

# Fuente de calor en el campo geotérmico de Cerro Prieto y su relación con la anomalía magnética Nuevo León, México

Ana Luz Quintanilla M.<sup>1</sup> y Francisco Suárez V.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Instituto de Investigaciones Oceanológicas, Universidad Autónoma de Baja California, Ensenada, Baja California, México.

<sup>2</sup> CICESE, División Ciencias de la Tierra, Ensenada, Baja California, México.

Recibido: 30 de marzo, 1992; aceptado: 17 de marzo, 1994.

## RESUMEN

El sistema geotérmico de Cerro Prieto ubicado dentro de la provincia de la Depresión del Salton es uno de los sistemas hidrotermales activos localizados en la parte norte, dentro de la zona de transición en la frontera de placas marcada por el sistema de Falla San Andrés-Dorsal del Pacífico Este. Diversos modelos se han desarrollado mediante los cuales se pretende explicar los procesos tectónicos responsables del desarrollo del ambiente geotérmico en el área de Cerro Prieto. Dentro de estos modelos está el propuesto por Goldstein *et al.*, (1984), quienes empleando datos magnéticos y algunos resultados de análisis petrográficos, proponen que la llamada anomalía magnética Nuevo León sea generada por un cuerpo prismático de composición gabroica-peridotítica localizado a 3.8 km de profundidad. Utilizando información magnética e incorporando nuevos resultados petrológicos obtenidos de muestras de roca recuperadas durante la perforación de pozos recientes, se propone un modelo que modifica el de Goldstein *et al.* (1984). Como resultado del presente estudio se propone que la anomalía magnética Nuevo León podría ser generada por dos cuerpos cuyas dimensiones y profundidades son diferentes. El más somero de éstos tiene su cima localizada a 4.5 km de profundidad y su base está a 7 km. Este está ligeramente inclinado hacia el norte. En el segundo cuerpo la cima está localizada a 5 km y su base a 8 km. Ambos cuerpos son de composición gabroica. Considerando lo anterior, así como el gradiente térmico calculado, se obtiene que la zona de fusión se localiza a 11 km de profundidad y no a los 7-7.5 km. La presencia de los cuerpos plutónicos a profundidad son considerados como parte de la fuente térmica en el área.

**PALABRAS CLAVE:** Centro de dispersión, anomalía magnética, Cerro Prieto, geotermia, fuente de calor.

## ABSTRACT

The Cerro Prieto geothermal system located within the Salton Trough province is one of the northernmost of a series of active hydrothermal systems found along the East Pacific Rise-San Andreas Fault zone plate boundary transition. Several models have been developed in an attempt to understand the tectonic process which creates the geothermal environment in the area. Among such models is the one of Goldstein *et al.*, (1984) which used the magnetic data and some petrographic analysis available. They proposed that the so called Nuevo León magnetic anomaly is produced by a prismatic body located at 3.8 km of depth which is constituted by gabbros and peridotites. Using the magnetic data and combining with the new petrological results from rock samples collected in recent boreholes from the field, and based upon the calculated thermal gradient, we have modified the Goldstein *et al.* (1984) model. The Nuevo Leon magnetic anomaly is produced not by one body but by two located at different depths and with different dimensions. In the shallower one, the top is located at 4.5 km and its base at 7 km deep, this is slightly tilted to the north. In the second body, the upper part is at 5 km deep and the base at 8 km. Both of them are gabbros in composition. Considering the results obtained and based upon the thermal gradient, the mixing zone is located at 11 km depth and the mafic plutonic bodies are considered part of the thermal source in the area.

**KEY WORDS:** Spreading center, magnetic anomaly, Cerro Prieto, heat source, geothermics.

## INTRODUCCION

A través de estudios geofísicos, ha sido posible establecer la existencia de centros de acreción de corteza a lo largo del Golfo de California, los cuales se manifiestan morfológicamente como cuencas oceánicas con variaciones en profundidad de unos cuantos cientos de metros hasta casi 4000 m. Dichos centros se caracterizan por la presencia de zonas con alto flujo de calor y enjambres sísmicos. Este proceso es generador de rupturas en la corteza continental, así como generación de nuevo material ígneo intruyendo y/o causando remezclas en la corteza continental (Lomnitz *et al.*, 1970; Elders *et al.*, 1972; Von Herzen, 1963; Lee y Cohen, 1979; Lawver y Sclater, 1973; Lawver y Williams, 1979). Procesos similares se han detectado en zonas de transición de condiciones netamente oceánicas a continentales, siendo un ejemplo de este proceso el campo geotérmico de Cerro Prieto, el cual se encuentra situado en el Valle de Mexicali, dentro de una zona considerada como la frontera entre las placas Norteamérica y Pacífica, la cual se

extiende desde el norte de San Francisco, California (EUA) hasta la boca del Golfo de California, estando caracterizada en la zona continental por la presencia de un sistema de fallas predominantemente de rumbo. El movimiento relativo entre las placas Pacífico-Norteamérica es de tipo transforme dándose a través del sistema San Andrés-Golfo. Asociadas a este sistema y como subsidiarias están las fallas Imperial y Cerro Prieto localizadas en el Valle Imperial-Mexicali, las cuales marcan el límite este y oeste de un centro de dispersión en el continente (Lomnitz *et al.*, 1970; Elders *et al.*, 1984; Quintanilla-Montoya, 1990) (Figura 1).

Como resultado de los diversos estudios geofísicos que se han llevado a cabo en la zona geotérmica de Cerro Prieto y específicamente los levantamientos magnéticos, se cartografió una anomalía magnética dipolar casi simétrica, con una amplitud relativa de 300 gamas, situada a 2 km al sur del Ejido Nuevo León y a 5 km de la Planta Cerro Prieto I (Figura 2). Dicha anomalía ha llamado la atención en los últimos años debido a su proximidad con el campo geo-

