

ESTUDIOS DE SISMICIDAD EN LA REGION DEL CAMPO GEOTERMICO DE CERRO PRIETO

A. Albores L.,¹ C. A. Reyes Z.,¹ J. N. Brune,²
J. González G.,¹ L. Garcilazo M.,¹ y F. Suárez V.¹

¹Centro de Investigación Científica y Educación Superior de Ensenada
Ensenada, Baja California, México

²Institute of Geophysics and Planetary Physics,
Scripps Institution of Oceanography
University of California, La Jolla, California, USA

I. RESUMEN

Reportamos resultados de los estudios de la sismicidad de la región del Campo Geotérmico de Cerro Prieto. Estos estudios se llevaron a cabo con estaciones permanentes de período corto durante 1974-1975 y 1977-78. Durante el último período se utilizaron sismómetros horizontales para el mejor control del arribo de tiempo de las ondas S. Las localizaciones fueron obtenidas para aproximadamente 200 eventos y las soluciones compuestas del plano de falla fueron obtenidas para un grupo de eventos seleccionados. La actividad sísmica está caracterizada principalmente por enjambres de eventos relativamente pequeños. Sin embargo, un enjambre tuvo eventos con magnitudes mayores de 5.0.

Los epicentros indican una distribución amplia que une las fallas de Cerro Prieto e Imperial. Dentro de esta distribución hay indicaciones de orientación paralela y oblicua al sistema de fallas transformadas Cerro Prieto-Imperial. Las soluciones compuestas del plano de falla indican movimiento lateral derecho a lo largo de fallas con tendencia noroeste-sureste y movimiento en la dirección del echado en algunas de las fallas oblicuas. Los resultados son consistentes con el modelo propuesto por Hill (1977) y sugieren que los enjambres ocurren como resultado de la inyección de fluidos magmáticos a lo largo de las zonas de falla. En consecuencia el entendimiento de la naturaleza del fallamiento y de los procesos tectónicos es muy importante en la evaluación del potencial para energía geotérmica en una región.

II. INTRODUCCION

Las áreas geotérmicas están usualmente localizadas en regiones de tectonismo activo, y en consecuencia no es sorprendente que en la mayoría de ellas la actividad sísmica es alta. En particular el estudio de la actividad sísmica del Valle de Mexicali es de gran importancia para nuestro entendimiento del tectonismo de la región, y debido al potencial económico que representa la explotación de sus recursos geotérmicos, es importante caracterizar el campo geotérmico de Cerro Prieto dentro del Patrón Tectónico Regional del Valle de Mexicali. Como consecuencia,

seremos capaces de refinar nuestros conceptos para identificar áreas similares con recursos geotérmicos potenciales.

En el presente trabajo reportamos los resultados de estudios de sismicidad iniciados en el Valle de Mexicali utilizando estaciones portátiles, y a partir de julio de 1977 estaciones permanentes, localizadas en la región del Campo Geotérmico de Cerro Prieto. Este es el primer estudio que se realiza en la región utilizando sismómetros verticales y horizontales para mejorar la confianza en las determinaciones de profundidades focales.

El estudio fue propuesto a la CFE-Coordinadora Ejecutiva de Cerro Prieto a través del Instituto de Investigaciones Eléctricas (IIE) y financiado conjuntamente por CFE y CICESE. Los resultados obtenidos hasta la fecha nos han aportado la infraestructura básica de datos para la futura elaboración del modelo tectónico-estructural de las partes activas del sistema de Fallas Imperial-Cerro Prieto. Esta base de datos no existía debido principalmente a la carencia de estaciones sismológicas en el valle.

Estudios sobre la ocurrencia y localización de microtemblores han sido propuestos por diferentes autores (Combs y Rothstein, 1976. Hamilton y Muffler, 1972. Hill et al. 1975. Lange and Westphal, 1969. Majer y McEvilly, 1979), como una herramienta exploratoria de Recursos Geotérmicos. El argumento principal es el siguiente: La actividad sísmica ocurre a lo largo de fallas, y éstas son zonas de alto fracturamiento que provee la permeabilidad suficiente para la extracción de calor. En este modelo el transporte de calor se lleva a cabo por el mecanismo convectivo de fluidos (salmuera caliente).

Otros métodos sísmico-pasivos han sido propuestos como herramientas de exploración: análisis de atenuación de ondas de cuerpo. Variaciones regionales en la razón V_p/V_s , análisis de ruido sísmico. Los dos primeros han sido evaluados por Majer y McEvilly (1979) como promisorios, puesto que existen resultados en campos típicos en los cuales valores anómalos en Q , y V_p/V_s se observan en las zonas de producción

(con referencia al área circunvecina). Los resultados sobre análisis de ruido sísmico aún no han sido lo suficientemente convincentes.

De las tendencias existentes para el estudio de los recursos geotérmicos en el Valle de Mexicali, (utilizando métodos sísmicos-pasivos), nos hemos decidido por el énfasis tectónico, en lugar de la observación con óptica muy fina de la sismicidad en el campo. Nuestros conocimientos del tectonismo de centros de dispersión en la corteza oceánica del Golfo de California están relativamente bien desarrollados y nos permiten hacer comparaciones directas con el Valle de Mexicali, el cual es parte de la misma provincia fisiográfica del Golfo de California.

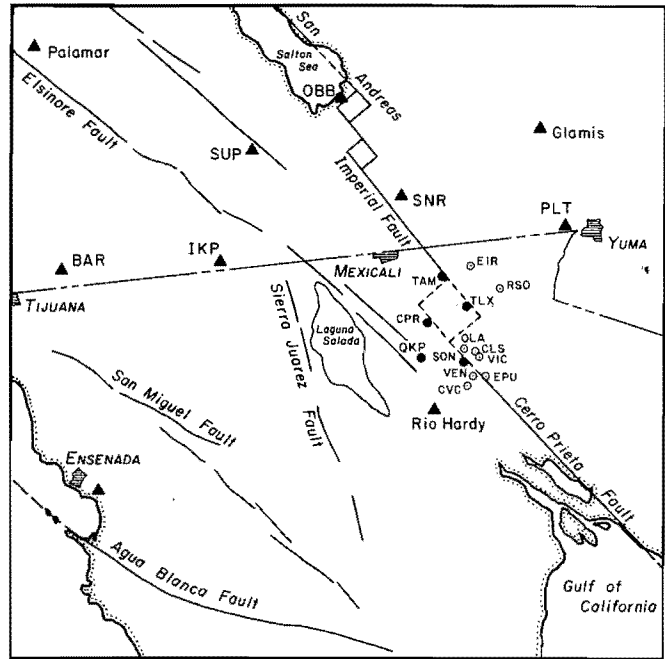
El Valle de Mexicali, como parte de la provincia fisiográfica del Golfo de California, está caracterizado por un sistema de grabens resultante de la extensión cortical asociada al movimiento de rumbo de las Fallas Imperial-Cerro Prieto. Como consecuencia ésta es una región de corteza delgada y alto flujo térmico causado por la intrusión de material ígneo del manto. Si suponemos que la cubierta sedimentaria (5000 a 6000 mts) inhibe la circulación hidrotermal (D.L. Williams et al. 1974, C. Lister, 1976) y que la circulación en esta región ocurre lateralmente a través del sistema de fallas transformadas (Imperial-Cerro Prieto), entonces esas zonas de falla son las más probables de transporte vertical por convección hidrotermal de salmueras calientes. En consecuencia, las zonas de fallas son los lugares más probables para encontrar reservorios geotérmicos de gran importancia económica.

III. INVESTIGACIONES PREVIAS

Tres estaciones permanentes fueron instaladas en 1969 por la UNAM y CALTECH, (Lomnitz, et al. 1970) alrededor de la región norte del Golfo de California para estudiar la sismicidad del Valle de Mexicali y la región Norte del Golfo de California. Lomnitz et al. (1970) reportaron que la actividad sísmica estuvo concentrada en las Fallas Imperial, Cerro Prieto (San Jacinto), Sierra Juárez y San Miguel (figura 1). El modelo tectónico de la provincia fisiográfica alrededor de la parte Norte del Golfo de California, propuesto por dichos autores, consiste de una serie de seis fallas transformadas conectadas con cinco centros de dispersión de corteza oceánica. Los centros de dispersión están caracterizados por zonas geotérmicas, volcanes recientes, enjambres de temblores y depresiones topográficas submarinas.

