
CAPITULO 2

CAMPO GEOTÉRMICO LOS HUMEROS, PUEBLA

2.1 Área de estudio

El campo geotérmico de Los Humeros se ubica en el extremo oriente del Cinturón Volcánico Transmexicano en el límite de Puebla y Veracruz. Las coordenadas geográficas son: latitud de 19.700 a 19.635° y longitud de -97.475° a -97.440°. Figura 2.1. La caldera principal de Los Humeros tiene un diámetro aproximado de 16 km, y cuenta con tres calderas en su interior: el colapso Los Potreros de 7 km y dos colapsos más pequeños: el colapso Central y Xalapasco.

Estudios geoquímicos (Barragan et al, 1988) y mediante estudios de pozos y análisis de núcleos (Arellano et al. 1998) muestran la presencia de dos yacimientos a diferentes profundidades, el más somero a 1.5 km de 280°C de temperatura y otro más profundo a 330°C.

Desde 1982 hasta la actualidad se han perforado alrededor de 42 pozos entre inyectores y productores. Actualmente Los Humeros es el tercer campo de mayor producción con 40 MW distribuido en 8 unidades productoras de 5 MW cada una, las cuales son alimentadas en promedio por 20 pozos productores por unidad.

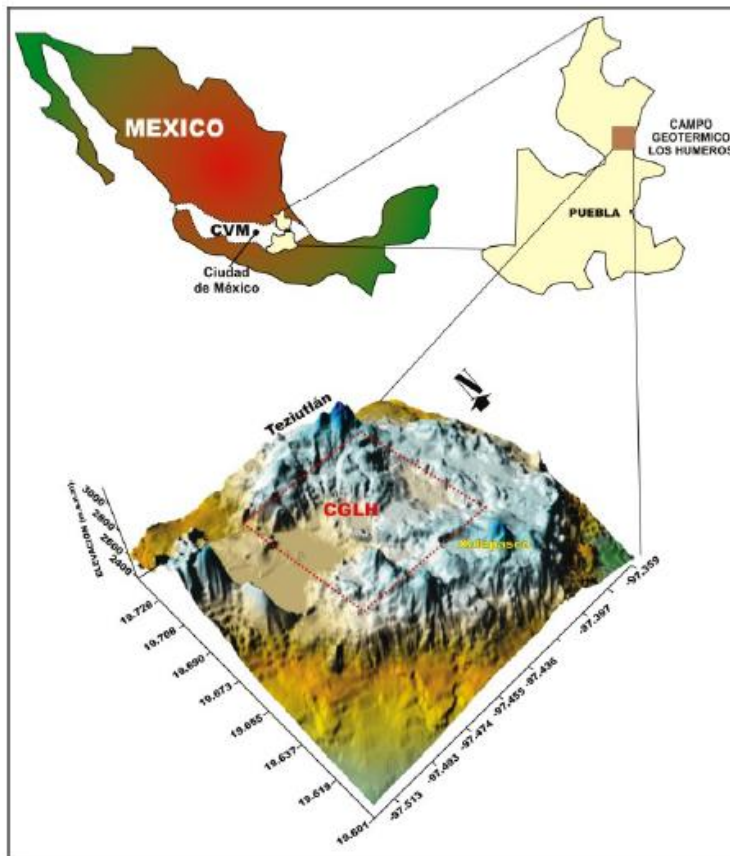
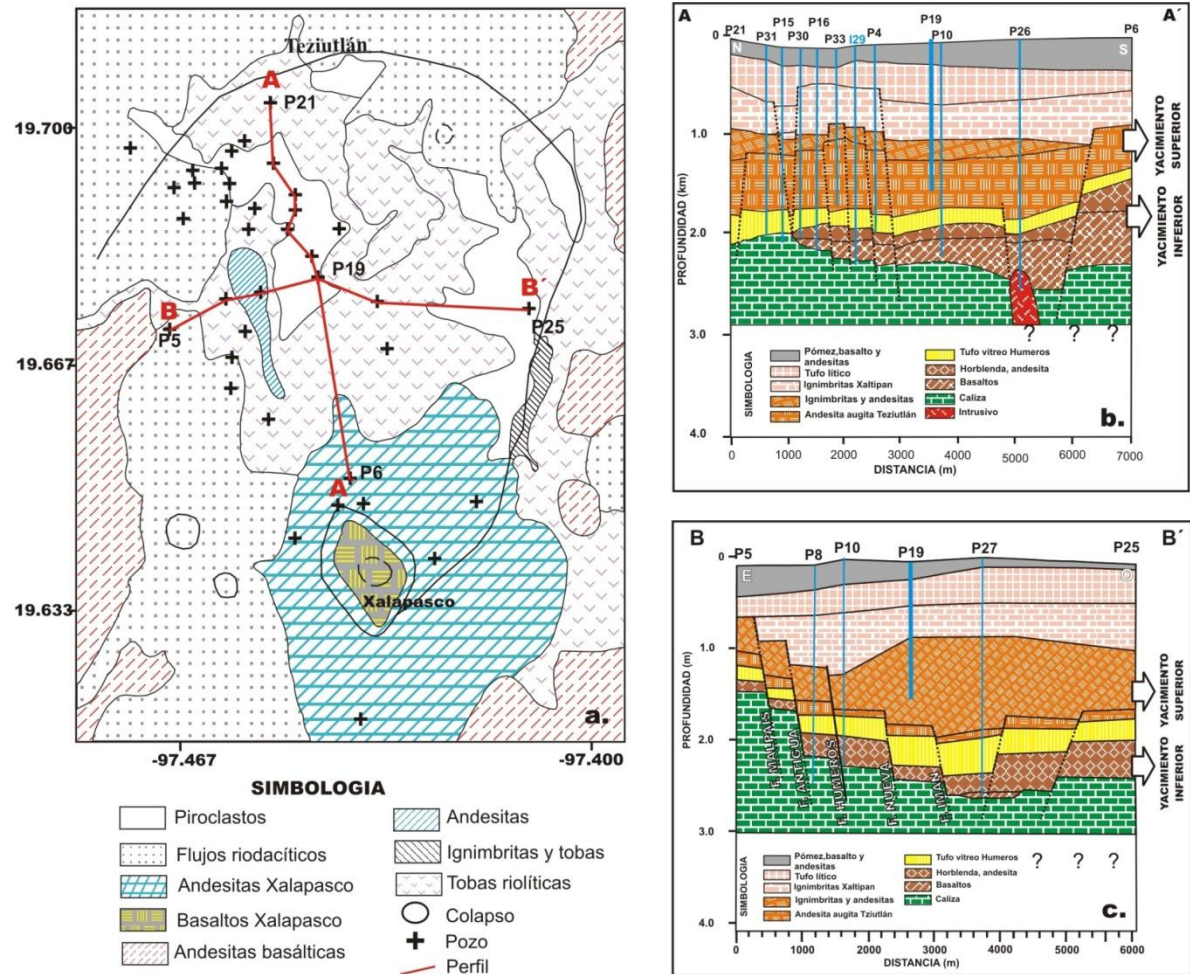


Figura 2.1. Vista de planta del Campo Geotérmico Los Humeros. (Lermo et. al, 2008).

2.2 Marco geológico

De acuerdo a estudios geológicos de Arellano et al. (2000) y Cedillo (1997), la estratigrafía de la caldera Los Humeros está conformada por nueve capas principales. Ésta información se complementa con estudios geofísicos de reflexión sísmica (COMESA, 1998) y gravimétricos (Campos-Enríquez, 1992), la litología aflorante en el campo Los Humeros data de esquistos del Pérmico Tardío en el norte del campo hasta basamentos de olivino de hace 20,000 años.



En la Figura 2.2, a) muestra la geología superficial de Los Humeros con distintas formaciones que en su mayoría son productos de actividad volcánica, en la misma figura, b) y c) se muestra un modelo de los perfiles N-S y E-W de las nueve capas, y la localización de los pozos.