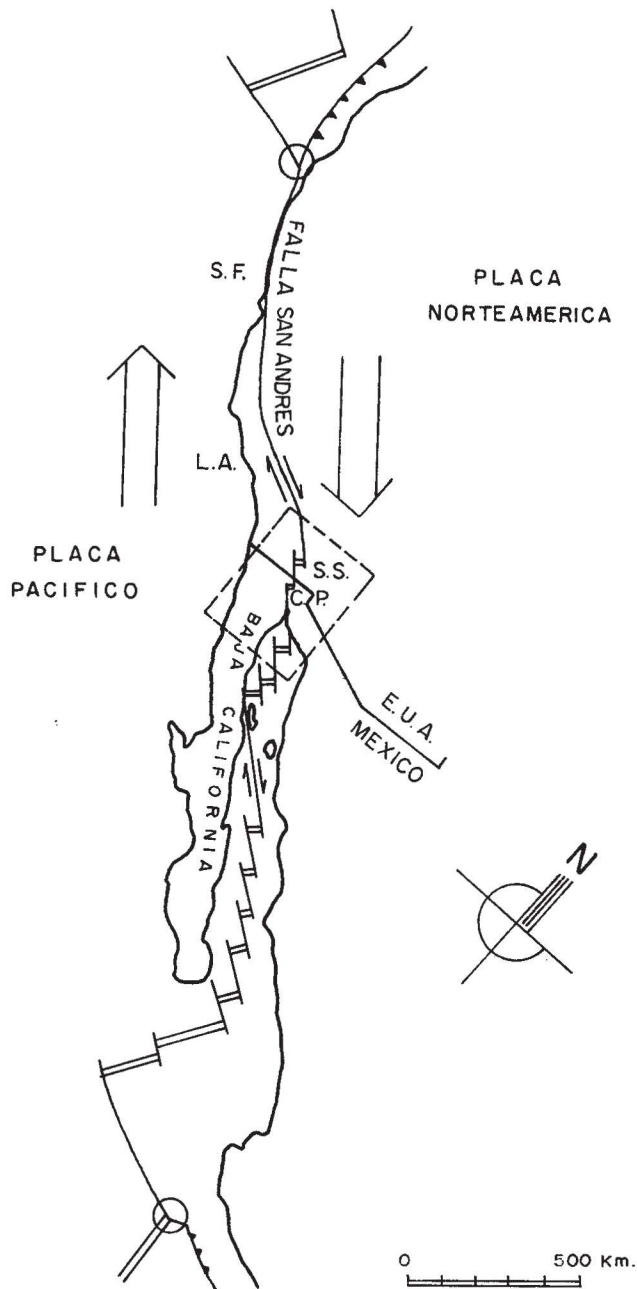


Fig. 1. Marco tectónico de la frontera entre placas Norteamérica-Pacífico, L.A. Los Angeles, S.S. Salton Sea, C.P. Cerro Prieto. Modificado de Lachenbruch (1985).

térmico (Fonseca y Razo, 1979; Lyons y Van de Kamp, 1980), y ha sido relacionada con la fuente de calor en el campo (Goldstein *et al.*, 1984; Quintanilla-Montoya, 1990). La perforación de los pozos M205 y GV2, cuya profundidad varía entre 3 y 4.5 km sobre el alto magnético, intersecta aparentemente un complejo de diques o sills cuya composición varía desde rocas generadas en ambientes tectónicos oceánicos (diabasas) hasta rocas de origen continental (dacitas) (Quintanilla-Montoya, 1990).

Como resultado de un estudio petrológico de subsuelo en el campo geotérmico de Cerro Prieto y de la remodela-

ción de la anomalía magnética Nuevo León basado en los resultados obtenidos tanto en el análisis petrológico de rocas máficas cortadas por los pozos anteriormente mencionados, así como de estudios geofísicos recientes (Frez y González, 1989a; Frez y González, 1991; CFE, 1987), se confirmó que Cerro Prieto es, al igual que otros centros geotérmicos en el área (Depresión del Salton, California, EUA), un centro de dispersión. Elders *et al.* (1984) y Goldstein *et al.* (1984) notaron que la anomalía magnética Nuevo León es probablemente causada por un conjunto de rocas máficas, tal como se encuentran en los centros de dispersión oceánicos, y es muy probable que esté relacionada con la fuente de calor del campo geotérmico.

El presente estudio tiene como objetivo proponer un modelo tectónico del campo geotérmico que modifica el modelo propuesto por Goldstein *et al.* (1984) con base en los resultados de estudios geológicos de subsuelo realizados en pozos de reciente perforación, cercanos a la anomalía magnética Nuevo León.

### ANOMALIA MAGNETICA NUEVO LEON

Fonseca *et al.* (1981) proponen la existencia de dos grupos de anomalías magnéticas en el campo geotérmico de Cerro Prieto. El primero representa anomalías producidas por movimientos tectogénicos de las rocas que constituyen el basamento. Un segundo grupo de anomalías se debe a un cambio en la susceptibilidad magnética debido a metamorfismo, intrusiones o depositación de materiales de alta susceptibilidad.

En el mapa de anomalías magnéticas del Valle de Mexicali (Figura 2) se puede observar que el primer grupo de anomalías, se presenta en la porción noroeste del área estudiada, entre la Sierra Cucapá (ubicada O-NO del campo) y las fallas Cerro Prieto y Michoacán. Estas anomalías presentan gran similitud con las de gravedad y se han interpretado como la respuesta magnética del basamento (Goldstein *et al.*, 1984).

El segundo grupo de anomalías magnéticas de acuerdo con Fonseca *et al.* (1981) es el más importante, puesto que puede representar zonas con metamorfismo local asociadas con la actividad geotérmica. Por ejemplo, al noroeste del pozo Prian (Figura 3) existe un mínimo magnético asociado con un máximo gravimétrico denominado horst Imperial; y al sureste del pozo Nuevo León 1, un máximo magnético se asocia con un mínimo gravimétrico. Este tipo de diferencias entre las anomalías magnéticas y gravimétricas se ha interpretado como producto de zonas que han sufrido metamorfismo, o bien, patrones de alteración hidrotermal en su mineralogía primaria. En Nueva Zelanda, algunos mínimos magnéticos han sido causados por el reemplazamiento de magnetita por pirita (Heartherton, 1965 en Fonseca *et al.*, 1981).

Con base en los cortes recobrados durante la perforación de los pozos Nuevo León 1 (NL-1) y Prian, Goldstein *et al.* (1984) elaboraron un modelo de la fuente magnética y térmica. Para el modelado utilizan un prisma vertical en

