



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO**

**INSTITUTO DE GEOFISICA
POSGRADO EN CIENCIAS DE LA TIERRA**

**SISMICIDAD EN EL CAMPO GEOTERMICO DE LOS
HUMEROS-PUEBLA (1997-2004), SU RELACION CON
LOS POZOS Y LA TECTONICA LOCAL**

T E S I S
QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:
MAESTRA EN CIENCIAS

presenta:
Yanet Teresa Antayhua Vera

Tutor:
M. en C. Javier Lermo Samaniego

2007



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

JURADO ASIGNADO:

Presidente: Dr. Oscar Campos Enríquez
Vocal: Dr. Luis Quintanar Robles
Secretario: M. en C. Javier Lermo Samaniego
Suplente: Dr. Carlos Valdés González
Suplente: Dr. Jorge Aguirre González

Lugar donde se realizó la tesis:

Instituto de Ingeniería, UNAM, Ciudad Universitaria, México, D.F.

TUTOR DE TESIS:

M. en C. Javier Francisco Lermo Samaniego

FIRMA

EN MEMORIA DE:
Padre Pius Hugo Camenish y Alcira Aspilcueta,
dos ángeles a quienes debo mi eterno agradecimiento,
por su cariño y apoyo incondicional para con mi familia .
Dios los tenga en su Gloria.

DEDICATORIAS

*A mis padres: Julieta Vera y Marcial Antayhua,
por el amor y ejemplo de valentía,
por la educación que recibí de ustedes y
por compartir mis éxitos y fracasos.
Las palabras no serían suficientes para manifestarles mi
profundo agradecimiento. Los quiero.*

*A mis hermanos: Félix, María, Isabel, Marcial, Augusto, Guido
y Rosario, por todos los momentos felices que pasamos juntos.
Por mantenernos siempre unidos a pesar de las dificultades.*

*A la hermana Clotilda Demund,
por todo el cariño y apoyo recibido.
Por inculcarme la humildad, la fe y la esperanza.*

*A mi tío Luis Vera, Por su confianza y
ayuda en los momentos que más necesité.
Mil gracias.*

A papá Luchito, por estar siempre junto a nosotros.

AGRADECIMIENTOS

Mi profundo agradecimiento a la *Universidad Nacional Autónoma de México*, por darme la oportunidad de estudiar la maestría.

Al Instituto de Ingeniería, por brindarme la beca de estudios, gracias a la cual pude estudiar la maestría en esta prestigiosa universidad.

Mil gracias al *Posgrado en Ciencias de la Tierra del Instituto de Geofísica*, por la formación académica recibida. A la Coordinadora del Programa de Posgrado Dra. Blanca Mendoza, Muchas gracias.

Agradezco infinitamente a Comisión Federal de Electricidad (CFE), a la Gerencia de Proyectos Termoeléctricos-Departamento de Exploración de Campos Geotérmicos. Mi agradecimiento a los ingenieros: *Raúl Maya, Saúl Venegas, Jesús Arredondo, Abelardo Vázquez, Magaly Flores y Cecilia Lorenzo*.

De manera especial, a mi asesor de tesis, *M. en C. Javier Francisco Lermo Samaniego*, por brindarme su tiempo, sus enseñanzas y consejos para llevar a buen término la presente tesis. Participar en los proyectos de investigación del Instituto de Ingeniería, me ha llenado de muchas satisfacciones y conocimientos.

Especial agradecimiento al Dr. *Carlos Vargas* de la Universidad Nacional de Colombia, por su contribución en el desarrollo del presente estudio.

A los Drs. *Oscar Campos, Carlos Valdés, Luis Quintanar y Jorge Aguirre*, por su contribución y apoyo incondicional en el desarrollo de la tesis. Su confianza y recomendaciones reforzaron mi formación académica.

A mis maestros: *Drs. Juan Martín Gómez, Carlos Mendoza, Marco Guzmán, Ramón Zúñiga, Krishna Singh y Vladimir Kostoglodov*, mi agradecimiento por las enseñanzas impartidas. Al *Dr. Jaime Yamamoto y Araceli Zamora*, gracias por su ayuda.

A mis compañeros y amigos de la maestría y el Servicio Sismológico Nacional: *Flor Torres, Paola Molina, Soledad, Berenice Tapia, Héctor Hernández, Arturo Martínez, Antonio Arvizu, Marcos Chavacán, Lizbeth Dorador, Sara Franco, Aída Quezada, Moisés Contreras, Quetzátcoatl Rodríguez, Mario Islas y Raúl Arámbula*, gracias a todos por hacerme sentir como en casa.

A *Benjamín*, por su apoyo constante en la parte electrónica y de cómputo. A *Isabel, Julio y Elenita* por su colaboración durante mi estadía en México.

Especial agradecimiento al *Dr. Hernando Tavera*, por involucrarme en este hermoso campo de la Sismología y la Vulcanología. Gracias por sus enseñanzas y consejos.

Al *Instituto Geofísico del Perú*, institución en la cual pude desarrollarme profesionalmente. Mil gracias.

A la Sra. *Ivonne, Julita, Yolanda y Rocío*, gracias queridas amigas por sus consejos.

ÍNDICE

RESUMEN

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. ANTECEDENTES	1
1.2. OBJETIVOS	4
1.3. DESARROLLO DE LA TESIS	4
CAPÍTULO 2. GEOLOGIA Y TECTÓNICA	6
2.1. UBICACIÓN GEOGRÁFICA DEL CAMPO GEOTÉRMICO DE LOS HUMEROS	6
2.2. ASPECTO GEOLÓGICO	6
2.3. ASPECTO TECTÓNICO	9
2.4. DISTRIBUCIÓN DE POZOS PRODUCTORES E INYECTORES	11
CAPÍTULO 3. SISMICIDAD EN EL CAMPO GEOTERMICO DE LOS HUMEROS	12
3.1. ESTUDIOS PREVIOS	13
3.2. ADQUISICIÓN DE DATOS	14
3.2.1. Redes Sísmicas	15
3.2.1.1. Red Sísmica Telemétrica Permanente de Los Humeros	15
3.2.1.2. Red Sísmica Temporal	19
3.3. PROCESAMIENTO Y LOCALIZACIÓN DE LOS SISMOS	21
3.3.1. Programa de Localización	21
3.3.2. Estimación de la Curva de Wadati	21
3.3.3. Modelo de Velocidad	23
3.3.4. Ecuación para el cálculo de la Magnitud de Duración	24
3.3.5. Localización Hipocentral	25
3.4. DISTRIBUCIÓN DE LA SISMICIDAD	28
3.4.1. Distribución en Superficie y en Profundidad del Total de Sismos	28
3.4.2. Distribución en Superficie y en Profundidad de los Sismos Seleccionados	30

CAPÍTULO 4. INVERSIÓN DE LA FORMA DE ONDA Y ESTADO DE ESFUERZOS DEL CAMPO GEOTÉRMICO DE LOS HUMEROS	34
4.1. MECANISMOS FOCALES SIMPLES Y DE TENSOR DE MOMENTO	34
4.1.1. Evaluación de la Polaridad de la onda P	34
4.1.2. Mecanismos Focales Simples	36
4.1.3. Mecanismos de Tensor de Momento	36
4.1.3.1. Distribución de los Mecanismos de Tensor de Momento	38
4.2. ESTADO DE ESFUERZOS	42
4.2.1. Distribución de los Esfuerzos	42
4.2.2. Estimación de la Escala de Magnitud de Duración	47
4.3. SISMOS REGISTRADOS EN LAS ESTACIONES S05 Y S06, SU CORRELACION CON LOS POZOS INYECTORES Y PRODUCTORES	48
CAPÍTULO 5. TOMOGRAFIA SISMICA POR ATENUACION A PARTIR DE LAS ONDAS DE CODA	53
5.1. ESTIMACION DE CODA Q_c	53
5.1.1. Datos	54
5.1.2. Resultados	54
5.2. TOMOGRAFIA SISMICA POR ATENUACIÓN (Q_c^{-1})	59
5.2.1. Procesamiento de los Datos	60
5.2.2. Distribución de la Atenuación Sísmica en 3D	63
5.2.3. Distribución de la Atenuación en 2D	67
CAPÍTULO 6. DISCUSIÓN DE RESULTADOS	69
6.1. SISMICIDAD	69
6.2. MECANISMOS FOCALES SIMPLES Y DE TENSOR DE MOMENTO	75
6.3. SISMICIDAD, POZOS INYECTORES Y PRODUCTORES	77
6.4. TOMOGRAFÍA SÍSMICA POR ATENUACIÓN	83
CAPÍTULO 7. CONCLUSIONES	88
BIBLIOGRAFÍA	91
ANEXOS	99
ANEXO 1. Mecanismos Focales Simples	100
ANEXO 2. Mecanismos de Tensor de Momento	115
ANEXO 3. Magnitud de Duración Corregida (M_d^*)	133

RESUMEN

En el presente estudio 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 utilizados corresponden a 95 sismos registrados por la red sísmica permanente y temporal instaladas por la Comisión Federal de Electricidad (CFE) y el Instituto de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México (I de I, UNAM). Asimismo, se realiza una estadística del número de sismos registrados por 2 estaciones de la red permanente, un análisis correlativo de la cantidad de inyección y producción de vapor de agua, mecanismos focales simples y de tensor de momento y posteriormente la tomografía sísmica por atenuación de ondas de coda (Q_c^{-1}) relacionada a la atenuación intrínseca. Los resultados muestran que el total de sismos (95) presentan magnitudes $M_d \leq 3.6$ y profundidades focales que no sobrepasan los 4.0 km. Su distribución en superficie y en profundidad muestran principalmente una intensa actividad sísmica en la zona norte, alrededor de los pozos inyectoros (I29, I38). Los mecanismos focales simples y de tensor de momento muestran una heterogeneidad de esfuerzos a la que está sometido el campo geotérmico, observándose así mecanismos de tipo transcurrente lateral derecha e izquierda, normal e inversa con pequeñas componentes de transurrencia. La relación entre el número de sismos registrados por mes en la estación S05 y la cantidad de inyección de agua al yacimiento geotérmico (I29 e I38) sugieren una estrecha relación entre ellos. Mientras que la relación de los sismos en la estación S06 y el aumento de producción en 8 pozos productores, podría estar asociado a la ocurrencia del sismo del 21 de enero del 2002, debido a la apertura de nuevas fracturas a través de las cuales circularía el fluido geotérmico. Con base en los resultados obtenidos del análisis sísmico: la distribución de la sismicidad en superficie, en profundidad y el análisis del estado de esfuerzos, sugieren que un alto porcentaje de la actividad sísmica que ocurre en el campo geotérmico de Los Humeros es de tipo "inducido". Asimismo, la tomografía sísmica por atenuación ha permitido evidenciar anomalías de alta atenuación en los extremos norte, sur y suroeste de la zona de explotación actual.

CAPITULO 1

INTRODUCCION

1.1. ANTECEDENTES

La constante interacción de las placas tectónicas y por ende la ocurrencia de una intensa actividad volcánica y sísmica, además de otros fenómenos naturales, ha tenido en muchos casos resultados catastróficos; sin embargo, también se ha constituido como una gran fuente de riqueza natural y entre ellos los recursos geotérmicos, cuya explotación ha permitido brindar energía eléctrica de bajo costo a poblaciones de diferentes partes del mundo, entre ellos: Estados Unidos, Filipinas, México, Nueva Zelanda, Costa Rica y El Salvador, además de otros usos tales como: calefacción (Islandia, Estados Unidos, Nueva Zelanda), procesado de alimentos (Estados Unidos y Filipinas), lavado y secado de lana (China y Nueva Zelanda), fermentación (Japón), industria papelera (Australia, China y Nueva Zelanda) entre otros.

Los inicios de la utilización de energía geotérmica en México para la producción de energía eléctrica de bajo costo se remonta a los años sesenta, con el inicio de la explotación del campo geotérmico de Pathé en el estado de Hidalgo (Figura 1). Posteriormente, en Abril de 1973 se puso en operación el campo geotérmico de Cerro Prieto, localizado a 30 km de la ciudad de Mexicali (Baja California). Este campo, con 720 Mwatts (Mw) de capacidad y alrededor de 200 pozos perforados entre inyectores y productores, distribuidas en sus cuatro centrales Cerro Prieto I, II, III y IV (Hiriart y Gutiérrez, 1992), se constituye como el segundo campo geotérmico más importante del mundo y primero de México en la generación de energía eléctrica. El segundo campo geotérmico en importancia lo constituye Los Azufres y se encuentra localizado en el estado de Michoacán a 200 km en dirección Oeste de la ciudad de México. Desde 1997 hasta la actualidad se perforaron alrededor de 60 pozos productores, con una capacidad de 93 Mw. El campo geotérmico de Los Humeros, tercero en importancia, se encuentra localizado en el extremo este del Cinturón Volcánico Mexicano (CVM), aproximadamente a 200 km de la ciudad de México. En 1982 se realizó la perforación del primer pozo y en la actualidad se tienen 41 de ellos, con una capacidad de 42 Mw en 7 unidades de 6 Mw cada una (Quijano-León y Gutiérrez Negrín, 2000). Uno de los campos recientemente explotados lo constituye Las Tres vírgenes, localizada en el extremo este de la península de Baja California Sur (BCS) a 34 km al NO de Santa Rosalía, la ciudad más cercana. Hasta la actualidad se han perforado 13 pozos con una capacidad de 10 Mw.

La exploración geotérmica a continuado y se encuentra a cargo de la Gerencia de Proyectos Termoeléctricos de CFE, los mismos que han establecido la existencia de más de mil manifestaciones geotermales en toda la Republica Mexicana (Figura 1), 30 de ellas

cuentan con estudios de factibilidad y en otros, ya se han perforado pozos exploratorios tales como Cerrito Colorado (Jalisco), Los Negritos (Michoacán) y Acoculco (Puebla).

En general, para conocer si las manifestaciones geotermales son económicamente rentables o no, se realizan diferentes estudios geológicos, geofísicos y geoquímicos a fin de conocer las propiedades físicas del campo antes y durante la explotación. Uno de los métodos más utilizados lo constituye la sismología. La instalación de una red sísmica compuesta por el mayor número de estaciones, antes de la puesta en operación del campo geotérmico, permite conocer zonas de mayor actividad tectónica activa; mientras que en los campos en explotación, la sismicidad podría estar asociada a los diferentes esfuerzos a la que está sometido como producto de la inyección de agua y explotación del vapor de agua en sí. Estos cambios de esfuerzos han sido ampliamente observados y estudiados en zonas de explotación de agua, gas y petróleo (Gupta, 2002; Rutledge y Phillips, 2004; Tang et al., 2005; Ake et al., 2005).

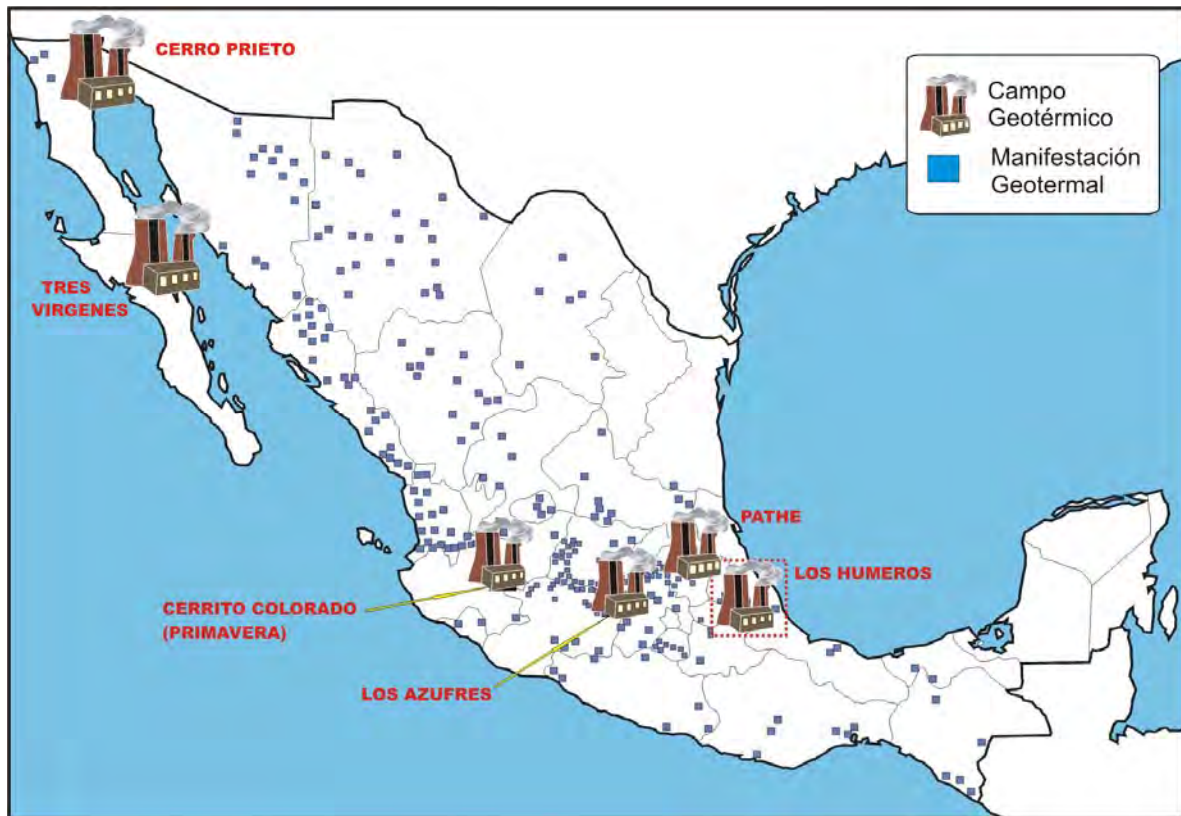


Figura 1. Ubicación de los principales campos geotérmicos y manifestaciones geotermales en México.

Estudios previos de sismicidad antes de la explotación de un campo geotérmico en México, son mínimos (Ponce y Rodríguez, 1977); generalmente son realizados durante la explotación. Los resultados de sismicidad obtenidos por Ponce y Rodríguez (1977) en el campo geotérmico de Los Humeros, muestra una mínima actividad sísmica local relacionada al campo. Estudios realizados por Rodríguez (1999) en el campo geotérmico de Tres Vírgenes

muestra una intensa actividad sísmica asociada a una falla regional conocida como La Virgen. Mientras tanto, estudios de sismicidad realizados en Acapulco-Puebla (Lermo et al., 2004) mostraron una ausencia de sismicidad local; mientras que esta situación se revierte cuando los campos entran en su etapa de explotación. Un ejemplo de ello, fue observado en el campo geotérmico de Tres Vírgenes (BCS) durante la etapa de estimulación ácida realizada a dos pozos productores (LV-4 y LV-13) y su repercusión en el pozo inyector LV-8 (Lermo et al., 2004). Los resultados mostraron un aumento en el número de sismos alrededor de los pozos LV-4 y LV-13 durante la estimulación. Por otro lado, el reinicio de la operatividad de estos dos pozos productores y el de inyección mostró también un incremento considerable en el número de sismos. En el campo geotérmico de Los Azufres (Michoacán), hasta la fecha, los estudios realizados por Rodríguez et al. (2001) y Valdés (2004) concluyen que la sismicidad está relacionada principalmente al graben de Acambay.

El campo geotérmico de Los Humeros (CGLH), motivo del presente estudio, al igual que otros campos, no cuenta con una historia sísmica detallada en su etapa exploratoria; sin embargo, Ponce y Rodríguez (1977) instalaron una red sísmica compuesta por 3 estaciones alrededor de Los Humeros. Esta red estuvo operativa desde el 12 al 24 de enero de 1977 y con ella pudo registrar y localizar 7 sismos locales, con profundidades menores a 1.0 km y magnitudes menores a 1, fuera de la zona de explotación. El estudio detallado de este campo inicia después de la ocurrencia del sismo del 25 de noviembre de 1994, de magnitud moderada ($M_d=4.6$) y profundidad superficial (2 km), el mismo que ocasionó severos daños en la infraestructura del campo geotérmico de Los Humeros (Lermo et al., 1999a; Lermo et al., 1999b). La experiencia permitió a CFE considerar el monitoreo sísmico permanente del campo, con la instalación de 6 estaciones sísmicas. Las estaciones fueron instaladas en diciembre de 1997 y que se encuentran operativas hasta la actualidad. Los estudios realizados por Lermo et al. (2001, 2002, 2004) y Lorenzo (2002) muestran la evolución de la actividad sísmica y su posible relación con los pozos productores e inyectores ubicados en la Zona Norte (ZN) del campo y su posterior migración hacia la Zona Sur (ZS).

En el presente estudio se realiza un análisis detallado de la actividad sísmica ocurrida en el campo geotérmico de Los Humeros durante el periodo diciembre de 1997 a diciembre de 2004, a fin de conocer su evolución en el espacio y tiempo; su distribución superficial, en profundidad y la relación de ésta con los pozos productores e inyectores. Por otro lado, se realiza la inversión de la forma de onda a fin de conocer la fuente que los genera, observar el estado de esfuerzos con el objeto de responder a la pregunta: si ésta sismicidad está asociada únicamente a los procesos de inyección y explotación dentro del campo ó a un régimen tectónico regional. Posteriormente, a partir de los parámetros de fuente se obtiene una ecuación para el cálculo de la magnitud de duración. Finalmente, se realiza una tomografía sísmica por atenuación en 3D utilizando las ondas de coda (Q_c^{-1}) a fin de relacionar esta atenuación con las zonas de mayor temperatura (atenuación intrínseca), éstos a su vez, permitirían expandir y conocer nuevas zonas de explotación geotérmica.

1.2. OBJETIVOS

1. Analizar la actividad sísmica ocurrida en el campo geotérmico de Los Humeros durante el periodo diciembre 1997 hasta diciembre de 2004.
2. Realizar la inversión de la forma de onda de los sismos seleccionados a fin de conocer y analizar los parámetros de fuente que los origina.
3. Obtener una ecuación para el cálculo de la magnitud de duración para el campo geotérmico de Los Humeros
4. Analizar la relación existente entre la sismicidad, la inyección y/o reinyección de agua al yacimiento geotérmico y la explotación del vapor de agua.
5. Realizar y analizar la tomografía sísmica por atenuación utilizando ondas de coda Qc^{-1} , así como su distribución en superficie y en profundidad.

1.3. DESARROLLO DE LA TESIS

El presente estudio está organizado de acuerdo al siguiente orden:

CAPITULO 1. En este capítulo se describe un panorama general de los campos geotérmicos en México, su ubicación e importancia. Asimismo, se describe los estudios de sismicidad realizados antes y durante la explotación geotérmica en los diferentes campos y particularmente en Los Humeros.

CAPITULO 2. Describe las características geológicas y tectónicas a nivel local del campo geotérmico de Los Humeros, así como la distribución de los pozos productores e inyectores.

CAPITULO 3. En este capítulo se describen los estudios previos de sismicidad realizados en el campo geotérmico de Los Humeros, las principales características de la Red Sísmica Telemétrica Permanente de Los Humeros instalada en Diciembre de 1997, además de la reubicación de las mismas. La instalación de estaciones temporales que estuvieron operativas por un corto periodo de tiempo. El análisis de la información sísmica, la localización hipocentral de los sismos y su distribución en superficie y en profundidad son discutidos en el presente capítulo.

CAPITULO 4. También se obtienen los parámetros de fuente a partir de los mecanismos focales simples y de la inversión del tensor de momento. Los resultados son presentados gráfica y numéricamente, además de su distribución en superficie, en profundidad y el estado de esfuerzos en el campo geotérmico de Los Humeros. La relación de la sismicidad con los pozos inyectores y productores, son discutidos también en este capítulo.

CAPITULO 5. Se analiza la distribución espacial de la atenuación de las ondas de coda (Qc^{-1}) siguiendo el modelo de dispersión simple propuesto por Aki and Chouet (1975). Los

resultados son presentados en 3 y 2 dimensiones (3D y 2D).

CAPITULO 6. En este capítulo, se analiza y se discuten los resultados obtenidos de la distribución superficial y en profundidad de los sismos, la fuente que los genera, la distribución de la atenuación sísmica y su relación con los pozos inyectoras, productores y la tectónica local del campo geotérmico de Los Humeros.

CAPITULO 7. Finalmente, se presenta las conclusiones del estudio sísmico del campo geotérmico de Los Humeros, Puebla.

En el Anexo 1, se presentan los mecanismos focales simples obtenidos utilizando la polaridad de la onda P

En el Anexo 2, se presenta la solución de los mecanismos de tensor de momento obtenidos en el presente estudio.

En el Anexo 3, muestra la magnitud de duración corregida (M_d^*), utilizando la ecuación propuesta en el presente estudio.

CAPÍTULO 2

GEOLOGÍA Y TECTÓNICA

2.1. UBICACIÓN GEOGRÁFICA DEL CAMPO GEOTÉRMICO DE LOS HUMEROS

El campo geotérmico Los Humeros se encuentra localizado en el extremo SE del Cinturón Volcánico Mexicano (CVM) entre los límites de los estados de Puebla y Veracruz; aproximadamente a 32 km al NO de Perote (Veracruz), la ciudad más cercana al campo geotérmico y a 200 km de la ciudad de México (Figura 2). El campo tiene un área aproximada de 16 km² de explotación y está limitada por las siguientes coordenadas geográficas: 19.655 a 19.733 de latitud Norte y -97.397 a -97.474 de Longitud Oeste.

2.2. ASPECTO GEOLÓGICO

La geología del campo geotérmico de Los Humeros ha sido descrita por diversos autores, tales como: Pérez-Reynoso (1978), Yáñez-García et al. (1979), Viggiano y Robles (1998a, 1998b), Cedillo (1997) y Arellano (2000). En la Figura 3, se muestra la descripción geológica de Los Humeros.

Geológicamente el campo geotérmico de Los Humeros (CGLH), se encuentra limitado: al norte por la estructura dómica denominada Macizo de Teziutlán (Figura 2). Esta estructura está constituida por esquistos y rocas graníticas desarrolladas durante el Pérmico Tardío hasta el Jurásico Temprano, formando así el basamento regional. Cubriendo al basamento, de manera discordante, aparecen las rocas del Triásico-Jurásico; éstas a su vez están 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 en los extremos 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 (11 Ma) y está constituida por derrames de andesita de hornblenda. Estas rocas se encuentran cubiertas parcialmente por derrames de andesitas de augita que proceden probablemente de los volcanes Cofre de Perote y Pico de Orizaba, cuya edad aproximada es de 5 Ma. El vulcanismo más reciente está representado por coladas de lavas

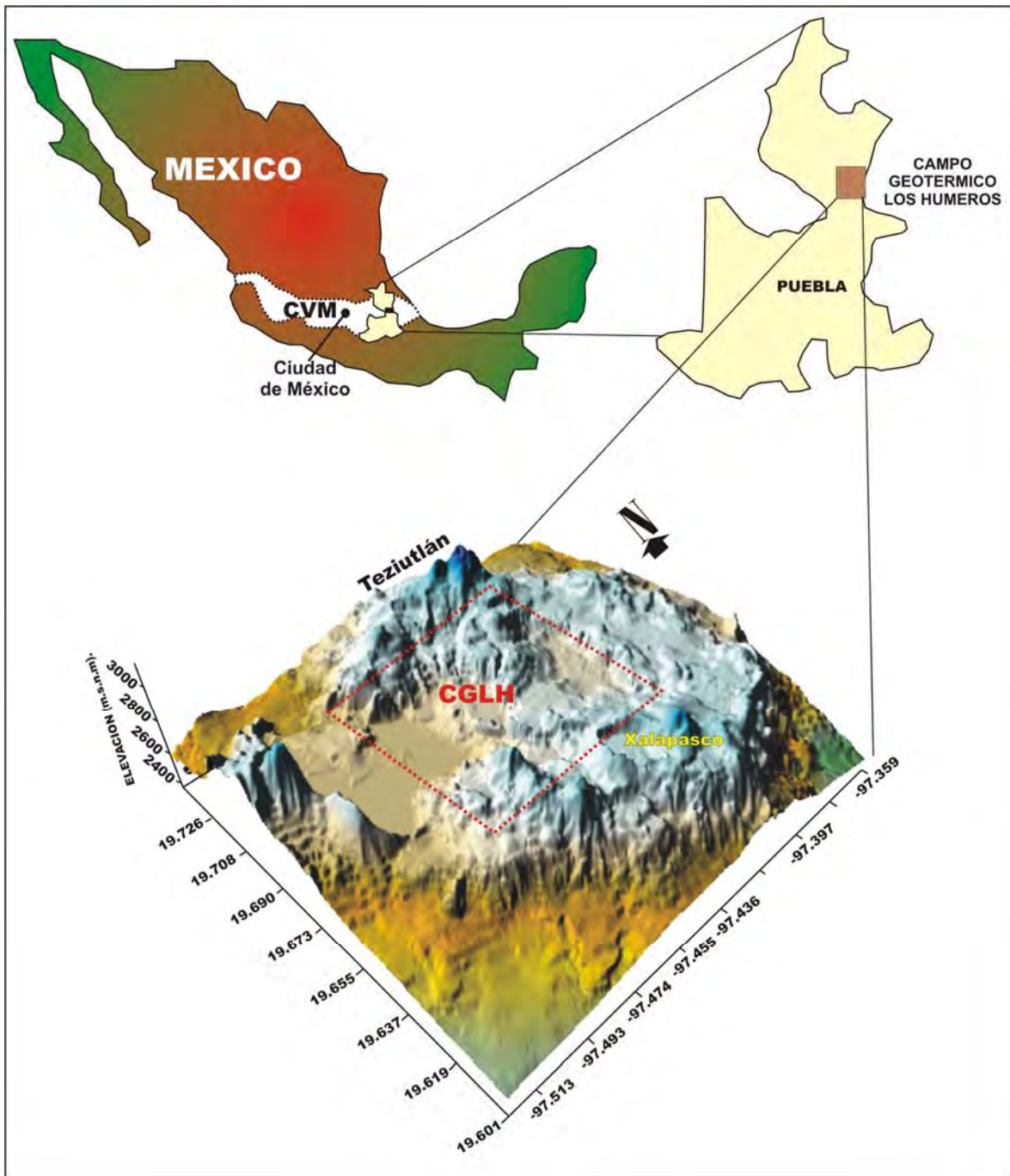


Figura 2. Ubicación geográfica del Campo Geotérmico de Los Humeros (CGLH)

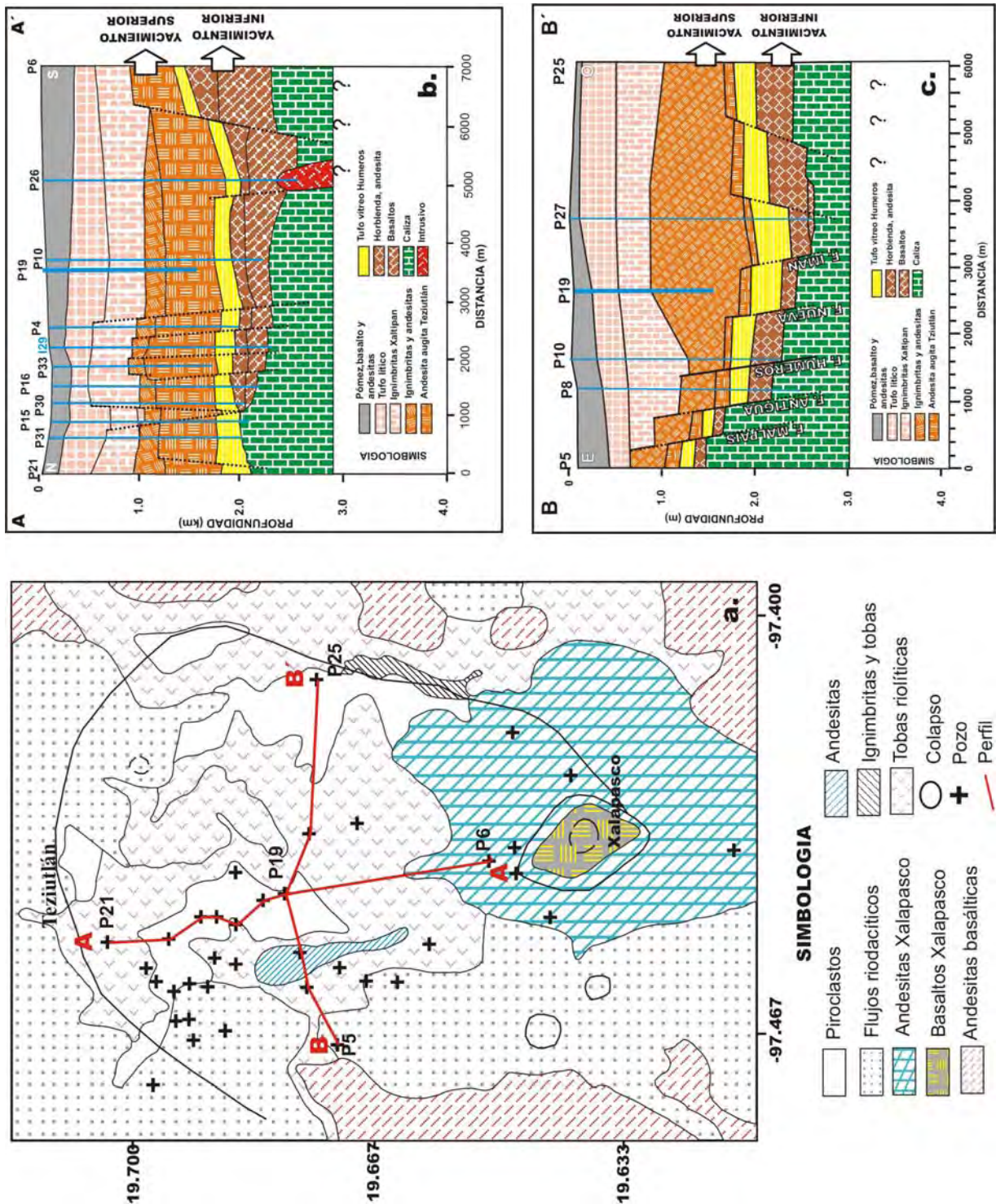


Figura 3. Geología superficial y del subsuelo del campo geotérmico de Los Humeros. a). Principales productos volcánicos depositados en el campo. b) y c). Perfiles estratigráficos en las direcciones Norte-Sur y Este-Oeste, según la Figura 3a (modificado de Arellano et al., 2000).

ácidas, básicas y rocas piroclásticas provenientes de varios centros emisores, los mismos que se observan principalmente al centro de la caldera de Los Humeros y están constituidos por andesitas, dacitas, riolitas, así como de las ignimbritas Xaltipan de 0.45 Ma (Yáñez et al., 1979).

De acuerdo a Cedillo (1997) y Arellano et al. (2000), el siguiente evento debió ser de tipo explosivo por la gran cantidad de material volcánico expulsado. Este evento habría vaciado parcialmente la cámara magmática y por tanto ocasionando el colapso de la estructura, originándose así la caldera de Los Humeros (Figura 3). Después del colapso, se habrían formado varios domos silíceos (0.3 Ma.); asimismo, la emisión de la ignimbrita Zaragoza (0.1 Ma.) ocasionó el colapso de la caldera Los Potreros. 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 las calderas del Xalapasco y otros denominados de explosión o mares que están distribuidas en toda la zona de Los Humeros.

En las Figuras 3b y 3c, se presentan dos secciones estratigráficas orientadas en dirección N-S y E-O respectivamente, según la Figura 3a (modificada de Cedillo, 1997). Estas secciones de 7 y 6 km de longitud, resumen de manera detallada la geología del subsuelo del CGLH, tales como: la disposición de las 9 unidades estratigráficas, espesor, sistemas de fallas y la topografía del basamento del campo geotérmico y la ubicación en profundidad de los dos yacimientos geotérmicos, uno superior formado por andesitas e ignimbritas y otro inferior compuesta por andesitas y basaltos que están separadas por una capa confinante (toba vítrea) que actúa como una barrera entre ellos.

2.3. ASPECTO TECTÓNICO

En la Figura 4, se presentan los principales elementos tectónicos del campo geotérmico de Los Humeros. Tal como se puede observar en la figura, el campo muestra una intensa actividad tectónica activa, representada principalmente por 3 estructuras caldéricas (Los Potreros, Los Humeros y El Xalapasco) formadas en los diferentes eventos volcánicos ocurridos en el campo. Estudios geológicos (Cedillo, 1997; Arellano et al., 2000), geofísicos de reflexión sísmica (COMESA, 1998), gravimetría (Campos-Enríquez et al., 1992) y magnetotelúricos (Seismocontrol S.A., 2005) revelaron también la existencia de sistemas de fallas orientados principalmente en las direcciones noroeste-sureste (NO-SE) y sureste-noroeste (SE-NO) respectivamente.

El primer sistema de fallas orientadas NO-SE está conformado por las fallas Malpais, Antigua, Humeros, Nueva e Imán, con una longitud aproximada de 9 km. De todas estas fallas, 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 la falla La Antigua 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). De acuerdo a los análisis estructurales realizados en la falla Humeros, estos muestran un movimiento de tipo normal; sin embargo existen discrepancias con el buzamiento de la falla.

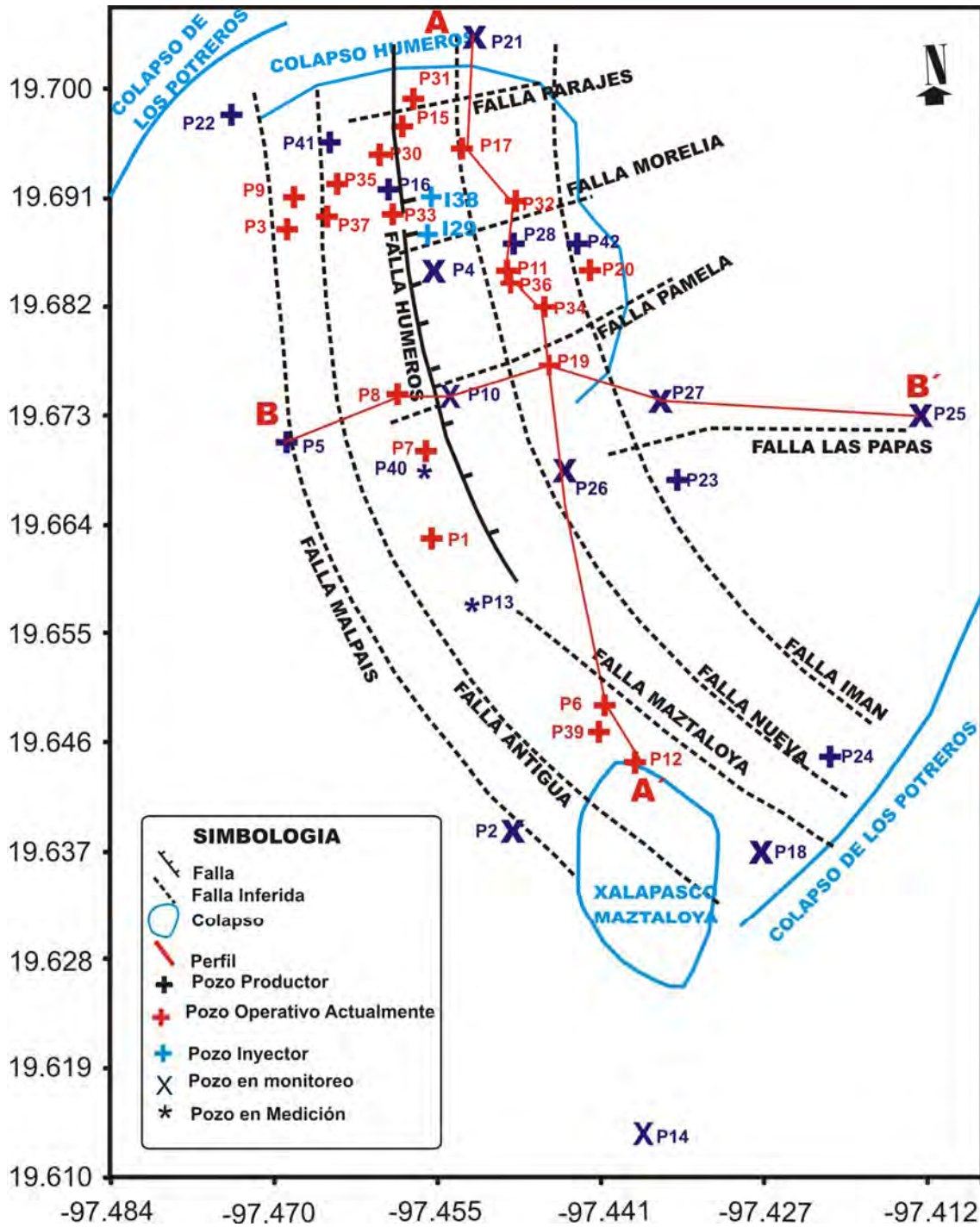


Figura 4. Distribución de los principales elementos tectónicos y los pozos productores e inyectores en el campo geotérmico de Los Humeros (modificado de Lorenzo, 2002).

Así, los estudios tomados de Lorenzo (2004) refieren que esta falla tiene un buzamiento hacia el este; mientras que López-Hernández (1995) reporta el buzamiento hacia el oeste.

El segundo sistema de fallas se encuentra orientado en dirección NE-SO y está representado por: Pamela, Morelia y Parajes; mientras que la falla Las Papas se orienta en dirección E-O. Estas cuatro fallas a diferencia de las anteriores, presentan longitudes menores a 4 km.

2.4. DISTRIBUCIÓN DE POZOS PRODUCTORES E INYECTORES

Después de los estudios geológicos, geofísicos y geoquímicos del campo geotérmico, en 1982 se perforó el primer pozo (P1). Las pruebas de factibilidad resultaron viables para la explotación del vapor de agua. Desde 1990 que inicia la operación en el campo geotérmico hasta la actualidad se han perforado 41 pozos hasta profundidades del orden de los 2.5 km; 30 de ellos son pozos productores (P), 9 en monitoreo y medición y 2 inyectores (I). Su distribución en superficie de dichos pozos son mostrados en la Figura 4. En general, el mayor número de pozos se encuentran ubicados en la ZN del campo geotérmico.

Del total de pozos productores, 21 de ellos se encuentran actualmente operativas (cruces en color rojo); otros pasaron a formar parte de los pozos en medición, en monitoreo e inyección debido a diversos problemas técnicos que se presentaron durante su operatividad (obstrucción, incrustación, acidez, colapso e insuficiencia de vapor). Mientras que, los pozos inyectores I29 e I38 fueron construidos en 1993 y 1997 respectivamente. Inicialmente, el I29 fue perforado como pozo productor hasta la profundidad de 2003 m., pero en agosto de 1993 debido a problemas de incrustación y acidez fue adaptado como inyector. El pozo I38 a diferencia del anterior, fue construido 4 años más tarde y entró en operatividad el 27 de diciembre de 1997.

CAPÍTULO 3

SISMICIDAD EN EL CAMPO GEOTÉRMICO DE LOS HUMEROS

3.1. ESTUDIOS PREVIOS

Ponce y Rodríguez (1977) realizaron un monitoreo sísmico en el campo geotérmico de Los Humeros antes de iniciar la explotación del recurso geotérmico. Ellos instalaron 3 estaciones sísmicas que operaron durante el mes de enero de 1997. Durante este corto periodo de tiempo, las estaciones registraron 7 sismos locales, los mismos que fueron localizados en la periferie del campo geotérmico (fuera de la zona de explotación). De acuerdo a los autores, estos sismos podrían estar asociados a fallas tectónicas.

En el campo geotérmico de los Humeros, se cuenta con información sísmica desde el año 1994, debido a la ocurrencia del sismo del 25 de noviembre de 1994 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 Mercali 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 Comisión Federal de Electricidad (CFE). Un ejemplo de los daños causados son mostrados en la Figuras 5a, 5b y 5c donde se puede observar claramente que las unidades de peso considerable, fueron desplazadas aproximadamente 10 cm en dirección norte de su posición original.

De acuerdo a la localización preliminar realizada por el Servicio Sismológico Nacional (SSN), éste sismo se encontraría alejado del campo geotérmico (cerca de la ciudad de Teziutlán); mientras que los daños observados podrían mostrar lo contrario. Motivado por esta incertidumbre Lermo et al. (1999a), realiza la relocalización del sismo de 1994. La información sísmica fue obtenida de un sismógrafo Sprengnether MQ800 que fue instalada por CFE cerca al pozo P21, dos días después de la ocurrencia del sismo y estuvo operativa hasta el 4 de enero de 1995. La lectura de las réplicas del sismo principal mostraron una diferencia entre los tiempos de arribo de las ondas P y S menores a 0.8 segundos ($T_s - T_p > 0.8$ s), lo que confirmaría que su hipocentro se ubica dentro del campo geotérmico de Los Humeros y su posible origen estaría relacionado a la activación de la ZN de la falla Los Humeros. En la Figura 5d, se presentan los parámetros hipocentrales obtenidos en la relocalización por Lermo (1999) y el SSN, además de un ejemplo de réplicas registradas el 27 de diciembre de 1997 en la estación P1.

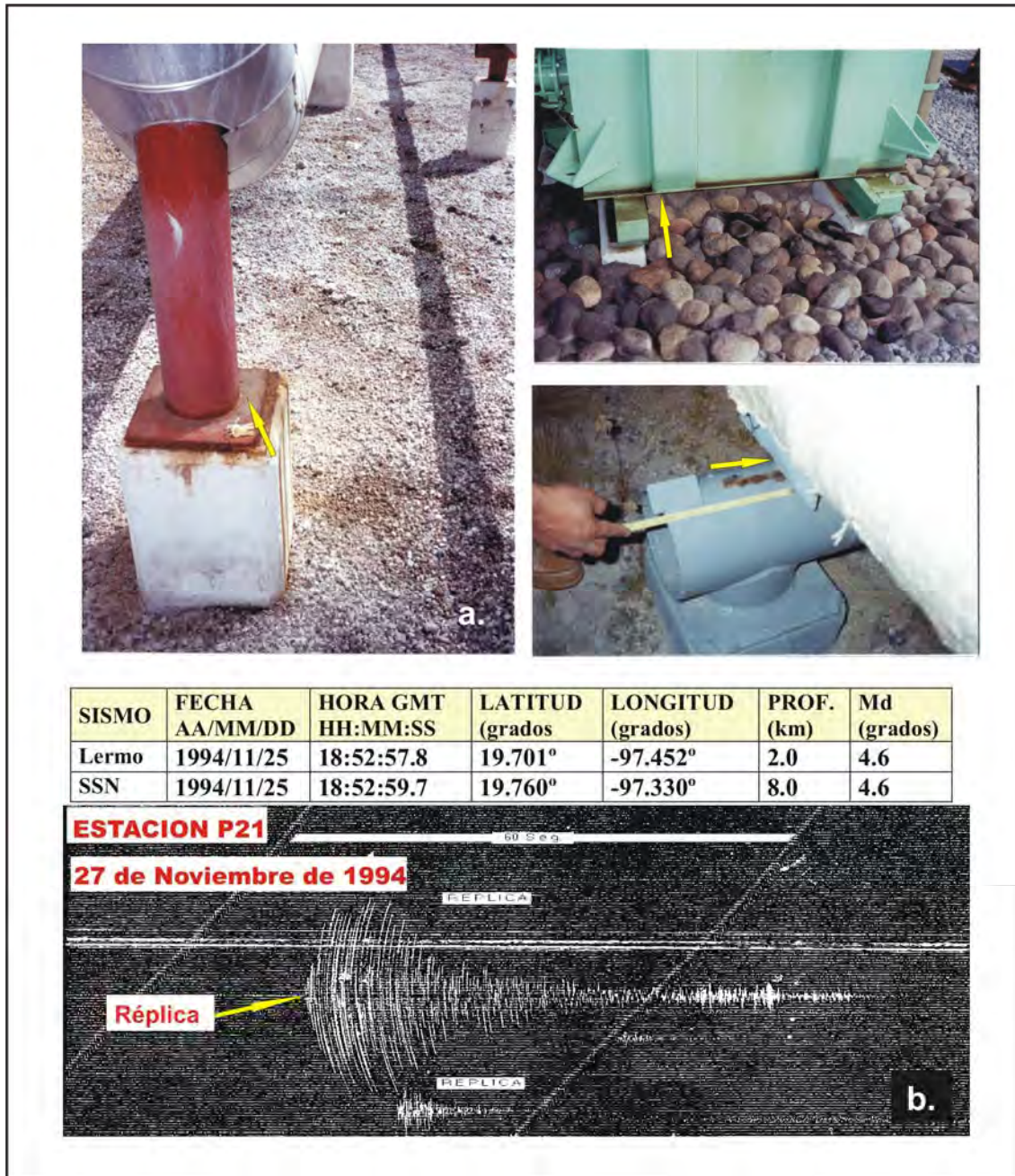


Figura 5. a). Fotografías que muestran el desplazamiento de las unidades del campo geotérmico como consecuencia del sismo del 25 de Noviembre de 1994. Las flechas indican la dirección del movimiento. b). Parámetros hipocentrales y ejemplos de réplicas del sismo.

Para CFE la ocurrencia de este sismo fue determinante para iniciar el monitoreo sísmico del campo geotérmico en diciembre de 1997, con la instalación de una red sísmica compuesta de 6 estaciones y distribuidas alrededor del campo. A partir de entonces los estudios del comportamiento sísmico fueron realizados y analizados por Lermo et al. (1999a), Lermo et al. (1999b), Lermo et al. (2000, 2001, 2002, 2005), Lermo y Lorenzo (2003) y Lorenzo (2002, 2004).

