^{\infty} T_n \cos(nwt - \varepsilon_n) \quad (21)$$

T_n = Amplitud del armónico n-esimo.

ε_n = Fase del n-esimo armónico.

t = Tiempo.

w = Frecuencia fundamental.

k = Difusividad térmica del suelo.

Trabajos previos (Dawson y Fisher, 1964), indican que dos armónicos dominan la serie:

La variación diurna

La variación anual.

De esta manera la Ec. (19) se escribe así:

$$T(Z,t) = T_0 + aZ + \text{Variación diurna de temperatura} + \text{Variación anual de temperatura} \quad (22)$$

Donde:

Variación diurna de temperatura es:

$$T_1 \exp\left[-Z\left(\frac{w}{2k}\right)^{\frac{1}{2}}\right] \cos\left(wt - \varepsilon - Z\left[\frac{w}{2k}\right]^{\frac{1}{2}}\right)$$

Variación anual de temperatura es:

$$T' \exp\left[-Z\left(\frac{w'}{2k}\right)^{\frac{1}{2}}\right] \cos\left(w't - \varepsilon' - Z\left[\frac{w'}{2k}\right]^{\frac{1}{2}}\right)$$

Así, la siguiente expresión nos da la temperatura corregida para la profundidad Z :

$$T(Z) = T(Z, t) - \text{variación diurna} - \text{variación anual} \quad (23)$$

De donde:

$$T(z) = T_0 + a Z \quad (24)$$

En otras palabras, la temperatura corregida $T(Z)$ vendrá dada por $T(Z, t)$, la temperatura a la profundidad Z en el tiempo t menos las variaciones diurna y anual de temperatura a la profundidad Z y en tiempo t .

Si al graficar T vs. Z la relación que se obtiene es $T(Z) = T_0 + aZ^n$ si n es aproximadamente igual a 1, el mecanismo de transferencia de calor dominante es conductivo y la ecuación representa la ley de Fourier, donde $a = \frac{Q}{K}$. Si por el contrario n resulta ser menor que 1, el mecanismo es convectivo.

A partir de la Ec. (4) se puede establecer la expresión para el cálculo del flujo de calor en condiciones estacionarias, donde la constante "a" corresponde al cociente entre el flujo de calor y la conductividad térmica, obteniendo la siguiente relación:

$$Q = K \frac{\Delta T}{\Delta Z} \quad (25)$$

Donde:

Q : Cantidad de calor por unidad de área y unidad de tiempo.

K : Conductividad térmica.

$\frac{\Delta T}{\Delta Z}$: Gradiente de temperatura.

Esta expresión se utilizará para evaluar el flujo de calor conductivo en la zona de estudio.

2.6 VARIACIONES DIURNAS Y ANUALES

Para poder encontrar la temperatura corregida $T(Z)$ y así relacionarla con la profundidad, es necesario instalar estaciones base para determinar las temperaturas diurnas y estacionales a

diferentes profundidades y condiciones atmosféricas, y así obtener gráficas de Temperatura vs. Tiempo.

La figura siguiente ilustra la atenuación y ángulo de desfase para una onda de temperatura a 2, 70 y 92 cms.

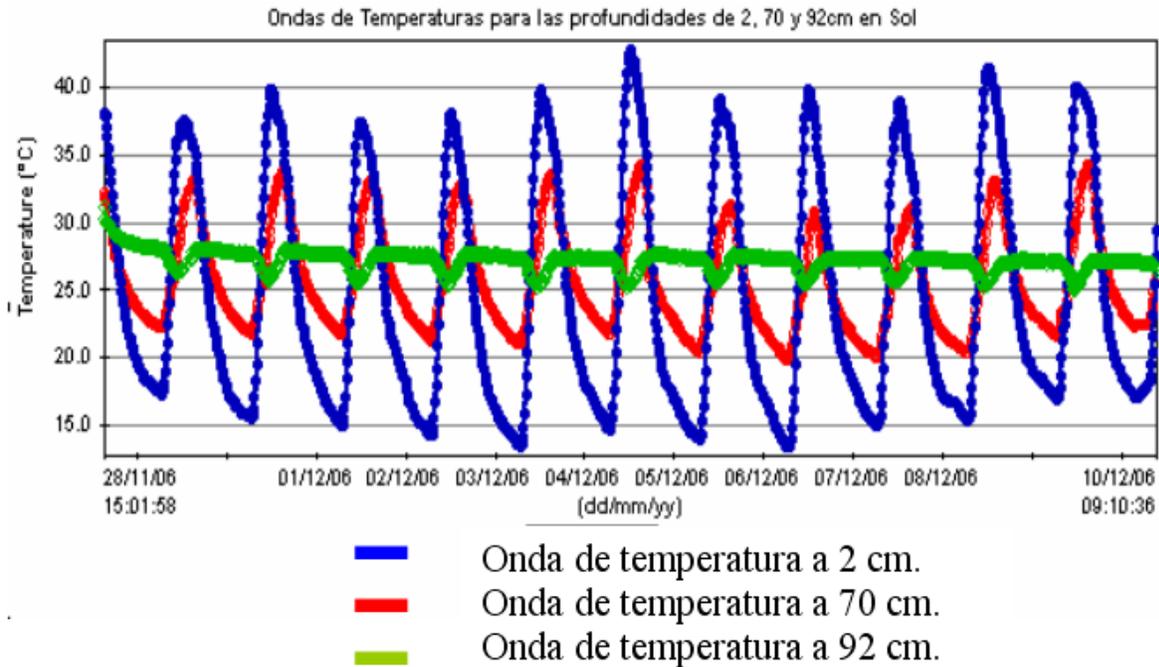


Fig. 4 Ondas de temperatura para profundidades de 2, 70 y 92 cm.

De estas gráficas puede obtenerse:

- La amplitud de las perturbaciones.
- El desfase de tiempo en la ocurrencia de máximos y mínimos para diferentes profundidades
- El periodo de la variación.
- La difusibilidad termal k del suelo a partir de la constante de decaimiento c de las variaciones con la profundidad, siendo:

$$c = \sqrt{\frac{\pi}{kP}}$$

Donde P = periodo de la variación considerada.

Profundidad a la que se consideran extinguidas las variaciones estacionales.

- Temperatura media anual del suelo.
- Velocidad de amortiguación de las variaciones diurnas de temperatura en función de la profundidad y precipitación lluviosa.

Sin embargo, en este trabajo solamente se utilizarán los gráficos para corregir la temperatura del suelo.

2.7 FLUJO DE CALOR CONDUCTIVO EN FALLAS.

Dadas las condiciones de flujo de calor y gradiente topográfico (debido a las diferentes elevaciones del suelo) adecuados se pueden originar diferentes tipos de flujo en el plano de fallas, entre los cuales están el conductivo y convectivo. De estos dos tipos de flujo el convectivo es el que genera fuentes termales en el trazo de la falla y también atrae más fluido hacia ella. A continuación se presenta un modelo de una falla a partir de la cual se describirán los patrones de flujo de calor conductivo y convectivo próximos a la falla.

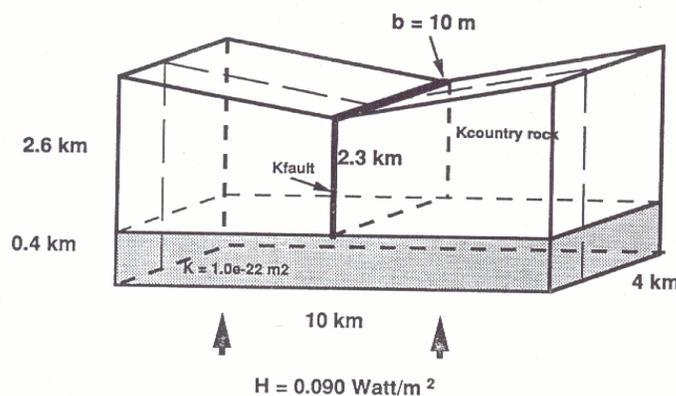


Fig. 5 Esquema de Falla Modelo

2.7.1. PATRONES DE FLUJO DE CALOR CONDUCTIVO

En las figuras siguientes se presenta el patrón de flujo de calor conductivo para un perfil en el plano de la falla y perpendicular a la falla. En el primer caso el flujo de calor presenta un

comportamiento uniforme indicando que se tiene la misma descarga de energía calorífica para todos los puntos de la falla.

Para el segundo caso el flujo se incrementa a medida que nos acercamos al plano de la falla, ya que por las condiciones topográficas el fluido de recarga tiende a concentrarse en el plano de la falla.

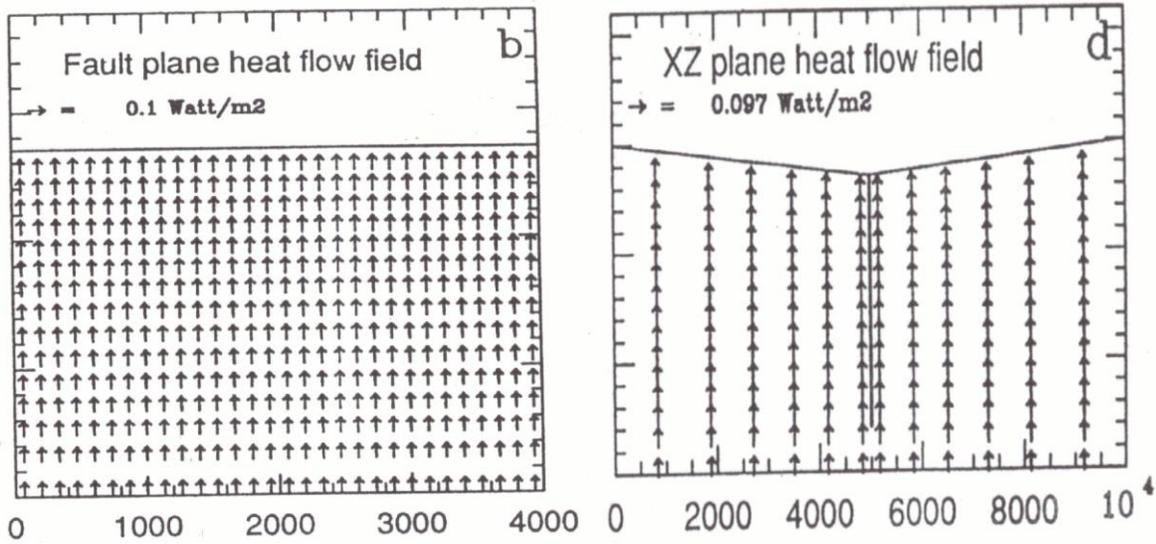


Fig. 6 Patrones de flujo de calor en el plano de una falla y perpendicular a ella. Flujo conductivo.

2.7.2 PATRONES DE FLUJO DE CALOR CONVECTIVO

A continuación se presentan las figuras que contienen el patrón de flujo de calor convectivo para un perfil en el plano de la falla y perpendicular a la falla. En el primer caso se tiene un régimen convectivo en todo el plano de la falla, estas condiciones se presentan cuando la falla transporta fluido a altas temperaturas. En el segundo caso se observa que a medida que nos acercamos a la falla se pasa de un régimen conductivo a convectivo por las condiciones topográficas de la falla.

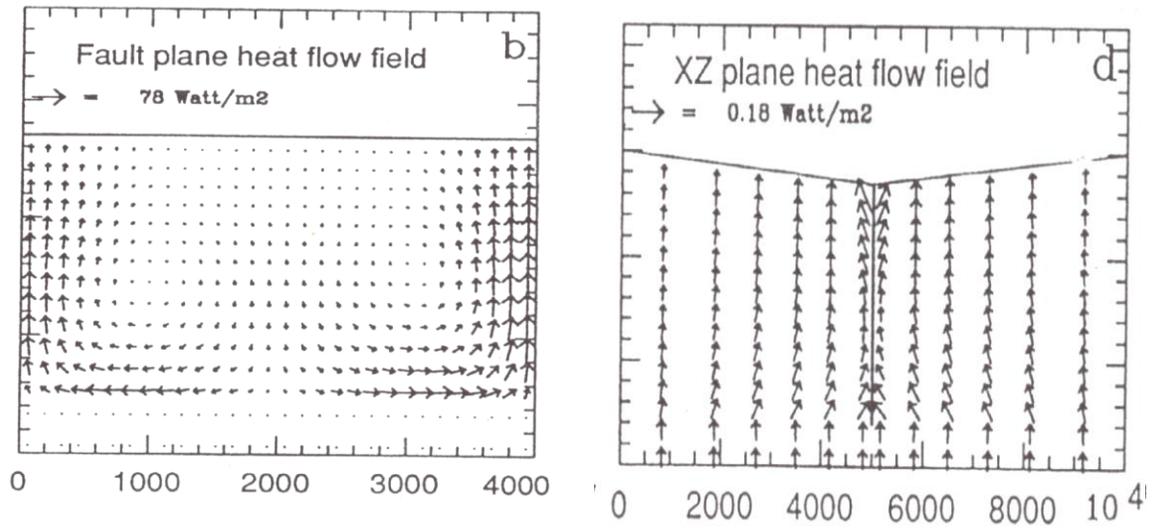


Fig. 7 Patrones de flujo de calor en el plano de una falla y perpendicular a ella. Flujo convectivo.

CAPITULO 3

CONDUCTIVIDAD TERMICA DE LOS SUELOS.

3.1 INTRODUCCION

En ambientes naturales la conductividad térmica es raro que sea homogénea a través del suelo, puede variar según el tipo, composición, humedad del suelo y la profundidad. Durante e inmediatamente después de un periodo de lluvia, existe una capa de agua que infiltra el suelo hasta que alcanza la tabla de agua. Durante el periodo de infiltración, hay transferencia de calor de los suelos hacia el agua que infiltra. Esta agua que infiltra cambia la conductividad de los materiales que constituyen el suelo.

La conductividad térmica de los suelos varía de acuerdo a los tipos de materiales del suelo además, a los constituyentes del suelo como son el agua y minerales los cuales pueden variar diariamente.

Como la conductividad térmica en el subsuelo depende del tipo de roca, de su porosidad y de la presión y composición de los fluidos que contiene, esta conductividad puede variar hasta el doble entre rocas no consolidadas y ciertos tipos de rocas ígneas cristalinas. Las variaciones en las propiedades térmicas dan como resultado variaciones en el gradiente de temperatura y en el flujo de calor medido.

Estas variaciones en la conductividad térmica pueden ocasionar variaciones en el gradiente térmico y en el flujo de calor medido.

Para evitar estas variaciones, en la conductividad térmica, las campañas de flujo de calor se deben hacer en la época seca, cuando el suelo mantiene una humedad mínima.

Existen una serie de métodos para medir la conductividad térmica de los suelos entre los cuales se pueden mencionar los siguientes:

a) Relaciones empíricas. Las cuales relacionan la conductividad térmica del suelo con el contenido de minerales, agua y aire. Dentro de estas relaciones se pueden mencionar la de DeVries y la de Kersten.

b) Series temporales. Se basa en conocer la temperatura del suelo a dos profundidades diferentes Z_1 y Z_2 para luego encontrar la difusividad térmica aparente.

c) Uso de la ecuación de Fourier. Se necesita medir el flujo de calor Q y el gradiente de temperatura con un equipo de sensores de capas delgadas paralelas que se colocan perpendicularmente a la dirección del flujo.

d) Método de la sonda de aguja. Se basa en que cuando se le aplica una corriente a la fuente lineal dentro de la sonda (alambre de cobre) esta genera calor a través del suelo y luego se mide la temperatura en el medio a través del tiempo, para un punto situado a una distancia r de la fuente de calor.

3.2. CONDUCTIVIDAD TÉRMICA.

3.2.1 LA CONDUCTIVIDAD TÉRMICA DE LOS SUELOS.

Es interesante observar que mientras la conductividad hidráulica en los materiales de la corteza varia en aproximadamente 16 ordenes de magnitud, la conductividad térmica de la corteza superior generalmente varía en menos de un factor de 5. La conductividad térmica de arcillas lacustres, uno de los conductores mas pobres, es cerca de $1 \text{ W m}^{-1}\text{K}^{-1}$, mientras que el granito, un conductor relativamente bueno es $3 \text{ W m}^{-1}\text{K}^{-1}$.

De acuerdo a Ingebritsen y Sandford el valor promedio global para el gradiente de temperatura es 25° C/ Km .

Los parámetros que gobiernan la conducción de calor en medios porosos como los suelos, están determinados principalmente por el contenido de humedad. Esto se debe a que el agua y el aire son los únicos constituyentes del suelo que pueden variar diariamente.

3.3 MÉTODOS PARA LA MEDICIÓN DE LA CONDUCTIVIDAD TÉRMICA.

La conductividad térmica de los suelos se puede determinar de varias maneras:

- a) por medio de relaciones empíricas que involucran la conductividad térmica con el contenido de minerales, agua y aire, presentes en el suelo
- b) Por medio de series temporales a diferentes profundidades del suelo.
- c) Por medio de instrumentos que determinan directamente la conductividad térmica (como la sonda de aguja).
- d) Por medio de la ecuación de Fourier y medición directa del flujo de calor.

3.3.1 RELACIONES EMPÍRICAS.

DeVries (1952) desarrollo un modelo para la conductividad térmica macroscópica de un medio formado por partículas elipsoidales de un suelo en un medio continuo de agua (o aire):

$$k_h = \frac{\sum \kappa_j \theta_j k_{h,j}}{\sum_{j=1}^n \kappa_j \theta_j} \quad (26)$$

Donde $k_{h,j}$ es la conductividad térmica y θ_j es la fracción de volumen del j-esimo constituyente. κ_j es un factor que relaciona el gradiente de temperatura en los granos de suelo de la clase j con el gradiente de temperatura en el agua o aire. Si se asume que las partículas del suelo tienen forma de agujas, Nobre y Thomson encontraron que:

$$\kappa_j = \frac{2}{3} \left[1 + \left(\frac{k_{h,j}}{k_{h,w}} - 1 \right) g_j \right]^{-1} + \frac{1}{3} \left[1 + \left(\frac{k_{h,j}}{k_{h,w}} - 1 \right) (1 - 2g_j) \right]^{-1} \quad (27)$$

Donde g_j son factores de forma geométricos.

Para los espacios ocupados por aire, el factor de forma depende del contenido volumétrico de agua y se deduce de una interpolación lineal entre el valor de una forma esférica en saturación y el valor de 0.013 en el punto seco, por medio de la siguiente ecuación:

$$g_w = 0.013 + \left(\frac{0.022}{\theta_{w,wilt}} + \frac{0.298}{\eta} \right) \theta_w \quad (28)$$

Donde $\theta_{w,wilt}$ es una constante, η es la porosidad del medio y θ_w es la humedad del suelo.

Otra relación que se utiliza para encontrar la conductividad térmica de los suelos, es dada por la ecuación de Kersten, que se basa en la conductividad térmica medida de cinco suelos diferentes:

$$k_h = 0.1442(a_1 \log \theta_w - a_2)10^{a_3 \rho_d} \quad (29)$$

Donde la conductividad térmica se da en W / mK, la densidad seca del material ρ_d en $\frac{g}{cm^3}$, y a_1, a_2 y a_3 son constantes empíricas adimensionales. Para un suelo de areniscas, estas constantes son 0.750, 0.400 y 0.625 respectivamente.