En la Figura 2.2.1 se muestra un resumen de la evolución de la caldera Los Humeros (Robin, 1982) que indica las diferentes etapas de la evolución que a continuación se explican:

En la sección 1) y 2) de la figura comienza con la emersión de material magmático y flujo de lava a la superficie a través de eventos de tipo explosivo, 3) al vaciar el contenido de la cámara magmática se forma la caldera Los Humeros por colapso de la parte superior de la formación, 4) enfriamiento de la cámara magmática y nuevo evento volcánico latente, emisión de lava, 5) nuevo evento volcánico abundante en gas que da origen al colapso Los Potreros y finalmente 6) se crea la Caldera Xalapasco por emisión de lava andesítica.

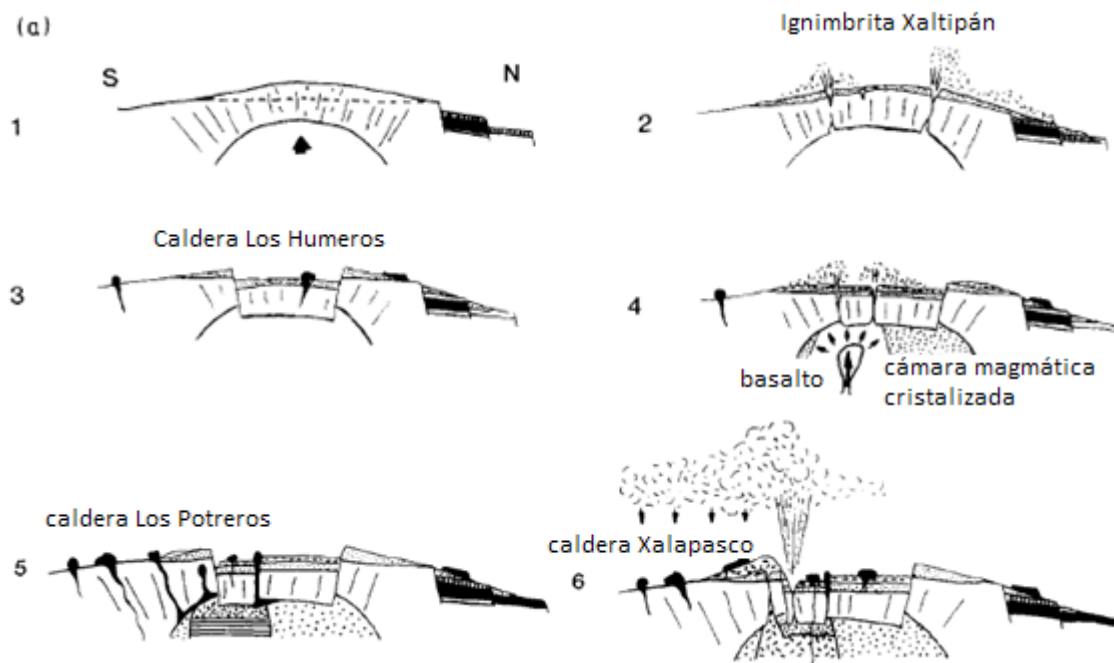


Figura 2.2.1 Evolución volcánica de la caldera Los Humeros (modificada de Robin, 1982).

1. Desplazamiento ascendente de la cámara magmática riolítica, lava de Tezuatlán 2. Emisión de la ignimbrita Xaltipán. 3. Formación de la caldera de Los Humeros 4. Enfriamiento de la cámara magmática y emisión de la ignimbrita Zaragoza 5. Formación de la caldera Los Potreros abundante en gas. 6. Formación de la Caldera Xalapasco, emisión de lava andesítica.

Se determinaron dos modelos de capas en Los Humeros. Uno propuesto por Cedillo (1988), anteriormente se consideró otro modelo de cuatro unidades por Vigginiano (1988a) que de manera general englobaba varias de las capas con las mismas características petrológicas y geoquímicas.

En la Tabla 1 se muestra un resumen de las cuatro unidades propuestas por Vigginiano (1988a) y las nueve capas propuestas por Cedillo (1997), además se muestran el tipo de litología tentativa y el nivel de permeabilidad de cada unidad de acuerdo a información de registros de pozo.

Tabla 1. Comparación de la geología propuesta por Viggiano (1988) y Cedillo (1997) junto con litología y permeabilidad en Los Humeros.

Viggiano-Robles 1988	Cedillo 1997	UNIDADES LITOLÓGICAS	Permeabilidad
I	1	Pómez, Basalto de Olivino y Andesita	alta
II	2	Toba e Ignimbrita Zaragoza	media
	3	Ignimbrita Xáltipan	baja a nula
	4	Interacción de Ignimbrita y Andesita	baja
III	5	Andesita de Augita	media
	6	Toba Vítreo Humeros	baja
	7	Andesita Hornblenda	media
IV	8	Basaltos	media
	9	Caliza, Mármoles e Intrusivos (basamento local)	baja

Estudios geoquímicos (Barragan et al, 1988) y mediante estudios de pozos y análisis de núcleos (Arellano et al. 1998) muestran la presencia de dos yacimientos a diferentes profundidades, el más somero a 1.5 km de 280°C de temperatura y otro más profundo a 330°C. El yacimiento somero es de tipo Líquido Dominante y el profundo de Vapor Dominante (Arellano et al., 2000). Las formaciones permeables son: Andesita de augita, andesita de Hornblenda. Por otro lado basaltos y mármoles (cerca del basamento), son los menos permeables y son posiblemente las zonas de los dos tipos de yacimientos.

2.3 Estructuras y pozos geotérmicos

La perforación del primer pozo exploratorio se realizó en 1982 (Lermo et al., 2008). Los pozos inyectoros I29, I38 se perforaron en 1993 y 1997, respectivamente y continúan en operación hasta la actualidad, adicionalmente se tienen perforados poco más de 40 pozos productores en diferentes lugares. Los pozos de producción se localizan en zonas donde el flujo de vapor es más abundante. Las estaciones sísmicas se encuentran en una zona cercana a los pozos para registrar la continua actividad sísmica.

En Los Humeros se detectaron dos sistemas de fallas (Seismocontrol, 2005). El primero de NW-SE formado por las fallas Malpaís, La Antigua, Mastaloya, La Nueva, Imán, La Cuesta y Los Humeros, estas dos últimas se observan en superficie y el resto son inferidas por estudios geológicos, geofísicos y geoquímicos. El otro sistema de fallas está orientado en la dirección NE-SW, formado por las fallas Arrollo Grande, Pamela, Parajes y Morelia (Lorenzo, 2002), mientras que las fallas Las papas y Las Víboras se orientan en dirección E-W. Figura 2.3.

