

Estudio sismológico del campo geotérmico de Los Humeros, Puebla, México. Parte I: Sismicidad, mecanismos de fuente y distribución de esfuerzos

Javier Lermo¹, Yanet Antayhua¹, Luis Quintanar² y Cecilia Lorenzo³

¹Instituto de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad Universitaria, 04510, México D.F. ²Instituto de Geofísica, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad Universitaria, 04510, México D.F. ³Comisión Federal de Electricidad, Gerencia de Proyectos Geotermoeléctricos, Morelia, Mich. Correo: jles@pumas.iingen.unam.mx

Resumen

Se analiza la distribución en superficie y en profundidad de los sismos ocurridos en el campo geotérmico de Los Humeros, Puebla (México) durante el periodo 1997-2004. Los datos corresponden a 95 sismos registrados por más de cinco estaciones permanentes y temporales instaladas por la Comisión Federal de Electricidad (CFE) y el Instituto de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México (I de I, UNAM), cuyas magnitudes de duración son menores o iguales a 3.6 Md y profundidades focales que no sobrepasan los 4.0 km. Asimismo, se realizaron mecanismos focales simples y de tensor de momento, además de la correlación del número de sismos registrados por dos estaciones de la red permanente (números S05, S06) con la inyección y/o reinyección de agua, producción de vapor de agua y la tectónica local. Los resultados en superficie y en profundidad muestran una intensa actividad sísmica en la zona norte del campo, alrededor de los pozos inyectores (I29, I38), mientras que los mecanismos focales simples y de tensor de momento evidencian una heterogeneidad de esfuerzos, sugiriendo que un alto porcentaje de la actividad sísmica ocurrida en Los Humeros son “inducidos”, principalmente por el proceso de inyección y/o reinyección de agua al subsuelo del campo geotérmico y por la posterior explotación del vapor.

Palabras clave: Los Humeros, sismicidad inducida, mecanismos focales, distribución de esfuerzos.

Seismologic study of Los Humeros geothermal field, Puebla, Mexico. Part I: Seismicity, source mechanisms and stress distribution

Abstract

The distribution in surface and depth of the earthquakes generated in the geothermal field of Los Humeros, Puebla (México) through 1997-2004 is analyzed. Data correspond to 95 earthquakes registered by more than five permanent and temporary stations installed by Comisión Federal de Electricidad (CFE) and the Instituto de Ingeniería of the Universidad Nacional Autónoma de México (I de I, UNAM). The events duration magnitudes are equal or lower than 3.6 and focal depths do not exceed 4.0 km. Also, simple focal mechanisms and moment tensors were made, in addition to a correlation between the number of earthquakes registered by two stations of the permanent network (numbers S05, S06) and the injection and/or reinjection of water, water steam production and the local tectonics. The results in surface and depth show an intense seismic activity in the north zone of the field around the injection wells (I29, I38), whereas the simple focal mechanisms and moment tensors demonstrate a heterogeneity of stresses, suggesting that a high percentage of the seismic activity in Los Humeros is “induced”, mainly by the process of injection and/or reinjection of water to the subsurface of the geothermal field and the later extraction of steam.

Key words: Los Humeros, induced seismicity, focal mechanisms, stress distribution.

1. Introducción

El Campo Geotérmico de Los Humeros (CGLH) se ubica en el extremo SE del Cinturón Volcánico Mexicano (CVM), y a 200 km de la ciudad de México (Figura 1). Los Humeros, al igual que otros campos geotérmicos existentes en México y el mundo, se desarrolló dentro de una caldera volcánica cuya constitución geológica y tectónica hicieron propicio su alto potencial geotérmico económicamente rentable (Cedillo, 2000). Desde 1982 hasta la actualidad se han perforado 41 pozos entre productores e inyectores, con una capacidad de 35 MW en 7 unidades de 5 MW cada una (Quijano-León y Gutiérrez Negrín, 2000). En general, se ha observado que cuando un sistema natural es sometido a los procesos de inyección y explotación del subsuelo (agua, vapor de agua, gas y petróleo), el estado de esfuerzos puede ser alterado considerablemente desencadenando muchas veces en una intensa actividad sísmica (Gupta, 2002; Rutledge *et al.*, 2004; Ake *et al.*, 2005).

La importancia del monitoreo sísmico en el CGLH se debe básicamente a la ocurrencia del sismo del 25 noviembre de 1994 ($M_d=4.6$), el cual ocasionó daños considerables en la infraestructura del campo geotérmico (Lermo *et al.*, 1999). En diciembre de 1997 la CFE instaló una Red Sísmica Telemétrica Permanente (RSTP) compuesta por 6 sismógrafos digitales triaxiales (S01, S02, S03, S04, S05, S06) y algunas temporales (PNCF, PSCF, CLCF, HUCF, T07, T08, T09) alrededor del campo geotérmico. En el presente estudio se utilizó la información sísmica registrada durante el periodo 1997-2004 proveniente de estas dos redes sísmicas, a fin de analizar la distribución de la sismicidad, conocer los mecanismos de fuente que la genera, el estado de esfuerzos del campo geotérmico y la relación de los sismos registrados en las estaciones permanentes (S05, S06) con los pozos (inyectores, productores) y la tectónica local.

2. Geología y tectónica

La geología del campo geotérmico de Los Humeros ha sido descrita por diversos autores (Pérez-Reynoso, 1978; Yáñez-García *et al.*, 1979; Viggiano y Robles, 1998a, 1998b; Cedillo, 2000; Arellano *et al.*, 2000). El basamento del CGLH está constituido por esquistos y rocas graníticas del Pérmico Tardío al Jurásico Temprano. Cubriendo al basamento, de manera discordante, aparecen las rocas del Triásico-Jurásico; éstas a su vez cubiertas por una secuencia marina del Jurásico Superior a Cretácico Superior. El basamento pre-volcánico está compuesto por rocas sedimentarias del Cretácico Superior que afloran al oeste, este y sur de la caldera de Los Humeros, sobreyaciéndole a ella una secuencia de andesitas e ignimbritas del Terciario. La primera acumulación de rocas volcánicas se habría efectuado aproximadamente hace 11 millones de años (Ma) y está constituida por derrames de andesita de hornblenda cubiertas parcialmente por derrames de andesitas de augita que procederían de los volcanes Cofre de Perote y Pico de Orizaba (5 Ma).

El vulcanismo más reciente está representado por coladas de lavas ácidas, básicas y rocas piroclásticas que se observan al centro de la caldera de Los Humeros (Figura 2a). Cedillo (2000) y Arellano *et al.* (2000), consideran que el siguiente evento debió ser de tipo explosivo por la gran cantidad de material volcánico expulsado, ocasionando probablemente el vaciado parcial de la cámara magmática y el colapso

del techo de la misma, originándose así la caldera de Los Humeros. Posteriormente, se sucedieron una serie de derrames de andesita basáltica y la emisión de grandes cantidades de pómez que cubrieron a la región (0.08 a 0.04 Ma). La fase final de la actividad volcánica del área está representada por derrames de composición basáltica que muestra una estrecha relación con el origen de la caldera del Xalapasco.

Tectónicamente, el CGLH presenta 3 estructuras caldéricas (Los Potreros, Los Humeros y El Xalapasco) formadas en los diferentes eventos volcánicos ocurridos en el campo (Figura 2b). Estudios geofísicos de reflexión sísmica (COMESA, 1998), gravimetría (Campos-Enríquez *et al.*, 1992) y transitorio electromagnético (TDM) (Seismocontrol S.A., 2005) revelaron también la existencia de sistemas de fallas orientados principalmente en las direcciones NW-SE (Malpaís, Antigua, Los Humeros, Nueva, Imán), NE-SW (Pamela, Morelia, Parajes) y E-W (Las Papas). La falla Los Humeros es la única que puede ser observada en superficie y de acuerdo a los estudios de reflexión sísmica estaría conectada en profundidad con el yacimiento superior y inferior, a través de las cuales ascienden los fluidos de alta temperatura hasta la superficie para dar lugar a las manifestaciones termales ubicadas sobre la primera (Seismocontrol S.A., 2005). Asimismo, los análisis estructurales realizados en la falla Los Humeros muestran un movimiento de tipo normal con buzamiento hacia el este.

La perforación de los pozos en el CGLH permitió la identificación de 9 unidades estratigráficas del subsuelo, espesor, sistemas de fallas, topografía del basamento y la ubicación en profundidad de los dos yacimientos geotérmicos, uno superior formado por andesitas e ignimbritas y otro inferior compuesto por andesitas y basaltos que están separadas por una capa confinante de toba vítrea (Cedillo, 2000; Arellano *et al.*, 2000). La Figura 2c, muestra el perfil estratigráfico representativo B-B' del CGLH, orientado en dirección este-oeste (E-W).

3. Estudios previos de sismicidad

Los estudios de sismicidad antes de la explotación del campo geotérmico de Los Humeros fueron mínimos (Ponce y Rodríguez, 1977); generalmente fueron realizados durante la explotación (Lermo *et al.*, 1999; Lermo *et al.*, 2001, Lermo *et al.*, 2002; Lermo *et al.*, 2005). Los resultados obtenidos por Ponce y Rodríguez (1977), muestra una mínima actividad sísmica local relacionada al campo. En el campo se cuenta con información sísmica desde 1994, debido a la ocurrencia del sismo del 25 de noviembre de ese año a las 18:52 (hora GMT). Este sismo superficial (2.0 km), fue sentido en las ciudades de Teziutlán y Puebla con una intensidad de III en la escala de Mercalli Modificada (Fernández *et al.*, 1996; reporte sísmico preliminar-SSN). Sin embargo, intensidades de VIII MM fueron observadas en el campo geotérmico de Los Humeros, ocasionando daños en la infraestructura de CFE (Lermo *et al.*, 1999). Con este antecedente, CFE instaló la red sísmica de Los Humeros compuesta por 6 estaciones distribuidas alrededor del campo geotérmico.