Para ambos modelos (DeVries y Kersten), si el contenido de agua es menor que el 5% los modelos no son aplicables.

Otra relación empírica para encontrar la conductividad térmica del medio roca- fluido es la siguiente:

$$K = K_r^{(1-n)} K_f^n \quad (30)$$

Donde n es la porosidad, K_r es la conductividad de la roca y K_f representan la conductividad del fluido. A 25° C, K_f es cerca de 0.6 W m⁻¹.

3.3.2 SERIES TEMPORALES DE TEMPERATURA EN LOS SUELOS.

Si se conoce la temperatura en el suelo a dos profundidades diferentes Z_1 y Z_2 , la difusividad térmica aparente puede encontrarse. La difusividad térmica es la razón entre la conductividad térmica y la capacidad térmica volumétrica.

$$D_{h,app} = \frac{K_h}{c_h} \quad (31)$$

La ecuación más simple que sirve para este propósito es:

$$D_{h,app} = \frac{w}{2} \left(\frac{Z_1 - Z_2}{\ln\left(\frac{A_1}{A_2}\right)} \right)^2 \quad (32)$$

Donde A_i es la amplitud de la onda de temperatura en el punto a la profundidad Z_i y w es la frecuencia de la onda de temperatura (o sea $\frac{2\pi}{24}$ horas). Note que el tiempo de ocurrencia no se necesita. Esta ecuación es solo una primera aproximación para encontrar el valor de la difusividad.

Otra ecuación que se usa para este propósito es:

$$D_{h,app} = \frac{w}{2} \left(\frac{Z_2 - Z_1}{\arctan X} \right)^2 \quad (33)$$

Donde:

$$X = \frac{(T_1 - T_3)(T'_2 - T'_4) - (T_2 - T_4)(T'_1 - T'_3)}{(T_1 - T_3)(T'_1 - T'_3) + (T_2 - T_4)(T'_2 - T'_4)} \quad (34)$$

T y T' son las temperaturas registradas cada 6 horas (subíndices 1,2,3,4) a las profundidades Z_1 y Z_2 respectivamente.

Otra ecuación comúnmente utilizada es la siguiente:

$$D_{h,app} = \frac{1}{2w} \left(\frac{Z_2 - Z_1}{t_2 - t_1} \right) \quad (35)$$

Donde t_i es el tiempo medido para la ocurrencia de un máximo o un mínimo en la temperatura del suelo a la profundidad Z_i .

En lo que estamos interesados es en la conductividad térmica. Por esa razón con cada una de estas ecuaciones necesitamos al menos dos determinaciones de la difusividad termal para tener dos ecuaciones y dos incógnitas: la conductividad térmica y la capacidad térmica volumétrica. De esta manera ambos parámetros se pueden determinar.

3.3.3 USO DE SENSORES DE FLUJO DE CALOR Y MEDICIÓN DE GRADIENTE.

Otra manera de determinar la conductividad térmica es medir el flujo de calor Q (con el método del sensor de capas delgadas por ejemplo), y el gradiente de temperatura. De estas dos variables y la ley de Fourier podemos determinar la conductividad térmica:

$$K = \frac{Q}{\frac{\partial T}{\partial Z}} \quad (36)$$

Donde:

Q : Flujo de calor.

$\frac{\partial T}{\partial Z}$: Gradiente de temperatura.

3.3.4 MÉTODO DE LA SONDA AGUJA.

La sonda aguja consiste en una fuente lineal de calor la cual es energizada dentro del suelo por medio de un voltaje DC. Esta sonda es de aproximadamente 60 cm. de longitud. La respuesta que presenta cada tipo de material del substrato depende del tipo de suelo y se registran las variaciones de la temperatura con respecto al tiempo (t).

Luego la conductividad se encuentra con la expresión siguiente (Ec. (57)):

$$K = 0.272 \frac{I^2 R}{\tan \alpha} \quad (37)$$

Donde:

I : es la corriente suministrada a la sonda por la fuente energizadora.

R : es la resistencia del alambre dela sonda.

$\tan \alpha$: Es la pendiente de la grafica T vrs. $\ln t$.

La expresión anterior se utilizará para encontrar la conductividad térmica del suelo en la zona de estudio.

A continuación se presenta un esquema de la aguja de sondeo:

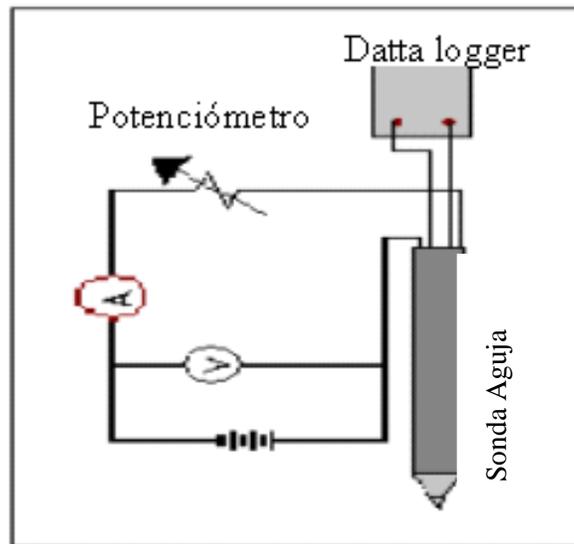


Fig. 8 Diagrama del de la sonda aguja.

3.3.4.1 Fundamentación teórica.

Si una línea de fuente de calor eléctricamente energizada de potencia constante, es enterrada en un cuerpo semi-infinito, homogéneo, inicialmente a una temperatura uniforme; la temperatura T de cualquier punto en el cuerpo, deberá ser función de las siguientes variables:

a) El tiempo “ t ” medido desde el momento cuando la corriente es conectada.

- b) La difusibilidad térmica “a” del material del cuerpo.
- c) La distancia radial “r” medida desde la línea de la fuente de calor.

Según Ec. (13) la ecuación matemática de la conducción calorífica en un sólido homogéneo semi- infinito, viene dada por:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \nabla^2 T \quad (38)$$

Donde el flujo de calor se desplaza en el sentido en que T disminuye (T =temperatura).

Desarrollando el operador Laplaciano en coordenadas cilíndricas, en vista de la simetría del problema, tenemos:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \left[\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial T}{\partial \theta} + \frac{\partial^2 T}{\partial Z^2} \right] \quad (39)$$

Obviamente $\frac{\partial T}{\partial t}$ no dependerá ni de θ ni de Z , si consideramos un medio homogéneo e infinito, entonces:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \left[\frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right) \right] \quad (40)$$

De donde:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \left[\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} \right] \quad (41)$$

Que se puede escribir:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \left[\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} \right] \quad (42)$$

Donde a es la difusividad térmica.

La solución de la ecuación diferencial Ec. (42), requiere de tediosos procedimientos matemáticos, hasta obtener la siguiente solución:

$$T = \frac{Q}{4\pi K} \int_0^t \left[\exp - \left(\frac{r^2}{4at} \right) \right] dt \quad (43)$$

Usando la sustitución $\beta = \frac{r^2}{4at}$, tenemos:

Si $t \rightarrow 0, \beta \rightarrow \infty$.

Si $t \rightarrow t, \beta \rightarrow rn$.

Donde:

$$n = \frac{1}{(4at)^{\frac{1}{2}}}$$

$$T = \frac{Q}{2\pi K} \int_{rn}^{\infty} \frac{e^{-\beta}}{\beta} d\beta. \text{ Desde } \beta = rn, \text{ hasta } \beta \rightarrow \infty.$$

$$T = \frac{Q}{2\pi K} [I(rn)] \quad (44)$$

Donde $I(rn) = E - \ln(rn) + \frac{(rn)^2}{2} - \frac{(rn)^4}{6} + \dots$

Para (rn) suficientemente pequeña.

$$I(rn) = E - \ln(rn) \quad (45)$$

Entonces:

$$T = \frac{Q}{2\pi K} [E - \ln(rn)] \quad (46)$$

E: constante de Euler.

Para las temperaturas T_1 en t_1 y T_2 en t_2 a cualquier distancia radial r , a los tiempos t_1 y t_2 , respectivamente se tendrá que:

$$T_2 - T_1 = -\frac{Q}{2\pi K} [\ln(rn_2) - \ln(rn_1)] \quad (47)$$

$$T_2 - T_1 = -\frac{Q}{2\pi K} \ln \left(\frac{n_2}{n_1} \right) \quad (48)$$

Del cambio de variables de la Ec. (43), se tiene la siguiente relación:

$$r \ n = \frac{r}{(4at)^{\frac{1}{2}}}$$

Entonces:

$$n_1 = \frac{1}{2(at_1)^{\frac{1}{2}}}$$

$$n_2 = \frac{1}{2(at_2)^{\frac{1}{2}}}$$

y :

$$\frac{n_2}{n_1} = \frac{2a^{\frac{1}{2}}t_1^{\frac{1}{2}}}{2a^{\frac{1}{2}}t_2^{\frac{1}{2}}}$$

$$\frac{n_2}{n_1} = \left(\frac{t_1}{t_2}\right)^{\frac{1}{2}}$$

$$\ln\left(\frac{n_2}{n_1}\right) = \ln\left(\frac{t_1}{t_2}\right)^{\frac{1}{2}}$$

Entonces:

$$\ln\left(\frac{n_2}{n_1}\right) = -\frac{1}{2}\ln\left(\frac{t_2}{t_1}\right)$$

Pasando de la variable n a la variable t, la Ec. (48) se transforma en:

$$T_2 - T_1 = \frac{Q}{4\pi K} \ln\left(\frac{t_2}{t_1}\right) \quad (49)$$

Donde el tiempo t, puede ser seleccionado de modo que los términos de un orden de magnitud más pequeño en la serie I (r n), puedan ser considerados despreciables. Es obvio que un gráfico de temperatura contra $\ln(t_2)$, debe ser una línea recta de pendiente $\frac{Q}{4\pi K}$.

Los parámetros Q y ΔT correspondientes a t_2 , pueden ser determinados experimentalmente, calculando así la conductividad térmica K del suelo.

Debido a que la variable “r” ha sido eliminada en la Ec. (49), la temperatura T_1 y T_2 puede ser tomada a cualquier distancia radial, pudiendo tomar la temperatura, incluso de la superficie de la línea de la fuente de calor.

Para medir la conductividad térmica del suelo en sitios naturales, es casi imposible insertar un alambre fino dentro del suelo, sin disturbar la formación original del suelo.

Experimentalmente, una sonda puede ser construida con tubos de prueba de 1/8 a 4 pulg. de diámetro, en el cual el alambre caliente es colocado en posición axial; con termocuplas colocadas holgadamente dentro del tubo.

También puede verse fácilmente que el calor desde la línea energizada, deberá pasar a través de las paredes de la sonda antes de llegar al suelo. Existe, por lo tanto, una resistencia dentro del tubo, y en la zona de contacto entre el suelo y la pared exterior del tubo.

Para tomar en cuenta la desviación de la línea de fuente de calor, Van der Held sugirió que un factor de tiempo podría ser insertado en el termino temporal de la Ec. (49). Van der Held consideró la diferencia en la absorción de calor entre la punta de prueba y la tierra desplazada, como una absorción de calor antes del inicio del tiempo medido. Se usó un factor de tiempo t para cada tiempo observado; entonces:

$$dT = \frac{Q}{4\pi K} \frac{dt}{t - t_0} \quad (50)$$

Y para la temperatura T al tiempo t :

$$T - T_1 = \frac{Q}{4\pi K} \ln \left[\frac{(t - t_0)}{(t_1 - t_0)} \right] \quad (51)$$

Diferenciando la Ec. (51), tenemos:

$$(t - t_0) = \frac{Q}{4\pi K} \frac{dt}{dT} = t_c \quad (52)$$

Donde:

t_c = Tiempo corregido.

Para muchos materiales, Van der Held demostró que t_0 era por lo menos constante para una punta de prueba. Una vez que t_1 y t_2 son determinadas, solamente son necesarias dos observaciones de temperatura, correspondientes a t_1 y t_2 , de manera que la conductividad térmica puede ser calculada a partir de la Ec. (51).

La desventaja de usar el tiempo corregido, es que el factor t toma en cuenta únicamente el tiempo inicial, mientras que el efecto debido al núcleo desplazado, continua existiendo durante el periodo entero de prueba.

Los resultados experimentales al usar el tiempo corregido fueron bastante lejanos de aquéllos que usaron la fuente de calor lineal. Tratando de explorar otros métodos de corrección, fue examinada la teoría de la fuente de calor cilíndrica.

Carslaw y Jaeger, derivaron la siguiente ecuación para temperaturas T a una distancia radial r desde la línea central de un cilindro, y el tiempo t después de un rango constante de calentamiento “ Q ”, por unidades de longitud, el cual es proporcionado al cilindro:

$$T = -\frac{2Q}{\pi K} \int_0^{\infty} \left(1 - e^{-au^2 t}\right) \frac{J_0(ur)Y_1(ur) - Y_0(ur)J_1(ur)}{u^2 [J_1^2(ur) + Y_1^2(ur)]} du \quad (53)$$

Dificultades encontradas a la ecuación:

- a) Solamente un método de prueba y error puede ser usado para resolver esta ecuación. No es práctica para aplicaciones de campo.
- b) En el periodo inicial de calentamiento, se podrían introducir errores apreciables, ya que es imposible calentar las puntas de prueba instantáneamente.

Finalmente, el problema fue resuelto usando un factor empírico en la Ec. (49). Este factor una vez determinado permanece constante para una punta de prueba dada (constante de las puntas de prueba).

Así, de la Ec. (51), tenemos:

$$K = \frac{Q}{4\pi(T_2 - T_1)} \ln \left[\frac{t_2 - t_1}{t_1 - t_0} \right] \quad (54)$$

Donde $Q = 3.413I^2R \frac{BTU}{ft.hr}$

Sin embargo la Ec. (54) se convierte en:

$$K = \frac{3.413I^2R}{4\pi \frac{(T_2 - T_1)}{\ln(t_2 - t_0) - \ln(t_1 - t_0)}} \quad (55)$$

Donde t_0 es el tiempo de referencia.

El término:

$$\frac{(T_2 - T_1)}{\ln(t_2 - t_0) - \ln(t_1 - t_0)} = \tan \alpha \quad (56)$$

Representa la pendiente de la curva de temperatura contra el logaritmo natural del tiempo.

Entonces:

$$K = 0.272 \frac{I^2R}{\tan \alpha} \quad (57)$$

La expresión anterior se utilizará para encontrar la conductividad del suelo en el área de estudio.

Como resultado de largas series de cálculo de prueba y error fue determinado el factor de corrección para K :

$$F_c = \frac{I}{I - C} \quad (58)$$

Que compensa la diferencia entre las puntas de prueba y la fuente de calor de alambre fino; donde C es la constante de la punta de prueba, la cual es diferente para diferentes puntas de prueba. Así:

$$K = 0.272 \left(\frac{I}{I - C} \right) \frac{I^2R}{\tan \alpha} \quad (59)$$

El valor de C puede ser determinado por la calibración de las puntas de prueba, contra una fuente de calor de alambre fino.

CAMPO GEOTERMICO DE AHUACHAPAN

4.1 INTRODUCCIÓN

En el presente capítulo se definen los conceptos básicos de un sistema geotérmico y sus características (fuente de calor, zona de recarga y descarga, capa sello y reservorio). Se describen los aspectos geológicos del sistema geotérmico de Ahuachapán a partir de los estudios geovolcanológicos realizados, los cuales reconocen su origen a comienzos del Pleistoceno presentando los siguientes ciclos volcánicos: Ciclo pre-caldérico, Ciclo Caldérico y Ciclo post- caldérico.

Finalmente se realiza una descripción de la geología estructural de la zona de estudio especificando los sistemas de fallas, tipos de materiales, estratigrafía, litología y permeabilidad de las estructuras identificadas.

4.2 SISTEMA GEOTERMICO

Es conocido que existen diversas fuentes generadoras de calor en el interior de la tierra por ejemplo: decaimiento de minerales radiactivos, reacciones químicas, presión mecánica, fricción, etc. Pero es la tectónica de placas y ciertos procesos físicos, que dan origen a la formación y flujo de magma hacia la superficie (creando volcanes y calentando formaciones geológicas), que se constituye en el mecanismo principal al cual se asocian los sistemas geotérmicos.

Las corrientes de convección en la astenósfera han originado placas oceánicas y continentales en la litósfera terrestre, que al chocar o separarse constituyen regiones geológicamente activas en las cuales se presentan los fenómenos de subducción de placas o la formación de fisuras corticales. En el primer caso, la colisión e introducción de una placa por debajo de la otra, ha generado elevadas temperaturas y la fusión de rocas, formando magma que en ocasiones fluye hasta la superficie para crear volcanes. Para el segundo caso, al separarse la corteza debido al

movimiento divergente de las placas, el magma asciende a través de la litosfera y se derrama en la superficie originando también vulcanismo.

La energía calorífica transportada a los niveles superiores de la corteza, por cualesquiera de los procesos mencionados anteriormente, puede ser almacenada en las rocas o en acuíferos localizados a pocos kilómetros de profundidad, llegando a constituir sistemas geotérmicos que pueden manifestarse en forma de lodo hirviente, fumarolas, geysers, manantiales hidrotermales, suelos calientes, etc.

Entonces, un sistema geotérmico se define como el conjunto integrado por la fuente de calor, el fluido (recarga, descarga) y la zona cortical donde se almacena o circula el fluido geotérmico (capa sello, reservorio y patrón de flujo).

La energía almacenada en forma de calor en las rocas y en acuíferos situados cerca de la superficie, en ciertos casos es susceptible de ser aprovechada mediante la perforación de pozos de hasta 3 Km de profundidad, en la generación de electricidad, calefacción, refrigeración, agricultura, acuicultura, la industria, etc. cuando esto sucede en condiciones rentables, el yacimiento y las instalaciones constituyen lo que se denomina campo geotérmico.

4.2.1 CARACTERISTICAS DEL SISTEMA GEOTERMICO

Los sistemas geotérmicos son aprovechados para la generación de energía eléctrica (alta temperatura), o para fines industriales en los que se necesita poco calor (baja temperatura).

Estos sistemas tienen como principales características (figura.10):

Fuente de calor (anomalía térmica), Reservorio, Capa sello, Fuente de recarga, Zona de descarga, y Zona de ascenso de vapor.