Lermo et al. (1999b), analizando la información sísmica ocurrida durante diciembre de 1997 a diciembre de 1998, observó que la sismicidad se concentraba principalmente alrededor de los pozos inyectores I29 e I38, mostrando así una estrecha relación entre el número de sismos y la cantidad de inyección de agua al yacimiento geotérmico. Estos resultados fueron observados también durante los siguientes años de monitoreo (Lermo et al., 1999a; Lermo y Lorenzo, 2003; Lermo et al., 1999b, 2000, 2001, 2002, 2005; Lorenzo, 2002, 2004).

Desde diciembre 1997 hasta enero de 1999, esta sismicidad se concentró principalmente en la ZN del campo geotérmico; es decir, alrededor de los pozos inyectores I29 e I38 alcanzando profundidades del orden de 4 km, pero a partir de febrero de 1999 la sismicidad también es observada hacia el sur del campo. En general, estos sismos se distribuyen a lo largo de la falla Los Humeros, precisamente al sur de ésta falla ocurrió un sismo de magnitud moderada ($M_w=3.6$) y profundidad superficial (2 km) el 21 de enero de 2002. El análisis de los parámetros de fuente realizados por Lermo et al. (2002), muestra concordancia con las características estructurales de la falla Los Humeros.

En febrero del 2002, las estaciones sísmicas quedaron inoperativas temporalmente por problemas de seguridad, por la lejanía a la fuente sísmica y presencia de ruido en otras (Lermo y Lorenzo, 2003); por lo que fue necesario reubicar las estaciones con una mejor cobertura azimutal con respecto a la sismicidad y libre de ruido.

La redistribución fue llevada a cabo al poco tiempo, aunque de las 6 estaciones quedaron operativas únicamente 3 estaciones. Estos inconvenientes fueron sucediéndose hasta fines del 2004; por tal razón, CFE tomó la decisión de construir casetas para las estaciones sísmicas con mayor seguridad, además de implementar un nuevo sistema digital de monitoreo (Lermo et al., 2005).

Los resultados de los estudios realizados por Lermo y Lorenzo durante los últimos tres años siguen tendencias similares a los descritos anteriormente.

3.2. ADQUISICIÓN DE DATOS

La información sísmica utilizada en el presente estudio proviene de 2 redes sísmicas instaladas alrededor del campo geotérmico Los Humeros: una Red Sísmica Telemétrica Permanente (RSTP) y una Red Sísmica Temporal (RST). Las características de cada una de ellas y su distribución en el campo geotérmico son descritas a continuación.

3.2.1. Redes Sísmicas

La primera estación sísmica instalada en el CGLH fue instalada por personal de CFE el 27 de noviembre de 1994; es decir, 2 días después de ocurrido el sismo del 25 de diciembre de 1994 ($M_d=4.6$) a fin de monitorear las réplicas del sismo principal y su repercusión en el campo. Esta estación estuvo compuesta por un sismógrafo Sprengnether MQ800 de componente vertical y fue instalada al lado del pozo P21. La estación P21 estuvo operativa hasta el 4 de enero de 1995 y la información obtenida de las réplicas permitió la relocalización del sismo principal. El antecedente de los daños sufridos en las unidades geotérmicas permitió que CFE considerara necesaria y de gran utilidad la instalación de una red sísmica telemétrica permanente (RSTP) para el monitoreo sísmico del campo geotérmico.

3.2.1.1. Red Sísmica Telemétrica Permanente de Los Humeros

La RSTP del campo geotérmico de Los Humeros, fue instalada el 1 de diciembre de 1997 y está compuesta por 6 estaciones sísmicas, las cuales contienen un registrador digital de aceleración Altus K2 con una resolución de 16 bits, además presenta 2 tarjetas tipo flash de memoria variable para el almacenamiento temporal de la información sísmica. Este registrador de aceleración está acoplado a 3 sensores de velocidad marca Kinometrics, tipo Ranger SS-1 de periodo corto (1 segundo) en sus tres componentes, una vertical (Z) y dos horizontales norte-sur (N-S) y este-oeste (E-O) respectivamente, (Figura 6a). La curva de magnificación de este sistema es plana entre los 0.2 a 40 Hz (Lermo et al., 1999b). Asimismo, estas estaciones sísmicas están conectadas a una radio de transmisión Freewave modelo DGR-115H, una antena transmisora tipo Yagi de 920-960 Mhz, direccional y un panel solar de 75 watts a 17 V. Estos dispositivos son alimentados por medio de una o dos batería de ciclo profundo de 12 V a 135 Amp, que es cargada por medio del panel solar (Figura 6b).

La distribución superficial de la RSTP se presenta con flechas verdes en la Figura 7 y en la Tabla 1 sus principales características.

Tal como se observa en la figura, la distancia entre estaciones es de 5 km aproximadamente y cubre en total un área de 20 km². En general, todas las estaciones se encuentran entre los 2800 a 3110 msnm.

La ubicación original de las 6 estaciones se conservó hasta febrero de 2002. El problema de su reubicación inicia con el hurto de la estación S02 (Coamilas), sumándose a ello los problemas de ruido observados en las estaciones S01 y S02; así como la lejanía de S03 y S04 a la zona de mayor actividad sísmica. Esta última observada con el análisis de la sismicidad correspondiente al periodo diciembre 1997 a enero de 2002. Ejemplo del registro del sismo N° 8 (Tabla 4) del 31 de diciembre de 1997 en las 6 estaciones permanentes, es mostrado en la Figura 8a.

A fin de encontrar el lugar adecuado para la reubicación de las 3 estaciones, Lermo et al. (2003), realizó estudios de efectos de sitio utilizando la metodología descrita por Nakamura (1989). Los lugares seleccionados fueron: Cerro Sotoltepec, Cerro Arenas, Cerro Hilillo y la parte alta del cráter del volcán Xalapasco. La reubicación de las 4 estaciones antes mencionadas fue llevada a cabo en septiembre del 2002; mientras que, S05 y S06 continúan en

su ubicación original hasta la actualidad. Las características de las nuevas estaciones son descritas y mostradas en la Tabla 1 y su representación está dada por triángulos blancos en la Figura 7.

Tabla 1. Principales características de las estaciones sísmicas instaladas en el campo geotérmico de Los Humeros, Puebla (CG).

ESTACIÓN	LATITUD (grados)	LONGITUD (grados)	ELEVACIÓN (msnm)	LOCALIDAD
S01	19.721	-97.445	2975	Sotoltepec
S02	19.646	-97.402	2925	Coamilacas
S03	19.633	-97.460	3000	El Jaral
S04	19.690	-97.488	2775	Los Coyotes
S05	19.684	-97.456	2800	Loma Blanca
S06	19.661	-97.440	2900	Las Papas
Repetidor	19.718	-97.420	3110	San Antonio
Central	19.630	-97.412	2970	Campamento
ESTACIONES REUBICADAS				
T07	19.657	-97.463	3025	C. Arenas
T08	19.709	-97.467	2971	C. Sotoltepec
T09	19.699	-97.437	2962	C.Hilillo
T11	19.635	-97.444	3030	Xalapasco
ESTACIONES TEMPORALES				
HUCF	19.681	-97.458	2840	CG
CLCF	19.687	-97.452	2885	CG
PSCF	19.686	-97.460	2754	CG
PNCF	19.693	-97.454	2435	CG

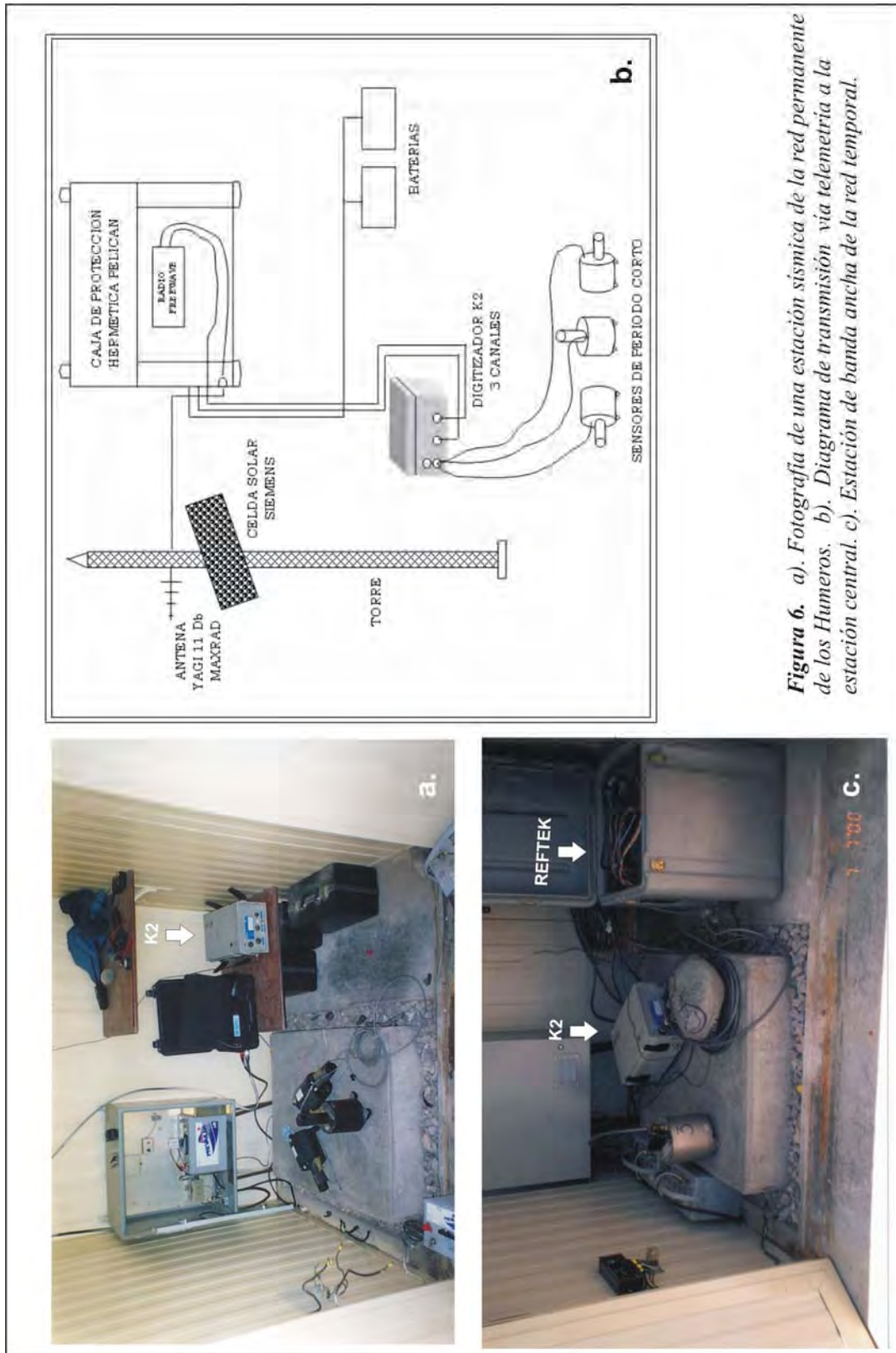


Figura 6. a). Fotografía de una estación sísmica de la red permanente de los Humeros. b). Diagrama de transmisión vía telemetría a la estación central. c). Estación de banda ancha de la red temporal.

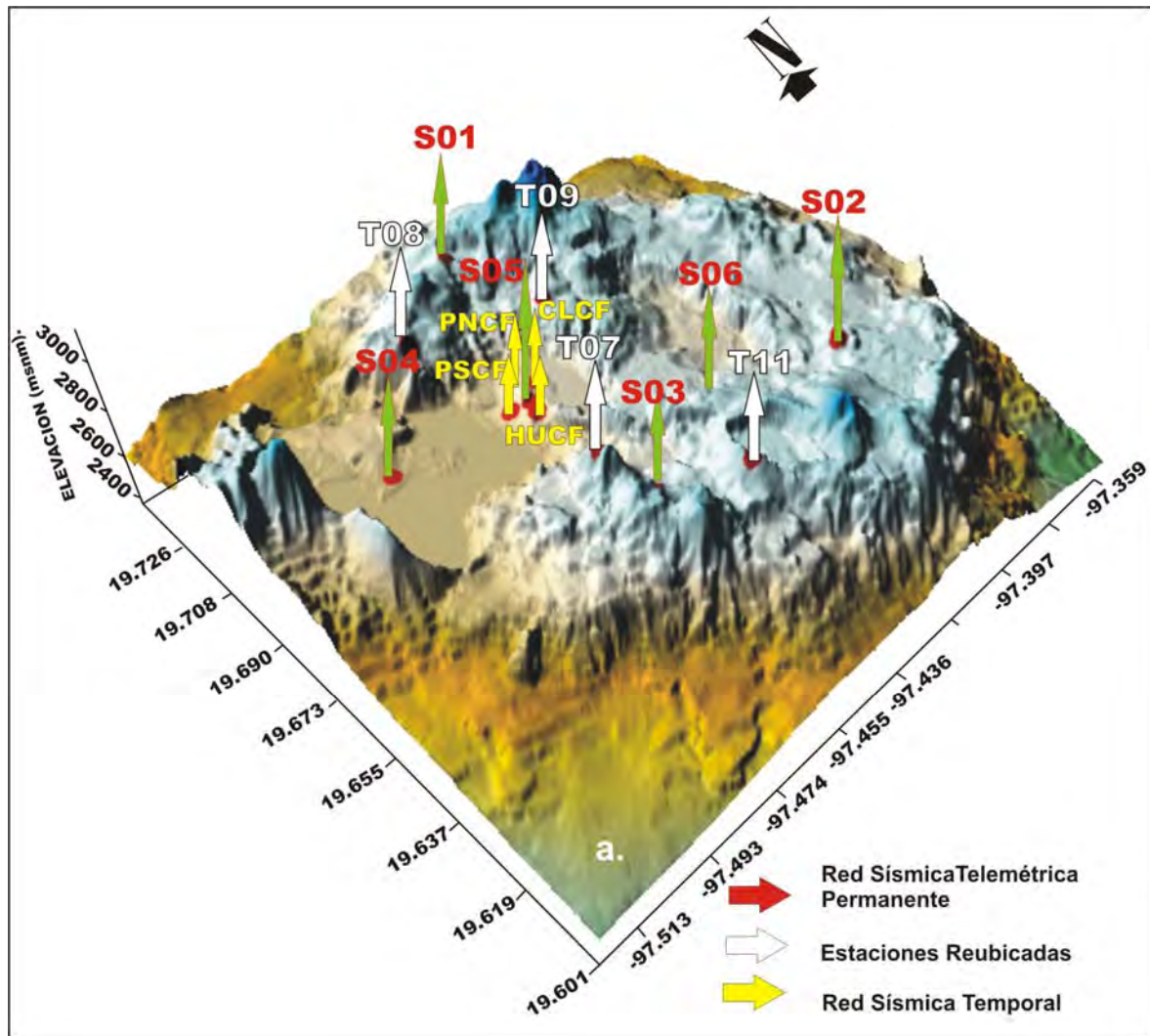


Figura 7. Distribución de las estaciones sísmicas correspondientes a la Red Sísmica Telemétrica Permanente (flechas verdes), estaciones reubicadas (flechas blancas) y de la Red Sísmica Temporal (flechas amarillas).

3.2.1.2. Red Sísmica Temporal

La red sísmica temporal del campo geotérmico (RST) fue instalada los meses de julio a octubre de 1999 y 2000, a fin de verificar la calibración de las estaciones sísmicas permanentes y analizar la actividad sísmica alrededor de los pozos inyectoras. En la Figura 6b, se muestra la fotografía de las 2 estaciones: K2 y Reftek-Guralp, instaladas en el mismo lugar para los fines de calibración (Lermo y Lorenzo, 2003).

Esta RST estuvo compuesta por 4 estaciones de banda ancha (Reftek-Guralp), propiedad del Instituto de Ingeniería (IdeI) de la UNAM. Estas estaciones fueron instaladas alrededor de la estación permanente S05 (Figura 7). La primera de ellas estuvo ubicado en el poblado de Los Humeros (HUCF), la segunda estación (PNCF) se instaló al norte de S05, la tercera en el extremo este de la estación S05 y que tomó el nombre de CLCF; mientras que el cuarto en el extremo oeste de la estación S05 (PSCF). Cada una de estas estaciones estuvo conformada por: un registrador Reftek 72A-08 de 24 bits y un sismómetro de 3 componentes (Z, N-S y E-O) marca Guralp CMG-40T de periodo natural de 30.8 s. La corrección instrumental muestra una respuesta plana entre 0.03 a 80 Hz.

Tal como se puede observar en la Figura 7, las estaciones sísmicas (flechas amarillas), se distribuyen alrededor de la estación permanente S05 (Loma blanca). Asimismo, en la Figura 8b se muestra el sismo N° 61 del 11 de julio de 1999 (Tabla 4) registrado en las estaciones permanentes y temporales.

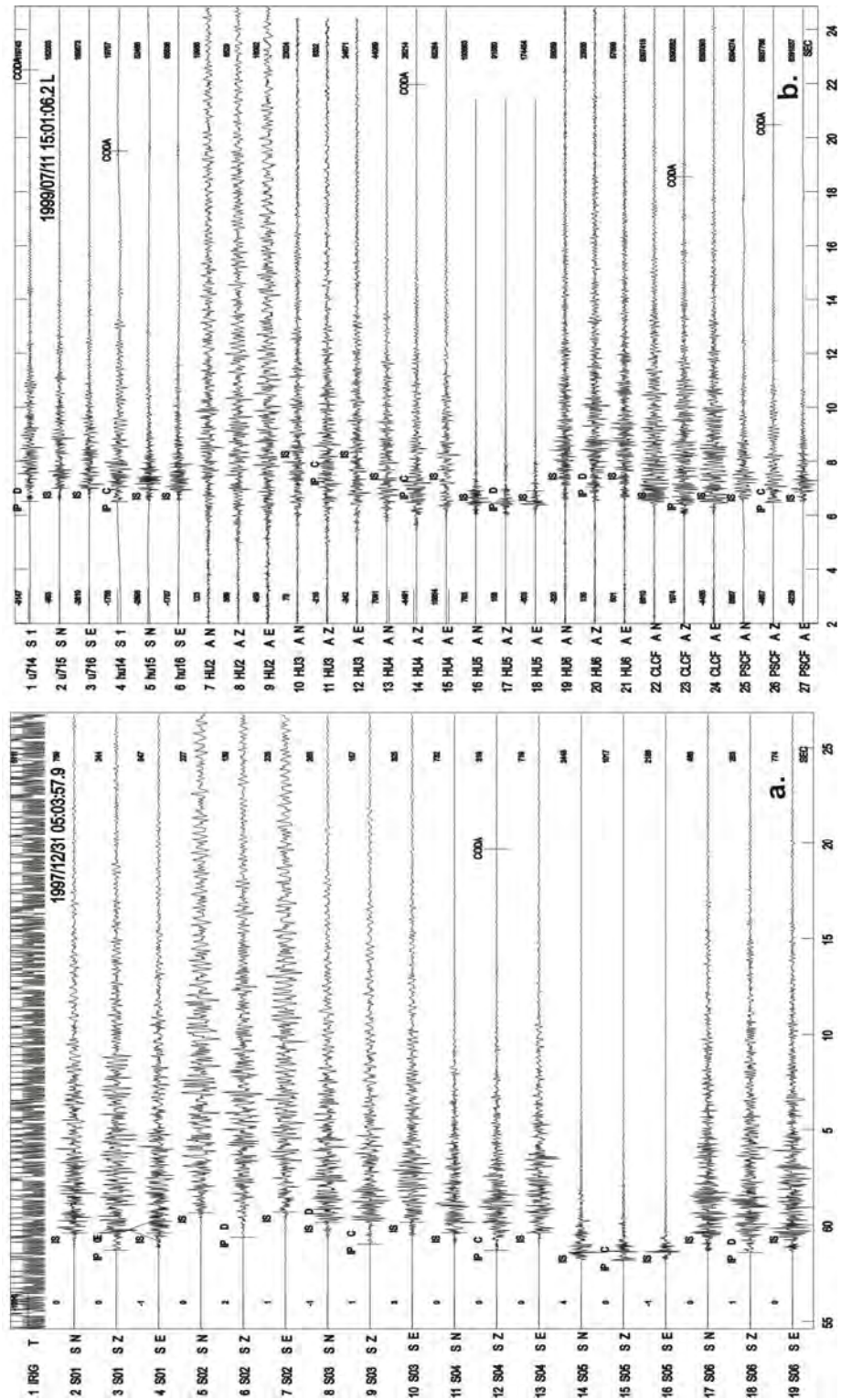


Figura 8. Ejemplos de sismos registrados en: a). Estaciones de la red permanente de Los Humeros y b) Estaciones de la red temporal.

3.3. PROCESAMIENTO Y LOCALIZACIÓN DE LOS SISMOS

Para el procesamiento y localización de los sismos correspondientes al periodo diciembre 1997 a diciembre de 2004, se ha seguido el siguiente procedimiento:

- Recopilación de toda la información sísmica registrada en las estaciones de las diferentes redes sísmicas instaladas durante el periodo de estudio.
- Selección de sismos locales registrados en 3 o más estaciones, tomando como base la estación S05 y S06, debido a que ambas estaciones estuvieron operativas durante todo el periodo de estudio, además de conservar su ubicación original.
- El total de sismos seleccionados permitió generar una base de datos de 280 sismos locales, 120 de ellos registrados en 3 estaciones, 65 sismos en 4 estaciones, y 95 en 5 o más estaciones sísmicas.
- El paso siguiente fue utilizar un programa de localización para la lectura de los tiempos de arribo de las ondas P y S y su posterior localización hipocentral

3.3.1. Programa de Localización

El programa de procesamiento utilizado en el presente estudio es el SEISAN versión 8.0 (Havskov and Ottemoller, 2003) y con el apoyo del programa de localización Hypocenter (Lienert, 1986). 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.

Aunque existen otros programas de localización hipocentral, se ha elegido éste porque presenta utilidades que permiten controlar mejor la profundidad focal del sismo. Asimismo, cuenta con programas adicionales para el realizar mecanismos focales, modelado de la onda, obtención de coda Q, entre otros y que son utilizados también en el estudio.

3.3.2. Estimación de la Curva de Wadati

Una vez creada la base de datos de sismos locales de Los Humeros correspondiente al periodo de estudio, se procedió a leer los tiempos de arribo más claros de las ondas P y S del total de sismos (280). Posteriormente, se realizó la curva de Wadati graficando los tiempos de arribo de ondas S versus ondas P (T_s vs T_P). Este proceso fue realizado año por año, con excepción de 1997 en el que se hizo únicamente de un mes debido a que la red sísmica de los Humeros inició su operatividad en el mes de diciembre. Los resultados obtenidos son mostrados en la Figura 9.

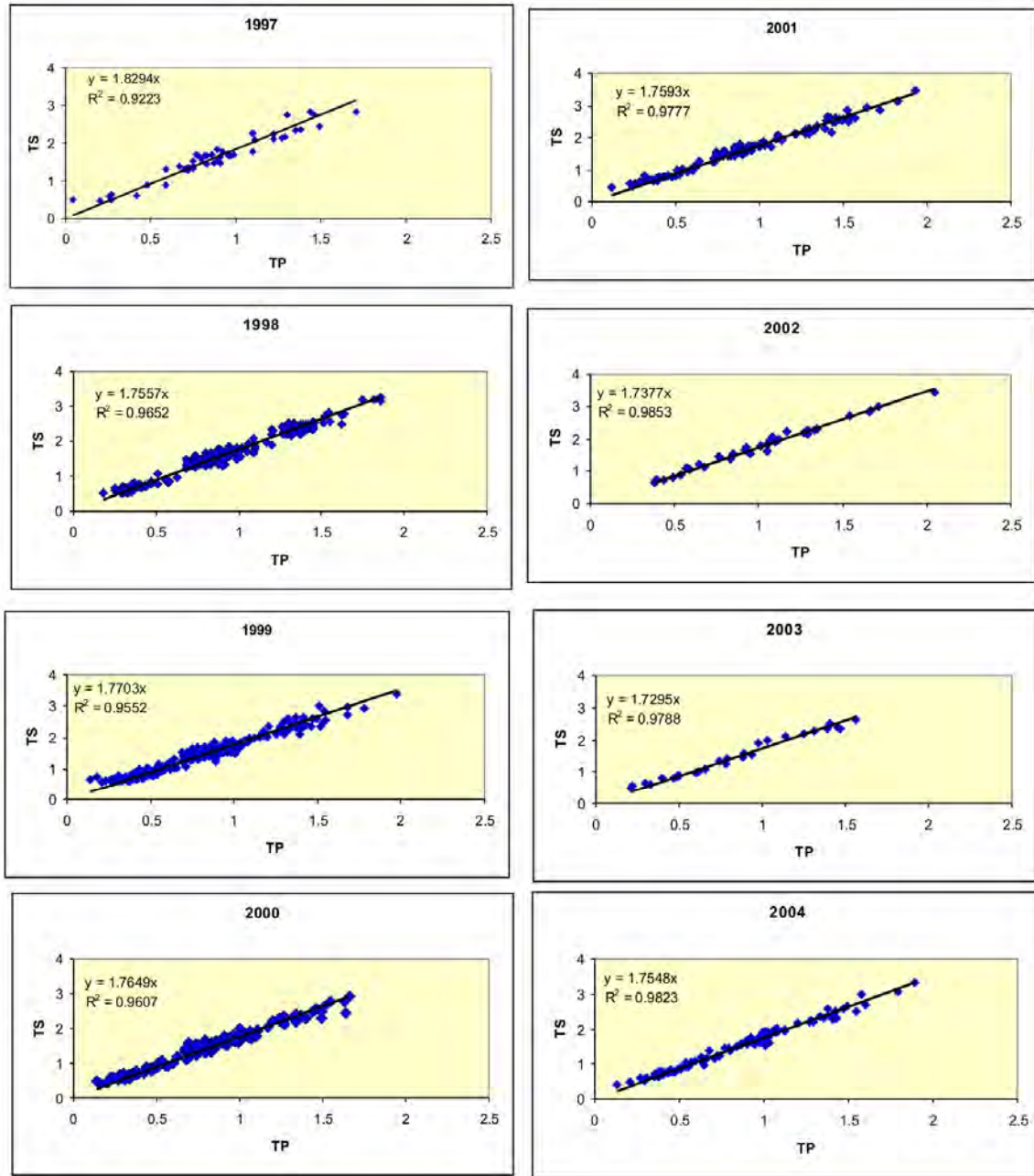


Figura 9. Estimación año por año de las curvas de Wadati. TP y TS, son los tiempos de arribo de las ondas P y S en segundos. Y es la ecuación de la pendiente y R^2 es el coeficiente de correlación.

De acuerdo al análisis de las diferentes curvas de Wadati, se observa que para diciembre de 1997, se obtiene una relación de velocidad $V_p/V_s=1.83$, relativamente grande comparada a los obtenidos utilizando información de todo un año para 1998 a 2004 donde V_p/V_s oscila entre 1.73 a 1.77 respectivamente y coeficientes de correlación del orden de 0.9. Debido a la particularidad del valor de diciembre de 1997, se vió la necesidad de seleccionar únicamente el mes de Diciembre de los años 1998 a 2003 (no hay suficiente información para el mes de diciembre de 2004), a fin de observar si el valor se repetía de manera constante durante ese mes o nó, lo que podría sugerir su relación con algún fenómeno particular. Sin embargo, los resultados del cálculo (Tabla 2) muestran mayor semejanza con lo obtenido año por año, por lo que se descarta lo inferido anteriormente.

En el campo geotérmico de las Tres Vírgenes (BCS) Wong y Munguía (2006) obtuvieron valores de V_p/V_s de 1.68 y 1.76 respectivamente. Por otro lado Gunasekera et al. (2003), en los estudios de sismicidad realizados en la zona geotérmica de Carolina (Estados Unidos), encontraron variaciones de V_p/V_s desde 1.65 hasta 1.81. Los autores de ambos estudios relacionaron estas variaciones a la heterogeneidad estratigráfica, aunque en general observaron que los valores altos se presentan principalmente en la parte central (zona de producción) y los menores en la periferie del campo. Asimismo, Rebollar et al. (2003) sugieren que los valores altos ($V_p/V_s=1.91$) se presentarían también, en áreas con saturación de agua (región geotérmica de Cerro Prieto, Baja California).

Los valores de V_p/V_s entre 1.73 a 1.76 obtenidos en el campo geotérmico de Los Humeros podrían sugerir que la heterogeneidad es menos complicada a lo observado en Las Tres Vírgenes (Wong et al., 2001) y en el campo geotérmico de Carolina (Gunasekera et al., 2003); mientras que el valor de 1.83 podría estar relacionado a la puesta en operación del pozo inyector I38 el 27 de diciembre de 1997 (Lermo et al., 1999).

Tabla 2. Valores de la relación de velocidades (V_p/V_s) obtenidos para el periodo de estudio de 1997 a 2004 y sus correspondientes coeficientes de correlación (coef. corr.). La parte inferior de la tabla, muestra los V_p/V_s únicamente para el mes de diciembre de cada año. (**, sin información).

AÑO	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004
Vp/Vs	1.83	1.76	1.77	1.77	1.76	1.73	1.73	1.76
Coef. Corr.	0.92	0.97	0.96	0.96	0.97	0.98	0.98	0.98
DICIEMBRE								
Vp/Vs	1.83	1.77	1.77	1.74	1.76	**	1.73	**

3.3.3. Modelo de Velocidad

Entre los diferentes métodos aplicados para conocer el modelo de velocidades en el campo geotérmico de Los Humeros, el más adecuado fue el obtenido por Hurtado (2001) a partir de cuatro perfiles de reflexión sísmica realizado por COMESA (1998), los mismos que fueron realizados en las direcciones N-S y E-O respectivamente, con una longitud de 4 km.

Con el perfil de reflexión sísmica N° 2 y orientado en dirección E-O, Hurtado (2001) obtuvo la velocidad de la onda P (V_p) y la profundidad equivalente para los 9 estratos de la que esta compuesta el subsuelo de campo geotérmico de Los Humeros (Cedillo, 1997; Arellano et al., 2000) siguiendo la metodología descrita por Dix (1995). En la Tabla 3, se muestra el modelo de velocidad obtenido, donde la profundidad a cada estrato esta dado en km y la velocidad de la onda P en km/s.

Tabla 3. Modelo de velocidad obtenido por Hurtado (2001). Prof, es la profundidad en kilómetros y V_p la velocidad de la onda P en kilómetros por segundo.

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

3.3.4. Ecuación para el cálculo de la Magnitud de Duración

Hasta la actualidad, no se han obtenido ecuaciones para el cálculo de magnitud, para sismos ocurridos en campos geotérmicos. Generalmente, los utilizados corresponden a los propuestos por Lee et al. (1975), Havskov y Macías (1983) entre otros. Estas ecuaciones fueron obtenidas con información sísmica de ambientes tectónicos diferentes al de un campo geotérmico. Sin embargo, la utilización de dichas ecuaciones cuando no se cuenta con uno específico para la zona de estudio, permite estimar una magnitud aproximada. Por ello, para este estudio, se consideró utilizar la ecuación más reciente obtenida para la cuenca de México, con información sísmica local de buena calidad (Chavacán et al., 2004).

La ecuación es la siguiente:

$$Md = -1.61947 + 2.336177 \text{Log}_{10}(T) + 0.00052(D)$$

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

3.3.5. Localización Hipocentral

En general, la información sísmica proviene de las estaciones permanentes y temporales con una frecuencia de muestro de 100 muestras por segundo (100 m/s). La lectura de los tiempos de arribo T_s y T_p fueron realizados con una precisión de 0.01s para la onda P y de 0.05s para la onda S, por la buena calidad de la información sísmica recopilada. La relación de velocidades V_p/V_s utilizada para la localización ha sido obtenido a partir de las curvas de Wadati realizadas año por año (ver Tabla 2, Figura 7), obteniéndose así, un valor promedio de $V_p/V_s=1.76$. Asimismo, el modelo de velocidad utilizado corresponde al propuesto por Hurtado (2001) y la ecuación de magnitud propuesto por Chavacán et al. (2004). Esta información ha sido adicionada al programa SEISAN para realizar la localización hipocentral de los 280 sismos.

Los resultados obtenidos de la localización muestran:

- Los errores de localización hipocentral (latitud, longitud y profundidad) menores a 2 a 3 km para los sismos localizados con 3 y 4 estaciones; mientras que para los localizados con 5 a más estaciones los errores fueron menores a 1 km.
- Los 280 sismos localizados, no sobrepasan los 4 km de profundidad.
- La magnitud de los sismos son del orden 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. (1999b, 2001), Lermo y Lorenzo (2003).

Debido a que se trata de sismos muy locales, donde el error en la localización debe ser lo más pequeño posible, en el presente estudio se ha seleccionado únicamente los sismos localizados en cinco a más estaciones, los mismos que hacen un total de 95. Los parámetros hipocentrales de los 95 sismos son presentados en la Tabla 4. Tal como se puede observar en la Tabla 4, la información sísmica corresponde al periodo diciembre 1997 a marzo de 2002. La ausencia de sismos desde febrero 2002 a diciembre de 2004 se debe a que la mayoría de los sismos ocurridos en este periodo fueron registrados únicamente con 3 y 4 estaciones sísmicas por los problemas ya descritos anteriormente.

De acuerdo a lo mostrado en la Tabla 4, los sismos presentan magnitudes Md entre 0.8 y 3.6 respectivamente, mientras que la profundidad de los mismos se concentran principalmente desde los 2 km. hasta los 4 km. En general, los errores en la localización hipocentral son menores a 1 km.

Tabla 4. Parámetros hipocentrales de los 95 sismos seleccionados. La fecha esta dado por año (AA), mes (MM) y día (DD); la hora GMT en hora (HH), minuto (MM) y segundo (SS); prof, la profundidad focal en kilómetros; RMS, la raíz media cuadrática en segundos.

Nº SISMO	FECHA AA/MM/DD	HORA GMT HH:MM:SS	LATITUD (grados)	LONGITUD (grados)	PROF. (km)	Md (grados)	RMS (s)
1	1994/11/25	18:52:57.8	19.701	-97.452	2.0	4.6	2.1
2	1997/12/13	11:04:53.1	19.686	-97.453	4.0	0.9	0.1
3	1997/12/30	16:14:44.2	19.688	-97.453	1.8	0.9	0.1
4	1997/12/30	17:26:58.1	19.685	-97.449	0.7	1.3	0.1
5	1997/12/30	17:27:38.3	19.684	-97.454	2.9	2.3	0.0
6	1997/12/30	19:53:52.9	19.683	-97.453	2.2	1.3	0.1
7	1997/12/30	20:02:01.2	19.685	-97.458	2.8	0.9	0.1
8	1997/12/31	05:03:57.9	19.687	-97.453	2.3	1.7	0.1
9	1998/02/14	09:09:13.7	19.690	-97.455	2.3	1.2	0.1
10	1998/02/19	07:14:40.9	19.691	-97.448	2.3	1.4	0.0
11	1998/02/21	23:39:28.0	19.688	-97.453	2.2	0.9	0.0
12	1998/02/23	19:35:44.8	19.690	-97.447	2.1	1.3	0.0
13	1998/03/01	18:47:03.2	19.686	-97.444	2.0	1.1	0.0
14	1998/03/07	12:18:57.1	19.688	-97.454	3.1	1.7	0.0
15	1998/03/13	21:11:23.9	19.689	-97.448	2.3	1.5	0.1
16	1998/03/21	03:23:04.2	19.691	-97.449	2.3	1.5	0.0
17	1998/03/22	14:02:12.5	19.687	-97.460	2.9	1.1	0.0
18	1998/03/29	13:57:48.3	19.692	-97.454	2.1	1.6	0.1
19	1998/05/08	18:43:21.9	19.687	-97.450	3.3	1.6	0.0
20	1998/05/12	15:47:05.9	19.692	-97.458	2.0	1.6	0.0
21	1998/05/28	19:54:16.7	19.692	-97.453	2.3	1.3	0.0
22	1998/08/12	08:24:27.9	19.692	-97.455	2.3	1.0	0.0
23	1998/09/03	19:21:20.9	19.694	-97.453	2.4	1.3	0.1
24	1998/09/03	19:28:37.0	19.696	-97.455	2.0	1.5	0.1
25	1998/09/04	09:34:56.8	19.695	-97.455	2.3	1.9	0.0
26	1998/09/10	18:24:26.2	19.691	-97.455	2.4	1.9	0.0
27	1998/09/12	04:38:33.6	19.693	-97.455	2.6	2.0	0.0
28	1998/09/20	00:43:15.2	19.692	-97.455	2.8	1.9	0.0
29	1998/09/23	02:07:02.6	19.689	-97.449	2.2	2.0	0.0
30	1998/09/28	11:52:32.9	19.693	-97.454	3.5	1.8	0.0
31	1998/09/28	23:03:42.9	19.691	-97.455	4.0	1.6	0.0
32	1998/10/02	15:39:48.9	19.690	-97.457	2.4	1.7	0.1
33	1998/10/06	00:28:55.1	19.676	-97.446	2.9	1.6	0.1
34	1998/10/08	02:25:06.5	19.692	-97.459	2.3	1.7	0.1
35	1998/10/13	05:34:30.4	19.694	-97.457	2.4	1.9	0.0
36	1998/10/18	19:04:53.0	19.688	-97.453	2.4	1.7	0.0
37	1998/10/30	04:42:08.8	19.692	-97.459	2.4	2.1	0.0
38	1998/10/31	05:58:39.7	19.691	-97.461	2.0	1.6	0.0
39	1998/11/01	19:44:56.7	19.692	-97.455	3.3	1.7	0.0
40	1998/11/04	13:41:36.5	19.698	-97.461	1.8	1.5	0.1
41	1998/11/12	05:24:49.5	19.693	-97.454	2.2	1.4	0.1
42	1998/11/14	06:42:31.6	19.688	-97.457	2.4	1.6	0.0
43	1998/12/03	03:25:19.8	19.694	-97.457	2.3	1.4	0.1

N° SISMO	FECHA AA/MM/DD	HORA GMT HH:MM:SS	LATITUD (grados)	LONGITUD (grados)	PROF. (km)	Md (grados)	RMS (s)
44	1998/12/04	14:52:23.5	19.694	-97.458	2.3	1.7	0.0
45	1998/12/10	18:32:19.1	19.691	-97.458	2.2	1.5	0.0
46	1998/12/23	23:58:43.2	19.690	-97.456	2.4	1.6	0.0
47	1998/12/29	08:18:09.3	19.687	-97.453	3.1	1.7	0.0
48	1999/01/06	07:15:07.3	19.693	-97.455	2.3	1.2	0.0
49	1999/01/09	09:19:35.3	19.695	-97.459	3.5	1.6	0.0
50	1999/01/23	03:00:33.7	19.692	-97.451	2.3	1.1	0.1
51	1999/01/27	17:09:47.9	19.694	-97.454	2.3	1.5	0.1
52	1999/01/30	00:04:50.9	19.694	-97.456	2.0	1.6	0.1
53	1999/02/02	01:41:49.3	19.692	-97.453	2.8	1.6	0.0
54	1999/02/03	06:02:47.8	19.694	-97.456	2.8	1.3	0.0
55	1999/02/11	01:37:26.4	19.658	-97.453	2.0	1.3	0.1
56	1999/05/28	02:45:10.5	19.692	-97.455	2.4	1.2	0.1
57	1999/05/28	03:03:55.4	19.690	-97.461	1.7	1.4	0.1
58	1999/05/28	04:09:42.1	19.693	-97.458	2.4	1.1	0.0
59	1999/06/11	15:56:47.2	19.658	-97.455	1.3	1.5	0.1
60	1999/06/18	17:34:20.0	19.691	-97.461	2.1	1.6	0.1
61	1999/07/11	15:01:06.2	19.688	-97.455	3.1	2.2	0.1
62	1999/07/14	16:26:35.5	19.671	-97.454	2.2	0.7	0.0
63	1999/07/16	00:16:52.3	19.688	-97.460	0.2	0.6	0.0
64	1999/07/16	10:04:18.5	19.686	-97.453	3.4	0.6	0.0
65	1999/07/21	01:50:40.9	19.699	-97.455	2.0	1.2	0.1
66	1999/07/22	07:47:57.6	19.692	-97.456	2.3	1.4	0.0
67	1999/07/23	01:37:52.0	19.683	-97.456	3.6	0.6	0.0
68	1999/07/23	03:09:29.7	19.688	-97.461	0.2	0.7	0.0
69	1999/07/24	07:13:09.0	19.684	-97.455	3.7	1.0	0.0
70	1999/07/30	19:26:41.0	19.692	-97.464	3.0	0.6	0.1
71	1999/08/05	23:17:06.4	19.695	-97.448	3.1	1.0	0.1
72	1999/08/06	01:41:00.0	19.695	-97.456	2.9	2.1	0.1
73	1999/08/06	08:06:47.8	19.688	-97.457	3.0	1.0	0.0
74	1999/08/19	11:08:44.7	19.680	-97.450	3.4	0.2	0.0
75	1999/08/21	18:44:41.9	19.662	-97.451	2.4	1.3	0.0
76	1999/09/17	13:38:46.1	19.696	-97.450	2.3	1.1	0.0
77	1999/12/30	17:26:57.9	19.685	-97.449	0.7	1.3	0.1
78	2000/03/28	01:50:30.4	19.690	-97.457	3.0	1.3	0.0
79	2000/04/03	04:52:49.1	19.694	-97.447	1.8	1.4	0.0
80	2000/04/07	07:31:38.0	19.693	-97.456	3.0	1.3	0.0
81	2000/04/11	01:42:19.9	19.688	-97.452	2.1	1.2	0.1
82	2000/05/27	18:01:21.4	19.691	-97.454	1.7	1.4	0.1
83	2000/06/13	22:09:15.6	19.687	-97.460	2.9	1.0	0.0
84	2000/06/16	22:29:26.8	19.654	-97.443	0.7	1.6	0.1
85	2000/06/19	02:19:25.6	19.665	-97.454	1.9	1.2	0.0
86	2000/06/19	04:51:38.4	19.650	-97.445	0.7	1.0	0.0
87	2000/06/25	23:40:42.4	19.696	-97.448	2.3	1.4	0.0
88	2000/07/28	19:17:16.0	19.689	-97.456	2.1	1.0	0.1
89	2000/08/17	23:36:49.1	19.694	-97.453	2.4	1.5	0.1
90	2000/08/17	23:42:42.1	19.687	-97.454	2.2	1.2	0.0

N° SISMO	FECHA AA/MM/DD	HORA GMT HH:MM:SS	LATITUD (grados)	LONGITUD (grados)	PROF. (km)	Md (grados)	RMS (s)
91	2001/07/07	00:21:07.0	19.682	-97.461	0.8	1.3	0.0
92	2001/12/11	05:31:53.8	19.694	-97.449	1.9	1.6	0.0
93	2002/01/21	18:15:35.7	19.661	-97.457	2.3	3.2	0.6
94	2002/02/04	12:26:25.5	19.691	-97.461	2.0	1.7	0.1
95	2002/03/20	01:13:20.8	19.693	-97.463	1.6	1.8	0.0

3.4. DISTRIBUCIÓN DE LA SISMICIDAD

3.4.1. Distribución en Superficie y en Profundidad del Total de Sismos

La distribución de los 280 sismos registrados durante el periodo diciembre 1997 a diciembre 2004 en el CGLH se presentan año por año, a fin de analizar su evolución en el espacio y tiempo. De acuerdo a los estudios previos realizados por Lermo et al. (1999b, 2001) a partir de febrero de 1999, se observó una migración de la sismicidad de la zona norte (ZN) hacia la zona sur (ZS).

En la Figura 10, se presenta el mapa del campo geotérmico de Los Humeros, con la distribución de las principales fallas, ubicación de pozos y las estaciones sísmicas involucradas en el presente estudio. Sobre este mapa se ubican los epicentros de los sismos correspondientes al periodo de estudio. En la figura del centro se muestran los sismos que corresponden a diciembre 1997 (círculos blancos) y al año 1998 (círculos rojos). La sismicidad de diciembre de 1997 está compuesto por 10 sismos y se distribuye principalmente entre la estación S05 y el pozo inyector I29; mientras que los correspondientes al año 1998, se concentraron al sur de los pozos productores P15, P17 y al norte de la estación S05, cubriendo un área aproximada de 15 km². Un pequeño agrupamiento de sismos es observado junto al pozo P9.

A diferencia de la sismicidad de 1998, la de 1999 se distribuye en todo el campo geotérmico aunque la mayor concentración es observada en la ZN, alrededor de la estación S05 y pozo I29 hasta la ubicación del pozo P21. Mientras tanto, a partir de febrero del mismo año se observó la ocurrencia de sismos en la ZS, aunque de manera más dispersa, estos sismos se distribuyen entre las fallas Malpais y Humeros.

Los sismos correspondientes al año 2000, muestran una distribución similar al año 1999, observándose sismicidad en la ZN donde el número de sismos es mayor y numéricamente menor en la ZS. Sin embargo, a diferencia de los años anteriores, se observa un pequeño agrupamiento de sismos al sur de P22 y al oeste de los pozos P9, P37 y P3.

La sismicidad de 2001, presenta una distribución alrededor de la zona de actividad geotérmica, comparada con los años anteriores tanto en la ZN como en la ZS donde solamente se observa 2 sismos sobre la falla de Los Humeros.

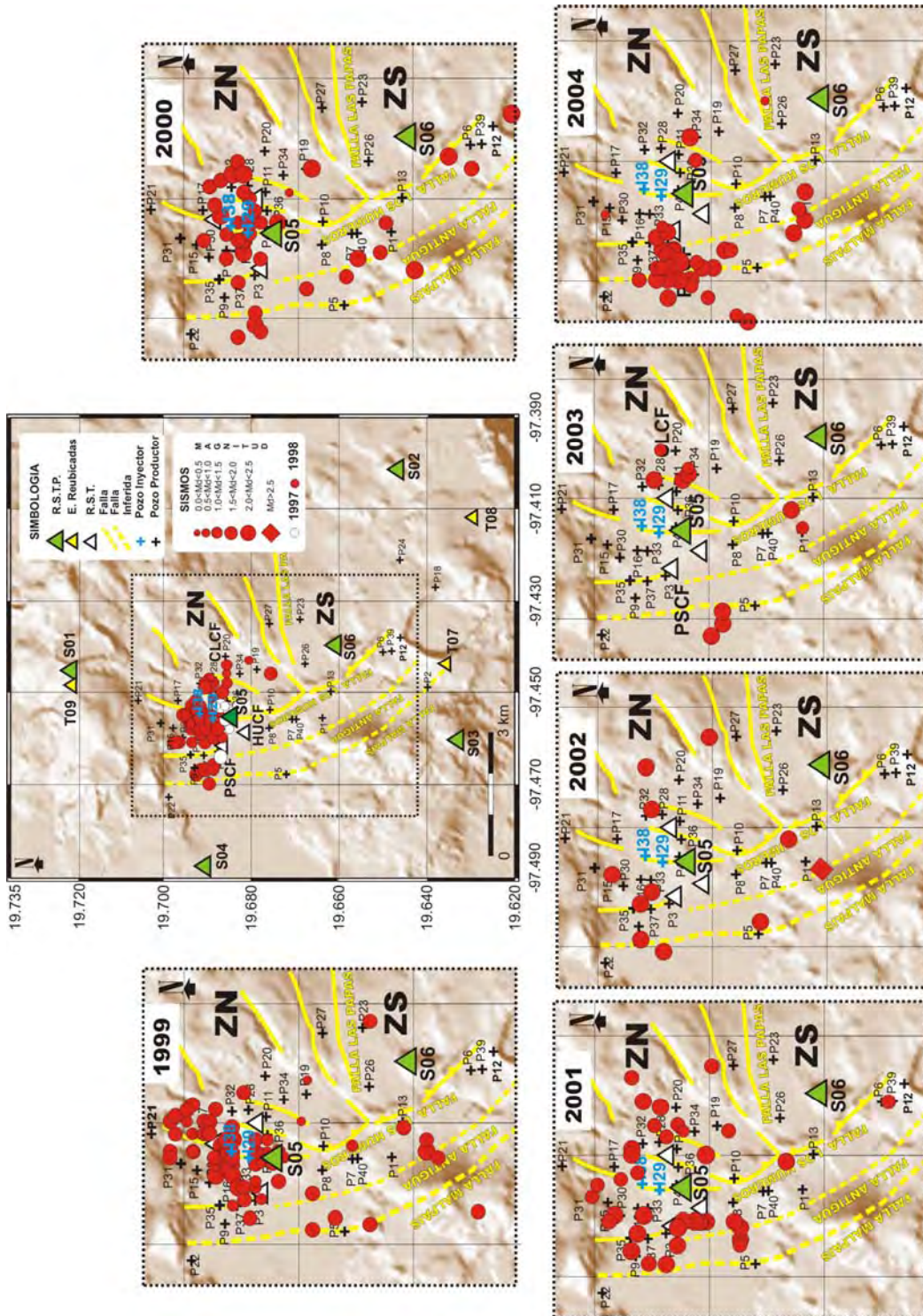


Figura 10. Distribución de los sismos año por año correspondiente al periodo diciembre 1997 a diciembre del 2004. El cuadro discontinuo muestra el área de sismicidad para cada año.

En los años 2002 y 2003, el número de sismos se redujo considerablemente y se distribuye en la zona de actividad geotermal, observándose así, sismos en los alrededores de las estaciones temporales PSCF, PNCF y CLCF; mientras que pocos sismos se localizan en la ZS del campo. El sismo representado por el rombo corresponde al sismo de magnitud moderada del 21 de enero del 2002 y se ubica sobre la falla Antigua. Cabe señalar que la inoperatividad de 3 estaciones, por problemas de hurto desde el año 2002, no permitió conocer la cantidad de sismos locales ocurridos durante estos años.

La sismicidad correspondiente al año 2004, muestra una concentración importante en el extremo este de la estación S05, entre las fallas Malpais y Antigua. Los años anteriores ya se había observado sismicidad hacia este extremo, pero durante este año el número aumentó considerablemente. En la ZS continuó la ocurrencia de sismos principalmente sobre la traza de la falla Antigua.