Los resultados obtenidos en un estudio más reciente de los datos de las estaciones RHM, EGM, SFP, la red de CALTECH del Sur de California, y de una red temporal instalada durante el período 1974-1975, se muestran en la figura 2. Estas determinaciones de epicentros se llevaron a cabo con un promedio de aproximadamente 5 estaciones con arribos identificables de ondas S en 2-3 de ellas.

Los epicentros en la región sureste de Cerro Prieto, muestran claramente una tendencia paralela a la Falla Cerro Prieto, e indican que dicha tendencia de epicentros está asociada con la falla. En la región comprendida entre las dos fallas, los epicentros se dispersan y no sugieren un patrón simple. Pocos



XBL 794-9404

Figura 1. Mapa regional del área de Cerro Prieto. Los puntos sólidos representan la Red Sismológica de estaciones permanentes de Cerro Prieto (RESCEP). Los círculos abiertos representan estaciones temporales que operaron para los eventos de Enero, 1977 y para el enjambre Victoria de Marzo, 1978. Los triángulos sólidos representan algunas de las estaciones permanentes de la región.

eventos ocurren fuera de la región entre las dos fallas. Aún cuando durante el período de tiempo representado por la figura 2 no existe una tendencia de epicentros a lo largo de la Falla Imperial, en el período de tiempo estudiado por Lomnitz et al. (1970) existió dicha tendencia (existió además una concentración a lo largo de la Falla Cerro Prieto). Los datos del Boletín Sismológico de CALTECH previos a 1971 no muestran concentraciones obvias de actividad a lo largo de la Falla Imperial en México o de la Falla Cerro Prieto. Esto podría deberse a la pobre cobertura y pobre precisión de localización durante este período de tiempo.

IV. RESULTADOS RECIENTES

Instrumentación.- Estaciones portátiles de alta ganancia con registro en papel ahumado (Sprengnether Mod.MEQ-800) con 60 db de atenuación (incrementos de -6 db/pasos) fueron utilizadas en conjunto con sismómetros RANGER-SS1 (frecuencia natural de 1 Hz y constante de motor $G=93$ volts/mt/seg). La magnificación sin atenuación tiene su máximo alrededor de los 25Hz (4×10^6). La respuesta a frecuencias del sistema incluidos el amplificador y filtros se muestra en la figura 3. El suministro de energía eléctrica del sistema se provee con dos baterías de 12 volts (75 amps). El consumo de corriente es de 15 mamp., lo cual permite operar en modo continuo por cinco semanas. El sistema de control de tiempo (WWVB) se provee con radios Modelo 60-TL de True Time Instruments. El código de tiempo se alimenta manualmente al sistema al iniciar y finalizar el re

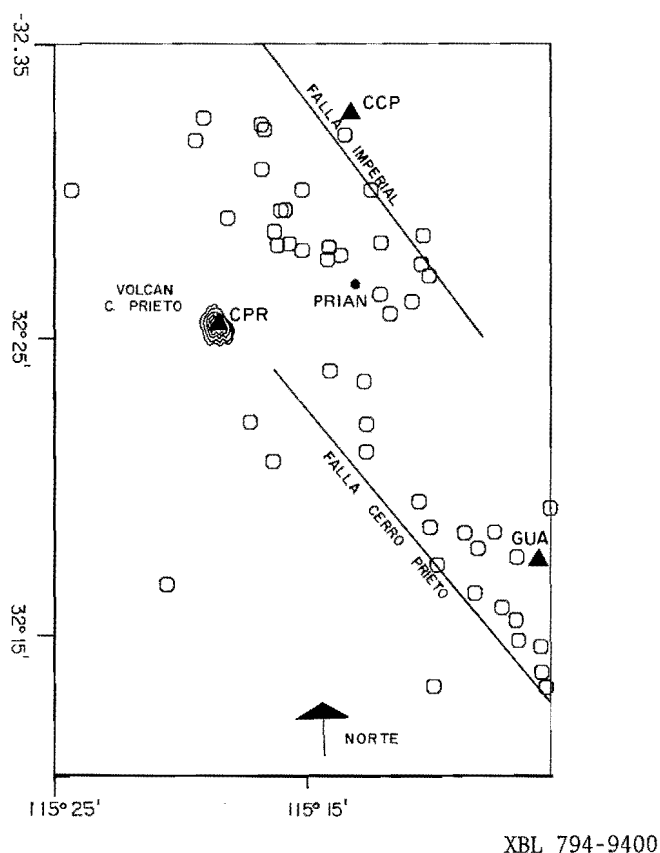
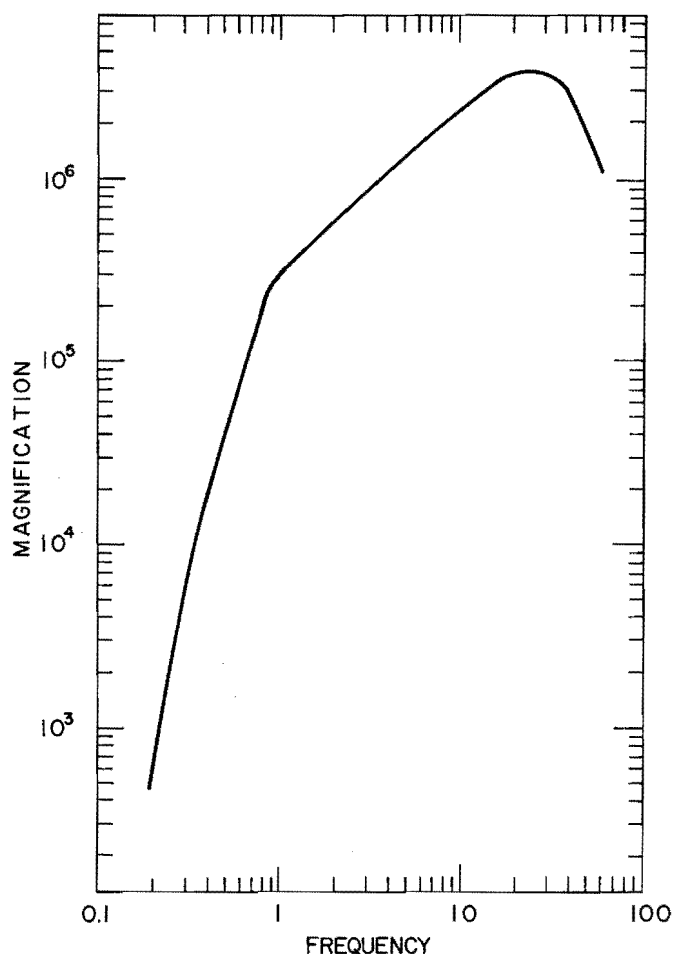


Figura 2. Sismicidad de la región de Cerro Prieto de 1971-1975. Los triángulos sólidos representan estaciones locales operadas en 1974 - 1975.



XBL 794-9401

Figura 3. Curva de amplificación para los sismógrafos utilizados en este estudio.

gistro. La estabilidad del control interno de tiempos es $\pm 4.32 \times 10^{-4}$ seg/día. La velocidad de registro del tambor es 2 mm/seg, lo cual permite leer los tiempos de arribo de señales impulsivas con un error de aproximadamente ± 0.05 segs.

Operación de Campo.- Las estaciones fueron operadas en diferentes lugares por períodos cortos de tiempo con el objeto de determinar el nivel de actividad local de microtemblores y niveles de ruido sísmico. En junio 20/77 se instaló la red permanente (RESCEP), en el área de Cerro Prieto, que consta de tres estaciones con sismómetros verticales (QKP, SON, TAM) y dos estaciones con sismómetros verticales y horizontales (CPR, TLX). La localización de las estaciones se muestra en la Figura 1.

Las coordenadas geográficas se listan en la Tabla I, en la cual también se incluye el nivel de ganancia al que ha operado cada estación desde junio 20/77. El nivel de ruido sísmico en el valle es considerablemente alto durante el día, decreciendo significativamente durante la noche, por lo cual todas excepto QKP han operado al mínimo nivel de ganancia de 3.9×10^3 (-60 db), dando un nivel de ruido en la traza del sismograma de 0.5 mm. pico a pico. Los sismómetros se encuentran instalados en bases de concreto a 2 mts. de profundidad, observándose

TABLA 1: Coordenadas geográficas y nivel de ganancia (ganancia máxima igual a 4×10^6) de las estaciones.