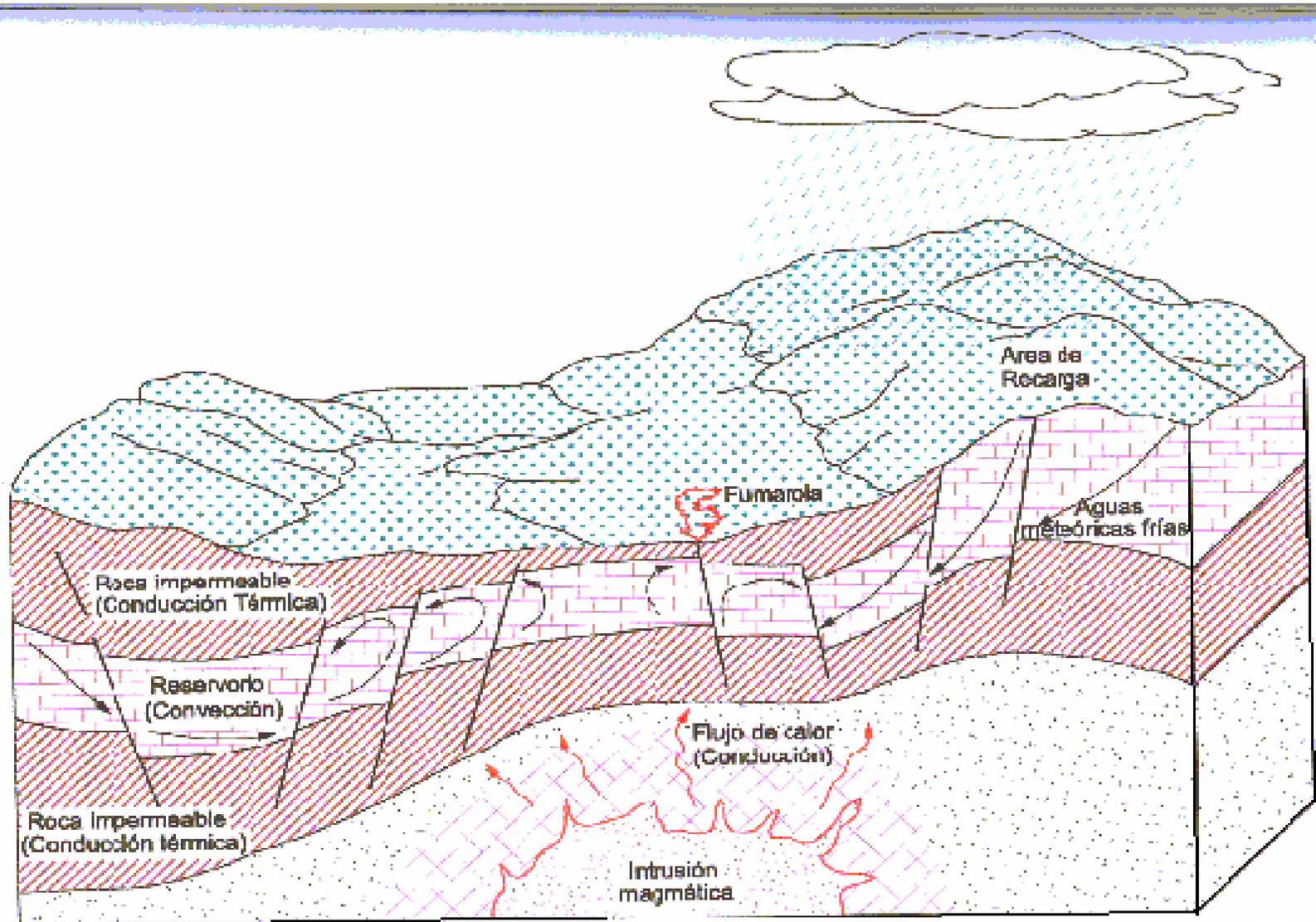


Fig 9 Representación esquemática de un sistema geotérmico ideal

Fuente de Calor

En regiones volcánicas, el calor requerido para la formación de un sistema geotérmico cerca de la superficie, puede ser suministrado por una masa de magma de alta temperatura situada en la corteza terrestre ya sea como una intrusión en proceso de enfriamiento o bien como una cámara magmática que ha alimentado a un volcán o una caldera.

Es por eso que se consideran áreas potencialmente geotérmicas aquellas donde permanecen localmente grandes volúmenes de magma dentro de la parte superior de la corteza continental (por ejemplo magmas ácidos diferenciados dentro de la corteza), o donde existen manifestaciones volcánicas que indican la presencia de cámaras magmáticas. Estas áreas se caracterizan por la presencia de volcanes poli génicos con productos andesíticos, dacíticos o riolíticos, o calderas y complejos dómicos.

Para la formación de cámaras magmáticas con suficiente contenido de energía térmica, existen condiciones tectónicas favorables como es el cruce de diferentes fallas o la inclinación de bloques fallados que forman trampas apropiadas donde el magma, en su ascenso, se estaciona y produce su diferenciación.

En la mayoría de los casos, las cámaras magmáticas son grandes depósitos de magma que alimentan a complejos volcánicos centrales, en los que las estructuras volcánicas se forman alrededor de una chimenea central con varias erupciones de productos de diferente composición que están relacionados unos con otros por medio de la cristalización fraccional. En otros casos, los magmas diferenciados, más ligeros y con alto contenido de gases, son capaces de llegar hasta la superficie por medio de erupciones explosivas de gran intensidad, formando calderas regionales con domos y algunos centros monogénicos (por ejemplo, Campi Flegrei, Italia).

En la mayoría de los casos, los sistemas geotérmicos en América Latina se encuentran localizados en zonas vulcanológicas de origen cuaternario, constituidos por productos diferenciados (andesitas ácidas, riolitas o dacitas) relacionados con intrusión ígnea bastante superficial (aproximadamente entre 10 y 15 km de profundidad) que representa la cámara magmática de centros volcánicos recientes y activos. Mas raramente los hay también en zonas donde el magma permanece a poca profundidad sin producir vulcanismo y los levantamientos

que provoca en la corteza superior afectan la tectónica superficial con la formación de “horts” y “mini – horts”, generalmente colapsos menores o por sistemas de fallas radiales o concéntricas. [8]

Para el caso del Campo Geotérmico de Ahuachapán, el modelo geológico muestra (figura 10), que la fuente de calor del sistema geotérmico se relaciona principalmente con una cámara magmática joven andesítica a basáltica, de edad menor a 0.1 millones de años, que alimenta al complejo volcánico Laguna Las Ninfas, Hoyo de Cuajuste y Laguna Verde, el cual se encuentra localizado aproximadamente a 3 Km. al sudeste del campo en explotación e inmediatamente al noreste de la Caldera de Concepción de Ataco. El calor que genera esta cámara, que se encuentra a una profundidad aproximada de 9 Km., se agrega al calor residual asociado con la actividad explosiva que produjo la Caldera de Concepción de Ataco, hace aproximadamente 0.7 millones de años.

Reservorio

Esta constituido por rocas permeables, con un volumen suficientemente grande para asegurar la explotación prolongada de fluidos geotérmicos. Además, debe estar localizado dentro de un sistema hidrológico que permita la recarga hidráulica del área en explotación.

La delimitación del reservorio es el problema más difícil de la exploración geotérmica, ya que existe frecuentemente una cubierta de rocas en superficie que a menudo impide el estudio de los substratos profundos. Para el estudio del reservorio se requiere del conocimiento del marco geológico general y en particular, el de los espesores, profundidades, litología y permeabilidad de las rocas que se encuentran por debajo de la cubierta superficial. También es importante la identificación de las áreas de mayor permeabilidad primaria, secundaria y del modelo de distribución del fracturamiento tectónico. Es particularmente importante determinar si el fracturamiento es debido a la tectónica activa (geotectónica). En este caso la tectónica activa contribuirá a mantener abiertas las fracturas o reactivar fracturas previas que podrían estar selladas por alteración hidrotermal.

Cuando el reservorio se encuentra en rocas volcánicas, la permeabilidad, en la mayoría de los casos, es de tipo secundario ya que éstas tienen generalmente baja porosidad primaria. En rocas sedimentarias en la que se encuentran reservorios geotérmicos, la permeabilidad primaria suele ser escasa y solo es posible que lleguen a ser productores de fluidos geotérmicos gracias a la incorporación de la permeabilidad secundaria de origen tectónico. Debido a esto en la mayoría de los campos geotérmicos la permeabilidad esta controlada por un fracturamiento penetrante o por fracturas concentradas en zonas de fallas, mas que por la porosidad primaria.

Desde el momento que el fluido que circula por un sistema geotérmico está relacionado con agua meteórica, es necesario que la roca que contiene el reservorio esté en contacto con la superficie por medio de un afloramiento a través de fallas o fracturas que crucen la cubierta superficial de rocas impermeables. La circulación de fluidos en ese último caso, estará asegurada por las estructuras tectónicas o vulcano – tectónicas que permiten conducir las aguas meteóricas al reservorio y que les permiten regresar a la superficie, produciendo manifestaciones termales. Si bien casi todos los campos geotérmicos conocidos están localizados en las cercanías de manifestaciones termales naturales, la presencia de estas no constituyen por si sola la prueba de la existencia de un campo geotérmico. [8]

En el Campo Geotérmico de Ahuachapán (figura10), el reservorio corresponde a un nivel propilitizado, relacionado con las andesitas de Ahuachapán y en forma parcial con los aglomerados antiguos. Para determinar su geometría se ha tomado en cuenta la extensión de un cuerpo geofísico de media densidad y baja resistividad, la configuración del nivel de lavas andesíticas, la profundidad de las principales perdidas de circulación, los perfiles de temperatura estática, la ocurrencia de fallas reconocidas por medio de la foto geología y el alineamiento de manifestaciones hidrotermales.

La reconstrucción del reservorio se ha hecho en forma de una capa subhorizontal, con un espesor estimado entre 300 y 400 metros y una elevación del techo de 300 a 400 msnm en la parte central del campo geotérmico, bajando a 100 y 0 msnm en dirección al este y sur, se calcula que su área es de 10 Km².

La distribución y circulación de los fluidos hidrotermales ésta controlado por el horizonte propilitizado y por el patrón de fallas y fracturas que existen en el campo, principalmente por

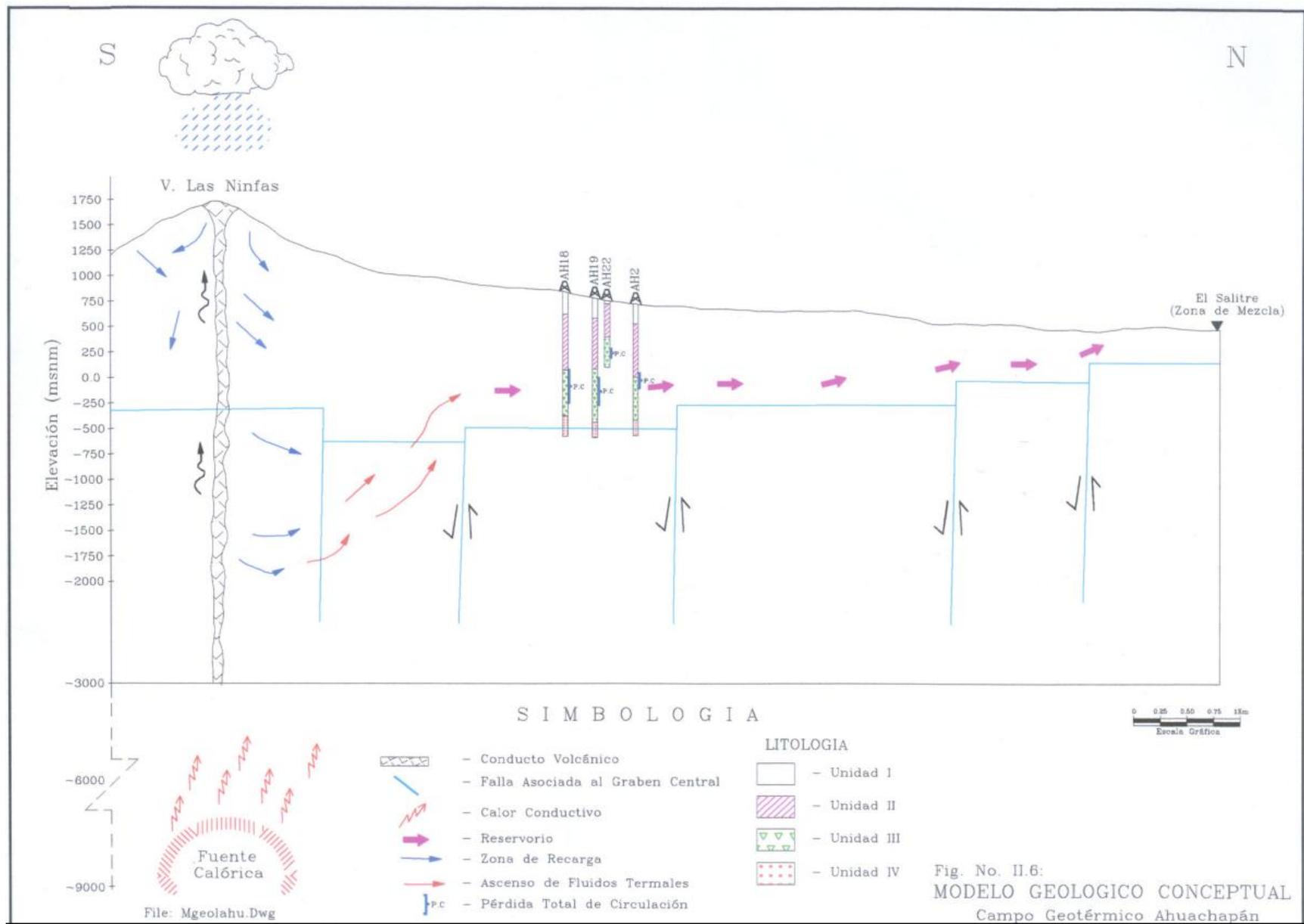


Fig.10 Modelo Geológico Conceptual, Campo geotérmico de Ahuachapán

el sistema neotectónico nornoroeste – sursureste, que es el que permite el movimiento preferencial de los fluidos.

El acuífero relacionado con estas pérdidas de circulación se llama superficial, el cual en el momento actual está sellado y cementado. Cercano a los 0 msnm se identifica la principal zona de aporte. Esta zona productora se encuentra en la base de los aglomerados jóvenes y techo de las andesitas de Ahuachapán – Cuyanausul. El pozo CH –D, que se encuentra en la zona de transición entre Ahuachapán y Chipilapa, produce tanto de los aglomerados jóvenes como el techo de las andesitas de Ahuachapán, lo cual da lugar a establecer la hipótesis de que el reservorio o acuífero salino de Ahuachapán se mezcla al este con el acuífero regional saturado a las elevaciones entre 100 a 300 msnm.

Capa Sello

Es la que impide la pérdida de calor por circulación de fluido geotérmico hacia la superficie. Esta puede ser: una roca o una secuencia de rocas con nula o poca permeabilidad, una roca sedimentaria o volcánica con impermeabilidad primaria (arcilla, limolita, toba, etc.) o una roca impermeabilizada por autosellamiento debido a los efectos prolongados de la actividad geotérmica.

Las regiones donde la cobertura está fracturada, los fluidos del reservorio pueden ascender directamente a la superficie, produciendo manifestaciones termales (manantiales calientes, suelos calientes, fumarolas, etc.). La presencia de tales manifestaciones puede ser indicadora de la existencia de un reservorio geotérmico, pero esto no es absolutamente cierto ya que pueden existir reservorios geotérmicos sin dichas manifestaciones. El estudio de la cobertura y de las manifestaciones termales superficiales debe considerar el marco hidrológico, geoquímico y geológico de la región.

Es importante mencionar que determinar la presencia de una secuencia impermeable en la parte superior de un reservorio geotérmico, es esencial para determinar la utilidad de pozos someros de gradiente geotérmico en etapas subsecuentes de la exploración. [8]

Para el Campo Geotérmico de Ahuachapán (figura 11), la capa sello corresponde a la unidad denominada aglomerados jóvenes (YA), que presenta una fuerte alteración hidrotermal, que conduce a la formación de filosilicatos, los cuales pertenecen al grupo de las cloritas (facies filítica y filítica – propilítica). La cual forma una barrera de permeabilidad entre el acuífero saturado regional y salino o reservorio.

La Recarga

La fuente de recarga es necesaria para reemplazar las pérdidas del fluido provocadas por la naturaleza en forma de fumarolas, géysers, etc. o artificialmente mediante la perforación de pozos, para mantener así el balance hidrológico del sistema. Se reconocen tres tipos de recarga de un sistema geotérmico:

Meteórica, proveniente de la precipitación pluvial sobre la superficie y del derretimiento de la nieve o hielo invernal.

Magmática, originada por los vapores desprendidos durante la cristalización del magma.

Aguas atrapadas, son aguas capturadas por formaciones rocosas en épocas muy antiguas.

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

Zona de Descarga.

Es el área donde el fluido se desplaza después de haber cedido energía calorífica al reservorio. Generalmente su movimiento es por medio del fracturamiento que presenta el sistema geotérmico.

Zona de Ascenso.

Esta es el área donde el reservorio presenta su mayor temperatura. El ascenso de flujo se da por medio del fallamiento que comunica el reservorio con la superficie de la tierra.

En el caso del Campo Geotérmico de Ahuachapán (figura 10), la recarga de fluidos calientes es proveniente del sureste, en la cual, parte del agua pluvial que se precipita se infiltra por gravedad, hasta finalmente llegar a formar parte del reservorio. Los mayores valores de precipitación se concentran en la parte alta de la Cordillera Apaneca, donde varían entre 1600 y 2100 mm anuales, y está relacionada con dos zonas de infiltración de las cuales una se localiza al suroeste de los pozos y la otra en los volcanes Laguna Las Ninfas, El Hoyo de Cuajuste, Laguna Verde y El Cuyanausul.

Los fluidos meteóricos calentados por la fuente de calor, localizada debajo del complejo volcánico Laguna Las Ninfas, El Hoyo de Cuajuste y Laguna Verde suben a la superficie a lo largo de fracturas profundas con dirección oeste – este y ostenoroeste – sursureste. La mayoría de los fluidos calientes son descargados en los manantiales de El Salitre, unos 7 Km. al norte de Ahuachapán y en las manifestaciones fumarólicas, que por lo general están alineadas a lo largo de fallas nornoroeste – sursureste.

4.3 ESTUDIOS GEOVULCANOLOGICOS

Los estudios realizados, para conocer los inicios y evolución del campo geotérmico de Ahuachapán reconocen que su origen es a comienzos del Pleistoceno y que su evolución es por medio de ciclos volcánicos (figuras 11, 12 y 13), los cuales son los siguientes:

- Ciclo pre – caldérico, representado por una serie de estrato – volcanes que tienen una composición que varía de intermedia a básica, por ejemplo, El Cuyanausul, Apaneca y La Empalizada, los cuales poseen una edad estimada entre 0.7 y 1.7 millones de años (m.a). Estos centros eruptivos están alineados a lo largo de una estructura semicircular, que podría estar relacionada, a su vez, a una paleó caldera.
- Ciclo caldérico, el cual se caracterizó por la formación de La Caldera de Concepción de Ataco hace aproximadamente 0.7 m.a como consecuencia de una serie de eventos explosivos, cuyos productos alcanzaron un volumen de 21 km^3 , estos cubren un área de

unos 700 km². En el mismo interior de la caldera se llevaron a cabo reactivaciones subsecuentes, con la expulsión del piroclasto “Cebra” y resurgimiento de domos dacíticos y andesíticos pequeños.

- Ciclo post- caldérico, el cual posee una edad aproximada de 0.1 millones de años. La principal actividad corresponde a la formación de una cadena volcánica constituida por la Laguna Verde y Laguna Las Ninfas, que se prolonga a lo largo de un eje neo – volcánico orientado del suroeste al noreste, con una emisión de productos cercana a 7 km³. La composición de estos materiales corresponde a andesitas y subordinadamente dacitas.