Los estudios realizados con la información obtenida han permitido observar que desde diciembre 1997 hasta enero de 1999 la sismicidad se concentró principalmente en la zona norte (ZN) del campo geotérmico, es decir, alrededor de los pozos inyectoros I29 e I38 alcanzando profundidades del orden de 4.0 km, pero a partir de febrero de 1999 la sismicidad también se observó en la zona sur (ZS) del campo. En general, estos sismos se distribuyen a lo largo de la falla Los Humeros. Precisamente al sur de esta falla ocurrió un sismo de magnitud moderada ($M_w=3.6$) y profundidad superficial (2.0 km) el 21 de enero de 2002. El análisis de los parámetros de fuente realizados por Lermo *et al.* (2002), mostraron concordancia con las características estructurales de la falla Los Humeros.

4. Datos y análisis de sismicidad

4.1. Redes sísmicas

La información sísmica utilizada en el presente estudio proviene de dos redes sísmicas instaladas alrededor del campo geotérmico de Los Humeros (Figura 3), una Red Sísmica Telemétrica Permanente (RSTP) y una Red Sísmica Temporal (RST). La primera red, fue instalada el 1 de diciembre de 1997 y está compuesta por 6 estaciones sísmicas (S01, S02, S03, S04, S05, S06) las cuales contienen un registrador digital (Altus K2) acoplado a tres sensores de velocidad (Kinematics, Ranger SS-1) de periodo corto (1 s) en sus tres componentes: vertical (Z), norte-sur (N-S) y este-oeste (E-W). La ubicación original de las 6 estaciones se conservó hasta febrero de 2002. Posteriormente, fue necesaria la reubicación de 4 estaciones (S01, S02, S03, S04) por problemas de robo, ruido y lejanía a la zona de mayor actividad sísmica (T07, T08, T09, T11). La red temporal fue instalada los meses de julio a octubre de 1999 y 2000 alrededor de la estación permanente S05 y los pozos inyectoros I29 e I38. Esta red estuvo compuesta por 4 estaciones de banda ancha (Reftek-Guralp), propiedad del Instituto de Ingeniería (I de I) de la UNAM (HUCF, PNCF, CLCF, PSCF). Cada una de las estaciones estuvo conformada por un registrador Reftek 72A-08 de 24 bits y un sismómetro de 3 componentes (Z, N-S y E-W) marca Guralp CMG-40T de periodo natural de 30.8 s. Ambas redes registraron con una frecuencia de muestro de 100 muestras por segundo (100 m/s).

En la Figura 3 se presenta la distribución de la RSTP (flechas verdes), estaciones reubicadas (flechas blancas) y RST (flechas amarillas) del campo geotérmico de Los Humeros.

4.2. Datos

La información sísmica utilizada en este estudio corresponde al periodo de diciembre de 1997 a diciembre de 2004 y proviene de la RSTP y RST instaladas alrededor del campo geotérmico. Durante el periodo de estudio las estaciones sísmicas registraron numerosos sismos locales, de los cuales se seleccionaron 95 sismos registrados en 5 o más estaciones y fases de ondas P y S fácilmente identificables, a fin de optimizar la localización hipocentral de los mismos (Antayhua, 2007). Un ejemplo de sismo registrado por las redes del campo geotérmico se presenta en la Figura 4 y corresponde a los registros del sismo del 11 de julio de 1999. El programa utilizado para su localización es el SEISAN versión 8.0 (Havskov and Ottemoller, 2003). Este programa al igual que otros, utiliza como datos de entrada: nombre de la estación, coordenadas geográficas (latitud y longitud), elevación de la misma, la lectura de los tiempos de arribo de las ondas P (T_p), S (T_s), la duración total del sismo, una relación de velocidad (V_p/V_s), un modelo de velocidad y una ecuación para el cálculo de la magnitud de duración. En este estudio, la lectura de los tiempos de arribo se ha realizado con una precisión de 0.01 s para la onda P y de 0.05 s para la onda S. La relación $V_p/V_s=1.76$ utilizada para la localización se obtuvo construyendo la curva de Wadati a partir de los tiempos de arribo de las ondas P y S. Asimismo, el modelo de velocidad corresponde al propuesto por Lermo et al. (2000), para el cual se utilizó el perfil de reflexión sísmica realizado por COMESA (1998). La velocidad de la onda P (V_p) y la profundidad equivalente de 9 estratos de la que está compuesta el subsuelo de Los Humeros (Tabla 1) fue obtenida siguiendo la metodología descrita por Dix (1995). La ecuación de magnitud de duración corresponde al propuesto por Chavacán et al. (2004), donde:

$$Md = -1.61947 + 2.336177 \log_{10}(T) + 0.00052(D),$$

siendo Md la magnitud de duración en grados corregida a partir de la ecuación propuesta por Lee *et al.* (1972), T la duración total del sismo en segundos y D la distancia epicentral en kilómetros.

Profundidad (km):	0.00	0.24	0.65	1.25	1.79	1.93	2.13	2.37	30.00
Vp (km/s):	1.24	1.94	2.85	3.54	3.69	3.90	4.14	5.18	6.00

Tabla 1. Modelo de velocidad obtenido por Lermo *et al.* (2001). **Vp** la velocidad de la onda P en kilómetros por segundo.

Los resultados muestran errores de localización hipocentral (latitud, longitud y profundidad) menores a 1 km (figura 5b), profundidades focales que no sobrepasan los 4 km y magnitudes de 0.8 a 3.6 Md. Estas características en profundidad y magnitud de los sismos ocurridos en el campo geotérmico de Los Humeros fueron observados también por Lermo *et al.* (2002, 2005).

4.3. Sismicidad

En la Figura 5a se presenta la distribución en superficie de los 95 sismos seleccionados, además de sus elipses de error (Figura 5b). Tal como se observa en la Figura 5a, los sismos se distribuyen principalmente en la ZN del campo geotérmico y muy pocos en la ZS. Asimismo, la mayor concentración se observa sobre los pozos inyectoros I29 e I38 y al norte de la falla Los Humeros. Al norte de esta falla se ubica el epicentro del sismo del 25 de Noviembre de 1994, el mismo que causó daños en la infraestructura del campo geotérmico (Lermo *et al.*, 1999); mientras que al sur de la falla Antigua se localiza el sismo del 21 de enero del 2002. Ambos sismos (1994 y 2002) son hasta la actualidad los de mayor magnitud ($Md=4.6$ y $Mw=3.6$) ocurridos en Los Humeros. Las elipses de error de la localización de los epicentros se muestran en la Figura 5b; las elipses en color negro representan a sismos con errores menores a 1 km y en color rojo a errores menores a 2 km.

La distribución en profundidad de los 95 sismos se presenta en el perfil estratigráfico B-B' orientado en dirección E-W (Figura 6). En este perfil representativo del campo geotérmico de Los Humeros, se observa que los sismos se localizan por debajo de la ubicación de los dos pozos inyectoros (I29, I38), entre las fallas Antigua y Los Humeros, con profundidades focales del orden de 4.0 km. Asimismo, se observan dos alineamientos de sismos hasta la profundidad de 2.5 km (yacimiento inferior). Por debajo de los 2.5 hasta los 4 km los sismos se localizan básicamente en la capa de calizas, lo que sugiere probablemente el fracturamiento de esta capa por la presión ejercida por el proceso de inyección y producción.

5. Mecanismos de Fuente

5.1. Mecanismo focal simple

Para obtener los mecanismos focales simples y de tensor de momento, primero se analizó la polaridad de la onda P registrada en la estación S05 (la más cercana al agrupamiento sísmico), debido a que durante el periodo de estudio (diciembre 1997 a diciembre 2004) los sismos se registraron de manera intercalada con polaridades compresionales (C) y dilatacionales (D). En la Figura 7 la dirección de las

flechas en color amarillo representan las polaridades C y D. Esta característica podría sugerir que el esfuerzo generado en el campo se debe a fuentes diferentes. Por tal razón, los mecanismos focales simples y de tensor de momento son analizados considerando esta particularidad.

Se obtuvo la solución de los mecanismos focales simples para 28 de los 95 sismos seleccionados, debido a que se registraron en 5 o más estaciones y con polaridad de onda P impulsiva. Para tal fin, se ha seguido la metodología descrita por Reasenberg and Oppenheimer (1985) y la opción “focmec” del programa de procesamiento SEISAN (Havskov and Ottemoler, 2003). En la Figura 8 se muestran mecanismos focales simples obtenidos para 8 sismos. Los mecanismos con polaridad C y D están representados con barras en color café y azul, respectivamente. Se considera que el plano de falla de los mecanismos sigue la tendencia de las fallas del campo geotérmico de Los Humeros (NNW-SSE aproximadamente), pero las soluciones de los mecanismos no muestran concordancia con las fallas. Por el contrario, corresponden a diversos tipos de fallamientos: transcurrencia lateral derecha, lateral izquierda, normales e inversos con pequeñas componentes de transcurrencia. Esta heterogeneidad de fallamientos estaría asociada con los procesos de inyección y/o reinyección de agua y producción del vapor geotérmico.