ESTACION	LATITUD	LONGITUD	GANANCIA
EPU *	32° 14 60	115° 04 80	60 db
EIR *	32° 36.55	115° 07.75	60 db
RSO *	32° 31.90	115° 00.95	60 db
CPR *+	32° 25.20	115° 18.10	60 db
QKP +	32° 18.30	115° 19.92	90 db
TLX +	32° 18.32	115° 08.71	60 db
NVL +	32° 23.91	115° 12.66	60 db
TOM +	32° 34.62	115° 14.33	60 db
SON +	32° 17.50	115° 09.83	60 db
CLS **	32° 19.46	115° 06.75	
OLA **	32° 20.03	115° 09.57	
VIC **	32° 18.56	115° 06.04	
VEN **	32° 14.65	115° 07.50	
CVC **	32° 12.16	115° 08.73	

* ESTACIONES UTILIZADAS DURANTE ENERO 1977
 ** ESTACIONES UTILIZADAS DURANTE MARZO 1978 (digitales)
 + RED DE ESTACIONES PERMANENTES

XBL 794-9409

un amortiguamiento de al menos un factor de dos en el nivel de ruido con respecto a las observaciones en la superficie. La frecuencia característica del ruido sísmico está principalmente relacionado a la intensa actividad agrícola del valle (y posiblemente a la actividad geotermal en la vecindad de la estación Nuevo León). La diferencia en ruido sísmico observado en las estaciones localizadas en el valle, con respecto a la estación QKP, es muy probablemente originada por efectos de amplificación en los sedimentos de baja rigidez del valle.

V. ANALISIS DE DATOS

Los resultados de este estudio están basados en localizaciones relativas precisas y mecanismos focales compuestos del primer movimiento. Los mejores datos (eventos grandes) provinieron de enjambres de eventos. Los enjambres ocurrieron en las siguientes localidades: Vecindad del Campo Geotérmico de Cerro Prieto (Septiembre 28, 77), en la vecindad del pozo exploratorio PRIAN (Octubre 15, 77), sur de la Falla Imperial cerca del Ejido Tlaxcala (Enero 17, 77), y en la vecindad del Ejido Victoria (Marzo 10, 78). La base de datos para el estudio de la sismicidad durante este período fueron tiempos de arribos de fases P y S, y polaridades de las ondas P registradas por las estaciones de la red sismográfica de Cerro Prieto RESCEP 1977-1978.

En las determinaciones de epicentros y profundidades focales se seleccionaron eventos registrados por RESCEP, que están caracterizados por arribos impulsivos, permitiendo lecturas confiables de los arribos P y S.

En promedio el espaciamiento de las estaciones de RESCEP (figura 1) es aproximadamente 20 Km, esto provee buen control en las determinaciones epicentrales y profundidades focales para eventos localizados en el interior de la red. Los datos de los enjambres de: Septiembre 28, 77 Octubre 15, 77 Enero 20, 78 y Marzo 10, 78 fueron particularmente importantes como "eventos maestros" para las determinaciones relativas de epicentros que se discuten posteriormente. La localización de esos eventos se muestran en la Figura 1. La Tabla 2 da sus coordenadas hipocentrales y magnitud coda.

Para alcanzar el máximo nivel de precisión en las determinaciones hipocentrales los tiempos del primer arribo de las fases P y S, fueron leídos por varios lectores utilizando lentes con una magnificación de 6X. Las lecturas así obtenidas fueron comparadas para determinar los errores estándar en la precisión de tiempos de arribos (± 0.05 seg).

El método de localización relativa utilizada en este estudio es simple y efectiva. El método ha sido descrito por Johnson y Hadley (1976) y se describe brevemente a continuación. El método consiste de dos partes. Primeramente uno o varios eventos por zonas son seleccionados y designados eventos maestros. El criterio de selección es principalmente la disponibilidad de arribos impulsivos P y S en todas las estaciones. En seguida se supone que los residuales tiempo-distancia en la localización son ocasionados completamente por retrasos de estación, esto es, por anomalías en la estructura de velocidades en la vecindad de la estación. Los eventos restantes son localizados utilizando esos retardos de tiempo como correcciones de estación. De esta for-

TABLA 2: Fechas, coordenadas hipocentrales y magnitudes coda de los eventos maestros para la determinación relativa de epicentros.

FECHA	LATITUD	LONGITUD	DEPTH	MAG
770928	32° 23.72	115° 13.15	9.35	1.7
770928	32° 24.17	115° 13.66	11.46	2.3
770928	32° 24.37	115° 12.43	6.08	2.8
770928	32° 23.79	115° 13.33	9.05	2.8
771015	32° 24.01	115° 11.71	9.33	*
771015	32° 23.80	115° 11.37	7.12	*
771015	32° 24.02	115° 11.23	10.04	*
771220	32° 37.90	115° 19.56	6.64	1.9
771211	32° 36.92	115° 24.48	6.03	1.8
771211	32° 36.52	115° 23.78	6.67	2.0
780120	32° 27.10	115° 11.18	14.98	1.0
780120	32° 26.92	115° 10.73	14.86	1.1
780318	32° 16.24	115° 05.61	10.81	4.9
780318	32° 15.16	115° 06.14	11.89	2.3
780319	32° 16.11	115° 07.80	9.74	2.5

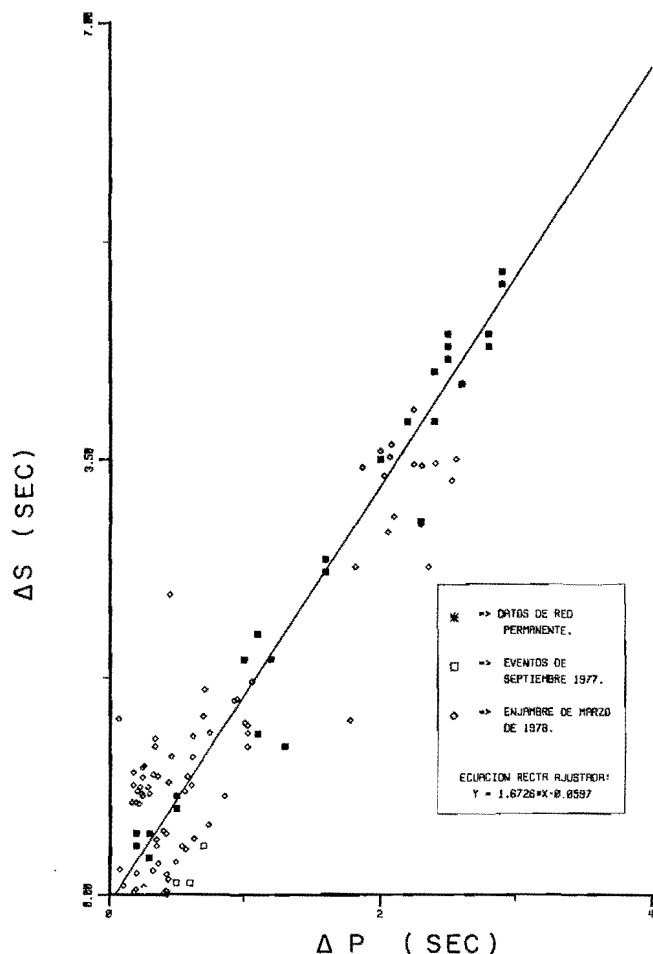
* $0 < M < 1.0$

XBL 794-9408

ma se logra un alto nivel de precisión en las localizaciones relativas (equivalente a fijar un vector de localización relativa a los tiempos relativos entre un evento y el evento maestro). El mayor logro de este método de localizaciones relativas es el de proveer una imagen más clara de la distribución de la sismicidad. Con la eventual adquisición de conocimiento sobre la estructura de velocidades será posible obtener un mayor refinamiento en las determinaciones. Pero creemos que las conclusiones básicas no se cambiarán críticamente.