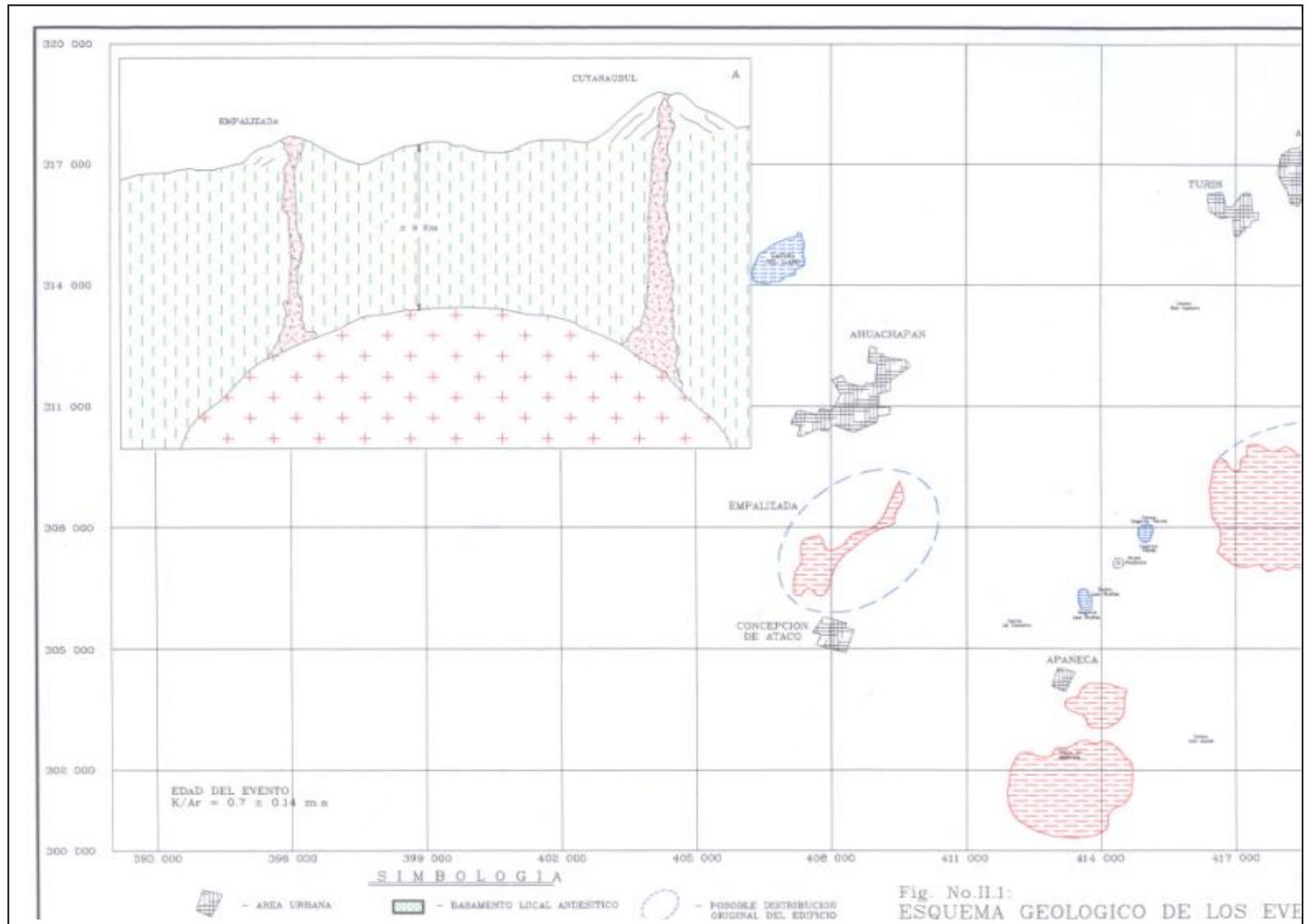


Fig 11 Esquema geológico de los eventos magmáticos pre- caldéricos, Campo geotérmico de Ahuachapán

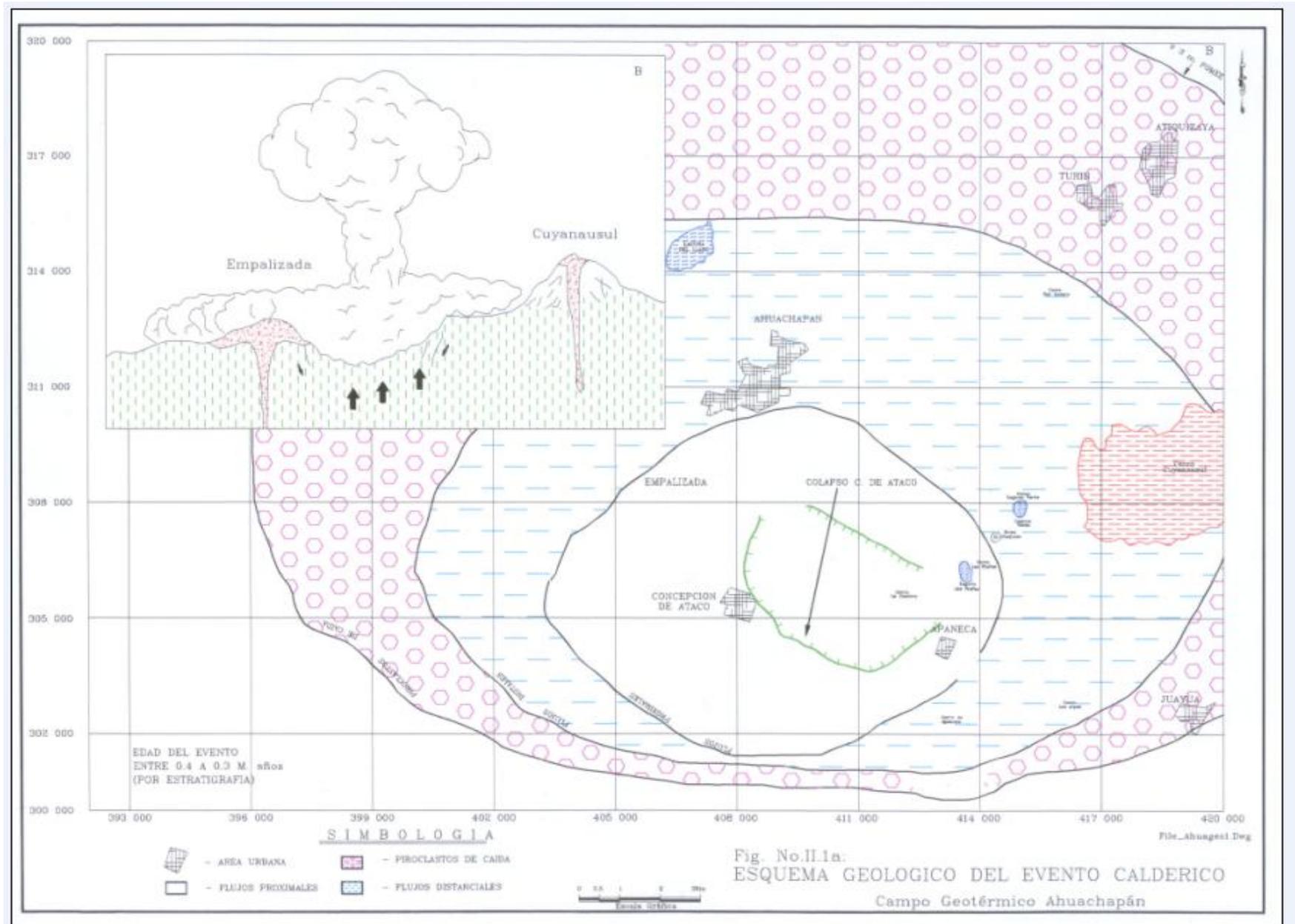


Fig. 12 Esquema geológico del evento caldérico, Campo geotérmico de Ahuachapán

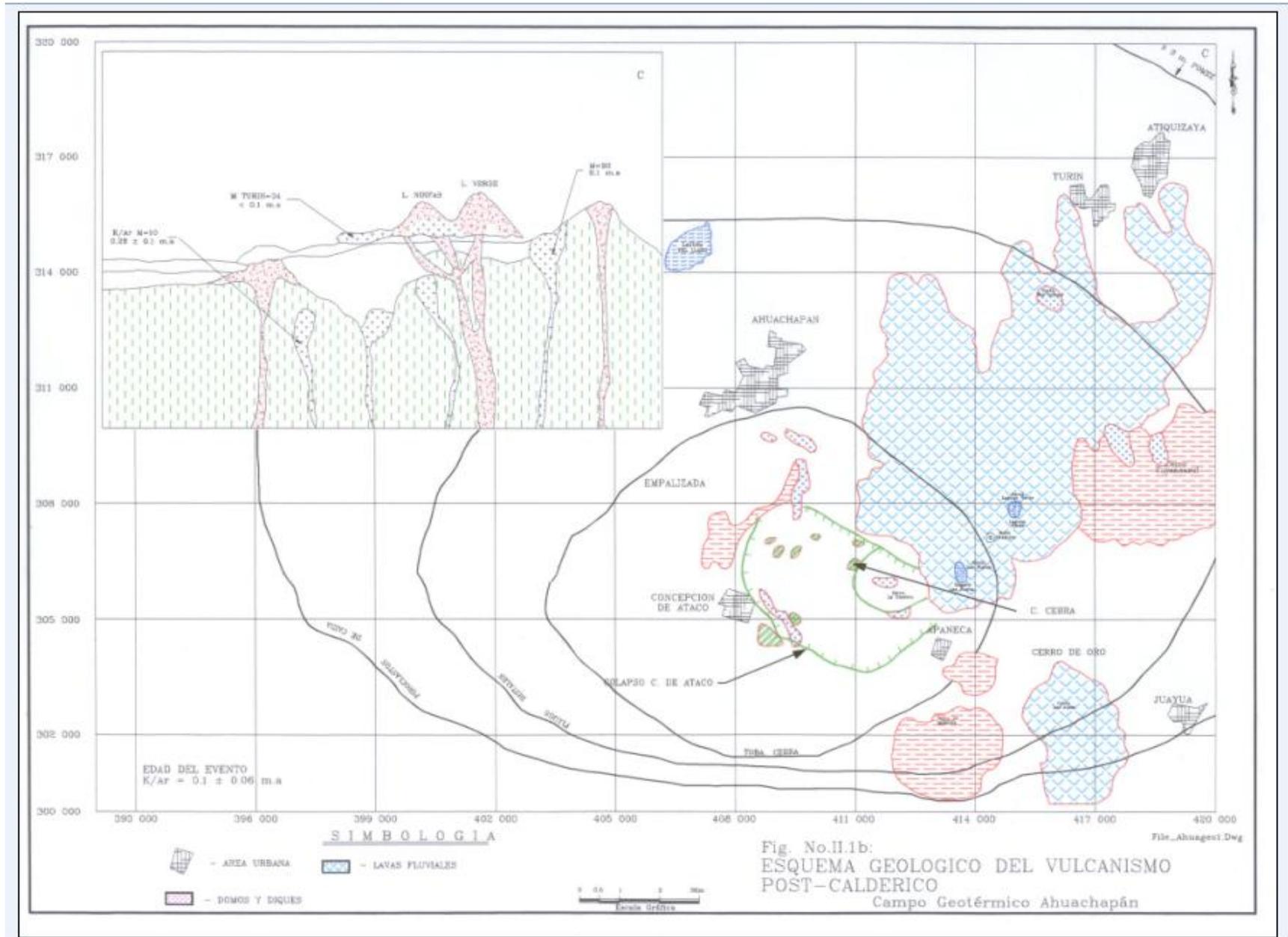


Fig.13 Esquema geológico del vulcanismo post – caldérico, Campo geotérmico de Ahuachapán

4.4 INTERPRETACIÓN DE LOS EVENTOS VOLCÁNICOS.

La caldera de Concepción de Ataco, con su magmatismo efusivo asociado, no posee actualmente ningún interés geotérmico. Las explosiones freáticas de los volcanes Laguna Verde, Hoyo de Cuajuste y Laguna Las Ninfas, que se encuentran alineados en el borde sur del Graben Centroamericano, corresponden a una fase hidrotermal postmagmática.

La evolución de esta caldera fue precedida por el surgimiento de los edificios de La Empalizada y El Cuyanausul. Datos radiométricos indican que el primero tiene una edad aproximada de 0.7 millones de años, el cual es considerado como el primer evento magmático asociado al evento caldérico de Concepción de Ataco. Los productos piroclásticos de la caldera fueron emitidos hacia el norte y noroeste, cubriendo un área entre 20 y 28 km².

Posterior al colapso caldérico, ocurrió una evacuación de materiales de composición básica a intermedia, que se mezclaron con piroclastos ácidos existentes, con lo cual se originaron los piroclastos Cebra. El cráter producido por esta erupción se encuentra en el extremo este del colapso mayor. Es de mencionar que los espesores de este evento no superan los 25 metros y su distribución es local.

Continúa el vaciado de la cámara magmática y se originan los volcanes Las Ninfas y Laguna Verde, que culminaron su actividad con lavas basálticas fluidales, que salieron de su flanco norte.

El ciclo caldérico y magmático de la región termina con el apareamiento de los últimos domos y diques. La edad de los domos que afectan a El Cuyanausul es de 0.09800 ± 0.00098 millones de años. Si se hace una comparación de la edad del primer evento magmático de La Empalizada, que es de 0.7 millones de años, con el último que corresponde a los domos de El Tortuguero de edad 0.10 ± 0.06 millones de años, se llega a la conclusión de que la cámara magmática es bastante joven, por lo que está en capacidad de aportar calor. Debido a ésta evolución vulcanológica, la fuente de calor del sistema geotérmico es una combinación de dos situaciones magmatológicas distintas:

- La cámara magmática relacionada a los productos que originaron el colapso caldérico, posee un gran tamaño y una profundidad limitada, pero debido a su edad relativamente antigua ha contribuido marginalmente a generar la anomalía térmica.
- La cámara magmática que esta relacionada con los volcanes Laguna Las Ninfas y Laguna Verde, es muy reciente y probablemente somera, por lo que representa la principal fuente de calor del sistema.

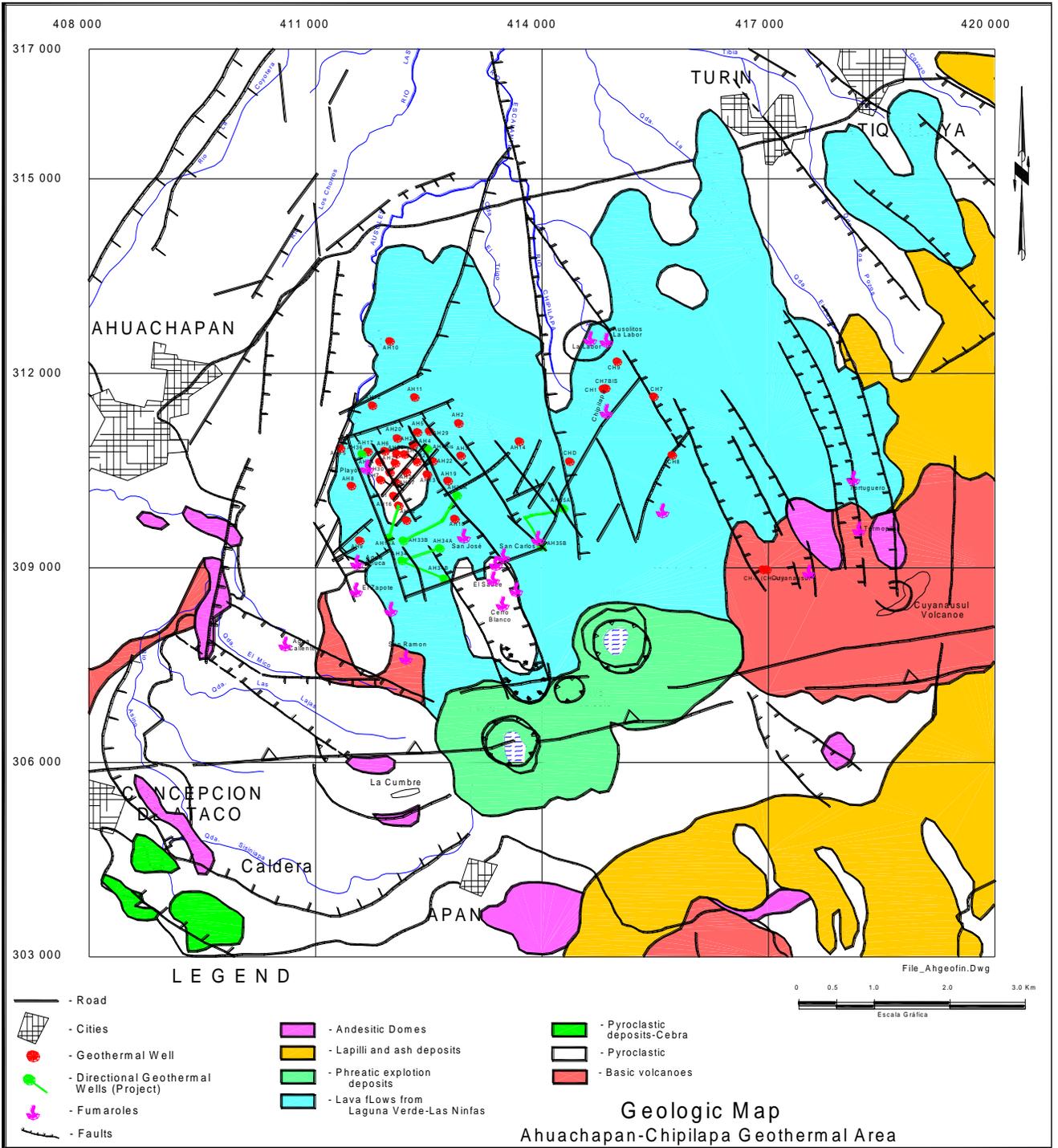


Fig.14 Mapa geológico del área geotermal Ahuachapán - Chipilapa

4.5 GEOLOGIA ESTRUCTURAL

4.5.1 ESTRUCTURA REGIONAL

En el Campo Geotérmico de Ahuachapán se presentan los siguientes sistemas de fallas:

(figura 15):

Sistema noreste – suroeste, que es uno de los que mejor se observa. Está constituido por fallas que tiene una dirección que va de 35° a 45°, con planos de inclinación subverticales hacia el sudeste que varían de 83° a 89°. Se encuentra cortando a los productos piroclásticos que provienen de la caldera de Concepción de Ataco y está cubierto por los productos más recientes de las Ninfas y Laguna Verde.