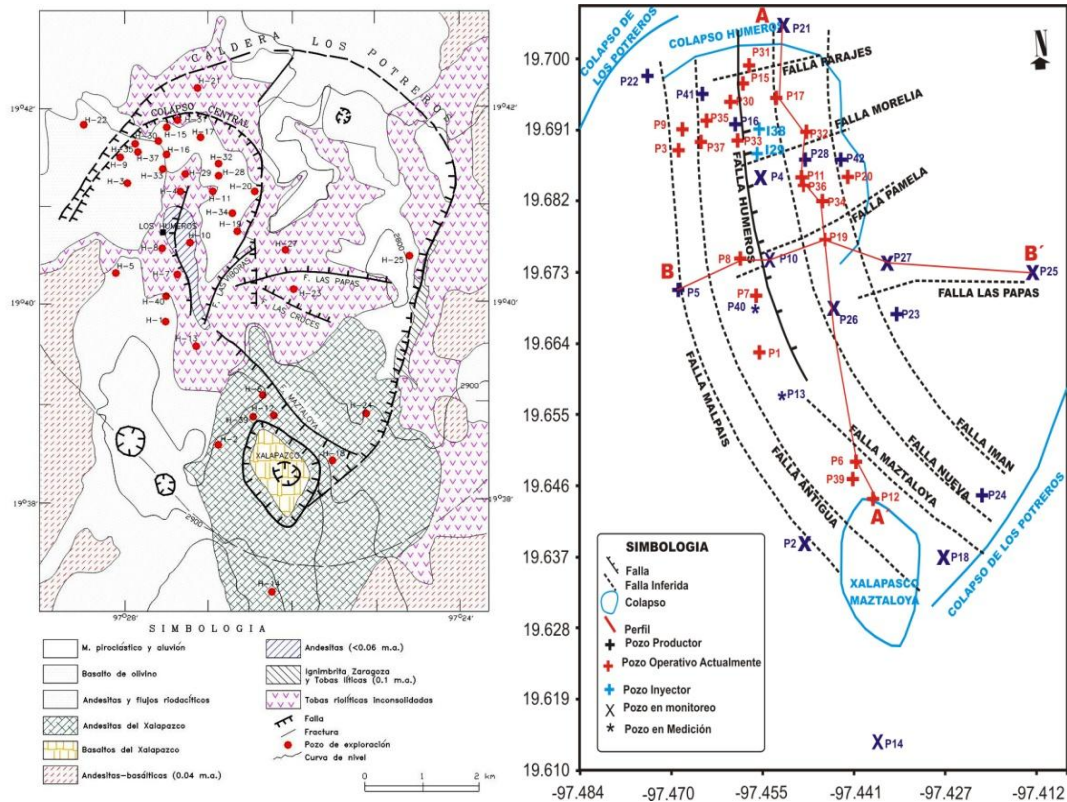


Figura 2.3 El mapa de la izquierda (modificada de Arellano, 2000) muestra la caldera Los Potrerillos, la Caldera Xalapasco y el colapso central. A la derecha (modificado de Lorenzo, 2002) el mapa muestran los dos sistemas de fallas NW-SE formados por las fallas: Antigua, Malpaís, Humeros, Iman y Nueva y el otro sistema en dirección NE-SW formado por las fallas: Pamela, Arrollo Grande, Pajares.

La figura 2.3.1 es un mapa de elevación del campo Los Humeros donde se muestran las principales fallas del campo y la red sísmica. En este mapa se muestran con líneas continuas en amarillo las fallas que se observa en superficie como el caso de la Falla Humeros, La Cuesta, El colapso los Potreros y Las Víboras, en líneas punteadas se muestran las fallas inferidas, entre las más importantes se encuentran la Falla Malpaís, La Antigua, La Nueva, Parajes y Morelia.

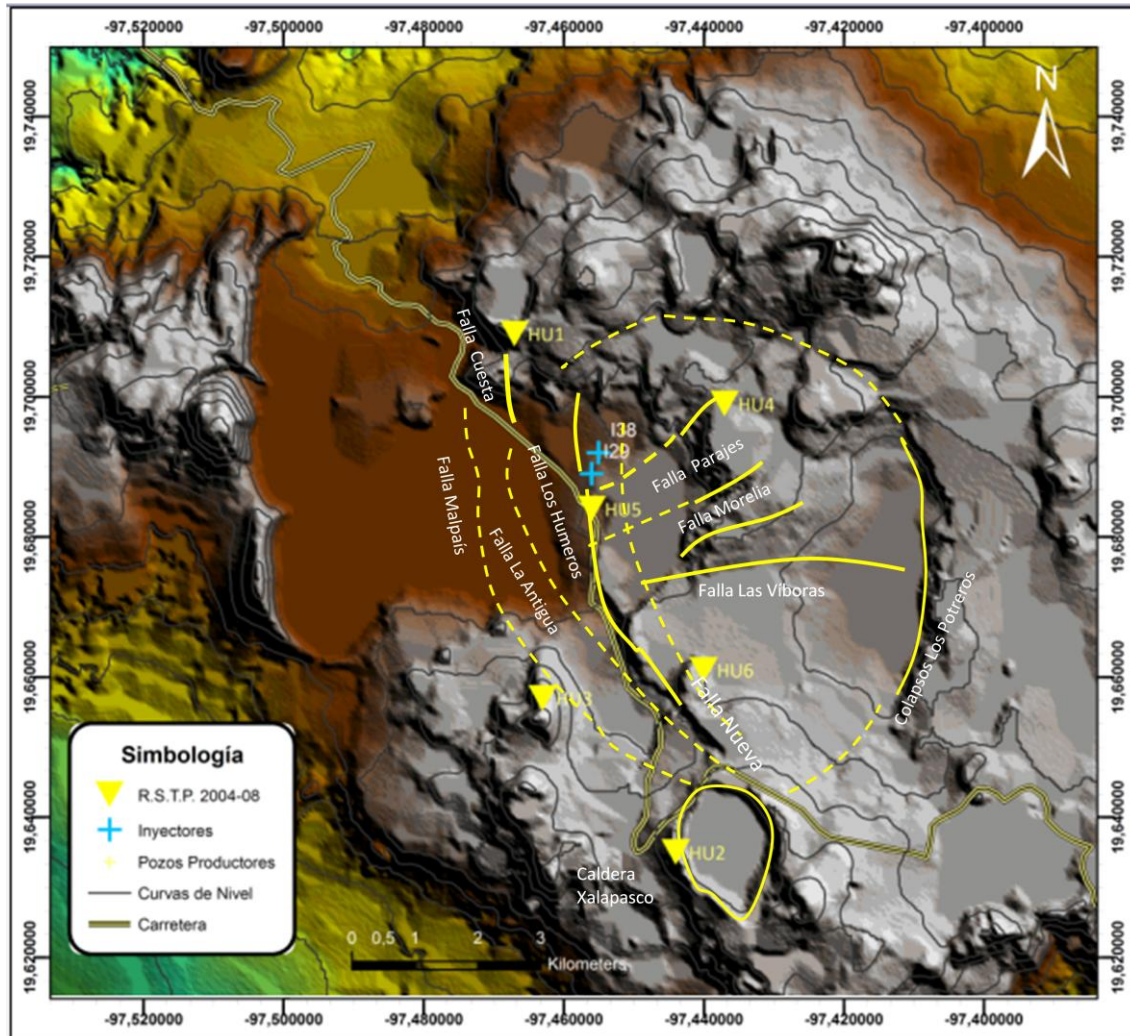


Figura 2.3.1 Mapa del campo geotérmico Los Humeros con las principales estructuras. Los triángulos en amarillo representan la localización de las estaciones y en cruces azules los pozos inyectorios. Adicionalmente se observa que las líneas continuas representan las fallas que se ven en superficie, mientras las líneas punteadas representan las fallas inferidas por estudios previos.

2.4 Sismicidad del campo Los Humeros

2.4.1 Estudios Previos

La microsismicidad puede ser utilizada para investigar las estructuras del subsuelo en áreas geotérmicas y petroleras donde exista sismicidad inducida por inyección de fluidos, sin embargo, la sismicidad en campos geotérmicos se puede deber también a factores como esfuerzos tectónicos, incremento de la presión de poro de la formación o movimiento relativo a causa del colapso entre las estructuras. (Tosha et al, 1993).

Los primeros estudios de sismicidad fueron realizados por Ponce y Rodríguez (1977) antes de que se efectuara la exploración del recurso geotérmico en Los Humeros. Posteriormente, a raíz de un evento sísmico del 24 de Noviembre de 1994 de magnitud $M_d = 4.6$ que causó daños en la infraestructura de la Comisión Federal de Electricidad (CFE), se instaló la Red Sísmica Telemétrica Permanente (RSTP) y una Red Sísmica Temporal (RST) para detectar y analizar la sismicidad dentro del campo.

El hipocentro del sismo de 1994 se localizó, de acuerdo con el Servicio Sismológico Nacional, fuera del campo Los Humeros. Por otra parte, Lermo et al. (1999a) relocalizaron el evento dentro del campo según la diferencia entre la onda P y S que fue menor a 0.8 segundos ($T_s - T_p < 0.8s$), su origen estaría relacionado a la falla Los Humeros. En la Tabla 2 se muestran los valores hipocentrales.

Tabla 2. Parámetros hipocentrales, Localización del servicio Sismológico Nacional y relocalización por Lermo del sismo del 25 de Noviembre de 1994.

