

ALGUNAS CONSIDERACIONES SOBRE FLUJO TERMICO APLICADAS EN MEXICO.

Javier Saúl Salgado Pareja* y Luis del Castillo García.**

RESUMEN. En este trabajo se discuten los principales aspectos, - tanto teóricos como prácticos para el tratamiento del flujo térmico, como una herramienta de vital importancia para el entendimiento Geológico/Geofísico de nuestro planeta. El tratamiento se inicia con el análisis de la ecuación de la conducción del calor y se da un enfoque hacia la interpretación de las soluciones de la misma que sin duda alguna son las que determinan el comportamiento del flujo térmico en relación a las diferentes capas de la tierra.

Se hace hincapié en los factores de control físico que determinan - las correcciones que son necesarias aplicar en todo estudio geotérmico, puesto que juegan un importante papel en las técnicas de medición del flujo térmico. Al discutir las técnicas geofísicas que se han empleado hasta ahora en nuestro país en la búsqueda de campos geotérmicos, se analiza una que por sus características y método de observación es mucho más conveniente el aplicarla en México en base a su costo de operación.

Al abordar el estudio del comportamiento térmico de la tierra se - intenta determinar la variación de la temperatura con la profundidad y, si es posible, conocer la distribución de temperaturas o gradientes a través del tiempo para proporcionar un ajuste lo más apropiado posible a las nuevas hipótesis de la tectónica global en relación a normas criterios de exploración integrada.

INTRODUCCION. Los principales objetivos buscados al abordar el estudio del comportamiento térmico de la tierra son determinar como varía la temperatura con la profundidad y, si es posible, como cambia la distribución de temperaturas con el tiempo. Para abordar este tratamiento es necesario analizar las diversas soluciones de la ecuación de la conducción del calor, ya que estas, sin duda determinan los límites de aplicabilidad de esta teoría, tanto en el aspecto puro como para el desarrollo de criterios de exploración integrada; Carslaw y Jaeger - (1959) hacen un análisis completo de la ecuación del calor y de sus soluciones particulares, orientadas hacia aspectos aplicativos. En la determinación del flujo térmico terrestre existen una serie de factores que afectan notablemente la reducción de datos, por lo que es necesario analizarlos con el fin de poder eliminarlos y obtener de este modo la señal geotérmica de interés. McDonald (1965).

Las técnicas geofísicas de exploración constituyen sin duda alguna la parte medular dentro del proceso de localización de recursos geotérmicos, sin embargo, la elección de una determinada técnica de explora-

* Escuela Superior de Ingeniería y Arquitectura. IPN.

** Dirección de Graduados e Investigación, IPN.

ción debe apoyarse en bases plenamente justificables desde el punto de vista geológico, ya que un conocimiento firme sobre la geología del área de interés permite ahorrar tiempo e inversión. Actualmente en nuestro país se debe considerar además de un buen criterio geológico, el aspecto económico ya que este último es el que determina a final de cuentas el alcance de una determinada técnica de exploración en función de los objetivos buscados.

En nuestro país, la geofísica ha sido orientada fundamentalmente hacia el entendimiento geológico estructural del área con posibilidades geotérmicas, sin embargo, no se han realizado estudios orientados hacia el entendimiento físico-químico directo de los procesos geotérmicos, que sin duda alguna son esenciales para el desarrollo integral de la geotermia como una fuente de energía alterna y para normar criterios de exploración para minerales de rendimiento económico. Los primeros estudios que sobre geotermia se realizaron en México tuvieron una orientación de naturaleza descriptiva, estos fueron publicados por de Anda (1957) y de Anda et al (1961).

En México, el organismo que tiene a su cargo la exploración y explotación de los recursos geotérmicos es la C. F. E. por lo que ha realizado estudios geofísicos en las diversas áreas con potencial geotérmico. Los primeros estudios realizados por esta dependencia fueron efectuados por contratistas, esta es la razón básica por la cual no se lograron avances en este sector en el período de 1961 a 1968. En consecuencia la Comisión Federal de Electricidad decidió trabajar en coordinación con el Instituto de Geofísica de la UNAM; este hecho dió como resultado que se desarrollaran ampliamente las operaciones de exploración y sobre todo, que las contribuciones a la geofísica aplicada hayan sido notables. Con este sistema de trabajo, se han efectuado exploraciones en el área del Valle de Mexicali y el campo geotérmico de Cerro Prieto, B.C.N.