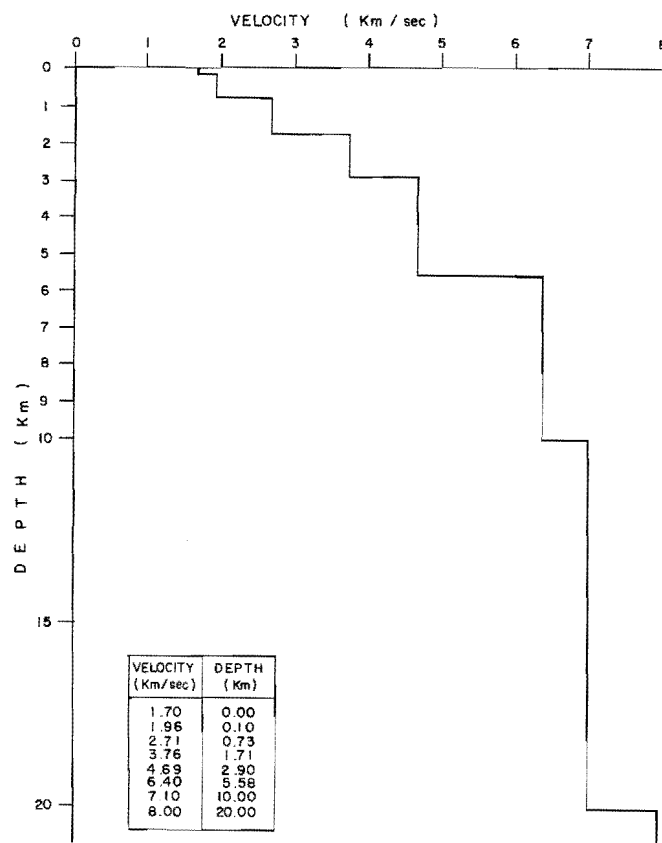
Para fijar la velocidad de la onda S a partir de la velocidad de la onda P, la razón V_p/V_s fue determinada del diagrama de Wadati que se muestra en la figura 4. Aproximadamente 80 datos de primeros arribos de las fases P y S leídos en los registros verticales y horizontales fueron utilizados. Los tiempos de las fases P y S se determinaron con referencia a la estación con arribo P más temprano. La correlación lineal entre S y P dan un valor para V_p/V_s de 1.67, menor que el valor esperado de 1.73 (para una razón de Poisson de 0.25) y significativamente diferente del valor de 2.5 reportado por Majer y McEvilly (1979, este volumen) en un estudio realizado en la vecindad inmediata de los pozos de Cerro Prieto utilizando sismómetros verticales y horizontales.

Las determinaciones hipocentrales se obtuvieron utilizando el programa de localización HYPO-75 (Lee y Lahr, 1975). El modelo de velocidades utilizado para la localización se tomó de estudios similares en el Valle Imperial. El modelo se muestra en la figura 5. Las discontinuidades abruptas en este modelo fueron alisadas por la introducción de capas delgadas con cambios graduales en velocidad para disminuir los efectos desestabilizadores de capas abruptas sobre las determinaciones de mecanismos focales.



XBL 794-9403

Figura 4. Diagrama Wadati para los tiempos de arribo de las ondas P y S en la región de Cerro Prieto.



XBL 794-9402

Figura 5. Modelo de velocidad utilizado en este estudio.

VI. DISCUSION DE LOS RESULTADOS

Localizaciones.- La Figura 6 muestra la distribución de epicentros localizables de la actividad sísmica en el Valle de Mexicali durante el período de observación Enero 1977 - Mayo 1978. La distribución general de epicentros determinados durante este período de observación no es muy diferente del período mostrado en la figura 2, sugiriendo que ambas determinaciones son relativamente confiables. Eventos tan pequeños como M (magnitud) aproximadamente 0.5 fueron localizados, pero debido al alto nivel de ruido sísmico observado en el valle, y a problemas intermitentes en la operación de la red, la cobertura de la actividad sísmica no es completa.

Como se puede observar en la figura 6, el patrón sísmico muestra una tendencia N-S conectando el extremo noroeste de la Falla Cerro Prieto con el extremo sureste de la Falla Imperial. La sismicidad muestra escasa actividad sísmica a lo largo del trazo superficial de la Falla Imperial comprendido entre la estación TAM y la frontera Internacional (en contraste durante 1969, Lomnitz et al. 1970,

encontraron actividad significativa en esta sección de la Falla Imperial). La concentración de eventos en la vecindad del Ejido Victoria (cercana a la estación SON) corresponde en su mayor parte al "Enjambre Victoria" de Marzo 10-23/78 el cual consistió en aproximadamente 500 eventos. Las magnitudes de los eventos más grandes fueron 4.7 y 5.0. La distribución de epicentros sugiere que la actividad del enjambre involucró predominantemente la tendencia noroeste de la Falla Cerro Prieto y una falla paralela en-echelon, y fallas conectantes NS. Esta interpretación también la sugiere el mecanismo focal compuesto de esos eventos.

Un patrón difuso de actividad sísmica se observa al oeste de la Falla Cerro Prieto. Cerca de la estación QKP ocurrió una serie de réplicas de un temblor del 5 de Mayo de 1978, con aproximadamente 1500 eventos de magnitud menor a 1. Existe también actividad sísmica difusa al noroeste de Cerro Prieto probablemente asociada a la zona de falla San Jacinto, (aún cuando estos eventos ocurren en el exterior de RESCEP y su localización está pobremente constreñida).

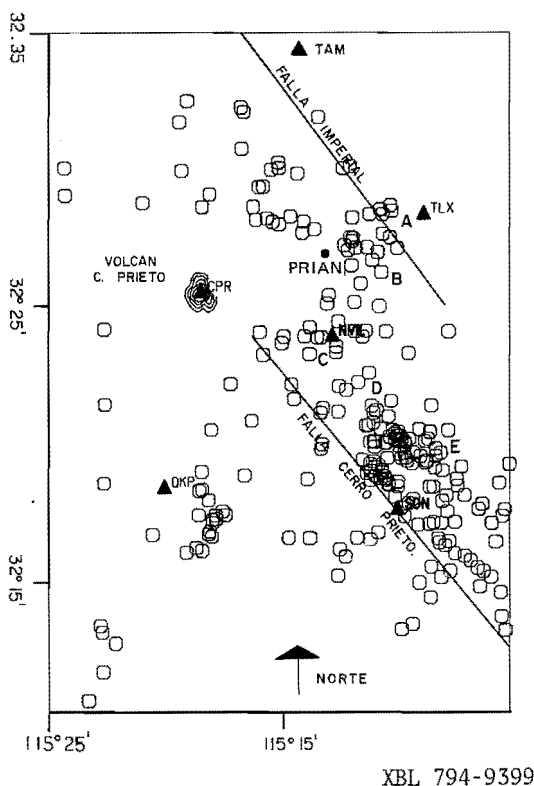


Figura 6. Sismicidad de la región de Cerro Prieto, 1977-1978. Los triángulos sólidos representan estaciones permanentes de la Red Sismológica de Cerro Prieto (RESCEP).

Un estudio especial se realizó de las réplicas de un evento de magnitud 4.2 (CALTECH) que se localizó en el extremo sur de la Falla Imperial (Punto A) el 17 de Enero de 1977. Durante un período de observación de 48 horas, iniciadas 36 horas después del evento principal se registraron 40 eventos de los cuales fue posible localizar 10. Las profundidades focales estimadas varían de 6 a 13 Km.

Soluciones Compuestas del Plano de Falla.- La esfera focal de las proyecciones de la polaridad del primer arribo para un determinado grupo de eventos, rotulados A, B, C y D en la figura 6, fueron graficados en una proyección de igual área (hemisferio superior). Si todos los eventos del mismo grupo tienen la misma orientación de falla, esta proyección compuesta indicará dicha orientación, aun cuando pocas estaciones hayan sido utilizadas.