3.4.2. Distribución en Superficie y en Profundidad de los Sismos Seleccionados

En la Figura 11a, se presenta la distribución en superficie de los 95 sismos mejor localizados, cuyos parámetros hipocentrales se encuentran en la Tabla 4.

Tal como se puede observar en la figura, 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 ésta falla se ubica el epicentro del sismo del 25 de Noviembre de 1994, la misma que causó daños en la infraestructura del campo geotérmico (Lermo et al., 1999a); mientras que al sur de la falla la Antigua se localiza el sismo del 21 de enero del 2002. Ambos sismos (1994 y 2002), se constituyen hasta la actualidad como los de mayor magnitud ($M_d=4.6$ y $M_w=3.6$) ocurridos en Los Humeros.

Las elipses de error de la localización de los epicentros son mostrados en la Figura 11b. Los de color rojo representan a los sismos de 1994 ubicado en la ZN y del 2002 en la ZS. La elipse de error para el primer sismo es de 2 km aproximadamente y esto se debe a que fue relocalizado con estaciones regionales (SSN, SISMEX) y la lectura de Ts-Tp de las réplicas del sismo obtenida de la única estación local P1, instalada posterior a la ocurrencia del sismo principal. Las elipses en color negro representan a los siguientes 93 sismos. Tal como se observa en la figura los errores son menores a 1 km.

La distribución en profundidad de los sismos seleccionados (Figura 12) son presentados en los perfiles estratigráficos realizados por Cedillo (1997) y Arellano et al. (2000) en las direcciones N-S (A-A') y E-O (B-B') respectivamente, de acuerdo a la Figura 11a.

En el perfil A-A' (Figura 12a), se observa que los sismos se distribuyen desde los 0.2 hasta los 4.0 km de profundidad. Los sismos más superficiales (0.2 a 1 km), se ubican de manera dispersa en las capas de pómez, basaltos e ignimbritas (6 sismos). Mientras que de 1 a 1.8 km aproximadamente, correspondiente al yacimiento superior, se localizaron únicamente 3 sismos, 2 en la ZN y 1 en la ZS. Un agrupamiento importante es observada desde los 2 a 2.5 km de profundidad aproximadamente, ubicándose sobre la capa impermeable (separa los dos

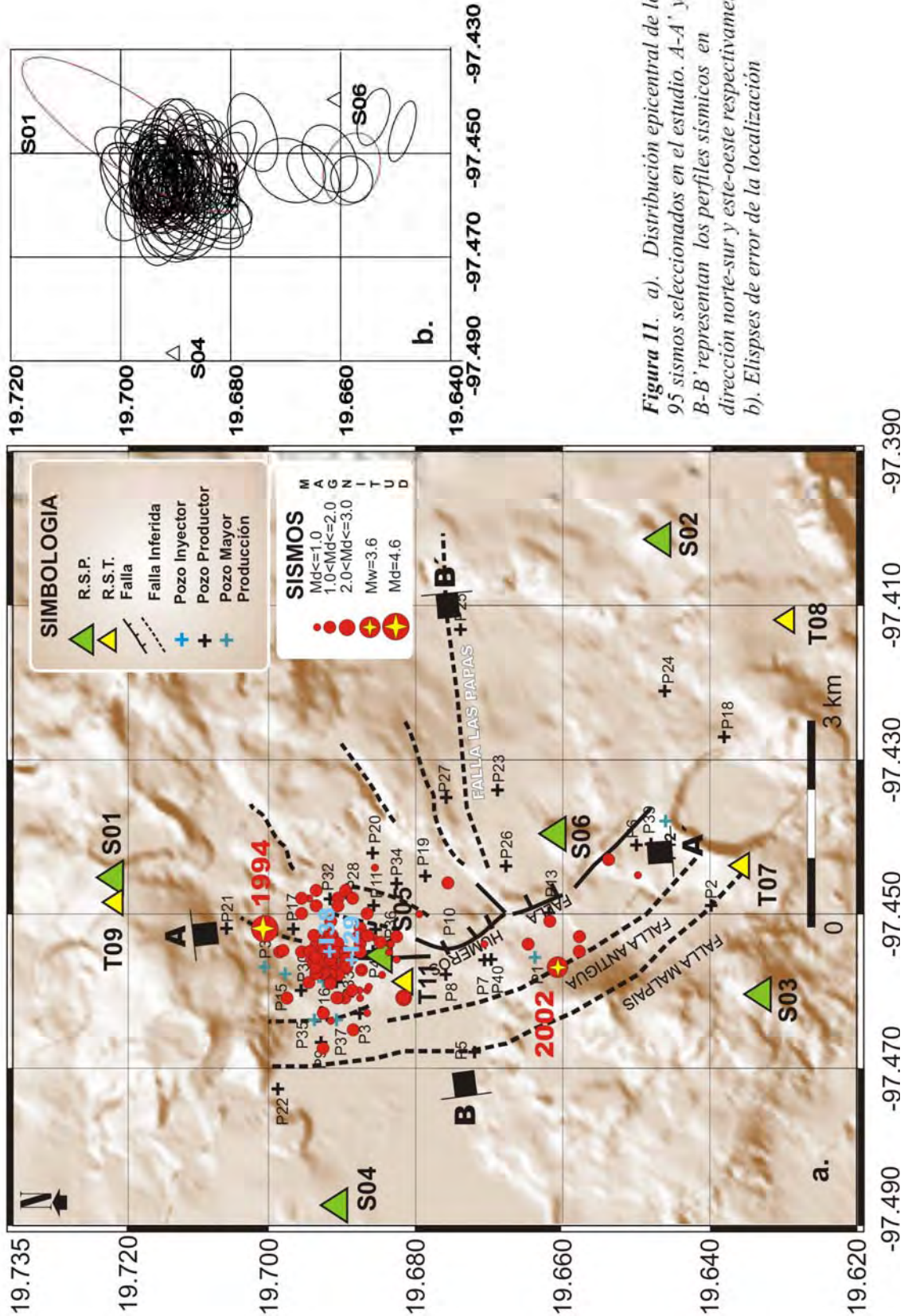


Figura 11. a). Distribución epicentral de los 95 sismos seleccionados en el estudio. A-A' y B-B' representan los perfiles sísmicos en dirección norte-sur y este-oeste respectivamente. b). Elipses de error de la localización

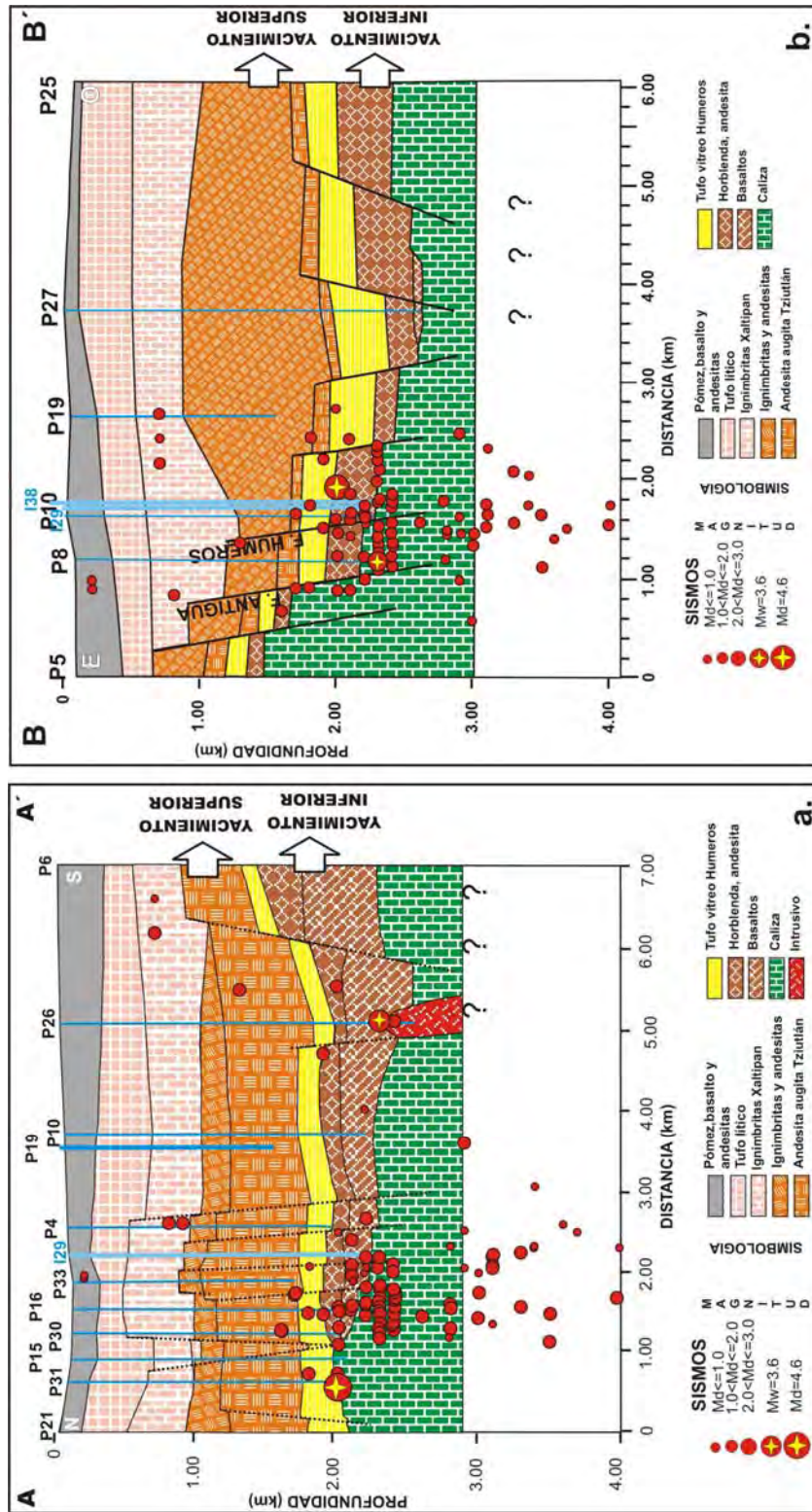


Figura 12. Perfiles estratigráficos del campo geotérmico de Los Humeros según la Figura 11a y distribución de los sismos en las direcciones: a). Norte-sur (A-A') y b). Este-oeste (B-B').

yacimientos), el yacimiento Inferior y de manera importante en las calizas. Otro grupo de sismos, aunque más dispersa, se observa de los 2.5 a 4 km siguiendo la misma tendencia que los ubicados en la parte superior de los mismos. En el perfil también se observa que el sismo de 1994 ($M_d=4.6$) se localiza entre la capa impermeable y la caliza a 2 km de profundidad; mientras que, el sismo del 2002 ($M_w=3.6$) ubicada en la ZS y a 2.3 km de profundidad, se localiza entre el yacimiento Inferior y el intrusivo.

En el perfil B-B' (Figura 12b), construido en dirección E-O, se puede observar que los sismos se localizan por debajo de la ubicación de los 2 pozos inyectores (I29, I38) y entre las fallas Antigua y Humeros, hasta profundidades del orden de 4.0 km. Obsérvese 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 los mismos como consecuencia de la presión ejercida por el proceso de inyección y producción respectivamente.

CAPÍTULO 4

INVERSIÓN DE LA FORMA DE ONDA Y ESTADO DE ESFUERZOS DEL CAMPO GEOTÉRMICO DE LOS HUMEROS

4.1. MECANISMOS FOCALES SIMPLES Y DE TENSOR DE MOMENTO

4.1.1. Evaluación de la Polaridad de la Onda P

La evaluación de las polaridades de la onda P, se ha realizado utilizando únicamente los sismos registrados en la estación S05 debido a que esta estación estuvo operativa durante todo el periodo de estudio (diciembre 1997 a diciembre 2004) y cercana a la fuente sísmica, tal como se observa en el mapa de distribución de los epicentros (Figura 11a). El cambio de polaridad de los sismos registrados en S05, fue observada durante la lectura de las fases de las ondas P y S. Curiosamente, este cambio en la polaridad se daba alternadamente ya sea en minutos, horas, días ó meses. Un ejemplo de sismos con diferentes polaridades son mostrados en le Figura 13a y corresponde a sismos registrados en enero del año 2000. Esta particularidad, permitió realizar una estadística de la polaridad de los sismos registrados en S05 en función del tiempo.

En la Figura 13b, se muestran los resultados obtenidos de la evaluación año por año de la polaridad para el periodo 1999-2004. Básicamente, se observa una homogeneidad en el número de polaridades de compresión (números positivos) y dilatación (números negativos); aunque en el año 2000 y 2004 se puede observar un mayor número de compresiones y dilataciones respectivamente. Esta continua alternancia entre las polaridades de los sismos registrados en la estación S05, permite sugerir que los esfuerzos que los genera son diferentes entre si; por tal razón se procedió a realizar los mecanismos focales simples y de tensor de momento a fin de conocer los parámetros de los planos de la falla y la orientación de los ejes de máximo esfuerzo. Para obtener los mecanismos focales simples se ha utilizado la polaridad de la onda P observados en todas las estaciones sísmicas que registraron el sismo (Reasenberg and Oppenheimer, 1985); mientras que los mecanismos de tensor de momento fueron obtenidos invirtiendo las formas de onda con el programa desarrollado por Dreger (2002).

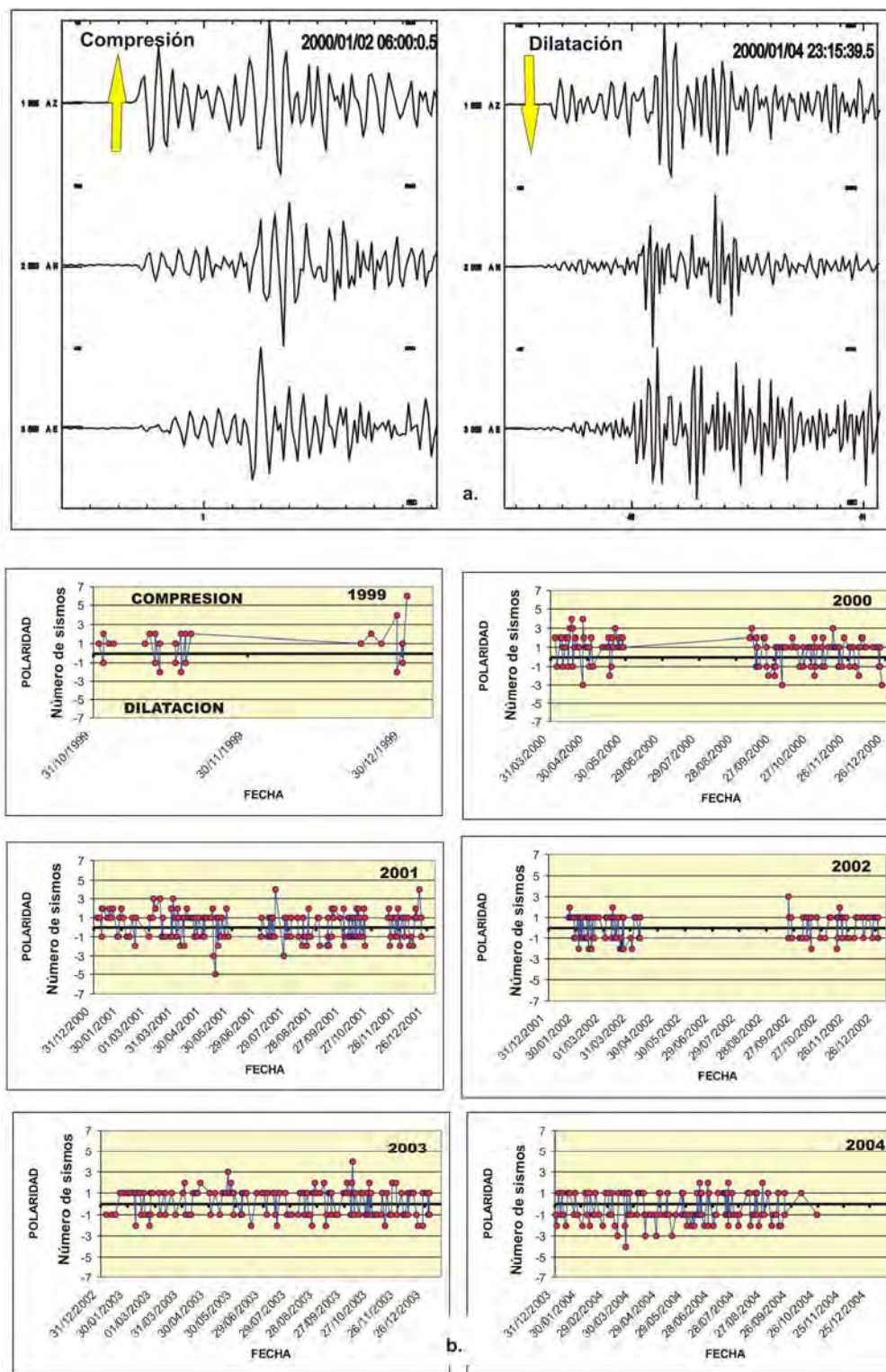


Figura 13. a). Ejemplos de sismos registrados en enero del 2000 en la estación S05. En el lado izquierdo, el sismo presenta polaridad compresional y en el lado derecho la dilatacional. b). Estadística del número de polaridades de compresión y dilatación registrados durante 1999 a 2004.

4.1.2. Mecanismos Focales Simples

De la localización hipocentral de los 95 sismos seleccionados (Tabla 4, Figura 11), se seleccionaron sismos con polaridades de la onda P claramente identificadas en 5 a más estaciones, a fin de obtener una buena solución de los mecanismos focales. La selección ha permitido contar con 28 sismos que satisfacen las condiciones antes mencionadas. Sin embargo, a fin de tener una buena solución de los mecanismos focales se da mayor énfasis a los obtenidos con 6 a más estaciones, los mismos que hacen un total de 5 sismos.

Para construir los mecanismos focales de los 28 sismos, se ha utilizado una de las opciones del programa de procesamiento SEISAN versión 8.0 (Havskov and Ottemoller, 2003) denominado “focmec” el mismo que utiliza la metodología descrita por Reasenberg and Oppenheimer (1985).

Las soluciones de los mecanismos focales obtenidos para los 5 sismos (registrado en 6 a más estaciones) de los 95 sismos ocurridos en el campo geotérmico de Los Humeros son mostrados en la Figura 14 y los 23 restantes en el Anexo 1. Estas soluciones corresponden principalmente a fallamientos de tipo: transcurrencia lateral derecha (4 y 61) e izquierda (72), así como de tipo normal con una pequeña componente de transcurrencia (10 y 79). Obsérvese que la polaridad de la onda P en la estación S05 para tres sismos es compresional (4, 61, 72) y dos dilatacional (10, 79); sin embargo, muestra claramente la heterogeneidad de las rupturas que ocurren en el campo geotérmico.

4.1.3. Mecanismos de Tensor de Momento

Básicamente, los mecanismos focales simples obtenidos para 28 sismos han permitido conocer los parámetros de los planos de falla tales como el azimut (strike), buzamiento (dip) y el ángulo de desplazamiento (rake). 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. Los resultados obtenidos son los parámetros de la falla, además del momento sísmico escalar (M_0) y la magnitud M_w .

El programa que se utiliza para tal fin fue desarrollado por Dreger (2002), donde la representación general de la fuente sísmica se considera como una fuente puntual en el espacio y en el 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). Esta descomposición está representada en porcentajes de doble par de fuerzas (Pdc o DC) si corresponde a un sismo de origen tectónico y CLVD (PCLVD) si corresponde a una explosión. La profundidad focal es establecida iterativamente hasta encontrar la mejor solución, la misma que se verá reflejada en el porcentaje de la reducción de la varianza (Var. Red), donde:

$$Var.Red. = 1 - \left[\frac{\sum \sqrt{(data_i - synth_i)^2}}{\sqrt{data_i^2}} \right] * 100$$

$Data_i$, son las formas de onda del sismo en desplazamiento y $synth$ son las funciones de Green obtenidas a partir del modelo de velocidad.

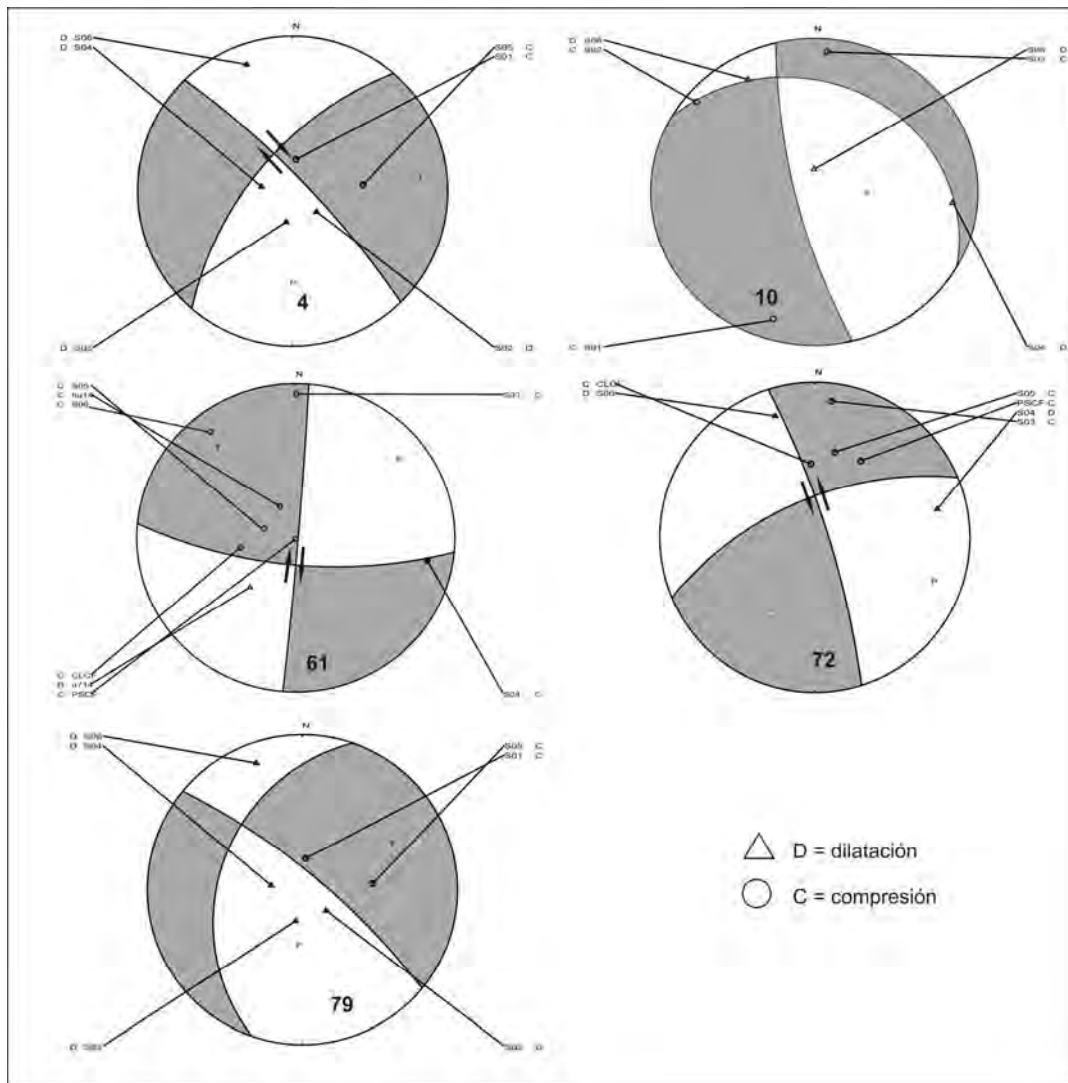


Figura 14. Representación de los mecanismos focales simples obtenidos a partir de la polaridad de la onda P y registrados en 6 a más estaciones sísmicas del campo geotérmico de Los Hornos.

4.1.3.1. Distribución de los Mecanismos de Tensor de Momento

Para realizar la inversión del tensor de momento a los sismos registrados en el campo geotérmico de los Humeros, se han utilizado los siguientes parámetros:

- De los 95 sismos mejor localizados (ver Tabla 4, Figura 11), se han seleccionado 34 sismos cuyo registro de los tiempos de arribo de las ondas de cuerpo son lo suficientemente claros. Una vez realizada la selección, las formas de ondas son corregidas por instrumento y presentada en unidades métricas (cm/s) y convertidos del formato Seisan a formato SAC especificando correctamente la fecha, hora de inicio de la traza sísmica y la estación que registró el sismo. En general, el total de sismos seleccionados para la inversión fueron registrados principalmente en las estaciones S05, S01 y S06. Únicamente 2 sismos registrados en el año 1999 fueron invertidos con 2 estaciones de banda ancha y que corresponden a la red temporal (CLCF, HUCF).
- Los parámetros hipocentrales del sismo: latitud, longitud, profundidad focal, distancia epicentral y el azimut. Para los sismos seleccionados las distancias epicentrales no sobrepasan los 6 km.
- El modelo de velocidad utilizado para la localización hipocentral de los sismos (Tabla 3) es utilizado también para la inversión. Las capas del modelo son presentadas en espesores (km). Además dentro del modelo se han especificado la profundidad del sismo y la capa en la que se encuentra ubicado.
- Para obtener ondas de bajas frecuencias, los sismos fueron filtrados utilizando un pasabanda de 0.5 a 0.9 Hz.
- Para la inversión de todas las formas de onda se ha utilizado una ventana de 10 segundos.

En la Figura 15a, se presenta un ejemplo de la forma de onda a invertir y los formatos requeridos por el programa; mientras que la Figura 15b muestra las ondas de bajas frecuencias rotadas en sus componentes radial (superior) y tangencial (inferior) y filtradas utilizando un pasabanda de 0.5 a 0.9 Hz. En ambas figuras, las barras oscuras muestran la ventana de 10 s. Asimismo, el resultado de la inversión del tensor de momento es mostrado en la Figura 15c, donde la línea continua corresponde a los datos observados y la línea discontinua a los sintéticos. La solución numérica presenta los parámetros de la falla para ambos planos tales como el azimut (strike), ángulo de desplazamiento (rake), buzamiento (dip) y la orientación de los ejes de presión (P) y tensión (T) respectivamente, además del momento sísmico escalar (M_0) y la magnitud de momento (M_w). Otros parámetros importantes que muestra el archivo de salida son: el porcentaje del doble par de fuerzas (Pdc) y de CLVD, la varianza y la reducción de la varianza (Var. Red.), éste último permite conocer la calidad de la inversión. Mientras tanto, la solución gráfica muestra el ajuste de los datos observados (líneas continuas oscuras) y los sintéticos (líneas discontinuas en color rojo) además del tipo de mecanismo de tensor de momento obtenido. El ejemplo de la inversión corresponde al sismo N° 5 (Tabla 4, 5) y presenta un fallamiento de tipo transcurrente lateral izquierda y la calidad de la solución

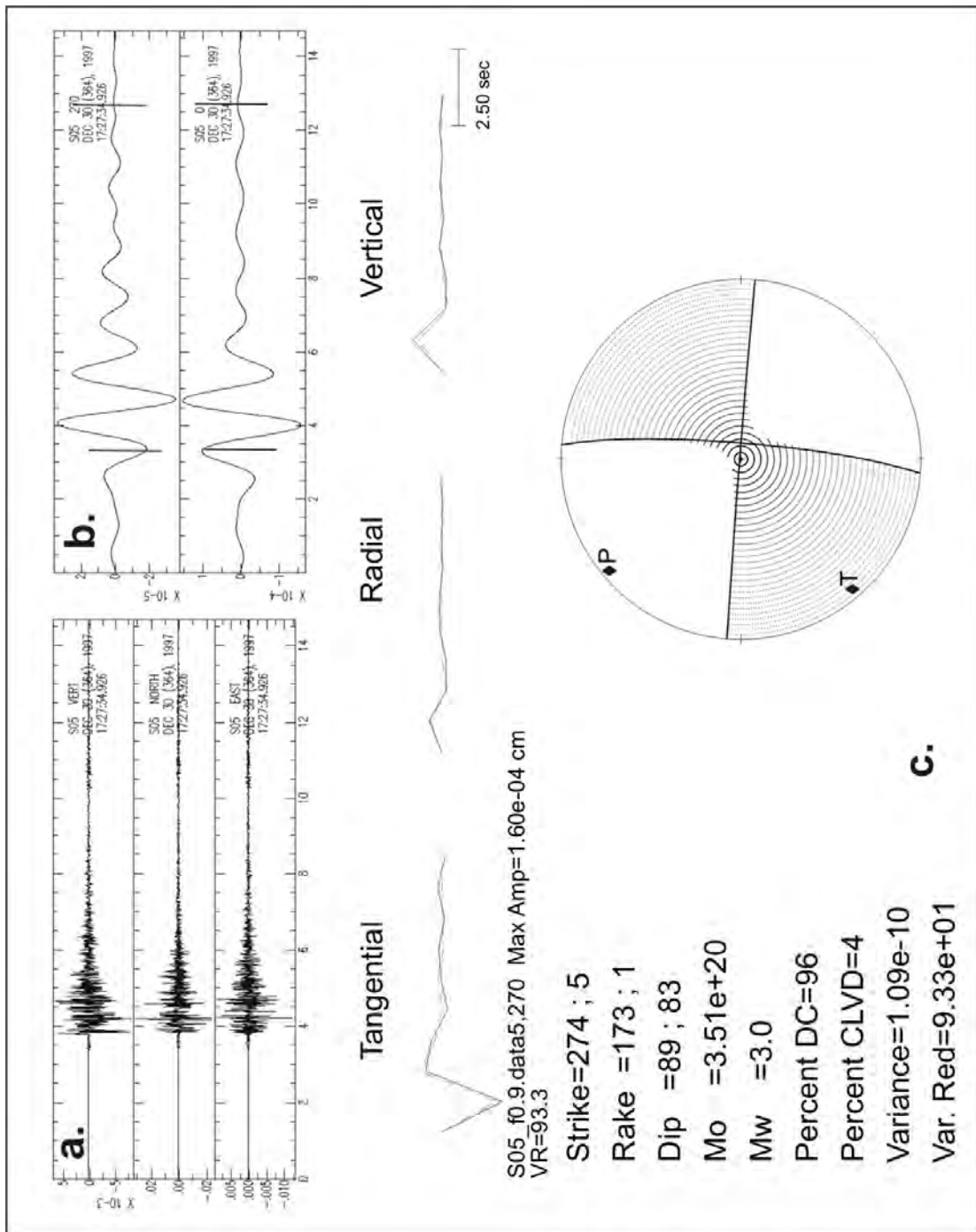


Figura 15. a). Sismo local N° 5 registrado en la estación S05 (Tabla 4), convertido del formato Seisan a SAC y se encuentra en unidades métricas (cm/s). b). Onda de bajas frecuencias obtenida filtrando y rotando la señal mostrada en la Figura 15a. Las líneas oscuras verticales muestran la ventana de 10 segundos para la inversión. c). Datos observados y sintéticos obtenidos de la inversión de 15a, en el lado izquierdo se muestra la solución numérica y en el derecho el mecanismo de tensor de momento.

Capítulo 4. Inversión de la Forma de Onda y Estado de Esfuerzos del Campo Geotérmico..

es del 93%. En el Anexo 2 se reportan los resultados de los 34 mecanismos de tensor de momento. En la Tabla 5, se presenta los parámetros de la falla obtenidos de la inversión del tensor de momento para 34 de los 94 sismos localizados en el campo geotérmico de Los Humeros.

Tabla 5. Solución numérica de los planos de falla obtenidos de la inversión del tensor de momento. N° est.inv. es el número de estaciones utilizadas para la inversión; azim, buz y des, representa el azimut, buzamiento y ángulo de desplazamiento de los planos de falla A y B en grados; Mo es el momento sísmico en dinas-centímetro y Mw magnitud de momento en grados; Var.Red la reducción de la varianza en porcentaje, T y P los ejes de tensión y presión en grados.

N° SISMO	N° EST. INV.	AZIM A/B	BUZ A/B	DESP.	Mo (dyn-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	6.85x10 ¹⁸	1.9	69	277.8/32.6	113.5/56.4
14	2	292/100	67/24	95/79	8.09x10 ¹⁹	2.6	61	210.9/67.7	18.4/21.9
15	2	48/318	89/84	174/-1	2.42x10 ¹⁹	2.2	53	182.8/4.2	273.2/4.2
16	2	267/17	69/49	135/28	1.45x10 ¹⁹	2.1	45	223/46.4	326.5/12.5
17	2	232/340	63/59	35/148	7.48x10 ¹⁸	1.9	70	286.9/2.6	194.4/43.4
18	2	248/347	78/57	146/15	7.44x10 ¹⁹	2.5	58	201/34.5	302.2/15.8
19	2	94/186	88/56	34/178	2.09x10 ¹⁹	2.2	50	145.1/21	44.5/25.6
22	3	226/329	68/61	149/25	4.74x10 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	7.62x10 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	8.47x10 ¹⁸	2.6	65	165.7/18.4	75.3/1.3
30	2	198/290	81/75	16/171	4.22x10 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	1.45x10 ¹⁹	2.1	49	198.6/8.5	107.4/8.5
37	2	190/281	89/53	37/179	1.85x10 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	2.36x10 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	3.25x10 ²⁰	2.9	53	332.2/1.9	241.7/15.2
72	2	193/359	46/45	100/80	9.67x10 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	5.5x10 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	3.22x10 ²¹	3.6	67	152.1/40.4	249.1/8.2

Los sismos en color negro representan aquellos cuyas polaridades en la estación S05 fueron registrados como compresión y en azul los de dilatación. Tal como se puede ver en la tabla, el sismo N° 22 fue invertido con 3 estaciones, 17 sismos con 2 y 16 con una sola estación (S05). El número de los sismos esta de acuerdo a lo mostrado en la Tabla 4.

En la Tabla también se presenta la calidad de la inversión (Var. Red.) y en ella se puede observar que la inversión realizada con 2 y 3 estaciones es relativamente baja; mientras que los obtenidos únicamente con la estación S05 son mayores al 70%. Cabe resaltar que la inversión de los sismos registrados en la estación S05 siempre mostró una Var. Red. mayor al 70% pero al incluir otra estación, la calidad disminuyó considerablemente sin variar la tendencia del mecanismo de tensor de momento. Obsérvese también que en la Tabla 5, solamente se ha colocado los valores del momento sísmico escalar (M_0) y magnitud de momento (M_w) para los sismos que han sido invertidos con 2 y 3 estaciones, considerando que la incertidumbre de los valores reales de estos dos parámetros pueden ser mejor controlados mientras más estaciones participen en la inversión. Por otro lado, la mayoría de los sismos analizados presentan $1.8 \leq M_w \leq 2.9$ y M_0 entre 1.45×10^{19} a 3.25×10^{20} dyn-cm. Mientras tanto, el sismo N° 93 ocurrido el 21 de enero del 2002 es el que presenta una $M_w=3.6$ y $M_0=3.22 \times 10^{21}$ dyn-cm, aproximadamente 10 veces más grande que los sismos anteriores. El valor de M_w coincide con lo obtenido por Lermo y Lorenzo (2003) a partir del análisis espectral descrito por Brune (1970). Hasta la actualidad este sismo (2002) y el de 1994 se constituyen como los sismos de mayor magnitud que han ocurrido en el campo geotérmico de Los Humeros.

Gráficamente, la distribución superficial de los mecanismos de tensor de momento obtenidos de la inversión son presentados en la Figura 16a. En esta figura, los mecanismos de mayor tamaño representan a las soluciones obtenidas con 2 y 3 estaciones; mientras que las de menor tamaño a los obtenidos con una estación. Asimismo la diferencia de los colores de los mecanismos para las zonas de compresión fue realizada considerando el tipo de polaridad observada en la estación S05 tal como se describió en 4.1.1. Por lo tanto, los mecanismos en color café oscuro presentaron polaridades compresionales y en color azul dilatacionales. Esta diferenciación fue realizada con el propósito de observar alguna similitud entre los mecanismos de tensor de momento con polaridad compresional y del mismo modo para los dilatacionales; sin embargo, en ambos casos se presenta una heterogeneidad de fallamientos, sobresaliendo entre ellos los de transcurrancia lateral derecha e izquierda y en menor número los de tipo normal e inverso. Asimismo, el mecanismo del sismo del 21 de enero del 2002 (color amarillo) sugiere un fallamiento de tipo inverso con una pequeña componente de transcurrancia.

En el perfil estratigráfico B-B' en dirección E-O (Figura 16b), se muestra la distribución de los mecanismos de tensor en profundidad. En esta figura se observa que a las profundidades de 0.2 a 4 km, los mecanismos de tensor de momento presentan fallamientos de diversos tipos, tanto para el grupo de sismos localizados entre la capa de calizas y el yacimiento Inferior (2.3 km) como para los que se encuentran por debajo de los 2.5 km hasta alcanzar la profundidad máxima de 4 km.

4.2. ESTADO DE ESFUERZOS

Para definir el estado de esfuerzos generados en el campo geotérmico de Los Humeros, se ha utilizado la información obtenida de los mecanismos de tensor de momento de los 33 sismos invertidos, tales como: el azimut y buzamiento de los ejes de presión y tensión respectivamente (Tabla 5). La representación gráfica de los ejes de presión y tensión en profundidad fueron realizados utilizando el programa RAKE desarrollado por Louvari (1995). Asimismo, a fin de conocer la orientación preferencial de los ejes de presión (P) y tensión (T), se ha realizado su proyección estereográfica en el plano inferior de Schmidt.

4.2.1. Distribución de los Esfuerzos

En la Figura 17, se presenta la distribución en profundidad de los ejes de presión (P) y tensión (T) de los 34 sismos analizados con el tensor de momento en Los Humeros. Tal como se observa en la figura, su representación fue realizada en el perfil estratigráfico orientado en dirección E-O (Figura 16b) debido a que en este perfil se observa mejor las características estructurales y litológicas del subsuelo del campo geotérmico. A fin de describir detalladamente estos esfuerzos, se ha considerado conveniente dividir el grupo de sismos registrados en la estación S05 con polaridad compresional (Figura 17a), dilatacional (Figura 17b) y luego presentarlo en conjunto (Figura 17c).

En la Figura 17a, se observa que los ejes P y T del sismo más superficial (0.7 km) se orienta en dirección NNO-SSE y NO-SE respectivamente. Entre los 2.0 a 2.5 km los ejes P presentan una orientación E-O, básicamente en los 2 alineamientos de sismos localizados entre 2.2 a 2.5 km. Mientras tanto, la orientación de T es muy heterogénea. A profundidades mayores a 2.5 km, en general, P se orienta en dirección NO-SE y NE-SO. En cambio T presenta similares características a los sismos entre 2.2 a 2.5 km. Una distribución particular de los ejes de P y T se puede observar en la periferie oeste (círculos discontinuos en color café) donde aparentemente los ejes rotan circundando al grupo de sismos.

Por otro lado, la orientación de los ejes P y T de los sismos cuya polaridad observada en S05 son de tipo dilatacional (Figura 17b) muestra que, entre 1.8 a 2.3 km de profundidad, P se orienta principalmente en dirección E-O y T en dirección NE-SO. Similar a lo observado en la Figura 16a, los ejes P y T muestran una rotación circundando la periferie este del perfil (círculos discontinuos en color azul). La observación del conjunto de los ejes P y T para los dos casos presentados en las Figuras 17a y 17b, muestran claramente esta rotación, circundando completamente al grupo de sismos. Curiosamente, los de tipo compresional se ubican en el extremo Oeste de la falla los Humeros y a lado este los de tipo dilatacional.

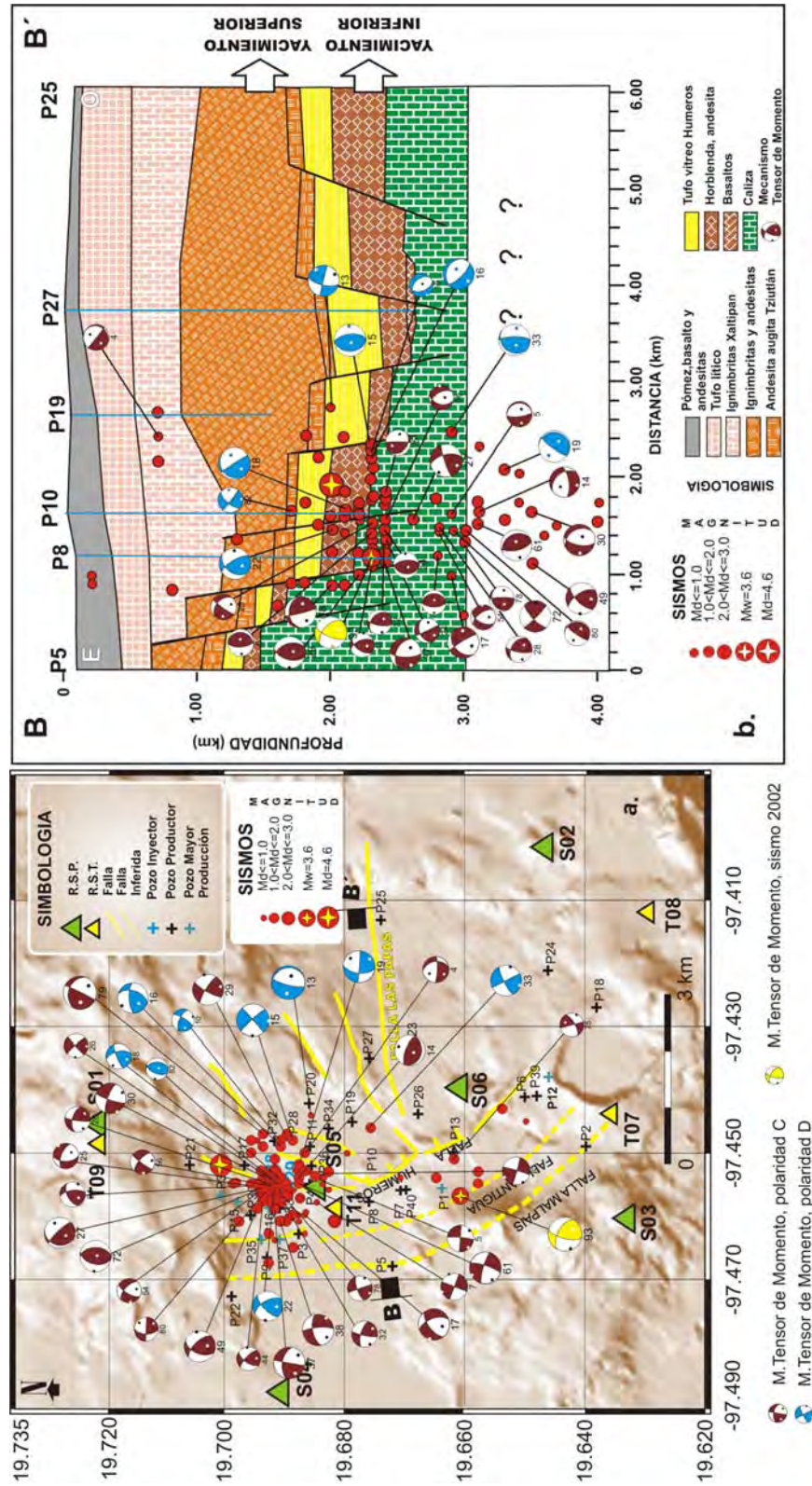


Figura. 16. a). Distribución en superficie de los mecanismos focales de tensor de momento con su correspondiente numeración de acuerdo a la Tabla 4. b). Perfil estratigráfico del campo geotérmico de Los Humeros tomado en dirección E-O y la distribución de los mecanismos en profundidad.

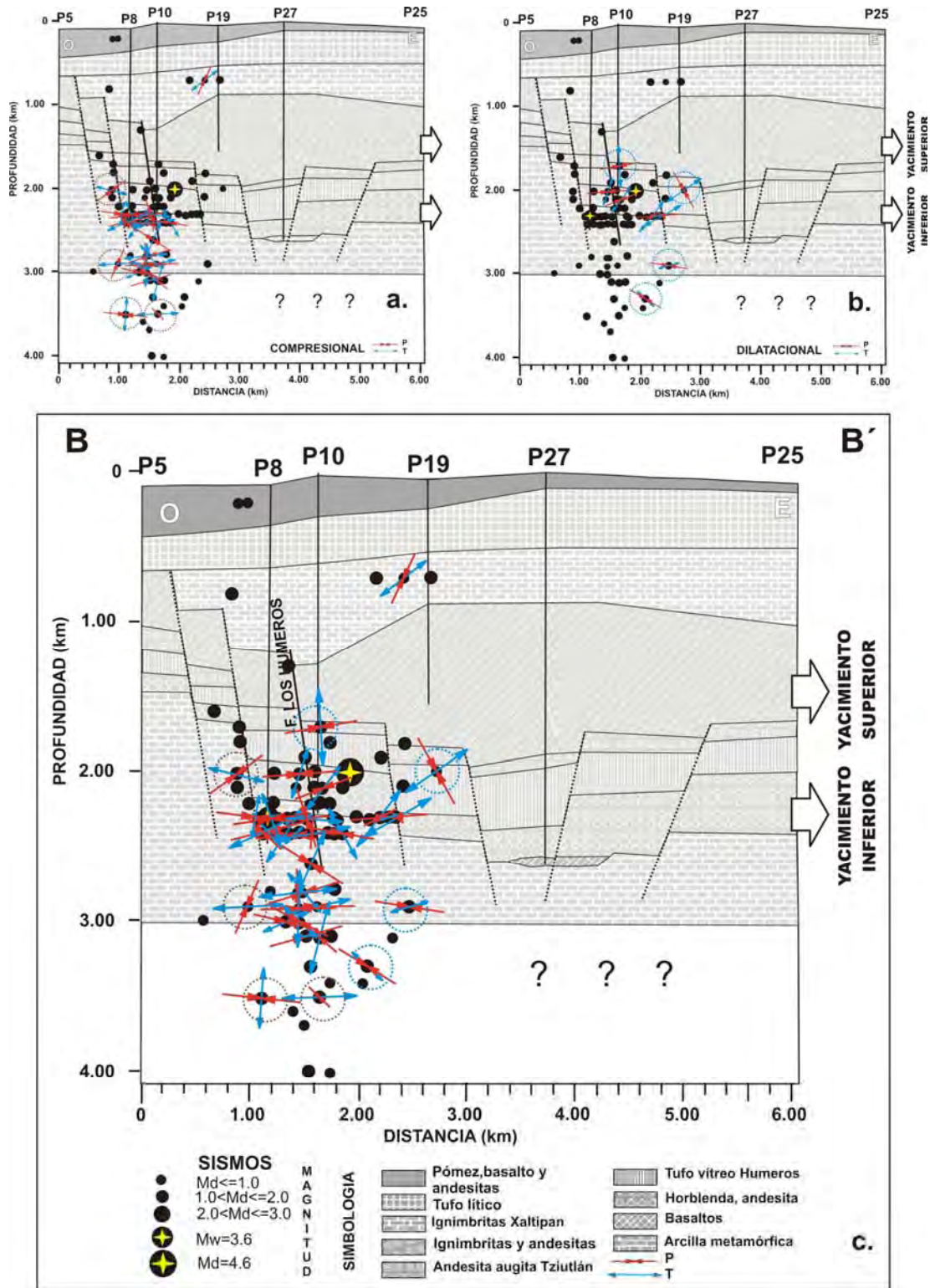


Figura 17. Distribución en profundidad de los esfuerzos generados en el campo geotérmico de Los Humeros. Esfuerzos de presión (P) y tensión (T) de los sismos registrados en la estación S05 con polaridad a). Compresional. b). Dilataacional y c). Conjunto de esfuerzos de a) y b).

El análisis estadístico de los 34 sismos para los cuales se han obtenido los ejes de presión (Figura 18a) y tensión (Figura 18c), muestran una distribución aleatoria al sur de la rejilla de Schmidt; mientras que en la parte central y norte se observa una disminución importante. El diagrama de rosas de los ejes de presión (Figura 18b) muestra que la orientación del esfuerzo máximo principal en el campo geotérmico de los Humeros es en dirección N60°E a S240°O. Otras 2 direcciones de máximo esfuerzo son observados en la figura y están orientados en dirección N320°O a S150°E y N240°O a S120°E. Mientras tanto, la orientación principal de los ejes T (esfuerzo mínimo principal) está dado en dirección N3°E a S181°O y N20°E a S200°O (Figura 18d).

De acuerdo a los estudios estructurales de inversión de estrías, orientación de conos volcánicos, diques y grietas, realizados por Ferrari et al. (1994b), Suter (1991), Suter et al. (1997) y García-Palomo (2002) en las diferentes regiones del Cinturón Volcánico Mexicano (CVM), evidencian que el esfuerzo máximo principal está orientado en dirección NE-SO y se muestra casi constante a través de todo el CVM (Figura 18e). En general, el esfuerzo mínimo principal en Los Humeros presenta una orientación predominante en dirección N-S, coincidiendo con la en la parte central del CVM (N-S).