Recientemente se ha estudiado el área de Los Humeros-Derrumbadas. Pue. mediante diversas técnicas geofísicas, por conducto del Departamento de Geología y Minería entre los que se puedan citar los trabajos de García Durán (1968), Palacios y García (1981), Yañez y García (1982) y García Estrada (1983). Además se ha estudiado a nivel regional el Continente Mexicano desde el punto de vista geodinámico, estas investigaciones fueron realizadas por Castillo G.L. (Del) 1977 a, b, c, d, 1978; Castillo G.L. (Del) y Domínguez (1977); Castillo G.L. (Del) et al (1983). Aquí se tratará de analizar una técnica que por sus características y método de observación es mucho más conveniente el aplicarla en México, ya que su método de campo es sencillo y el procesado de datos puede efectuarse sin necesidad de utilizar equipo complicado; esta técnica ha sido desarrollada recientemente y por su metodología se cree que tiene un gran futuro.

LEVANTAMIENTOS SUPERFICIALES DE TEMPERATURA Y METODOLOGIA.

El levantamiento superficial de temperaturas es una técnica geofísica rápida y barata que se emplea para apoyar los programas de perforación profunda en la exploración geotérmica. El objetivo perseguido con esta técnica es obtener la señal geotérmica de interés a partir de las mediciones realizadas en el campo a profundidades de 2-5 m. En general se considera que se tiene una anomalía térmica cuando se cumple la siguiente desigualdad, García Estrada (1983):

$T_{\text{medida}} > T_{\text{media anual a la altura del terreno}} + \text{Amplitud del ciclo diurno a 2-5 m. de profundidad} + \text{Incremento de temperatura producida por el gradiente normal.}$

Un factor de vital importancia que es menester considerar en esta tecnología es la existencia de la onda térmica de periodicidad anual; aquí ésta onda se considera como ruido y en general es provocada por los siguientes factores.

- a) Variación diurna en el calentamiento solar.
- b) Variación anual en el calentamiento solar.
- c) Variación aperiódica en el calentamiento solar.
- d) Variaciones en el albedo superficial, el cual afecta la cantidad de energía absorbida.
- e) Variaciones en la rugosidad del terreno; este factor afecta la cantidad de calor disipado por el flujo turbulento del viento.
- f) Variaciones en la difusividad térmica del suelo.
- g) Pendiente del terreno.
- h) Variaciones en la elevación.
- i) Variaciones en el nivel del agua subterránea y en su movimiento.

Las variaciones de temperatura generadas por estos efectos no existen a profundidades de 20-30 m. a excepción de la circulación de agua.

Si la onda de temperatura anual puede simularse matemáticamente partiendo de un conjunto de parámetros, entonces estos efectos perturbadores (considerados como ruido) pueden substraerse de las tempera-