La solución compuesta del plano de falla para los eventos del grupo A (Enero 17, 1977) se muestra en la figura 7. Este indica ya sea movimiento lateral derecho a lo largo de una falla con una tendencia noroeste o un movimiento lateral izquierdo con una tendencia noreste a lo largo de una falla conjugada. Si la interpretación del movimiento lateral derecho es seleccionada, entonces la localización de los epicentros sugiere al menos tres fallas en echelon paralelas a la Falla de Cerro Prieto. De otra forma, si la interpretación del movimiento la-

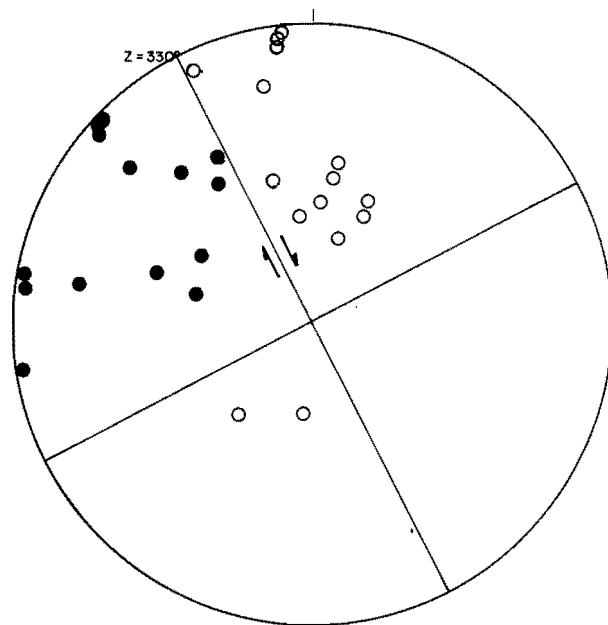
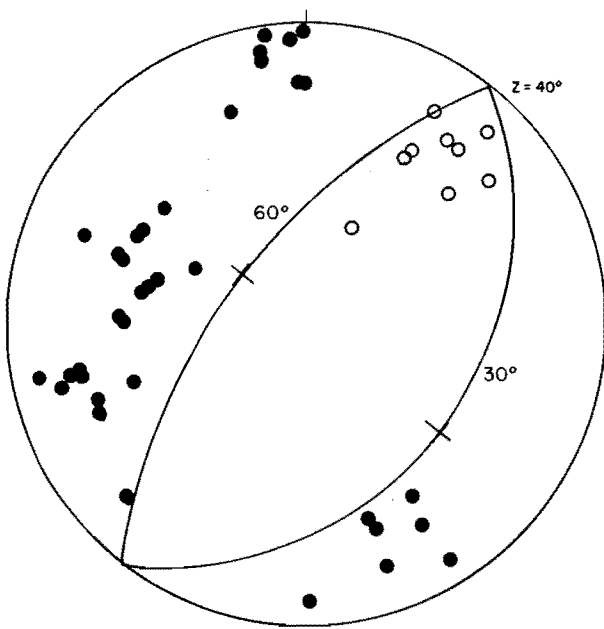


Figura 7. Gráfica del mecanismo focal compuesto para los eventos del temblor de Enero 17, 1977. Símbolos: o = dilatación, ● = compresión.

teral izquierdo es seleccionada, los epicentros también podrían representar fallamiento lateral izquierdo conjugado.

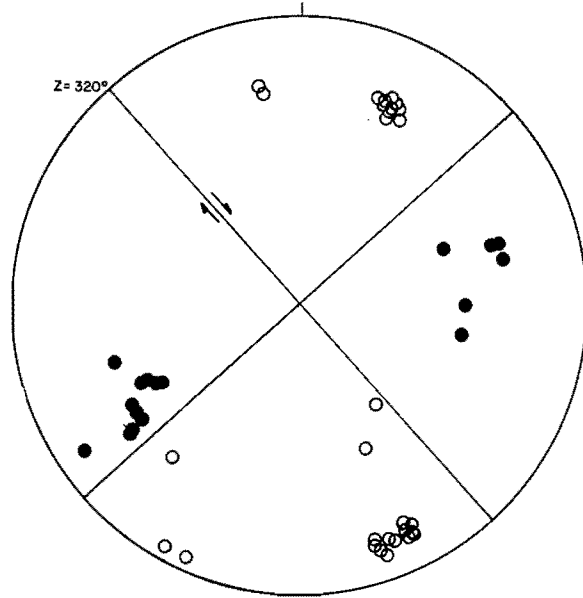
Para los eventos localizados en la vecindad del pozo exploratorio PRIAN (Grupo B, figura 6) el mecanismo focal está pobremente constreñido pero sugiere movimiento sobre una falla vertical. En comparación el mecanismo focal compuesto de eventos en la vecindad de los pozos de producción de la planta geotérmica de Cerro Prieto (Grupo C, figura 8) indican que la actividad sísmica involucra predominantemente fallamiento normal con un echado de 30 grados hacia el sureste o 60 grados al noroeste, la primera es consistente con los resultados de estudios geológicos estructurales realizados en el área de la zona de producción por Puente y de la Peña (1979, este volumen). Los datos de la polaridad del plano de falla compuesto del Grupo D, figura 9, también sugiere un fallamiento normal, sin embargo, los datos no son suficientes para precisar la solución. La línea punteada indica el mismo plano de falla como en la figura 8, y es consistente con los datos, con la excepción de un punto.

La solución compuesta del plano de falla para el Grupo E, figura 10 (enjambre de Marzo 10-23, 1978) está bien constreñida e indica un rumbo lateral derecho con una tendencia de falla noroeste (azimut 330 grados) o movimiento lateral izquierdo con una tendencia de falla noreste. La solución anterior es la más probable porque es consistente con la orientación de la falla de Cerro Prieto y la tendencia indicada,



XBL 794-9407

Figura 8. Gráfica del mecanismo focal compuesto para los eventos del Enjambre de Septiembre 29 y Octubre 15, 1977. Símbolos: o = dilatación, • = compresión.



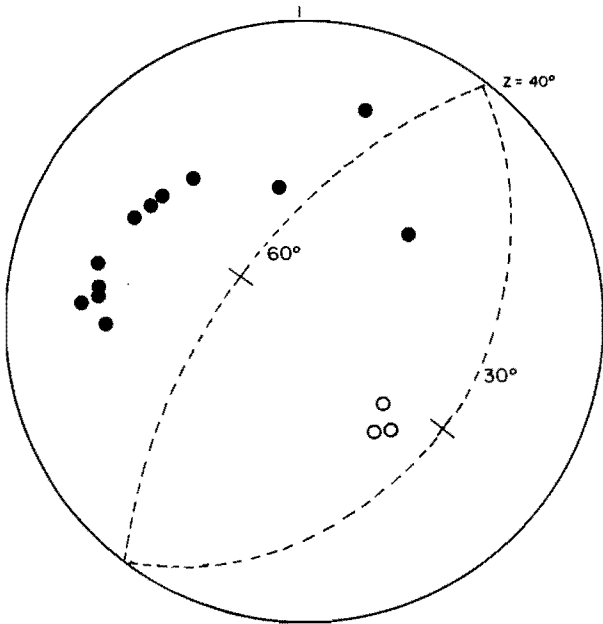
XBL 794-9405

Figura 10. Gráfica del mecanismo focal compuesto para los eventos del Enjambre 10-21, 1978. Símbolos: o = dilatación, • = compresión.

por las localizaciones epicentrales, figura 6. Algunos de los eventos de este enjambre no están representados en la solución compuesta, porque sus polaridades fueron claramente inconsistentes con la solución. Estas podrían representar fallamiento con deslizamiento de echado simultáneamente con fallamiento con deslizamiento de rumbo.

Interpretación.— El patrón de sismicidad y el mecanismo focal compuesto del plano de falla descrito anteriormente sugiere que la distribución de la deformación tectónica (deslizamiento sísmico) en el Valle de Mexicali, ocurre principalmente a lo largo de dos tendencias tectónicas: i) Fallas paralelas incluyendo el sistema de fallas transformadas Imperial-Cerro Prieto, ii) Un sistema de fallas oblicuas a la tendencia Imperial-Cerro Prieto involucrando al menos fallamiento normal.

Los resultados de estudios previos en la provincia del Salton Sea y en el Golfo de California (Hill et al. 1975, Lomnitz et al. 1970, Reichle 1976, Thatcher y Brune, 1971) nos indican que las fuerzas tectónicas regionales inducidas por el movimiento relativo de la placa del Pacífico (Nor-Oeste) con respecto a la placa Americana, produce fuerzas tectónicas tensionales en el graben de Cerro Prieto, ocasionando dispersión cortical con el consecuente adelgazamiento de la corteza. Dispersión local de la corteza es requerido por la geometría de la es-tribación local (off-set) del sistema de fallas Imperial-Cerro Prieto. Nuestros datos en conjunto con estudios geológicos (Puente y de la Peña, 1979 este volumen) indican que en el interior del graben de Cerro Prieto la corteza se rompe en una serie de blocks delimitados por planos orientados paralela-mente al sistema Imperial-Cerro Prieto (como se



XBL 794-9406

Figura 9. Gráfica del mecanismo focal compuesto para los eventos del Grupo D (ver figura 6). Símbolos: o = dilatación, • = compresión.

observa en los puntos A y E de la figura 6) y por un conjunto oblicuo de fracturas con una componente de fallamiento normal, indicando tensión en una dirección noroeste-sureste como lo indica la distribución de la sismicidad en el graben y los mecanismos focales compuestos (Puntos B y C). Cuando este sistema de fracturamiento se observa en la luz del modelo de Hill (1977) se sugiere que los enjambres ocurren como resultado de la inyección de fluidos magmáticos. La existencia de estas zonas de fracturamiento complejo en la corteza podrían también explicar el alto flujo térmico observado en el Valle de Mexicali, puesto que las fracturas producen zonas de alta permeabilidad a través de los cuales la salmuera caliente puede fluir.