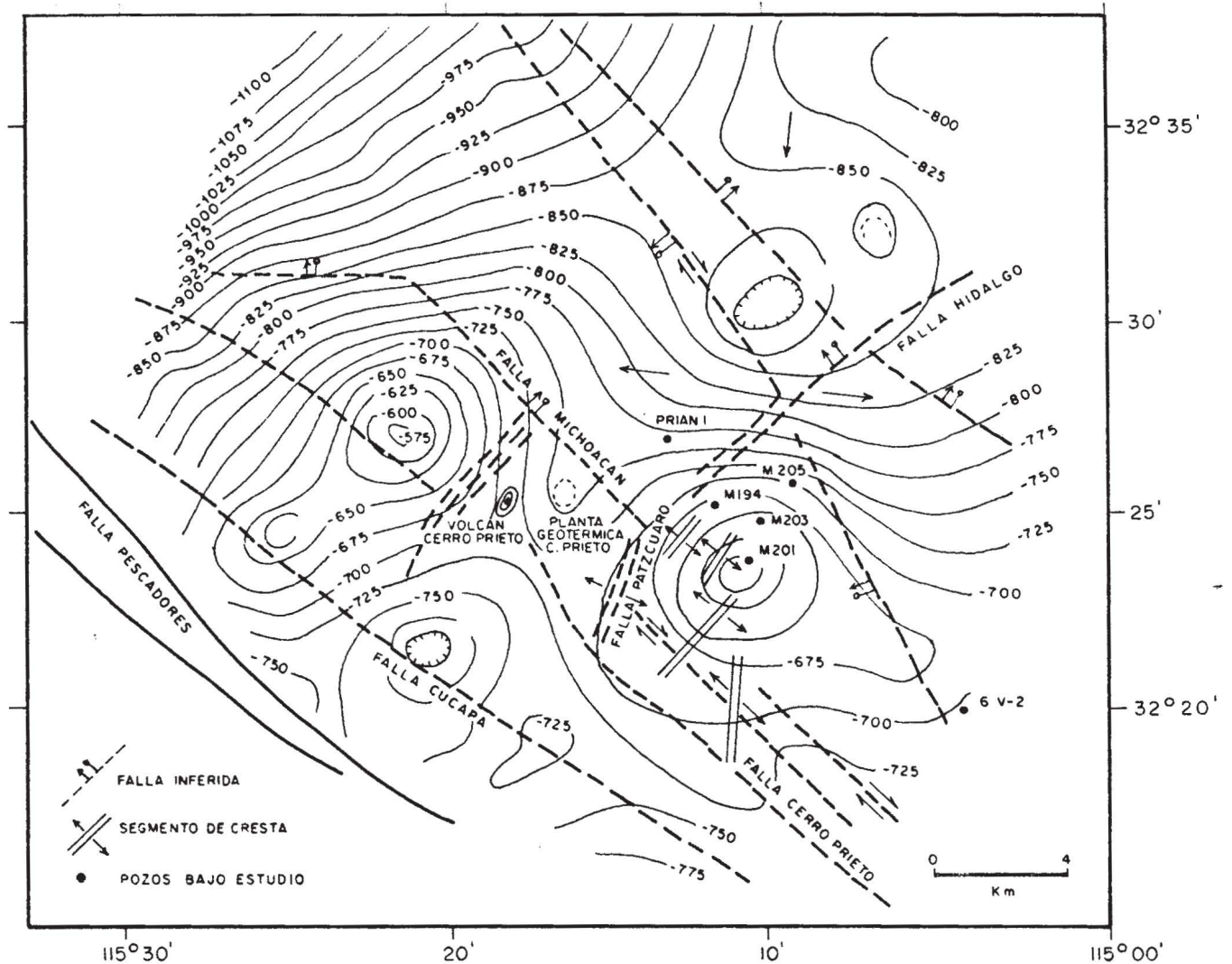


Fig. 2. Plano integrado de anomalías magnéticas y microtectónica. Modificado de Reyes (1979).

combinación con una estructura bidimensional. La comparación entre los campos observados y los calculados por Goldstein *et al.*, (1984) puede observarse en la Figura 3. Debido a que el máximo y mínimo positivo de la anomalía son casi iguales, el modelaje de un prisma por sí solo no concuerda con los datos observados para la inclinación del campo actual; por tanto, suponen que una porción de la anomalía, en particular el bajo magnético, se debe a una caída del basamento magnético a profundidad.

La Figura 3 muestra que la anomalía observada concuerda bien con la producida por una fuente magnética de forma prismática, cuya aparente susceptibilidad magnética es ( $k_A$ ) de  $5,300 \times 10^{-6}$  cgs, dentro de un basamento menos magnético ( $k_A = 2,100 \times 10^{-6}$  cgs). Ambas litologías subyacen a un grueso espesor de sedimentos no magnéticos. La fuente magnética, de acuerdo con Goldstein *et al.* (1984) es un bloque tabular de  $4 \times 6$  km en área, ubicando su cima a 3.7 km de profundidad, con 2.3 km de espesor y con un echado ligeramente hacia el Norte. El basamento

magnético estaría formado por una granodiorita similar en composición al de la Sierra Cucapá, la cual parece ser considerablemente más somera (3.8 km) al sur de la fuente magnética principal (Figura 4).

El modelo propuesto por los autores citados está basado en gran parte en el análisis de las rocas colectadas en la perforación de los pozos profundos NL-1 (3351 m), H-2 (3540 m), M-189 (2530 m), M-366 (2850) (Figura 3). En la Figura 4 se muestra una superficie de 400-500 m de espesor (sobre la cima del cuerpo magnético), la cual suponen como la zona de diques o sills. Los autores descartan la posibilidad de que estas rocas sean las que originen la anomalía magnética debido a que las muestras analizadas por el método de microsonda dieron como resultado una titanomagnetita con un alto porcentaje ( $x = 0.65 \pm 0.02$ ) de ulvoespinela ( $Fe_2TiO_4$ ) (Nagata, 1961; Irving, 1964 en Goldstein *et al.*, 1984). La composición resultante es un mineral con baja temperatura de Curie ( $145^\circ C$  promedio); por tanto estas rocas se consideran no magnéticas bajo

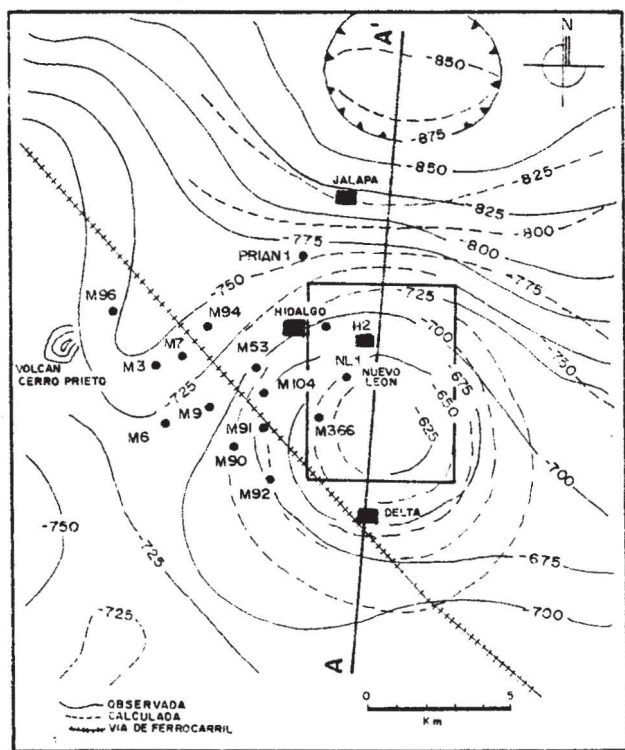


Fig. 3. Anomalia magnética Nuevo León y su relación con los pozos analizados por Goldstein y otros (1984). El rectángulo es la proyección aproximada en superficie del cuerpo magnético a profundidad. (•) pozos, (■) poblados. La planta Cerro Prieto I se ubica al SO de la vía de ferrocarril, entre los pozos M-9 y M-194. Unidades de las isolíneas en gamas. Tomado de Goldstein y otros (1984).