- El sistema nornoreste – sursuroeste se observa muy bien al noroeste y oeste de Ahuachapán. Se ha reactivado en un periodo muy reciente, tal como lo demuestran las fallas que afectan a los cráteres de los volcanes más jóvenes.
- El sistema este – oeste a este noreste – oeste suroeste está constituido por fallas normales de expresión regional que controlaron la formación del Graben Centroamericano. Los sistemas volcánicos de actividad post Pliocénica se ubican a lo largo de esta dirección tectónica y en el borde sur del Graben. Este sistema desempeña el papel de barrera hidrogeológica, lo cual indica que contemporáneamente a la fase tectónica distensiva asociada a la abertura del Graben, ocurrió una fase compresiva de igual orientación.
- Las rocas que contienen el reservorio geotérmico están afectadas por el sistema nornoroeste – sur sureste, así como también por el sistema norte – sur. El primero es el sistema de fallas más activo, ya que el alineamiento de las fumarolas tiene lugar a lo largo de él. De igual manera, los fluidos que alimentan al reservorio suben a través de estructuras profundas y se desplazan lateralmente de manera preferente siguiendo a este sistema neotectónico. Las fallas que delimitan bloques de distinta permeabilidad pertenecen a los sistemas oeste suroeste – este noreste, noreste – suroeste, norte – sur y nornoreste – sur suroeste, mientras que las fallas nornoroeste – sur sureste representan a las de permeabilidad más acentuada.

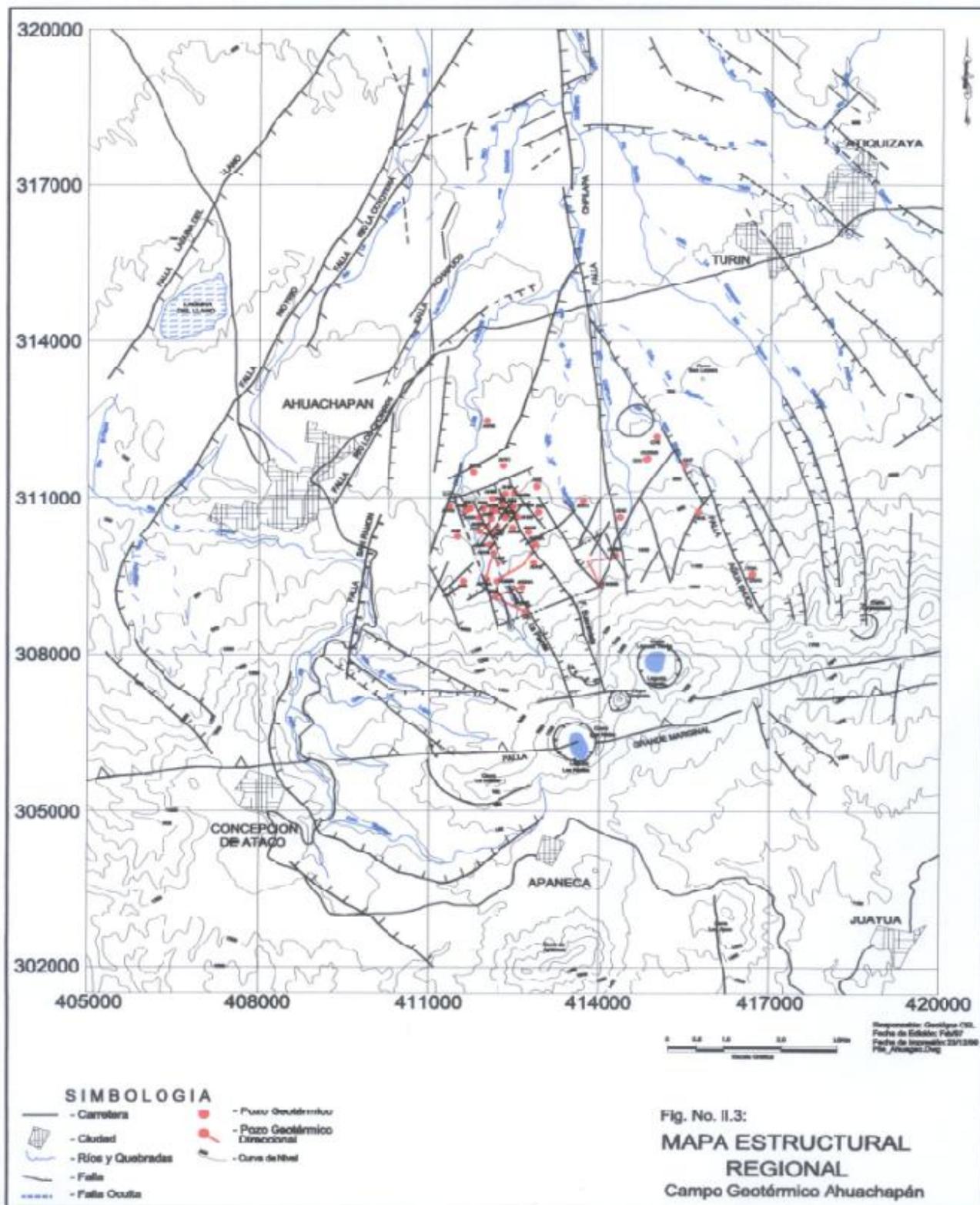


Fig. 15 Mapa estructural regional del campo geotérmico de Ahuachapán

Todo parece indicar que las fallas paralelas a los bordes del Graben Centroamericano funcionan como barreras hidrogeológicas, mientras que las que tienen direcciones norte – sur, sirven de drenaje. Los cruces de dirección tectónica originan zonas muy favorables para el desarrollo de acuíferos. Debido a esto Ahuachapán corresponde a dos zonas de depresión posiblemente tectónica, que están separadas por un mini - horst

4.6 ESTUDIO GEOLÓGICO EN LA ZONA SURESTE DEL CAMPO GEOTÉRMICO DE AHUACHAPÁN

4.6.1 DESCRIPCIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO

La zona de estudio (figura.16) está caracterizada por los sistemas de fallas y fracturas que están orientadas en las direcciones:

- E – O aproximadamente sobre el Graben Centroamericano.
- N NO.
- NE.

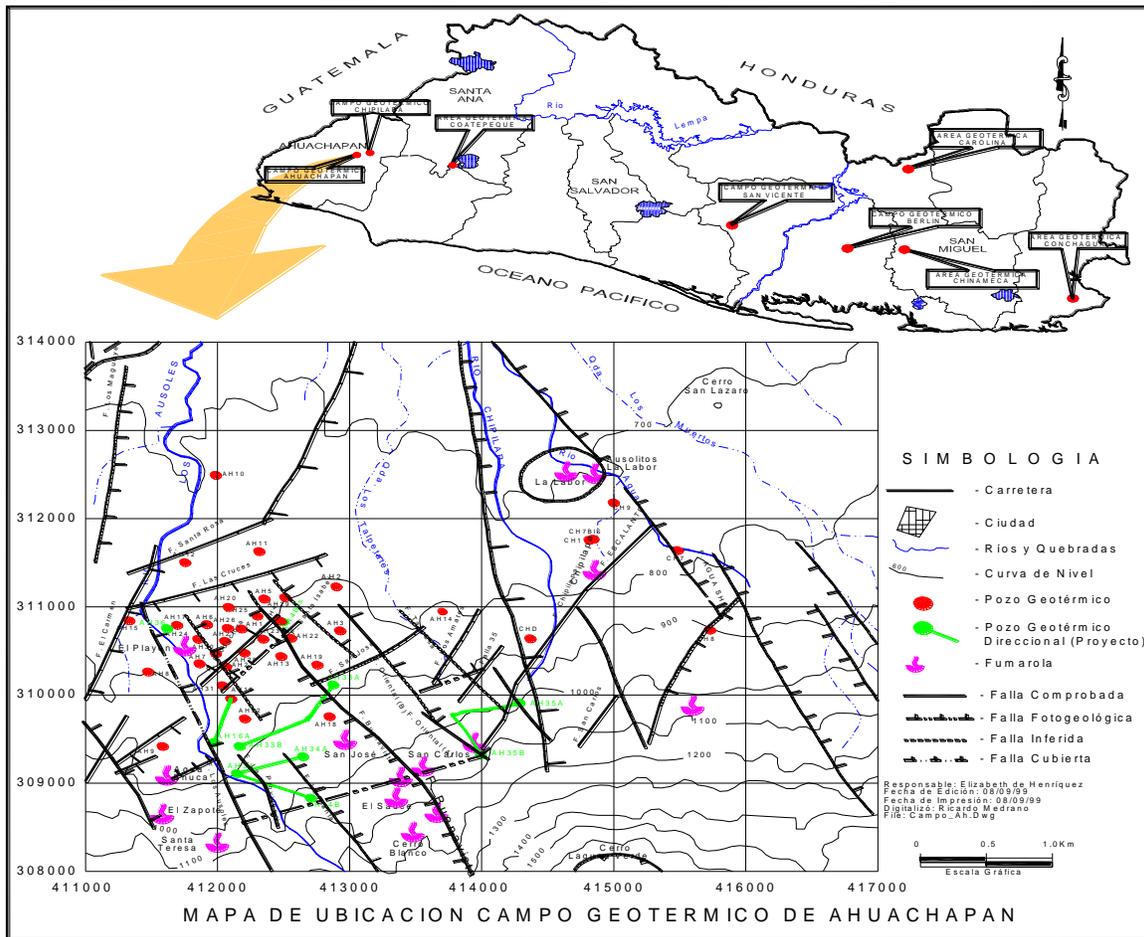


Figura 16 Sistemas de fallas que presenta la zona Sur – Este del Campo Geotérmico de Ahuachapán

El área esta cubierta principalmente por materiales laháricos, piroclastos, bloques de lava, aglomerados y lavas andesítica – basáltica. En las fumarolas grandes existe una alteración hidrotermal intensa, las cuales están relacionadas con las fallas, de igual maneras las quebradas principales están controladas por estructuras geológicas, como ocurre con la Quebrada Madre Vieja, que tiene la mayor parte de su recorrido a lo largo de la Falla Buena Vista, la Quebrada Las Pozas con la Falla Oriental B, la Quebrada Chipilapa con la Falla Chipilapa, etc.

La parte sureste del campo está caracterizada por grandes bloques de andesitas que provienen principalmente del Volcán Laguna Verde. También son observables algunos de los antiguos deslizamientos y zonas de derrumbes.

En la figura 17, se muestra la ubicación del área de estudio, donde se observan los sistemas de fallas, la ubicación de las fumarolas, los pozos y las principales quebradas de la zona.

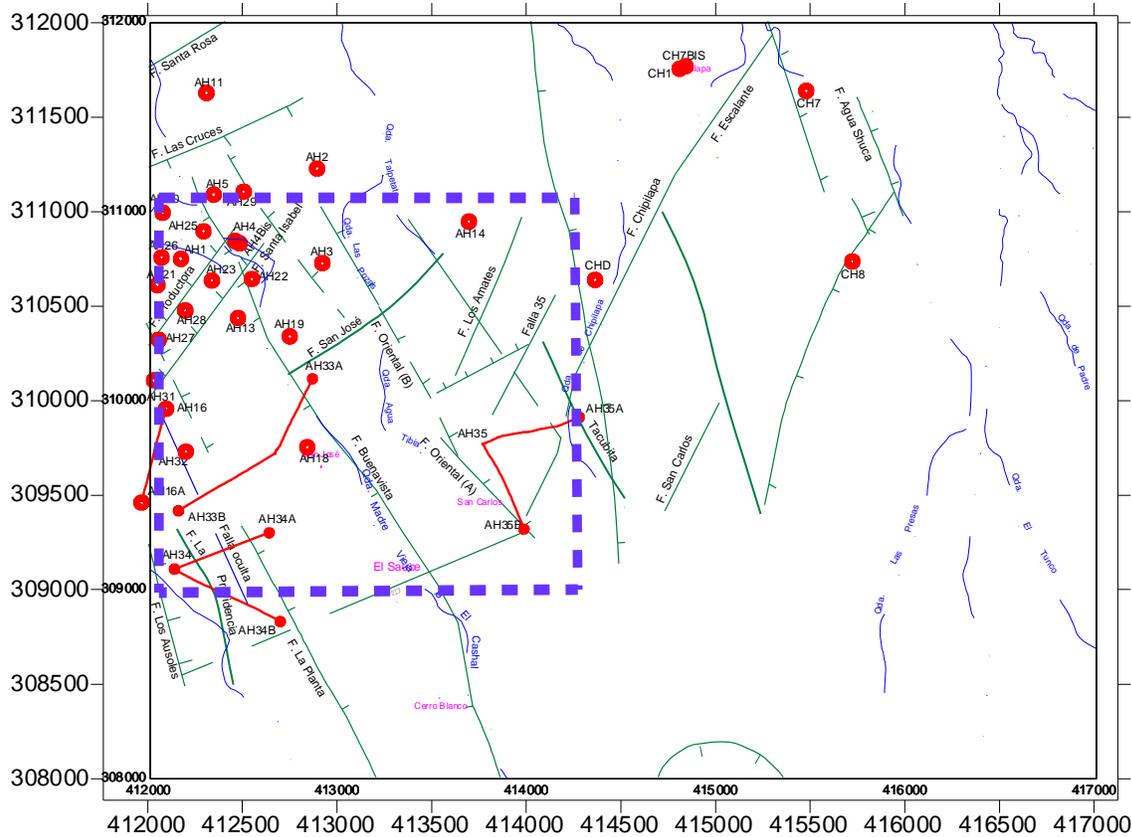


Figura 17 Área de estudio para flujo de calor en la zona Sur – Este del Campo Geotérmico de Ahuachapán

Desde el punto de vista geomorfológico, el área de estudio se encuentra ubicada en el flanco norte de la cadena de estrato – volcanes plesitocénicos (Las Ninfas, Hoyo de Cuajuste y laguna Verde), con terrenos de topografía abrupta, con fuertes pendientes en la parte sur y con pendientes intermedias en la parte norte.

4.6.2 ESTRATIGRAFÍA Y LITOLOGÍA

La estratigrafía general de la zona está compuesta por la formación San Salvador que generalmente son tobas y andesitas y es la más reciente, seguidos por los aglomerados, los cuales

forman la capa sello del sistema geotérmico, las andesitas de Ahuachapán, en donde se localiza el reservorio productivo y como basamento se encuentra la formación Bálsamo.

Con la perforación de los pozos se ha podido encontrar que las tobas y andesitas de la formación San Salvador poseen un espesor de 200 m, mientras que para las andesitas de Ahuachapán su espesor es de 300 m. Un estudio detallado de la litología y de las micro estructuras fue realizado en los testigos de perforación de los pozos AH- 33B, AH- 34, AH- 34B, AH – 35A, AH – 35B (véase tabla1).

Tabla 1: Se presenta un resumen sobre la litología y estructuras encontradas en los núcleos de perforación de los pozos AH-33B, AH-34, AH-34B, AH-35 A y AH-35B.

Pozo	Prof. (m)	Litología/ Alteración	Venas/Fracturas	Estructuras asociadas	Dureza y Estabilidad
AH-33B	1183-1190	Andesita porfirítica Abundantes minerales de arcillas, epidota, hematita	Vetillas (1-2mm ancho) rellenos por cuarzo		Baja a media
	1500.40-1506.40	Andesita porfirítica Abundantes epidota, hematita y minerales de arcillas	Venas (2-6mm ancho) rellenas por cuarzo y epidota, estrías presentes	Los Ausoles? La Planta?	Media a alta
AH-34 (vertical)	1405-1409	Andesita altamente alterada con epidota, clorita y minerales de arcillas	Abundantes fracturas y vetillas rellenas por cuarzo, epidota, clorita y hematita	Los Ausoles?	Baja a media
	1601-1607	Andesita amigdaloida Alteración incluye epidota, hematita, clorita, calcita y cuarzo	Vacuolas rellenas por cuarzo, abundantes fracturas y vetillas (5mm) con cuarzo y poca calcita		Media a alta
AH-34B	1293-1298	Basalto bien fino Clorita principal mineral de alteración	Venas moderadas rellenas por calcita; estrías presentes	La Providencia	Alta
	1494-1500	Aglomerado Clorita y hematita como minerales de alteración	Fracturas presentes, vetillas (<1-2mm ancho) rellenas por calcita, hematita y clorita		Baja a media
	1641-1645.25	Andesita bien fina	Bien fracturada, vetillas de hematita y calcita		Alta
AH-35A	927-928	Andesita alterada Alteración consiste de clorita, epidota y pirita	Abundantes fracturas y vetillas (1mm – 5 mm) y algunas estilolitas rellenas por cuarzo y calcita	Chipilapa	Media a alta
	1215.50-1221.50	Aglomerado Clorita y minerales de alteración	No presente		Media
	1501-1507	Andesita basáltica bien fina	Abundantes fracturas y vetillas (<1mm) rellenas por cuarzo.		Alta
AH-35B	506.50-572.50	Toba lítica aglomerática altamente alterada Alteración argilitica	Poca vetillas		Baja a media
	1018-1021	Aglomerada silicificada Alteración principalmente clorita y cuarzo	Vetillas (<1mm)	Chipilapa	Alta
	1323-1325.28	Andesita basáltica bien fina	No presente	Chipilapa	Alta
	1552.20-1555.50	Andesita silicificada Minerales de arcillas presentes	Venas rellenas por calcita y cuarzo, estilolita rellenas por calcita		Media a alta

Se observa en los núcleos de perforación que la zona de los pozos AH – 34 y AH – 34B, contiene abundantes fracturas y venas en las andesitas, a las profundidades de 1400 – 1645 m. Las venas están principalmente rellenas por cuarzo. La zona de los pozos AH – 35 presenta mayor grado de fracturamiento a los 1500 m de profundidad.

4.6.3 ESTRUCTURAS Y PERMEABILIDAD

En el área alrededor de los pozos AH – 35, se observan en algunos sitios puntuales, cierto fracturamiento que en su gran mayoría corresponde a diaclasas y en pocos lugares se observan indicios de movimientos tectónicos.

Son pocas las fallas que se observan, lo que hace difícil la tarea de darles una categoría como representativas, ya que no presentan con claridad sus indicadores cinemáticos, sin embargo las diaclasas medidas han sido analizadas por grupos para lograr tener una mejor idea de las tendencias del fracturamiento, el cual se esperaría sea representativo de las estructuras mayores que pueden ser de interés para objetivos de perforación. Si bien es cierto no evidencian los tipos de movimientos, se pudo deducir las tendencias de las direcciones de los planos principales y los buzamientos predominantes, por medio del análisis de los resultados obtenidos, con el programa SSWINN.

Las primeras 3 mediciones se realizaron en la calle hacia la plataforma del pozo AH – 35, donde se observaron fracturas conjugadas con un promedio de buzamiento en las fracturas de 76° y 77°. En el lado SO de la calle, se identificaron estrías oscilando en un ángulo de 30°. Fue observado que los materiales arcillosos que separan las fracturas, indican una falla. También se observa una capa oxidada de 5cm, la cual es casi vertical. Ya en la plataforma del pozo AH – 35 se observa un desplazamiento, con un movimiento de falla normal con un componente de rumbo en forma dextral. El desplazamiento inferior fue 1cm mientras 2 metros arriba el desplazamiento es casi 5cm. Aquí también fueron identificadas fracturas conjugadas.

En la Quebrada Chipilapa cerca del Cantón Tacubita, se observa una falla sinistral, con fracturas conjugadas; dichas fracturas no obedecen la dirección de la Falla Chipilapa, muy probablemente es parte de la intersección de la Falla Tacubita y Falla Chipilapa. Estas fracturas presentan una orientación simétrica. Al mismo tiempo se realizaron mediciones en algunos afloramientos a lo

largo de la línea de reinyección, donde se encuentra el afloramiento de andesitas basáltica y materiales laháricos. Así como a lo largo de las Quebradas Agua Tibia, Talpetate y Las Pozas.