5.2. Mecanismo de tensor de momento

Básicamente, los mecanismos focales simples obtenidos para 28 sismos han permitido conocer los parámetros de los planos de falla (azimut, buzamiento y ángulo de desplazamiento). Otro método para conocer estos parámetros también lo constituye la inversión del tensor de momento. Este método a diferencia de la anterior invierte las formas de onda, utilizando para ello las funciones de Green que son generados a partir del modelo de velocidades de la zona de estudio, suficientemente conocido para explicar la propagación de las bajas frecuencias. El programa utilizado para la inversión corresponde a Dreger (2002), donde la representación general de la fuente sísmica se considera como una fuente puntual en el espacio y tiempo según la relación:

$$U_n(x, t) = M_{ij} G_{nij}(x, z, t)$$

Donde: U_n es la componente de desplazamiento observado, G_{nij} es la componente de las funciones de Green para especificar las orientaciones del par de fuerzas, M_{ij} es el tensor de momento sísmico escalar que describe la magnitud del par de fuerzas, ij son las direcciones geográficas. En esta distribución únicamente el tensor de momento desviatorio es resuelto utilizando mínimos cuadrados; así, M_{ij} es descompuesto en M_0 , tensor de momento de doble par de fuerzas y un vector lineal de compensación del tensor de momento (Jost y Herrmann, 1989). Para realizar la inversión el programa requiere de los parámetros hipocentrales, coordenadas geográficas de las estaciones, modelo de velocidad en espesores, además de un filtro adecuado para obtener las bajas frecuencias del sismo. La calidad de la solución de la inversión es mostrada gráfica y numéricamente. El porcentaje de la reducción de la varianza (Var. Red.) desde 0 a 100%, define la calidad de la solución y el valor más alto representa la buena calidad del mecanismo de tensor de momento.

En total, se invirtieron 34 sismos con 1, 2 y 3 estaciones. Los resultados de la inversión: parámetros de la falla, momento sísmico escalar (M_0), magnitud de momento (M_w), los ejes de presión (P) y tensión (T) y la calidad de la solución (Var. Red.) se presentan en la Tabla 2 y en la Figura 8. En esta figura se muestran únicamente 18 mecanismos de tensor de momento invertidos con 2 y 3 estaciones, 8 de los cuales se comparan con los mecanismos obtenidos con la polaridad de la onda P.

Sismo número	Nº Est. Inv.	Azimut A/B	Buz. A/B	Desplazamiento	M_0 (dina-cm)	Mw	Var. Red. (%)	T (°) Az/Buz	P (°) Az/Buz
4	1	92/352	81/14	-129/-39			86	211.4/26.8	326.9/40.4
5	1	274/5	89/83	173/1			93	229.6/10.7	139.4/0.8
6	1	106/16	86/86	176.4			77	331.1/2.8	240.9/2.8
10	1	267/3	77/68	157/14			81	255.6/30.5	161/7.7
13	2	194/342	78/14	-83/-121	6.85×10^{18}	1.9	69	277.8/32.6	113.5/56.4
14	2	292/100	67/24	95/79	8.09×10^{19}	2.6	61	210.9/67.7	18.4/21.9
15	2	48/318	89/84	174/-1	2.42×10^{19}	2.2	53	182.8/4.2	273.2/4.2
16	2	267/17	69/49	135/28	1.45×10^{19}	2.1	45	223/46.4	326.5/12.5
17	2	232/340	63/59	35/148	7.48×10^{18}	1.9	70	286.9/2.6	194.4/43.4
18	2	248/347	78/57	146/15	7.44×10^{19}	2.5	58	201/34.5	302.2/15.8
19	2	94/186	88/56	34/178	2.09×10^{19}	2.2	50	145.1/21	44.5/25.6
22	3	226/329	68/61	149/25	4.74×10^{18}	1.8	34	185.4/37.5	278.9/4.5
24	1	352/243	65/55	39/148			75	211.5/44.7	115.5/6.1
25	1	292/179	61/55	138/37			91	54.2/3.7	148.4/48.6
26	1	228/319	85/84	174/5			89	183/11.5	273.9/4.4
27	2	317/193	78/20	73/145	7.62×10^{19}	2.6	47	206.3/53.9	61.1/30.9
28	1	188/284	81/56	146/11			70	140.7/30	240.3/16.2
29	2	302/209	78/78	13/168	8.47×10^{18}	2.6	65	165.7/18.4	75.3/1.3
30	2	198/290	81/75	16/171	4.22×10^{19}	2.4	51	244.3/2.4	153.7/15.2
32	1	191/286	81/66	156/10			95	144.8/26.8	241.6/13.3
33	2	333/243	89/78	12/179	1.45×10^{19}	2.1	49	198.6/8.5	107.4/8.5
37	2	190/281	89/53	37/179	1.85×10^{19}	2.1	44	241.8/24.2	139/26.2
44	1	314/214	72/62	30/160			81	176.6/33.5	82.2/6.6
49	2	317/202	62/51	45/143	2.36×10^{19}	2.2	67	174.9/50.5	77.3/6.2
54	1	210/313	69/61	31/155			86	263.3/6.0	168.7/37.7
56	1	217/311	81/67	23/170			83	266/10	171.7/23.3
61	2	286/18	78/78	12/168	3.25×10^{20}	2.9	53	332.2/1.9	241.7/15.2
72	2	193/359	46/45	100/80	9.67×10^{19}	2.6	44	181.5/82.9	276.1/0.6
75	1	60/165	69/55	142/26			67	18.1/40.4	115.1/8.2
78	1	341/250	89/71	19/179			66	207.1/15.4	114/11.2
79	2	26/290	86/31	59/173	5.5×10^{19}	2.5	42	267.5/40.6	142/34.2
80	1	272/181	89/56	34/178			72	141.9/24.4	41.3/22.2
82	1	203/358	55/38	105/70			61	157.3/74.8	282.3/8.9
93	2	194/299	69/55	142/26	3.22×10^{21}	3.6	67	152.1/40.4	249.1/8.2

Nº Est. Inv. es el número de estaciones utilizadas para la inversión; Azimut, Buz y Desplazamiento, representa el azimut, buzamiento y ángulo de desplazamiento de los planos de falla A y B en grados; M_0 es el momento sísmico en dinas-centímetro y Mw magnitud de momento en grados; Var. Red. es la reducción de la varianza en porcentaje; T y P los ejes de tensión y presión en grados. La diferencia en color representa a sismos registrados con polaridad de onda P compresional (color negro) y dilatacional (color azul)

Tabla 2. Solución numérica de los planos de falla obtenidos de la inversión del tensor de momento.

Al igual que a las soluciones de mecanismos focales simples, los de tensor de momento presentan una heterogeneidad de fallamientos. En general, los mecanismos que predominan en el campo geotérmico de Los Humeros son de transcurrancia lateral derecha e izquierda, característica similar a lo observado en el campo de gas de Carthage Cotton, Texas (Rutledge *et al.*, 2004), lo que sugiere nuevamente la

existencia de una heterogeneidad de esfuerzos asociados probablemente a los procesos de inyección y producción. Obviamente no se descarta que algunos sismos tengan un origen netamente tectónico.

5.3. Estado de esfuerzos

Para conocer el estado de esfuerzos del campo se ha utilizado la información obtenida de la inversión del tensor de momento, azimut, buzamiento y los ejes de presión y tensión de ambos planos nodales (A, B) mostrados en la Tabla 2. Para representar la distribución de los ejes (T, P) en el perfil estratigráfico orientado en dirección E-W de Los Humeros, se utilizó el programa RAKE (Louvari, 1995). Asimismo, para conocer la orientación preferencial de estos ejes se ha realizado la proyección estereográfica en el plano inferior de Schmidt y el diagrama de rosas (Antayhua, 2007).

En la Figura 9a se presenta la distribución de los esfuerzos de P (flecha en color rojo) y T (flecha en color azul) y se observa que los ejes de presión presentan una orientación preferencial NW-SE; mientras que la orientación de T es heterogénea. Los círculos en color café y azul, diferencian a los sismos compresionales y dilatacionales respectivamente. La observación de la distribución de los ejes muestra una rotación de los ejes circundando completamente al agrupamiento de sismos. Por otro lado, la proyección estereográfica de los ejes de P y T y el diagrama de rosas (Figura 9b), muestra que el esfuerzo máximo principal (eje P) asociado al esfuerzo local, está orientado principalmente en dirección NE-SW y el esfuerzo mínimo principal (eje T) asociado al esfuerzo regional, se orienta en dirección N-S (Antayhua, 2007), coincidiendo con la orientación del esfuerzo observado en la parte central del Cinturón Volcánico Mexicano (CVM), descrito por Suter *et al.* (1997) y García-Palomo (2002).

6. Relación de los sismos con los pozos y la tectónica local

Para conocer si existe una relación entre el número de sismos y la cantidad de vapor de agua inyectada y producida, se ha utilizado la información sísmica local ($T_s - T_p \leq 3.5$ s) registrada en las estaciones S05 y S06, ubicadas en la ZN y ZS del campo, así como los datos de inyección de los pozos I29 e I38 y de mayor producción P1, P12, P15, P16, P31, P35 y P37. La elección de estas dos estaciones antes mencionadas se debe básicamente a que se encuentran en una ubicación adecuada y han estado en operación en el mismo lugar desde su instalación hasta la actualidad. Aunque se dispone de datos sísmicos desde 1997, la estadística involucra únicamente desde enero 1999 a julio 2005. Los datos se dan en términos del número de sismos por mes (N° sismos/mes) y toneladas por mes (Tn/mes) de agua inyectada al yacimiento geotérmico y vapor producido.

La comparación visual realizada entre número de sismos en la estación S05 y la masa de fluido inyectada en el pozo I29 se muestra en la Figura 10a, donde se observa que la sismicidad aumenta cuando la cantidad de inyección de agua al subsuelo aumenta y viceversa. Sin embargo, si se analiza la inyección en el pozo I38 no se observa una relación clara, debido probablemente a que la cantidad inyectada en este es menor que en el pozo I29.