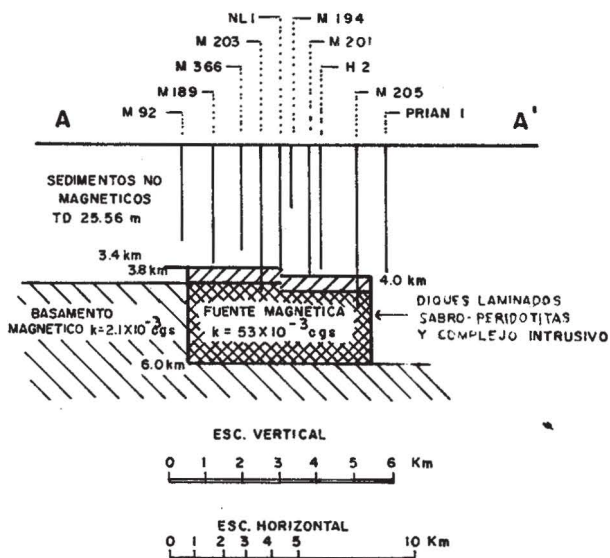


Fig. 4. Relación de la anomalía magnética Nuevo León con modelo geológico de subsuelo propuesto para el área de Cerro Prieto, a lo largo de la línea A-A' mostrada en la Figura 3. (Modificación de Goldstein y otros, 1984).

condiciones *in situ*. Johnson y Hall (1977) reportaron que la titanomagnetita es el mineral dominante magnético de los basaltos tholeiíticos oceánicos.

Si la mineralogía de las rocas que constituyen los diques no es la causante de la anomalía, la fuente magnética deberá encontrarse a una mayor profundidad siendo constituida por cuerpos plutónicos de gabro-peridotitas ricas en magnetita (con una temperatura de Curie mayor de 350°C). Este conjunto de rocas ígneas habría sido emplazado a una profundidad somera, probablemente como resultado de la extensión y adelgazamiento que ha sufrido la corteza continental debido a la tectónica extensional que generó las fallas Imperial-Cerro Prieto. La base de este cuerpo magnético estaría a unos 6 km de profundidad y se propone que esté muy cerca de la isoterma de Curie (575°C) para la magnetita, el principal mineral ferromagnético presente en las rocas peridotítico-gabroicas. El modelo de Goldstein *et al.* (1984) propone también que como la temperatura del "solidus" para rocas tipo gabro es alrededor de 900°C, se esperaría encontrar la zona de fusión alrededor de unos 10 a 12 kms de profundidad, con base en la extrapolación lineal del gradiente térmico (87°C/km). Lo anterior coincide con la zona de actividad sísmica tipo enjambre propuesta por Frez y González (1989).

Con el objeto de seguir una metodología similar a la de Goldstein *et al.* (1984) se realizó un análisis petrográfico y químico de las muestras de roca recuperadas durante la perforación de nuevos pozos.

- a) Se seleccionaron las muestras de canal (recorte) con menos rasgos de alteración, y se elaboraron láminas delgadas para su análisis petrográfico. Se analizaron aproximadamente 450 secciones de rocas para determinar su mineralogía y rasgos texturales.
- b) Se analizaron cuatro muestras de roca pertenecientes a los pozos GV-2 y M-203 por el método de difracción de rayos X, con el fin de identificar minerales arcillosos de origen secundario imposibles de identificar por medio del análisis petrográfico.
- c) Para el análisis químico, se seleccionaron muestras de cortes litológicos que fueron enviados al laboratorio del Instituto de la Universidad de Utah para análisis de roca total (Tabla 1).
- d) La actualización del modelo propuesto por Goldstein *et al.* (1984) se realizó con base en la anomalía magnética, siguiendo una técnica tridimensional (Bhattacharya, 1964).

Se utilizó información química y petrográfica de las rocas obtenidas durante la perforación de los pozos M-194, M-201, M-203, M-205 y GV-2.

## RESULTADOS Y DISCUSION

El modelo de Goldstein *et al.* (1984) propone que a los 3.8 km de profundidad se encuentra la cima de un cuerpo o fuente magnética (gabro-peridotita). Sin embargo, en los pozos M-203 y M-205 con profundidades de 4000 y 4394 m respectivamente, las rocas volcánicas que constituyen los diques o sills se han encontrado hasta los 4.2 km de

Tabla 1

Análisis químicos de las rocas volcánicas de Cerro Prieto

Pozo y Profundidad	M-194 2553 m	M-203 3327	M-203 3336	M-203 3351	M-203 3354	M-203 3921	M-203 3927	M-203 3930	M-203 3942	M-203 3957	M-203 3969	M-205 1795	M-205 2360	M-205 2382	M-205 2754	GV2 3020	
Oxidos mayores (% en peso)	SiO <sub>2</sub>	59.63	50.10	51.60	54.40	50.59	64.40	64.20	64.60	64.93	65.50	64.50	58.30	58.90	58.40	57.40	47.80
	TiO <sub>2</sub>	1.79	2.11	2.08	2.02	2.29	0.773	0.771	0.778	0.780	0.745	0.834	1.79	1.76	1.74	1.79	1.14
	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	14.49	14.76	14.58	13.16	13.97	15.60	15.87	15.84	15.63	15.38	15.38	15.25	14.95	14.89	15.20	17.24
	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2.50	10.35	4.49	3.42	4.61	2.61	2.57	2.88	2.44	2.26	2.55	4.44	3.89	3.53	4.41	4.47
	FeO	5.60	---	5.05	6.15	6.38	3.79	3.96	3.59	3.97	3.74	3.58	5.03	5.52	5.75	4.99	5.19
	MgO	2.24	5.48	5.48	5.33	5.48	0.988	0.996	0.985	1.02	0.962	1.33	2.36	2.32	2.36	2.38	7.77
	CaO	6.08	8.78	8.43	8.41	8.98	4.55	4.59	4.56	4.52	4.31	4.74	5.68	5.55	5.54	5.68	9.58
	Na <sub>2</sub> O	2.63	2.79	2.82	2.56	2.68	4.45	4.47	4.54	4.60	4.64	4.43	4.65	4.72	4.71	4.68	2.95
	K <sub>2</sub> O	3.40	0.939	0.920	0.572	0.686	1.24	1.40	1.26	1.17	1.32	1.08	0.828	0.815	0.750	0.833	0.131
	MnO	0.133	0.180	0.173	0.178	0.197	0.088	0.084	0.084	0.095	0.080	0.099	0.170	0.167	0.166	0.163	0.156
	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.334	0.262	0.267	0.240	0.265	0.263	0.259	0.259	0.263	0.252	0.250	0.420	0.414	0.412	0.414	0.098
	B <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.121	0.013	0.015	0.034	0.013	0.079	0.058	0.060	0.053	0.056	0.051	0.051	0.045	0.048	0.053	0.156
		98.948	95.760	90.905	96.474	96.141	98.831	99.228	99.436	99.471	99.245	98.824	98.969	99.051	98.926	97.993	96.681
Elementos traza (p.p.m)	Sr	356	257	269	207	213	412	416	413	385	364	364	280	252	272	283	226
	Co	46	31	164	61	47	65	61	64	55	51	55	44	201	60	46	44
	Cr	8	130	141	115	103	< 2.0	< 2.0	14	11	12	9	< 2.0	43	33	5	257
	Cu	83	47	48	49	54	62	28	22	161	238	276	25	25	27	25	77
	Ni	10	58	60	47	46	< 5.0	11	12	7	11	6	5	9	8	8	139
	Pb	< 10	< 10	< 10	< 10	< 10	< 10	< 10	< 10	< 10	< 10	< 10	< 10	< 10	< 10	< 10	394
	Zr	239	158	163	157	176	341	336	318	316	326	286	289	298	290	294	159
	Zn	82	91	111	90	96	126	121	116	145	1467	255	126	387	230	126	82
	Sn	6	8	5	16	< 5.0	13	< 5.0	< 5.0	< 5.0	< 5.0	5.0	< 5.0	9	< 5.0	< 5.0	< 5.0
	Li	9	16	16	9	10	9	8	9	7	8	7	15	13	12	14	26
	Be	2.4	1.9	1.9	1.8	1.9	2.5	2.6	2.5	2.5	2.5	2.4	2.2	2.3	2.2	2.2	1.4
	La	48	26	26	25	26	39	39	40	39	38	37	32	34	33	33	18
	Ce	63	19	21	21	23	50	50	52	49	46	44	33	39	35	33	< 10.0