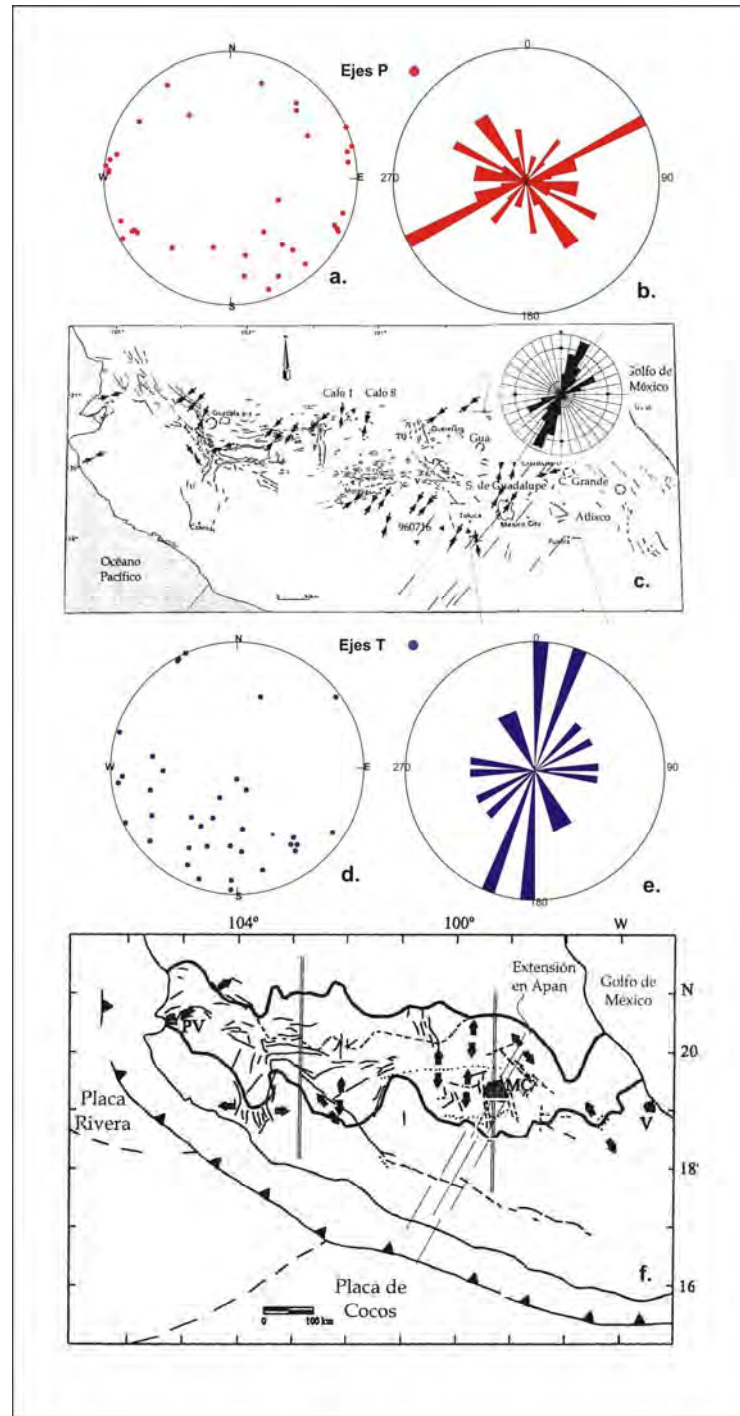


Figura 18. a). Proyección estereográfica de los ejes de presión (círculos rojos). b). Diagrama de rosas, mostrando la orientación del máximo esfuerzo de los ejes de presión en el campo geotérmico de Los Hornos. c). Orientación del esfuerzo máximo en el Cinturón Volcánico Mexicano. En la margen superior derecha de la figura se muestra la orientación el promedio del esfuerzo máximo (Ferrari et al., 1994b; Suter et al., 1997; García-Palomo, 2002o). d). Proyección de los ejes de tensión (T). e). Orientación del esfuerzo mínimo principal en Los Hornos. f). Orientación del esfuerzo mínimo principal en el CVM (Suter, 1991).

4.2.2. Estimación de la Escala de Magnitud de Duración

Debido a la falta de una relación de magnitud de duración calculada específicamente para campos geotérmicos es que, en el presente estudio, se utilizó el propuesto por Chavacán et al. (2004), para estimar la magnitud de duración (M_d) de los 95 sismos localizados en el campo geotérmico de Los Humeros, tal como se describió en el capítulo 3.3.3. Sin embargo, comparando los valores de M_w obtenidos a partir de la inversión de la forma de onda y los M_d obtenidos utilizando la relación de Chavacán et al. (2004), se observó que los M_d son más pequeños que los M_w (Tabla 6). Similares características fueron observadas al realizar el cálculo con las relaciones propuestas por Lee et al. (1975), Havskov y Macías (1983). Por tal razón, se consideró conveniente proponer una escala de magnitud de duración para el campo geotérmico de Los Humeros a partir de los valores de M_w obtenidos de la inversión para los 16 sismos presentados en la Tabla 6.

Tabla 6. Comparación de los valores de magnitud de duración inicial (M_d inicial) y propuesto (M_d^*). M_w , T (s) y D (km) son la magnitud de momento, tiempo en segundos y distancia en kilómetros a partir de los cuales se obtuvo M_d^*

Nº SISMO	M_d INICIAL	M_w	T (s)	D (km)	M_d^* PROPUESTO
13	1.1	1.9	14	3.0	1.88
14	1.7	2.6	26	3.0	2.32
15	1.5	2.2	21	3.0	2.17
16	1.5	2.1	21	3.0	2.17
17	1.1	1.9	15	4.0	1.98
22	1.0	1.8	13	4.0	1.88
27	2.0	2.6	35	3.0	2.57
29	2.0	2.6	35	4.0	2.58
30	1.8	2.4	30	4.0	2.47
33	1.6	2.1	23	2.0	2.19
37	1.5	2.1	22	4.1	2.26
49	1.6	2.2	24	4.0	2.31
61	2.2	2.9	45	6.0	2.86
72	2.1	2.6	40	4.0	2.67
79	1.4	2.5	20	4.0	2.18
93	3.2	3.6	180	1.9	3.64

Para obtener la relación de la magnitud de duración para el campo geotérmico de Los Humeros, se utilizó la fórmula empírica para calcular M_d :

$$M_d = A + B \log_{10} T + CD$$

Donde: T es la duración del registro en segundos; A, B y C son constantes y D la distancia epicentral en kilómetros. Los detalles de la regresión lineal para el cálculo de las constantes son ampliamente discutidos en Draper y Smith (1981).

Para estimar la nueva relación de magnitud Md para Los Humeros, se siguió la metodología descrita por Lee et al. (1972), en la cual considera que la magnitud del sismo depende de la duración de la señal (T) y de la distancia epicentral (D), de tal manera que a partir de estos datos conocidos puede realizarse la regresión lineal múltiple para el cálculo de las constantes A, B y C. La distancia epicentral está referida únicamente a la estación S06 debido a que esta estación estuvo operativa durante el todo el periodo de estudio y por tanto, se pudo realizar la lectura de la duración para 73 sismos. Obsérvese que la distancia epicentral se encuentra en el rango de 2 a 4 km y solamente el sismo 61 se encuentra a 6 km (Tabla 6). En la regresión, D y $\text{Log}_{10}T$ son las variables independientes; mientras que M_w obtenido para los 16 sismos es la variable dependiente de la ecuación empírica, además de ser utilizada para calibrar la nueva magnitud de duración Md*.

Los resultados numéricos de la regresión múltiple, muestran principalmente que T y D son variables significativas con una varianza observada del 96% ($R^2=0.96$) y un coeficiente de correlación múltiple de 98% ($R=0.98$). Así, los valores obtenidos para las constantes son: $A=0.1285$, $B=1.6283$ y $C=0.0487$. Por tanto, la relación obtenida de la regresión que más se ajusta para el cálculo de las magnitudes Md* en Los Humeros es la siguiente:

$$Md^* = -0.1285 + 1.6283\text{Log}_{10}T - 0.0487D$$

Para verificar la relación calculada para Los Humeros, en la Figura 19 y Tabla 6 se presenta los resultados de Md* y en ella se observa que los valores son similares a los de M_w , exceptuando a los sismos 14 y 79 donde la variación es de 0.3. Por lo expuesto, es evidente que la relación de Chavacán et al (2004) subestima las magnitudes en Los Humeros, esto podría deberse a que la relación fue obtenida para una zona con características litológicas del subsuelo diferentes a la de un campo geotérmico, además de utilizar para su cálculo, sismos locales y regionales. Los valores corregidos de Md* del total de sismos analizados (95 sismos), son presentados en el Anexo 3.

4.3. SISMOS REGISTRADOS EN LAS ESTACIONES S05 Y S06, SU CORRELACIÓN CON LOS POZOS INYECTORES Y PRODUCTORES

Para realizar la correlación del 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 respectivamente, así como los datos de inyección de los pozos I29 e I38 y de mayor producción P1, P12, P15, P16, P31, P35 y P37 (Figura 20, 21 y 22). La elección de estas 2 estaciones antes mencionadas se debe básicamente a que estuvieron operativas ininterrumpidamente desde su instalación hasta la actualidad. Aunque se dispone de datos sísmicos desde 1997, la estadística involucra únicamente desde enero 1999 a julio 2005 y están dados en número de sismos por mes (N° sismos/mes) y toneladas por mes (Tn/mes) de vapor de agua producida e inyectada al yacimiento geotérmico.

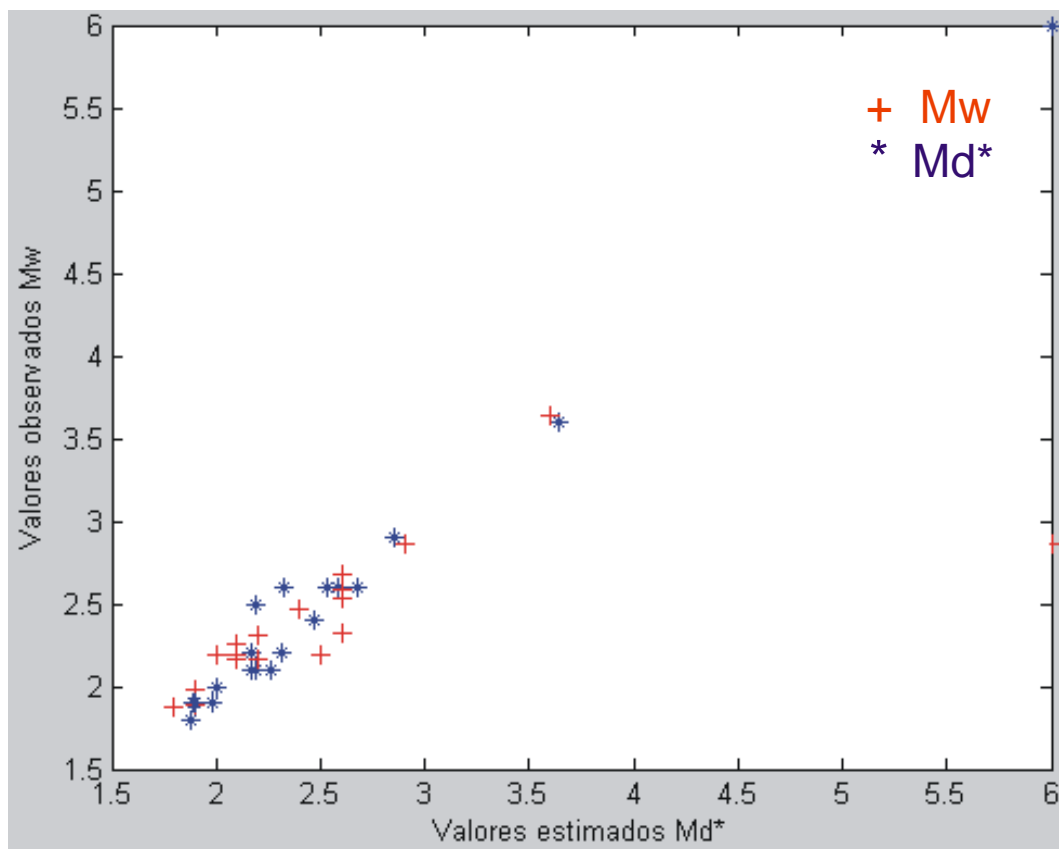


Figura 19. Comparación de los valores Mw observados y los estimados Md*. Obsérvese que algunos de ellos muestran diferencias mínimas (Tabla 6).

Los resultados de la correlación del total de sismos por mes (Nº sismos/mes) registrados en la estación S05 (sismos localizados y no localizados), con la inyección en toneladas por mes (Tn/mes) es mostrada en las Figura 20. Tal como se observa en la figura, la ocurrencia de sismos en la estación S05 ubicada en la ZN del campo geotérmico de Los Humeros y la cantidad de agua inyectada en I29 muestra un comportamiento similar; es decir, la sismicidad aumenta cuando la cantidad de inyección de agua al subsuelo aumenta; asimismo, si ésta disminuye la sismicidad también disminuye. Sin embargo, si se analiza la sismicidad y la inyección I38 no hay una relación directa para el periodo 1999 a septiembre del 2004 debido a que la cantidad inyectada por éste es menor a I29. Obsérvese que en enero del 2004 se aumentó la cantidad de inyección en I38 a los mismos niveles que I29 y la tendencia de la sismicidad aumenta durante los siguientes meses aunque I29 deja de operar por un periodo de 3 meses (junio a septiembre del 2004).

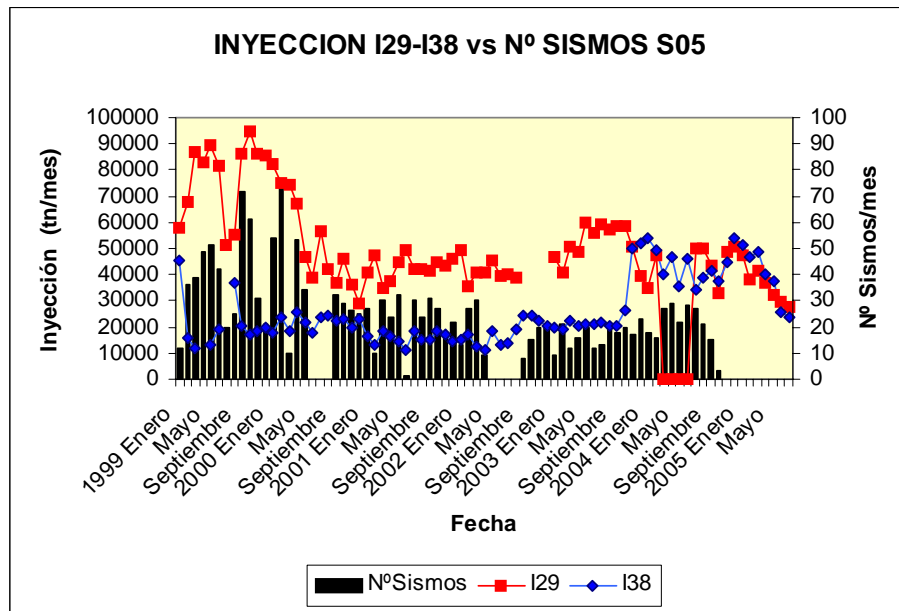


Figura 20. Correlación de la cantidad de inyección de agua en los pozos I29 e I38 versus el número de sismos registrados en la estación S05. La inyección está dada en toneladas por mes (tn/mes) y los sismos en números de sismos por mes.

Por otro lado, en la Figura 21, se muestra la producción de los pozos desde su puesta en operación y en ella se observa que desde 1997 hasta Junio del 2005, 6 pozos operaron ininterrumpidamente (P7, P8, P9, P11, P19, P20) y su producción se mantuvo casi constante durante todo el periodo (Figura 21a). Los siguientes 6 pozos mostrados en la Figura 21b, operaron de manera discontinua (P17, P30, P32, P33, P36, P39), P33 y P36 fueron cerrados completamente por la insuficiente cantidad de vapor de agua. Mientras que, 8 pozos (P1, P9, P12, P15, P16, P31, P35, P37) presentaron un aumento en la producción, especialmente en el pozo P1 (Figura 21c).

A fin de observar este aumento de la producción y su posible relación con la sismicidad se ha graficado el número de sismos registrados en la estación S06 ubicada en la ZS del campo geotérmico y la cantidad de producción de vapor, observada principalmente en los 8 pozos, los mismos que son mostrados en la Figura 21c. La razón por la cual se realiza la evaluación en la estación S06 se debe precisamente a que en esta zona ocurrió el sismo de magnitud moderada ($M_w=3.6$) el 21 de enero del 2002. En la Figura 22, se presenta los resultados obtenidos. En esta figura se puede observar un ligero aumento de la sismicidad en la estación S06 a partir de noviembre del 2003 y se prolonga hasta septiembre del 2004; mientras que la producción aumenta relativamente en marzo del 2003. Sin embargo un aumento significativo de la producción se observa principalmente en marzo del 2004, coincidiendo curiosamente 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).

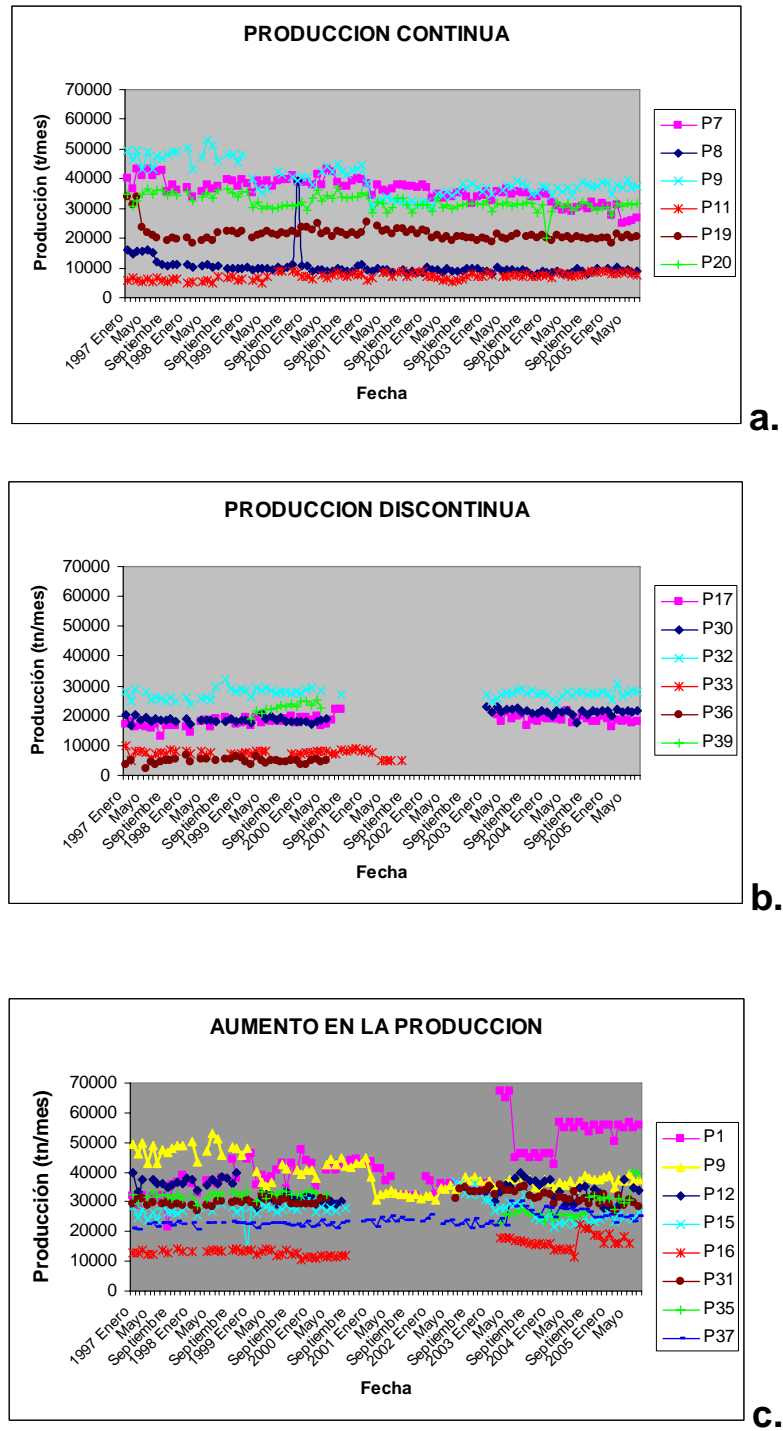


Figura 21. Operatividad de los pozos y cantidad de producción de vapor de agua en toneladas por mes (Tn/mes). a). Producción continua, b). Producción discontinua y c). Aumento de producción.

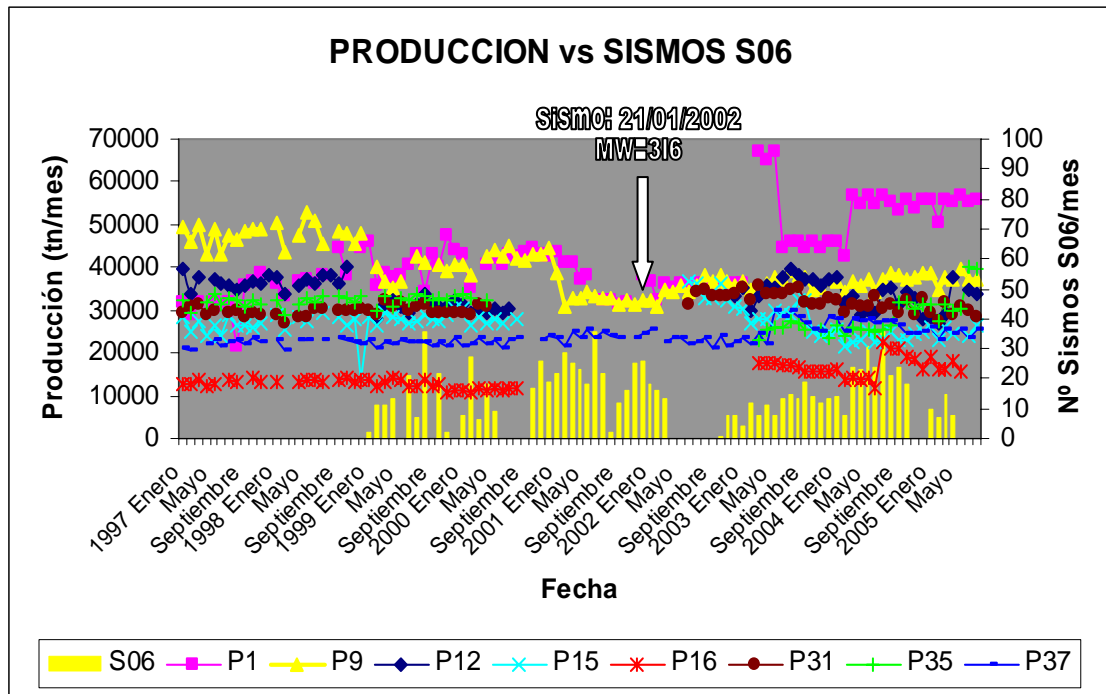


Figura 22. Correlación de la sismicidad registrada en la estación S06 y los 8 pozos de mayor producción de vapor de agua.

CAPÍTULO 5

TOMOGRAFÍA SÍSMICA POR ATENUACIÓN A PARTIR DE LAS ONDAS DE CODA

5.1. ESTIMACIÓN DE CODA Q_c

Para conocer la distribución de la atenuación sísmica en el campo geotérmico de Los Hornos, primero se estima el factor de calidad Q_c . Para estimar éste factor, se utiliza el modelo de retrodispersión simple propuesto por Aki y Chouet (1975). De acuerdo al modelo, la envolvente de desplazamiento $A(f,t)$ de las ondas de coda en una banda de frecuencias f puede ser expresado de la siguiente manera:

$$\ln[t^2]A_{obs}[f(r,t)] = C - Q_c^{-1}2\pi ft \quad (1)$$

Donde: C es una constante que depende de la frecuencia, $A_{obs}[f(r,t)]$ es la amplitud media del registro, \ln es el logaritmo natural, t es el tiempo medido desde el tiempo origen del sismo y Q_c es el factor de calidad que contiene información de la atenuación de la energía sísmica.

El modelo de Aki y Chouet (1975), asume que la coda del sismo local está compuesta por la suma de ondas S producidas por heterogeneidades dentro del medio en el cual se propaga. Por lo tanto, la coda es la porción de sismograma correspondiente a la retrodispersión de las ondas S donde la fuente y el receptor se encuentran en el mismo punto y la radiación es esférica. Este modelo es válido únicamente para ondas que arriban 2 veces el tiempo de viaje de las ondas S.

$$T = 2t_s + \frac{t_v}{2} \quad (2)$$

De acuerdo a estas consideraciones, la ecuación (1) también puede ser expresada como:

$$Y = bX + C$$

Donde:

$$\begin{aligned} Y &= \ln[t^2]Aobs[f(r,t)] \\ X &= 2\pi ft \\ b &= Qc^{-1} \end{aligned} \quad (3)$$

Qc^{-1} , es calculada de la pendiente b, utilizando la solución de mínimos cuadrados (ecuación 3).

5.1.1. Datos

Para estimar el factor de calidad (Qc) de la atenuación sísmica en el campo geotérmico de los Humeros, se ha utilizado los 95 sismos registrados y mejor localizados durante diciembre 1997 a diciembre del 2004 (ver Figura 11a), los mismos que fueron registrados por las estaciones permanentes (RSTP) en sus tres componentes: horizontales (N-S y E-O) y vertical (Z). El programa utilizado para estimar el valor de Q es denominado “codaq” y forma parte de las opciones del programa SEISAN (Havskov and Ottemoller, 2003). Codaq, tiene como datos de entrada: longitud de la ventana, la velocidad promedio de las ondas S (V_s), un promedio de la densidad de las rocas, número de frecuencias, y el mínimo coeficiente de correlación. Debido a que los sismos que ocurren en los Humeros son muy pequeños, se consideró una ventana de 5 segundos y el tiempo de inicio de 2 veces el tiempo de S ($2t_s$), una V_s de 2.05 km/s, la densidad promedio de 2.5 gr/cm³ y las frecuencias para el filtrado de los sismos de 2, 4, 8 y 16 Hz. Asimismo, se estableció un coeficiente de correlación mínima de 0.6.

Un ejemplo del procedimiento seguido para la estimación de Qc con el programa SEISAN “Codaq” es mostrada en la Figura 23. Este sismo corresponde al registrado el día 13 de diciembre de 1997 en las estaciones S01, S03 y S04. Estas señales fueron filtradas a 2, 4, 8 y 16 Hz respectivamente. La primera flecha indica el tiempo de arribo de la onda P del sismo y las otras dos flechas la longitud de la ventana (5 segundos). La línea en color rojo representa el mejor ajuste del decaimiento de las ondas de coda.

5.2.2. Resultados

Debido a que se siguió el mismo procedimiento para el cálculo de Qc en todas las estaciones de la red sísmica permanente de Los Humeros (RSTP), se ha obtenido valores de Qc promedios para cada una de ellas y en las 4 frecuencias utilizadas (Tabla 6). Tal como se observa en la tabla, los coeficientes de correlación son mayores a 0.6 y una raíz media cuadrática (rms) que varía entre 0.07 hasta 0.31. Asimismo, los resultados muestran que los valores bajos de Qc varían entre 33.4 para la frecuencia de 2 Hz hasta 329.4 para los 16 Hz. En general, los valores mas bajos de Qc para todas las frecuencias son observadas en las estaciones S04 y S05 las mismas que se ubican en la ZN del campo geotérmico de Los Humeros y los valores altos son observados en S02 y S06, estaciones ubicadas en la ZS.

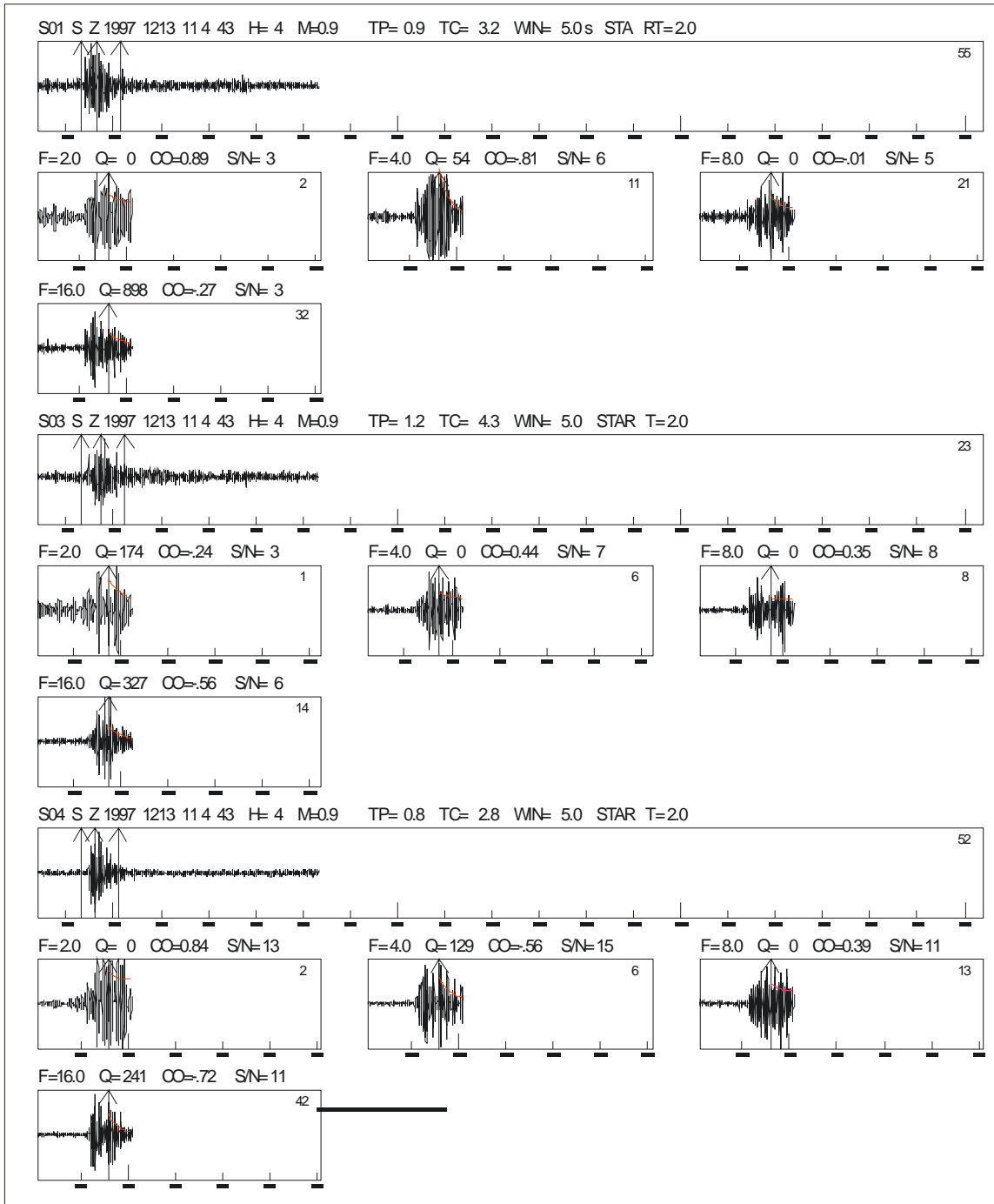


Figura 23. Ejemplo del cálculo de coda Q_c en un sismo registrado en las estaciones S01, S03 y S04. Las frecuencias de filtro son de 2, 4, 8 y 16 Hz

Tabla 6. Valores promedio de Q_c obtenidos para cada una de las 6 estaciones sísmicas y las 4 frecuencias (f). Coef. Corr es el coeficiente de correlación y rms la raíz media cuadrática.

F (Hz)	ESTACION	Q_c	Coef. Corr	rms	f (Hz)	ESTACIÓN	Q_c	Coef. Corr	rms
$f=2$	S01	58.31	0.75	0.09	$f=8$	S01	***	***	***
	S02	69.80	0.79	0.07		S02	***	***	***
	S03	75.90	0.77	0.08		S03	149.20	0.77	0.19
	S04	33.35	0.82	0.11		S04	133.67	0.76	0.21
	S05	35.50	0.84	0.10		S05	119.40	0.78	0.22
	S06	43.83	0.80	0.09		S06	214.80	0.61	0.20
$f=4$	S01	86.63	0.72	0.22	$f=16$	S01	282.30	0.66	0.28
	S02	113.00	0.62	0.19		S02	394.00	0.60	0.25
	S03	66.17	0.79	0.17		S03	240.30	0.69	0.31
	S04	74.92	0.75	0.19		S04	275.84	0.65	0.30
	S05	72.92	0.75	0.19		S05	188.11	0.78	0.29
	S06	51.71	0.74	0.21		S06	329.44	0.61	0.30

En la Figura 24a, se han graficado los valores promedios de Q_c como una función de la frecuencia (Q_c vs f) para todas las estaciones utilizadas en el análisis, un tiempo de inicio de $2t_s$ y una ventana de 5 segundos (ecuación 2). De acuerdo a la figura, el aumento de los valores de Q_c en cada una de las estaciones es directamente proporcional a la frecuencia. Obsérvese también que la estación S05 presenta los valores más bajos de Q_c , además de encontrarse en la zona de mayor actividad sísmica y muy cercana a los pozos de inyección I29 e I38. Similares características fueron observados por Rodríguez (1999) y Wong et al. (2001) en el campo geotérmico de Las Tres Vírgenes, donde la estación Residencia (E1), ubicada en la zona central del campo geotérmico, zona de mayor actividad hidrotermal y tectónica (Figura 24b), presentó los valores más bajos de Q_c (Figura 24c, 24d). Los valores de ambos autores están representados en líneas y círculos de color rojo, en tanto que los valores altos fueron obtenidos en el análisis de Q_c en estaciones ubicadas fuera del campo geotérmico y están representados con símbolos en color negro en las figuras 24c y 24d respectivamente.

Después de la evaluación de los valores de Q_c para cada una de las estaciones instaladas en el campo geotérmico, se presentan también los resultados totales de Q_c para cada una de las frecuencias. A partir de estos resultados, se estiman los valores de Q_c a la frecuencia de 1 Hz (Q_0) y el coeficiente de anelasticidad (η), utilizando para ello la relación propuesta por Aki (1980a).

$$Q_c = Q_0 f^\eta$$

Los estudios realizados por Aki and Chouet (1975), Bollinger (1979), Nuttli (1980), Singh and Herrmann (1983) y Paul et al. (2003), consideran que los valores de Q_0 están

asociados principalmente a las heterogeneidades del medio (geología) y η a la tectónica del medio, donde los valores altos de Q_0 y η representan una menor heterogeneidad y mayor actividad tectónica respectivamente. En el campo geotérmico de Los Humeros, se ha estimado un valor de $Q_c = 24 \pm 12 f^{0.86 \pm 0.06}$. Asimismo, la curva de ajuste muestra una diferencia de 6 y 2 unidades para las frecuencias 2 y 4 Hz; mientras que para 8 y 16 Hz es de 10 y 20 unidades aproximadamente, que se ve reflejado en el error y error promedio (Tabla 7).

De acuerdo a los valores obtenidos de $Q_0=24$ y $\eta=0.86$, en el campo geotérmico de Los Humeros (Figura 24b, Tabla 7) y los obtenidos por Wong et al. (2001) en Las Tres Vírgenes ($Q_0=50$, $\eta=0.65$), no muestran variaciones considerables. Sin embargo, si se compara los valores de Los Humeros y Tres Vírgenes con los obtenidos por Tonatiuh et al. (1997) en el campo geotérmico de Cerro Prieto ($Q_0=111.5$, $\eta=0.41$), se puede observar una diferencia importante, principalmente en el valor de Q_0 . Esta diferencia podría sugerir que Cerro prieto presenta una geología menos heterogénea que los otros dos campos geotérmicos.

Tabla 7. Valores promedio de Q_c obtenidos para el campo geotérmico de Los Humeros Q_0 es el valor de Q_c a la frecuencia de 1 Hz y η el coeficiente de anelasticidad

<i>Frec. (Hz)</i>	<i>Qc</i>	<i>AJUSTE</i>	<i>Error</i>	<i>Qo</i>	<i>η</i>	<i>Error Prom.</i>
2.0	49.85	43.561	0.003	24	0.86	0.039
	4.0	77.56	79.065	0.000		
	8.0	154.27	143.506	0.001		
	16.0	284.99	260.468	0.002		

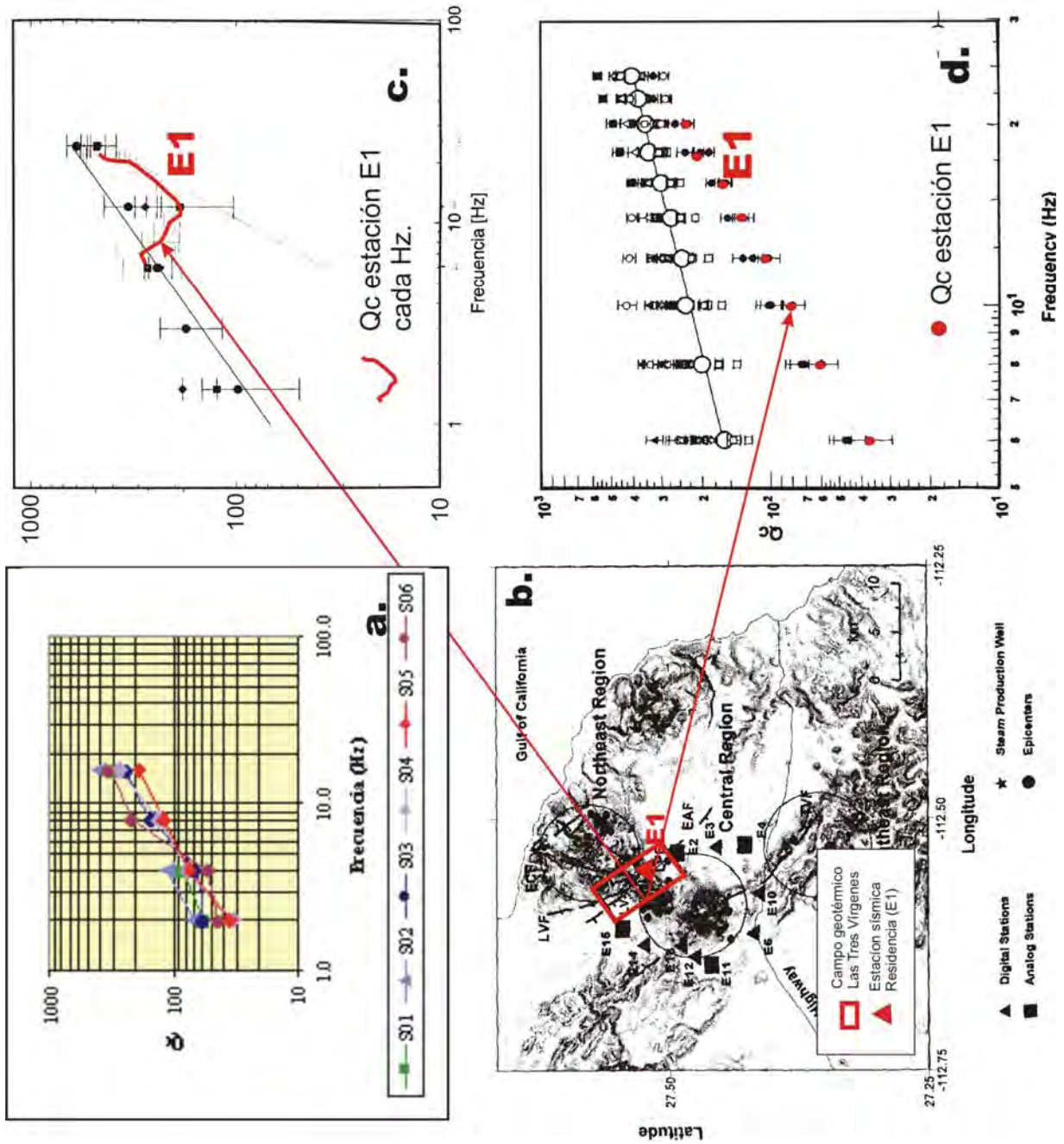
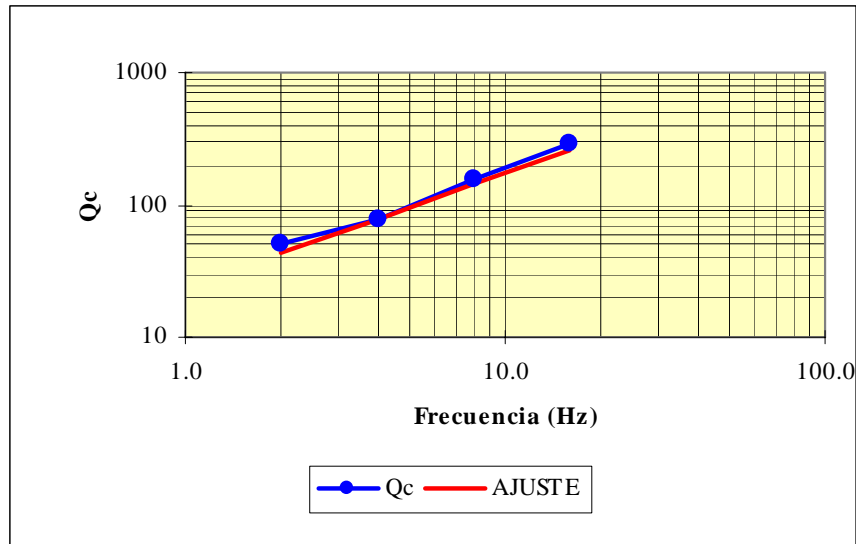


Figura 24. a) Valores de Q_c obtenidos para todas las estaciones del campo geotérmico de Los Humeros como una función de la frecuencia. Los valores graficados son los valores promedio de Q_c . b). Distribución de estaciones y principales estructuras Ubicación del campo geotérmico de Las Tres Vírgenes, E1 es la estación Residencia. c). Valores de Q_c obtenidos por Rodríguez (1999) en la estación E1 y d). Valores de Q_c obtenidos por Wong et al. (2001) en la estación E1. d). Valores promedio de Q_c para todo el campo geotérmico de Los Humeros y su respectivo ajuste (Tabla 7).

Figura 24. Continuación.....



e.

5.2. TOMOGRAFÍA SÍSMICA POR ATENUACIÓN (Qc^{-1})

Una vez obtenido los valores de Qc , se procedió a determinar la atenuación sísmica a partir de las ondas de coda (Qc^{-1}). Para ello, se ha seguido el modelo de retrodispersión simple en un medio isótropo y homogéneo (Aki and Chouet, 1975) descrito en 5.1, a fin de obtener la tomografía sísmica en 3D. Así,

$$Qc^{-1} = Qi^{-1} + Qs^{-1}$$

Qc^{-1} , es la suma de dos tipos de atenuaciones, la primera Qi^{-1} es la atenuación intrínseca relacionada a la energía elástica convertida en energía termal; mientras que la segunda Qs^{-1} es la atenuación relacionada a la dispersión.

La tomografía sísmica por atenuación determina las anomalías con base en la caída de la amplitud de las ondas. Para obtener la distribución de Qc^{-1} en un medio tridimensional Vargas et al. (2004) realizaron una modificación de la expresión de Pulli (1984), la misma que utiliza elipses, donde los focos del mismo son el hipocentro y la estación. De esta manera obtuvo una expresión elipsoidal de la forma:

$$\frac{x^2}{(vT/2)^2} + \frac{y^2}{(vT/2)^2} + \frac{z^2}{(vT/2)^2 - R^2/4} = 1 \quad (5)$$

Donde: R es la distancia entre la fuente (hipocentro) y la estación; v es la velocidad de la onda S ; x , y y z son las coordenadas de la superficie y T es el tiempo de recorrido de las

ondas de coda entre la fuente y la estación (ver ecuación 2), con una velocidad constante y coeficiente de atenuación Q_0^{-1} . Para el estudio, se parte de la hipótesis que el valor de Q_c obtenido anteriormente es un valor aparente o promedio (Q_{av}) que cubre el área elíptica definida por la dispersión simple (Vargas et al., 2004), y que se puede relacionar con la medida de Q_c a partir de la siguiente expresión:

$$\frac{A_{total}}{Q_{av}} = \sum_j \frac{A_{cell-j}}{Q_j} \quad (6)$$

Donde: A_{cell-j} es la fracción de área en una región elíptica con coeficiente de atenuación verdadero Q_j . Extendiendo este concepto a 3D y asumiendo una velocidad de propagación constante, Vargas et al. (2004) determinó la distribución espacial de la atenuación de las ondas coda sobre el elipsoide que define la dispersión simple así:

$$\frac{1}{Q_{av}} = \frac{1}{Q_1} \frac{V_{cell-1}}{V_{total}} + \dots + \frac{1}{Q_n} \frac{V_{cell-n}}{V_{total}} \quad (7)$$

La relación V_{cell}/V_{total} es la fracción de volumen asociada al recorrido la onda dispersada, la misma que pasa por la celda j -ésima. Si el proceso se repite para cada par estación – hipocentro, entonces toda la región será muestreada. Por tanto, la ecuación (7) se puede escribir de la siguiente manera:

$$a_1x_1 + a_2x_2 + \dots + a_nx_n = y \quad (8)$$

$$\text{donde, } y = \left(\frac{1}{Q_{av}} \right) x_i = \left(\frac{1}{Q_i} \right) a_i = \frac{1}{Q_i} \left(\frac{V_{cell-i}}{V_{Total}} \right) \quad (9)$$

Esta ecuación permite una estimación por mínimos cuadrados de x_i y puede expresarse de la forma $Y=AX$, donde, A corresponde a una matriz de $n \times m$ elementos, $X = 1/Q_m$ y $Y = 1/Q_n$, siendo estos últimos vectores de $1xm$ y $1xn$ elementos

5.2.1. Procesamiento de los Datos

Para realizar la tomografía sísmica por atenuación, en el presente estudio, se utiliza el programa desarrollado por Vargas et al. (2004) dentro del ambiente MATLAB. Este programa utiliza como datos de entrada:

- Coordenadas geográficas de las estaciones sísmicas utilizadas (latitud, longitud, elevación)
- Parámetros hipocentrales de los 95 sismos localizados en el campo geotérmico de Los Humeros (latitud, longitud y profundidad)
- Ventana utilizada para el cálculo de Q_c (5 segundos)
- Valores obtenidos de Q_c

- Velocidad promedio de la onda S ($V_s=2.05$ km/s)
- Un enmallado de la zona de estudio considerando divisiones de 6x6x6 y 8x8x8 celdas en latitud, longitud y profundidad. Para el primero (6x6x6), la distancia entre celdas es de 2.5 km.

En la Tabla 8, se presenta los parámetros de entrada para obtener los valores de Q_c^{-1} con los cuales se realiza la tomografía sísmica por atenuación del campo geotérmico de Los Humeros. En este caso particular, los primeros 20 valores de Q_c corresponden a los obtenidos con $f=8$ Hz. Sin embargo el procedimiento fue realizado también para las frecuencias de 2, 4 y 16 Hz.

Tabla 8. Parámetros de entrada para el cálculo de la atenuación sísmica Q_c^{-1} . Lat y long son la latitud y longitud en grados tanto para la estación como para el epicentro; elev. es la elevación de la estación en metros sobre el nivel del mar y la ventana de señal utilizada en el análisis de Q_c .

ESTACION			SISMO				
Lat (°)	Long. (°)	Elev. (m.s.n.m)	Lat (°)	Long. (°)	Prof. (km)	Ventana (s)	Q_c
19.690	-97.489	2780	19.688	-97.453	1.80	5.0	92
19.690	-97.489	2780	19.685	-97.454	2.10	5.0	127
19.684	-97.456	2800	19.685	-97.454	2.10	5.0	157
19.633	-97.460	3000	19.683	-97.453	2.20	5.0	223
19.690	-97.489	2780	19.683	-97.453	2.20	5.0	136
19.690	-97.489	2780	19.685	-97.458	2.80	5.0	139
19.684	-97.456	2800	19.685	-97.458	2.80	5.0	167
19.690	-97.489	2780	19.687	-97.453	2.30	5.0	92
19.690	-97.489	2780	19.688	-97.453	2.20	5.0	222
19.684	-97.456	2800	19.691	-97.448	2.30	5.0	157
19.690	-97.489	2780	19.689	-97.448	2.30	5.0	155
19.684	-97.456	2800	19.689	-97.448	2.30	5.0	125
19.684	-97.456	2800	19.692	-97.454	2.10	5.0	120
19.684	-97.456	2800	19.691	-97.449	2.30	5.0	108
19.633	-97.460	3000	19.687	-97.450	3.30	5.0	135
19.684	-97.456	2800	19.687	-97.450	3.30	5.0	191
19.633	-97.460	3000	19.692	-97.453	2.30	5.0	102
19.690	-97.489	2780	19.692	-97.453	2.30	5.0	164
Continúa.....							

En la Tabla 9, se presenta el archivo de salida de la tomografía sísmica con los valores de Q_c^{-1} , la profundidad de muestreo del mismo en kilómetros y su respectiva resolución. Particularmente, los primeros 5 resultados numéricos corresponden a la obtenida para la frecuencia de 8 Hz y espaciamiento entre celdas de 6x6x6. Tal como se puede observar en la

tabla, la profundidad de muestreo (prof.) alcanza los 12.5 km. Obsérvese que a la resolución disminuye a medida que aumenta la profundidad de muestreo, tal es así que a la profundidad máxima (12.5 km) la resolución es nula.