Por otro lado, en la Figura 10b se muestra el aumento de producción de vapor en 8 pozos (P1, P9, P12, P15, P16, P31, P35, P37) y los sismos registrados en la estación S06. La razón por la cual se realiza la evaluación en dicha estación, se debe precisamente a que en esta zona ocurrió el sismo de magnitud moderada ($M_w=3.6$) el 21 de enero del 2002. Los resultados muestran un ligero aumento de la

sismicidad en la estación S06 a partir de noviembre del 2003 y se prolonga hasta septiembre del 2004; sin embargo, un aumento significativo de la producción se observa principalmente en marzo del 2004, coincidiendo con el aumento significativo de sismos durante la fecha mencionada. Obsérvese que antes de la ocurrencia del sismo del 2002, la producción se mantenía casi constante y con tendencias de disminuir (P1, P9).

7. Discusión y conclusiones

La intensa actividad sísmica registrada desde diciembre de 1997 hasta diciembre del 2004 permitió localizar 95 sismos con magnitudes $M_d \leq 3.6$ y profundidades menores a 4.0 km en el campo geotérmico Los Humeros. Si se comparan los resultados sísmicos obtenidos por Ponce y Rodríguez (1977) antes del inicio de la explotación del campo, con el análisis sísmico durante la explotación, evidentemente la situación estable se revierte a una más dinámica.

La sismicidad en superficie y profundidad registrada desde diciembre 1997 a diciembre de 2004 en el campo se localiza en la zona norte, alrededor de los pozos inyectoros I29 e I38 y sobre la traza de la falla Los Humeros. En profundidad, los sismos ocurren entre 1.8 a 4 km sugiriendo un intenso fracturamiento y/o microfracturamiento a dichas profundidades. De acuerdo a las soluciones de mecanismos focales y de tensor de momento, en el campo ha ocurrido un fallamiento muy heterogéneo, predominando el de transcurrancia lateral derecha e izquierda como lo que observaron Rutledge *et al.* (2004) en el campo de gas Carthage Cotton en Texas.

La comparación visual realizada entre el número de sismos registrados en la estación S05 y S06 con el pozo inyector y en menor medida con la producción de algunos pozos (P1, P9, P12, P15, P16, P31, P35, P37), sugiere que el aumento o disminución de los sismos depende básicamente de la cantidad de inyección de agua al yacimiento. Asimismo, la ocurrencia del sismo del 21 de enero de 2002 habría ocasionado nuevas aperturas por las cuales habría una mayor circulación del fluido geotérmico, lo que en superficie se tradujo en un aumento en la producción principalmente en los pozos P1 y P9 (Antayhua, 2007).

Por tanto, se concluye que la distribución de los sismos, parámetros de fuente, distribución de esfuerzos y correlación con los pozos, demuestran que la mayoría de los sismos “son inducidos” y están asociados a la liberación de esfuerzos locales, ocasionados por los procesos de inyección y/o reinyección de agua al yacimiento geotérmico y en menor medida con la producción de vapor de agua; mientras que un porcentaje menor está relacionado con esfuerzos tectónicos regionales (Suter *et al.*, 1997; García-Palomo, 2002).

Agradecimientos

Los autores agradecen la colaboración de Comisión Federal de Electricidad (CFE), a la Gerencia de Proyectos Geotermoeléctricos, Departamento de Exploración, a los ingenieros: Raúl Maya, Magaly Flores, Saúl Venegas, Jesús Arredondo y Abelardo Vázquez. Asimismo, agradecen las correcciones y sugerencias del Dr. Gerardo García Estrada y el Ing. Luis C.A. Gutiérrez Negrín.

Referencias

- Antayhua, Y. (2007). Sismicidad en el campo geotérmico de Los Humeros-Puebla (1997-2004), su relación con los pozos y la tectónica local. Universidad Nacional Autónoma de México, Posgrado en Ciencias de la Tierra, Tesis de Maestría, 136 p.
- Arellano, M., A. García, M.R. Barragán, G. Izquierdo, A. Aragón, y A. Pizano (2000). Distribución inicial de presión y temperatura del campo geotérmico de Los Humeros. *Boletín Instituto de Investigaciones Eléctricas-Comisión, Federal de Electricidad*, 450p.
- Ake, J., M. Mahrer, D. O'Connell and L. Block (2005). Deep-injection and Closely Monitored Induced Seismicity at Paradox Valley, Colorado. *Bulletin of the Seismological Society of America*. Vol. 95, N° 2, pp. 664-683.
- Campos-Enríquez, J. O. y J. Arredondo-Fragoso (1992). Gravity study of Los Humeros caldera complex, Mexico; structure and associated geothermal system. *Journal Volc. Geotherm. Research.*, Vol. 49, pp. 69-90
- Cedillo, F. (2000). Hydrogeological model of the geothermal reservoirs from Los Humeros, Puebla, México. *Proceedings World Geothermal Congress, Kyushu-Tohoku, Japan*, May 28-June 10, pp. 1639-1644.
- Chavacán, M., J. Lermo y L. Quintanar (2004). Determinación de una escala de magnitud para temblores corticales en la parte central del Cinturón Volcánico Mexicano. *Memorias de la I Conferencia Internacional de Peligrosidad, Riesgo Geológico e Ingeniería Sísmica*, Santiago de Cuba, Cuba, pp. 1-4.
- COMESA (1998). Informe sismológico final (Vibrosismo). Sísmica 2D. Campo geotérmico de Los Humeros. Informe: RHU-002/98. Inédito.
- Dix, C. H. (1995). Seismic velocities from surface measurements, *Geophysics*, Vol. 20, pp. 68-86.
- Dreger, D.S. (2002). Time-Domain Moment Tensor Inverse Code (TDMT_INV). Version 1.1. University of California, Berkeley Seismological Laboratory (BSL). 18p.
- Fernández, S., Uribe, A., Flores, J.C., y Gómez, R. (1996). Estudio sismológico en el área del temblor de Xalapa de 1920, *Memorias del VII Simposium de Geofísica y Exploración*, Veracruz, Ver. pp. 365-370.
- García-Palomo, A. (2002). Vulcanismo y geología estructural de la región de Apan, Edos. de Hidalgo, Tlaxcala, Puebla y México. Tesis de Doctor en Vulcanología. Universidad Nacional Autónoma de México. 181 pp.
- Gupta, K. (2002). A review of recent studies of triggered earthquakes by artificial water reservoirs with special emphasis on earthquakes in Koyna, India. *ELSEVIER. Earth-Science Reviews*. Vol. 58, pp.279-310.

- Havskov, J. and L. Ottemoller (2003). SEISAN. The earthquake analysis software. Versión 8.0. Preliminary. Institute of Solid Earth Physics, University of Bergen, Bergen, Norway. 250 p.
- Jost, M. L. and R. Herrmann (1989). A Student's guide to and review of moment tensors. *Seis. Res. Lett.* Vol 60, pp. 37-57.
- Lee, W., R. Bennet y L. Meagher (1972). A method for estimating magnitude of local earthquake from signal duration. U.S.G.S. Open file report.
- Lermo, J., J. Guerrero, J. Soto y G. Machorro (1999). Procesado e interpretación de datos sísmicos de la red sismológica del campo geotérmico de Los Humeros, Pue. *Memoria del XII Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica*, Veracruz, México, pp. 127-136.
- Lermo, J., J. Soto, C. Lorenzo, H. Mijares y J. Flores (2001). Estudio de la sismicidad del campo geotérmico de Los Humeros, Pue. Fase III. Comisión Federal de Electricidad, Gerencia de Proyectos Geotermoeléctricos. Informe Técnico: DEX-HU-02/01, 48 p. Inédito.
- Lermo, J., C. Lorenzo, W. Kemper y H. Kemper (2002). Mantenimiento preventivo y calibración del equipo electrónico del campo geotérmico de Los Humeros, Puebla. Gerencia de Proyectos Geotermoeléctricos. Informe Técnico: GF-HU-00/2002. Inédito.
- Lermo J., C. Lorenzo, G. Espitia y Y. Antayhua (2005). Sismicidad en el campo geotérmico de Los Humeros, Pue. Instrumentación y operación de la Red Sismológica. Comisión Federal de Electricidad, Gerencia de Proyectos Geotermoeléctricos. Informe Técnico: GF-HU-01-05. Inédito.
- Louvari, H. (1995). Calculate the parameters of the second nodal plane and the parameters of P and T axes. Stress orientation. University of Thessaloniki Geophysical Laboratory, Greece. 22 p.
- Pérez-Reynoso, J. (1978). Geología y petrografía de Los Humeros. *Geomimet.* Vol. 91. pp. 97-106.
- Ponce, L. y C. Rodríguez (1977). Microearthquake activity associated to Los Humeros caldera, Mexico: Preliminary survey. *Geofísica Internacional*. Vol. 17-4. pp. 461-478.
- Quijano-León, J. and L.C. Gutiérrez-Negrín (2000). Geothermal production and development plans in Mexico: *Proceedings of the World Geothermal Congress: Kyushu-Tohoku, Japan*, pp. 355-361.
- Reasenbergs, P., and D. Oppenheimer (1985). FPFIT, FPLOT and FPPAGE: Fortran computer programs for calculating and displaying earthquake fault-plane solutions, U.S. Geological Survey. Open file report N° 85-739.
- Rutledge, J. T., W.S. Phillips, and M.J. Mayerhofer (2004). Faulting Induced by Forced Fluid Injection and Fluid Flow Forced by Faulting: An Interpretation of Hydraulic-Fracture Microseismicity, Carthage Cotton Valley Gas Field, Texas. *Bulletin of the Seismological Society of America*. Vol. 94-5, pp. 1817-1830.