profundidad (pozo M-205). Por tanto, la fuente magnética se encuentra a una profundidad mayor.

Con base en la información de perfiles de temperatura proporcionada por la Comisión Federal de Electricidad (Coordinadora Ejecutiva de Cerro Prieto, información inédita) se calcularon los gradientes geotérmicos para tres de los pozos bajo estudio (GV-2, M-203 y M-194), resultando un gradiente lineal geotérmico de  $87^{\circ}\text{C}/\text{km}$ , lo cual hace suponer que para alcanzar la isoterma de Curie para la magnetita ( $575^{\circ}\text{C}$ ) se requiere una profundidad de aproximadamente 7-7.5 km. Mercado y Bermejo (1985) obtuvieron un gradiente de  $150^{\circ}\text{C}/\text{km}$ . Así, para alcanzar dicha isoterma, se requerirían aproximadamente 4 km, y se menciona que las intrusiones de lava se están dando a profundidades entre los 6 y 8 km. Sin embargo, los pozos M-203 y M-205 que no fueron incluidos para el cálculo de dicho gradiente alcanzaron más de 4 km en profundidad. Sólo el pozo M-201 entró en el cálculo hecho por los autores. Utilizando el gradiente geotérmico obtenido de los perfiles de temperatura de tres de los pozos bajo estudio, y tomando en cuenta la composición del tipo de magnetita encontrada (Goldstein *et al.* 1984), podría existir una inversión de la temperatura con la profundidad si la componente convectiva del flujo térmico fuera despreciable en y por debajo del yacimiento; pero según Mercado y Bermejo (1985) no es este el caso. De acuerdo con Hall (1987) la temperatura en la zona de fusión para rocas ígneas varía entre  $950^{\circ}\text{C}$  -  $1200^{\circ}\text{C}$ . En el área bajo estudio, esta temperatura se alcanzaría por extrapolación lineal del gradiente ( $87^{\circ}\text{C}$ ), a unos 11 km de profundidad. El rasgo más notable de la sismicidad en el Valle de Mexicali es una zona lenticular llamada "zona sísmica de Mexicali". Esta zona está acotada al norte por el temblor de Imperial (Mexicali) en 1979 ( $M_L=6.6$ ) y al sur por el temblor de Victoria en 1980 ( $M_L=6.1$ ) (González, 1986). La parte SE de la falla Imperial y la NO de la falla Cerro Prieto forman sus flancos este y oeste respectivamente. Esta actividad sísmica consiste de enjambres de sismos con una relativa ausencia de secuencias de tipo evento principal-réplicas. La sismicidad ocurre principalmente entre los 5 y 13 km de profundidad, y está asociada a posibles movimientos de fluidos magmáticos y geotérmicos, a través de enjambres de diques (Hill, 1977).

El tipo de litología encontrada en los pozos bajo estudio (Quintanilla, 1990) incluye cuatro grupos: basaltos, basalto-andesitas, andesitas y dacitas, de acuerdo con la clasificación de Cox *et al.* (1979) (Figura 5). Las rocas de composición basáltica fueron encontradas en los pozos M-203 y GV-2 y pertenecen al grupo de basaltos subalcalinos. Las rocas del pozo GV-2 (al SE del centro de dispersión) son de la variedad tholeítica, y las del pozo M-203 son basaltos transicionales al grupo andesitas. La composición química de estas rocas se ha visto modificada debido a fusión parcial con rocas de corteza continental durante su elevación o intrusión a profundidades más someras, por lo cual se consideran rocas "contaminadas". Las texturas muestran evidencias de un desequilibrio térmico-composicional durante su cristalización. En estas rocas también pudo observarse la presencia de alteración hidrotermal. Con base en el tipo de litologías definido en los diferentes pozos bajo estudio, y de acuerdo con las diferencias químicas

entre los Pozos GV-2, M-194, M-201, M-203 y M-205, nuestro modelo propone dos cuerpos magnéticos, cuya ubicación en planta puede ser observada en la Figura 6. El cuerpo principal tiene su cima aproximadamente 4.5 km de profundidad, y su base está localizada a los 7 km de profundidad, manteniendo el área propuesta por Goldstein *et al.* (1984) de  $4 \times 6$  km, con un espesor de 2.5 km. El cuerpo está inclinado ligeramente hacia el Norte simulando la caída del basamento producido probablemente por la componente vertical de desplazamiento de la falla Imperial.

El segundo cuerpo magnético se ubica al sureste del principal y tiene menor dimensión en área ( $2.5 \times 2.5$  km) (Figura 6). Ha sido ubicado ligeramente a mayor profundidad que el primero debido a que se encuentra en el límite inferior del centro de dispersión. Tiene el mismo espesor que el primero (2.5 km) y se ubicó en esa posición debido a que la litología del pozo GV-2 difiere del resto de los pozos. La diferencia radica básicamente en la composición química de las rocas. El pozo GV-2 presenta únicamente rocas basálticas (tholeitas), y en el resto de los pozos se tienen desde basaltos calco-alcalinos hasta rocas más continentales del tipo andesitas y dacitas.

La ubicación del segundo cuerpo explica la presencia del pequeño máximo localizado al sureste del alto magnético de la anomalía Nuevo León. (Figura 2).

La susceptibilidad magnética se adoptó de acuerdo con los valores propuestos por Telford *et al.* (1978), y algunos valores medidos directamente en el campo. Para el basamento magnético, cuya litología es la equivalente a las rocas graníticas que conforman la Sierra Cucapá, se adoptó  $k=200 \times 10^{-6}$  cgs, y para el gabro asociado a la fuente magnética fue inferido un valor de  $k = 6000 \times 10^{-6}$  cgs (esta litología no aflora). La contribución magnética de los sedimentos que sobreyacen a estas rocas ígneas se despreció.