SISMO	FECHA AA/MM/DD	HORA GMT HH:MM:SS	LATITUD (grados)	LONGITUD (grados)	PROF. (km)	M_d (grados)
Lermo	1994/11/25	18:52:57.8	19.701°	-97.452°	2.0	4.6

2.5 Adquisición de datos y equipo de trabajo

La primera estación sísmica en el campo geotérmico Los Humeros fue un sismómetro Sprengnether MEQ-800 de componente vertical que se colocó cerca del pozo P21 por personal de la CFE, con el objetivo de monitorear las replicas y relocalizar el hipocentro del sismo de 1994, la estación estuvo en operación hasta Enero de 1995. Actualmente, la adquisición de datos se realiza mediante redes sísmicas con estaciones sísmicas multi-componentes colocadas al alrededor del campo geotérmico. (Lermo et al., 2001)

2.5.1 Red Sísmica Telemétrica Permanente

La Comisión Federal de Electricidad (CFE) instaló una Red Sísmica Telemétrica Permanente (RSTP), a partir del 1 de Diciembre de 1997, que consta de seis estaciones sísmicas (S01, S02, S03, S04, S05, S06). La Red Sísmica Telemétrica Permanente (RSTP) cubre el campo geotérmico Los Hornos en un área de 20 km² aproximadamente. Figura 2.5.

En septiembre de 2002 se reubicaron las estaciones: S02 por problemas de vandalismo; las estaciones S01 y S02 por ruido ambiental; y las estaciones S03 y S04 por la lejanía de la actividad sísmica. Las estaciones S05 y S06 no presentaron problemas y conservaron su posición original. Cabe mencionar que la relocalización de las estaciones (Lermo et al., 2003) se realizó mediante un estudio de efecto de sitio utilizando la metodología descrita por Nakamura (1989).

Cada estación tiene un sismógrafo con registrador digital de aceleración Altus K2, con resolución de 16 bits. El registrador está acoplado a tres sensores de velocidad Kinometrics tipo Ranger SS-1 de periodo corto (1s) en sus tres componentes, dos horizontales (N-S y E-O) y una vertical (Z), con dos memorias flash de capacidad de 1Mb para el almacenamiento de la información sísmica. Cada estación sísmica está conectada a un radio de transmisión Freewave modelo DGR-115H, una antena transmisora tipo Yagi de 920-960Mhz y un panel solar de 75watts a 17 V que alimentan a una batería de ciclo profundo de 12 V a 135 Amp que a su vez alimenta al resto del equipo (Lermo et al.2005). Figura 2.4a

2.5.2 Red Sísmica Temporal

La Red Sísmica Temporal (RST) fue instalada los meses de Julio a Octubre de 1999 e inicios del 2000 alrededor de la estación S05 para calibrar las estaciones de la Red Sísmica Telemétrica Permanente (RSTP), (Lermo y Lorenzo, 2003). La red temporal consta de cuatro estaciones sísmicas de banda ancha. Cada estación contiene un registrador de aceleración Reftek 72A-08 de 24 bits y un sismómetro multi-componentes (N-S, E-O y Z) marca Guralp CMG-40T de periodo natural de 30.8s. La corrección instrumental muestra una respuesta plana entre 0.03 a 80 Hz. Figura 2.4b.

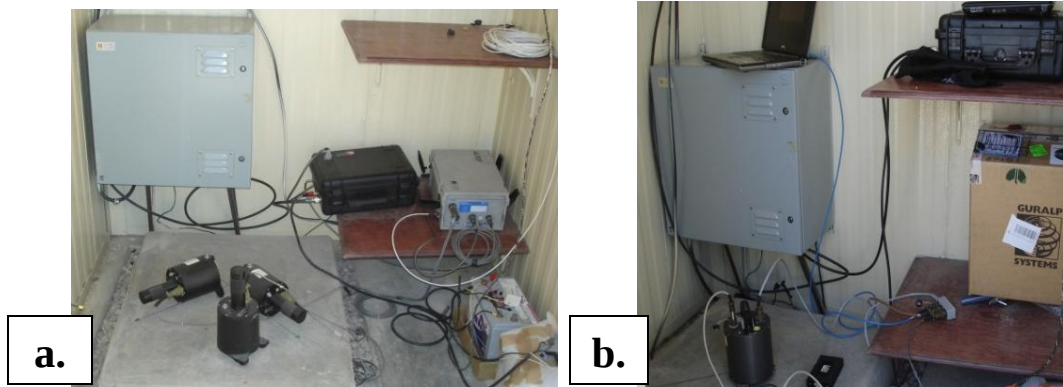


Figura 2.4 Fotografías de las estaciones sísmicas. a) equipo K2 con sensores en tres componentes de la Red Permanente. b) El quipo Guralp de banda ancha de la Red Sísmica Temporal.

La figura 2. 5, en el mapa de elevación se muestra la Red Sísmica Telemétrica Permanente (RSTP) en triángulos color amarillo de 1997 a 2002, y en triángulos color azul la misma red después de 2004 a 2008. La Red Sísmica Temporal en triángulos verdes se encuentra cerca de los pozos inyectoros y de la estación S05.

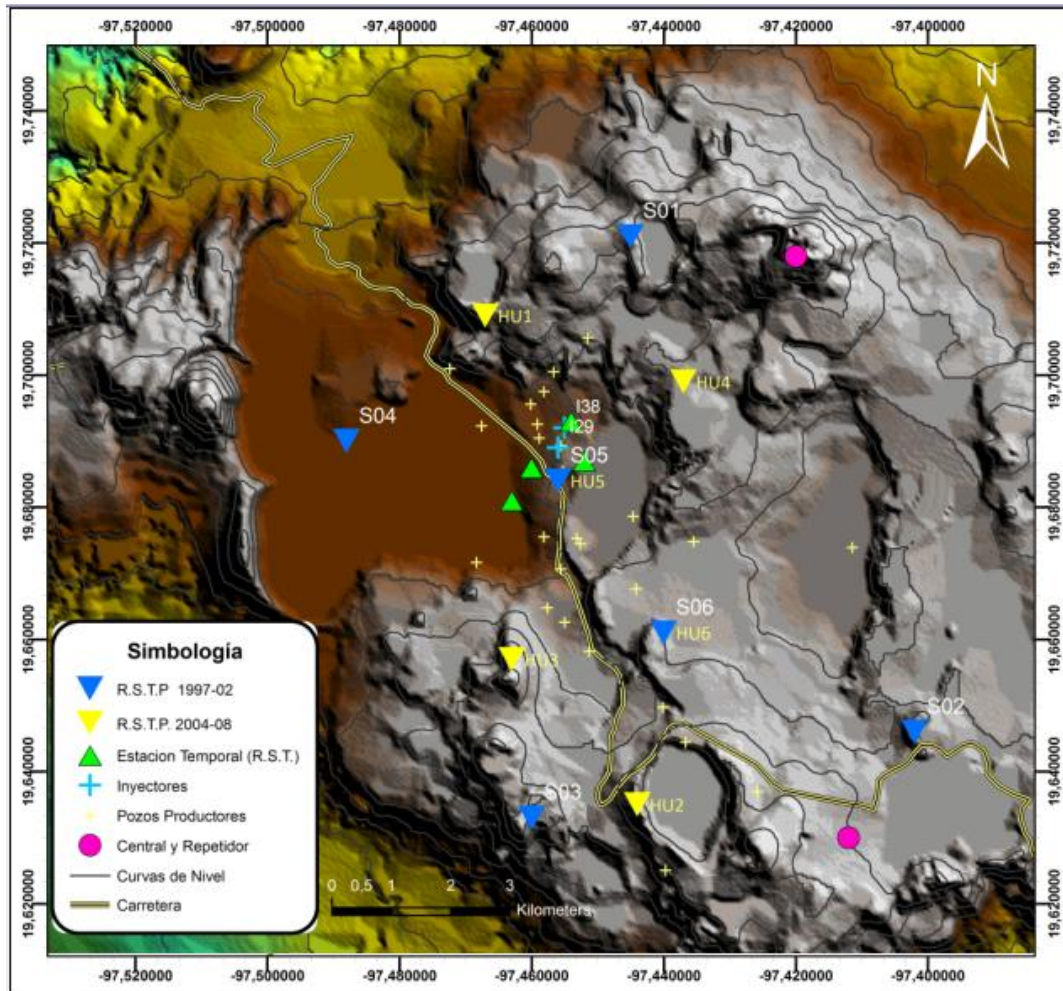


Figura 2.5 El Mapa de altitud muestra la distribución de las redes sísmicas. La Red Sísmica Telemétrica Permanente (RSTP) se muestra en triángulos azules de 1997-2002 y en triángulos amarillos de 2004-2008. En triángulos verde se muestra la Red Sísmica Temporal (RST) y en círculos morados el Repetidos (Norte) y la Central (Sur).