Un segundo grupo de mediciones fue realizado entre mayo del 2001 y febrero del 2002. Las estructuras medidas al sur y sureste del campo fueron realizadas en las lavas fracturadas en el flanco del volcán Laguna Verde. Ejemplo de las mediciones realizadas son: en la zona del Cashal, las estructuras medidas en la dirección de NNE – SSO presentan un buzamiento promedio de 74°, hacia el ONO pueden asociarse con la prolongación de la Falla Chipilapa y las que tienen un buzamiento promedio de 87° hacia el SO a la Falla Buena Vista. La zona de las Victorias con un buzamiento promedio de 58° hacia el ENE probablemente caracteriza a la Falla Oriental A. Las mediciones en los Alpes presentan un buzamiento de 84° hacia el NE el cual puede coincidir con la prolongación de la Falla Tacubita. Las mediciones en la zona de El Anonal y Quebrada Las Presas tienen un buzamiento de 79° (medido en un plano de falla con estrías horizontales) se asocian a la Falla Las Presas. Un resumen de los buzamientos promedios se presenta en la tabla 2.

Tabla 2: Resumen de promedios de buzamientos para los diferentes grupos

Grupo	Buzamiento Promedio
1. Calle a Plataforma del pozo AH-35	76°
2. Plataforma del pozo AH-35	74°
3. Quebrada Chipilapa	79°
4. Línea de Reinyección	68°
5. Quebradas Las Pozas y Agua Tibia	75°
6. Cashal	74°, 87°
7. El Anonal, Quebrada Las Presas	Diaclasas: 70°, 70°, 52° Plano de falla: 79°

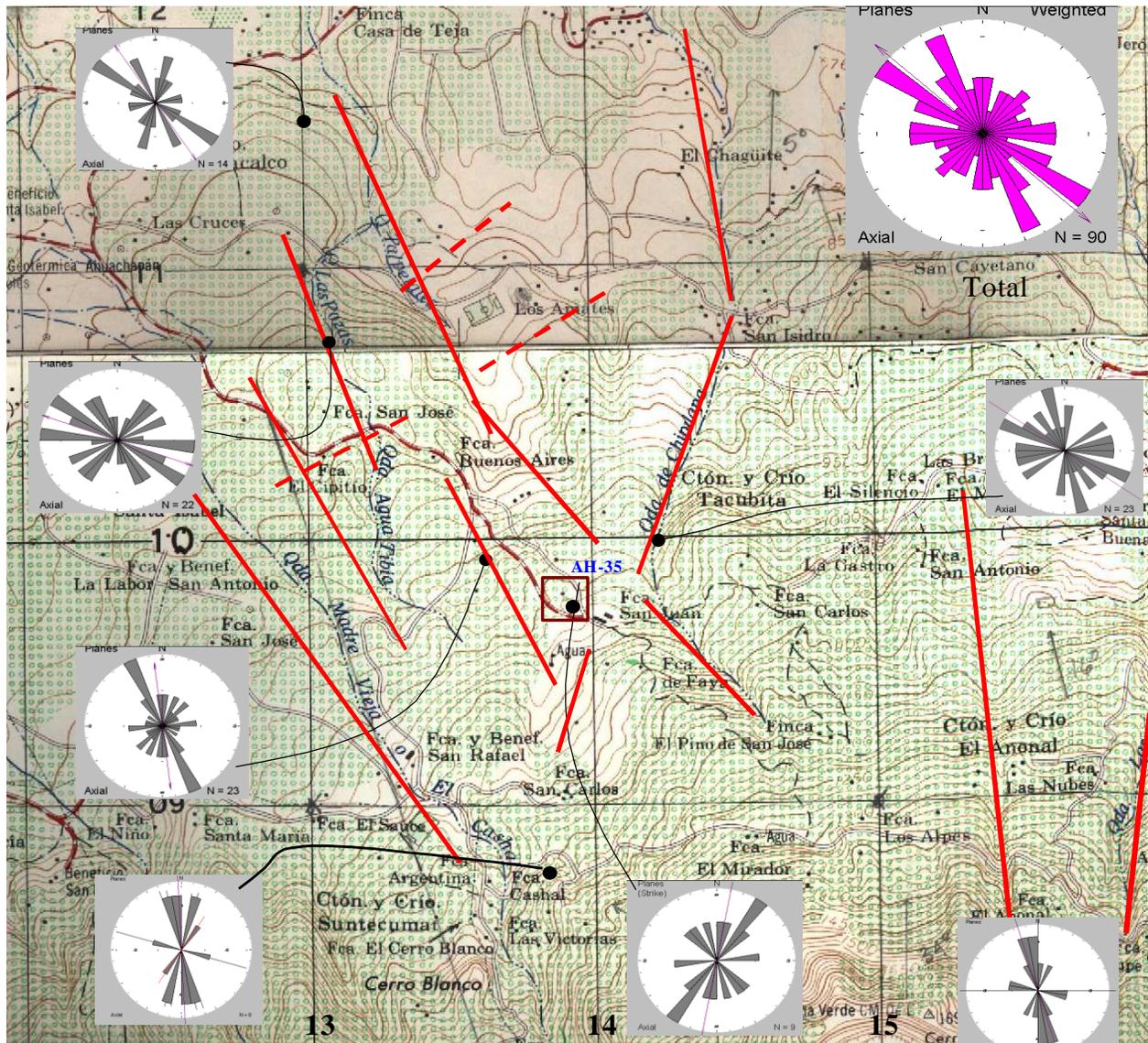


Figura 18: Patrones de los datos estructurales medidos en el campo, ubicados sobre un mapa del área de estudio. En la esquina superior derecha se ha insertado el patrón general considerando todos los datos, en el cual se ve que predomina las estructuras con orientación NO-SE. También se han dibujado (en rojo) los lineamientos más evidentes, la mayoría de los cuales corresponden con las fallas dibujadas en el mapa geológico estructural del sistema Ahuachapán - Chipilapa

En la figura 18 se muestran los patrones de los datos estructurales medidos en el campo, ubicados sobre un mapa del área de estudio. En la esquina superior está el patrón general considerando todos los datos, en el cual se ve que predominan las estructuras con orientación NO – SE. Se han dibujado los lineamientos más evidentes, la mayoría de los cuales corresponden con las fallas dibujadas en el mapa geológico estructural del sistema Ahuachapán – Chipilapa. Se ve que predomina, la correspondencia de la orientación de los planos medidos con las orientaciones estructurales del área, predominando los sistemas de fallas NO – SE, NE – SO.

Los ángulos de buzamiento predominantes de esos planos, medidos en la zona sureste del campo, oscilan entre 70° y 87°.

La correspondencia entre las zonas permeables interceptadas en estos pozos y las estructuras asociadas permite considerar que las fallas Chipilapa, Tacubita y Oriental A están activas.

PROCEDIMIENTO DE INVESTIGACION

5.1 INTRODUCCION

En este capitulo se describen los procedimientos utilizados para la captura, procesamiento e interpretación de datos de la prospección de flujo de calor conductivo realizada en la zona Sur – Este del Campo Geotérmico de Ahuachapán.

5.2 HIPOTESIS

La hipótesis planteada para la presente investigación fue la siguiente:

Existe una alta probabilidad de que la anomalía térmica observada en la zona Sur – Este del campo Geotérmico de Ahuachapán sea de importancia para la expansión del campo geotérmico de Ahuachapán.

5.3 VARIABLES

Según las ecuaciones 25,56 y 57 de los capítulos 2 y 3, las variables que se requieren para estimar la conductividad y flujo de calor conductivo son las siguientes:

5.3.1 Para medición de conductividad térmica: Corriente eléctrica (A), Voltaje (V), Temperatura (°C) y Tiempo (seg.).

Variables Independientes

- Corriente (A)**
- Voltaje (V)**
- Tiempo (seg.)**

Variables Dependientes

- Temperatura (°C)**

5.3.2 Para flujo de calor: Temperatura (°C), tiempo y profundidad (cm.)

Variables Independientes

- Tiempo (min.)**
- Profundidad (m)**
- Temperatura (°C)**

Variables Dependientes

- Flujo de calor**

5.4 UNIVERSO Y MUESTRA.

El presente estudio exploratorio utilizó como universo el campo geotérmico de Ahuachapán, el cual se localiza a 103 Km al Oeste de San Salvador, en el flanco Sur del Graben Centroamericano y al Norte del complejo volcánico Apaneca – Cuyanausul. Como muestra la zona localizada al sur – este del campo geotérmico de Ahuachapán, entre las coordenadas Lambert 309000 – 311000 m latitud Norte y 412000 - 414000 longitud Este, con una extensión aproximada de 6 Km². (Figura 1).

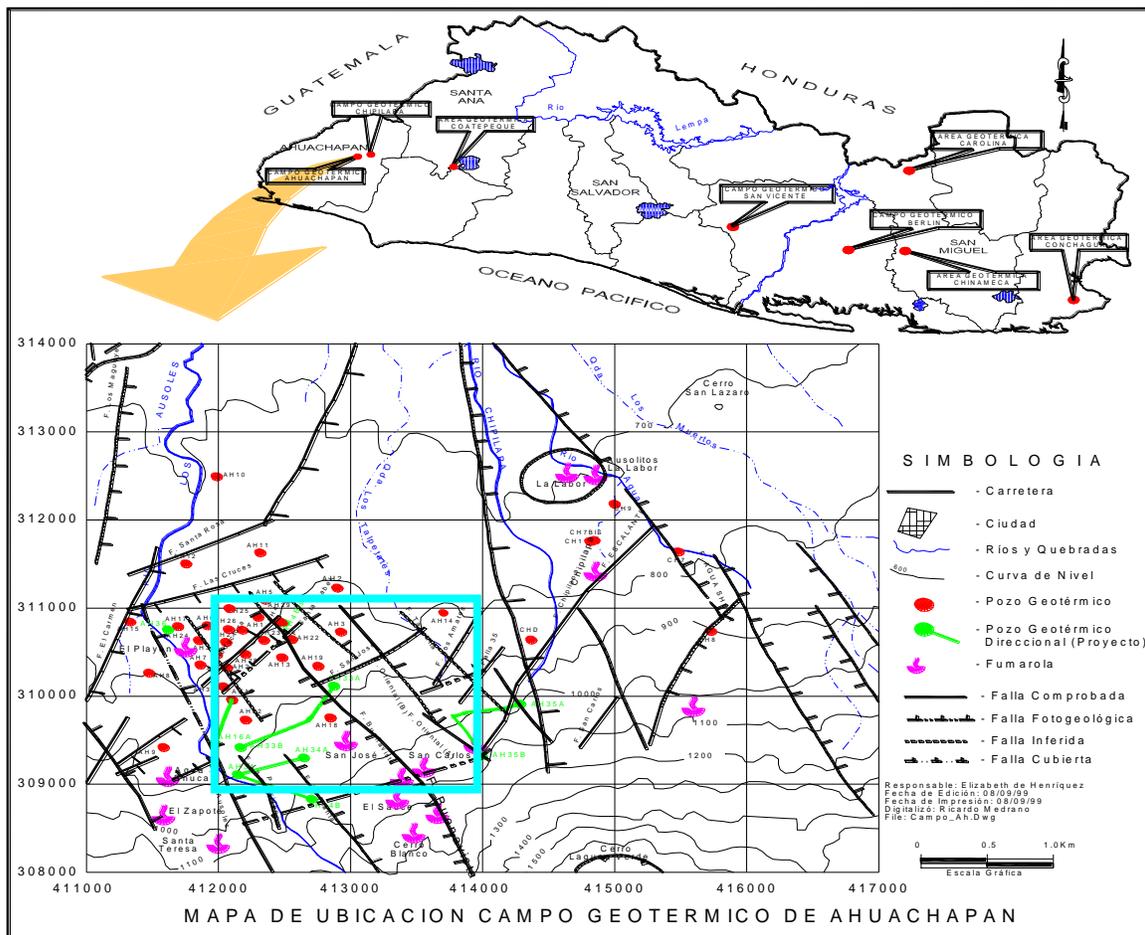


Figura 19 Zona de estudio en el área sur – este del Campo Geotérmico de Ahuachapán.

En esta área se realizaron las siguientes mediciones:

Registros de temperatura (cada 10 min.) en tiempo real, a profundidades de 2, 30 y 70 cm en un punto próximo al área de estudio (1.5 Km. Llamado estación base). Este punto puede estar incluido dentro de la zona de estudio.

Prospección de flujo de calor para un área de 6 Km². En esta área se realizaron mediciones de conductividad térmica (5 puntos en promedio por cada tipo de suelo identificado) y temperatura a las profundidades de 2 y 70 cm en puntos separados cada 200m y 300 metros.

5.5 INSTRUMENTOS

5.5.1 DESCRIPCIÓN DEL EQUIPO

El equipo necesario que se utilizó para el presente proyecto es:

a) Data Logger marca HOBO Type T, Termocupla Monocanal para registro en tiempo real de la temperatura. Rango de medición entre -70°C y +180°C Capacidad de almacenamiento 32,530 medidas en total. (Fig.20).

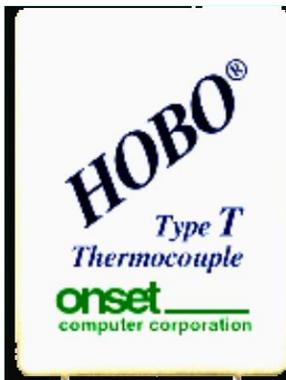


Fig. 20. Data Logger, marca HOBO.



*Fig.21 Termómetro DUAL
Marca BARNANT*

b) Termómetro Dual marca Barnat, Tipo T para medición de temperatura (Fig.22).Este termómetro posee una sonda con la cual se pueden realizar mediciones hasta un máximo de 92cm. Este termómetro fue utilizado en la medición de temperatura en las estaciones termométricas a 2 y 70 cm de profundidad.

c) Sonda Aguja (conductivímetro), (Fig.22). Se utilizó para la medición de conductividad térmica del área de estudio. Este equipo fue construido por la escuela de Física de la Universidad de El Salvador y esta constituido por: una batería de 12V, un amperímetro, un voltímetro y un data Loger tipo T(marca HOBO) conectados a la sonda.

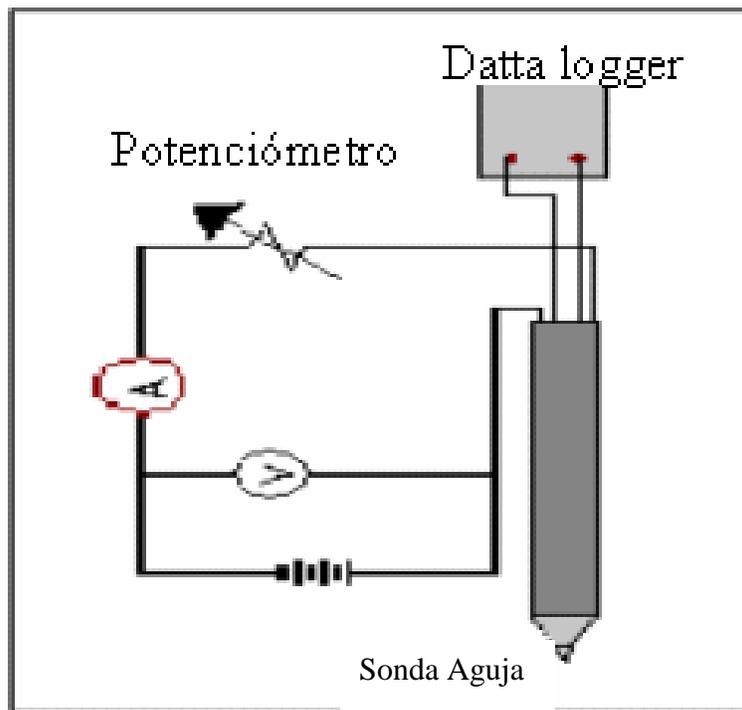


Fig. 22. Circuito del Equipo Sonda aguja, para la medición de conductividad térmica

d) Estación base (fig. 24) para la medición de temperatura en tiempo real a diferentes profundidades. Se construyó ubicando 3 termocuplas tipo T (Cobre – Constantan) en una regla de madera, conectadas a un data Loger cada una.

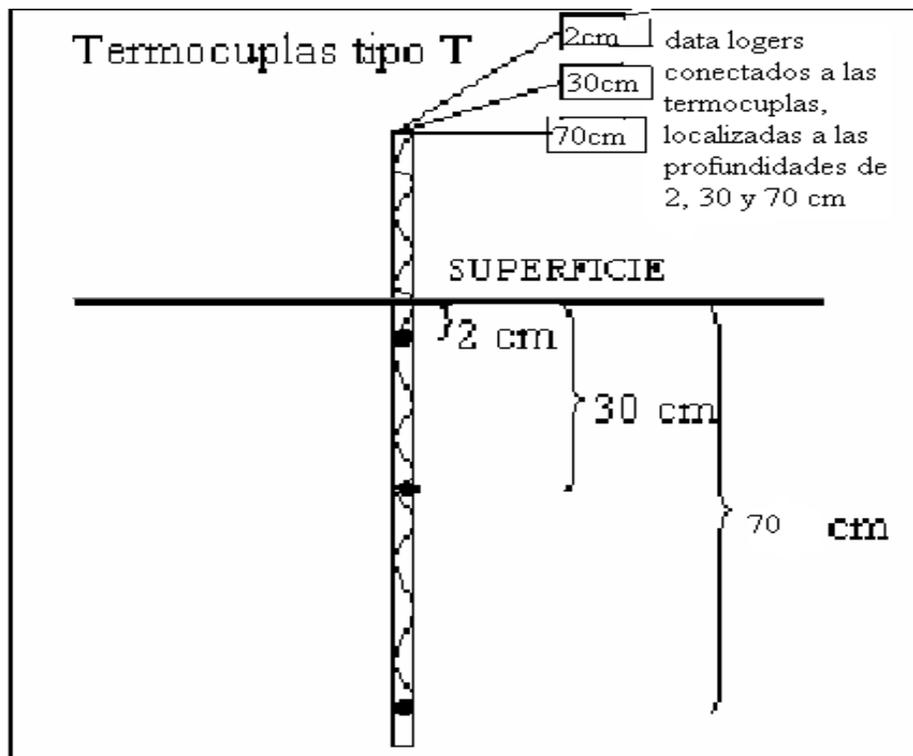


Fig.23 Estación Base. Consiste en una cadena de 3 termocuplas a 2, 30 y 70 cm de profundidad de la superficie de la tierra.

5.6 MEDICION DE VARIABLES Y PROCESAMIENTO.

Cálculo de la distribución espacial de flujo de calor.

Para calcular el flujo de calor conductivo de la zona sur – este del campo geotérmico de Ahuachapán, se realizaron mediciones de temperatura y conductividad térmica, para obtener con la ley de Fourier $Q = -K \Delta T / \Delta Z$ los valores de flujo de calor.

El cálculo de flujo de calor se realizó para 57 puntos, para lo cual fue necesario lo siguiente:

a) Estación base en sombra

Próxima al área de estudio (Fig.24). Esta estación, registró las variaciones de temperatura a las profundidades de 2, 30, y 70 cm. Con el objeto de corregir las medidas subsuperficiales de temperatura realizadas en diferentes horas del día en los 57 puntos.