De acuerdo con el transecto A - A' (Figura 7) se obtuvo una amplitud de  $250\gamma$ , la cual podría llegar a  $300\gamma$ , debido al mínimo que produce la caída del basamento al norte del centro de dispersión. Goldstein *et al.* (1984) mencionan que la anomalía magnética Nuevo León tiene una amplitud de aproximadamente  $300\gamma$  medida en superficie por personal de la CFE con un magnetómetro de campo total (Fonseca y Razo, 1979).

El modelo propuesto en este estudio concuerda con la idea propuesta por Goldstein *et al.* (1984) y Elders *et al.*, (1984), de que la fuente magnética es un conjunto de plutones del tipo gabros. Las rocas basálticas encontradas en los pozos bajo estudio, son sus equivalentes volcánicos; inclusive en el análisis petrográfico, algunas de las rocas mostraron texturas típicas de rocas plutónicas máficas (meso y acumuladas).

## CONCLUSIONES

Con base en el estudio petrográfico y químico de las rocas obtenidas de cinco pozos perforados en el campo geotérmico de Cerro Prieto, así como en el análisis magnético de éstas se derivan las siguientes conclusiones.

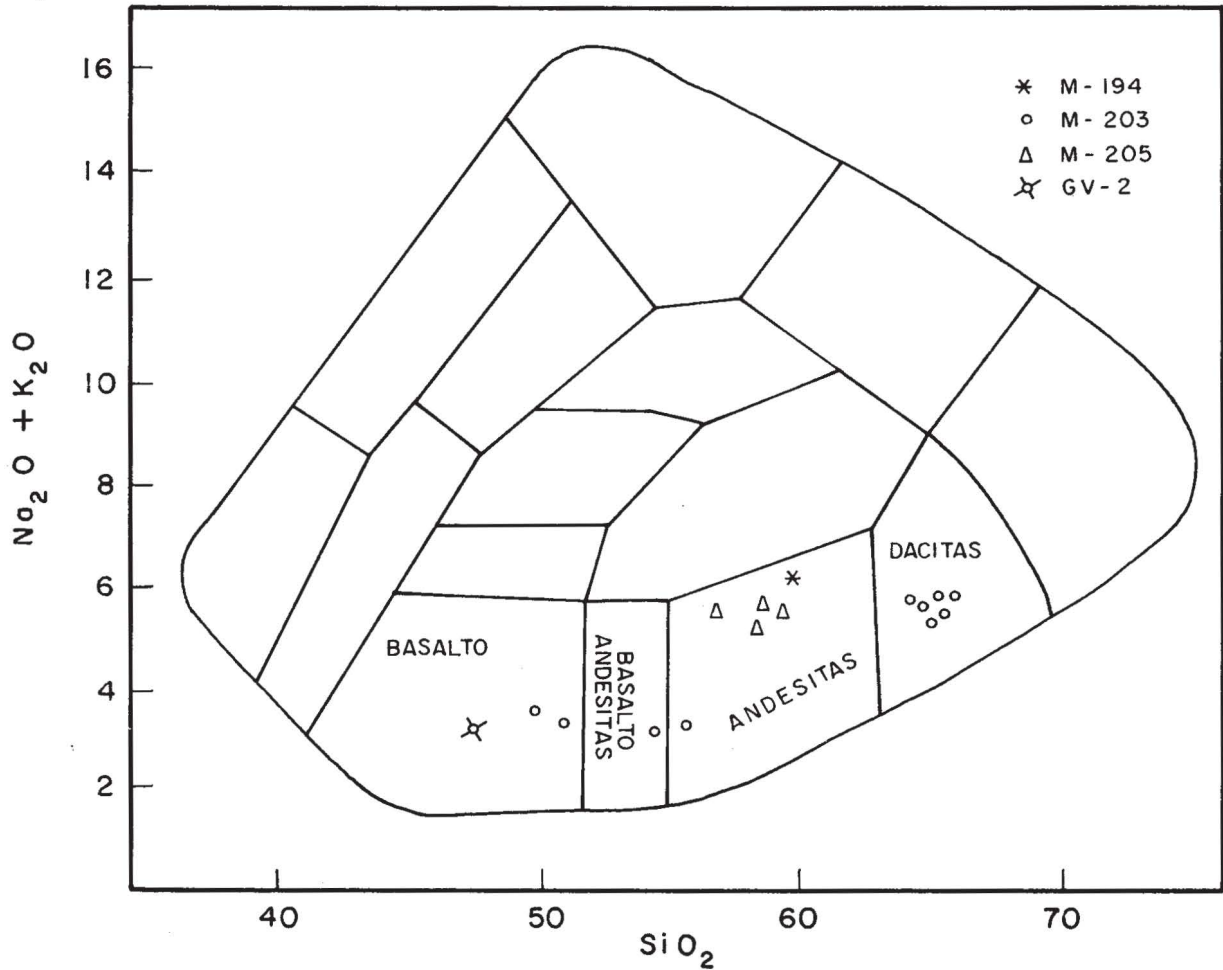


Fig. 5. Clasificación química de las rocas estudiadas de acuerdo con el diagrama propuesto por Cox y otros (1979).

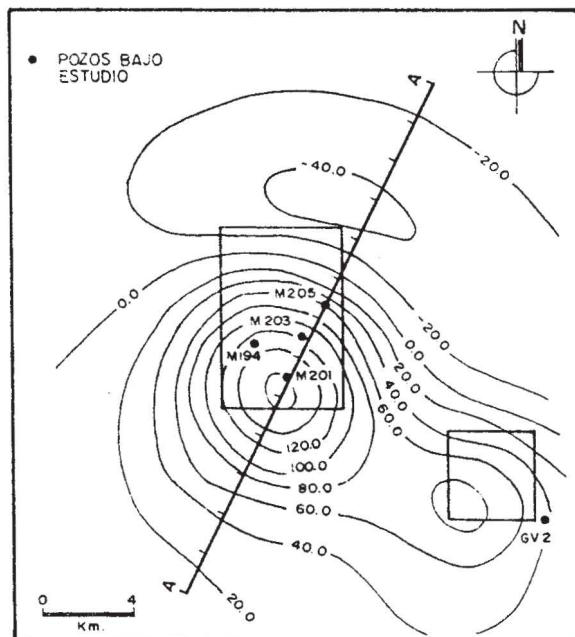


Fig. 6. Modelo de la anomalía magnética Nuevo León obtenida por el método propuesto por Bhattacharyya (1964) y su relación con los pozos bajo estudio. Los rectángulos representan la proyección en superficie de los cuerpos magnéticos a profundidad.