Tabla 9. Parámetros de salida de la tomografía sísmica

LATITUD (°)	LONGITUD (°)	Prof (km)	Qc-1	RESOLUCIÓN
19.6830	-97.4814	0.11	0.01420	0.2907
19.6830	-97.4401	0.11	0.00386	0.1002
19.6830	-97.3987	0.11	0.00386	0.1002
19.7264	-97.4401	0.11	0.00999	0.1564
19.7264	-97.3987	0.11	0.00200	0.0209
.....				
19.5961	-97.4401	2.58	0.01609	0.0689
19.6395	-97.5228	2.58	0.03335	0.0164
19.6395	-97.4814	2.58	0.02445	0.0684
19.6395	-97.3987	2.58	0.02068	0.3126
19.6830	-97.3987	2.58	0.02202	0.1003
.....				
19.5961	-97.4401	5.05	0.06667	0.0693
19.6395	-97.4814	5.05	0.02467	0.0683
19.6395	-97.4401	5.05	0.00200	0.1005
19.6830	-97.4401	5.05	0.00386	0.1002
19.6830	-97.3987	5.05	0.04280	0.0695
.....				
19.6395	-97.4401	7.62	0.00200	0.0681
19.6395	-97.3987	7.62	0.06667	0.0158
19.6830	-97.4401	7.62	0.00200	0.0634
19.7265	-97.4814	7.62	0.00200	0.0157
19.7265	-97.4401	7.62	0.06667	0.0165
.....				
19.6395	-97.4814	10.09	0.01009	0.0143
19.6395	-97.4401	10.09	0.04389	0.0146
19.6830	-97.4814	10.09	0.00200	0.0147
19.6830	-97.4401	10.09	0.00200	0.0147
19.6830	-97.3987	10.09	0.00659	0.0000
.....				
19.5526	-97.5642	12.56	0.00659	0.0000
19.5526	-97.5228	12.56	0.00659	0.0000
19.5526	-97.4814	12.56	0.00659	0.0000
19.5526	-97.4401	12.56	0.00659	0.0000
19.5526	-97.3987	12.56	0.00659	0.0000

A fin de conocer que espaciamiento es el que mejor muestrea el subsuelo del campo geotérmico de Los Humeros, se procede a calcular la longitud de onda que más se asemeje al espesor de 7 de los 8 estratos del que está compuesto el campo (Figura 3b, 3c) considerando para ello las frecuencias de filtrado de 2, 4, 8 y 16 Hz. De acuerdo a lo postulado, la longitud de onda debe ser proporcional al espesor de los estratos a muestrear. Así, para su evaluación se utiliza la relación:

$$\lambda = \frac{v}{f}$$

Donde: λ es el tamaño de la onda, v es la velocidad promedio de la onda S y f la frecuencia.

Los resultados de la evaluación es presentada en la Tabla 10, donde se observa que para una velocidad promedio de 2.05 km/s y a las 4 frecuencias, la longitud de la onda varía de 1.03 a 0.113 km. Si se realiza una comparación de las longitudes de onda obtenidas para cada una de las frecuencias y el espesor promedio de los 7 primeros estratos del campo (0.33 km), se puede ver claramente que el valor más cercano a éste corresponde a la frecuencia de 8 Hz y longitud de onda de 0.26 km.

Tabla 10. En la parte superior de la tabla se presenta la evaluación de la longitud de onda (λ) considerando frecuencias de filtrado de 2, 4, 8 y 16 Hz. En la parte inferior, se muestra el modelo de velocidad de Los Humeros, número de capas, espesor y promedio de las mismas.

		<i>f</i> (Hz)	2	4	8	16			
		λ (km)	1.03	0.51	0.26	0.13			
<i>Nº</i>									
<i>Capas</i>	1	2	3	4	5	6	7	8	<i>Prom.</i>
<i>Espesor</i>									<i>(km)</i>
<i>(km)</i>	0.24	0.41	0.60	0.54	0.14	0.20	0.24	*	0.33

5.2.2. Distribución de la Atenuación Sísmica en 3D

Básicamente, la tomografía sísmica de la atenuación fue realizada para las 4 frecuencias y para los dos tipos de espaciamiento entre celdas. Sin embargo, los resultados obtenidos para las frecuencias 2, 4 y 16 Hz presentaron mayores errores y por tanto menor resolución comparados con los de $f=8$ Hz. Un ejemplo de ello es la tomografía sísmica obtenida con la frecuencia $f=2$ Hz y enmallado del campo de 8x8x8 (Figura 25). De acuerdo a la Figura 25a, la anomalía de atenuación (valores altos) se distribuye en la periferie del campo geotérmico de Los Humeros; mientras que la baja atenuación es percibida en el extremo S y E del campo. Asimismo, el número de celdas por elipse es de 120 en la zona de baja atenuación (Figura 25b). Mientras que, la atenuación del elipsoide muestra una distorsión generalizada

(Figuras 25c) y la resolución de la tomografía en cada una de las celdas (Figuras 25d) es sumamente baja (0.02). Resultados similares fueron obtenidos para las frecuencias 4, 16 Hz y ambos espaciamientos entre celdas.

De acuerdo a las evaluaciones realizadas y tomando en consideración la mejor solución elipsoidal, errores mínimos en el modelado, profundidad máxima de muestreo y que la longitud del muestro esté de acuerdo al espesor de los estratos (Tabla 10), en el presente estudio, se ha seleccionado la solución obtenida considerando el área compuesta por 6x6x6 celdas y la frecuencia de $f=8$ Hz cuyos primeros resultados numéricos fueron presentados en la Tabla 9. Mientras tanto, en la Figura 26, se presenta la mejor solución gráfica de la tomografía sísmica por atenuación de ondas de coda (Q_c^{-1}) obtenida para el campo geotérmico de Los Humeros.

En la Figura 26a, la distribución de la atenuación en 3 dimensiones (3D), muestra una anomalía importante que abarca prácticamente el extremo SE del campo geotérmico (CGLH) marcado en la figura con un rectángulo blanco. De acuerdo a la tomografía, esta zona de alta atenuación se extiende hacia el E de CGLH. En profundidad, la anomalía alcanza profundidades del orden de los 10 km aproximadamente (Figura 26b). Esta misma característica se observa en la distribución de la atenuación en cada una de las celdas y a la profundidad mencionada. Sin embargo, aunque aparentemente esta zona de alta atenuación alcanza los 12 km, la tomografía muestra una buena resolución del elemento hasta los 5.1 km. (Figura 26c). Obsérvese también que la atenuación del elipsoide (Figura 26d) es similar con la resolución mostrada en la Figura 26c.

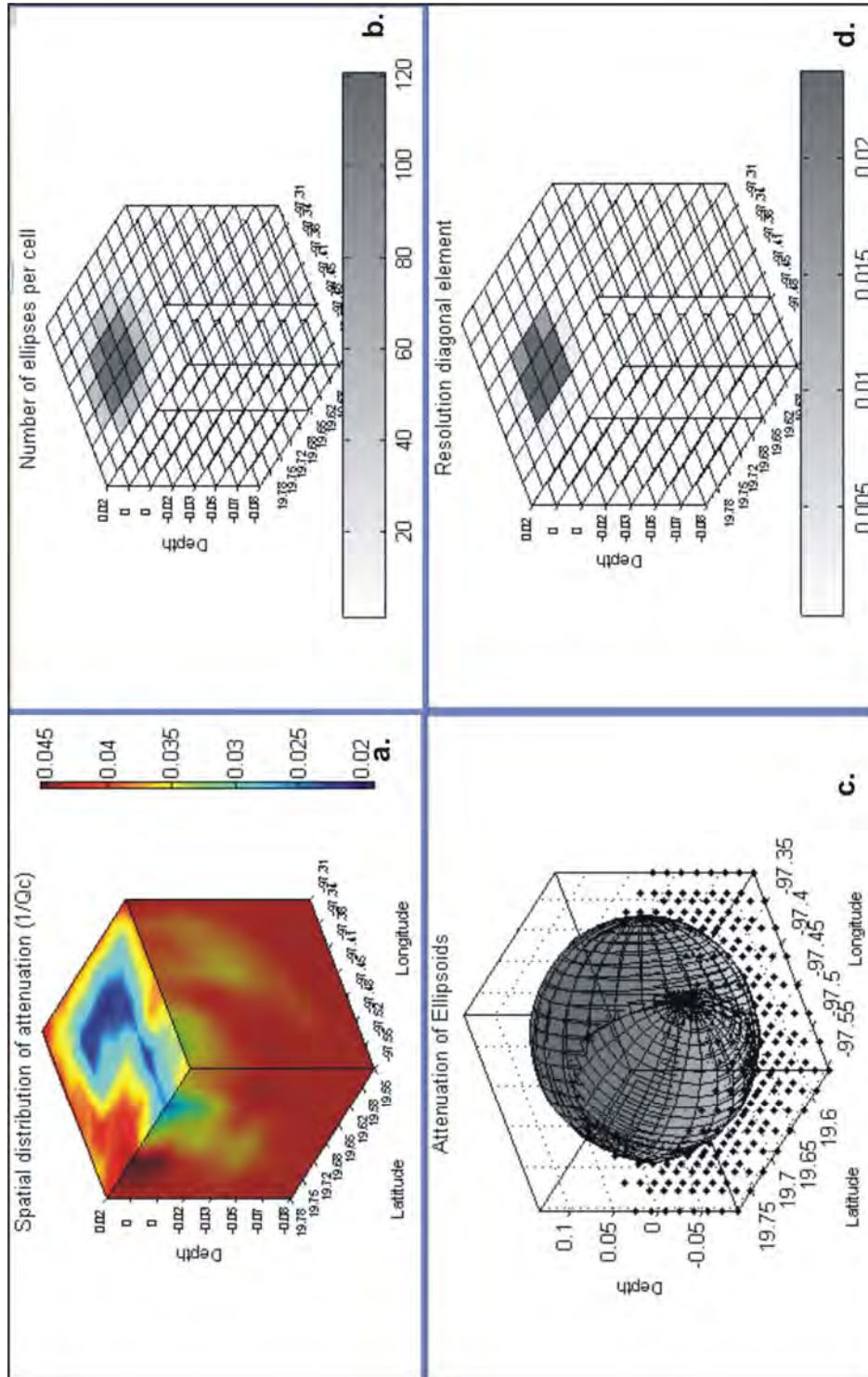


Figura 25. a). Distribución de la atenuación de ondas de coda utilizando la frecuencia de 2 Hz. La profundidad (depth) está dada en grados. b). Representa al número de elipses por celda. c). Atenuación de elipsoides, obsérvese la distorsión de la misma. d). Resolución de la distribución de la atenuación.

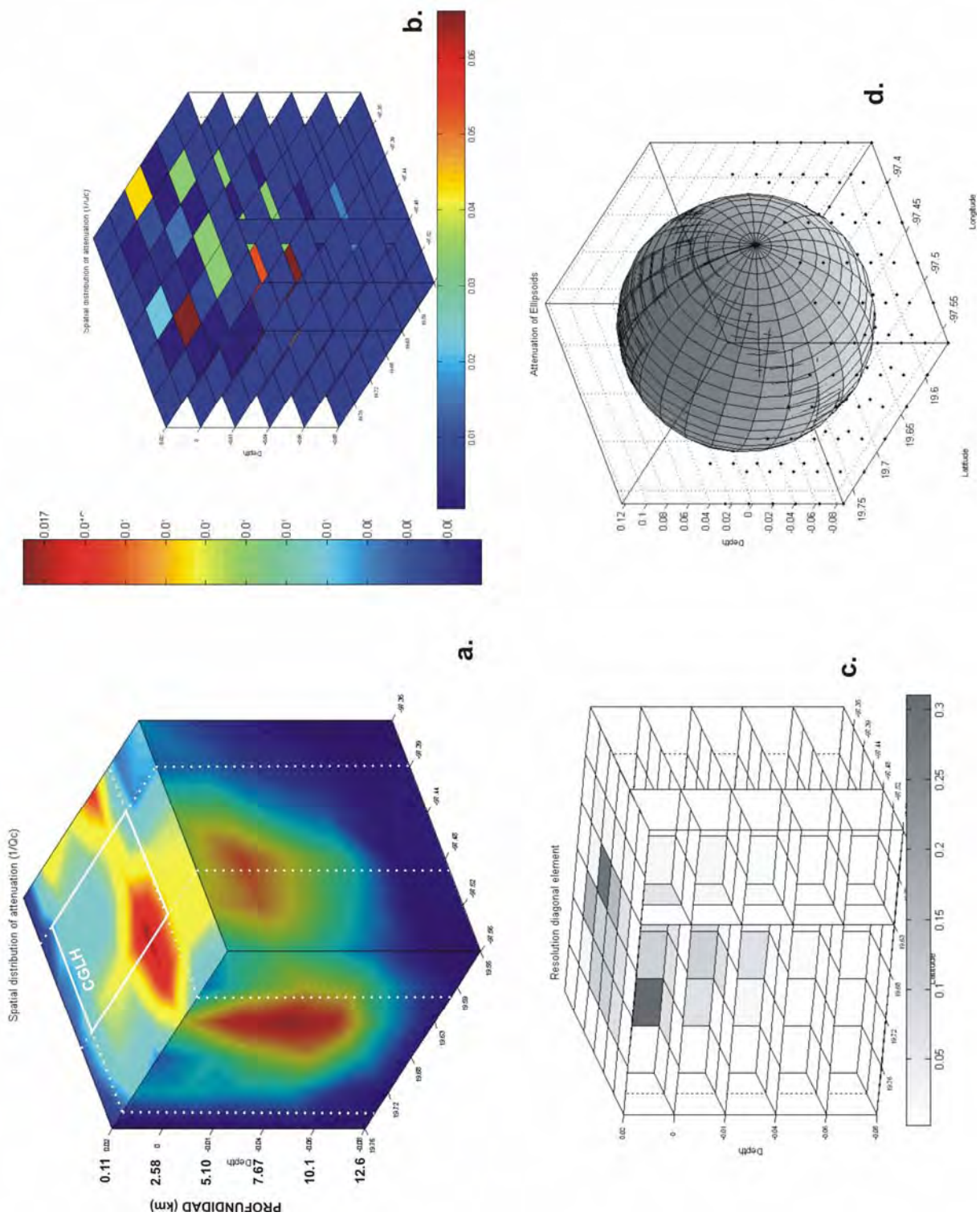


Figura 26. a). Distribución de la atenuación de ondas de coda en el campo geotérmico de Los Humeros. b). Atenuación en cada una de las celdas. c). Atenuación de elipsoides y d). Resolución de la tomografía por atenuación.

5.2.3. Distribución de la Atenuación Sísmica en 2D

A fin de observar detalladamente las anomalías por atenuación en el campo geotérmico, se ha visto por conveniente realizar la representación de las mismas en 2D únicamente para las 3 primeras celdas ubicadas a 0.1, 2.7 y 5.1 km debido a que la máxima resolución de la tomografía alcanza hasta los 5.0 km; asimismo, la zona de explotación geotérmica y la de mayor actividad sísmica se encuentra a profundidades menores a 4.0 km. Así, para su representación se ha utilizado el programa SURFER y el interpolador Kriging (Clark, 1979).

En la Figura 27a, se presenta el mapa geomorfológico del campo geotérmico de Los Humeros y en ella se ha ubicado los pozos productores (flechas blancas) e inyectores (flechas amarillas), los mismos que muestran la zona de explotación geotérmica en la actualidad. Sobre este mapa, se ha sobrepuesto la tomografía de la atenuación sísmica (Q_c^{-1}) para la profundidad de 0.1 km, en ella se observa que para dicha profundidad la atenuación es baja en la zona de explotación (color celeste); mientras que la alta atenuación (color rojo) se ubica en el extremo S y SO del volcán Xalapasco y del campo geotérmico de Los Humeros. A la profundidad de 2.6 km (Figura 27b), anomalías importantes son observados en la zona N, NO y SO del campo. Similar a lo observado en la Figura 26b, en la zona de explotación geotérmica, donde los pozos están representados por círculos amarillos, la atenuación es baja y solamente algunos pozos de la zona norte se encuentran sobre la anomalía de alta atenuación, probablemente esto explique porqué los pozos productores de la zona N tienen mayor producción que los ubicados en la zona S. Cabe señalar que los pozos tanto productores e inyectores no sobrepasan los 2.5 km de profundidad (ver Figura 12). En la Figura 27c a diferencia de la anterior, la distribución de las anomalías a la profundidad de 5.1 km es más intensa en la zona NE, O y SO respectivamente.

En general, la distribución de la atenuación a diferentes profundidades muestra claramente que en la parte central de campo presenta una baja atenuación hasta los 2 km aproximadamente; mientras que a mayor profundidad la atenuación es mayor. Tal como se mostró en las figuras anteriores, esta zona de alta atenuación sobrepasa el límite de explotación actual del campo geotérmico de Los Humeros.

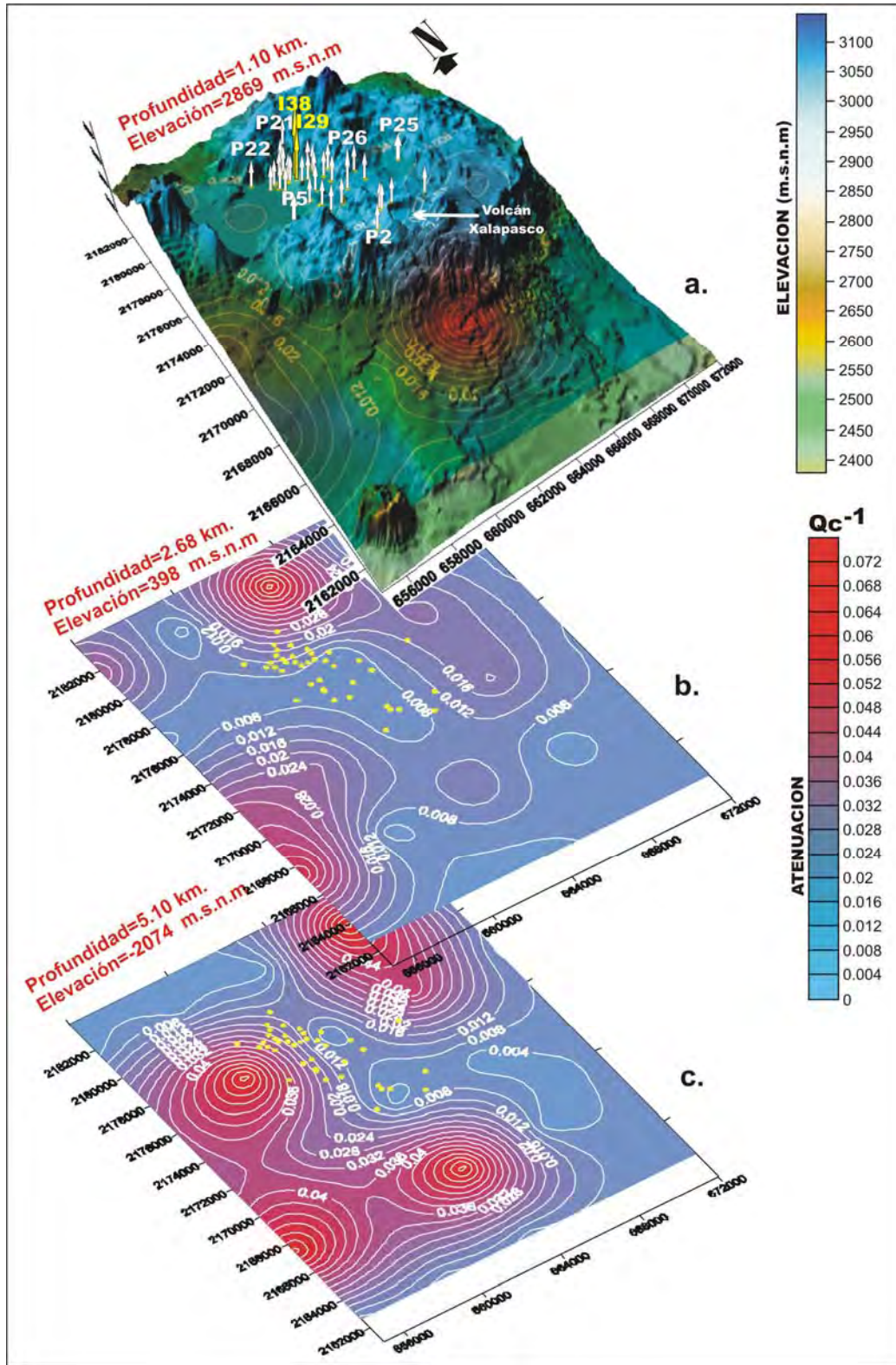


Figura 27. Distribución de la atenuación de ondas de coda en 2D en el campo geotérmico de Los Hornos. a). A una profundidad de 1.1 km. b). A los 2.6 km y c). Hasta los 5.10 km.

CAPÍTULO 6

DISCUSIÓN DE RESULTADOS

A través de los años, la sismología se ha constituido como una de las herramientas importantes en el estudio de las Ciencias de la Tierra, y la complejidad de la estructura terrestre ha sido bien explicada por medio de ella. Evidentemente, el estudio de los sismos a nivel mundial, regional y local se ha convertido en tarea constante para los sismólogos y demás investigadores involucrados en este campo. Se conoce desde tiempos remotos que la ocurrencia de sismos así como las erupciones volcánicas, generó en algunos casos, enormes pérdidas humanas y económicas. Sin embargo, la ocurrencia de los mismos también han generado recursos naturales en bien de la humanidad.

Los recursos geotérmicos, forma parte de este conjunto de riquezas que brinda la naturaleza. En México y varios países del mundo han permitido que numerosas familias cuenten con energía eléctrica económicamente rentable, además de otros usos adicionales. En general, los campos geotérmicos en México se encuentran ubicados en zonas volcánicas (Los Humeros, Los Azufres y Las Tres Vírgenes) y sobre fallas activas (Cerro Prieto). Particularmente, el campo geotérmico de Los Humeros, se encuentra ubicado dentro de una caldera volcánica. Esta caldera fue formada después de una erupción violenta, lo que habría ocasionado el colapso de la misma debido al vaciado parcial de la cámara magmática (Arellano et al., 2000). Los estudios geológicos, geofísicos y geoquímicos, llevados a cabo por la Comisión Federal de Electricidad (CFE) mostraron que este ambiente tectónico era propicio para explotar el recurso geotérmico. Dentro de estos estudios, fue considerado también el sísmico.

6.1. SISMICIDAD

El primer estudio sísmico en Los Humeros fue llevado a cabo por Ponce y Rodríguez. (1977) a fin de conocer la actividad sísmica ocurrida en el campo antes de la perforación del primer pozo exploratorio (1982). La red sísmica instalada por Ponce y Rodríguez. (1977) estuvo conformada por 3 estaciones Sprengnether MEQ-800 portátiles que operaron durante 12 días del mes de enero de 1977 (12 al 24). Durante los 12 días, fueron moviéndose de lugar conforme se observaba la evolución sísmica; sin embargo los resultados no fueron alentadores, pues solamente registraron 7 sismos locales (Figura 28a) la localización hipocentral de 3 de

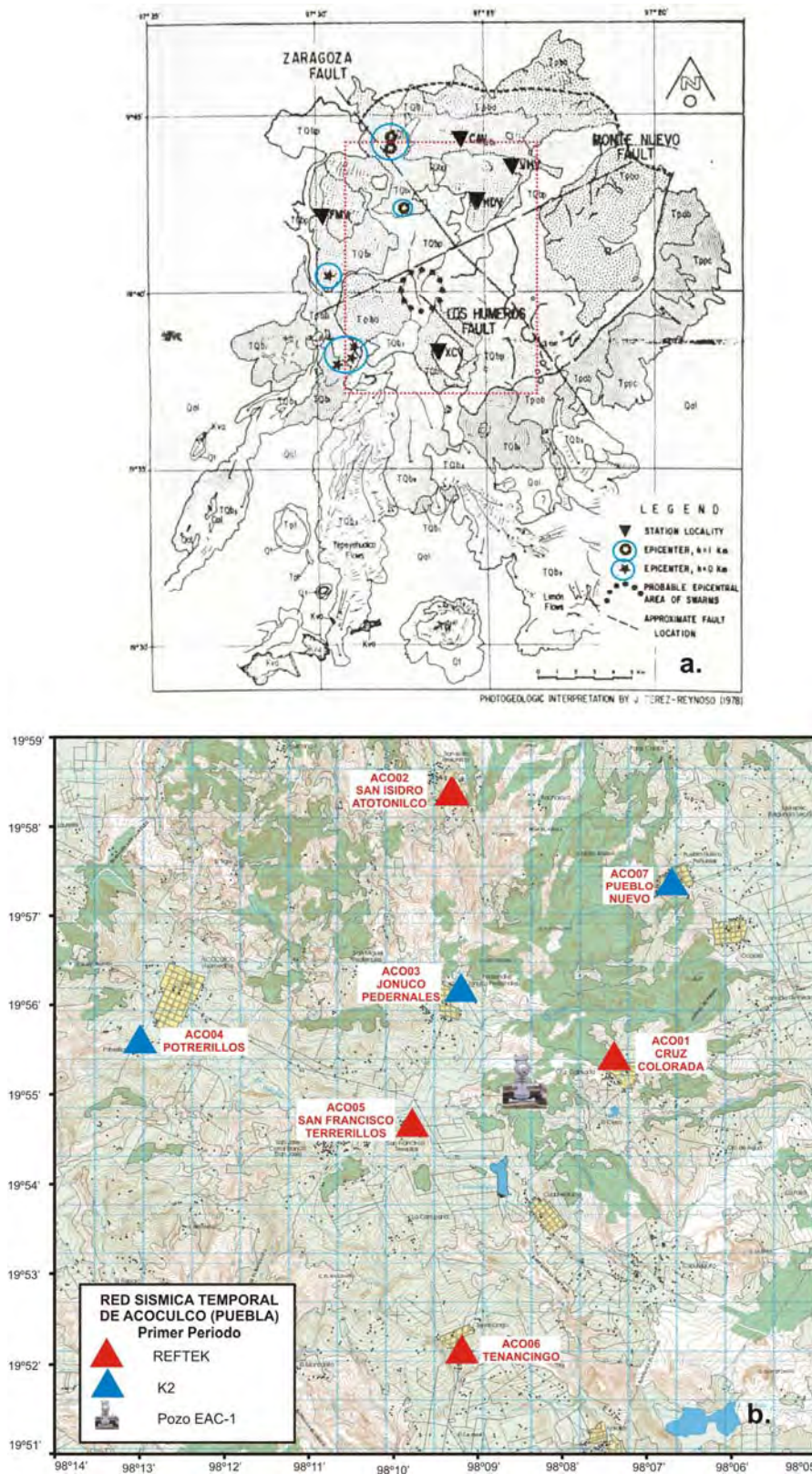


Figura 28. Estudios sísmicos realizados antes de la explotación de los campos geotérmicos de: a). Los Humeros (Ponce y Rodríguez., 1977) y b). Acozulco (Lermo et al., 2004).

ellas fue realizada utilizando la diferencia de tiempos de arribo de las ondas P y S ($T_s - T_p$) y suponiendo una velocidad de onda P de 2.5 km/s y que estos sismos ocurren a 1 km de profundidad. En cuanto a los 4 restantes, consideraron para su localización el tiempo de arribo de la máxima amplitud de las ondas superficiales y que éstos ocurren a 0 km. Los resultados muestran que los sismos se localizan en los extremos NE y SO del campo geotérmico (cuadro rojo discontinuo) y solamente un sismo fue localizado en la parte central. Evidentemente, las suposiciones interpuestas para su localización podrían inducir a errores considerables, sin embargo lo que se observa, en general, es que la sismicidad dentro del campo es mínima.

Por otro lado, estudios de sismicidad en el campo geotérmico de Acoculco (Puebla), durante su etapa exploratoria, fueron llevados a cabo por Lermo et al. (2004). En la Figura 28b se presenta el área monitoreada con 7 estaciones sismológicas, las cuales estuvieron constituidos por un registrador digital de 24 bits (Reftek y Kinematics), sismómetros de banda ancha y 3 acelerómetros (Guralp y Episensor). Las estaciones estuvieron operativas durante 4 meses (agosto a noviembre del 2004). Aún cuando este campo se encuentra en su etapa exploratoria, la perforación del pozo EAC-1 permitió concluir que su explotación es factible; sin embargo, no se tenía conocimiento si había actividad sísmica o no. Los resultados obtenidos del monitoreo de 4 meses con estaciones de alta sensibilidad y buena cobertura azimutal, permitió responder a la pregunta: *en este campo no se registró ningún sismo local relacionado a movimiento de fluidos o de tipo tectónico local*. Los sismos registrados correspondían solamente a los originados en el Cinturón Volcánico Mexicano (CVM). Por tanto, el campo geotérmico de Acoculco antes de su explotación, permanece como una zona estable con una ausencia total de sismos locales.

En el presente estudio, antes de la localización hipocentral de los sismos ocurridos en el campo geotérmico de Los Humeros durante el periodo diciembre 1997 a diciembre 2004, se realizó la curva de Wadati a fin de conocer la relación de velocidades (V_p/V_s). Tal como se presentó en la Figura 8, el análisis fue realizado año por año, observándose que para el mes de diciembre de 1997 (inicio de operación de la red sísmica), la relación V_p/V_s fue de 1.83, posteriormente estos valores fluctuaron entre 1.73 a 1.76 y 1.77 respectivamente y el valor alto de V_p/V_s no volvió a repetirse aún cuando se analizaron los primeros 3 meses de 1998, así como todos los meses de diciembre de cada año. Valores bajos y altos de V_p/V_s fueron observados también por Wong y Munguía (2006) en el campo geotérmico de Las Tres Vírgenes (1.68 y 1.76). De acuerdo a los resultados obtenidos de su análisis, los autores sugieren que los valores bajos podrían estar asociados a la heterogeneidad estratigráfica de la zona de estudio y los valores altos con la saturación de agua en el subsuelo, coincidiendo con el estudio realizado por Rebollar et al. (2003) en la región geotérmica de Cerro Prieto (Baja California). Similares resultados fueron obtenidos por Gunasekera et al. (2003), en los estudios de sismicidad realizados en la zona geotérmica de Carolina (Estados Unidos) donde los valores V_p/V_s fluctuaron de 1.65 a 1.81. Asimismo, Gunasekera et al. (2003) enfatiza también que los valores altos se encuentran principalmente en la zona de producción y los bajos en la periferie de ella. Por tanto, se considera que en Los Humeros podría estar ocurriendo una situación similar a lo observado en otros campos geotérmicos; es decir, los valores de 1.73 a 1.77 obtenidos en el estudio podrían estar asociados a circulación de fluidos a través de las heterogeneidades del subsuelo y el valor anómalo de 1.83 probablemente estarían asociados a la puesta en operación del pozo inyector I38 el 27 de diciembre de 1997,

puesto que se está modificando el estado natural del subsuelo del campo geotérmico al realizar la inyección y la posterior explotación.

La intensa actividad sísmica registrada desde diciembre de 1997 hasta diciembre del 2004, permitió localizar numerosos sismos con magnitudes $M_d \leq 3.6$ y profundidades menores a 4 km en el campo geotérmico Los Humeros. Si se comparan los resultados sísmicos obtenidos por Ponce y Rodríguez (1997), antes del inicio de la explotación del campo geotérmico de Los Humeros y de Aocolco (Lermo et al., 2004), con el análisis sísmico durante la explotación realizada en este estudio (Figura 29a), evidentemente la situación estable se revierte a una más dinámica, observándose así, una intensa actividad sísmica desde el primer día de operatividad de la red sísmica de Los Humeros (diciembre de 1997).

La distribución de sismos en superficie y en profundidad muestran también un agrupamiento importante en la ZN, específicamente alrededor de los pozos inyectoros (I29, I38). A la profundidad a la que ocurren estos sismos muestran que el fracturamiento o microfracturamiento importante estaría ocurriendo entre los 1.8 hasta 4 km de profundidad, debido a los cambios físicos y químicos que sufre el yacimiento al inyectar y explotar el vapor de agua (presión, temperatura, cambios en la composición química entre fluidos de superficie y profundos). Similares resultados fueron obtenidos en la estimulación ácida de dos pozos (LV-4 y LV-13) realizada en Tres Vírgenes, BCS y son mostrados en la Figura 29b (Lermo et al., 2004). Esta particularidad, fue observada también por Rutledge et al. (2004) donde indujeron un fallamiento con la inyección de fluidos (gel propano y agua) desde la superficie en un campo de gas ubicado en el valle de Carthage Cotton, Texas (Estados Unidos). La presión ejercida por la inyección de los dos fluidos al subsuelo generó el fallamiento y por ende una intensa actividad sísmica (Figura 29c). Otro ejemplo de sismicidad inducida por inyección (presión) es observado por Ake, et al. (2005) en el valle Paradox, Colorado (Estados Unidos) en donde se extrae agua del subsuelo con fines comerciales (Figura 29d). Si bien es cierto la zona ya presentaba sismicidad durante todo el tiempo, Ake et al. (2005) mostró que al inyectar mayor presión al subsuelo, el índice de sismicidad aumentaba considerablemente alrededor del pozo inyector. En la Figura 29e, se presenta el estudio realizado por Tang et al. (2005) en el campo geotérmico de Krafla, donde se puede observar claramente sismicidad relacionada a la inyección del pozo K26.

Por lo tanto, las características de la sismicidad del campo geotérmico de Los Humeros se resumen en lo siguiente:

- 1.- La actividad sísmica del campo geotérmico de Los Humeros inició cuando entró en operación el primer pozo inyector (I29) en agosto de 1993, ocurriendo posteriormente el sismo de magnitud moderada (4.6 M_d) el 25 de noviembre de 1994.
- 2.- El análisis de la relación de velocidades (V_p/V_s) presenta valores entre 1.73 a 1.77; mientras que el valor anómalo de 1.82 observado en diciembre de 1997 podría estar asociado a la puesta en operación del segundo pozo inyector I38 el 27 de diciembre del mismo año.
- 3.- La localización hipocentral de los sismos en el campo geotérmico de Los Humeros presentan magnitudes pequeñas ($M_d \leq 3.6$) y profundidades menores a 4 km.

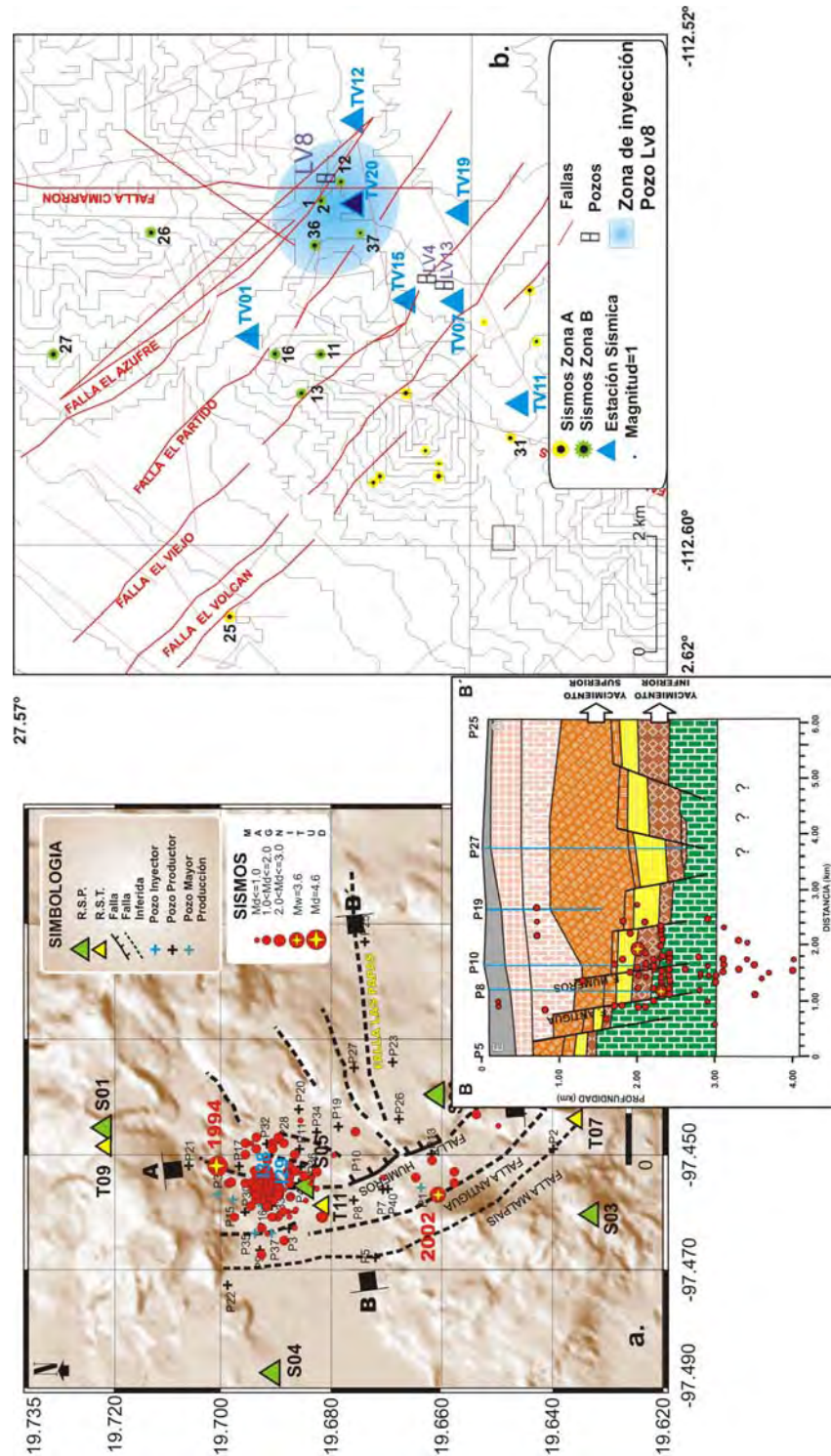
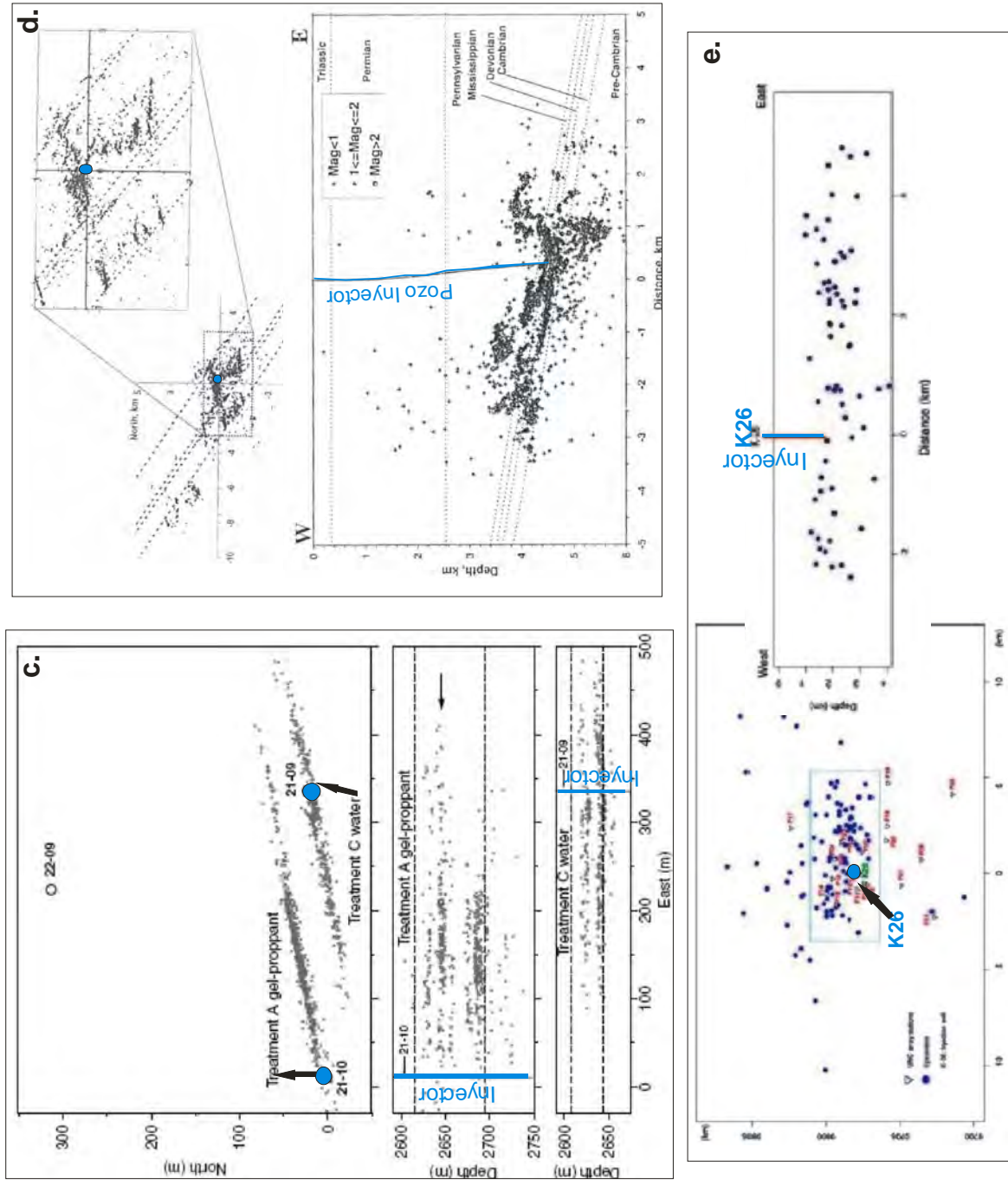


Figura 29. Sismicidad durante la explotación del campo geotérmico de: a). Los Humeros (este estudio), b). Las Tres Virgenes, BCS (Lermo et al., 2004), c). Carthage Cotton Valley, Texas (Rutledge et al., 2004), d). Paradox Valley, Colorado (Ake et al., 2005) y e). Krafla (Tang et al., 2005).

Figura 29. Continuación.....



4.- La distribución de la sismicidad en superficie y en profundidad es básicamente alrededor de los pozos inyectores (I29, I38) y sobre la traza de la falla Los Humeros, hasta una profundidad máxima de 4 km.

5.- La distribución de la sismicidad en superficie y en profundidad, sugiere un intenso fracturamiento y/o microfracturamiento entre los 1.8 hasta 4 km de profundidad, debido a los cambios de presión, temperatura y composición química entre fluidos inyectados y/o reinyectados desde la superficie hacia los yacimientos geotérmicos y su posterior explotación del vapor de agua.

6.2. MECANISMOS FOCALES SIMPLES Y DE TENSOR DE MOMENTO

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 y dilatacionales (ver Figura 13). Esta característica permitió sugerir que el esfuerzo generado en el campo podría tener una fuente diferente para los de tipo compresional y dilatacional. Por tal razón, los mecanismos focales simples y de tensor de momento fueron analizados considerando esta particularidad.

La Figura 30a, muestra los mecanismos focales simples (lado izquierdo de cada cuadro) y de tensor de momento (lado derecho) obtenidos en el campo geotérmico de Los Humeros. Tal como se puede observar en la figura, ambos mecanismos no son exactamente iguales, como debía esperarse pues se trata del mismo sismo. Las pequeñas diferencias observadas en ambos mecanismos se deben básicamente a la metodología y al número de estaciones utilizadas para obtener los mecanismos; sin embargo, de los 4 sismos presentados en la Figura 30a, 3 de ellos presentan mecanismos similares (4, 61, 79) a excepción del sismo 72, donde el mecanismo de tensor de momento es de tipo inverso y el mecanismo focal simple es de tipo transcurrente, probablemente debido a la ubicación de las estaciones donde se observó la polaridad de la onda P, pues todas se concentran principalmente en un solo cuadrante (ver Figura 14). En la figura, aunque 3 de los 4 se han registrado con polaridad C los mecanismos son de tipo transcurrente lateral derecho (4), inversa con una pequeña componente de transcurrencia (61) y transcurrente lateral izquierdo (72). Para el caso de los dilatacionales se observaron similares características. Analizando los 34 mecanismos de tensor de momento mostrados en la Figura 15 y Anexo 2, la mayoría de mecanismos son de tipo transcurrente lateral derecho e izquierdo y algunos de tipo normal e inverso pero con pequeñas componentes de transcurrencia. Por otro lado, Rutledge et al. (2004), en el estudio realizado en el campo de gas de Carthage Cotton, Texas, observó el cambio de polaridad de la onda P en la estación 2-33 (Figura 30b, inferior) y en los resultados de los mecanismos focales compuestos ocurrieron básicamente fallamientos de transcurrencia lateral derecho e izquierdo (Figura 30b, superior). Estos mecanismos observados en el campo de gas (Rutledge et al., 2004) y en Los Humeros muestran la existencia de una heterogeneidad de esfuerzos, aunque con un ligero predominio de los fallamientos de transcurrencia, probablemente producto de la inyección de agua al yacimiento geotérmico y la posterior explotación del vapor, por lo que un alto porcentaje de estos sismos son “*inducidos*”, obviamente no se descarta que algunos sismos tengan un origen netamente tectónico. De hecho, el diagrama de rosas mostrado en la Figura

18, evidencia una combinación de esfuerzos locales y regionales. Así, el esfuerzo máximo principal, orientado en dirección NE-SO (N60°E a S240°O) podría estar asociado principalmente a esfuerzos locales (compresivos), como los observados en las diferentes zonas del CVM (Ferrari et al., 1994b; Suter et al., 1997; García-Palomo, 2002); mientras que la orientación del esfuerzo mínimo principal orientado en dirección NNE-SSE (N10°E a S181°O y N30°E a S193°O) es similar a la orientación del esfuerzo regional de la parte central del CMV (Suter, 1991; García-Palomo, 2002).

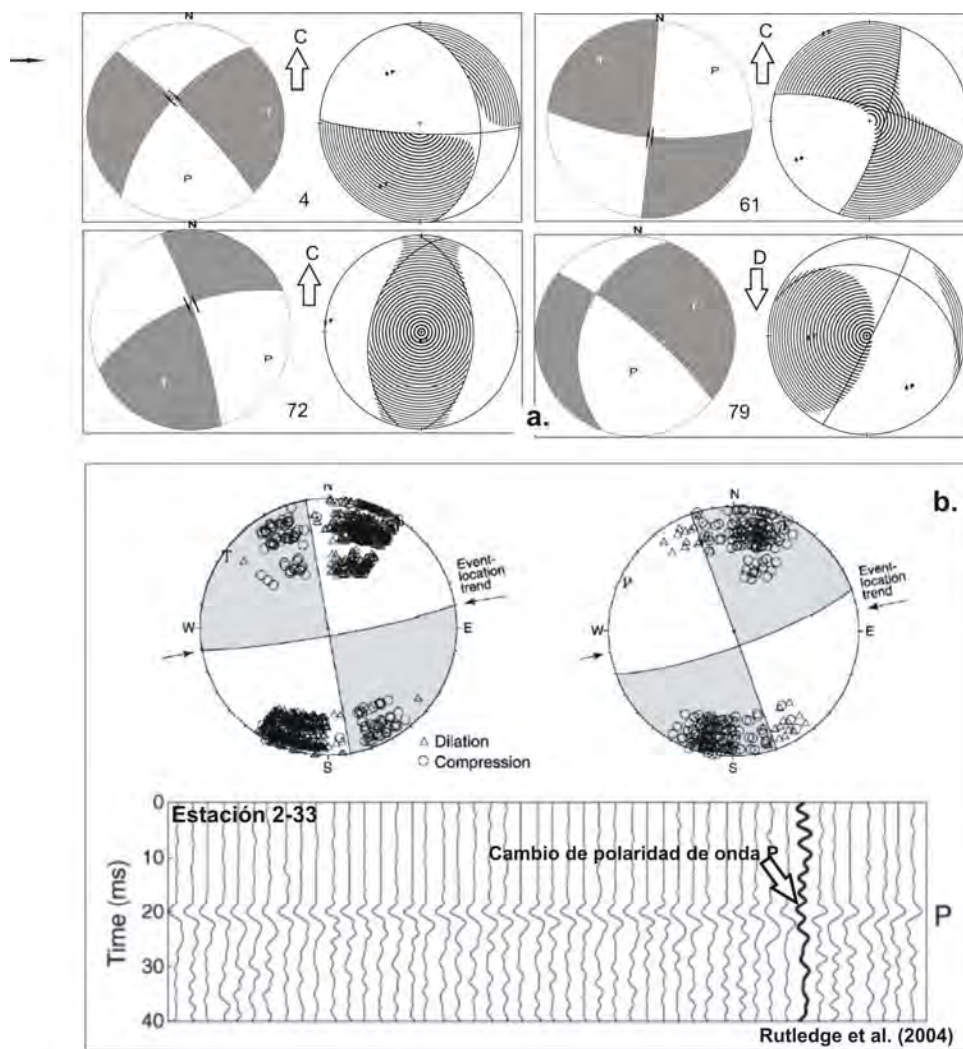


Figura 30. a). Mecanismos focales simples (lado izquierdo de cada cuadro) y de tensor de momento (lado derecho de cada cuadro) para 4 sismos mejor localizados en este estudio. Las flechas indican la dirección de la polaridad de la onda P en la estación S05. b). En la parte superior se muestran los mecanismos focales compuestos obtenidos por Rutledge et al. (2004) y en la parte inferior el cambio de la polaridad de la onda P en la estación 2-33.

En general, los estudios realizados por Wong et al. (2006), en el campo geotérmico de Las Tres Vírgenes (BCS), Arámbula y Valdés (2005) en el volcán Popocatepetl y este estudio, muestran que el esfuerzo mínimo principal (extensivo), coincide con el régimen tectónico regional del CVM.

Asimismo, la particularidad observada en la rotación de los esfuerzos representados por círculos discontinuos en color café y azul (ver Figura 17), corresponden a mecanismos de tipo inverso, normal, transcurrente (lateral derecho e izquierdo) y se encuentran circundando el agrupamiento de sismos. Esta característica, podría sugerir el límite de ocurrencia de sismos ya que en esta zona se ubican los pozos inyectoros; mientras que los alrededores aparentemente permanecen estables, aún cuando los pozos productores se ubican fuera de la zona de mayor actividad sísmica.