- Seismocontrol, S. A. (2005). Estudio de resistividad con transitorio electromagnético en el campo geotérmico de Los Humeros, Puebla. Comisión Federal de Electricidad, gerencia de Proyectos Termoeléctricos-departamento. Informe: GF-HU-08-05. Inédito.
- Suter, C., J. Contreras-Péres, and H. Ochoa Carrillo (1997). Structure of the Sierra Madre Oriental Fold-thrust belt in east central Mexico: II Convención sobre la Evolución Geológica de México, Pachuca-Hidalgo. Libroto guía de las excursiones geológicas. Instituto de Geología de la Universidad Nacional Autónoma de México, pp. 45-66.
- Viggiano, J., and C. Robles (1998a). Mineralogía hidrotermal en el campo geotérmico de Los Humeros, Puebla. Tomo I: Sus usos como indicadora de temperatura del régimen hidrológico. *Geotermia*, Vol. 4.
- Viggiano, J., and C. Robles (1998b). Mineralogía hidrotermal en el campo geotérmico de Los Humeros, Puebla. Tomo II: Geotermia del yacimiento, *Geotermia*, Vol. 4.
- Yáñez-García, C., S. García-Durán, and J. Cacique-Vásquez (1979). Geothermic exploration in the Los Humeros-Derrumbadas area. *Geothermic Research Count. Trans.* Vol. 3, pp. 801-803.

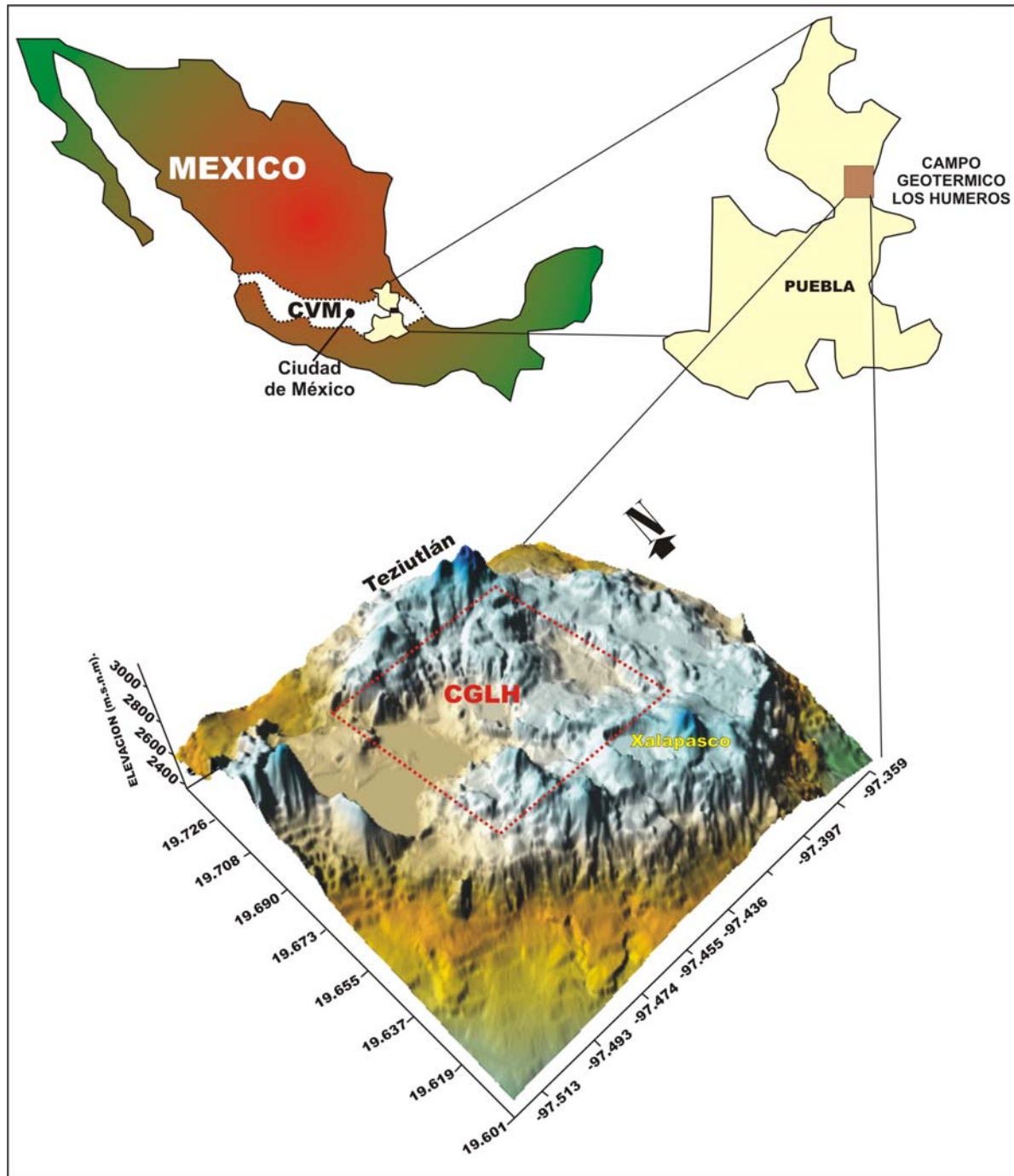


Figura 1. Ubicación geográfica del campo geotérmico de Los Humeros (CGLH).

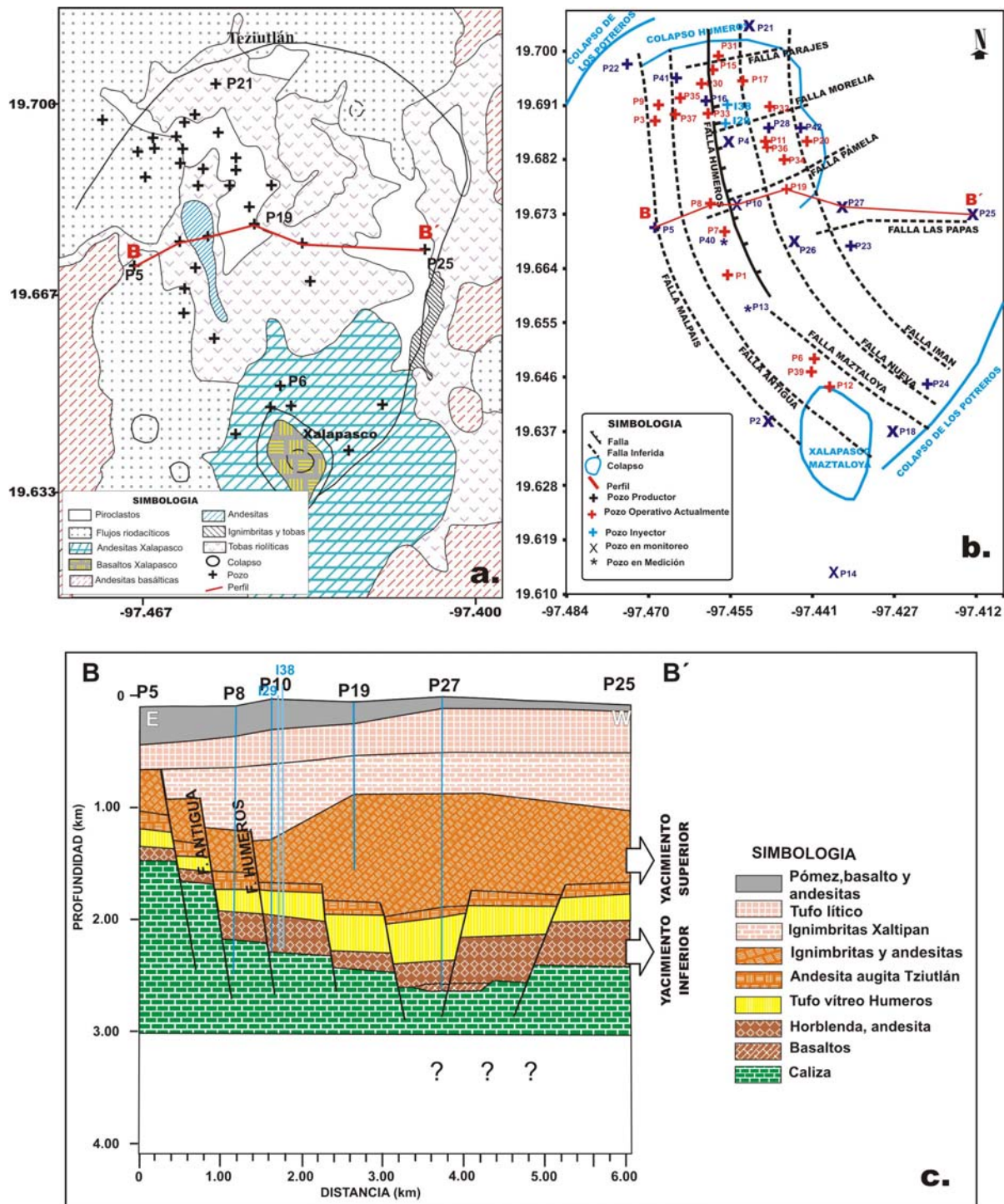


Figura 2. Geología y tectónica del campo geotérmico de Los Humeros (modificado de Cedillo, 2000; Arellano et al., 2000). a). Principales productos volcánicos depositados en el campo. Perfil B-B' orientado en dirección este-oeste (E-W). b). Principales elementos tectónicos y distribución de pozos inyector (I) y productores (P). c). Perfil estratigráfico orientado en dirección E-W según la Figura 2a.