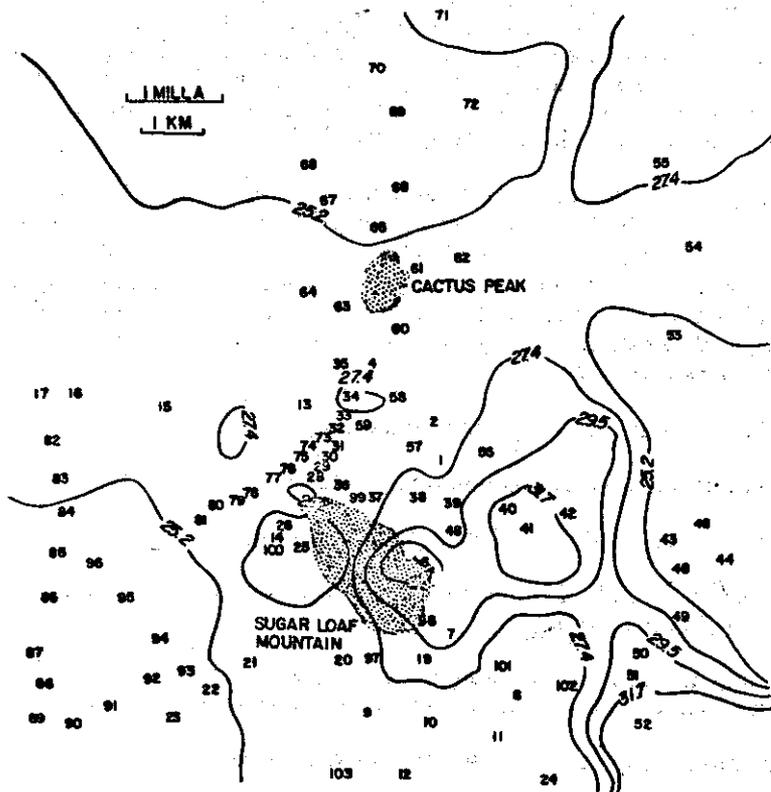


Figura 1. Isotermas a 2 m. de profundidad en la zona de Coso, California. Las temperaturas en °C, (LeSchack y Lewis, 1983).

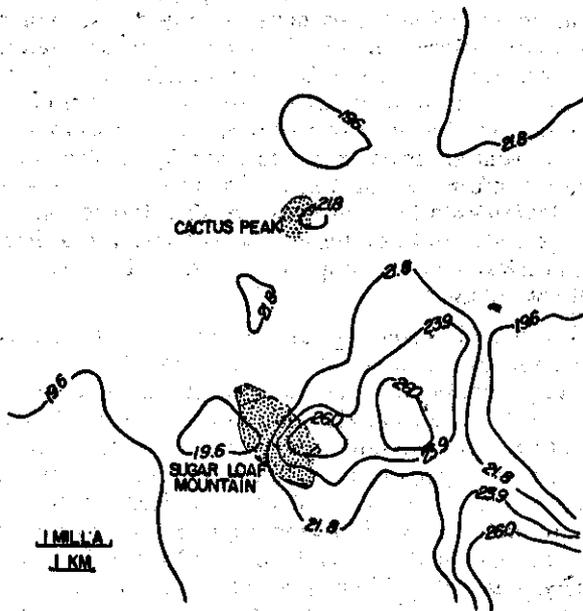


Figura 2. Isoérmicas de la temperatura media anual para el área de Coso corregidas por elevación. Las temperaturas en °C, (LeSchack y Lewis, 1983).

turas medidas y obtener de este modo la señal geotérmica. Leschack y Lewis (1983) desarrollaron un modelo de corrección para la onda de periodicidad anual; este modelo proporciona la temperatura teórica - que se esperan a una profundidad de 2 m. para el sitio y la fecha en la cual se introdujeron los parámetros.

Como se sabe, las oscilaciones térmicas son producidas por el calentamiento diferente que se tiene en la superficie de nuestro planeta, por lo que es necesario considerar los procesos energéticos y las propiedades físicas que gobiernan este fenómeno. La diferenciación del flujo energético (radiante, sensible y evaporativo) en la superficie de la tierra es función de las condiciones meteorológicas y de las características de la superficie terrestre; una vez que la energía se transmite a través de la matriz que conforma el suelo, serán las propiedades físicas del mismo las que determinen la magnitud y velocidad de propagación del flujo térmico superficial; sin embargo la conductividad y la difusividad térmicas afectan notablemente la amplitud y fase de la onda anual a los dos metros de profundidad.

El modelo de corrección para la oscilación de periodicidad anual requiere de seis parámetros constantes y de quince valores medios mensuales para cada una de las ocho variables consideradas. Los valores constantes incluyen las propiedades del suelo y las características climatológicas, en tanto que las variables requieren de valores climatológicos conocidos y de parámetros característicos de la superficie. Las propiedades del suelo que se requieren son la conductividad y la difusividad térmicas; las variables climatológicas incluyen el punto de rocío mensual, el porcentaje mensual de cielos despejados, la presión atmosférica media mensual y la velocidad media del viento; en tanto que las características superficiales son la rugosidad superficial, la difusividad térmica, el porcentaje de albedo y la humedad relativa superficial.