6.3. SISMICIDAD, POZOS INYECTORES Y PRODUCTORES

El análisis en superficie y en profundidad de los sismos ocurridos en Los Humeros durante el periodo diciembre 1997 a diciembre 2004, donde se observa que la acumulación de los sismos ocurre principalmente alrededor de la estación S05 y de los pozos inyectoros I29 e I38, permite sugerir la probable relación entre esta sismicidad y la cantidad de inyección y/o reinyección de agua al yacimiento geotérmico. Es así, que en la Figura 31a se graficó el número de sismos por mes (N° sismos/mes) registrados únicamente en la estación S05 (la más cercana al agrupamiento sísmico y operativa durante el periodo de estudio) y la cantidad de inyección (Tn/mes). Evidentemente los resultados muestran una estrecha relación entre ellos; es decir, el aumento o la disminución en el número de sismos dependen básicamente de la cantidad de inyección y/o reinyección. En la Figura 31a (señalada con flechas blancas), se enumeran y analizan los principales eventos ocurridos durante el periodo de estudio:

- 1:** El 15 de junio de 1999 ocurrió el sismo de Tehuacán ($M_w=7.0$) a una profundidad de 60 km y una distancia de 100 km aproximadamente del campo geotérmico. Este sismo causó daños materiales especialmente en construcciones coloniales en la ciudad de Puebla.
- 2:** El aumento considerable de sismicidad se observa a partir de septiembre de 1999 y coincide con el aumento de la cantidad de inyección en el pozo I29.
- 3:** El 21 de enero del 2002, ocurre un sismo de magnitud $M_w=3.6$ y profundidad superficial (2.0 km) en el campo geotérmico de Los Humeros.
- 4:** En enero de 2003, el incremento de inyección en I29 ocasiona nuevamente un relativo aumento de sismos.
- 5:** En noviembre de 2003, disminuye la inyección en I29 e incrementó en I38.
- 6:** El pozo I29 queda inoperativo en marzo del 2004 e I38 continúa operando. El número de sismos aumenta.

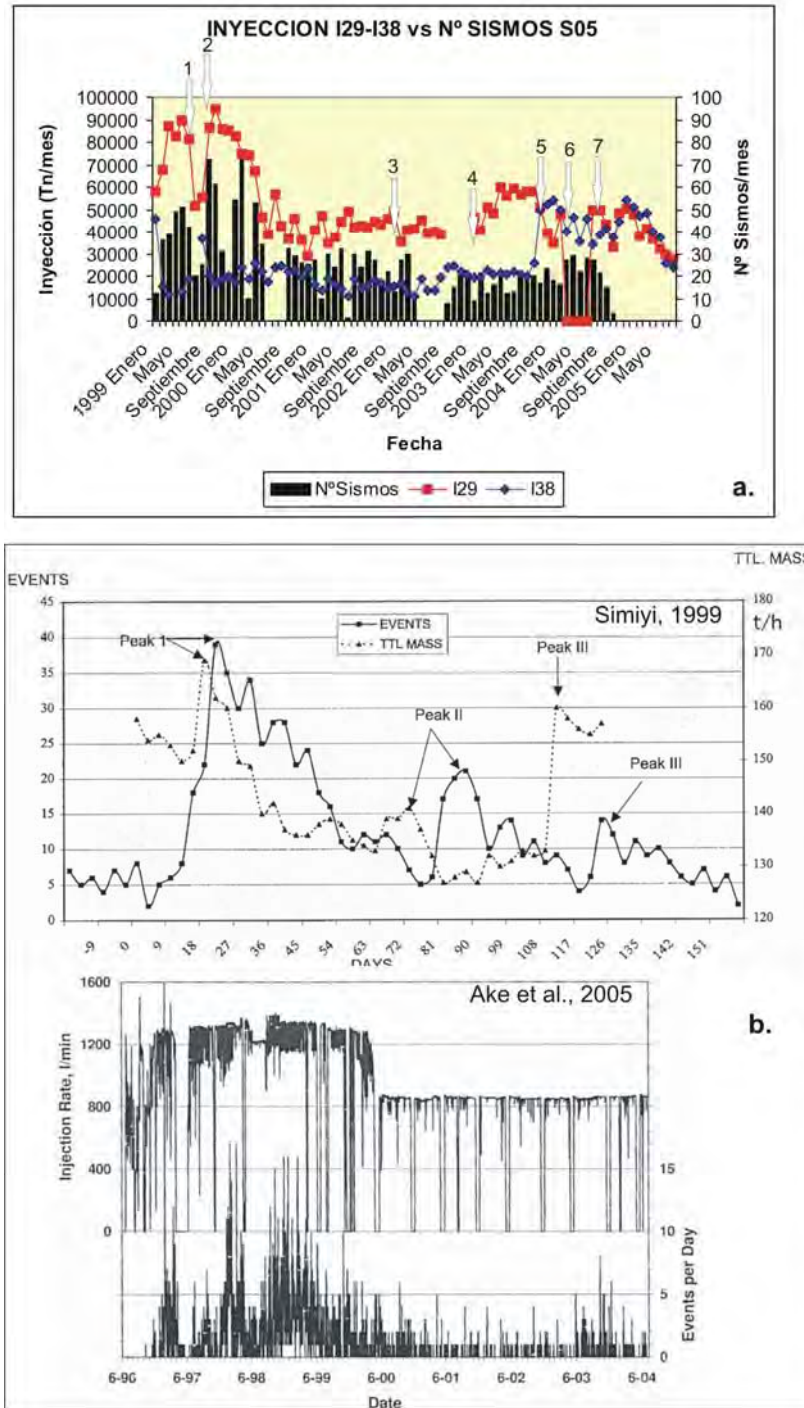


Figura 31. a). Sismos registrados en la estación S05, su relación con la inyección y principales eventos ocurridos durante el periodo de estudio. Las flechas y números indican los principales eventos ocurridos durante el periodo de estudio. b). Ejemplos de la relación entre el números de sismos (sismos por día) y la inyección en toneladas por hora (t/h) y litros por minuto (l/min) realizados por Simiyi (1999) y Ake et al. (2005) respectivamente.

7: En junio del 2004, nuevamente entra en operación el pozo I29 con niveles de inyección similares a I38.

El análisis de los principales eventos de la Figura 31a, permite ver que durante el periodo de estudio ocurrieron 2 sismos importantes: uno regional (1) y otro local (2). La importancia del sismo de Tehuacán radica en su magnitud y la profundidad a la que ocurrió. Estudios realizados por Hill (1993), Hill et al. (1995) y Linde et al. (1994) sugieren que sismos de magnitud comparada con el de Tehuacán pueden inducir la ocurrencia de sismos en zonas volcánicas y geotérmicas, ejemplos de ello son los sismos de Landers ($M_w=7.1$) y Hector Mine ($M_w=7.4$). Estos sismos indujeron microsismicidad en el valle Imperial de California (Hill, 1993; Hill et al., 1995); así como el sismo de Izmit en Turquía ($M_w=7.4$) que indujo sismicidad en áreas con actividad geotermal. Sin embargo Linde et al. (1994), puntualizan que ésta característica no siempre es recurrente; asimismo, sugiere que la microsismicidad inducida por sismos de magnitud grande en zonas volcánicas y geotérmicas ocurren probablemente a la “sacudida” que sufre el sistema como consecuencia del paso de las ondas sísmicas. En el estudio, el efecto del sismo de Tehuacán en el campo geotérmico de Los Humeros no está muy claro, pues ésta ocurre el 15 de junio de 1999 y el incremento de sismicidad se observa principalmente a partir de septiembre del mismo año; sin embargo, éste sismo sí afectó al volcán Popocatepetl ya que 23 horas después de ocurrido el sismo, la actividad sísmica principalmente volcano-tectónica y la emisión de gases (CO_2) del volcán se incrementó considerablemente (Pérez-Campos, 2001). Por otro lado, el sismo local del 21 de enero del 2002 ocurrido en la ZS del campo aparentemente no ocasionó cambios en la sismicidad de la ZN.

Resultados similares de la correlación entre cantidad de inyección y número de sismos en Los Humeros, son observados también por Simiyi (1999) en el rift de Olkaria-Kenia, Gupta (2002) en Koyna-India, Rutledge et al. (2003) en Carthage Cotton Valley-Texas y Ake et al. (2005) en Paradox Valley-California. En la Figura 31b, se muestra 2 ejemplos de la relación sismos versus inyección observados en el rift de Olkaria (Figura 31b, superior) y Paradox Valley (Figura 31b, inferior).

El análisis de los pozos de mayor producción con los sismos registrados en la estación S06 es presentado en la Figura 32. Tal como se describió en el Capítulo 4, son 8 los pozos que aumentaron su producción. La correlación de la producción con el número de sismos mostrado en la Figura 32a, presenta 4 eventos principales:

- 1:** Ocurre el sismo de Tehuacán y un aumento en el número de sismos se observa en junio, julio y agosto. La producción también tiene un ligero aumento en los pozos P1 y P9.
- 2:** La ocurrencia del sismo del 21 de enero del 2002 en la ZS, probablemente condiciona el ligero incremento de producción en marzo del mismo año.

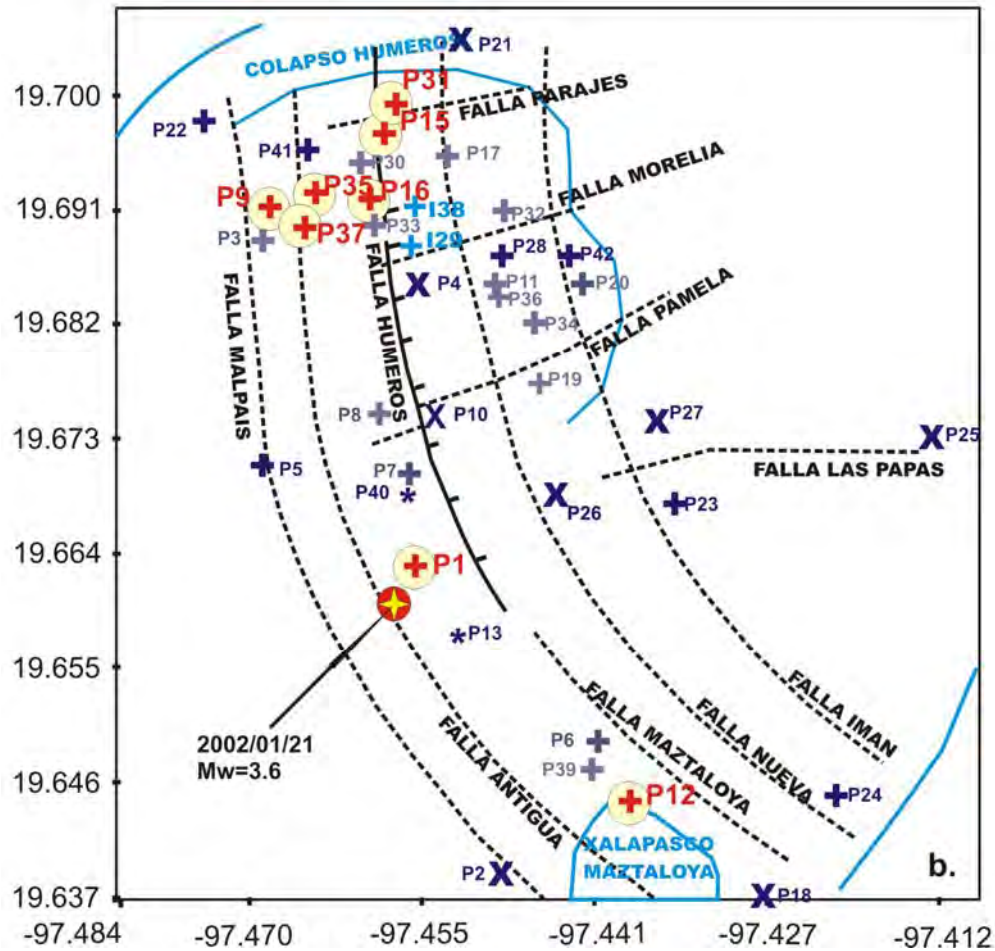
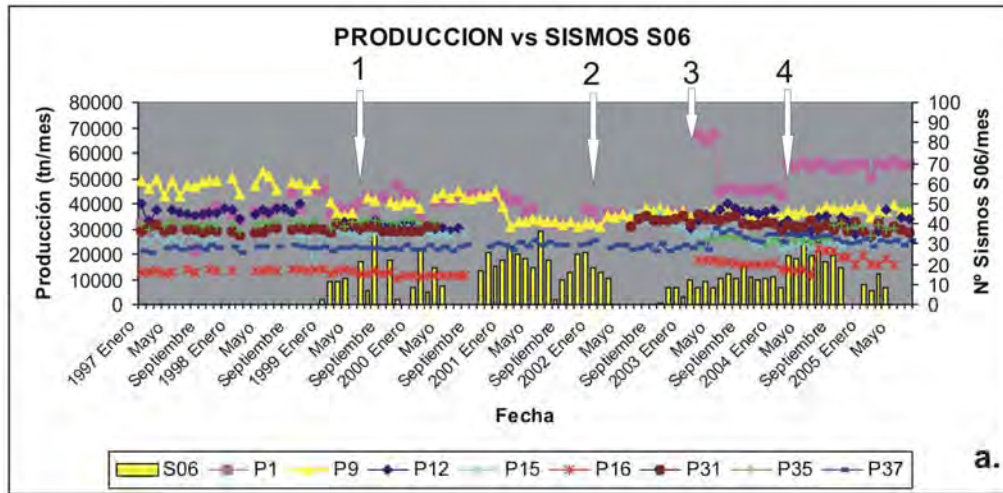


Figura 32. a). Relación de los pozos de mayor producción con los sismos registrados en la estación S06, las flechas y números indican los principales eventos ocurridos durante el periodo de estudio y b). Distribución de los pozos de mayor producción en el campo geotérmico de Los Humeros.

3: En febrero del 2003 se observa un incremento importante en la producción, especialmente en P1, P9 y P12; en tanto que el número de sismos se incrementa paulatinamente.

4: En marzo del 2004, tanto en S05 (ZN) y S06 (ZS), aumenta el número de sismos; mientras que el incremento de la producción es evidente en todos los pozos.

Tal como se observa en la Figura 32a, el incremento en la producción de vapor, podría estar asociado a la ocurrencia del sismo del 21 de enero del 2002 ($M_w=3.6$), debido a que el ligero aumento se inicia en marzo del mismo año; es decir, 2 meses después de ocurrido el segundo sismo de magnitud moderada. El origen del sismo del 21 de enero del 2002 aún es tema de discusión; sin embargo, el modelo conjunto de circulación de fluidos y anomalías locales de temperatura (Figura 33) proporcionados por CFE podría explicar su origen. Según el modelo, existen 3 anomalías de temperatura, el primero ubicado al N del campo entre los pozos inyectores I29 e I38 y el fluido geotérmico circularía hacia el S por las principales fallas: Nueva, Humeros, Antigua y Malpais. La segunda anomalía de menor tamaño, se ubica al E del campo, en tanto que el agua meteórica fluiría por la falla Las Papas en dirección E-O. En el Sur del campo (colapso Maztaloya) se ubica la tercera anomalía, el aporte de fluido geotérmico de la misma fluiría a través de las fallas Maztaloya, Antigua y Malpais en dirección N. Probablemente los esfuerzos generados por la circulación de los fluidos geotérmicos desde distintas direcciones y que aparentemente intersecan en un punto común (zona central del campo) podría ser el origen del sismo del 2002, ya que precisamente en esta zona ocurrió el sismo mencionado. Este sismo, a su vez, podría haber ocasionado la apertura de nuevas fracturas por las cuales los fluidos circularían libremente tanto de N a S y viceversa; es posible que este proceso haya permitido el incremento de la producción de vapor en los 8 pozos, en especial el pozo P1 (que presenta el mayor aumento en la producción) también se encuentra en la zona de intersección de la circulación de fluidos y la zona epicentral del sismo del 2002. Con respecto a los pozos P12, P15, P16 y P31, éstos se encuentran cerca de la falla Los Humeros y Maztaloya; mientras que, P9, P35 y P37 sobre la falla Antigua (Figura 32b).

Por lo tanto:

- 1.- Los cambios bruscos en la inyección de agua al yacimiento geotérmico induce el incremento o disminución de la sismicidad.
- 2.- El origen del sismo del 21 de enero del 2002 podría estar asociado al esfuerzo generado por la circulación e intersección de los fluidos en un punto común (zona epicentral del sismo).

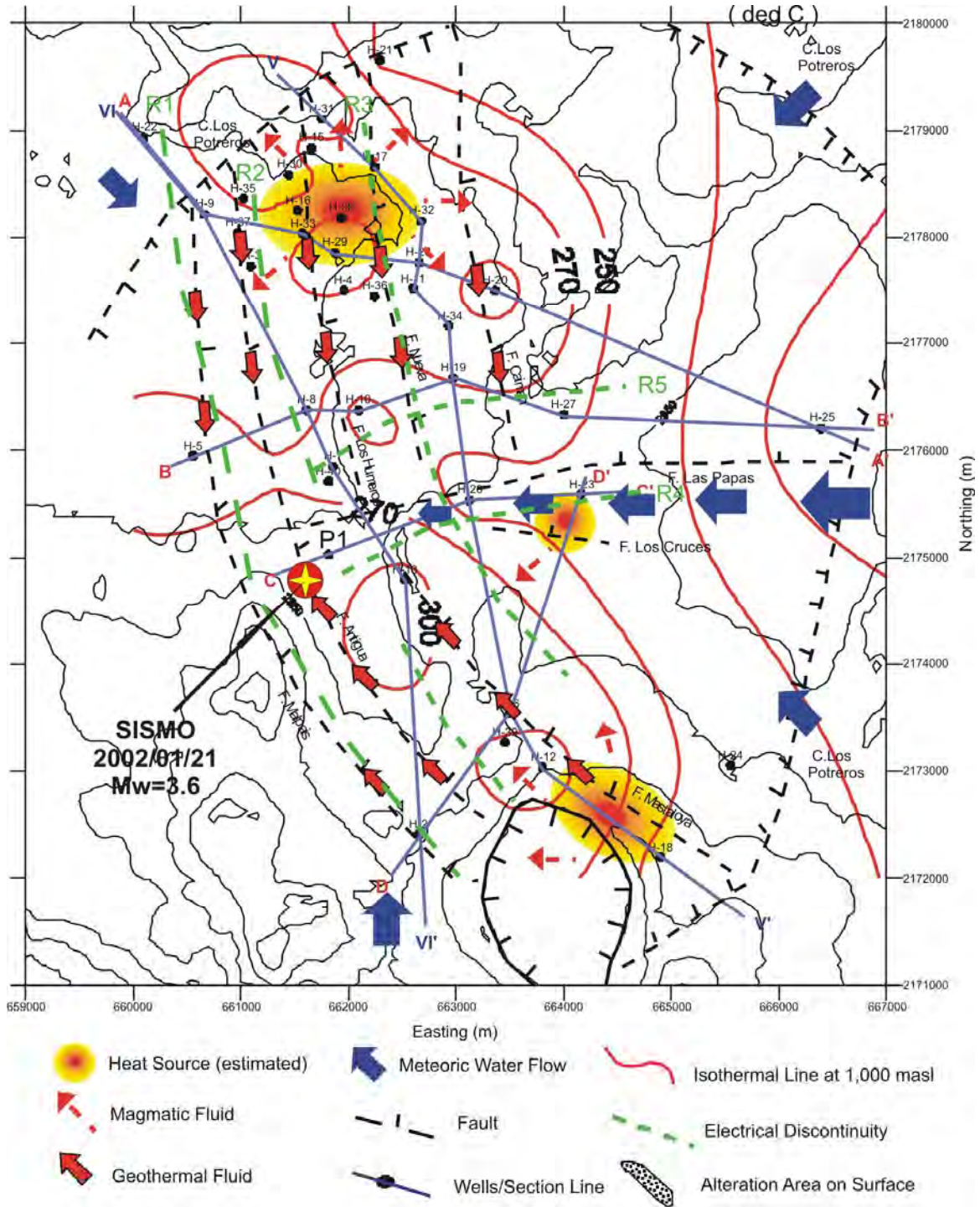


Figura 33. Modelo conceptual de Los Humeros proporcionado por comisión Federal de Electricidad (CFE). Las flechas indican la dirección de la circulación de los fluidos geotérmicos y las fuentes de calor.

6.4. TOMOGRAFÍA SÍSMICA POR ATENUACIÓN

Estudios del factor de calidad Q_c y la atenuación de las ondas de coda Q_c^{-1} han sido llevados a cabo en diferentes partes del mundo. Aki (1969), Fehler et al. (1992), O'Doherty et al. (1997) entre otros, consideran que las variaciones de Q_c con la frecuencia pueden ser producidos por diferentes mecanismos y que la dispersión de la energía depende de la geología y tectónica de la zona en estudio.

Algunos estudios del factor de calidad Q_c y la atenuación de las ondas de coda Q_c^{-1} realizados en zonas volcánicas con presencia de actividad geotérmica como el Etna, Kilauea, Monte Santa Elena, la caldera Long Valley, así como el volcán Popocatepetl, fueron llevados a cabo por Del Pezzo et al. (1976), Chouet (1986), Havskov et al. (1989), O'Doherty y Bean (1997), Shapiro et al. (2000) y Novelo-Casanova et al. (2005) respectivamente. Los autores sugieren que las variaciones observadas en la atenuación en dichas zonas volcánicas podrían estar relacionadas a la acumulación de magma, actividad geotérmica y zonas de alta temperatura; es decir, estaría predominando la atenuación intrínseca (Aki, 1980b) debido a la disminución de los elementos estructurales con la profundidad.

En el estudio, la estimación del factor de calidad Q_c fue obtenido utilizando el total de sismos seleccionados (95) mostrados en la Tabla 4. La evaluación de Q_c en cada una de las estaciones de la red permanente de Los Humeros (RSTP) para las bandas de frecuencia 2, 4, 8 y 16 Hz, muestran que las estaciones S04 y S05 presentan los valores de Q_c más bajos (zona de producción) y en S02 y S06 los valores más altos (fuera de la zona de producción). Mientras tanto, los valores promedio de Q_c para el campo geotérmico de Los Humeros varían entre 50 a 285 respectivamente. Comparando con los valores promedio de Q_c obtenidos por Havskov et al. (1989) en el volcán Santa Elena, Wong et al. (2001) y Rodríguez (1999) en el campo geotérmico de Las Tres Vírgenes, se puede observar que los valores son relativamente similares a los obtenidos en este estudio (Figura 34). En contraste con las anteriores, los valores de Q_c obtenidos por Tonatiuh et al. (1997) en el campo geotérmico de Cerro Prieto varían entre 200 a 500. Esta diferencia podría deberse a las características del campo; mientras que las Tres Vírgenes y Los Humeros forman parte de zonas volcánicas, Cerro Prieto está ubicado en la falla geológica de San Andrés, además de presentar una gran saturación de fluido geotérmico.

Asimismo, para el campo geotérmico de Los Humeros, los valores estimados de Q_c presentan una dependencia de la frecuencia de la forma: $Q_c = 24 \pm 12 f^{0.86 \pm 0.06}$. Algunos autores consideran que Q_0 podría ser un buen indicador de la heterogeneidad del medio: así, los valores altos podrían estar asociados con zonas de baja heterogeneidad y relativamente estables (Bollinger, 1979; Singh and Herrmann, 1983) un ejemplo de ello son los valores de $Q_0=64$ y 110 reportados en Irán (Nuttli, 1980) y el Himalaya (Paul et al., 2003); mientras que, los valores bajos, como el obtenido en este estudio podrían ser característicos de zonas con alta heterogeneidad y actividad tectónica reciente (Aki and Chouet, 1975; Singh and Herrmann, 1983).

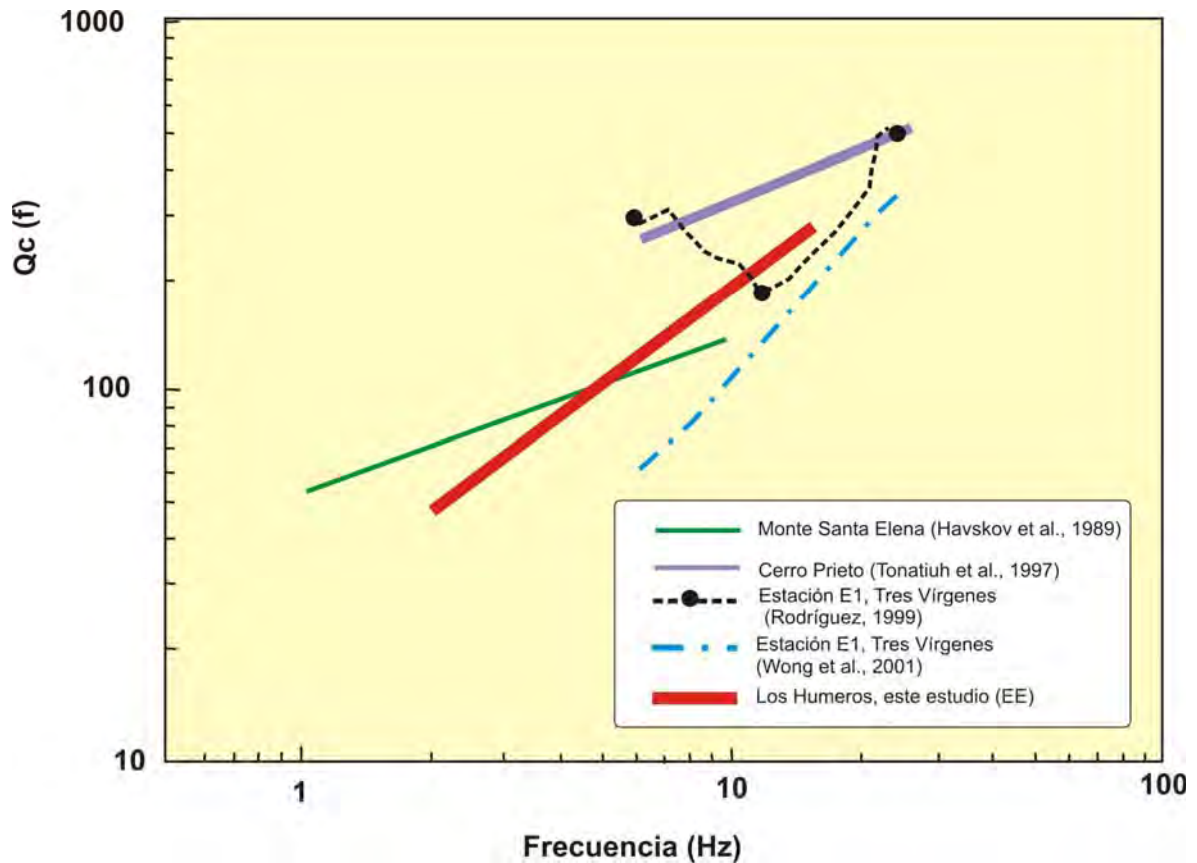


Figura 34. Comparación de los valores promedio de Q_c obtenidos en este estudio (EE) para el campo geotérmico de Los Humeros y los obtenidos para otras zonas geotérmicas y volcánicas. Obsérvese la diferencia entre los valores obtenidos en Los Humeros, Tres Vírgenes y el volcán Santa Elena con los de Cerro Prieto.

Por otro lado, utilizando la teoría de ondas de coda de Aki and Chouet (1975) se estimaron las variaciones de la atenuación (Q_c^{-1}) en el campo geotérmico de Los Humeros. Se conoce que Q_c^{-1} es la suma de la atenuación intrínseca y de dispersión. La primera está relacionada principalmente con cambios de temperatura, contenido y viscosidad de fluidos dentro de sistemas volcánicos (Gao, 1992; Novelo-Casanova et al., 2005); mientras que la segunda está sujeta a la dispersión que sufren las ondas al atravesar diferentes medios con presencia de elementos tectónicos (fallas). Aún cuando el campo geotérmico de Los Humeros es una zona con actividad tectónica, ésta disminuye conforme aumenta la profundidad. Por ello, asumiendo que la atenuación por dispersión es isotrópica en todo el campo geotérmico, la atenuación de las ondas de coda Q_c^{-1} estaría asociada principalmente a los cambios bruscos de temperatura a medida que aumenta la profundidad (Arellano et al., 2000) y a la saturación y circulación de fluidos geotérmicos (atenuación intrínseca). Fehler et al. (1992) y Wennerberg (1993), sugieren que la atenuación intrínseca es más grande que la atenuación por dispersión (scattering) alrededor de 3 bandas de frecuencia: 2, 4 y 8 Hz respectivamente.

La tomografía sísmica por atenuación de ondas de coda (Q_c^{-1}) obtenida para el campo geotérmico, con el modelo propuesto por Vargas et al. (2004), ha sido realizada considerando que Q_c^{-1} refleja principalmente la atenuación intrínseca. La evaluación de la atenuación utilizando 4 bandas de frecuencias 2, 4, 8 y 16 Hz, permitieron obtener una buena solución con la banda de frecuencias de 8 Hz. Esta frecuencia se encuentra dentro del rango descrito por Wennerberg (1993) y el espesor de los estratos del subsuelo de Los Humeros. La distribución de Q_c^{-1} en 3D (Figura 35), evidencia una anomalía de alta atenuación en el extremo SE del campo geotérmico y alcanza profundidades del orden de los 10 km. En el extremo SE, esta anomalía de alta atenuación, asociada a cambios de temperatura, presenta una forma elipsoidal alargada hasta los 10 km; en tanto que al S alcanza hasta los 7 km aproximadamente. Estudios realizados de las anomalías de Q_c y Q_c^{-1} observados por Okubo et al. (1985), Sudo (1991), García-Aristizábal y Acevedo (2004), Novelo-Casanova et al. (2005) en los volcanes Aso (Japón), Guagua Pichincha (Ecuador) y Popocatepetl (México) donde las anomalías se encuentran justo por debajo del volcán entre los 3 a 5 km y 6 a 8 km respectivamente, estarían relacionados básicamente a materiales parcialmente fundidos y altas temperaturas. Si este fuese el caso de Los Humeros, el material a temperaturas altas podría encontrarse probablemente entre 3 a 10 km con la salvedad de la resolución de la tomografía que alcanza únicamente hasta los 5 km.

La distribución de las anomalías de atenuación en 2D (Figura 35) ilustra detalladamente que la parte más superficial del campo geotérmico presenta una anomalía al S y SO de la zona de producción. A mayor profundidad (2.5 km) hasta los cuales se tiene descrita la geología, tectónica y la ubicación de los 2 yacimientos geotérmicos (Superior e Inferior), dos anomalías son observadas tanto en la zona N como en la zona SO. Tal como se observa en la figura, la anomalía térmica de la zona N se manifiesta con mayor intensidad a dicha profundidad, los mismos que estarían proporcionando de vapor geotérmico a los pozos productores, probablemente éste sea el motivo por el cual en esta zona se encuentran los pozos de mayor producción, contrariamente a los de la zona S y E (a excepción del pozo P21) donde a esa profundidad las anomalías térmicas se encuentran principalmente al SO de la ubicación de los pozos. Similar situación se observa en el extremo E del campo donde se ubica el pozo P25. Este pozo fue cerrado por la deficiencia de vapor geotérmico a esa profundidad. Según el modelo conceptual proporcionado por CFE (Figura 33), el pozo P25 se ubica justo por debajo de la zona de circulación de agua meteórica y la pequeña anomalía térmica que allí se observa no sería suficiente como para generar vapor en cantidades considerables. A diferencia de las 2 profundidades anteriores, a los 5.1 km las anomalías térmicas aumentan principalmente en los extremos NE, O y SO. La distribución en las 3 profundidades (1.10, 2.68 y 5.10 km) de las anomalías de atenuación en 2D, muestran básicamente una alta atenuación al S del volcán Xalapasco, lo que podría estar relacionado, probablemente, con la ubicación de la cámara magmática del mismo, ya que este volcán, hizo su erupción hace 8,500 años.

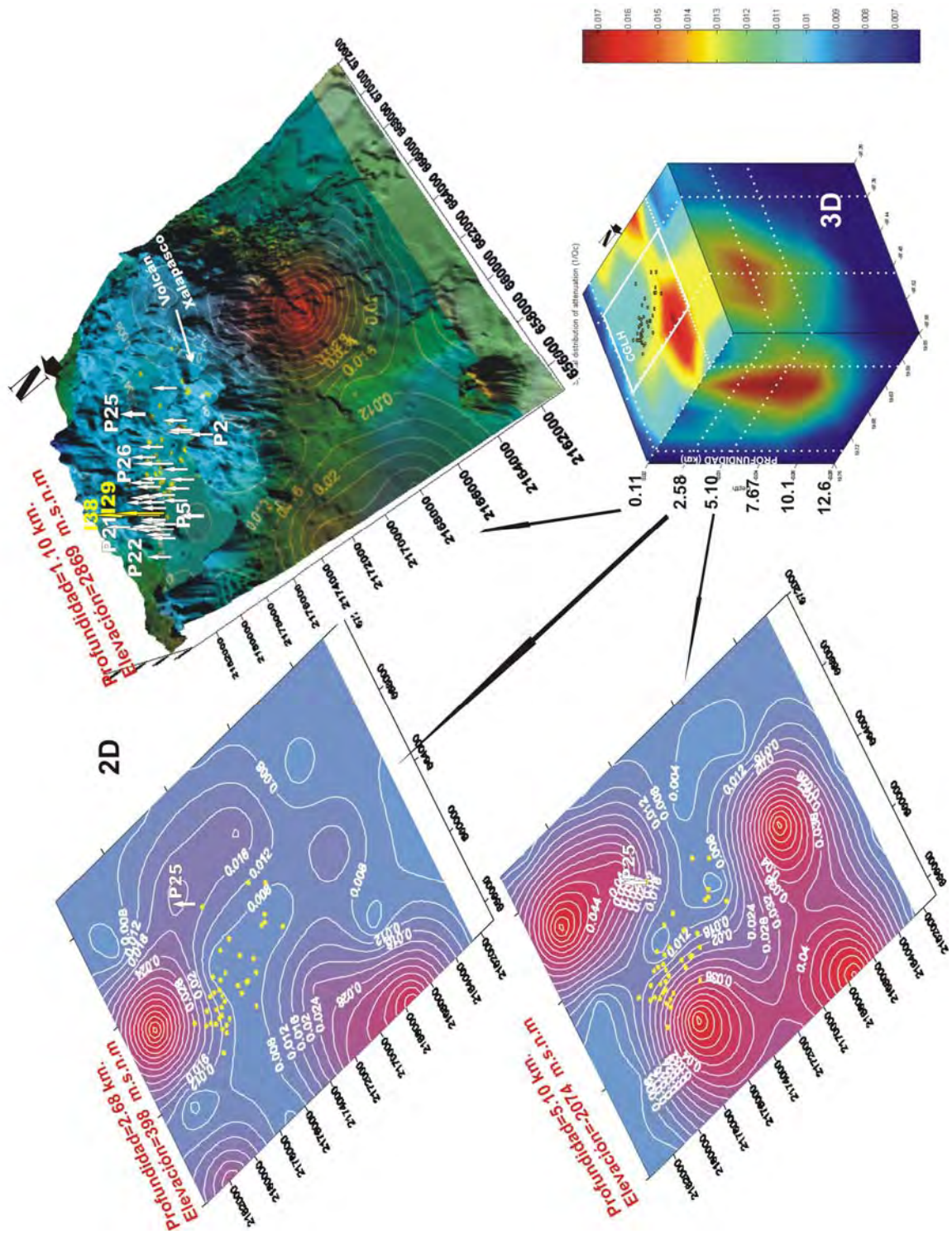


Figura 35. Tomografía sísmica por atenuación en 3D y 2D del campo geotérmico de Los Humeros (CGLH). Los círculos amarillos representan a los pozos productores e inyectoras.

Por lo tanto:

1.- El valor de Q_c estimado en el campo geotérmico de Los Humeros es característico de zonas volcánicas con actividad tectónica y a cambios bruscos de temperatura a medida que aumenta la profundidad.

2.- La tomografía sísmica por atenuación (Q_c^{-1}), ha evidenciado zonas de alta atenuación en el extremo N, S y SO de la zona de producción actual. La anomalía de alta atenuación observada al S y SO del campo geotérmico podría estar asociada probablemente a la cámara magmática del volcán Xalapasco.

CAPÍTULO 7

CONCLUSIONES

El análisis de la actividad sísmica ocurrida en el campo geotérmico de Los Humeros durante el periodo diciembre 1997 a diciembre del 2004, su la relación con los pozos productores e inyectores y la tectónica local ha permitido llegar a las siguientes conclusiones:

1. La intensa actividad sísmica en el campo geotérmico de Los Humeros, inició con la puesta en operación del pozo inyector I29 en agosto de 1993; por tanto, la ocurrencia del sismo del 25 de noviembre de 1994 ($M_d=4.6$) en la ZN del campo, está asociado a los esfuerzos generados por este proceso de inyección.
2. Las estaciones de la Red Sísmica Telemétrica Permanente y la Red Temporal del campo Geotérmico de Los Humeros registraron 280 sismos locales observados en 3 a más estaciones durante el periodo Diciembre 1997 a Diciembre del 2004. La localización hipocentral de los mismos permitieron conocer su evolución en el espacio y el tiempo.
3. El análisis año por año de la relación de velocidades (V_p/V_s), mostró una variación de la misma entre 1.73 a 1.77. El valor anómalo observado en Diciembre de 1997 esta relacionado a la puesta en operatividad del segundo pozo inyector I38, en diciembre del mismo año.
4. En este estudio, se seleccionaron 95 sismos localizados con 5 a más estaciones. Estos sismos seleccionados y mejor localizados, presentan errores menores a 1.0 km en sus parámetros hipocentrales (latitud, longitud y profundidad) y magnitudes $M_d \leq 3.6$. Asimismo, los hipocentros no sobrepasan los 4.0 km de profundidad.
5. La distribución de la sismicidad en superficie y en profundidad muestra una concentración importante en la ZN del campo geotérmico, básicamente alrededor de los pozos inyectores I29 e I38 y en menor número en la ZS, siguiendo la traza de la falla Los Humeros. Asimismo, un intenso fracturamiento y/o microfracturamiento está ocurriendo entre los 1.8 a 4 km de profundidad debido a los cambios físicos y químicos que sufre el yacimiento al inyectar y explotar el vapor de agua.

6. El análisis de los mecanismos focales y de tensor de momento, sugieren que en el campo geotérmico de Los Humeros existe una heterogeneidad de esfuerzos, asociados probablemente a la inyección de agua al yacimiento geotérmico y la explotación del vapor de agua.
7. El análisis del diagrama de rosas sugiere que el esfuerzo máximo compresional estaría asociado a esfuerzos locales y el esfuerzo mínimo tensional a esfuerzos regionales en el CVM.
8. La inversión del tensor de momento, además de brindar información de la fuente que originó los sismos del campo geotérmico de Los Humeros, ha permitido estimar la magnitud de momento (M_w) y el momento sísmico (M_0) de 16 sismos. La mayoría de los sismos analizados presentan $1.8 \leq M_w \leq 2.9$ y M_0 entre 1.45×10^{19} a 3.25×10^{20} dyn-cm. Mientras tanto, el sismo N° 93 ocurrido el 21 de enero del 2002 es el que presenta una $M_w=3.6$ y $M_0=3.22 \times 10^{21}$ dyn-cm, aproximadamente 10 veces más grande que los sismos locales que ocurren normalmente.
9. Asimismo, a partir de M_w , se ha propuesto una nueva ecuación de magnitud de duración (M_d^*) para la zona de estudio. Evidentemente la utilización de ecuaciones de magnitud M_d estimadas para otras áreas con características geológicas diferentes a la de un campo geotérmico como Los Humeros podría incurrir en el error de sobreestimar o subestimar el tamaño real de los sismos como lo ocurrido en este estudio utilizando la ecuación propuesta por Chavacán et al. (2004). Esta nueva ecuación ha permitido corregir las magnitudes M_d iniciales de los sismos mejor localizados (Anexo 3)
10. El análisis de los sismos versus la cantidad de inyección, sugiere una estrecha relación entre ellos: los cambios bruscos en la cantidad de inyección de agua al yacimiento geotérmico induce al incremento o disminución de la sismicidad. Mientras tanto, el aumento de la producción en 8 pozos y particularmente en el pozo P1, podría estar asociada a la ocurrencia del sismo del 21 de enero del 2002 ($M_w=3.6$) en la ZS del campo. Este sismo habría ocasionado la apertura de nuevas fracturas a través de las cuales los fluidos geotérmicos de la ZN y ZS circularían libremente.
11. La distribución de los sismos, la heterogeneidad de esfuerzos y la relación de los sismos con la cantidad de inyección, permiten concluir que un alto porcentaje de los sismos ocurridos en el campo geotérmico de Los Humeros, son “inducidos”.
12. Por otro lado, el análisis del factor de calidad Q_c y la tomografía sísmica por atenuación (Q_c^{-1}) en 3D y 2D ha permitido concluir que: el valor estimado de $Q_c = 24 \pm 12 f^{0.86 \pm 0.06}$, es similar a los valores obtenidos en zonas volcánicas y geotérmicas. Asimismo, la distribución de la atenuación relacionada con los cambios de temperatura (atenuación intrínseca), evidenció anomalías de alta atenuación en los extremos N, S y SO de la zona de explotación geotérmica actual y a profundidades del orden de los 5 km.

13. El estudio de la sismicidad del campo geotérmico de Los Humeros, al igual que en otros campos de explotación de recursos naturales del subsuelo, han evidenciado la importancia de realizar el monitoreo sísmico antes, durante y después de la explotación de los mismos, ya que brindan información importante de la fuente que los origina y los cambios bruscos que sufre el sistema al estar sometido a esfuerzos diferentes a su estado natural. Por lo tanto, es recomendable que se continúe con el monitoreo e implementación de redes sísmicas en otros campos en explotación y/o próximamente explotables que aún carecen del mismo.

14. La tomografía sísmica por atenuación, ha permitido evidenciar algunas zonas de alta atenuación, fuera de la zona de explotación; sin embargo, para tener un mayor conocimiento de su factibilidad es recomendable realizar estudios más detallados tanto geofísicos, geoquímicos y geológicos a fin de ampliar la zona de explotación del recurso geotérmico.

BIBLIOGRAFIA

- Arámbula, R., Valdés, C. (2006). State of Stress based on VT events in 9 years of activity at Popocatepetl volcano, México. Cities on Volcanoes, enero-2006. Poster.
- Arellano, M., García, A, Barragán M.R., Izquierdo, G., Aragón, A., y Pizano, Arturo (2000). Distribución inicial de presión y temperatura del campo geotérmico de Los Humeros. Boletín Instituto de Investigaciones Eléctricas-Comisión Federal de Electricidad. 450 p.
- Ake, J., Mahrer, M., O'Connell, D., and Block, L. (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.
- Aki, K. (1969). Analysis of the seismic coda of local earthquakes as scatter waves. *Geophysics Research Letters*. Vol. 74. pp. 615-631.
- Aki, K., and Chouet, B. (1975). Origin of coda waves: source, attenuation and scattering effects. *Journal Geophysics Research*. Vol. 80. pp. 3322-3342.
- Aki, K. (1980a). Attenuation of shear in the lithosphere for frequency from 0.05 a 25 Hz *Physics Earth Planet Interior*. Vol. 21. pp. 50-60.
- Aki, K. (1980b). Scattering and attenuation of shear waves in the lithosphere. *Journal Geophysics Research*. Vol. 85. pp. 6496-6504.
- Bollinger, A. (1979). Attenuation of the Lg phase and the determination pf mb in the Southern United States. *Bulletin of the Seismological Society of America*. Vol. 69. pp. 45-63.
- Brune, J. N. (1970). Tectonic stress and spectra of seismic shear waves. *Journal Geophysic Research*. Vol. 75, pp. 4997-5009.
- Campos-Enriquez, J. O., Arredondo-Fragoso, J. J. (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. (1997). Geología del subsuelo del campo geotérmico de Los Humeros, Puebla. Comisión Federal de Electricidad-Gerencia de Proyectos Termoeléctricos, Residencia Los Humeros. Informe HU/RE/03/97.

- Cedillo, F. (2000). Hydrogeological model of the geothermal reservoirs from Los Humeros, Puebla, México. Proceeding World Geothermal Congres. Kyushu-Tohoku, Japan, May 28-June 10.
- Chavacán, M., Lermo, J. Quintanar, L. (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. 1-4 de junio, 2004.
- Chouet, B. (1976). Source scattering and attenuation effects on high frequency seismic waves. Ph. D. thesis. Mass. Inst. of Technology, Cambridge.
- Clark, I. (1979). Practical Geoestistics. 1a. Ed. Londres. Great Britain printers. 125 p.
- COMESA (1998). Informe sísmológico final (Vibrosismo). Sísmica 2D. Campo geotérmico de Los Humeros. Informe: RHU-002/98.
- Del Pezzo, E., Gresta, C., Patane, G., and Scarcella, G. (1987). Attenuation of short period seismic waves at Etna as compared to other volcanic areas. Advances in Volcanic Seismology. Okal. PAGEOPH. Vol. 125. pp. 1039-1050.
- Dix, C. H. (1995). Seismic velocities from surface measurements. *Geophysics*. Vol. 20. pp.68-86.
- Draper, N. y Smith, H. (1981). Applied regression analysis. 2nd Ed. Wiley, New York.
- Dominguez, T., Rebollar, C., and Fabriol, H. (1997). Attenuation of coda waves at the Cerro Prieto geothermal field, Baja California, Mexico. *Bulletin of the Seismological Society of America*. Vol. 87. N° 5. pp. 1368-1374
- Dreger, D.S. (2002). Time-Domain Moment Tensor Inverse Code (TDMT_INV) Version 1.1. University of California, Berkeley Seismological Laboratory (BSL). 18p.
- Fehler, M., Hoshiaba, M., Sato, H., and Obara, K. (1992). Separation of scattering and intrinsic attenuation for the Kanto-Tokai region, Japan using measurements of S-wave energy versus hypocentral distance. *Geophysics J. Int.* Vol. 108. pp. 787-800.
- Fernández, S., Uribe, A., Flores, J.C., y Gómez, R. (1996). Estudio sísmológico en el área del temblor de Xalapa de 1920, memorias del VII Simposium de Geofísica y Exposición, Veracruz, Ver. Pp. 365-370.
- Ferrari, L., Garduño, V., Pasquaré ,G. y Tibaldi, A. (1994b). Volcanic and tectonic evolution of central Mexico: Oligoceno to Recent. *Geofísica Internacional*. Vol 33, pp. 91-105.
- Gao, L.S. (1992). Physical meaning of the coda envelopes. *Volcanic Seismology*. IAVCEI. Springer-Verlag, Berlin, Germany. Vol. 3. pp.391-403.

- García-Aristizábal, A. and Acevedo, M. (2004). Variación espacio-temporal del factor de calidad Q en el volcán Guagua Pichincha. Investigaciones en Geociencias. Instituto Geofísico, Ecuador. pp. 111-122.
- 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.
- Gunasekara, R. C., Foulger, G.R., Julian, B.R. (2003). Reservoir Depletion at The Geysers Geothermal Area, California, show by Four-Dimensional Seismic Tomography. *Journal of Geophysical Research*. Vol. 108 N° B3, 2134.
- 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.
- Gutierrez-Negrín, L., López-Martínez, A., García-Balcázar, M. (1982). Litología y zoneamiento hidrotermal de los pozos H1 y H2 del campo geotérmico de Los Humeros, Pue. CFE, Informe Interno 23/82.
- Gutierrez-Negrín, L., López Martínez, A., García-Balcázar, M. (1984). Applicatipn of dating por searching geothermic sources. Nuclear Traces and radiation measurements. Vol. 8, N° 1-4. pp. 385-389.
- Havskov, J. y Macías, M. (1983). A coda-length magnitude scale for some Mexican stations. *Geofísica Internacional*. Vol 22, N° 3, pp. 205-213.
- Havskov, J., Malone S., McClurg, D., and Crosson, R. (1989). Coda Q for the state of Washington, *Bulletin of the Seismological Society of America*. Vol. 79. pp. 1024-1038.
- Havskov, J. and Ottemoller, L. (2003). SEISAN. The earthquake analysis software. Versión 8.0. Preliminary. Institute of Solid Earth Physics, University of Bergen, Bergen, Norway. 250 p.
- Hill, D. (1993). Seismicity remotely triggered by the magnitude 7.3 Landers earthquake, California. *Science*. Vol. 260. N° 5114. pp. 1617-1623.
- Hill, D., Johnston, J.S., and Langbein, J.O. (1995). Response of Long Valley caldera at the Mw=7.3 Lander, California earthquake. *Journal Geophysics Research* Vol. 100. pp. 12985-13005.
- Hiriart, G. y Gutiérrez, H. (1992). An update of Cerro Prieto Geothermal Field Twenty years of commercial power. *Geothermal Reousrces Council Bulletin*. Sept-oct. pp. 289-294.
- Hurtado, A. (2001). Mecanismos focales y modelamiento (CMT) del sismo del 1ro de julio de 1999, campo geotérmico de Los Humeros. Informe Interno del Instituto de Ingeniería.