Los resultados de este estudio han sido muy estimulantes y nos indican que, con una mayor cobertura y precisión, aspectos importantes del tectonismo del campo geotérmico de Cerro Prieto serán revelados. Un arreglo de seis estaciones con telemetría digital, diseñada para este propósito ha sido instalada por CICESE, con fondos de la CFE y CICESE, la red se encuentra en operación actualmente.

VII. AGRADECIMIENTOS

Este estudio fue financiado en conjunto por la Coordinadora Ejecutiva de Cerro Prieto (CFE) y el Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada (CICESE), a través del Instituto de Investigaciones Eléctricas (IIE). La información del primer período fue obtenida con fondos de la NSF y NASA. Durante este período los trabajos de campo fueron realizados por Alejandro Nava y Steve Day.

Queremos agradecer especialmente al Ing. Héctor Alonso (CFE), Ing. Guillermo de la Garza (IIE), y al Dr. Pablo Mulás (IIE) por el apoyo y estímulo brindado para este estudio.

Nos hemos beneficiado con las discusiones sobre la geología y geofísica de Cerro Prieto del Ing. Héctor Alonso, Ing. Antonio Razo, y el Ing. Puente.

Estamos especialmente agradecidos con Jouracy Soárez, Alejandro Hinojosa, L. Inzunza y Javier Martínez por su asistencia en la lectura de sismogramas y a F. Jaime por su participación en la colección diaria de sismogramas. Además apreciamos el esfuerzo de N. Rohner y Rosi Martínez por mecanografiar y traducir la versión Español-Inglés de este artículo.

VIII. BIBLIOGRAFIA

- Combs, J., y Rothstein, Y., 1976. Microearthquake studies at the Coso geothermal area, China Lake, California, *in* Proc., Second U.N. Symp. on Development and Use of Geothermal Resources, May 1975, San Francisco. Washington, D.C., U.S. Government Printing Office, v. 2, p. 909.
- Hamilton, R.M., y Muffler, L.J.P., 1972. Microearthquakes at The Geysers geothermal area, California. *J. Geophys. Res.*, v. 77, p. 2081.
- Hill, D.P., 1977. A model for earthquake swarms. *J. Geophys. Res.*, v. 82, p. 1347.
- Hill, D.P., Mowinckel, P., y Peake, L.G., 1975. Earthquakes, active faults, and geothermal areas in the Imperial Valley, California. *Science*, v. 188, p. 1306.
- Johnson, C.E., y Hadley, D.M., 1976. Tectonic implications of the Brawley earthquake swarm, Imperial Valley, California. *Bull. Seism. Soc. Am.*, v. 66, pp. 1133-1144.
- Lange, A.L., y Westphal, W.H., 1969. Microearthquakes near The Geysers, Sonoma County, California. *J. Geophys. Res.*, v. 74, p. 4377.
- Lee, W.H.K., y Lahr, J.C., 1975. HYPO-71 (Revised): A computer program for determining hypocenter, magnitude, and first motion pattern of local earthquakes. U.S. Geological Survey Open-File Report, p. 113.
- Lister, C.R.B., 1976. Qualitative theory on the deep end of geothermal systems, *in* Proc. Second U.N. Symp. on Development and Use of Geothermal Resources, May 1975, San Francisco. Washington, D.C., U.S. Government Printing Office, v. 2, p. 459.
- Lomnitz, C., Mooser, F., Allen, C.R., Brune, J.N., y Thatcher, W., 1970. Sismicidad y tectónica del Golfo de California, resultados preliminares. *Geofísica Internacional*, v. 10, no. 2, p. 37, 48.
- Majer, E.L., y McEvilly, T.V., 1979. Seismological investigations at The Geysers geothermal field. *Geophysics*, v. 44, no. 2, p. 246.
- Reichle, M.S., Sharman, G., y Brune, J.N., 1976. Sonobuoy and teleseismic study of Gulf of California transform fault earthquake sequences. *Bull. Seism. Soc. Amer.*, v. 66, p. 1623.
- Thatcher, W., y Brune, J.N., 1971. Seismic study on an oceanic ridge earthquake swarm in the Gulf of California. *Geophys. J.R. astr. Soc.*, v. 22, p. 1446.
- Weaver, C.S., y Hill, D.P., 1978. Earthquake swarms and local spreading along major strike-slip faults in California. Basel, Birkhauser Verlag, p. 117.
- Williams, D.L., Von Herzen, R.P., Sclater, J.G., y Anderson, R.N., 1974. The Galapagos spreading center: lithospheric cooling and hydrothermal circulation. *Geophys. J.R. astr. Soc.*, v. 38, p. 587.

SEISMICITY STUDIES IN THE REGION OF THE CERRO PRIETO GEOTHERMAL FIELD

ABSTRACT

We report results from seismicity studies in the region of the Cerro Prieto Geothermal Field. These studies were conducted with local short period seismic arrays during 1974-75 and 1977-78. During the latter period, horizontal seismometers were used for better control on the S-wave arrival times. Locations were obtained for about 200 events and composite fault plane solutions were obtained for five groups of events. The seismic activity is characterized primarily by swarms of relatively small events, although one swarm had events with magnitudes as high as 5.0.

The epicenters indicate a broad distribution connecting the Cerro Prieto and Imperial faults. Within this distribution there are indications of trends both parallel to and oblique to the Cerro Prieto-Imperial transform fault system. The composite fault plane solutions indicate right lateral strike-slip faulting along NW-SE trending faults and dip-slip faulting along at least some of the oblique faults.

The results are consistent with the model proposed by Hill (1977) and suggest that swarms occur as a result of injection of magmatic fluids along fault zones. Thus understanding the nature of faulting and tectonic processes is very important in evaluating the potential for geothermal energy in a region.

INTRODUCTION

Geothermal areas are usually located in regions of active tectonism, and as a consequence it is not surprising that in the majority of them the seismic activity is high. In particular, the study of seismic activity of the Mexicali Valley is very important for our understanding of the tectonism of the region, and due to the economic potential represented by the valley's geothermal resources, it is important to characterize the Cerro Prieto geothermal field within the regional tectonic pattern of the Valley of Mexicali. Consequently, we will be able to refine our concepts for identifying similar areas with potential geothermal resources.

In the present study we report the results of seismic studies initiated in the Valley of Mexicali using portable stations, and, beginning in July 1977, permanent stations, located in the region of the Cerro Prieto geothermal field. This is the first study carried out in this region using both horizontal and vertical seismographs to improve the determination of focal depth.

The study was proposed to the CFE Executive Coordinator of Cerro Prieto through the Institute of Electrical Research and financed jointly by CFE and CICESE. The results obtained to date have provided us with the basic data for future elaboration of the tectonic structural model of the active parts of the Imperial-Cerro Prieto fault system. This data base has not been available earlier due principally to the lack of seismological stations in the valley.

Study of the occurrence and locations of microearthquakes has been proposed by different authors (Combs and Rothstein, 1976; Hamilton and Muffler, 1972; Hill *et al.*, 1975; Lange and Westpahl, 1969; Majer and McEvilly, 1979) as an exploratory tool for geothermal resources. The principal concept is the following: The seismic activity occurs along faults, and these are highly fractured zones that provide permeability sufficient for the extraction of heat. In this model the transport of heat is brought about by the convection of fluids ("hot brines").

Other seismic passive methods have been proposed as tools for exploration: analysis of the attenuation of body waves, regional variation in the ratio V_p/V_s , and analysis of seismic noise. The first two have been evaluated by Majer and McEvilly (1979) as promising, because results now exist for typical fields in which anomalous values of Q and V_p/V_s are observed in the zones of production (relative to the surrounding areas). Results concerning the analysis of seismic noise still have not been sufficiently convincing.