El objeto de registrar temperatura para mas de dos profundidades es el de obtener la ecuación de la línea recta que relaciona la temperatura con la profundidad y visualizar la atenuación de la

señal de temperatura con respecto a la profundidad. En la siguiente tabla, se presentan registros de temperatura de la estación base generada en un archivo base en el programa EXCEL 97 (de los datos para 2cm de profundidad).

Tabla 3: Parte de datos colectados por la estación base para una profundidad de 2cm, en las cercanías del Campo Geotérmico de Ahuachapán.

Date	Time	Temperatura (°C) (2cm)
04/30/02	15:07:24.0	34.1
04/30/02	15:17:24.0	33.1
04/30/02	15:27:24.0	33.1
04/30/02	15:37:24.0	31.2
04/30/02	15:47:24.0	28.2
04/30/02	15:57:24.0	28.2
04/30/02	16:07:24.0	28.2
04/30/02	16:17:24.0	28.2
04/30/02	16:27:24.0	28.2
04/30/02	16:37:24.0	28.2
04/30/02	16:47:24.0	28.2

Para la estación base los datos obtenidos se procesaron de la siguiente manera:

1. Conversión de tiempo medido por data loggers a minutos. Eligiendo como minuto cero de referencia las 0:00:00 del 04/30/02.

Por ejemplo si se tomó una medida el 10 de mayo del 2002 a las 2:50 p.m los minutos transcurridos hasta ese momento eran 15237 minutos

2. Cálculo de Temperatura base a través de una correlación lineal del programa EXCEL 97 (Fig.25).

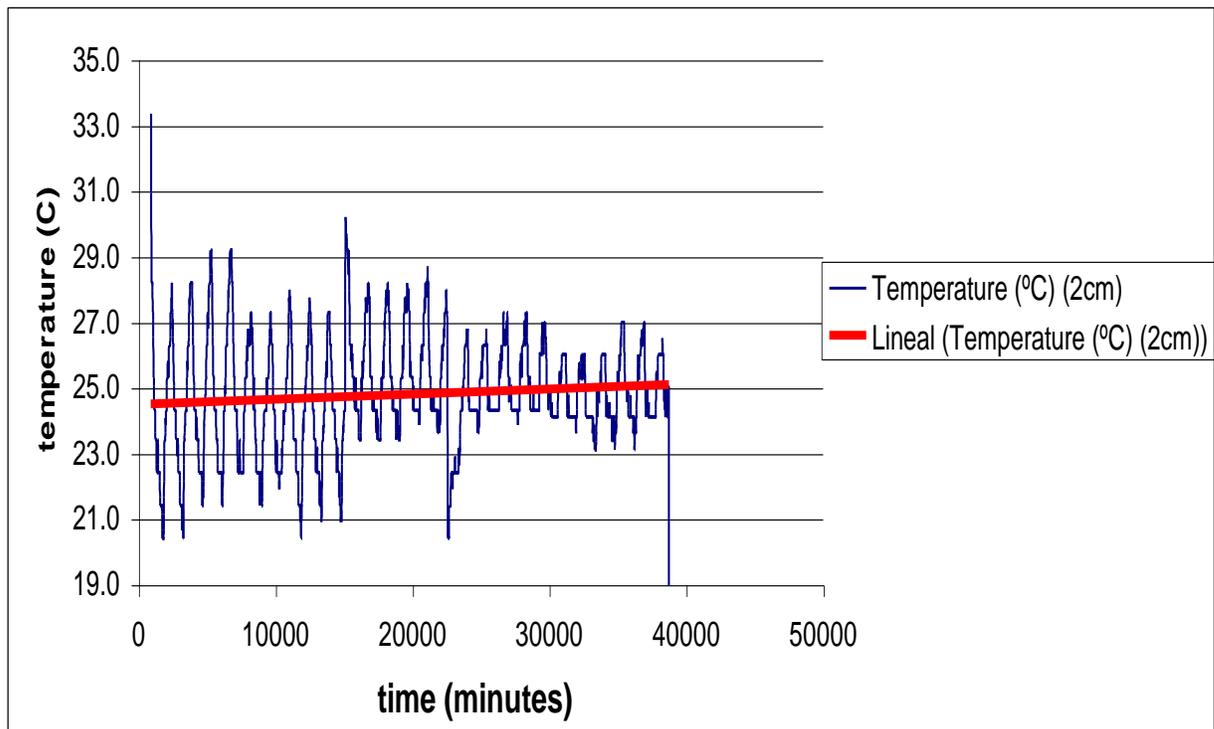


Fig. 24 *Línea de temperatura base obtenida a través de una correlación lineal del programa EXCEL 97, para una profundidad de 2 cm*

3. Cálculo de factores de corrección para medidas de temperatura registradas por data loggers según la siguiente expresión:

$$\text{Factor de Corrección} = T \text{ registrada en la estación base} - \text{Temperatura base}$$

b) Medición de temperatura en los puntos termométricos.

Los datos de los 57 puntos termométricos (registros espaciales) a las profundidades de 2 y 70 cm, se midieron por medio del termómetro marca Barnant tipo T, utilizando un tiempo de estabilización de 10 min.

El procesamiento de los datos se realizó de la siguiente manera:

1. Generación de un archivo base en el programa EXCEL 97, de los datos colectados en las estaciones termométricas como se muestra en la Tabla 2:

Tabla 4: Parte de datos colectados en las estaciones termométricas para profundidades de 70 y 2cm, en la zona SE del Campo Geotérmico de Ahuachapán.

Código de flujo de calor	Latitud			Longitud			Elevación (m)	Temperatura (°C) (70cm)	Tiempo 70cm	Temperatura (°C) (2cm.)	Tiempo 2 cm
Fc 54	13	54	33	89	47	43	1011	22.7	8:48 AM	22.1	9:03 AM
Fc16	13	54	35	89	48	35	894	24.1	2:00 PM	27.4	2:15 PM
Fc 17	13	54	24	89	48	41	901	22.8	2:58 PM	24	2:42 PM
Fc 18	13	54	24	89	48	37	902	23.6	3:21 PM	26.3	3:37 PM
Fc 19	13	54	36	89	48	22	932	24.9	10:15 AM	28	10:30 AM
Fc 20	13	54	29	89	48	18	925	25.3	11:30 AM	25	11:45 AM
Fc 21	13	54	29	89	48	42	903	23.3	12:15 PM	25.7	12:33 PM
Fc 22	13	54	15	89	48	43	944	23.2	1:45 PM	24.8	2:00 PM
Fc 23	13	54	7	89	48	50	935	24.4	2:30 PM	27.8	2:45 PM

2. Conversión de coordenadas geográficas a Lambert.
3. Conversión de tiempo medido en las estaciones termométricas a minutos. Eligiendo como cero de referencia las 0: 00:00 del 30 de abril del 2002.
4. Cálculo de la temperatura corregida para cada una de las mediciones realizadas en las estaciones termométricas de acuerdo a la siguiente expresión:

$$T \text{ corregida} = T \text{ medida en la estación termométrica} - \text{Factor de Corrección}$$

Es importante aclarar que en los casos, donde los tiempos de las medidas tomadas por la estación base no coincidían con los tiempos de las estaciones termométricas, se realizaron interpolaciones.

5. Cálculo del gradiente de temperatura para cada estación termométrica a través de la expresión:

$$\text{Gradiente } T = \Delta T / \Delta Z$$

Donde: $\Delta T = T \text{ corregida a } 70\text{cm} - T \text{ corregida a } 2\text{cm}$

$$\Delta Z = 70\text{cm} - 2\text{cm}$$

Gradiente T es el gradiente de temperatura.

b) **Medición de la conductividad térmica promedio del área de estudio.**

Las mediciones de conductividad térmica se realizaron con la sonda aguja, la cual se introducía en el suelo a una profundidad de 60 cm, para después conectarla según como se muestra en la figura 4.

Para el tratamiento de los datos colectados para conductividad térmica, se efectuaron los siguientes pasos:

1. Generación de un archivo base en el programa EXCEL 97, de los datos colectados por el data Loger como se muestra en la Tabla 3:

Tabla 5: Parte de datos colectados por el equipo de medición de conductividad térmica, en la zona SE del Campo Geotérmico de Ahuachapán.

Date	Time	Temperatura (*C)
01/11/02	11:38:11.0	28.2
01/11/02	11:38:12.0	28.2
01/11/02	11:38:13.0	29.2
01/11/02	11:38:14.0	29.2
01/11/02	11:38:15.0	30.2
01/11/02	11:38:16.0	30.2
01/11/02	11:38:17.0	30.2
01/11/02	11:38:18.0	31.2
01/11/02	11:38:19.0	31.2
01/11/02	11:38:20.0	32.2
01/11/02	11:38:21.0	32.2
01/11/03	11:38:22.0	33.1
01/11/02	11:38:23.0	33.1

2. Cálculo del promedio de las pendientes de los gráficos Temperatura vrs. Ln (t).

Utilizando $\frac{(T_2 - T_1)}{\ln(t_2 - t_0) - \ln(t_1 - t_0)} = \tan \alpha$, donde $\tan \alpha$ es la pendiente del gráfico.

3. Cálculo del promedio de la conductividad térmica para la zona de estudio, a partir de 5 mediciones para cada tipo de suelo identificado en la zona SE del Campo Geotérmico de

Ahuachapán. Utilizando $K = \frac{3.413I^2R}{4\pi \frac{(T_2 - T_1)}{\ln(t_2 - t_0) - \ln(t_1 - t_0)}}$; donde I es la corriente medida, y

R es la resistencia de la sonda aguja.

Los valores de flujo de calor para cada punto termométrico fueron calculados a partir de la ley de Fourier $Q = -K \Delta T / \Delta Z$, después de realizadas las respectivas correcciones a las temperaturas y determinado el valor promedio de la conductividad para la zona de estudio. A partir de estos datos se obtendrán mapas de flujo de calor y perfiles de flujo de calor por medio del programa SURFER, para su respectiva interpretación cualitativa.

CAPITULO 6

DISCUSION Y ANALISIS RESULTADOS

6.1 INTRODUCCION

En este capitulo se presenta el análisis y discusión de los resultados obtenidos de la campaña de flujo de calor conductivo, realizado en la zona sur – este del campo geotérmico de Ahuachapán.

El análisis cualitativo del mapa de flujo de calor conductivo refleja una probable área de máxima anomalía de flujo de calor, comprendida entre las fallas La Planta y Buena Vista.

Los perfiles, trazados perpendicularmente a las fallas mencionadas anteriormente, presentan máximos de flujo de calor, cercanos a los trazos de estas fallas, lo cual puede ser un indicativo que estas estructuras transporten fluidos hidrotermales (fallas activas)

A continuación se presenta la discusión y análisis del mapa y los perfiles de flujo de calor conductivo.

6.2 MAPA DE FLUJO DE CALOR.

De los datos de gradiente térmico el 40.35% de los 57 puntos termométricos medidos pudieron ser corregidos con la estación base ubicada en sombra. El resto de puntos requerían una estación en sol para su corrección, la cual no fue instalada por no contarse con el equipo necesario.

El valor promedio de flujo de calor conductivo, obtenido para la zona de estudio es 0.31 ± 0.09 W / m²; Este valor fue calculado para 23 puntos, a partir de los cuales se elaboró el mapa de flujo de calor conductivo.

En este mapa de flujo de calor conductivo (Fig. 26), se identifican 3 áreas anómalas las cuales presentan las siguientes características:

Zona 1: localizada al NO del área de estudio, con un área aproximada 1000 metros cuadrados, en la cual se ubican los pozos: AH 25, AH 26, AH 1, AH 27, AH 28, AH 23, AH 13, AH 20, AH 4 y AH 22. Esta anomalía aunque es obtenida a partir de dos mediciones, corresponde al área de explotación actual del campo geotérmico de Ahuachapán.

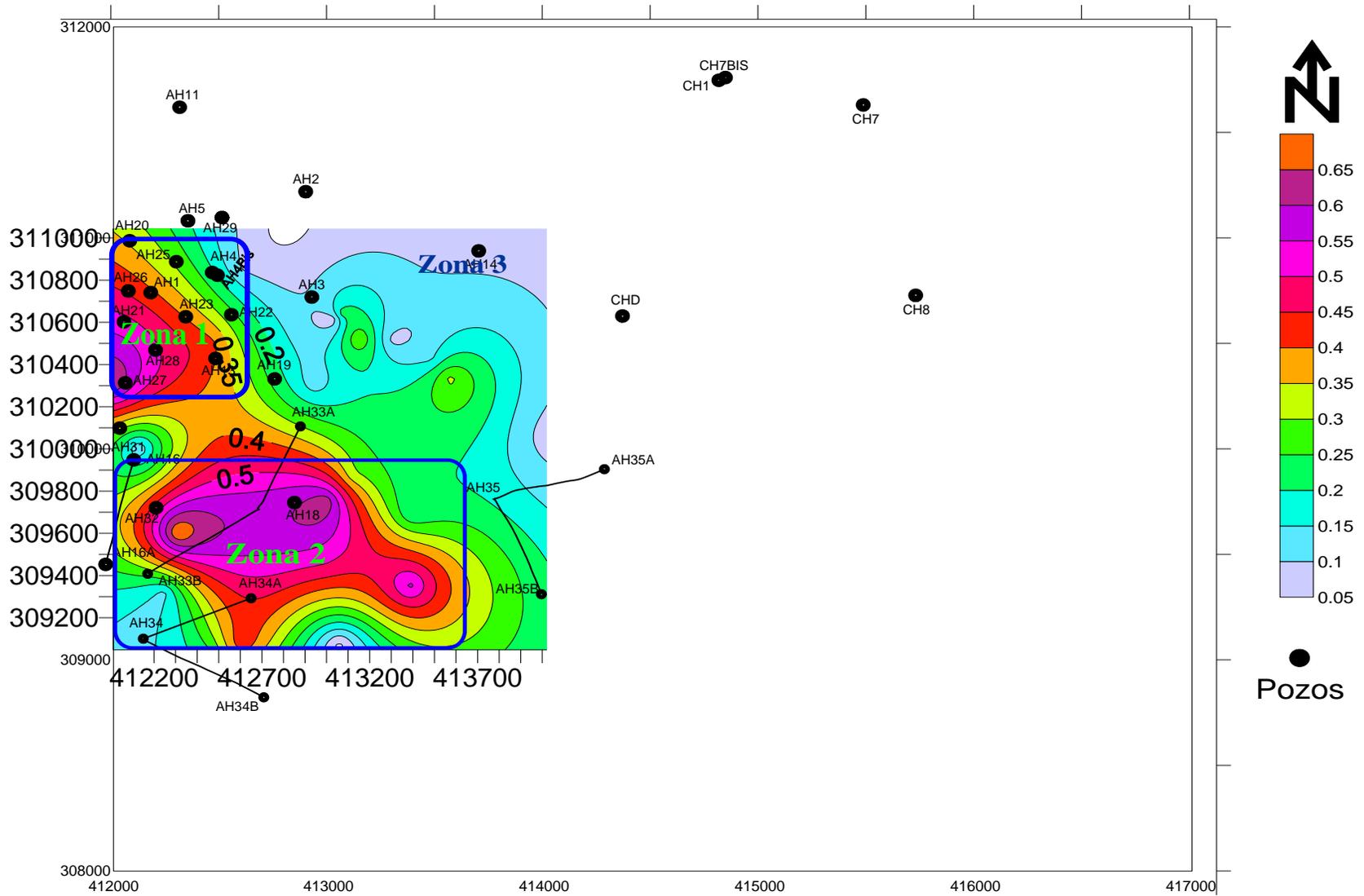


Fig. 25 Mapa de flujo de calor conductivo para la zona sur – este del campo geotérmico de Ahuachapán

En esta área se observan alineamientos de isocontornos en la parte Noroeste y Sureste, lo cual podría reflejar la dirección de una estructura geológica activa. El flujo de calor en esta zona varía entre 0.2 y 0.6 W / m².

- ✓ Zona 2: localizada hacia el SO - SE de la zona de estudio. Esta zona del mapa, se encuentra delimitada por la zona 1 hacia el NO y con área de aproximadamente 2 Km²; donde se localizan los pozos: AH 34 A, AH 33 B, AH 33 A, AH 32, AH 16 y AH 18.

En ella se observan alineamientos de isocontornos, que pueden estar reflejando la dirección de una estructura geológica (falla) con rumbo NO – SE, y un cierto alineamiento con rumbo NO – SO en el otro extremo de la anomalía que puede estar reflejando la dirección de otra falla en esa dirección. El flujo de calor conductivo en la zona es entre 0.2 y 0.65 W / m².

- ✓ Zona 3: Corresponde al área restante de las zonas 1 y 2, el flujo de calor varía entre 0.05 y 0.2 W / m².

6.3 PERFILES DE FLUJO DE CALOR.

A partir del mapa de flujo de calor conductivo, se elaboraron 3 perfiles (fig.27), 2 perpendiculares a las fallas: La Planta, Buena Vista, Oriental A, falla 35 y una falla oculta.

A continuación se presenta la descripción de los perfiles:

Perfil 1

Con dirección SO – SE, tiene una longitud de 1700m. Se proyectan los puntos termométricos 13, 15, 17 y 28, posee una longitud de aproximadamente 1700 m, intercepta las fallas: La Planta, Buena Vista y Oriental A.