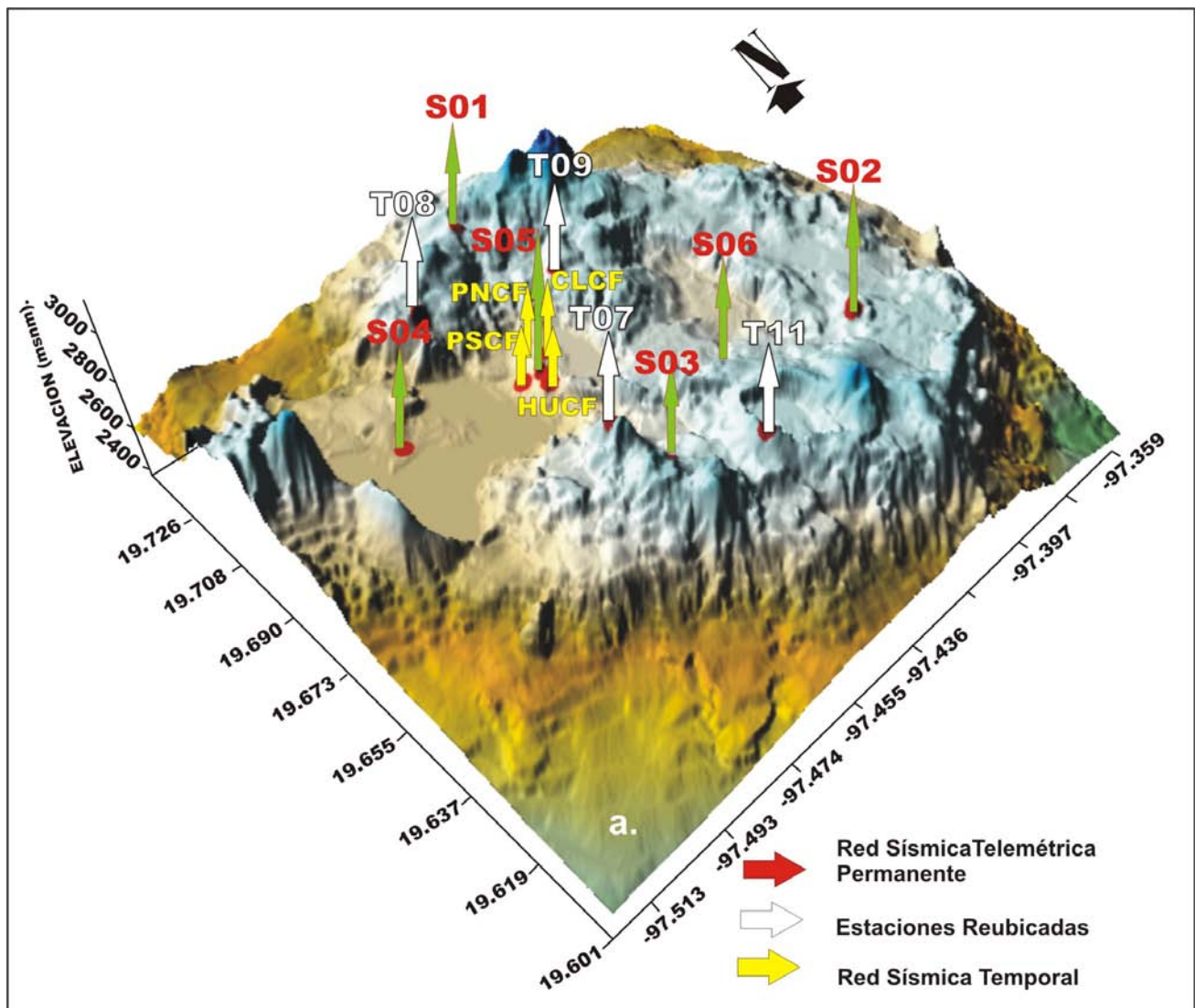


Figura 3. Distribución de las estaciones sísmicas permanentes, reubicadas y temporales del campo geotérmico de Los Hornos.

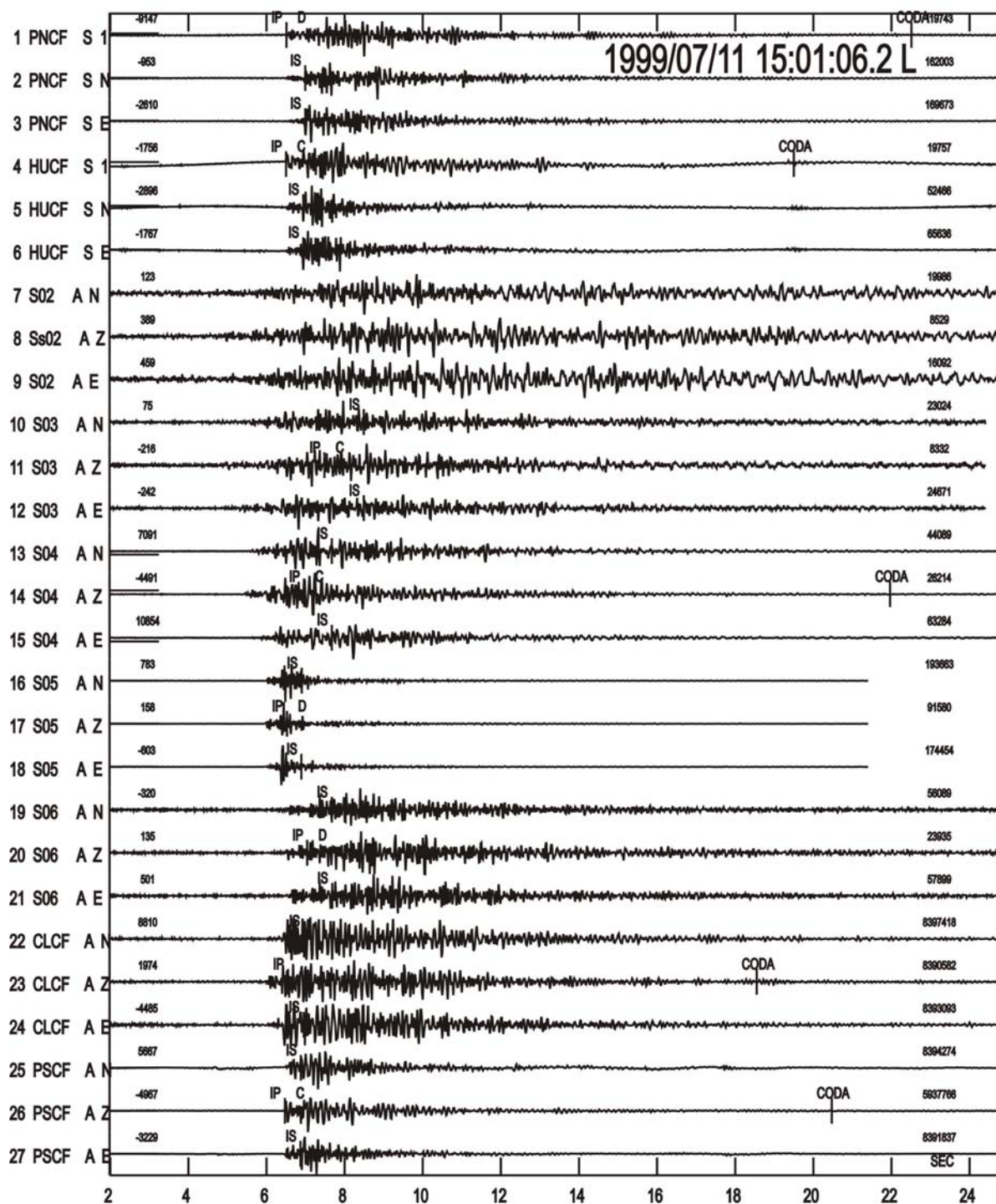


Figura 4. Ejemplo de sismo registrado el 11 de julio de 1999 ($M_d=2.2$) en las estaciones permanentes y temporales.