From among the range of emphases available for the study of the geothermal resources in the Valley of Mexicali (using passive seismic methods), we have decided on the tectonic emphasis, rather than a very fine scale focus on the seismicity in the geothermal field. Our knowledge of the tectonism of spreading centers in the oceanic crust of the Gulf of California is relatively well developed and permits us to make direct comparisons with the Mexicali Valley, which is part of the same physiographic province.

The Mexicali Valley, as part of the physiographic province of the Gulf of California, is characterized by a system of grabens resulting from crustal extension associated with strike-slip motion along the Cerro Prieto and Imperial faults. As a consequence it is a region of crustal thinning and high heat flow caused by the intrusion of igneous material from the mantle. If we assume that the sedimentary cover (5,000 to 6,000 meters) inhibits vertical hydrothermal circulation (Williams *et al.*, 1974; Lister, 1976) and that the circulation in this region occurs laterally across the system of transform faults (Imperial-Cerro Prieto), then these faults are likely zones of vertical transport for hydrothermal convection of hot solutions. Hence, the fault zones are probable places for geothermal reservoirs of major economic importance.

PREVIOUS INVESTIGATIONS

Three permanent stations were installed by UNAM and CALTECH in 1969 (Lomnitz *et al.*, 1970) around the northern part of the Gulf of California to study the seismicity of the Mexicali Valley and the northern part of the Gulf of California. Lomnitz *et al.* (1970) reported that the seismic activity was concentrated in the Imperial, Cerro Prieto (San Jacinto), Sierra Juarez and San Miguel faults (Figure 1). The tectonic model of the

physiographic province around the northern part of the Gulf proposed by these authors, consists of a series of six transform faults connected with five spreading centers. The spreading centers are characterized by geothermal zones, recent volcanoes, swarms of earthquakes, and topographic depressions.

The results obtained in a more recent study of data from stations Rio Hardy RHM, EGM, SPP, the CALTECH Southern California array, and a temporary array installed during the period 1974 to 1975, are shown in Figure 2. These determinations of epicenters were obtained with an average of 5 stations with 8 arrivals from 2-3 stations.

The epicenters in the region southeast of Cerro Prieto clearly show a trend paralleling the Cerro Prieto fault, and indicate that this trend of epicenters is associated with the fault. The epicenters scatter in the region between the two faults and do not indicate any simple pattern. A few events occur outside the region between the two faults. Although during the period of time represented by Figure 2, there is no obvious trend of epicenters along the Imperial fault, in the time period studied by Lomnitz *et al.* (1970), there was such a trend (there was also a concentration along the Cerro Prieto fault). The data from the CALTECH Bulletin for Periods before 1971 does not show obvious concentrations of activity along either the Imperial fault in Mexico or the Cerro Prieto fault. This could be partly due to poor coverage and poor location accuracy during this time period.

RECENT RESULTS

Instrumentation

High-gain portable stations recording on smoked paper (Sprengnether Model MEQ 800) with 60 dB of attenuation (with increments of -6 dB per step), were used in conjunction with Ranger SSI seismometers (natural frequency 1 Hz, generator constant 93 volts/meter/second). The unattenuated magnification peaks at about 25 Hz (4×10^6). The frequency response of this system, including the amplifier, and filters is shown in Figure 3. The power supply for the system is provided with two 12 volt batteries (75 amps). The current drain is about 15 milliamps, which permits operation in a continuous mode for five weeks. Time control for this system is provided with 60-TL True Time Instruments radios (WWVB). The time code is manually fed into the system at the beginning and end of each record. Stability of the internal time control is $\pm 4.32 \times 10^{-4}$ secs/day. The drum recording velocity is 2 millimeters/second, which permits reading of arrival times of impulsive signals with an error of about $\pm .05$ seconds.

Field Operation

The stations were operated in different places for short periods of time in order to determine a local level of microearthquake activity and the levels of seismic noise. On June 20, 1977 the permanent array (RESCEP), was installed in the area of Cerro Prieto, and consisted of three stations with vertical seismometers (QKP, SON, TAM) and two stations with vertical and horizontal seismometers (CPR, TLX). The location of the stations is shown in Figure 1.

Geographic coordinates for the stations are listed in Table 1, which also shows the gain

level at which each station has operated since June 20, 1977. The level of seismic noise in the valley is quite high during the day, decreasing significantly during the night, and thus all the stations except QKP were operated at the minimum gain of 3.9×10^3 (-60 dB), giving a noise level on the trace of the seismogram of .5 millimeters peak-to-peak. Seismometers were located in concrete bases 2 meters deep, resulting in a decreased noise level of about a factor of 2 with respect to observations on the surface. The characteristic frequency of the micro-seismic noise is about 2 Hz. This high level of seismic noise is primarily related to the intense agricultural activity in the valley (and possibly to geothermal activity in the case of the Nuevo León station). The difference in noise level observed on the valley stations, with respect to the station QKP, is probably a result of effects of amplification in the low rigidity sediments of the valley.

DATA ANALYSIS

The results of this study are based on precise relative locations and composite focal mechanism solutions. Most of the better data (larger events) was from swarms of events. Swarms occurred in the following localities: the region around the Cerro Prieto geothermal camp (September 28, 1977), near the exploration well PRIAN (October 15, 1977), near the southern extreme of the Imperial fault near Ejido Tlaxcala (January 17, 1977) and in the vicinity of Ejido Victoria (March 10, 1978). The data base for the study during this period was arrival times of P and S phases and polarities of P waves registered on the stations of the Cerro Prieto seismic array RESCEP (1977-1978). For determination of epicenters and focal depths events characterized by impulsive arrivals, allowing confident readings of the P and S wave arrivals, were selected from RESCEP recordings.

The average spacing of the stations of RESCEP (Figure 1) is about 20 km. This provides good control for the epicentral determinations and focal depths of events located in the interior of the array. Data from the swarms of September 28, 1977, October 15, 1977, January 10, 1978 and March 10, 1978 were particularly important as data for "master events" for the relative determinations of epicenters, to be discussed later. The locations of these events are shown in Figure 1. Table 2 gives their hypocentral coordinates and coda magnitudes.

In order to achieve the maximum level of precision in the hypocentral determinations the arrival times for the P and S phases were carefully read by several different persons using magnifying glasses with the magnification of 6X. Data thus obtained were compared to determine the standard errors in the accuracy of the arrival times ($\pm .05$ seconds).

The method of relative location used in this study is simple and effective. The method has been described by Johnson and Hadley (1976) and is described briefly here. The method consists of two parts. First, one or more events (by zone) are selected and designated master events. Criteria for selection is primarily the existence of impulsive P and S wave arrival times on all the stations. Then it is assumed that the

distance residuals in the location are brought about completely by station delays, i.e., by anomalies in the velocity structure in the vicinity of the station. The remaining events are located using these time delays as station corrections. In this way a high level of precision is obtained in the relative locations (equivalent to fixing the relative location vector from the relative times between the event and the master event). The major advantage of this method for relative locations is that it provides a clearer picture of the distribution of seismicity. If eventually better knowledge of velocity structure is obtained it will be possible to refine the locations. However, we believe that the basic conclusions obtained here will not be changed critically.

In order to determine the velocity of the S wave from the velocity of the P wave, the ratio V_p/V_s was determined using a Wadati diagram as shown in Figure 4. Approximately 80 data points from arrival times of the P and S phases, read on the vertical and horizontal components, were used. Times of the P and S phases are determined relative to earliest P wave arrival times. A linear correlation between S and P times gives a value of V_p/V_s of 1.67, which is less than the expected value of 1.73 (for a Poisson's ratio of 1/4th), and is significantly different from the value of 2.5 reported by Majer and McEvilly (this volume) in a study carried out in the immediate vicinity of the Cerro Prieto geothermal wells, using vertical and horizontal seismometers.

Hypocentral determinations were obtained utilizing the location program HYPO 1975 (Lee and Lahr, 1975). The model of velocities used for the locations has been taken from similar studies in the Imperial Valley. The model is shown in Figure 5. The abrupt continuities in this model were smoothed by introducing thin layers with gradual changes in velocity to diminish the destabilizing effects of abrupt layers on the determination of focal mechanisms.