Los valores máximos de flujo de calor conductivo (1 y 2) correlacionan con la Falla La Planta y la falla Buena Vista (Fig. 3)

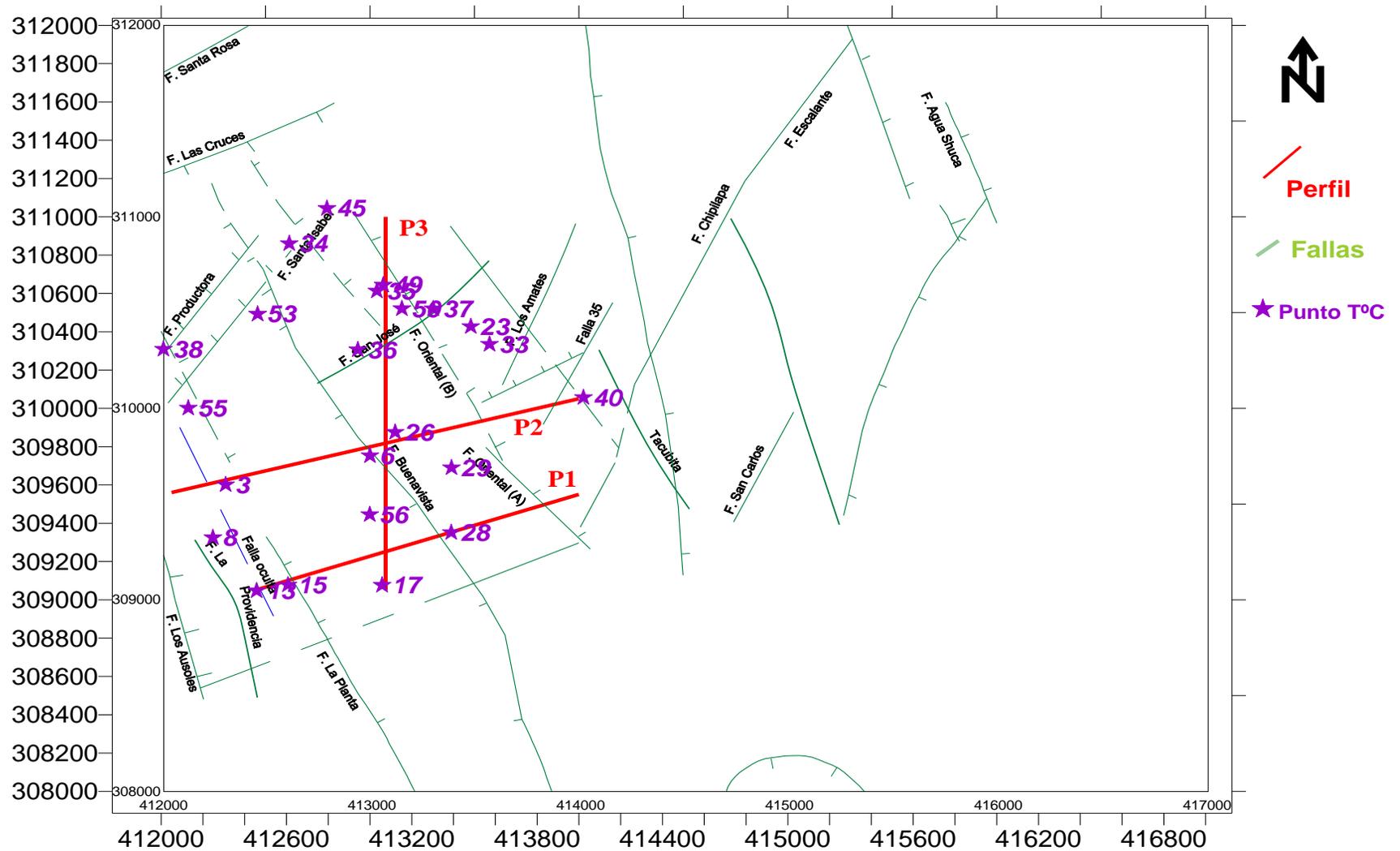


Fig. 26 Ubicación de los perfiles de flujo de calor, zona sur – este del campo geotérmico de Ahuachapán

Perfil 2

El perfil 2, tiene una dirección SO – SE, y posee una longitud de aproximadamente 2100 m. Se proyectan los puntos termométricos 3, 6, 26 y 40; Posee, intercepta las fallas: La Planta, Buena Vista, Oriental B, 35 .

Los valores máximos de flujo de calor conductivo (1, 2 y 3) correlacionan con las fallas: La Planta, la falla Buena Vista y Oriental B (Fig. 3)

Perfil 3

Elaborado con dirección SE – NE. Posee una longitud de aproximadamente 2000 m. Se proyectan los puntos termométricos 17, 56, 6, 26, 36, 35 y 49, e intercepta las fallas: Buena Vista, San José y Oriental B.

Los valores máximos de flujo de calor conductivo (1, 2 y 3) correlacionan con las fallas Buena Vista, San José y Oriental B (Fig. 3).

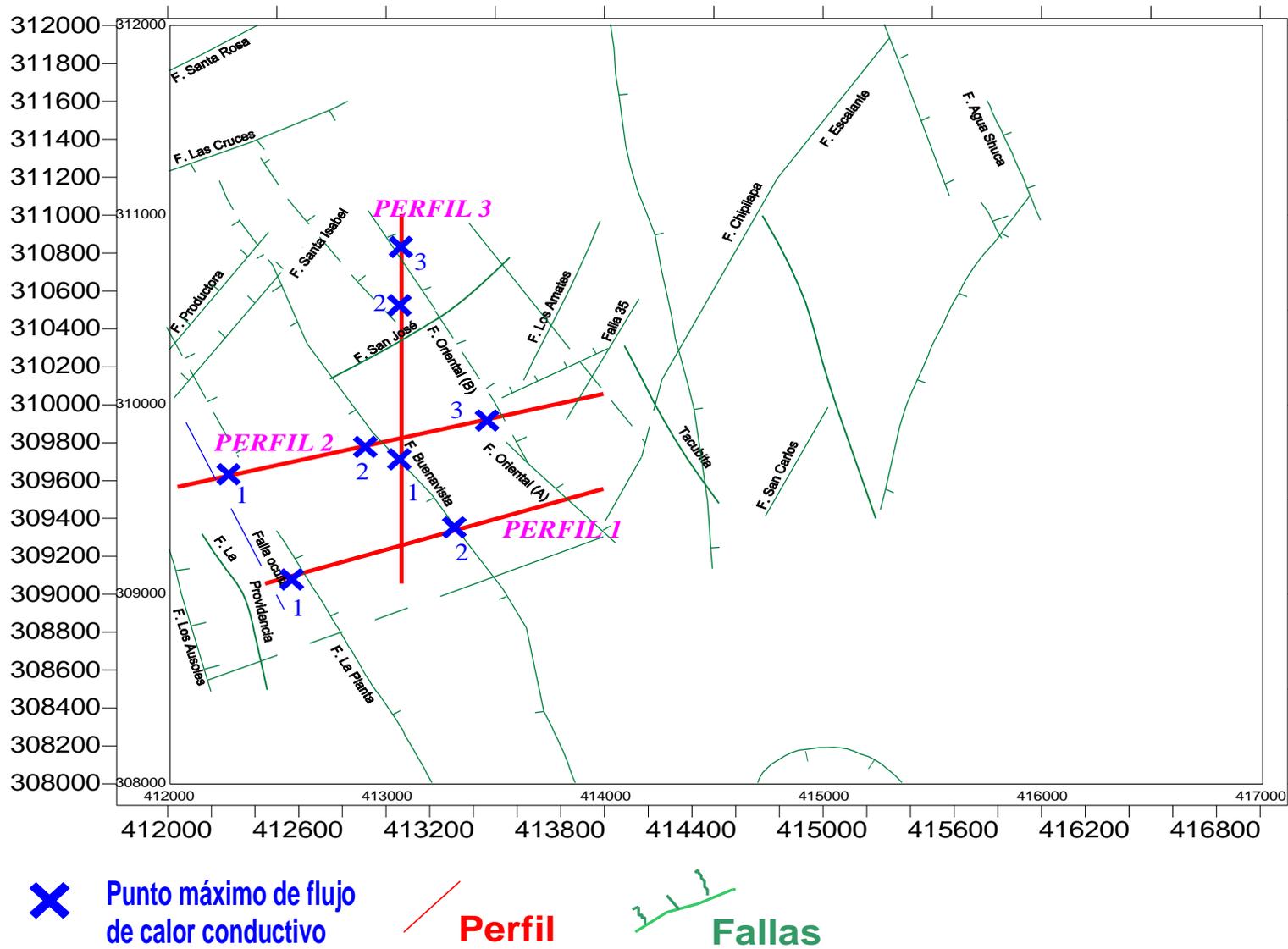


Fig. 27 Mapa de ubicación de perfiles de flujo de calor conductivo y correlación con estructuras geológicas.

6.4 CORRELACION DE MAPA Y PERFILES DE FLUJO DE CALOR CONDUCTIVO CON GEOLOGIA ESTRUCTURAL DE LA ZONA..

En la figura 28 se presenta la información combinada del mapa y los perfiles de flujo de calor conductivo, con el mapa estructural del campo geotérmico de Ahuachapán.

La correlación con las estructuras geológicas de la zona, establece lo siguiente:

- Las mayores anomalía de flujo de calor conductivo, se observa entre las fallas La Productora y la falla Santa Isabel (zona 1, que es la de explotación actual), donde el valor máximo de flujo de calor conductivo es de 0.55 W / m^2 ; y entre las fallas Buena Vista y La Planta (zona 2), en la cual el valor máximo de flujo de calor conductivo es de 0.65 W / m^2 .
- La falla Buena Vista, correlaciona con los alineamientos de isocontornos en dirección NO – SE. En los perfiles 1, 2 y 3, los puntos máximos de flujo de calor conductivo 2, 1 y 2 pueden corresponder a la falla Buena Vista.
- La falla La Planta, presenta cierta correlación con el alineamiento de isocontornos del mapa de flujo de calor, en la dirección SO de la zona de estudio. En los perfiles 1 y 2, los puntos máximos de flujo de calor conductivo 1 y 1 pueden corresponder a esta falla.

6.5 MAPA RESUMEN DE INFORMACION

En la figura 29, se presenta la síntesis de la interpretación realizada del mapa y los perfiles de flujo de calor conductivo, y de la correlación de ellos con las estructuras geológicas de la zona.

A partir de esta información se establece que:

- La zona 2 comprendida entre las fallas La Planta y Buena Vista (encerrada en recuadro), es el área que se propone para futuros estudios (geofísicos, geoquímicas, etc.) en la zona sur-este del campo geotérmico de Ahuachapán, Debido a que en ella se presenta el mayor valor de flujo de calor conductivo (0.65 W / m^2). Y que ayudarían a corroborar esta anomalía como de interés para futuras perforaciones.
- Las fallas la Planta y Buena Vista, es probable que transporten fluidos hidrotermales (fallas activas), debido a los máximos que presentan los perfiles 1, 2 y 3 en los trozos de estas fallas.

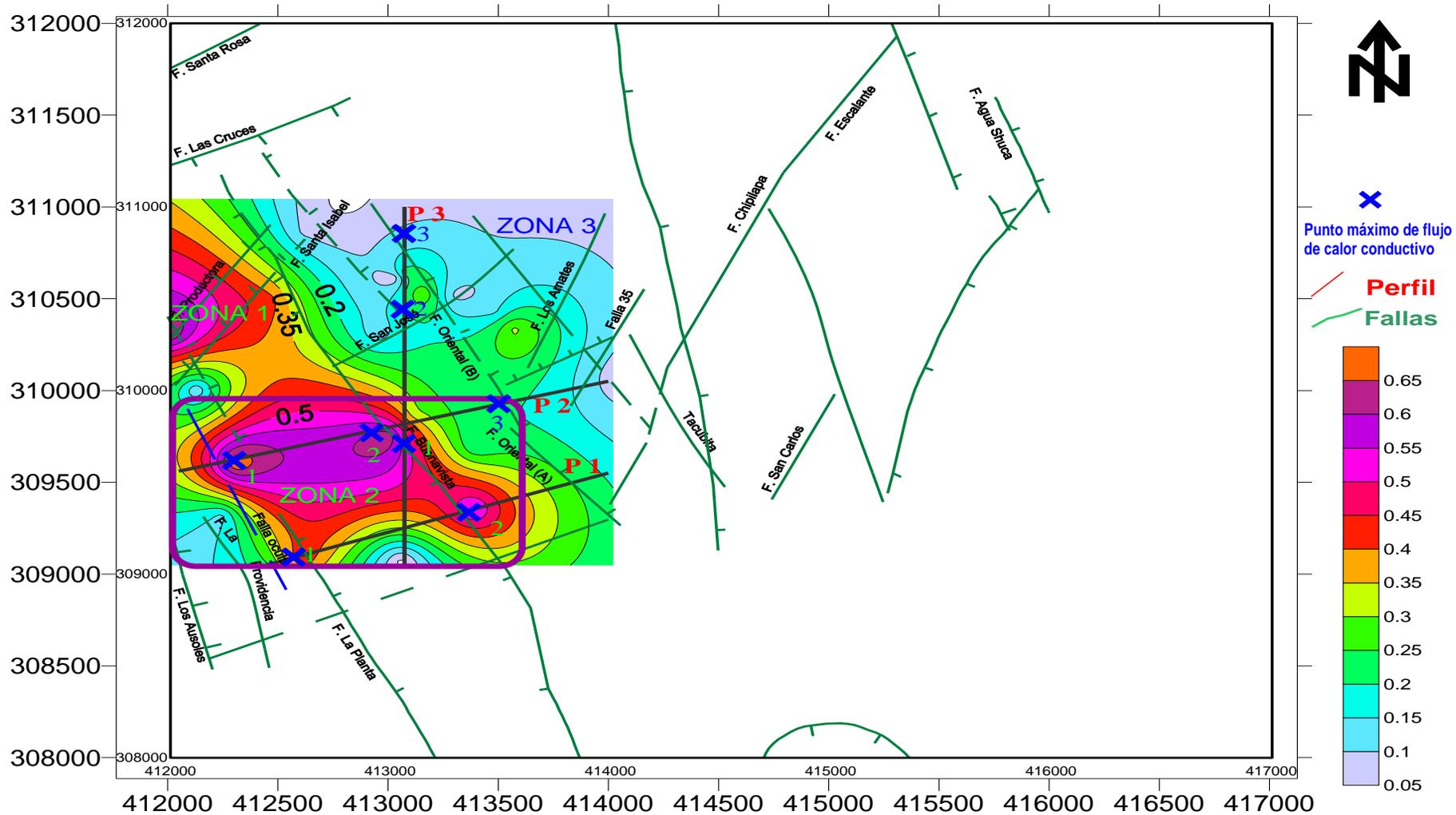


Figura 29: Mapa de ubicación de zona propuesta para explotación. Campo geotérmico de Ahuachapán.

CAPITULO 7

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

A partir de los resultados obtenidos de la campaña de flujo de calor conductivo, para la zona sur – este del campo geotérmico de Ahuachapán y del análisis cualitativo del mapa y perfiles de flujo de calor conductivo, se pueden establecer las siguientes conclusiones y recomendaciones:

7.1 CONCLUSIONES

- El área de estudio presenta un valor promedio de flujo de calor conductivo de 0.31 ± 0.09 W / m² característico de un área anómala (geotérmica). El valor de flujo de calor conductivo para zonas normales es de 0.06 a 0.08 W / m².
- Las fallas La Planta y Buena Vista según los perfiles de flujo de calor conductivo, trazados perpendicularmente a ellas (2 perfiles), presentan máximos de flujo de calor conductivo en los trazos de estas fallas, lo cual podría indicar que transporten fluidos hidrotermales (fallas activas).
- De las áreas de mayor anomalía de flujo de calor conductivo (zona 1 y zona 2), la zona 2 comprendida entre las fallas Buena Vista, La Planta, es la que se recomienda como probable zona de interés para futuros estudios (geofísicos, geoquímicas, etc.). Y que ayudarían a corroborar esta anomalía como de interés para futuras perforaciones, por encontrarse entre dos estructuras probablemente activas.

7.2 RECOMENDACIONES

- Debido a las limitantes que se tuvieron por la falta de equipo, para instalar dos estaciones bases, un 59.65% de los datos no lograron ser procesados. Por lo anterior se recomienda densificar las mediciones en el área recomendada para posibles perforaciones de pozos.
- Los tiempos de medición en los puntos termométricos, deben de ser entre 10 y 15 minutos, para lograr una estabilización del equipo con el medio.
- Realizar las líneas de medición de estaciones termométricas, perpendiculares a las estructuras existentes (fallas), con distancia entre estación termométrica de 200 – 300 metros, para cubrir las áreas de interés y determinar el comportamiento del flujo de calor conductivo en la dirección perpendicular a fallas activas.
- Debido a que las condiciones en que se pueden realizar las mediciones en las estaciones termométricas son: sol, sombra y sol – sombra, es preferible instalar dos estaciones base (sol y sombra). Para realizar las correcciones de las variaciones diurnas de la temperatura, para las estaciones termométricas.
- Se recomienda realizar las campañas de flujo de calor conductivo en la época seca, que comprende los meses de diciembre – abril, para evitar realizar correcciones de temperatura y conductividad térmica debido a la humedad.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- 1- Larios de López, Dina. 1983. "Prospección de Flujo de Calor del Campo Geotérmico de Chipilapa". Unidad de Física de Rocas, Centro de Investigaciones Geotérmicas, GEOCEL.
- 2- Larios de López, Dina. 1985. "Conductividad Térmica de las Rocas del Campo Geotérmico de Ahuachapán". Unidad de Física de Rocas, Centro de investigaciones Geotérmicas, GEOCEL.
- 3- Larios de López, Dina. 1988. Flujo de Calor Conductivo Regional del Campo Geotérmico de Berlín". Unidad de Física de Rocas, Centro de investigaciones Geotérmicas, GEOCEL.
- 4- Reina Servando de la Cruz (compilador). 1994. Ciencias de la Tierra Hoy. Ediciones científicas Universitarias. Las ciencias del siglo XX. Fondo de Cultura Económica, México.
- 5- CEL, 1988. "Flujo de Calor Pozo AH - 20", Departamento de Exploración y Evaluación de Campo. Reporte Interno.
- 6- Allis, R.G. 1979. "Heat Flow and Temperature Investigation in Thermal Ground". Report 135, Geophysics Division, Department of Scientific and industrial Research, Wellington, Nueva Zelandia.
- 7- J.Wang, R.L. Brass. 1999. "Ground Heat Flux Estimate from Surface Soil Temperature". Department of Civil and Environmental Engineering, Massachusetts, Institute of Technology, Cambridge, USA.

- 8- Guía para estudios de reconocimiento y prefactibilidad geotérmicos. OLADE (Organización Latinoamericana de Energía) y BID (Banco Interamericano de Desarrollo), Quito, Ecuador, Septiembre, 1993, páginas 4, 5, 6, 7 y 8.
- 9- Robertson, E.I. and Dawson, G.B. 1964. “Geothermal Heat Flow Through the Soil at Wairakei”. Geophysics Division, Department of Scientific and Industrial Research, Wellington, Nueva Zelandia.
- 10- K. Thompson, G.E. 1960. “Mediciones de Temperatura en el Area de Wairakei – Taupo”, (Traducción). Geophysics Division, Department of Scientific and Industrial Research, Wellington, Nueva Zelandia.
- 11- Dawson, G.B. and Fisher, R.G. 1963. “Variaciones de Temperatura Diurna y Estacional en El Suelo de Wairakei. (Traducción). Geophysics Division, Department of Scientific and Industrial Research, Wellington.
- 12- López, Dina L. And Smith, Leslie. June, 1995. “Fluid flow in fault zones: Analysis of the interplay of convective circulation and topografically driven groundwater flow”. Water Resources Research. Vol. 31. No 6. Pages 1489 – 1503.
- 13- López, Dina L October, 1996. “Fluid flow in fault zones: Influence of hydraulic anisotropy and heterogeneity on the fluid flow and heat transfer regime”. Water Resources Research. Vol. 32. No 10. Pages 3227 – 3235.
- 14- Kimball, B.A., eta. 1976. “Soil - heat Flux Determination: Temperature Gradient Method with Computed Thermal Conductivities”. Agricultural Research Service, U.S. Department of Agriculture. Vol. 40.

- 15- Kimball, B.A. and Jackson, R.D., 1975. "Soil Heat Flux Determination: A null – alignment method. Agricultural Research Service, U.S. Department of Agriculture Vol. 15 Pages 1 – 9.
- 16- Kilty, Kevin and Chapman, David S. 1981. "Convective Heat Transfer in Selected Geologic Situations". Ground Water. Vol.18, No 4.
- 17- López, Dina L. "On The Interpretation of Conductive Heat Flow Anomalies Near Fault Zones". Department of Geological Sciences, Ohio University, Athens, Ohio 45701, U.S.A.
- 18- The Planning of Geothermal Projects, Ingvar Birgir Frioleifsson, 1997, pág. 9
- 19- Kern, Donald Q. 1978. Procesos de transferencia de calor, México. Editorial Continental, Págs. 23 – 26.