- Jost, M. L. and Herrmann, R. (1989). A Student's guide to and review of moment tensors. *Seis. Res. Lett.* Vol 60, pp. 37-57.
- Lee, W., Bennet, R. y Meagher, L. (1972). A method for estimating magnitude of local earthquake from signal duration. U.S.G.S. Open file report.
- Lermo, J., Guerrero, J., Soto, J., Machorro, G. (1999a). 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., Soto, J., y Flores, J. (1999b). Procesado de datos sísmicos de la red del campo geotérmico de Los Humeros, Puebla. Informe Técnico Final del Instituto de Ingeniería, UNAM a la CFE-Gerencia de Proyectos Geotermoeléctricos.
- Lermo, J., Hurtado, A., Soto, J., y Flores, J. (2000). Análisis de la sismicidad del campo geotérmico de Los Humeros, Puebla. Informe Técnico Final del Instituto de Ingeniería, UNAM a la CFE-Gerencia de Proyectos Geotermoeléctricos.
- Lermo, J., Havskov, J. y J. Soto, (2001). Sistema de información sismotelemétrica de México (SISMEX). Veintisiete años de servicio, Memorias Técnicas del XIII Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica, Guadalajara, Jal. México, Octubre 31-Noviembre 3, 2001.
- Lermo, J., Soto, J., Lorenzo, C., Mijares, C., y Flores, J. (2002). Estudio de la sismicidad del campo geotérmico de Los Humeros, Puebla Fase III. Comisión Federal de Electricidad, Gerencia de Proyectos Termoeléctricos-Departamento de Exploración. Informe Técnico: DEX-HU-02/01.
- Lermo, J., y Lorenzo, C. (2003). Calibración del equipo electrónico de la red sísmica del campo geotérmico de Los Humeros, Puebla. Comisión Federal de Electricidad, Gerencia de Proyectos Termoeléctricos-Departamento de Exploración. Informe Técnico: DEX-HU-00/2003.
- Lermo, J., Bernal I., Antayhua, Y., Chavacán, M., y Vega, D. (2004). Estudio de actividad sísmica en la zona geotérmica de Acoculco, Puebla. Comisión Federal de Electricidad, gerencia de proyectos termoeléctricos-departamento de exploración. Informe Técnico GF-ACO-02-04. 81 pp.
- Lermo, J., Antayhua, Y., Bernal, I., Chavacán, M., y Vega, D. (2004). Monitoreo sísmico durante la estimulación ácida de los pozos LV-13 y LV-4 localizados en el campo geotérmico de Las Tres Vírgenes, B.C.S. Comisión Federal de Electricidad, Gerencia de Proyectos Termoeléctricos, departamento de exploración. Informe Técnico GF-TV-05-04. 81 pp.
- Lermo J., Lorenzo, C., Espitia, G., y Antayhua, Y. (2005). Sismicidad en el campo geotérmico de Los Humeros, Puebla. Instrumentación y operación de la Red Sismológica. Comisión Federal de Electricidad, Gerencia de Proyectos Termoeléctricos-Departamento de Exploración. Informe Técnico: GF-HU-01-05.

- Liener, B., Berg, E. y Frazer L. (1986). Hypocenter: An earthquake location method using centered, scaled and adaptively least squares. *Bull. Seism. Soc. Am.* Vol 76, pp. 771-783.
- Linde, A., Sacks, J., Jonnston, M., Hill, D., Bilham, R. (1994). Increased pressure from rising bubbles as a mechanism for remotely triggered seismicity. *Nature*. Vol. 371. N° 6496. pp. 408-410.
- López-Hernández, A. (1995). Estudio regional volcánico y estructural del campo geotérmico de Los Humeros, Pue., Mexico. *Geotermia. Revista Mexicana de Geoenergía*, 11-1, 17–36.
- Lorenzo, C. (2002). Reporte de la actividad sísmica registrada en el campo geotérmico de Los Humeros, Puebla durante el periodo enero 2001-abril 2002. Informe Interno. Gerencia de Proyectos Termoeléctricos-Residencia de Estudios, C.F.E. 20p.
- Lorenzo, C. (2004). Reporte de la actividad sísmica registrada en el campo geotérmico de Los Humeros, Puebla durante el periodo septiembre 2002-noviembre 2003. Informe Interno. Gerencia de Proyectos Termoeléctricos-Residencia de Estudios, C.F.E. 35p.
- 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.
- Macías, C. (1997). Análisis de la información sísmica en Tres Vírgenes, BCS, periodo enero-abril de 1994. Tesis de Licenciatura. Facultad de Ingeniería, UNAM.
- Moncayo, E., Vargas, C. and Durán, J. (2004). Temporal variation of coda-Q at Galeras Volcano, Colombia. *Earth Sciences Research Journal*. Vol. 8. N° 1. pp.19-24.
- Nakamura, Y. (1989). A method for dynamic characteristics estimation of subsurface using microtremors on the ground surface. *QR of RTRI*. pp. 25-33.
- Novelo-Casanova, D.A., and Martínez-Bringas, A. (2005). A seismic attenuation zone below Popocatepetl volcano inferred from coda waves of local earthquakes. *Geofísica Internacional*. Vol. 44, N° 2. pp. 177-186.
- Nuttli, O. (1980). The excitation and attenuation of seismic crustal phases in Iran. *Bulletin of the Seismological Society of America*. Vol. 70. pp. 469-485.
- O'Doherty, K.B., and Bean, C.J. (1997). Coda wave imaging of the Long Valley caldera using a spatial stacking technique. *Geophysics Research Letters*., Vol. 13. pp 1547-1550.
- Okubo, Y., Graf, R. J., Hansen, R. O., Ogawa, K., Tsu, H. (1985). Curie point depths of the island Kyushu and surrounding areas, Japan. *Geophysics*. Vol. 50. pp. 481-494.
- Paul, A., Gupta S., and Pant C. (2003). Coda Q estimates for Kamaun Himalaya. *Earth Planet*. Vol. 112, N° 4, pp. 569-576.

- Pérez-Campos, N. (2001). Difusión rectificada en el volcán Popocatepetl debido al sismo de Mw=7.0 del 15 de junio de 1999. Tesis de Ingeniero Geofísico. 98 p.
- Pérez-Reynoso, J. (1978). Geología y petrografía de Los Humeros. *Geomimet*. Vol. 91. pp. 97-106.
- Ponce, L., y Rodríguez, C. (1977). Microearthquake activity associated to Los Humeros caldera, Mexico: Preliminary survey. *Geofísica Internacional*. Vol. 17. N° 4. pp. 461-478.
- Pulli, J. (1984). Attenuation of coda waves in New England. *Bulletin of the Seismological Society of America*. Vol. 74. pp. 1149-1166.
- Quijano-Léon, J., and Torres, M.A. (1995). The Los Humeros geothermal reservoir, a case of very high temperature system. Proceeding of the World Geothermal Congress. Florencia Italia. Vol. 1. pp 43-48.
- Quijano-León, J. and Gutiérrez-Negrín, L. C. (2000). Geothermal production and development plans in Mexico: Proceeding of the World Geothermal Congress: Kyushu-Tohoku, Japan, pp. 355-361.
- Reasenbergs, P. and Oppenheimer, D. (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
- Rebollar, C., Reyes, L., Quintanar, L. and Arellano, F. (2003). Heterogeneity in the Cerro Prieto Geothermal Field, Baja California, México. *Bulletin of the Seismological Society of America*. Vol. 93. N° 2. pp. 783-794.
- Rodríguez, M. (1999). Procesado e interpretación de datos sísmicos registrados en zona geotérmica de Las Tres Vírgenes, B.C.S., en el periodo Diciembre 1995-Julio 1996. Comisión Federal de Electricidad, gerencia de proyectos termoeléctricos-departamento de exploración. Informe Técnico CON-CPG-5004/98.
- Rodríguez, M., Cuenca, J., y Gómez, G. (2001). Estudio de la actividad sísmica del campo geotérmico de Los Azufres (Michoacán). Comisión Federal de Electricidad, gerencia de Proyectos Termoeléctricos-departamento de exploración. Informe Técnico CON-RAZ-5002/00.
- Sudo, K. (1991). An Attenuating structure beneath the Aso caldera determined from the propagation of seismic waves. *Bulletin of Volcanology*. Vol. 35. pp. 99-111.
- Suter, C. (1991). State of stress and active deformation in Mexico and Central America, in Siemmons, D.D., et al., eds., Neotectonics of North America: *Geological Society of America*, decade of North America geology, decade Map Volume 1, pp. 401-421.

- Suter, C., Contreras-Péres, J., and Ochoa Carrillo, H. (1997). Structure of the Sierra Madre Oriental Fold-thrust belt in east central Mexico: II Convención sobre la Evolución Geológica de México, Pachuca-Hidalgo. Libro guía de las excursiones geológicas. Instituto de Geología de la Universidad Nacional Autónoma de México, pp. 45-66.
- Rutledge, J. T., and Phillips, W. S. (2003). Hydraulic stimulation of natural fractures as revealed by induced microearthquakes, Carthage Cotton Valley Gas Field, east Texas. *Geophysics*. Vol. 68. N° 2. pp. 441-452.
- Rutledge, J. T., Phillips, W. S., and Mayerhofer, M. J. (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. N° 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.
- Shapiro, N. M., Singh, S.K. Iglesias-Mendoza, A., Cruz-Atienza, V. M., and Pacheco, J.F. (2000). Evidence of low Q below Popocatepetl volcano, and its implication to seismic hazard in Mexico City. *Geophysical Research Letters*. Vol. 27. N° 17. pp. 2753-2756.
- Singh, S.K., Ordaz M., Pacheco, J.F., Quaas, R., Alcántara, L., Alcocer, S., Gutierrez, C., Meli, R., and Ovando, E. (1999). A preliminary report on the Tehuacán, Mexico earthquake of June 15, 1999 (Mw=7.0). *Seismological Research Letters*. Vol. 70. N° 5. pp. 489-504.
- Simiyi, M. (1999). Induced micro-seismicity during well discharge: OW-719, Olkaria, Kenya rift. *Geothermics*. N° 28, pp. 785-802.
- Singh, S., and Herrmann, B. (1983). Regionalization of crustal coda Q in the continental United States. *Journal Geophysics Research*. Vol. 88. pp. 527-538.
- Singh, S.K., Ordaz, M., Pacheco, J.F., Quaas, R., Alcántara, L., Alcocer, S., Gutierrez, C., Meli, R., and Ovando, E. (1999). A Preliminary Report on the Tehuacán, México Earthquake of June 15, 1999. *Seismological Research Letters*. Vol. 70, N° 5. pp. 489-504.
- Suter, M., Quintero-Legorreta, O., and López-Martínez, M. (1995). The Acambay graben: Active intraarc extensión in the trans-Mexican volcanic belt, Mexico. *Tectonics*. Vol. 14, N° 5. pp. 1245-1262.
- Tang, Ch., Rial J., Lees, J. and Thompson (2005). Thitieth Workshop on Geothermal Reservoir Engineering Stanford University, Stanford, California. January 31-February 2.

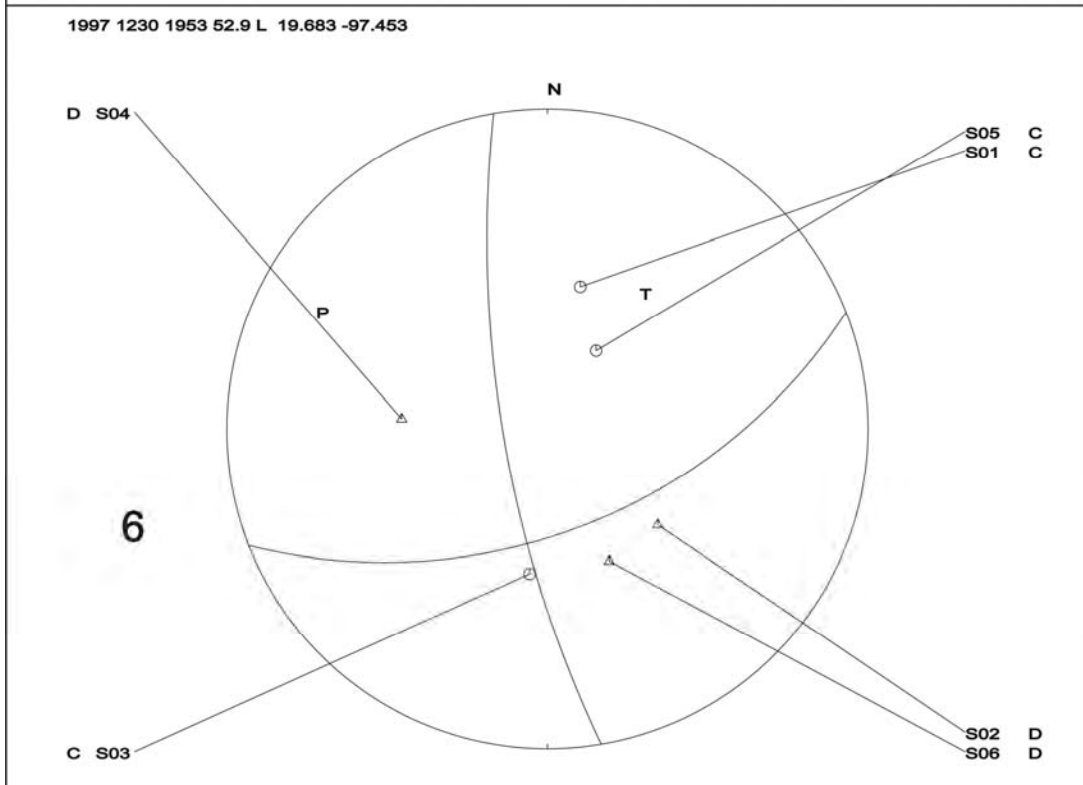
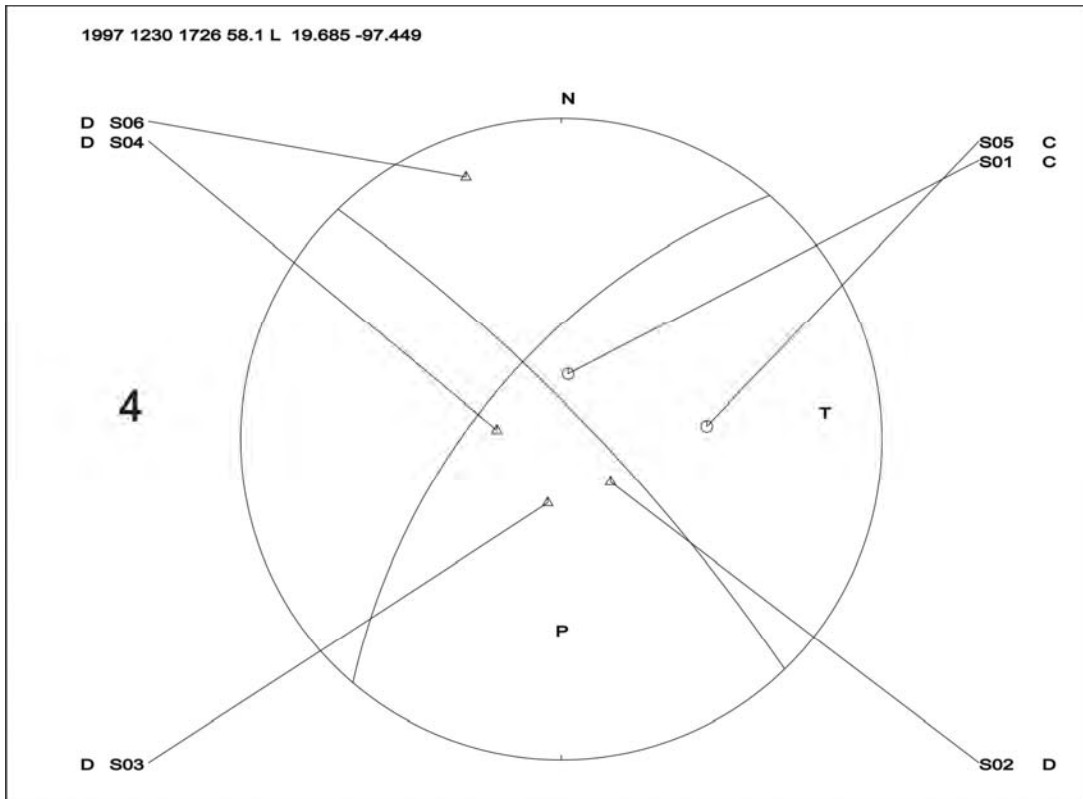
- Tonatiuh, D., Rebollar, C. and Fabriol H. (1997). Attenuation of coda waves at the Cerro prieto geothermal field, Baja California, Mexico. *Seismological Society of America*. Vol. 87, N° 5, pp. 1368-1374.
- Valdés, C. (2004). Estudio de la actividad sísmica del campo geotérmico de Los Azufres, Michoacán. Comisión Federal de Electricidad, Gerencia de Proyectos Termoeléctricos-departamento de exploración. Convenio N° 9400012387.
- Vargas, A., Ugalde, A., Pujades, G., and Canas, A. (2004). Spatial variation of coda wave attenuation in northwestern Colombia. *Geophysical Journal International*. Vol. 158. pp. 609-624.
- Viggiano, J., and Robles, C. (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 Robles, C. (1998b). Mineralogía hidrotermal en el campo geotérmico de Los Humeros, Puebla. Tomo II: Geotermia del yacimiento, *Geotermia*, Vol. 4.
- Wennerberg, L. (1993). Multiple scattering interpretations of coda-Q measurements. *Bulletin of the Seismological Society of America*. Vol. 83. pp. 279-290.
- Wong, V., Rebollar, C.J., and Munguía, L. (2001). Attenuation of Coda Waves at the Tres Vírgenes Volcanic Area, Baja California Sur, México. *Bulletin of the Seismological Society of America*. Vol. 91. N° 4. pp. 683-693.
- Wong, V., and Murguía, L. (2006). Seismicity, focal mechanisms, and stress distribution in the Tres Vírgenes volcanic and geothermal region, Baja California Sur, Mexico. *Geofísica Internacional*. Vol. 45. N° 1. pp. 23-37.
- Yáñez-García, C., García-Durán, S., and Cacique-Vásquez, J. (1979). Geothermic exploration in the Los Humeros-Derrumbadas area. *Geothermic Research Count. Trans.* Vol. 3. pp. 801-803.

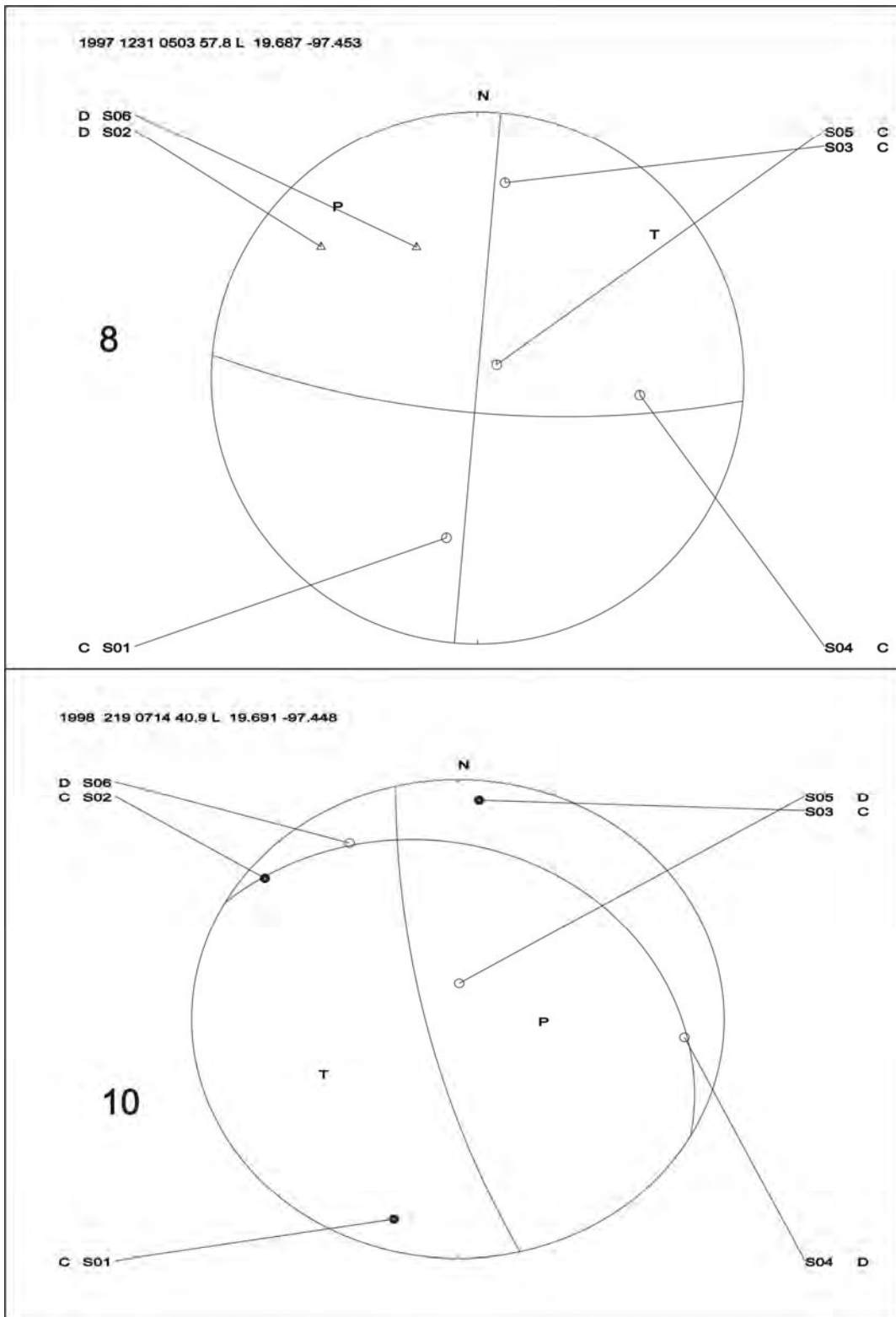
ANEXOS

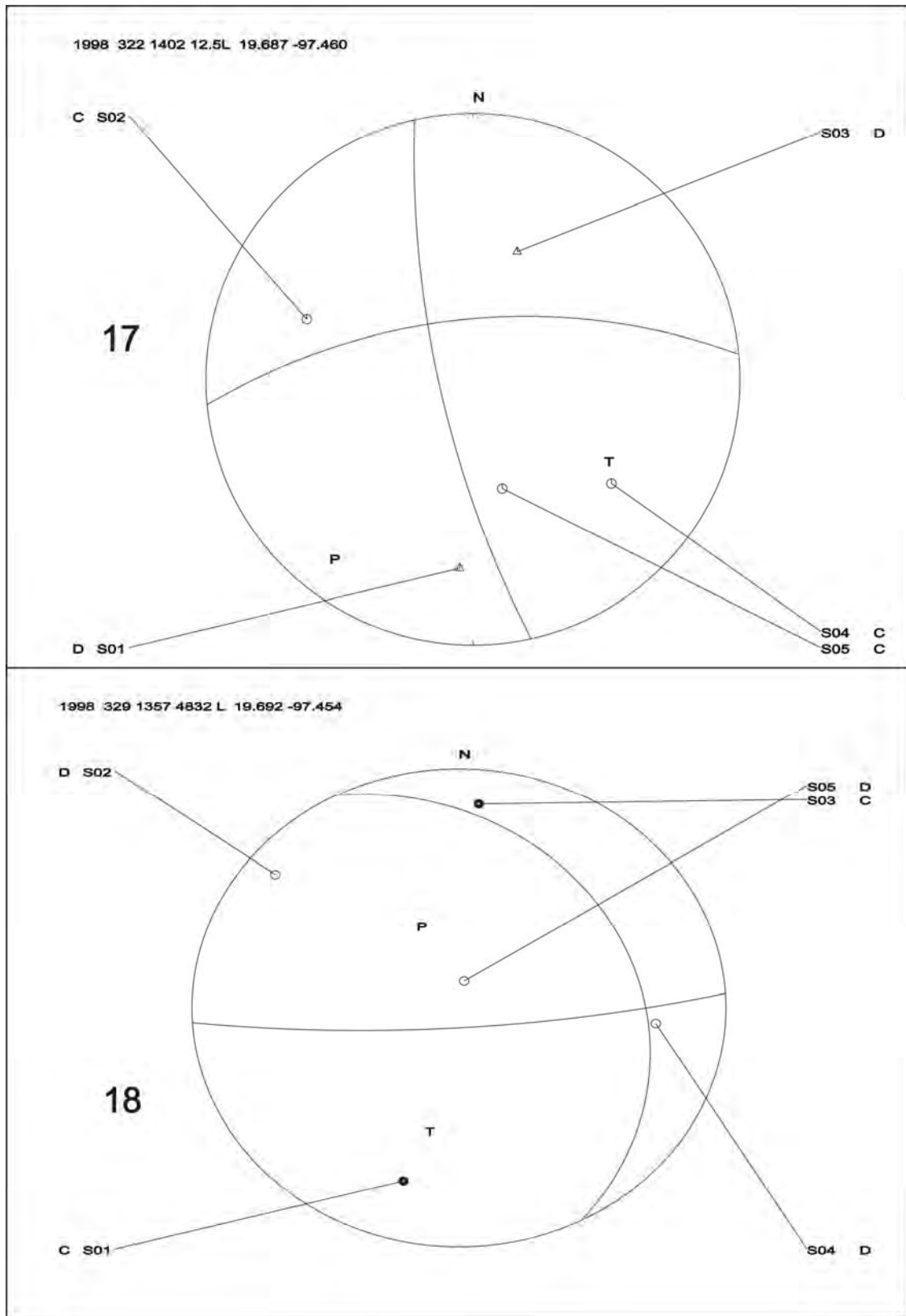
ANEXO 1

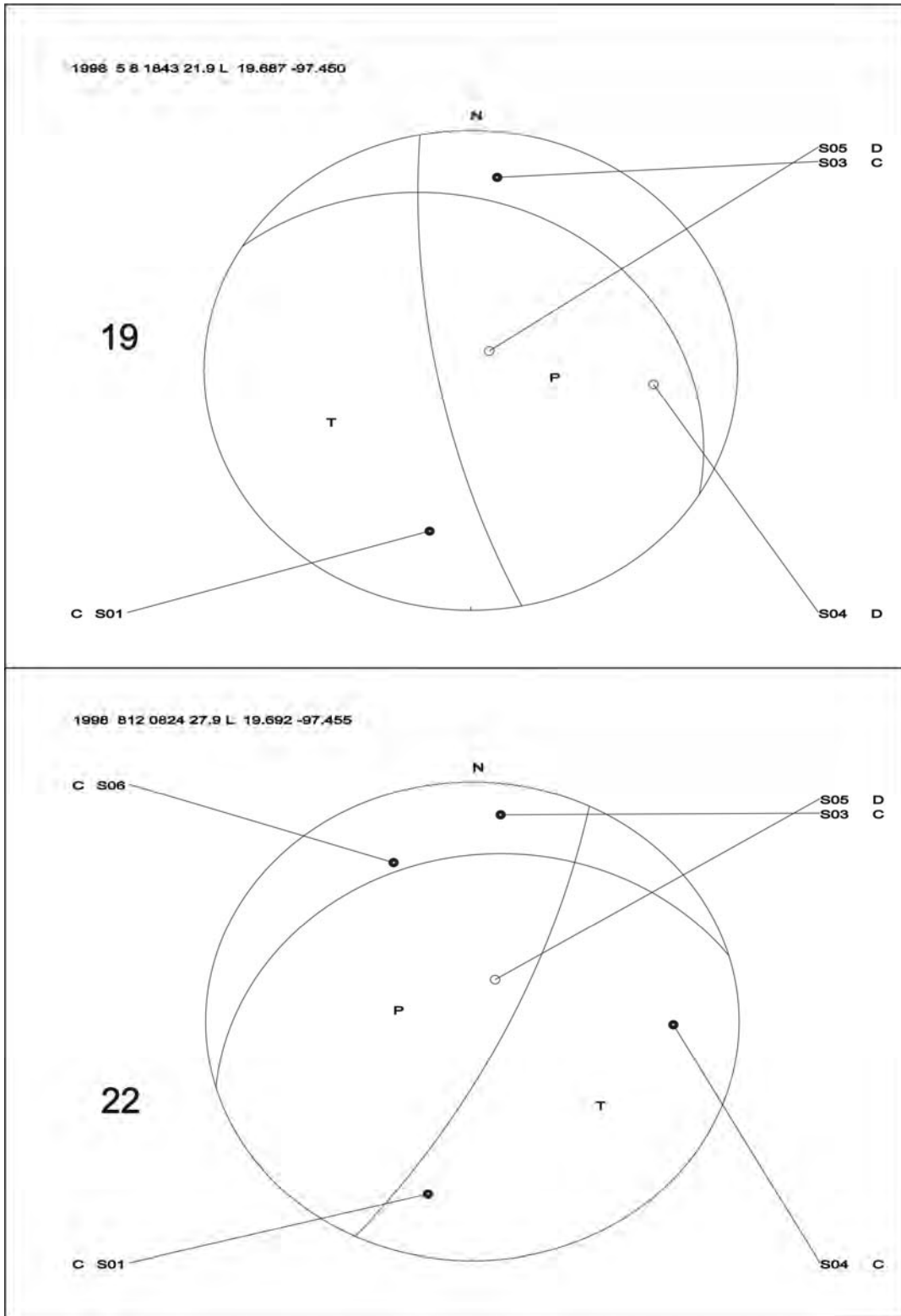
MECANISMOS FOCALES SIMPLES

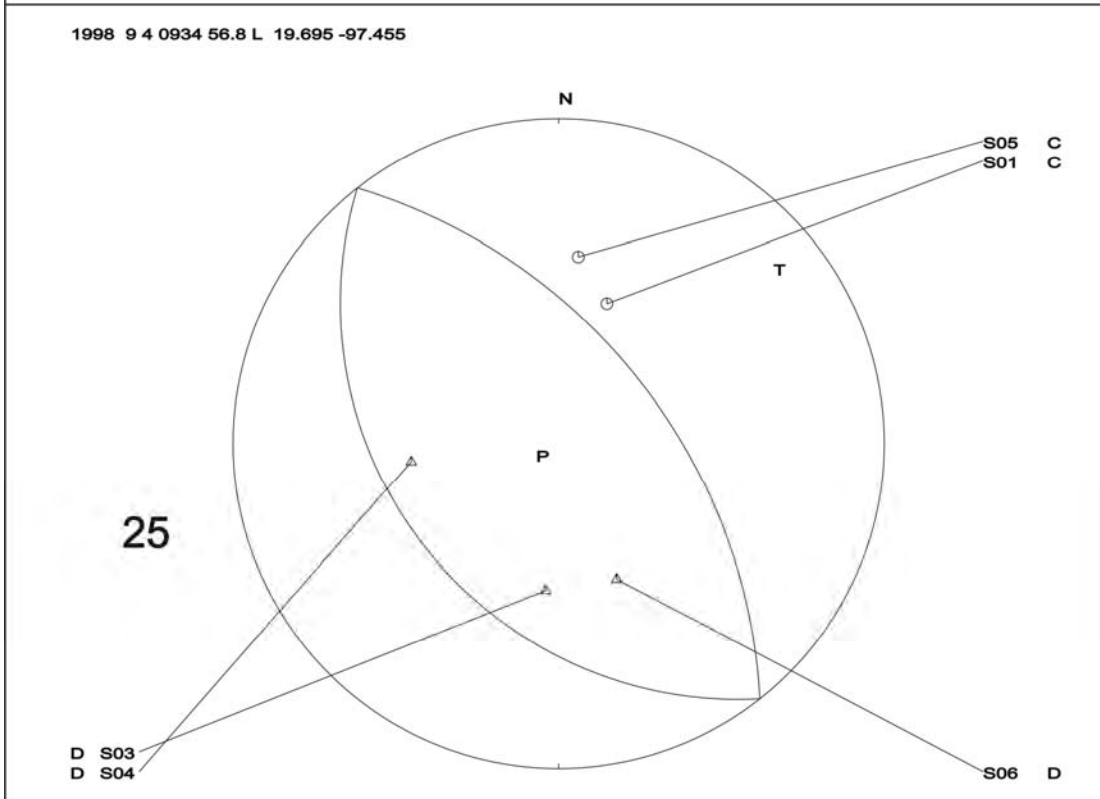
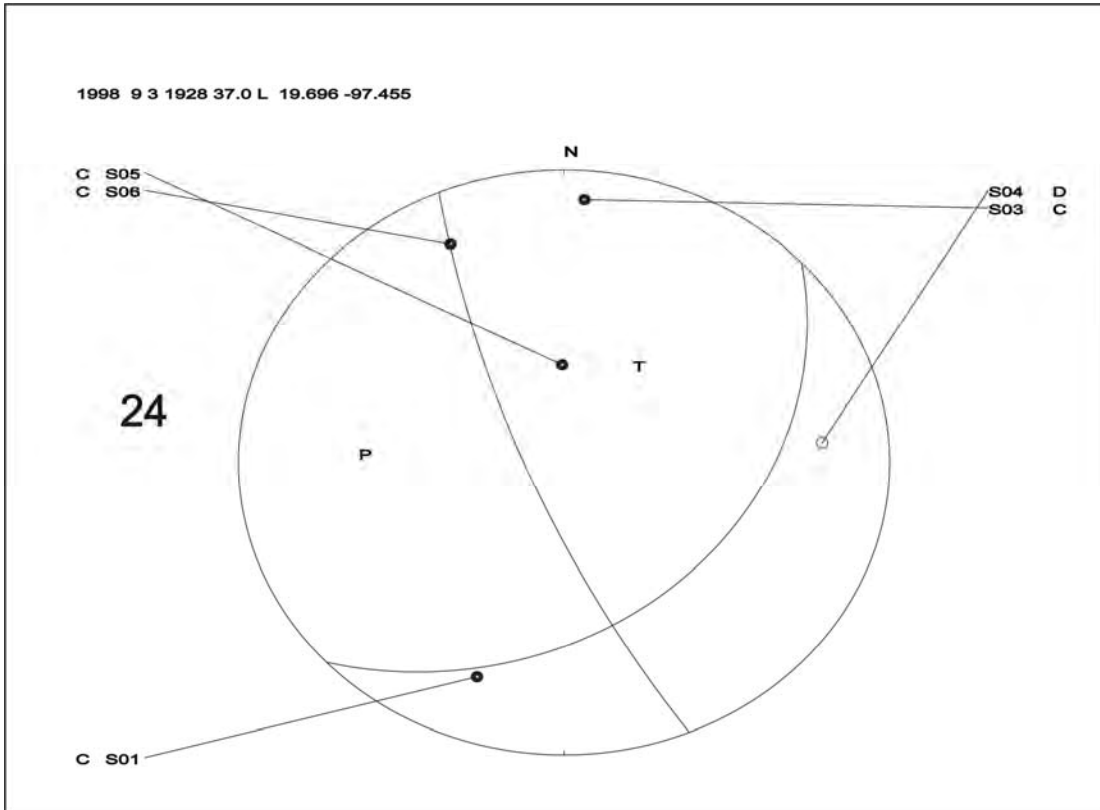
Este anexo contiene el total de mecanismos focales simples realizados en el presente estudio. En las figuras, los triángulos indican la polaridad de la onda P, de tipo dilatacional (D) y los círculos abiertos la de compresión (C).

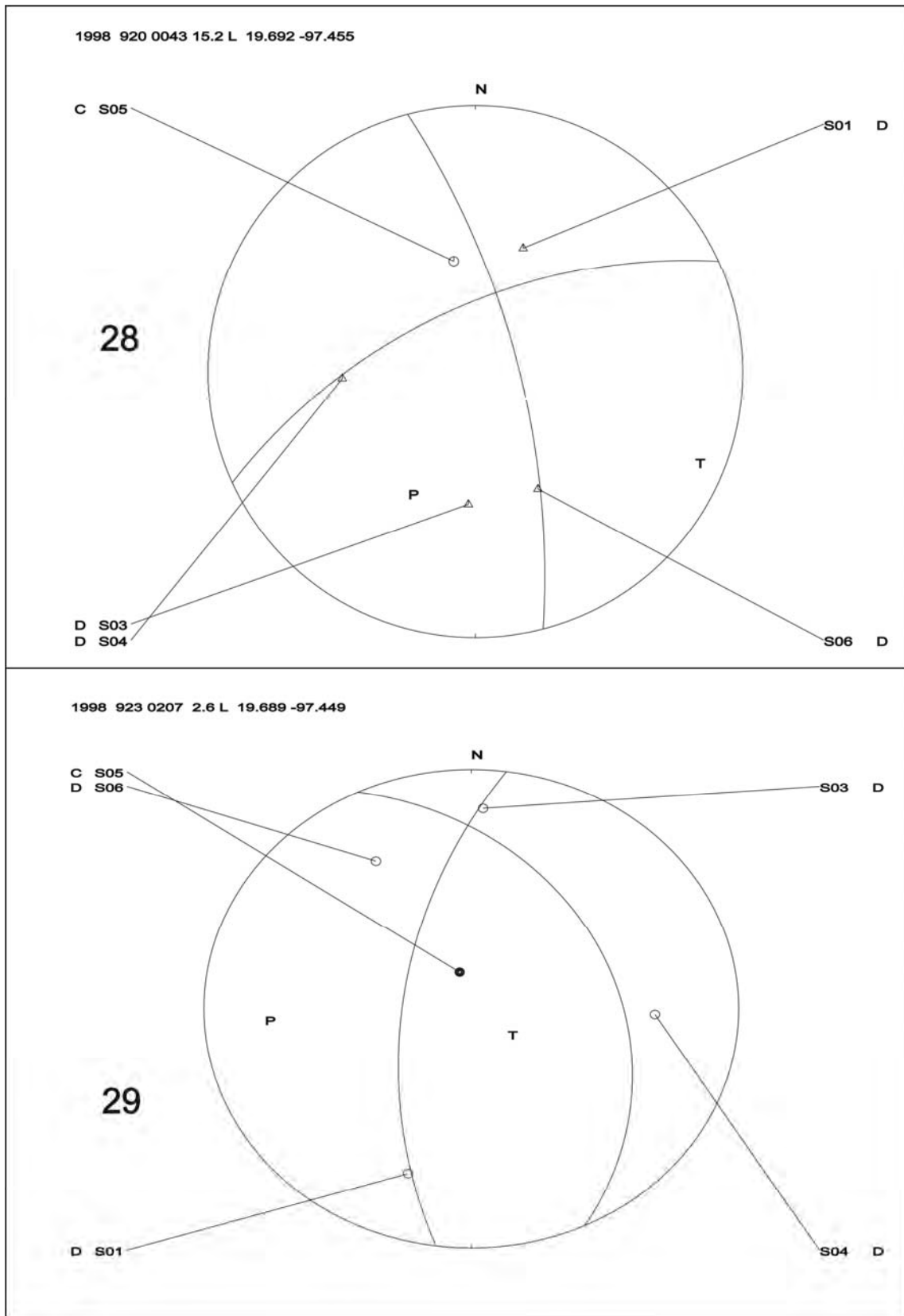


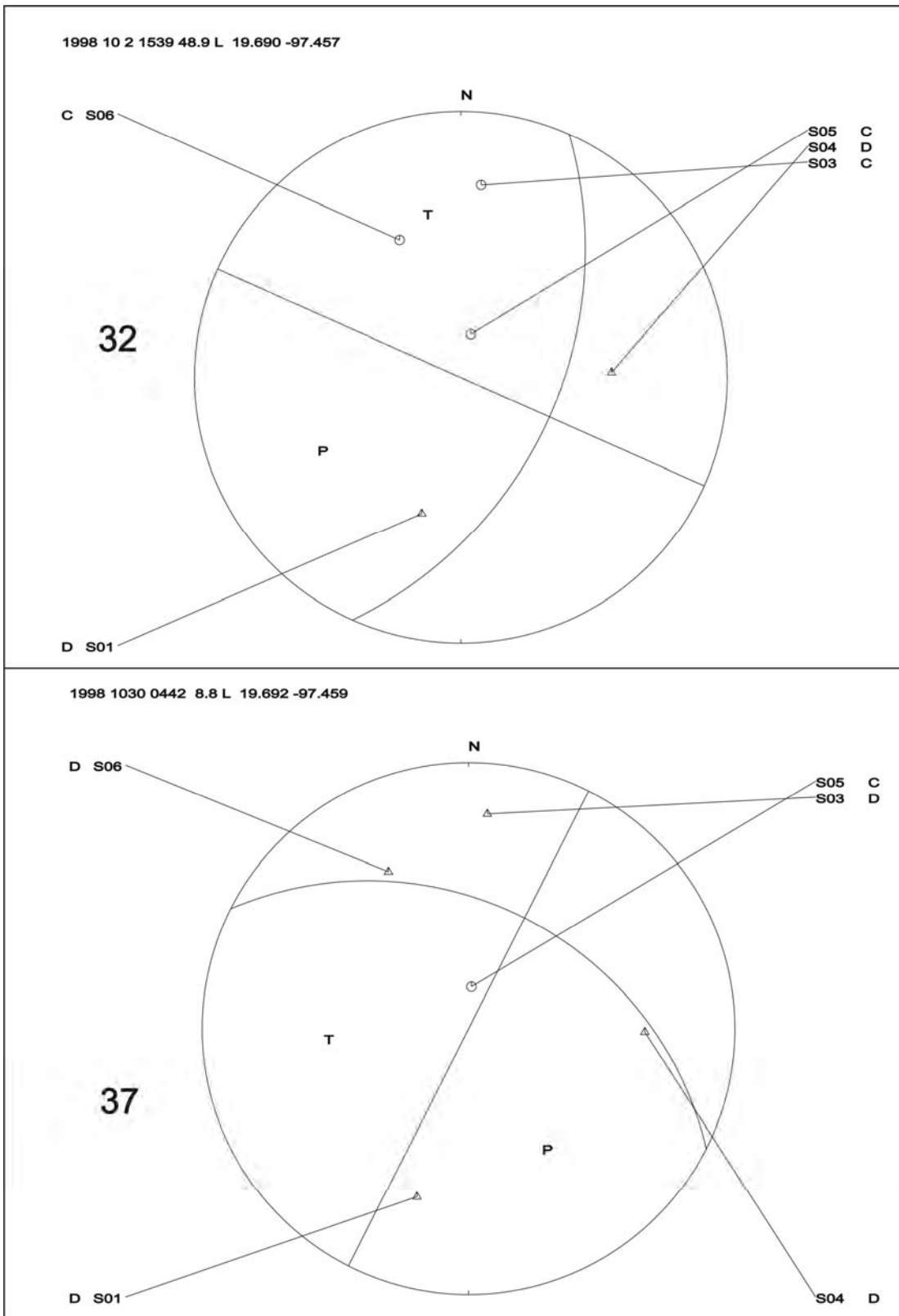


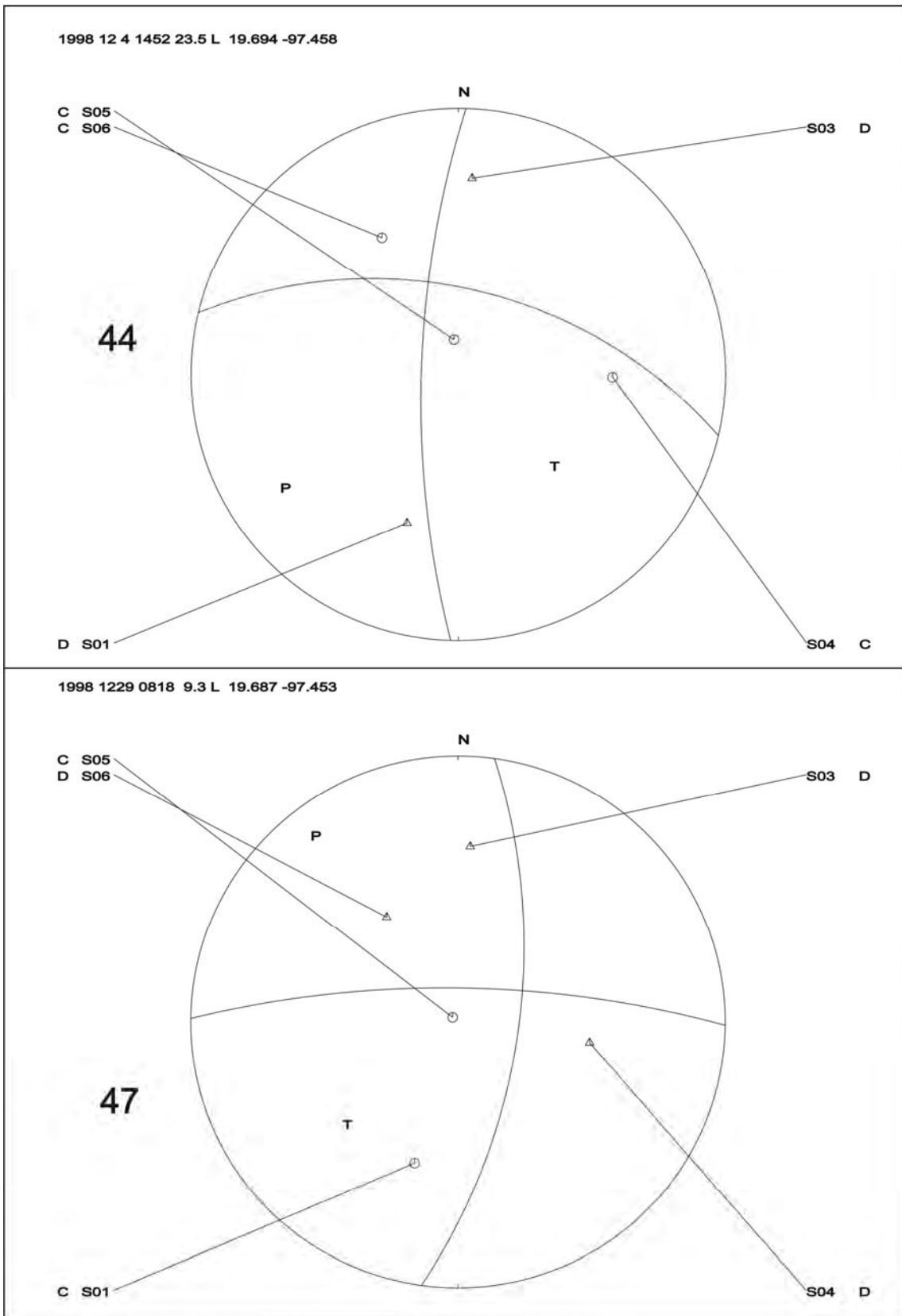


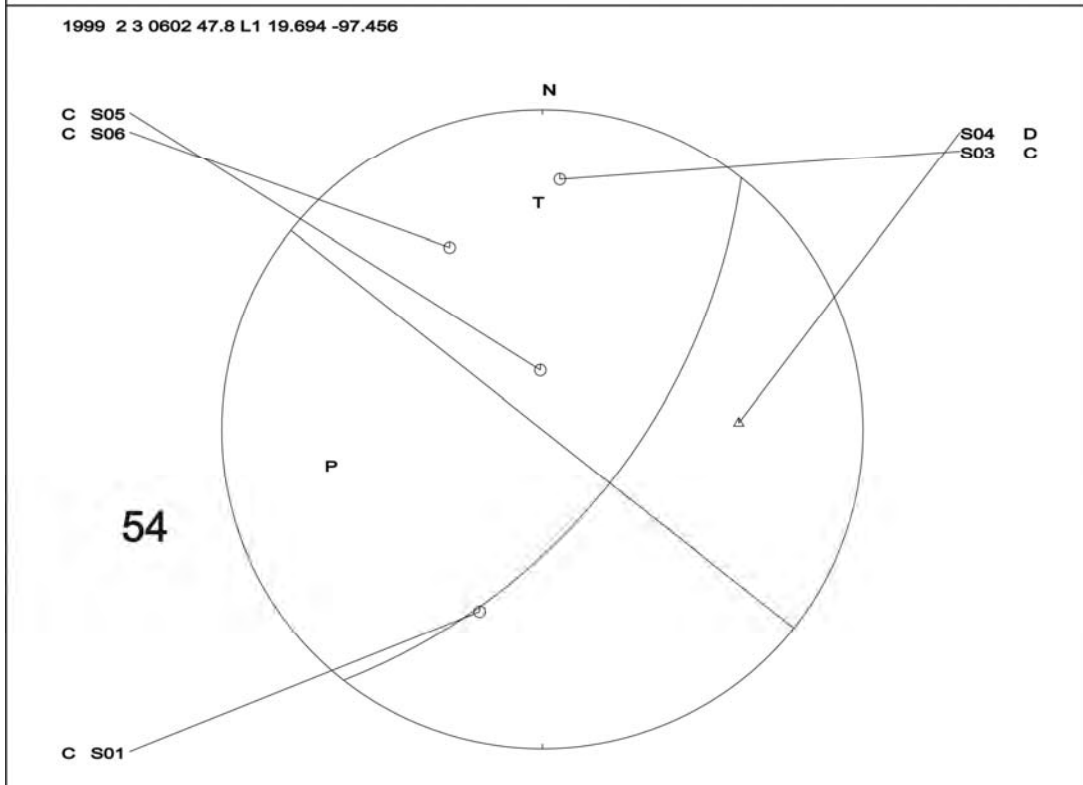
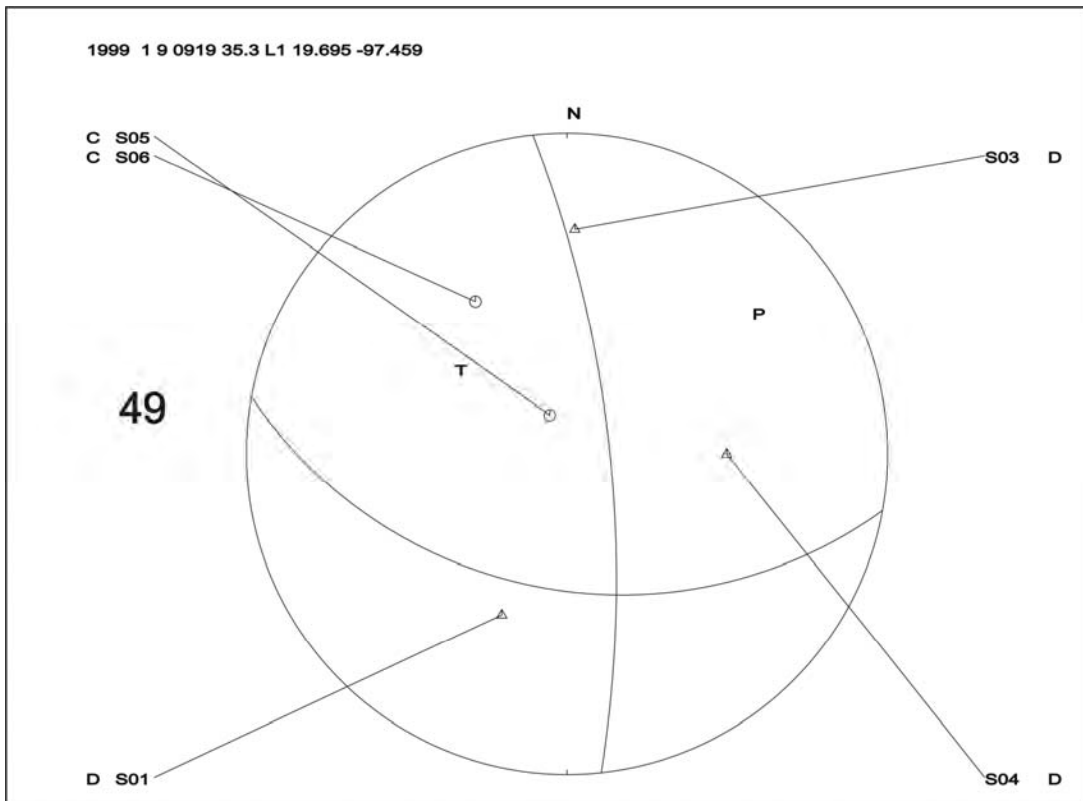