2.6 Procesamiento y localización de los eventos sísmicos

2.6.1 Localización de los sismos

El siguiente procedimiento muestra la forma en la que fueron localizados los sismos:

- Recopilación de la información sísmica de ambos periodos 1997-2002 y 2004-2008 recordando que la división de periodos se realizó en 2002 por la relocalización de las estaciones S01, S02, S03 y S04.
- En los sismogramas se seleccionaron los sismos registrados en más de tres estaciones y con software que comprobara su existencia.
- Con ayuda de la subrutina HYP071 del programa SEISAN, se localizaron los eventos con los tiempos de arribo de las ondas P y S, y posteriormente su localización hipocentral.
- Del total de 237 sismos locales, 95 se registraron en al menos cinco estaciones

2.6.2 Programa de Localización

El programa utilizado para localización de los eventos sísmicos fue el SEISAN versión 8.0 (Havskov y Ottemoller, 2003). Los parámetros que requiere este software para localizar los sismos son: nombre de la estación, coordenadas geográficas (latitud, longitud, elevación), lectura de los tiempos de arribos de la onda S-P, duración total del sismo, la relación de ambas velocidades (V_s/V_p), un modelo de velocidades del área, y la ecuación para el cálculo de magnitud de duración. Figura 2.6 muestra un ejemplo de sismograma típico de un evento localizado en cinco estaciones.

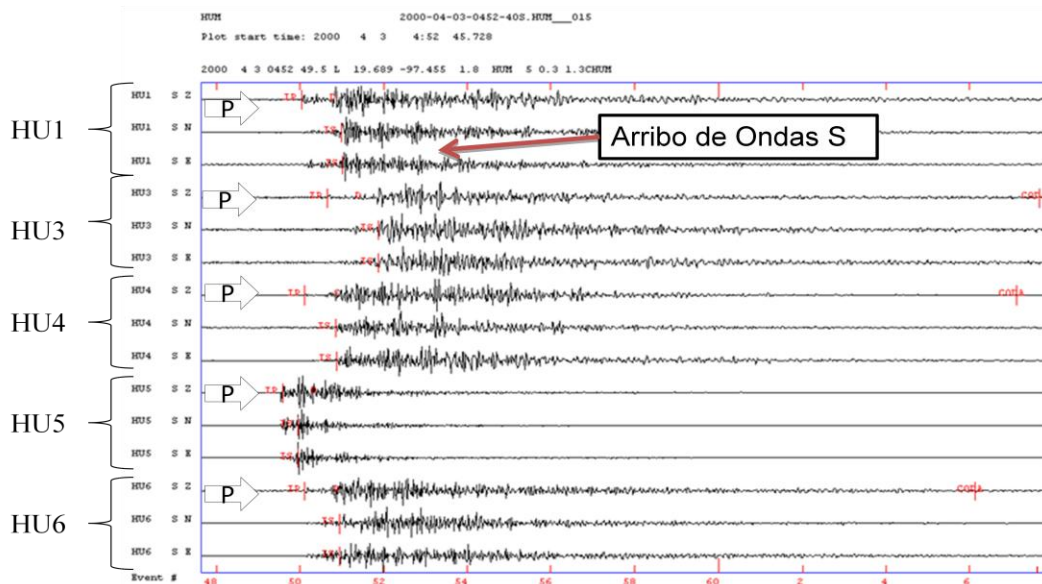


Figura 2.6 Sismograma que registró un evento sísmica en cinco estaciones, se muestran en flechas azules el arribo de la ondas P (componente vertical) con sus respectivas componentes transversales Norte y Este.

2.6.3 Ecuación para el cálculo de Magnitud de duración

La ecuación utilizada para el cálculo de la magnitud de duración de los eventos del campo geotérmico Los Humeros, es la que propuso Antayhua et al. 2007, para su cálculo utilizó sismos locales del campo Los Humeros. La ecuación es:

$$Md = -0.1285 + 1.6283 \log_{10}(T) + 0.0487(D)$$

Donde: **Md** es la magnitud de duración en grados corregida de la ecuación propuesta por Lee et al. (1975), **T** es la duración total del sismo en segundos y **D** es la distancia epicentral en kilómetros.

2.6.4 Modelo de velocidades

Para determinar el modelo de velocidades, Hurtado (2001) analizó cuatro perfiles de reflexión sísmica realizados por COMESA en 1998 en el campo geotérmico Los Humeros. Los perfiles están orientados en dirección N-S y E-O, con una longitud de 4 km. Hurtado (2001) mediante la metodología descrita por Dix (1995), obtuvo la velocidad de la onda P (V_p) y la profundidad para las nueve unidades del campo Los Humeros propuestos por Cedillo (1997) y Arellano et al. (2000). En la Tabla 2.2 se muestra la profundidad y los valores de velocidad de las nueve capas.

Tabla 2.2 Modelos de velocidad de acuerdo a las formaciones del campo geotérmico Los Humeros (Hurtado, 2001).

PROF. (km)	V_p (km/s)
0.00	1.24
0.24	1.94
0.65	2.85
1.25	3.54
1.79	3.69
1.93	3.90
2.13	4.14
2.37	5.18
30.00	6.00

2.7 Distribución de la sismicidad

De 1997 a 2008 la distribución de la sismicidad, de acuerdo a su localización hipocentral, estuvo cerca de los pozo inyectoras I29 e I38, en la zona norte del campo Los Humeros, donde también se encuentra la estación de monitoreo sísmico S05. Pero en febrero de 1999 la sismicidad tuvo un aumento de su ocurrencia en la zona Sur del campo donde la sismicidad se distribuye principalmente a lo largo de la falla Los Humeros (Lermo et al. 2002).

En la Figura 2.6.1 a se muestran las elipses de error de los 237 sismos del periodo de Diciembre 2007 a Octubre 2008 localizados en más de tres estaciones con errores promedio mayores a 3km. (Lermo et al, 2008). Por otro, en la Figura 2.6.1b se observa las elipses de error para los 94 sismos mejor localizados en más de cuatro estaciones del mismo periodo de tiempo con errores menores a 1 km (Antayhua et al., 2007).

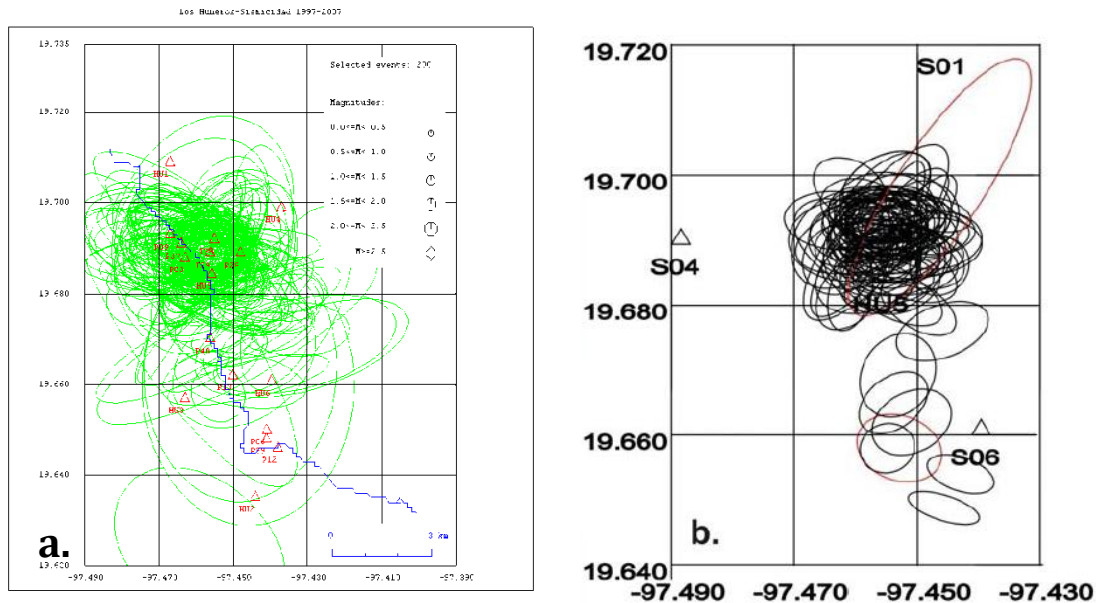


Figura 2.6.1 a) Mapa que muestran elipses de error de 237 sismos de Diciembre 1997 a Octubre 2008 en más de tres estaciones y 3 km de error. (Lermo et al, 2008). b) Elipses de error de 94 sismos mejor localizados en 4 estaciones de 1997 a 2008 con errores menores a 1 km . (Antayhua et al., 2007).