Para ilustrar esta técnica se analizará el trabajo efectuado por estos autores en el campo geotérmico de Coso, California, EUA. En este trabajo se realizaron una gran cantidad de mediciones de temperatura a una profundidad de 2 m., una vez que se tuvieron estas se procedió a corregirlas por el efecto de elevación, ya que este factor genera perturbaciones considerables. En la figura 1 se muestra el mapa de isotermas a 2 m. de profundidad que se obtuvo empleando esta técnica. Uno de los principales parámetros que debe considerarse en esta técnica es la temperatura media anual dada su gran influencia sobre las mediciones. En la figura 2 se ilustran las isotermas para este parámetro en el área de Coso. Una vez que el modelo de corrección ha proporcionado las temperaturas teóricas, estas deben substraherse de los valores medidos para obtener las temperaturas residuales, cuya configuración se ilustra en la figura 3.

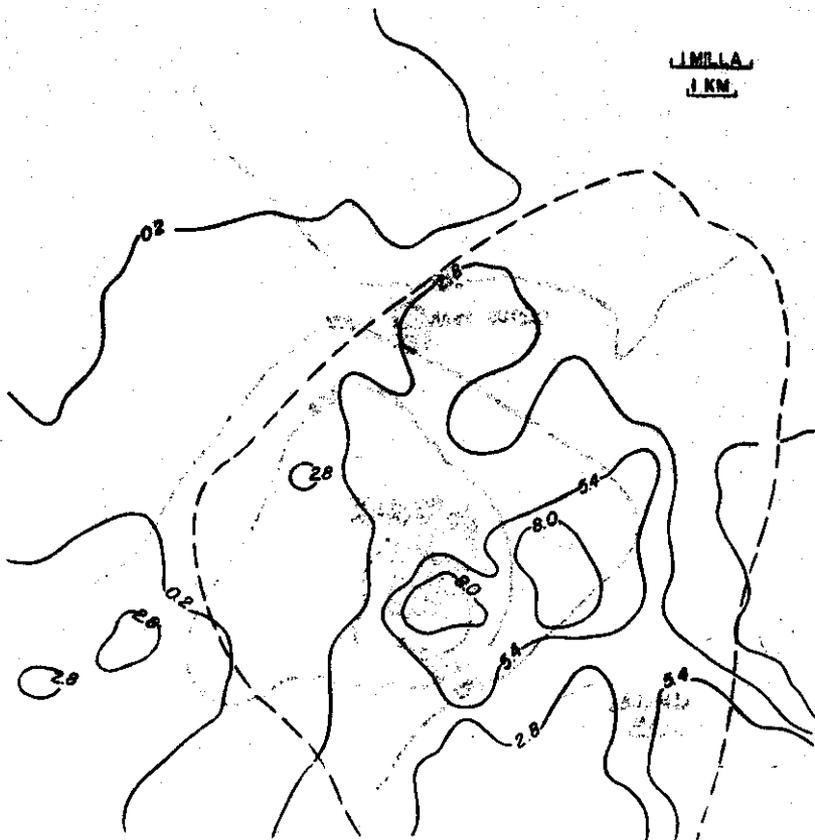


Figura 3. Mapa de temperatura residual para el área de Coso, la temperatura en °C, (LeSchack y Lewis, 1980).

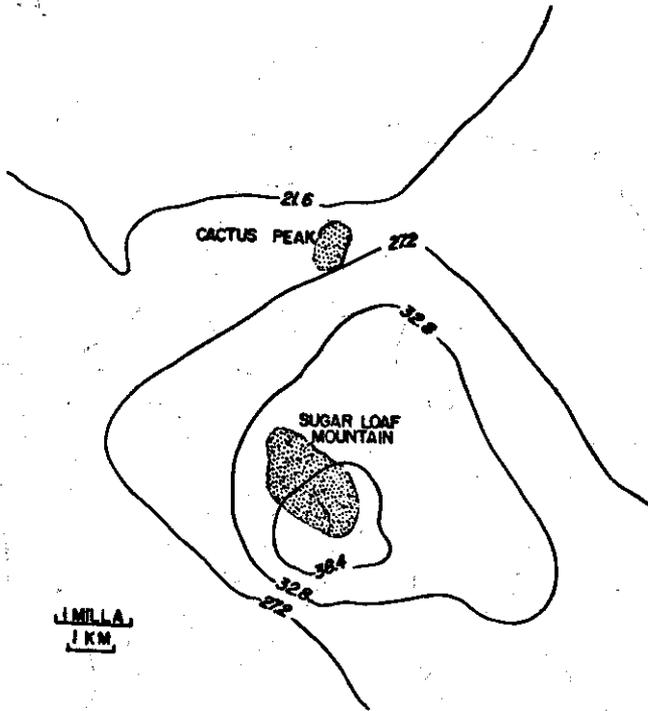


Figura 4. Isotermas a 30m. de profundidad para el área de Coso. Las temperaturas en °C, (LeSchack y Lewis, 1983).