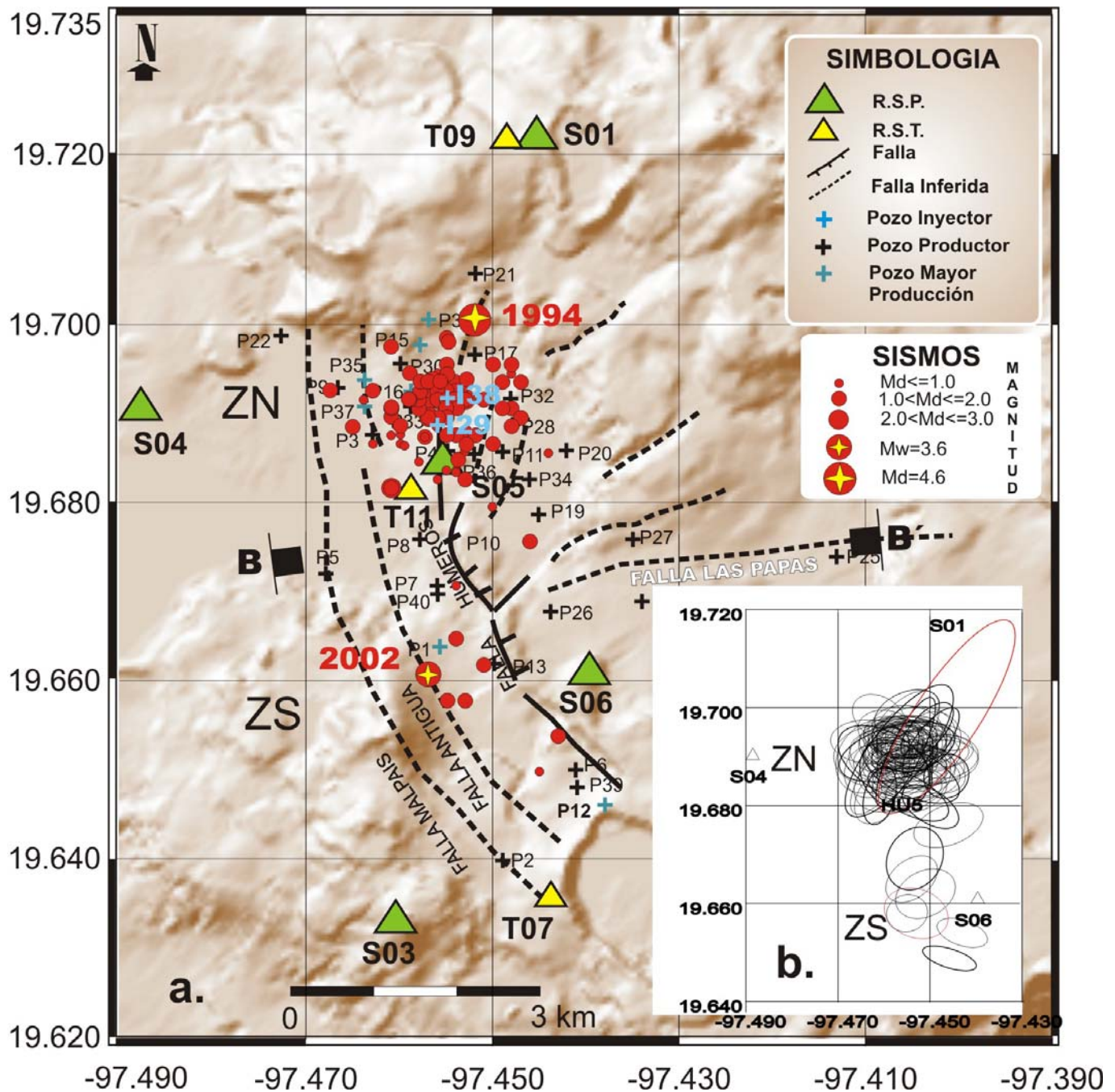


Figura 5. a). Distribución epicentral de los 95 sismos seleccionados en el estudio. B-B' es el perfil sísmico orientado en dirección E-W. b). Elipses de error de la localización epicentral del total de sismos (95). Las elipses en color rojo representan los errores en la localización de los sismos de 1994 y 2002.

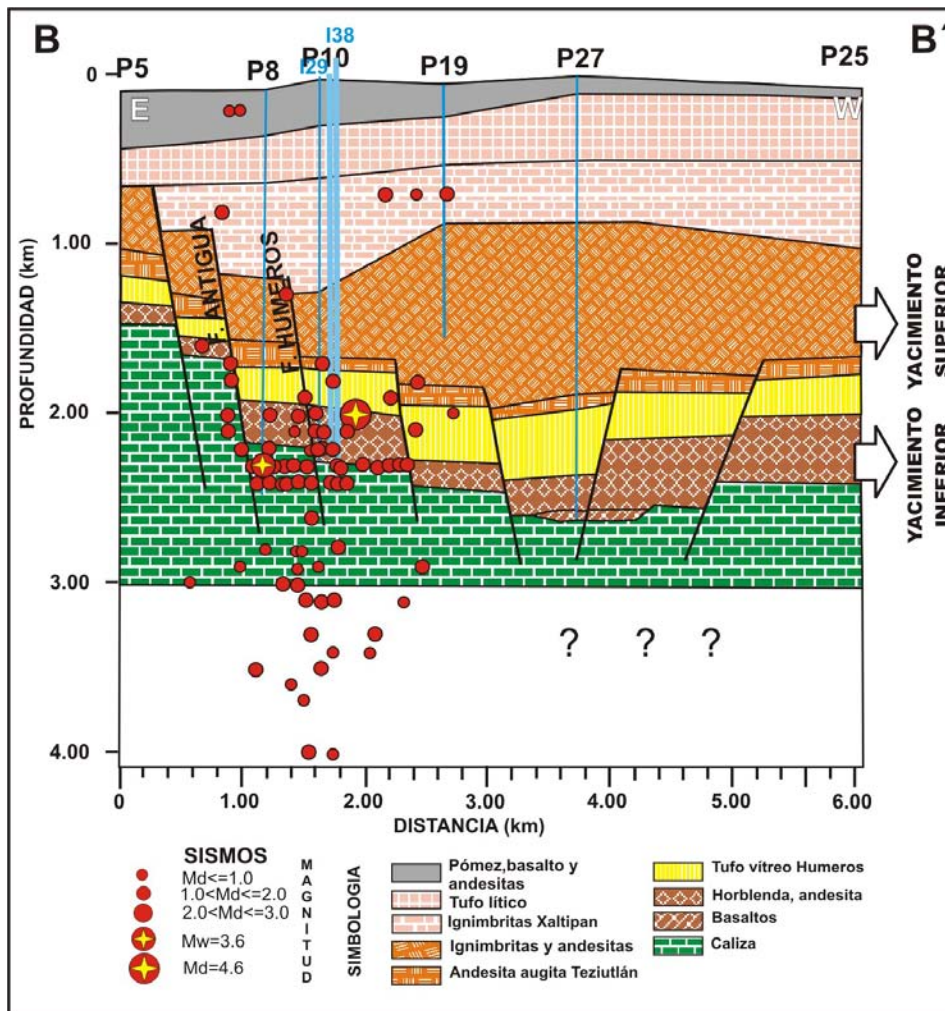


Figura 6. Distribución de los sismos en profundidad sobrepuesta en el perfil estratigráfico (B-B') del campo geotérmico de Los Humeros.

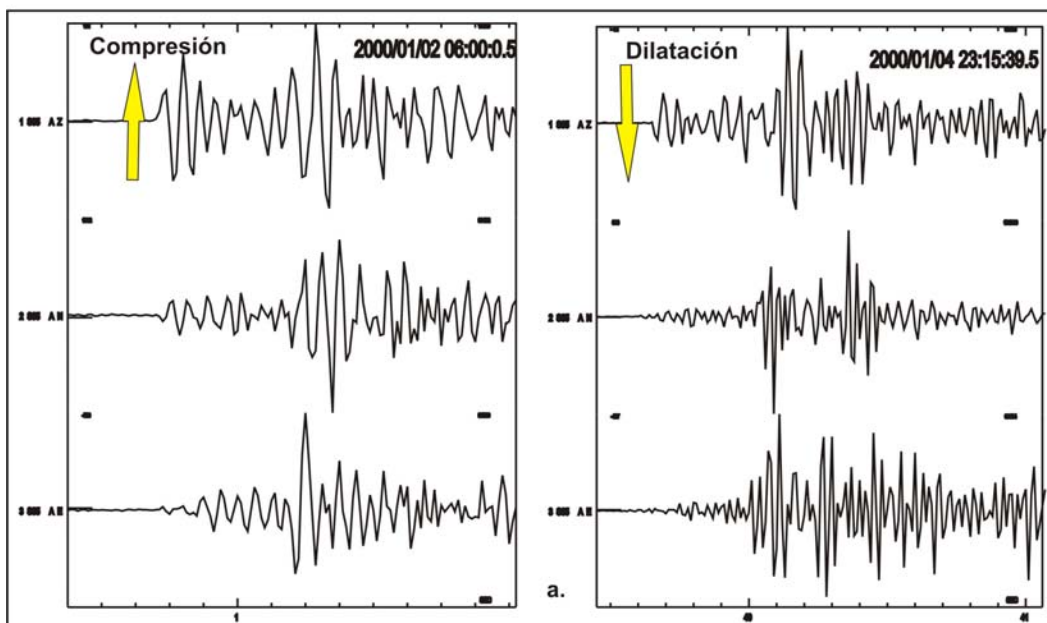


Figura 7. Ejemplos de sismos registrados en la estación S05 con polaridad compresional (lado izquierdo) y dilatacional (lado derecho) durante enero del año 2000.