El campo geotérmico se encuentra asociado a un centro de dispersión de corteza activo, que es el resultado del esfuerzo tectónico tensional impuesto por las fallas transformadas Cerro Prieto-Imperial, el cual actúa como eslabón estructural entre el sistema de fallas transformadas del Golfo de California y el sistema San Andrés. El vulcanismo asociado difiere de un centro oceánico debido a su variedad litológica, lo cual sugiere que dicho centro sea considerado transicional entre oceánico y continental (Figura 8).

En cuanto a la sismicidad, los mecanismos de tipo normal tienden a ocurrir en el centro de la llamada "zona sísmica de Mexicali", ubicada en la región lenticular entre las fallas Cerro Prieto e Imperial y limitada por los epicentros del temblor de Imperial de 1979 y de Victoria en 1980. La capa sismogénica se extiende desde los 2.5 km hasta los 11 km de profundidad con un 85% de la actividad sísmica entre los 5.5 y 9.0 km (González, 1986). Este tipo de mecanismo concuerda con la idea de que los diques y/o sills encontrados en los pozos profundos del campo geotérmico, son pequeñas ramificaciones (basaltos) de intrusiones mayores (gabros) que pudieran estar ocurriendo a profundidades que alcanzan los 10 km (Frez y González, 1989).

La anomalía dipolar magnética Nuevo León tiene relación genética con la fuente térmica del campo. Se propone

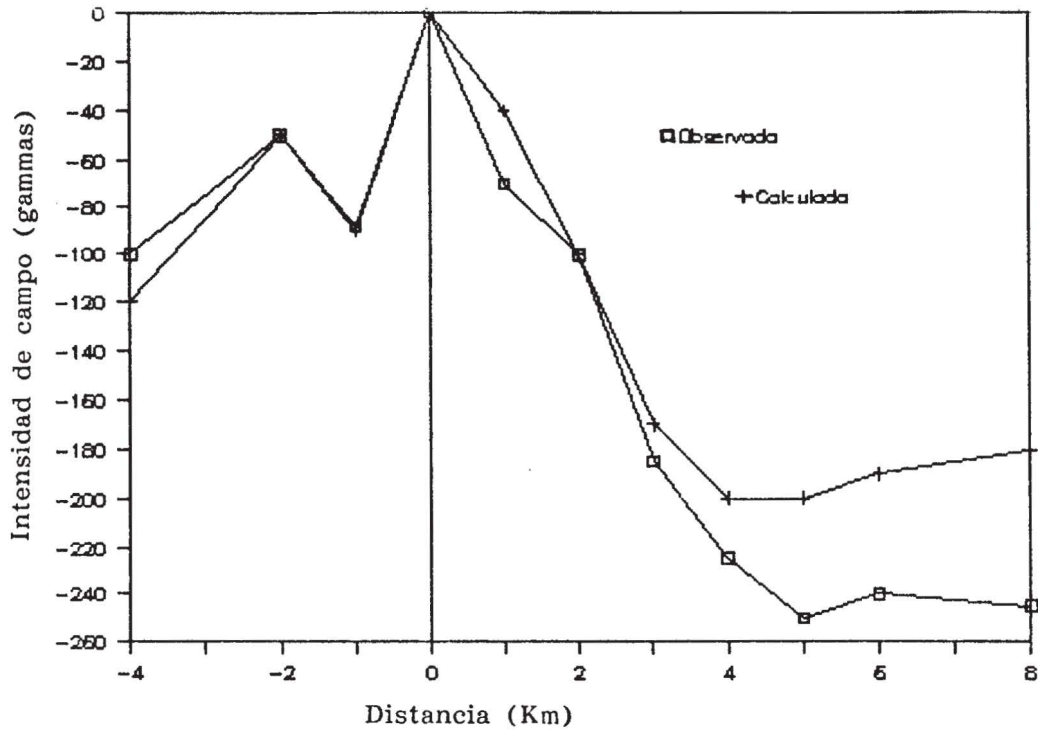


Fig. 7. Amplitud de la anomalía magnética observada y calculada para el perfil A-A' que se muestra en la Figura 6.

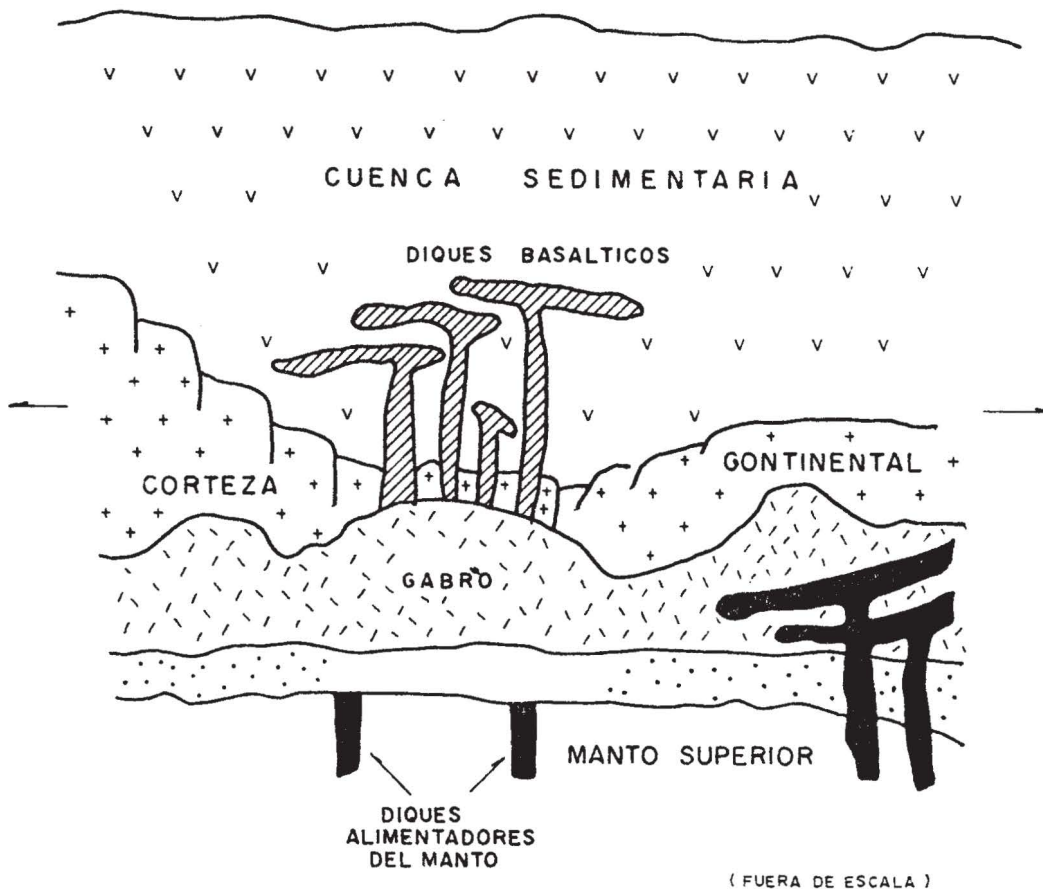


Fig. 8. Modelo conceptual diagramático del centro de dispersión transicional de Cerro Prieto.



un modelo de dos cuerpos magnéticos emplazados a profundidades diferentes y separados con diferente composición. Si los minerales magnéticos de las rocas volcánicas son paramagnéticos a temperaturas mayores de 300°C (Hall, 1987), las fuentes que dan origen a la anomalía Nuevo León están constituidas por cuerpos plutónicos de composición tipo gabro. La cima de estos cuerpos se estima a 4.5 km de profundidad en el caso del cuerpo de dimensión mayor, y de 5.0 km para el segundo, y sus bases se tienen a 7 y 8 km de profundidad respectivamente. Esto concuerda con el cálculo de la isoterma de Curie para la magnetita (575°C), principal mineral ferromagnético constituyente de rocas tipo gabro-peridotitas.