Para fines de estudio de anisotropía sísmica se analizará solamente los eventos sísmicos con las siguientes características:

- Los eventos localizados en 5 o más estaciones con el fin de tener una mejor localización de los eventos.
- Con magnitudes de menores a 3.2 y mayores a 1 de magnitud de duración (Md), para este criterio solo se descartaron pocos sismos por ser eventos locales.
- Estar cerca de la zona Centro.

El último criterio mencionado es de gran importancia para este trabajo de anisotropía sísmica, debido a que es necesario tener contralada la zona de donde provengan los sismos; al estar confinados a una zona, el barrido que atraviesan las ondas sísmicas es casi el mismo lugar y de esa manera se puede hacer la estadística de valores obtenidos de los parámetros de anisotropía. El total de eventos que cumplen las características anteriores son de 79 sismos locales.

En la Figura 2.7 se muestra la localización de los sismos de Diciembre 1997 a Octubre 2008 la cual tiene dos perfiles (líneas verdes) que se pueden observar en la Figura 2.8. Los perfiles N-S y E-W muestran la sismicidad de entre 2-4 km aproximadamente.

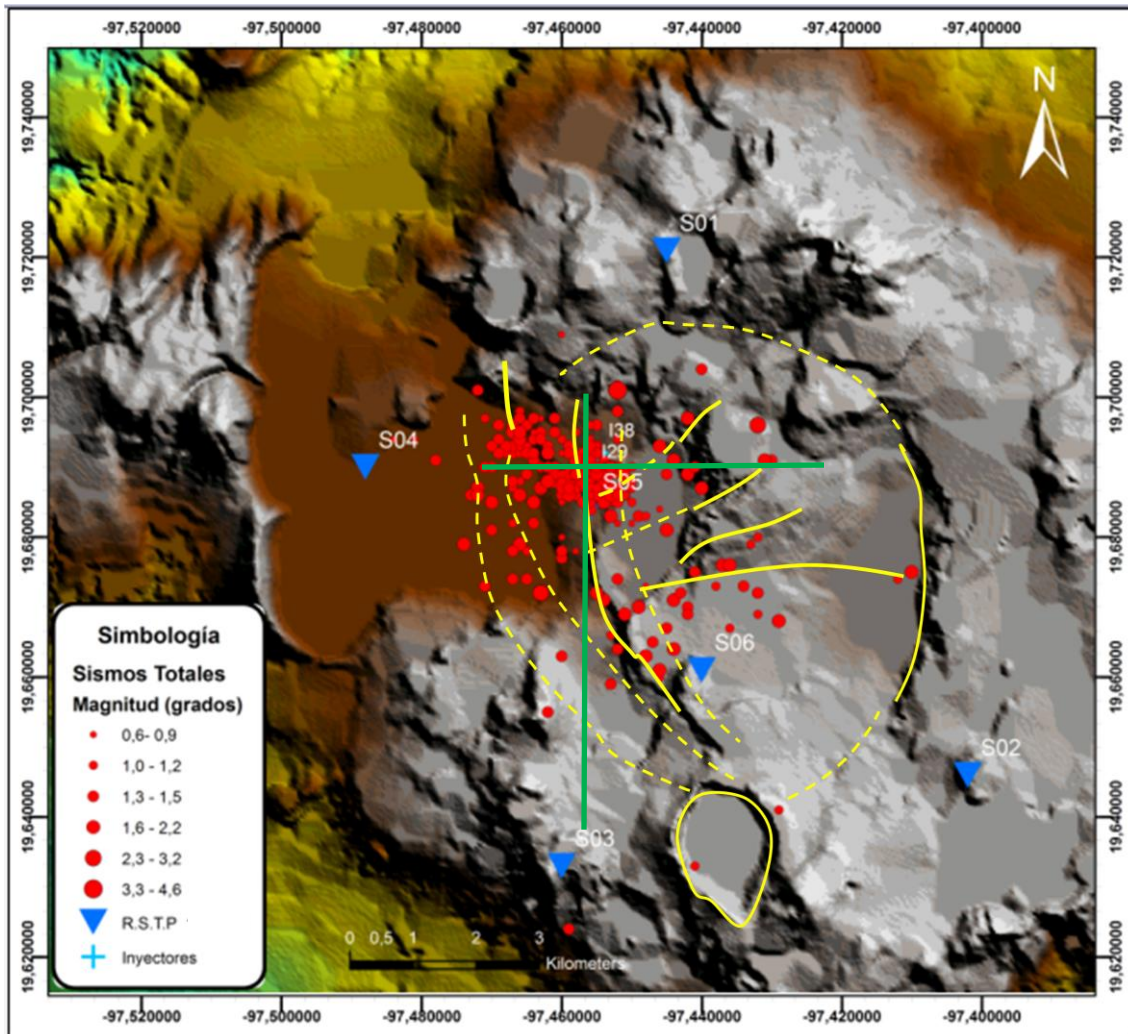


Figura 2.7 En círculos rojos se muestra la sismicidad dentro del campo Los Humeros de 1997-2008. Se observa una mayor distribución de sismos en el centro del campo. Adicionalmente representan las fallas vistas en superficie (líneas continuas) y fallas inferidas (líneas punteadas).

En la Figura 2.7.1 se muestra la sismicidad en perfiles N-S y E-W de 1997-2008. Se seleccionó esta zona debido a que presentó una mayor cantidad de eventos y por estar cerca de los pozos inyectoros.