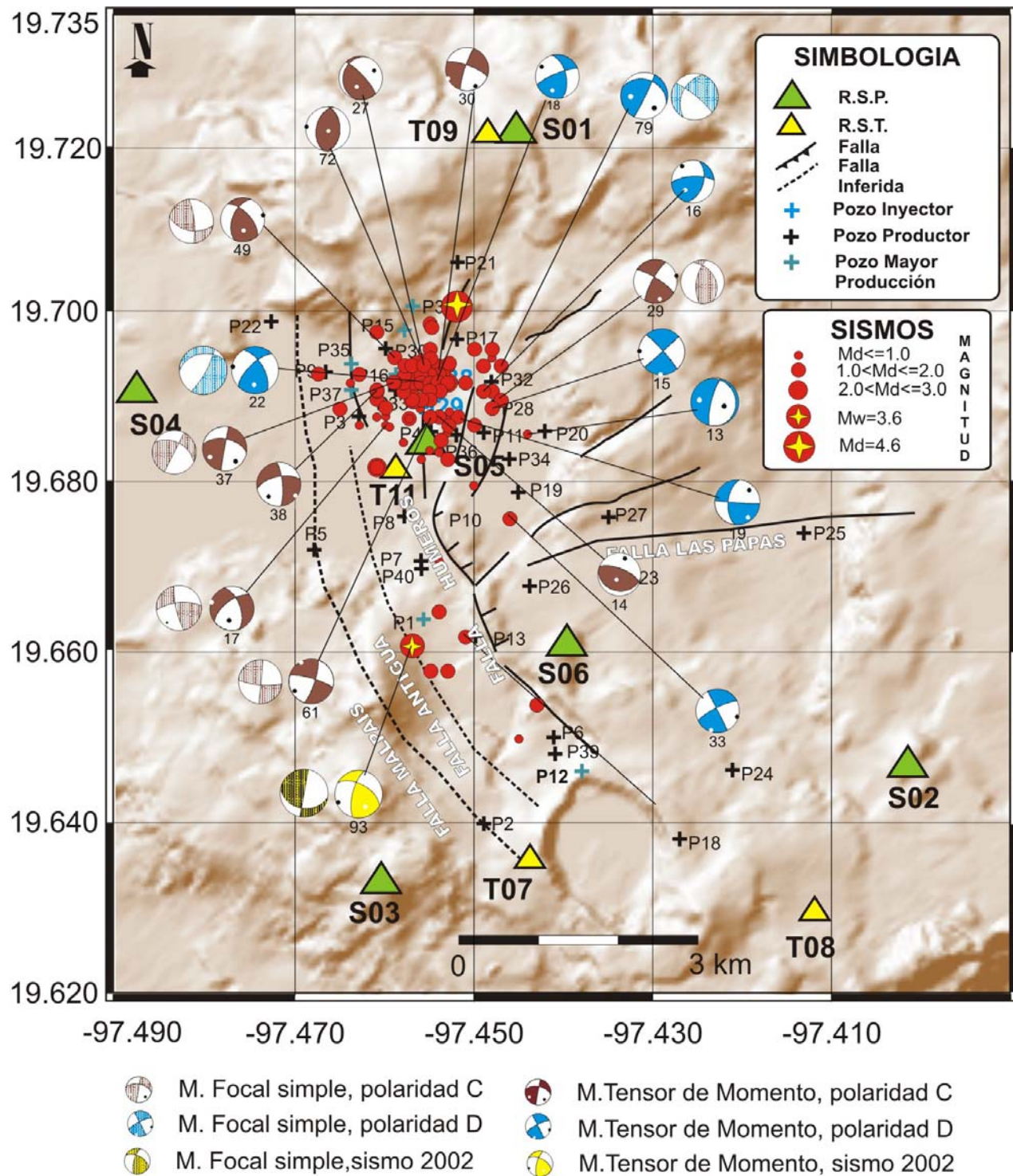


Figura 8. Distribución de los sismos seleccionados, mecanismos focales simples y de tensor de momento con polaridad compresional y dilatacional. La numeración de los sismos corresponde a lo mostrado en la Tabla 2.

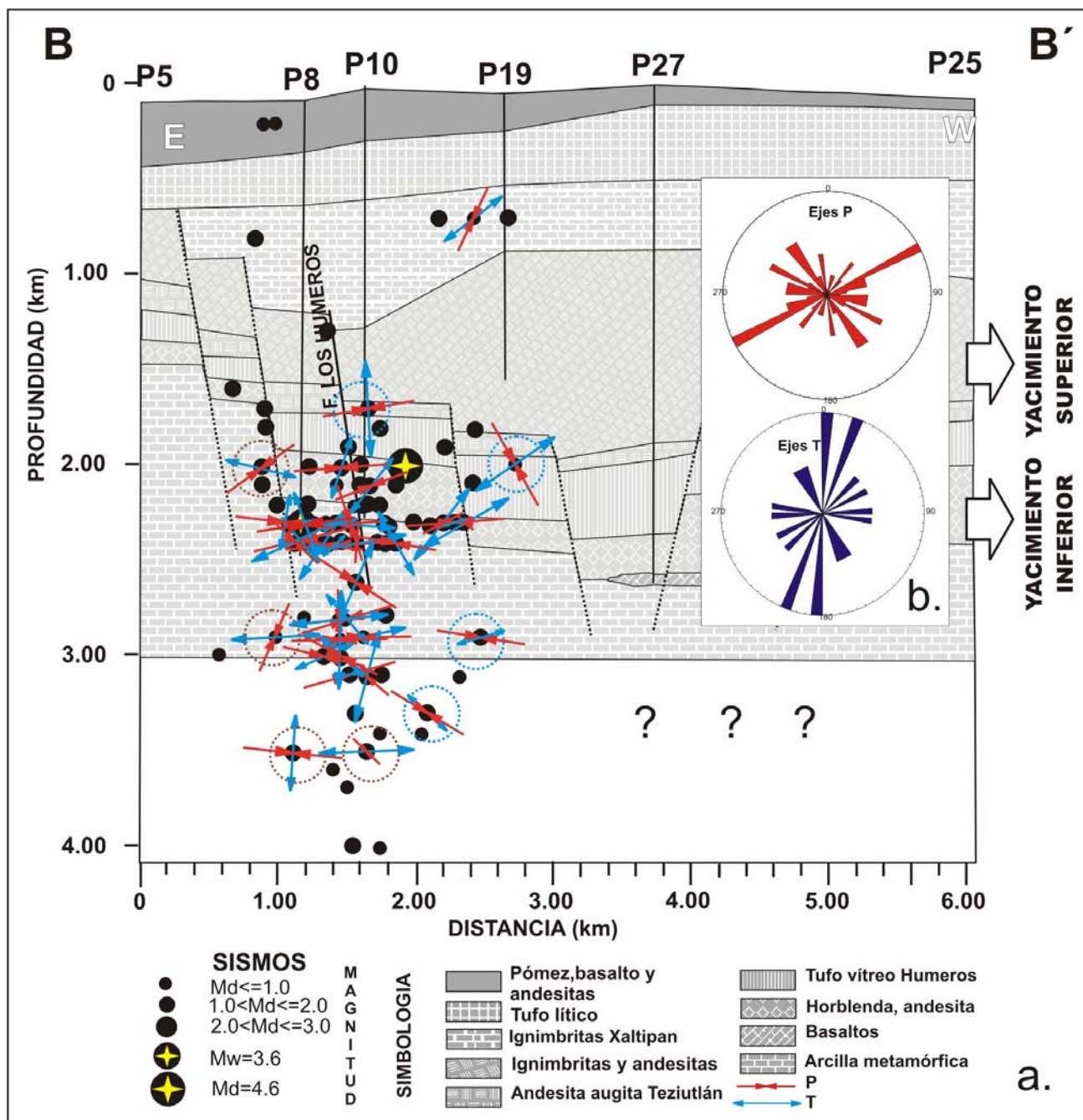


Figura 9. Distribución en profundidad de los esfuerzos generados en el campo geotérmico de Los Hornos. Las flechas en colores rojo y azul representan a los ejes de presión (P) y tensión (T), registrados en la estación S05 con polaridad C (círculo café) y D (círculo azul).

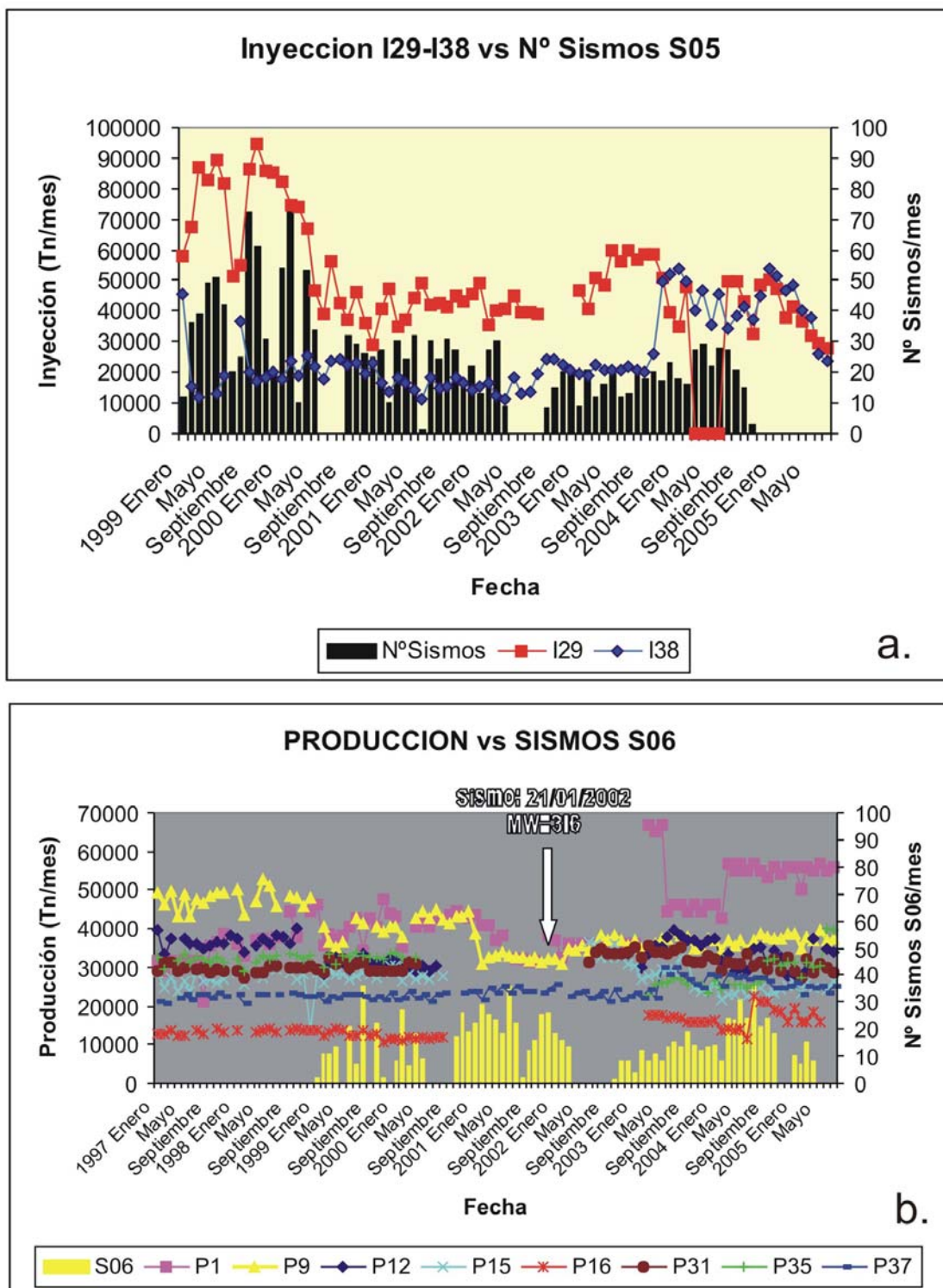


Figura 10. a). Comparación del número de sismos registrados en la estación S05 y la cantidad de inyección en los pozos inyectoros I29 e I38. b). Comparación del número de sismos registrados en la estación S06 con 8 pozos de mayor producción. La flecha indica la ocurrencia del sismo del 21 de enero de 2002.