En la figura 4 se muestra el mapa de isotermas obtenido mediante la medición de temperaturas a 30 m. de profundidad para la misma Zona de Coso; si se comparan las figuras 3 y 4 se observa la existencia de una gran similitud cualitativa entre las anomalías residuales de interés. Como consecuencia de lo anterior es posible establecer que esta técnica es conveniente dado su margen de seguridad y sobre todo su rapidez y economía. En general los pasos que se recomiendan a seguir en un levantamiento superficial de temperaturas son:

- a) Perforar en cada sitio elegido dos pozos adyacentes, ambos a 2 m. de profundidad.
- b) Insertar un termistor en uno y un medidor de conductividad en el otro, después leer el termistor una vez calibrado.
- c) Tomar muestras de suelo para su posterior análisis
- d) Medir la rugosidad superficial, el albedo y la conductividad térmica.
- e) Utilizando el programa de corrección para la onda anual introducir los datos meteorológicos correspondientes a los 18-24 meses previos a la fecha del cómputo, así como también la difusividad térmica, la rugosidad y el albedo; con estos datos la salida del programa será la temperatura normal para el sitio y a la fecha elegida.
- f) Substraer de las temperaturas medidas a 2 m. corregidas por elevación las temperaturas normales obtenidas mediante el programa; esto para obtener la anomalía geotérmica residual.

APLICACION DE ESTA TECNICA EN EL CAMPO GEOTERMICO LOS HUMEROS-DERRUMBADAS-DESARROLLO.

Como parte del programa de estudios geofísicos realizados por el Departamento de Exploración Geotérmica en el campo de Los Humeros, Pue. fue incluida una prospección termométrica a profundidad de 3,5 m., con el fin de realizar además de un registro detallado de las áreas con termalismo superficial tanto aparente como sutil, un muestreo de las temperaturas en cada una de ellas.

Suponiendo que el suelo pumicítico de Los Humeros tiene un valor de $k = 3,5 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{seg}$, es posible estimar la importancia que pueden tener los efectos climáticos superficiales a cualquier profundidad.

Como ω para el ciclo diurno está dado por:

$$d = 2\pi / (86.4 \times 10^3) \text{ seg.}^{-1}$$

y para el ciclo anual por:

$$a = 2\pi / (3.1536 \times 10^7) \text{ seg.}^{-1}$$

Los factores de amortiguamiento respectivos son:

$$fd = e^{-x} (10.19) \dots \dots \dots (1)$$

y

$$fa = e^{-x} (0.53) \dots \dots \dots (2)$$

Si se supone que la amplitud superficial de ambos ciclos de 10°C y se considera tolerable un error de 2°C en las medidas de temperatura, las profundidades mínimas que deben alcanzarse para que los efectos climáticos queden comprendidos dentro de este margen de error, pueden calcularse a partir de las ecuaciones:

$$10 e^{-x} (10.19) = 2 \text{ (ciclo diurno)}$$

$$10 e^{-x} (0.53) = 2 \text{ (ciclo anual)}$$

y despejando x se obtiene $x_d = 0.16 \text{ m.}$ y $x_a = 3.04 \text{ m.}$

Para calcular la amplitud de las oscilaciones climáticas a 3.5 y 2.5 m., basta substituir los valores correspondientes en las mismas ecuaciones; de donde se obtiene:

$$A_{3.5} = 3.24 \times 10^{-15^\circ\text{C}} \quad \text{Para el ciclo diurno (despreciable).}$$

$$A_{3.5} = 1.6^\circ\text{C} \quad \text{Para el ciclo anual}$$

$$A_{2.5} = 2.66^\circ\text{C} \quad \text{Para el ciclo anual}$$

Si se desea calcular el error máximo que se puede producir al calcular el gradiente entre las medidas no corregidas de temperatura a 3.5 y 2.5 m., debe tenerse en cuenta el corrimiento de fase de la oscilación térmica (E_x) entre ambas profundidades. Esta puede calcularse con la ecuación:

$$E_x = x \sqrt{\omega/2k} \dots \dots \dots (3)$$

Tabla I. PRODUCCION DE CALOR EN DIVERSOS TIPOS DE ROCAS

ROCA	Concentración partes por millón			Producción total de calor	
	URANIO	POTASIO	TORIO	K/U.	$\times 10^{-8}$ cal/gr-año
Granito ^a	4.75	37.9	18.5	8.0×10^3	810
Intermedia ^b	2.0	18.0		9.0×10^3	340
Basalto ^a	0.6	8.4	2.7	1.4×10^4	119
Eclogita ^{c, d, e,}					
Bajo contenido de Uranio	0.048	360.00	0.18	7.4×10^3	8.1
alto contenido de Uranio	0.25	2.6	0.45	1.0×10^4	34.0
peridotita ^c	0.016	12.0		7.5×10^3	0.91
Dunita ^c	0.001	10.0		1.0×10^4	0.19
Condrita ^f	0.012	845.0	0.04	2.0×10^4	3.94

a Heier and Rogers (1963)

b Evans and Goodman (1941)

c Tilton and Reed (1963)

d Heier (1963)

e Lovering and Morgan (1963)

f Wasserburg et al. (1964).

$$\Delta E_x = E_{2.5} - E_{3.5} = 0.53 \text{ rad.}$$

Maximizando la diferencia entre la ecuación de las oscilaciones a las profundidades respectivas, cuando entre ellas existe una diferencia de fase de 0.53 rad, se encuentra que el máximo error que se puede producir es de 1.5°C.

Suponiendo que la descalibración de los termistores provoca un error individual de 1°C, el gradiente calculado entre las temperaturas medidas por dos de ellos tienen un error máximo de 2°C, superior al producido por el ciclo climático anual, por lo que su corrección no mejoraría los resultados del estudio (García Estrada, 1983).

DEDUCCIONES GEOFISICAS MEDIANTE LAS OBSERVACIONES DEL FLUJO TERMICO.

Indiscutiblemente cualquier teoría que trate de explicar el origen y evolución de nuestro planeta debe tomar en cuenta los procesos y fenómenos que implican la existencia del calor como una fuente de energía básica. Desde un punto de vista termodinámico, el calor rige el comportamiento del interior de la tierra y este comportamiento determina la evolución de la corteza terrestre.

El principal problema que se plantea es poder deducir la estructura interna de la tierra a partir de los valores del flujo térmico superficial; para lograr un ajuste lo más cercano posible, se han ideado modelos que implican la existencia de condiciones iniciales y parámetros físicos que justifiquen los valores obtenidos para el flujo térmico superficial.

Interpretación del flujo térmico continental-oceánico.

Se ha encontrado que la cantidad de calor producido por las rocas continentales difiere notablemente del producido por las rocas oceánicas. Supóngase que los valores para las rocas de composición intermedia enlistados en la Tabla I representan la producción de calor en la corteza continental siendo esta cantidad igual a 1.1 u.f.c. Dado que el flujo térmico continental es aproximadamente igual a 1.6 u.f.c., se tendrá que el flujo proveniente de una profundidad de 30-40 Km estará comprendido entre 0.2 y 0.9 u.f.c., respectivamente. En el océano el material comprendido entre 35 Km de profundidad produce calor para un rango de 0.07-0.12 u.f.c., lo que prueba que el material que conforma el fondo oceánico es el basalto. Los sedimentos presentan una radiactividad perteneciente a rocas de composición intermedia y el material bajo la corteza es eclogita o bien peridotita.

Si se considera un flujo de 1.5 u.f.c. en las regiones oceánicas - deberá fluir entonces del interior de la tierra hacia esta región un va - lor de 1.4 u.f.c. La diferencia en flujo térmico entre el continente y el océano a una profundidad de 35 Km está comprendida entre 0.41 y - 1.2 u.f.c.. (Mc Donald, 1963 y 1964). Los resultados anteriores mues - tran con toda claridad que los valores medios del flujo térmico para con - tinentes y fondos oceánicos son prácticamente idénticos. Esto es el re - sultado individual más importante que se desprende de todos los estudios sobre el flujo térmico efectuados hasta el presente; no obstante, dicho - resultado es una extraordinaria y total sorpresa. Durante bastante tiem - po se creyó que el calor que ahora alcanza la superficie terrestre tenía - como causa principal la presencia de elementos radiactivos en la corte - za terrestre. Ahora bien, teniendo en cuenta que la corteza continental tiene un espesor medio de 35 km y la oceánica solo tiene por término - medio alrededor de 5 Km, cabría esperar que el flujo térmico en los con - tinentes fuera mucho más elevado que en los fondos oceánicos.