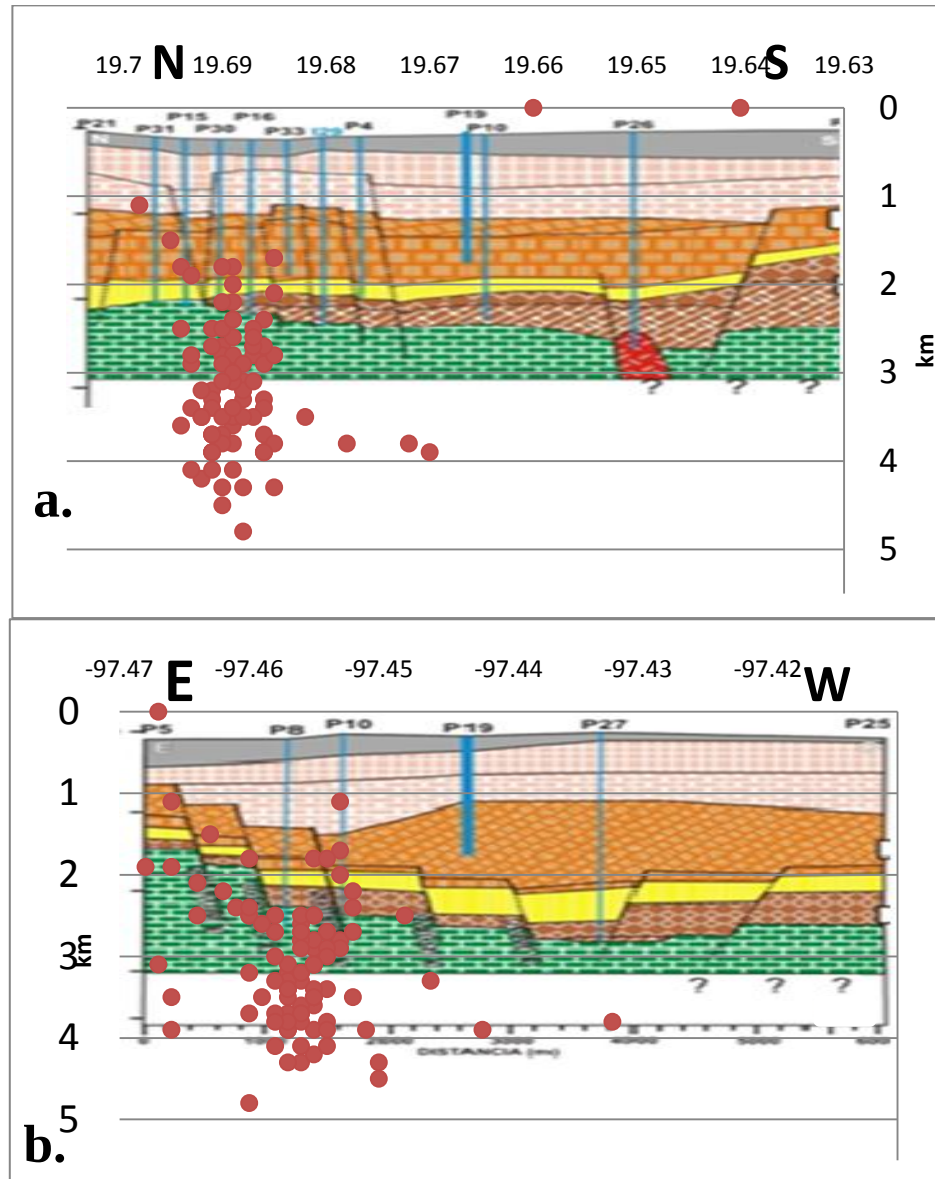


Figura 2.7.1 a) Perfiles N-S, b) E-W muestran la sismicidad del periodo 1997 a 2008. La mayoría de ellos está entre 2 y 4 km de profundidad, los sismos se presentan cerca de las fallas La Antigua y Humeros. Algunos eventos someros tienen 0.2 km de profundidad y los más profundos a casi 5 km (modificada de Cedillo, 1997 y Arellano et al. 2000)

En la Figura 2.7.2, se observa que la mayor cantidad de la sismicidad se concentra cerca de los pozos inyectoros I38 e I29 en un 85% de la sismicidad, en esta zona se tienen la estación S05 la cual no cambia de posición durante el monitoreo sísmico.

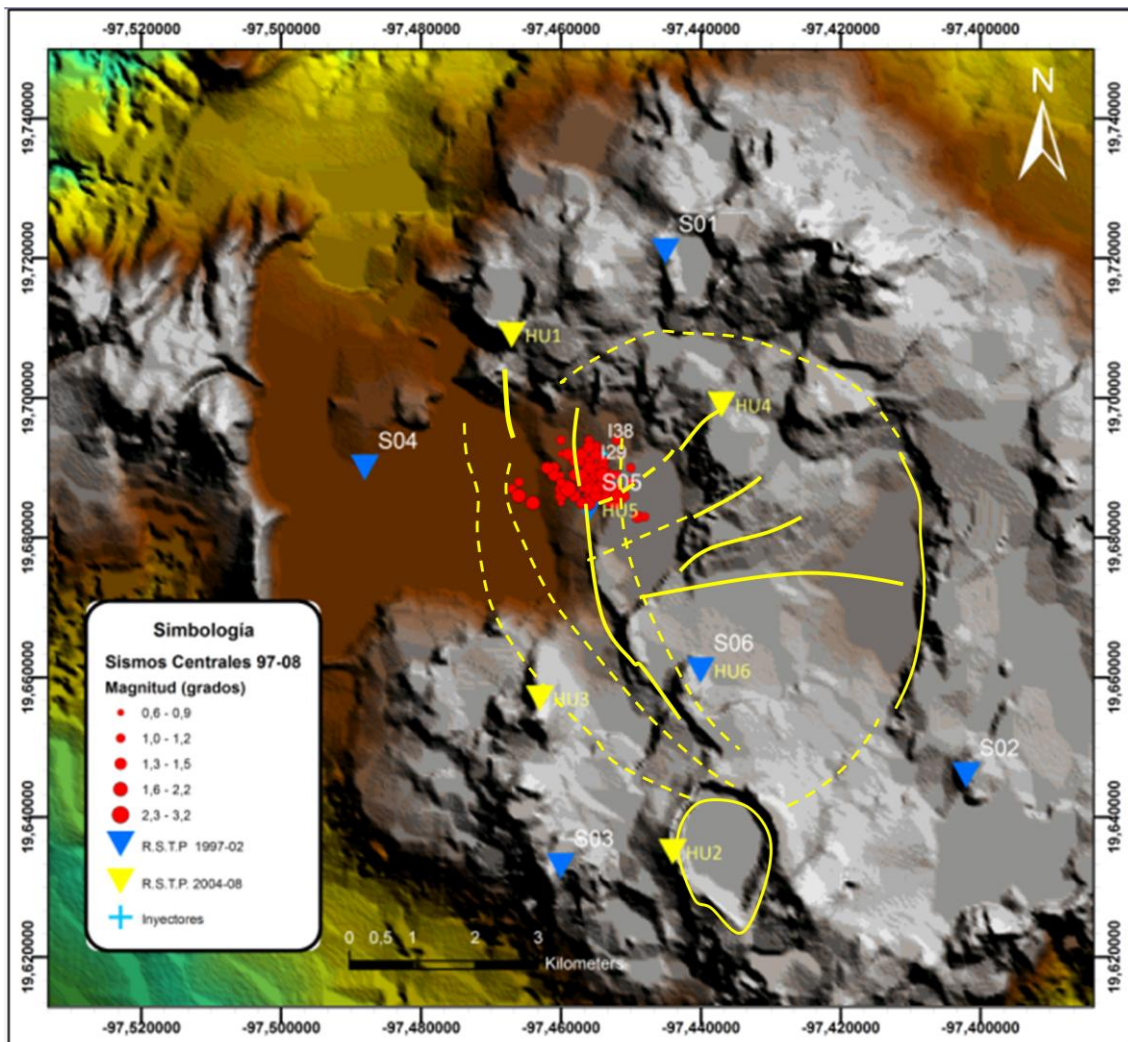


Figura 2.7.2. En círculos rojos se muestran los sismos localizados que cumplen las características para realizar el análisis de anisotropía sísmica: Registrados en al menos cinco estaciones, con valores de magnitud de duración entre $1 < M_d < 3.2$ y en el provenientes del centro del campo. El área seleccionada tiene casi el 85 % de los sismos y se encuentra cerca de los pozos inyectoros.

2.8 Distribución de esfuerzos

Antayhua et al. 2007 realizó estudios sobre la distribución de los esfuerzos en la zona del campo geotérmico Los Humeros, a partir de información de mecanismos focales simples y de momento a partir de la polaridad de la onda P.

2.8.1 Mecanismos Focales Simples

Los mecanismos simples de eventos identificados en cinco o más estaciones con una clara polaridad de onda P, se calcularon mediante el subprograma “focmec” del programa de localización SEISAN Versión 8.0 con la metodología descrita por Reasenberg y Oppenheimer (1985). Los resultados de estos mecanismos simples (Figura 2.8) corresponden a un fallamiento de transcurrencia lateral derecha (4 y 61), e izquierda (72), así como de tipo normal con componente en la transcurrencia izquierda (10 y 79), finalmente cabe mencionar que la ruptura, de acuerdo con la polaridad, muestra heterogeneidad en los eventos (Antayhua et al., 2007).