DISCUSSION OF RESULTS

Locations

Figure 6 shows the distribution of locateable epicenters for the seismic activity in the Mexicali Valley during the period of observation January, 1977 - May, 1978. The general distribution of epicenters during this period of observation is not greatly different from the period shown in Figure 2, suggesting that both sets of determinations are relatively reliable. Events as small as M approximately 0.5 were located, but due to the high noise level of the valley, and to intermittent problems in the operation of the array, the coverage of the seismic activity is not complete.

As can be observed in Figure 6, the seismic pattern shows a N-S trend connecting the northwest end of the Cerro Prieto fault with the southeast end of the Imperial fault. The seismicity shows little activity along the surface traces of the Imperial fault between the station TAM and the International Border. (In contrast during 1969 Lomnitz *et al.*, 1970 found significant activity along this section of the Imperial fault.) The concentration of events in the vicinity of Ejido Victoria (close to the station SON) corresponds mostly to the "Victoria Swarm" of March 10-23,

1978, which consisted of approximately 500 events. The magnitudes of the two largest events were 4.7 and 5.0. The distribution of epicenters suggests that the activity of the swarm involved predominantly the NW trending Cerro Prieto fault, a parallel en-echelon fault, and NS connecting faults. This interpretation is also suggested by the composite focal mechanisms for these events.

A diffuse pattern of seismic activity is observed east of the Cerro Prieto fault. Near the station QKP an aftershock sequence of a May 5, 1978 earthquake occurred, consisting of about 1500 events of magnitude less than 1. There is also diffuse seismic activity northwest of Cerro Prieto probably associated with the San Jacinto fault zone (although these events occurred outside of the array and their locations are poorly constrained).

A special study was made of the aftershocks of the January 17, 1977 event of magnitude 4.2 (CALTECH) at the extreme southeast end of the Imperial fault (near point A in Figure 6). During a period of observation of 48 hours, beginning 36 hours after the main event, 40 aftershocks were recorded, of which it was possible to locate 10. The estimated focal depths varied from 6 to 13 km.

Composite Fault Plane Solutions

The focal sphere projections of the polarity of first arrivals for certain groups of events, labelled A, B, C and D in Figure 6, were plotted on equal area projections (upper hemisphere). If all the events in the group have the same fault orientation, this composite projection will indicate this orientation, even though only a few stations are used.

The composite fault plane solution for the events in group A (January 17, 1977) is shown in Figure 7. It indicates either right lateral motion along a NW trending fault or left lateral motion along a conjugate NE trending fault. If the right lateral interpretation is taken, then the epicenter locations suggest at least 3 en-echelon faults, parallel to the Cerro Prieto fault. On the other hand, if the left lateral interpretation is taken, the epicenters could also represent some left lateral conjugate faulting.

The composite fault plane solution for the events located in the neighborhood of the exploration well PRIAN (group B, Figure 6) is poorly constrained but suggests dip-slip motion on a nearly vertical fault. The composite fault plane solution for the events in the vicinity of the Cerro Prieto geothermal steam wells (group C, Figure 6) indicates that the activity involves predominantly normal faulting, with a dip of 60° to the southeast, or 30° to the northwest, (Figure 8). The former is consistent with the results of structural geology studies carried out in the area of production by Puente and de la Peña (this volume). The composite fault plane polarity data for group D (Figure 9) also suggests normal faulting, although the data are not sufficient to accurately constrain the solution. The dashed lines indicate the same fault planes as in Figure 8 and is consistent with the data, with the exception of one point.

The composite fault plane solution for group E (Figure 10, swarm of March 10-23, 1978) is well constrained and indicates right lateral strike-slip along a NW trending fault (azimuth

330°) or a left lateral motion along a NE trending fault. The former solution is most likely because it is consistent with the orientation of the Cerro Prieto fault and the trends indicated in the epicentral locations (Figure 6). Some events in this swarm are not represented in the composite solution because their polarities were clearly inconsistent with the solution. They may represent dip-slip faulting occurring along with the strike-slip faulting.

Interpretation

The pattern of seismicity and the composite fault plane solutions described above suggest that the distribution of tectonic deformation (seismic slip) in the Mexicali Valley occurs principally along two tectonic trends: 1. faults parallel to and including the Imperial-Cerro Prieto transform fault system, 2. a system faults oblique to the Imperial-Cerro Prieto trend with at least some normal faulting.

The results of previous studies in the Salton Province and in the Gulf of California (Hill *et al.*, 1975; Lomnitz *et al.*, 1970; Thatcher and Brune, 1971; Reichle *et al.*, 1976; Weaver and Hill, 1978) indicates that the regional tectonic forces induced by the relative motion of the Pacific plate (northwest) with respect to the American plate, produces tensional tectonic forces in the Cerro Prieto graben, and causes crustal spreading and thinning. Local spreading of the crust is required by the geometry of the local offset of the Imperial-Cerro Prieto fault system. Our data, along with the geological studies (Puente and de la Peña, this volume) indicates that in the interior of the Cerro Prieto graben the crust is broken into a series of blocks bounded by planes oriented parallel to the Imperial-Cerro Prieto system (as observed at points A and E in Figure 6) and by an oblique set of fractures with some normal faulting, indicating tension in a NW-SE direction, indicated by the distribution of seismicity in the graben and by the composite focal plane solutions at points B, C and D. When this system of fracturing is viewed in the light of the model of Hill (1977) it suggests that swarms occur as a result of injection of magmatic fluids. Existence of these complex fracture zones in the crust also may explain the high heat flow observed in the Mexicali Valley, since the fractures would produce zones of high permeability through which the hot brines could flow.

The results of this study have been very encouraging, and indicate that, with improved coverage and accuracy, important aspects of tectonics of the Cerro Prieto steam field will be revealed. A six station telemetered digital seismic array designed for this purpose has been installed by CICESE, with funding from CFE and CICESE, and is now in operation.

ACKNOWLEDGEMENTS

This work was financed jointly by the Executive Coordinator of Cerro Prieto (CFE) and CICESE, through the Institute of Electrical Research (IIE).

We would like to specially acknowledge the encouragement and support for this study by Eng. Héctor Alonso (CFE), Eng. Guillermo de la Garza (IIE), and Dr. Pablo Mulás (IIE).

We have also benefited from discussions about the geology and geophysics of Cerro Prieto with Eng. Héctor Alonso, Eng. Antonio Razo, and Eng. I. Puente. We are especially thankful to L. Garcilazo, J. Soárez, J. Hinojoza and J. Martínez for assistance in reading records and field work.

The data from the earlier 1971-1975 period was obtained with funds from the National Science Foundation Grant #DES74-03188 and National Aeronautics and Space Administration Grant NASA NGR-05-009-246. Alejandro Nava and Steve Day carried out the field operations during this period and Steve Day assisted in some of the data analysis.

We also appreciate the efforts of Neenah Rohner and Rosi Martínez, who typed the English and Spanish versions of this paper.

TABLE AND FIGURE CAPTIONS

Table 1. Geographic coordinates and gain settings (maximum magnification of 4×10^6) for the stations.

Table 2. Dates, hypocentral coordinates, and coda magnitudes of the "master events" for relative determination of epicenters.

Figure 1. Regional map of the Cerro Prieto area. The solid dots represent the permanent stations of the Cerro Prieto Seismic Array (RESCEP). The open circles represent temporary stations operated for the January 1977 events and for the March 1978 Victoria swarm. The solid triangles represent some of the permanent regional stations.

Figure 2. Seismicity of the Cerro Prieto region from 1971-1975. Solid triangles represent local stations operated in 1974-1975.

Figure 3. Magnification curve for the seismographs used in this study.

Figure 4. Wadati diagram for P and S wave arrival times in the Cerro Prieto region.

Figure 5. Velocity model used in this study.

Figure 6. Seismicity of the Cerro Prieto region, 1977-78. The solid triangles represent permanent stations of the Cerro Prieto Seismic Array (RESCEP).

Figure 7. Composite focal mechanism plot for the aftershocks of the January 17, 1977, earthquake. Symbols: o = dilation, ● = compression.

Figure 8. Composite focal mechanism plot for earthquake swarms of September 29 and October 15, 1977. Symbols: o = dilation, ● = compression.

Figure 9. Composite focal mechanism plot for the events of Group D (see Figure 6). Symbols: o = dilation, ● = compression.

Figure 10. Composite focal mechanism plot for the earthquake swarm of March 10-21, 1978. Symbols: o = dilation, ● = compression.