La práctica identidad entre ambos flujos térmicos nos hace pensar que la mayor parte del calor oceánico tiene su origen debajo de la cor - teza es decir, en las capas superiores del manto. Pero dicha suposición plantea a su vez la existencia de notables diferencias entre las capas su - periores del manto que subyacen a océanos y continentes. En resumen, la igualdad entre los flujos térmicos continental y oceánico parece tener importantes implicaciones para la temperatura y el comportamiento ge - neral de las capas del manto terrestre.

Tectónica global.

La teoría general simplificada de la extensión de los fondos oceáni - cos contempla un proceso que permite afloramientos de materiales del manto a lo largo de los ejes de los relieves oceánicos, estos materiales conforman una nueva litósfera y se esparcen por las laderas de los mis - mos hasta alcanzar depresiones y fosas. Así, en el marco de este es - quema general, dicho proceso implica la existencia de un valor del flujo térmico superior al medio en las zonas activas de los ejes por las que fluye el magma con un flujo térmico inferior al medio de las fosas don - de se depositan los materiales más fríos de la litósfera, y un flujo térmico alrededor del medio, o flujo térmico normal en las cuencas oceá - nicas o zonas en las que tiene lugar el proceso de extensión lateral. El valor medio para las cuencas oceánicas es algo inferior al obtenido para el globo terráqueo en general, mientras que el de los relieves es más elevado y el de las fosas mucho menor. Por otro lado es difícil - asegurar si tales diferencias son realmente significativas, ya que las desviaciones estandar son muy amplias y las observaciones del flujo térmico no están distribuidas uniformemente sobre la superficie de - nuestro planeta y se ignora si factores tales como la topografía, el es

pesor de los sedimentos o la circulación de corrientes de agua en su interior pueden haber introducido errores sistemáticos apreciables. Sobre lo que no hay duda alguna es que en una estrecha zona que se extiende unos centenares de Km a lo largo de cada eje de cordillera, el flujo térmico posee valores mucho más altos que el promedio, situación que se repite, pero en este caso con disminuciones en los valores observados para el caso de las fosas oceánicas. Con esto parece probarse la correspondencia entre los valores variantes del flujo térmico y el proceso de expansión de los fondos oceánicos (Smith, 1973).

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

1. - Como uno de los objetivos de este trabajo es el de contribuir al desarrollo y difusión de nuevas metodologías de exploración geotérmica y tomando en cuenta que aquí se ha tratado una recientemente desarrollada como lo es la de los levantamientos superficiales de temperatura, se ha creído conveniente hacer referencia acerca de los avances logrados en este campo por la Comisión Federal de Electricidad en la exploración de la región geotérmica de los Humeros, Pue.

- a) Esta metodología solo es útil en zonas cubiertas por material homogéneo y poco compacto en las que pueda emplearse sin problemas de perforación.
- b) Los estudios en áreas conductivas solo son confiables si se realizan las correcciones térmicas por efectos climáticos anuales. Para efectuarlas es necesario disponer de equipo para registro automático de temperaturas, que instalado en una estación base proporcione información sobre el ciclo anual.
- c) Para la realización de un estudio de termometría somera en áreas de transferencia conductiva deben observarse las siguientes recomendaciones:
 - Realización del levantamiento en época de sequía.
 - Establecimiento de cuando menos una estación base para registro de los ciclos climáticos.
 - Determinación de la conductividad térmica.
 - Efectuar medidas meteorológicas sistemáticas.
- d) Un estudio de flujo térmico superficial solo es recomendable en zonas de comprobado interés geotérmico.