La amplitud de la anomalía magnética calculada es de 250γ pudiendo llegar a 300γ debido a la caída del basamento hacia el norte. Ello se considera un buen ajuste con respecto a la anomalía observada en el regional.

La zona de fusión se propone a unos 11 km de profundidad de acuerdo con la extrapolación lineal del gradiente geotérmico en los pozos del área, que según Hall (1987) puede variar entre 950 y 1200° para las rocas ígneas plutónicas. Estos cuerpos plutónicos a profundidad son considerados como parte de la fuente térmica en el área, la cual se mantendrá activa debido a la continua dispersión de corteza y a la actividad volcánica asociada a ésta.

Agradecemos a N. E. Goldstein sus valiosos comentarios al presente trabajo.

#### BIBLIOGRAFIA

- BHATTACHARYA, B. K., 1964. Magnetic anomalies due to prism-shaped bodies with arbitrary polarization. *Geophysics*, 29, 4, 517-531.
- COMISION FEDERAL DE ELECTRICIDAD, 1987. Proyecto geotermoeléctrico de Cerro Prieto, Coordinadora Ejecutiva de Mexicali. (Anónimo).
- COX, K. G., J. D. BELL y R. J. PANKHURST, 1979. The interpretation of Igneous Rocks. George Allen & Unwin Publ. Co. 446 pp.
- ELDERS, W. A., R. W. REX, T. MEIDAV, P. T. ROBINSON y S. BIELHER, 1972. Crustal spreading in southern California. *Science* 178, 15-24.
- ELDERS, W. A., A. E. BIRD, D. K. SCHIFFMAN P., 1984. Hydrothermal flow regime and magmatic heat source of the Cerro Prieto geothermal system, Baja California, Mexico. *Geothermics*, 13, 27-47.
- FONSECA, H. L. y A. RAZO-MONTIEL, 1979. Estudios gravimétricos, magnetométricos y de sismica de reflexión en el campo geotérmico de Cerro Prieto. Memorias sobre el campo geotérmico de Cerro Prieto, 303-322.
- FONSECA, H. L., A. DE LA PEÑA L., I. PUENTE C. y E. DIAZ, 1981. Extensión del Campo Geotérmico de Cerro Prieto y futuras zonas con probabilidades geotérmicas en el Valle de Mexicali. Memorias sobre el Campo Geotérmico de Cerro Prieto, 384-414.
- FREZ, J. y J. J. GONZALEZ, 1989a. Sismicidad y mecanismos focales en el Valle de Mexicali-Imperial (1973-1985). *Geofis. Int.*, 28, 4, 643-691.
- FREZ, J. y J. J. GONZALEZ, 1991. Crustal structure and seismotectonics of northern Baja California. "The Gulf and Peninsular Province of the Californias". *Am. Assoc. of Petroleum Geol., Memoir* 47, 261-283.
- GOLDSTEIN, N. E., M. J. WILT and D. J. CORRIGAN, 1984. Analysis of the Nuevo León magnetic anomaly and its possible relation to the Cerro Prieto magmatic-hydrothermal system. *Geothermics* 13, 3-11.
- GONZALEZ, J. J., 1986. Sismotectónica del Valle de Mexicali, 1977-1980. Tesis de Maestría. CICESE.
- HALL, A., 1987. Igneous Petrology. Longman Scientific - Technical Co., 573 pp.
- HILL, P. D., 1977. A model for earthquake swarms. *J. Geophys. Res.*, 82, 8, 1347-1352.
- LACHENBRUCH, A. H., J. H. SASS y S. P. GALANIS, 1985. Heat flow in southernmost California and the origin of the Salton Trough. *J. Geophys. Res.*, 90, 6709-6736.
- LAWVER, A. L. y J. G. SCLATER, 1973. Heat flow measurements in the southern portion of the Gulf of California. *Earth and Planetary Science Letter* 12, 198-208.
- LAWVER, L. A. y D. L. WILLIAMS, 1979. Heat flow in the central Gulf of California. *J. Geophys. Res.*, 47, 3465-3478.
- LEE, T-C. y L. H. COHEN, 1979. Onshore and offshore measurements of temperature gradients in the Salton Sea Geothermal area, California. *Geophysics*, 44, 2, 206-215.
- LOMNITZ, C., F. MOOSER, C. ALLEN, J. BRUNE y W. THATCHER, 1970. Seismicity and Tectonics of the Northern Gulf of California region, Mexico preliminary results. *Geofis. Int.* 10, 2, 37-48.
- LYONS, D. J. y P. C. VAN DE KAMP, 1980. Subsurface geological and geophysical study of the Cerro Prieto geothermal field, B.C., Mexico. Lawrence Berkeley report LBL-10540.
- MERCADO, S. y S. J. BERMEJO, 1985. Heat source and geothermal gradient of the Cerro Prieto Geothermal

Field. 1985 International Symposium on Geothermal Energy. International Volume Geothermal Resource Council. 527-531.

QUINTANILLA-MONTOYA, A. L., 1990. Caracterización tectónica del Campo Geotérmico de Cerro Prieto con base en el análisis petrológico y magnético de subsuelo. Tesis de Maestría, CICESE, Ensenada, México. 102 pp.

REYES ZAMORA, C. A., 1979. Estudio de microsismicidad del sistema de fallas transformadas Imperial-Cerro Prieto. Informe Técnico GEO79-01. Centro de Investigación Científica y Educación Superior de Ensenada. 90pp.

TELFORD, W. M., L. P. GELDART, R. E. SHERIFF y D. A. KEYS, 1978. Applied Geophysics. Cambridge University Press. 860 pp.

VON HERZEN, R. P., 1963. Geothermal heat flow in the Gulf of California and Aden, Science, 140, 1207-1208.

---

Ana Luz Quintanilla M.<sup>1</sup> y Francisco Suárez V.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Instituto de Investigaciones Oceanológicas, Universidad Autónoma de Baja California. Apartado Postal 453, Ensenada, Baja California, México.

<sup>2</sup> Centro de Investigación Científica y Educación Superior de Ensenada, División Ciencias de la Tierra, Apartado Postal 2732, Ensenada, Baja California, México.