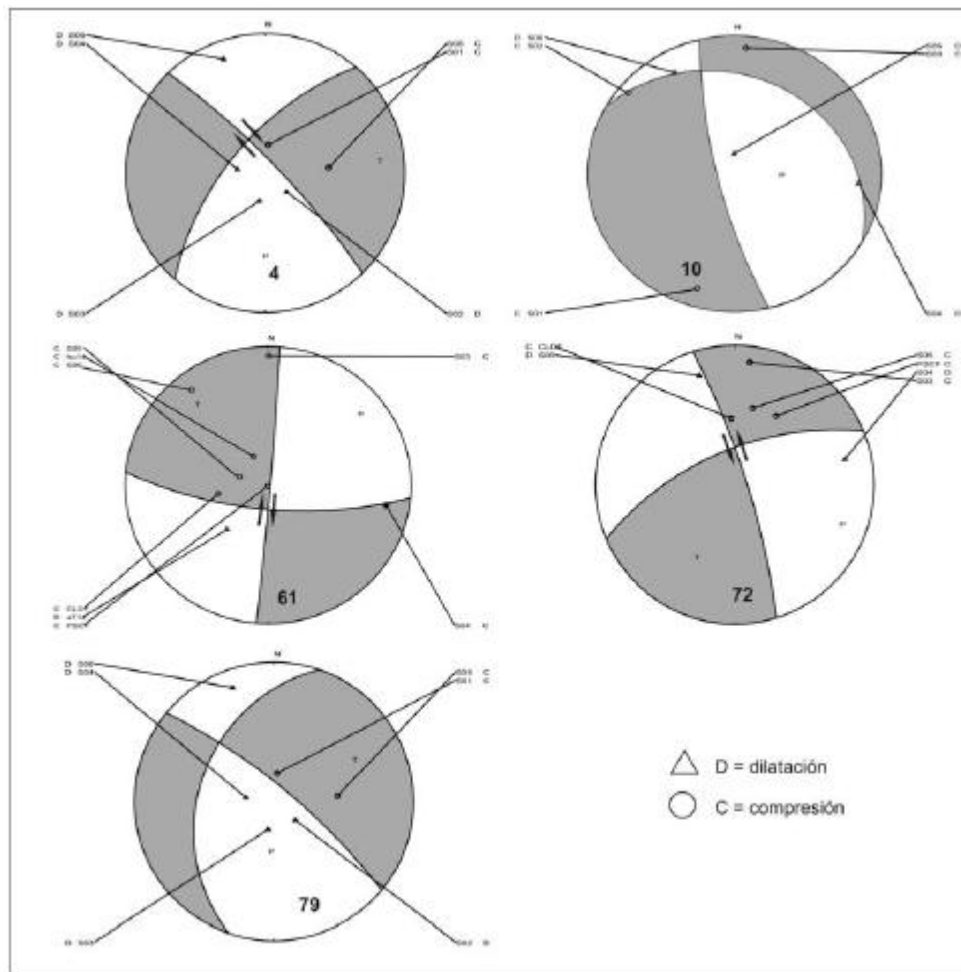


Figura 2.8 Mecanismos focales obtenidos a partir de las polaridades de onda P y registrados en seis estaciones del campo geotérmico Los Humeros. (Antayhua et al., 2007).

Los esfuerzos se dividen de acuerdo a la polaridad compresional o de dilatación de los sismos seleccionados. Los ejes de presión horizontal máximos tienen dirección N60°E a S30°O. Otras direcciones de compresión son N320° a S150° y N240° a S120°. Finalmente para el esfuerzo de Tensión (T) (compresión horizontal mínimo) tiene dirección N3°E a S180° y otro en dirección N20° a S200° (Antayhau et al., 2007). Figura 2.8.1. Los esfuerzos anteriores se grafican en diagramas de rosas para su mejor visualización. Los valores van de 0 a 360° y la mayor amplitud de los datos indica la dirección preferencial.

De acuerdo con estudios de Ferrari et al. (1994b), Suter (1991 y 1997) y García-Palomo (2002) a nivel regional, en el Cinturón Volcánico Transmexicano existen diferentes direcciones de esfuerzos principales, pero predominando la dirección NE-SW. En el campo Los Humeros el esfuerzo compresivo máximo tiene tendencia NE-SW y mínimo en la dirección casi NW-SE.

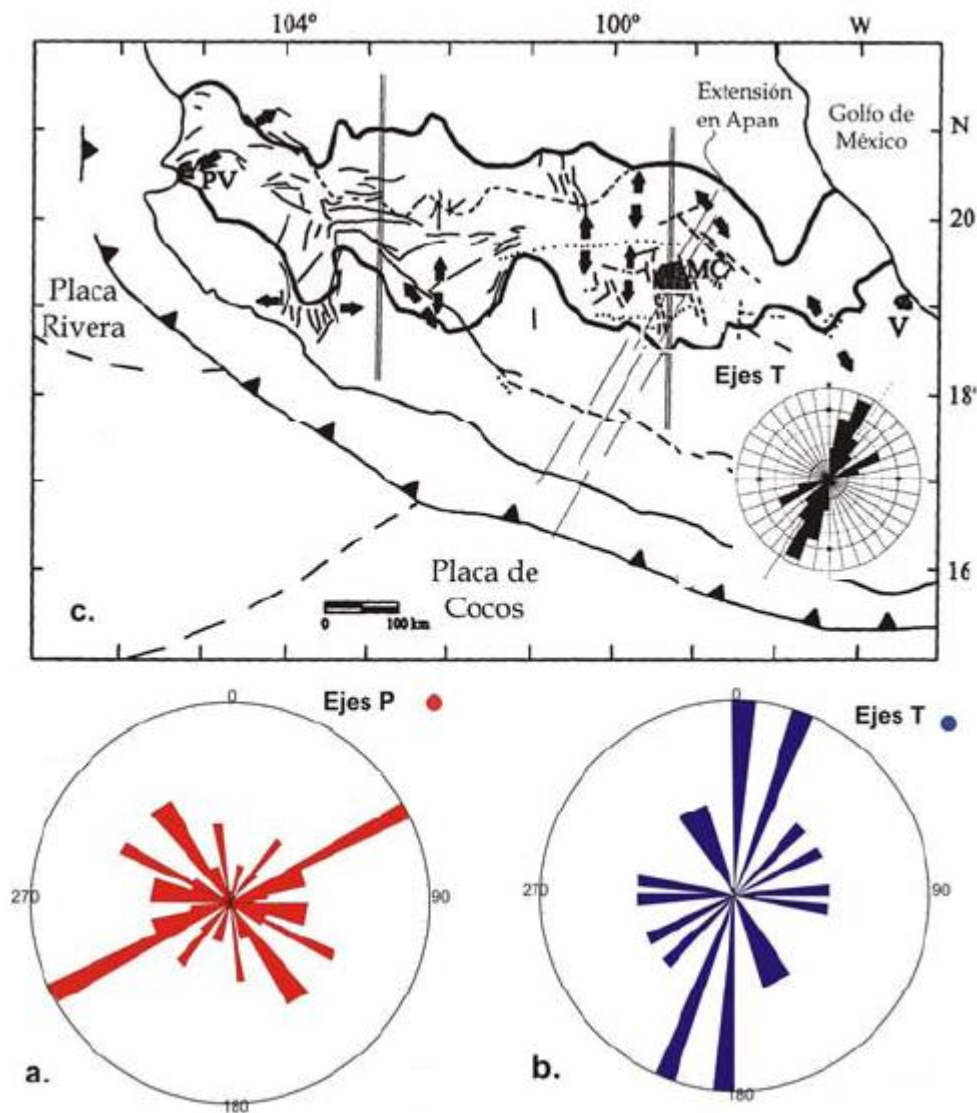


Figura 2.8.1. a. Diagrama de rosas que muestra la dirección de esfuerzo horizontal máximo compresivo en Los Humeros b. Orientación del esfuerzo horizontal mínimo en Los Humeros. c. Orientación del esfuerzo máximo en el Cinturón Volcánico Transmexicano en el diagrama de rosas de esta figura se muestra la dirección promedio del esfuerzo máximo T. (Suter, 1991).