2. - En lo que al desarrollo de la geotermia en nuestro país se refiere, es necesario impulsar los estudios tanto en el aspecto teórico como en el aplicado, puesto que las estructuras académicas que conforman la realidad en la formación de geocientíficos no contempla la

preparación adecuada de los alumnos en las técnicas orientadas hacia la exploración geotérmica y sobre todo hacia el entendimiento del interior del planeta, por lo que se recomienda a los encargados de las instituciones de educación superior en Ciencias de la Tierra que reactiven y estimulen estos estudios en beneficio de las fuentes alternas de energía.

LITERATURA CITADA

CARSLAW, H.S., AND J.C. JAEGER, 1959: Conduction of Heat in solids, second edition, Oxford University Press.

CASTILLO, G.L. (DEL), 1977a: Implicación Eje Volcánico, Placa de Cocos. Placa del Caribe, Mem. V Congreso Venezolano de Geología, Tomo II, pp 36-38.

CASTILLO, G.L. (DEL) 1977b: Geodynamic Evolution of Cocos-Caribbean Plates in the Eastern Mexican Boundary: 8th Caribbean Geological Conference, pp 835-844.

CASTILLO, G.L. (DEL), 1977c: Contribución de la Geodinámica al conocimiento de la tectónica del subsuelo y del fondo marino: Mem. III Congreso Nacional de la Academia Nacional de Ingeniería A.C., pp. 56-61.

CASTILLO, G.L. (DEL), 1977 d: Departamento de exploración, Informe para el IPGH (1973-1977), Sección Nacional de México a la XI Asamblea General y Reunión de Consulta. Anales Inst. Geof. UNAM, pp. 26-31.

CASTILLO, G.L. (DEL), 1978: Mexican National Report on Geodynamics; Geodynamics International, No. 13 y Anales del Inst. Geof. UNAM, V 22, pp. 147-152.

CASTILLO, G.L. (DEL), y DOMINGUEZ, G.A., 1977: Teoría de la Información en potenciales gravimétricos y magnetométrico del campo Geotérmico de Mexicali. B.C. México, Soc. Geol. Mex. V 38, No. 2, pp. 18-31.

CASTILLO, G.L. (DEL) ET AL. 1983: Geodynamics of the Eastern Region Caribbean and Scotia Arcs, Geodynamics Book Series No. 9, Am. Geoph. unión, 176 p.

DE ANDA, L.F., 1957: El campo de energía geotérmica de Pathé, Estado de Hidalgo, México. 20th. Intern. Geol. Congr. México, sección 1, tomo 2. Vulcanología del Cenozoico, pp 257-283.

DE ANDA, L.F., J.I. SEPTIEN, AND J.R. ELIZONDO, 1961: Geothermal energy in Mexico, U.N. Conf. on new sources of energy, Romer, paper G77, pp 25.

GARCIA-DURAN, SALVADOR, 1968: Informe sobre las mediciones de flujo térmico efectuadas en Los Humeros, Puebla, México, D.F. Comisión Federal de Electricidad, Informe Inédito.

GARCIA-ESTRADA, HECTOR, 1983: Estudio Termométrico a 3.5 m de profundidad en la zona geotérmica de Los Humeros, Puebla, México, D.F. Comisión Federal de Electricidad, Informe Inédito.

LESCHACK, L.A. AND J.E. LEWIS, 1983: Geothermal prospecting with shallow temp. surveys: Geophysics, V. 48, No. 7, pp 975-996.

MC DONALD, G.J. 1963: The deep structure of continents: Rev. Geophys. V. 1, pp 587-665.

MC DONALD, G.J. 1964: The deep structure of continents: Science, 143, pp 921-929.

MC DONALD, G.J.F. 1965: Geophysical deductions of terrestrial heat flow: Terrestrial heat flow, A.G.U. pp 191-210

PALACIOS-HARWEG, L.H. Y GARCIA VELAZQUEZ, H., 1981: Informe geofísico del proyecto geotérmico Los Humeros-Derrumbadas, estados de Puebla y Veracruz: México, D.F. C.F.E.

SMITH, J.P. 1973: Topics in Geophysics, The open University Press, London, 281 p.

YAÑEZ-GARCIA, C., Y GARCIA-DURAN, S., 1982: Exploración de la región geotérmica Los Humeros-Derrumbadas, estados de Puebla y Veracruz: México, D.F. C.F.E.