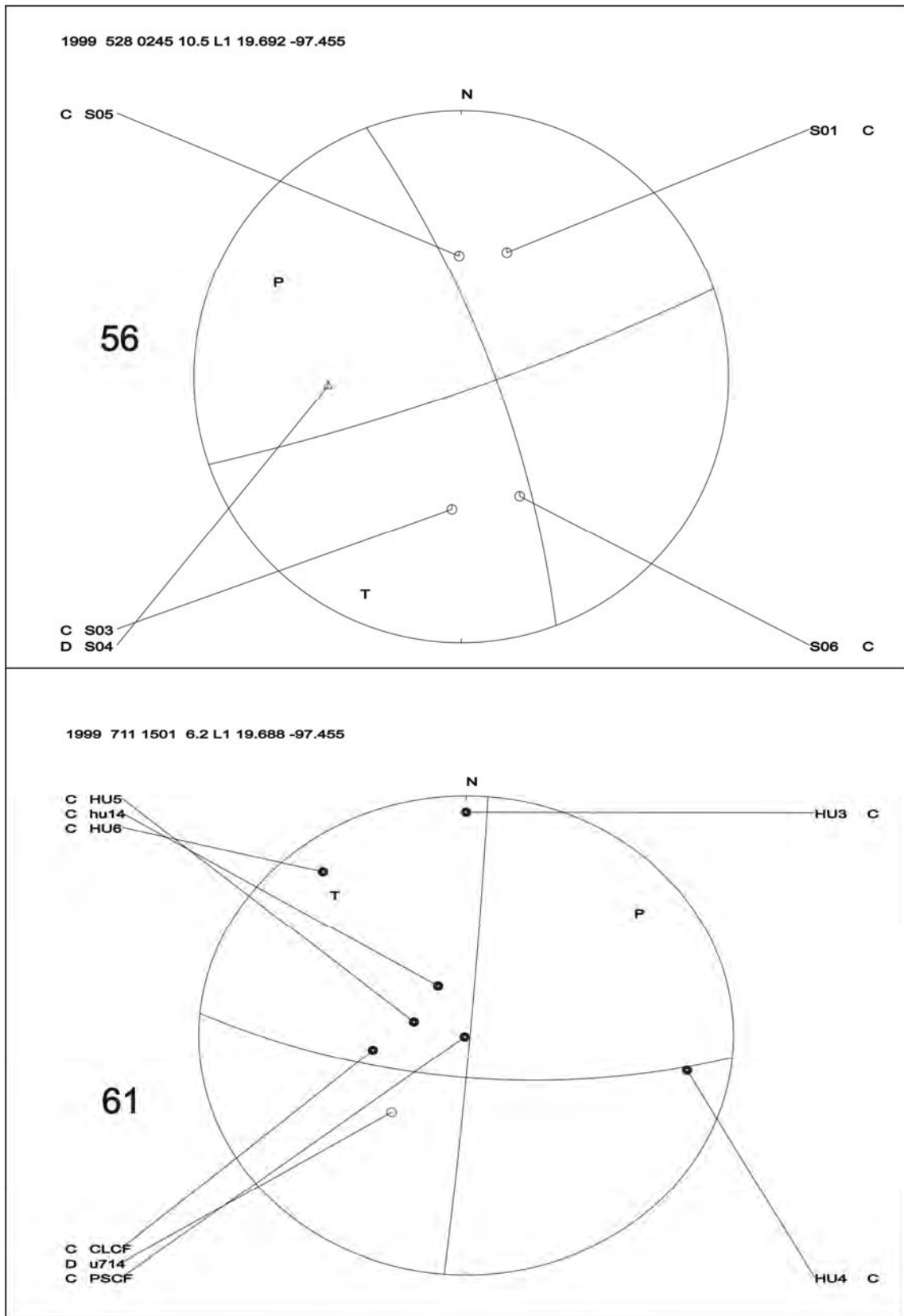


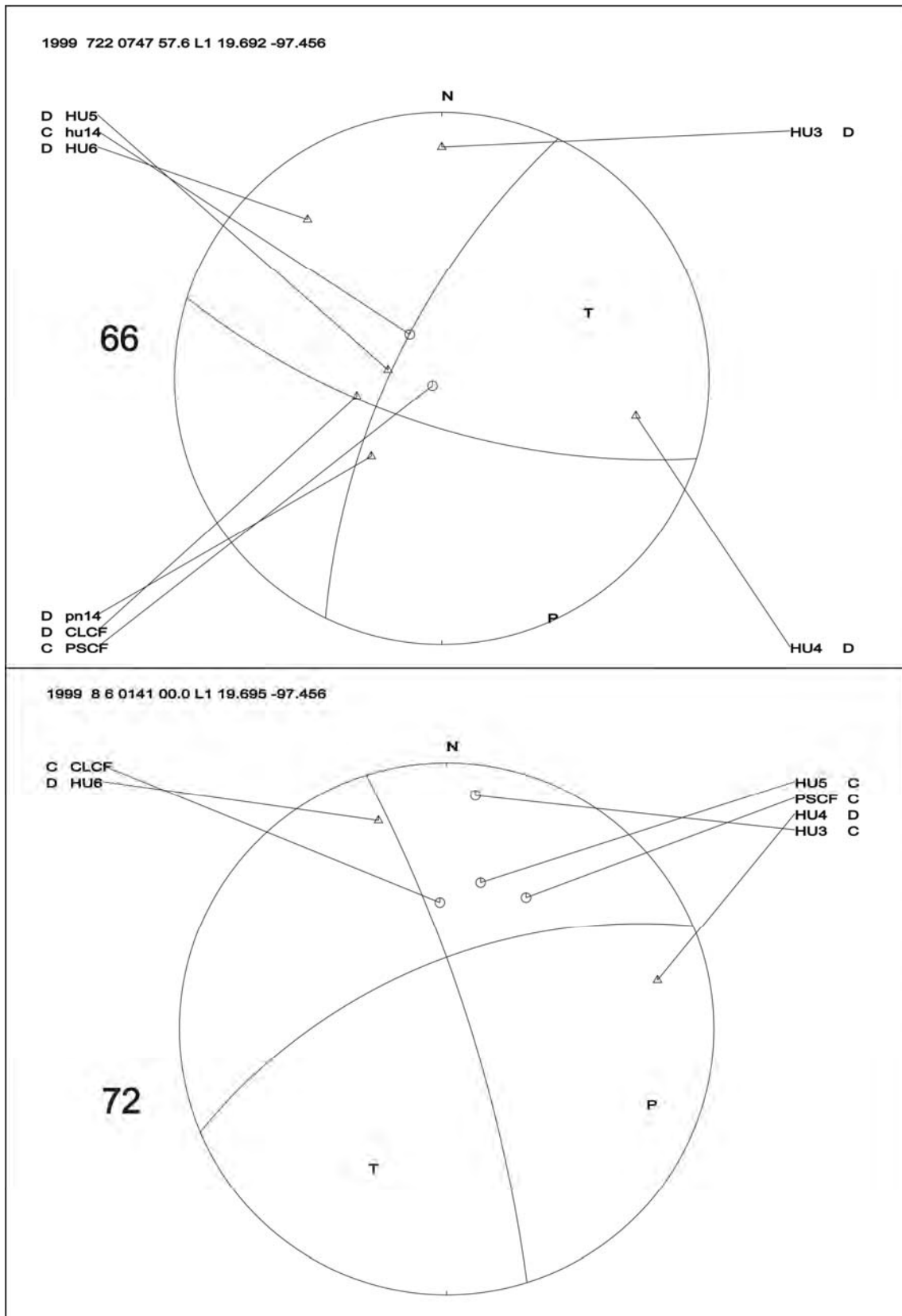


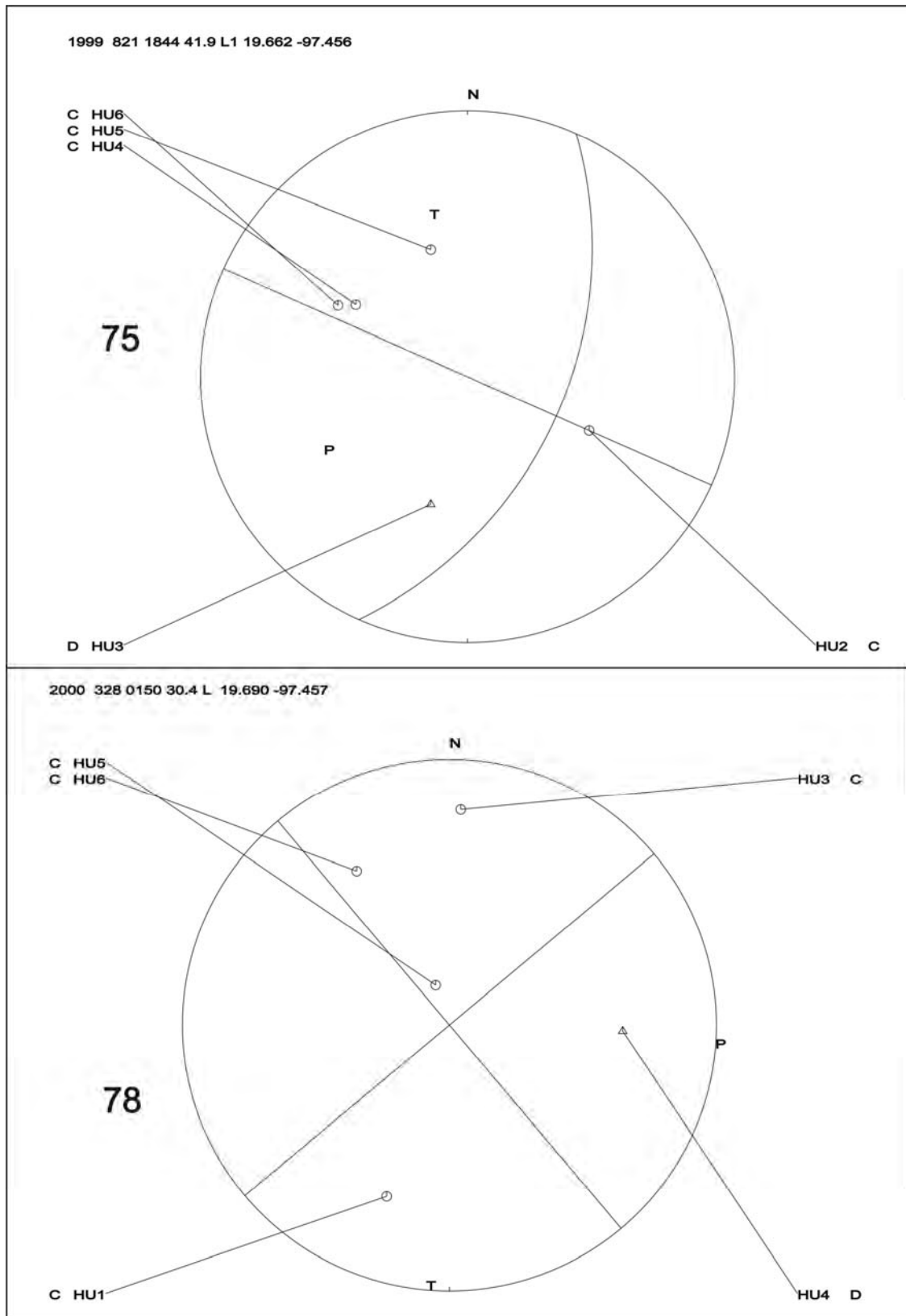


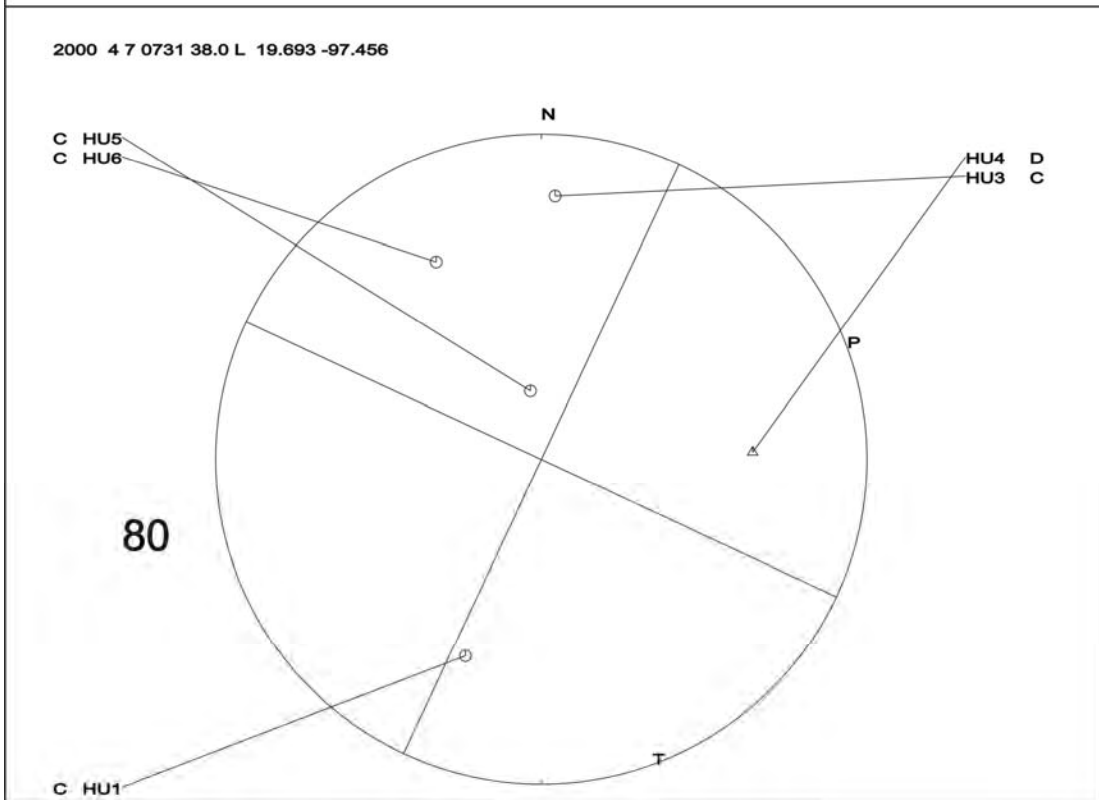
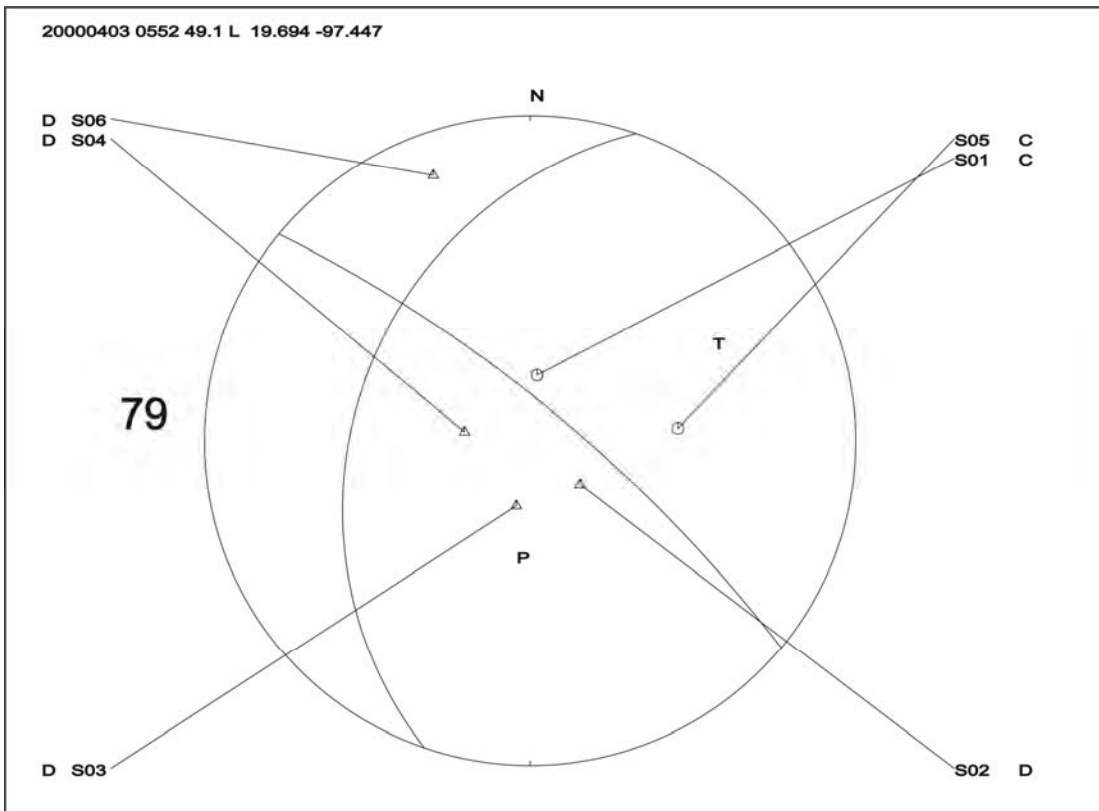


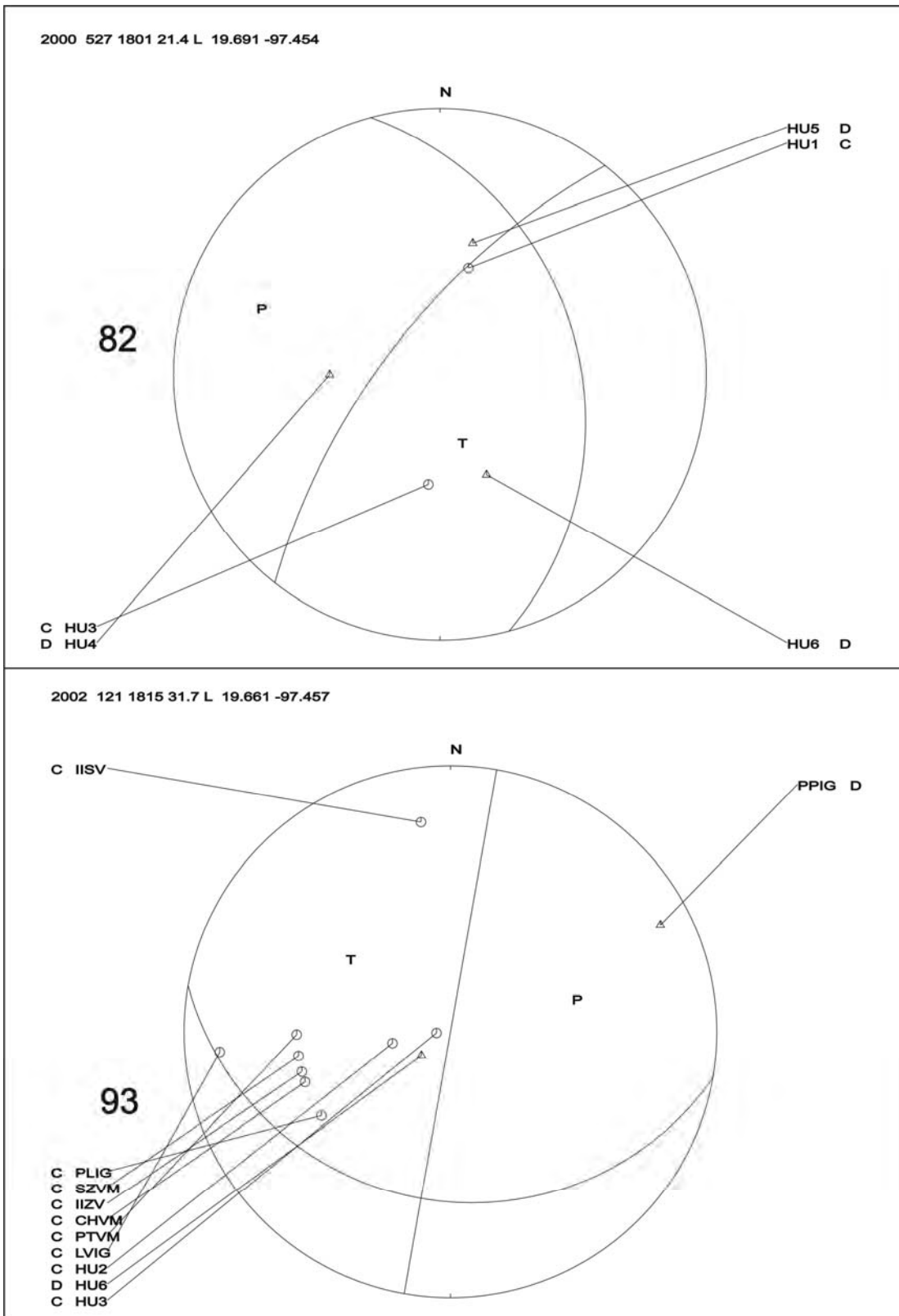








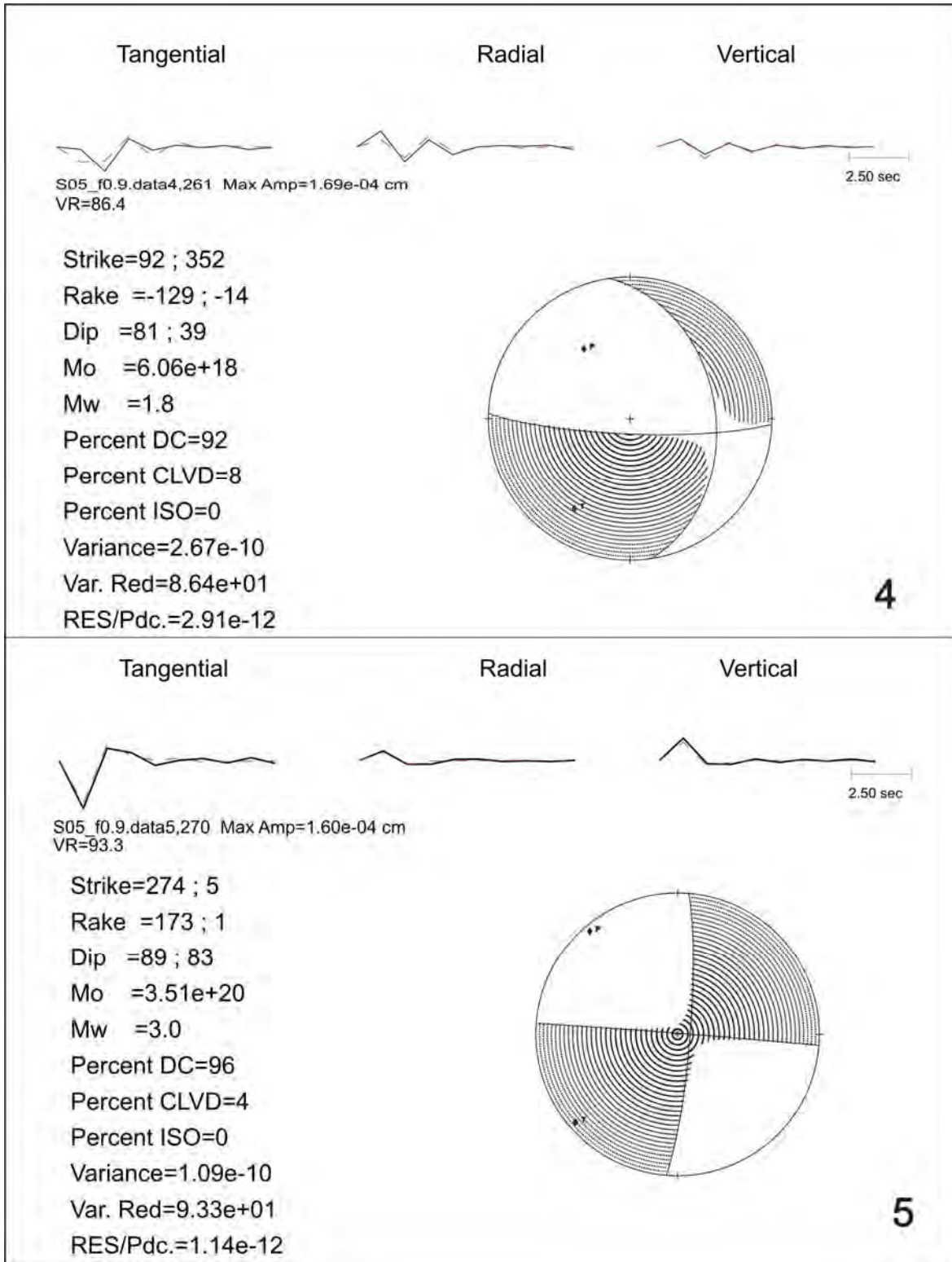


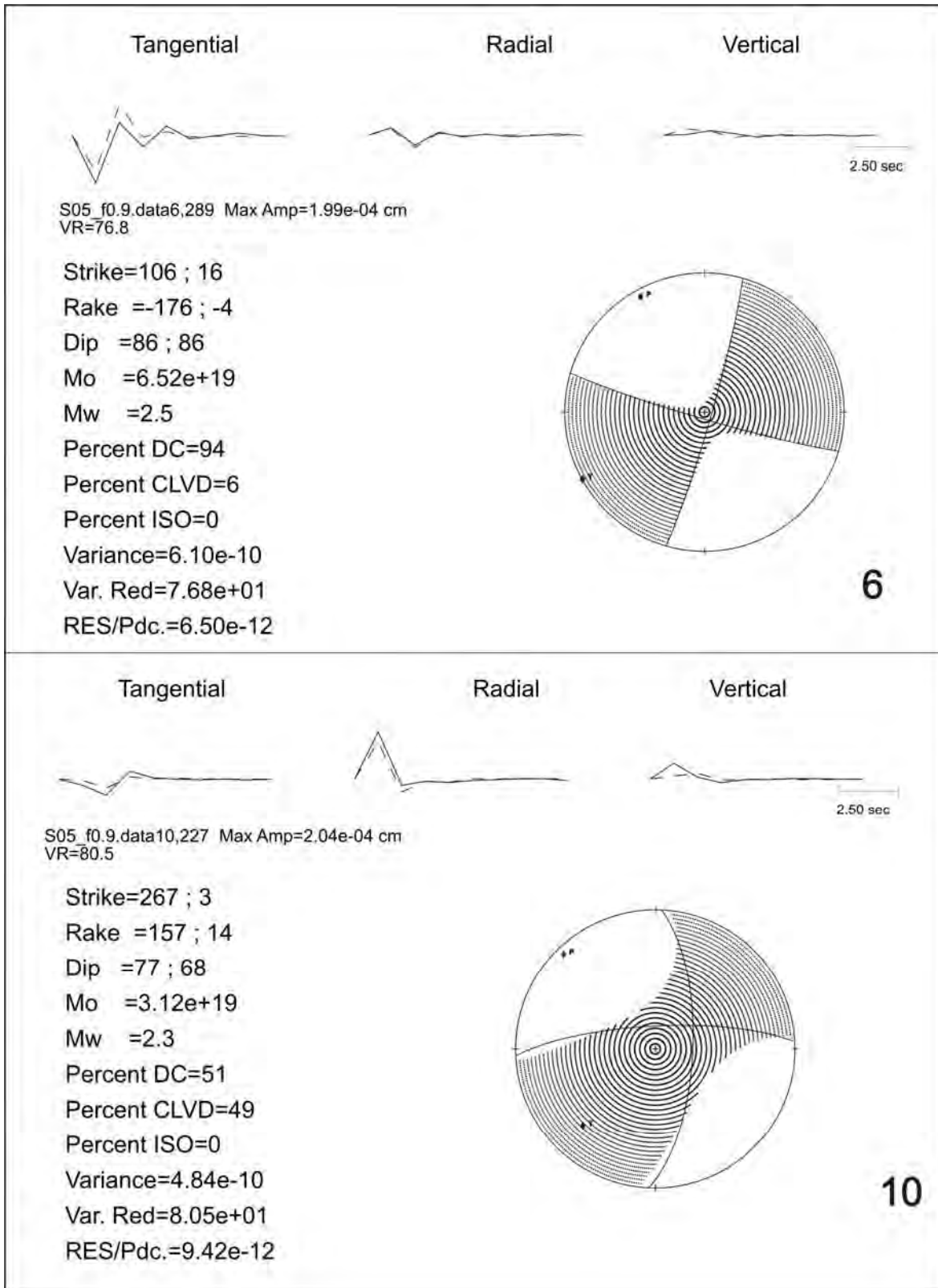


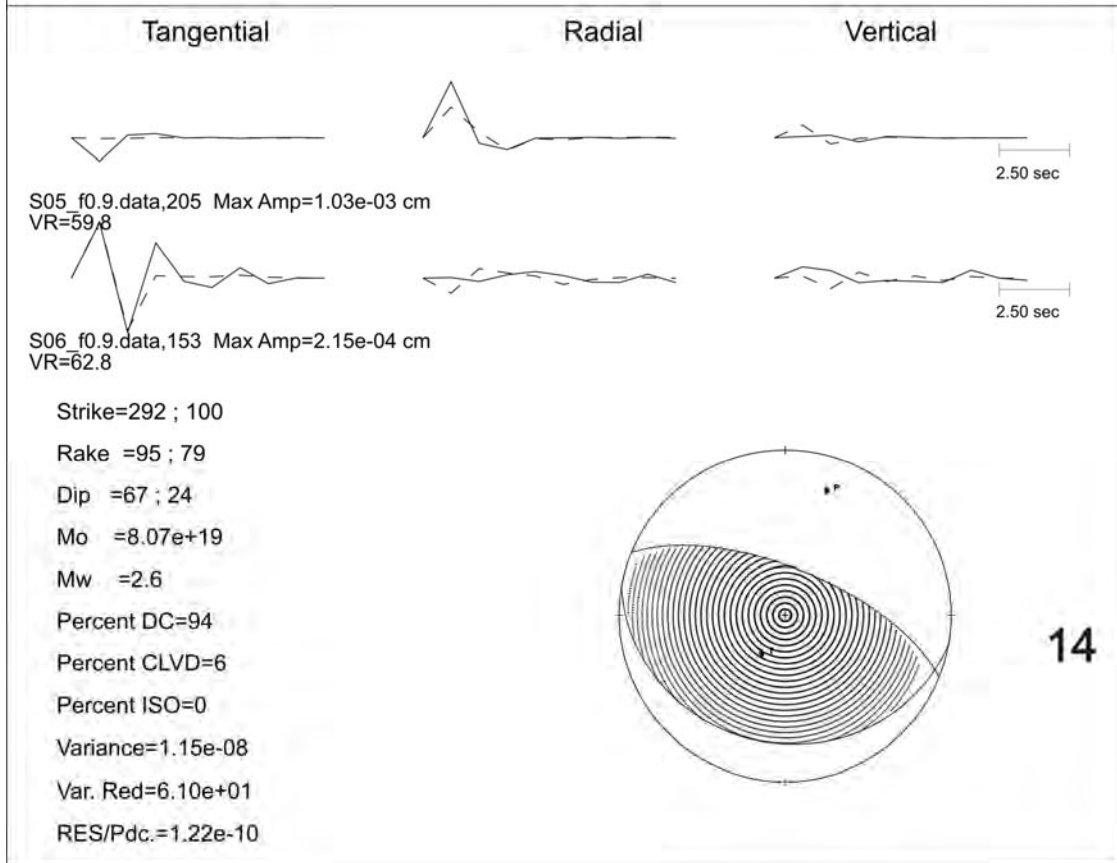
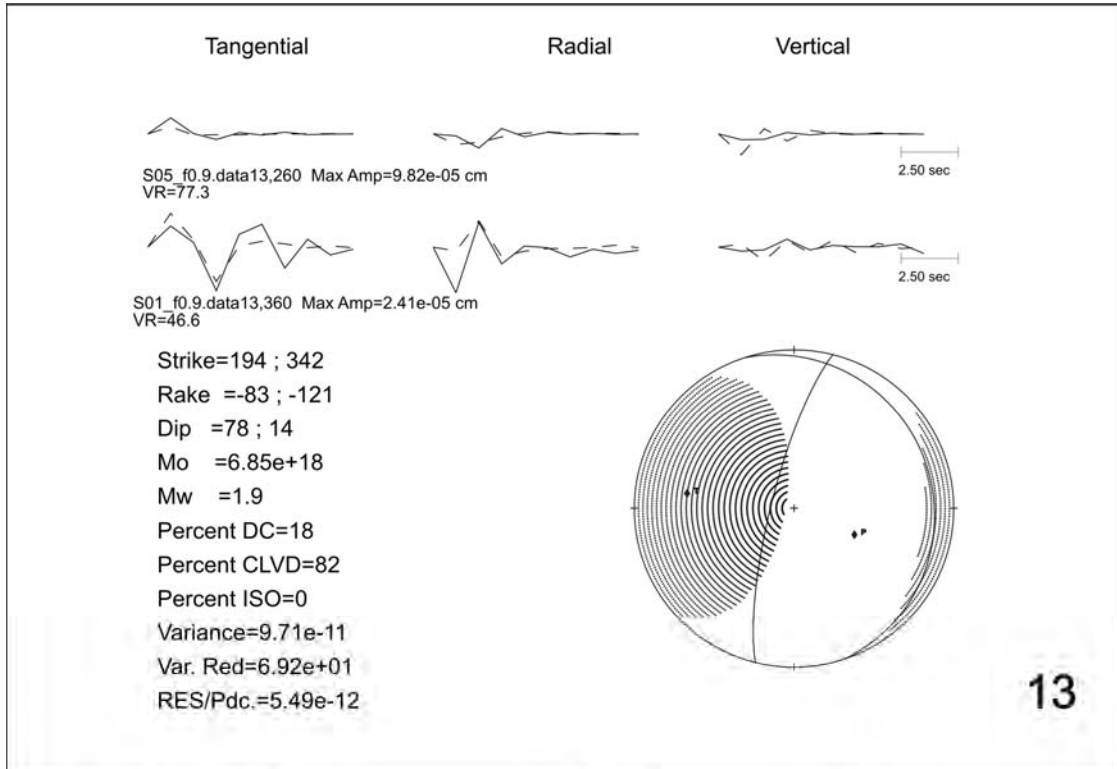
ANEXO 2

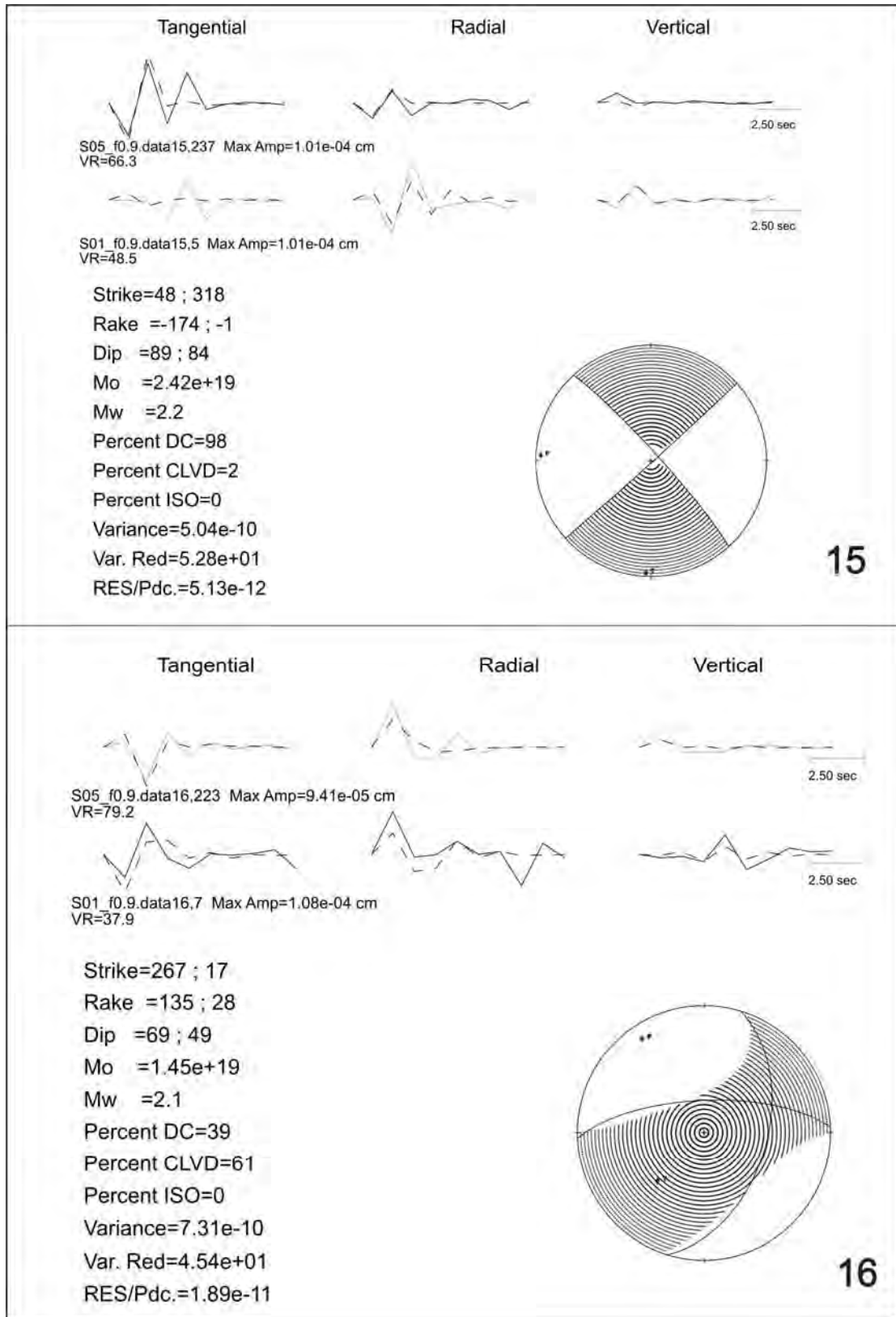
MECANISMOS DE TENSOR DE MOMENTO

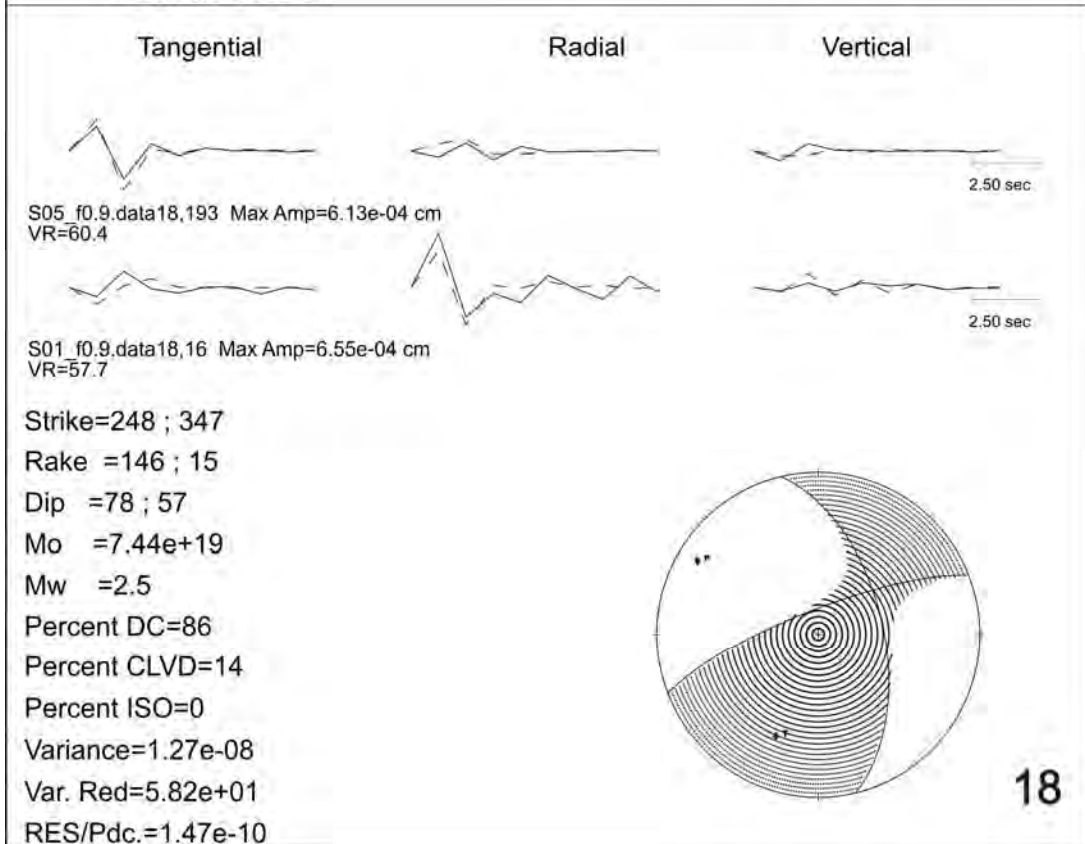
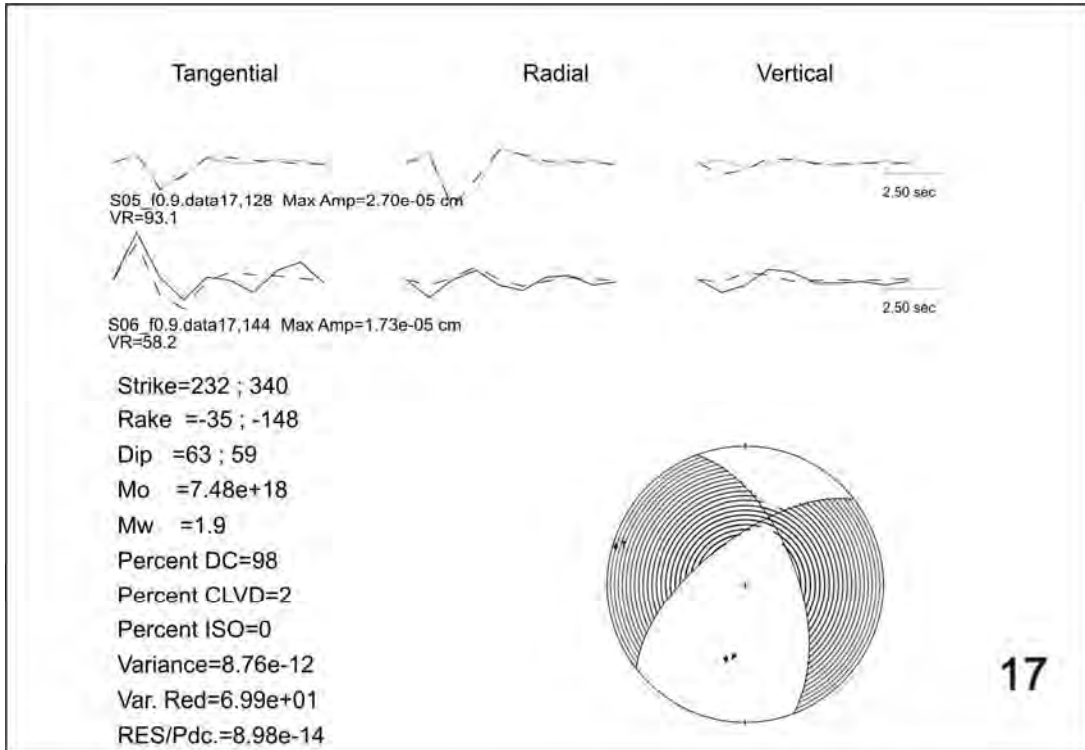
En este anexo, se presenta el total de mecanismos de tensor de momento obtenidos con una y dos estaciones. Cada uno de ellos esta identificado con el número de sismo mostrado en la Tabla 4 y 5. Otros, ver Figura 15.

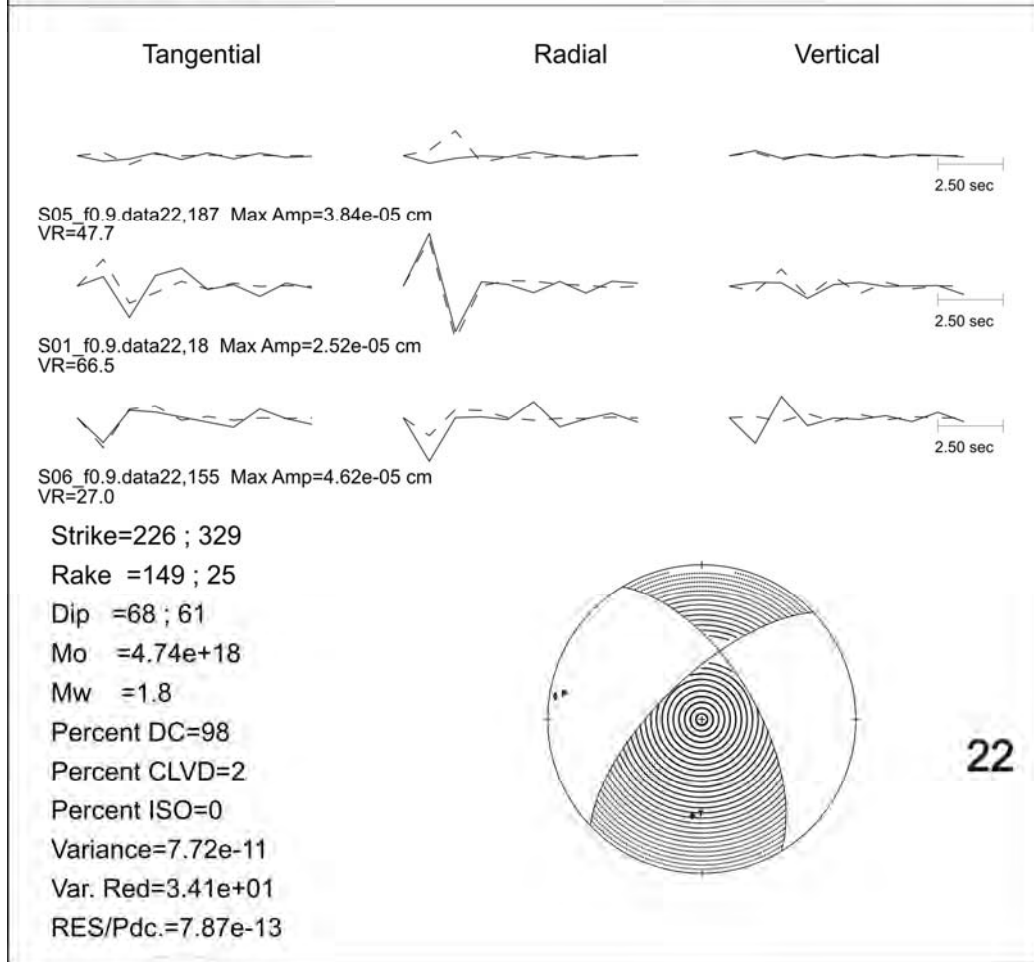
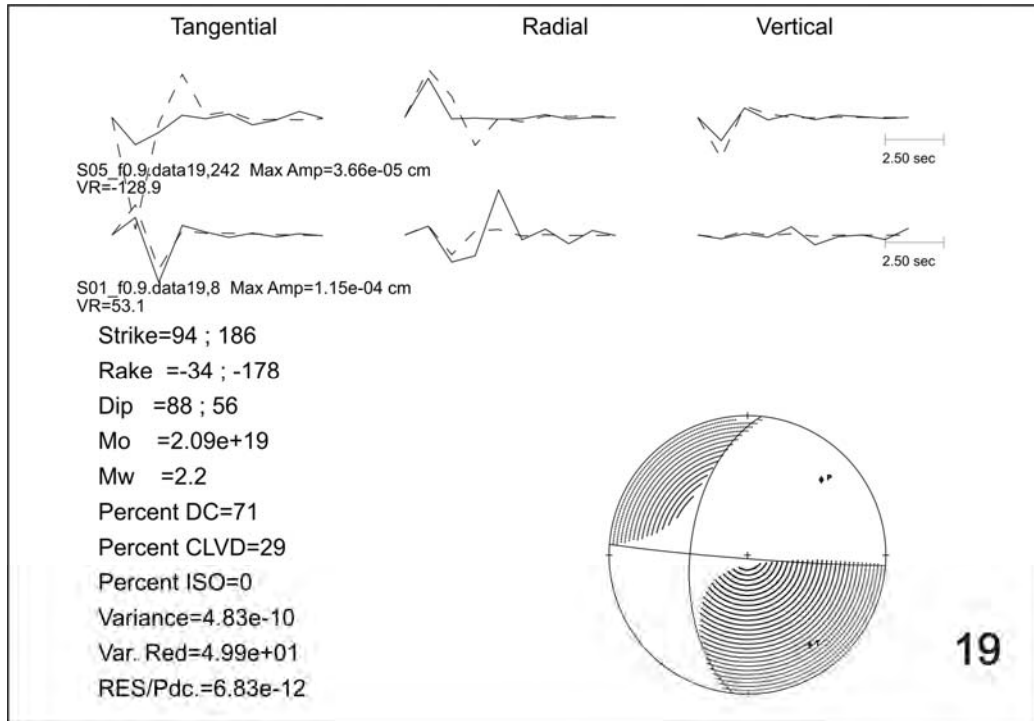


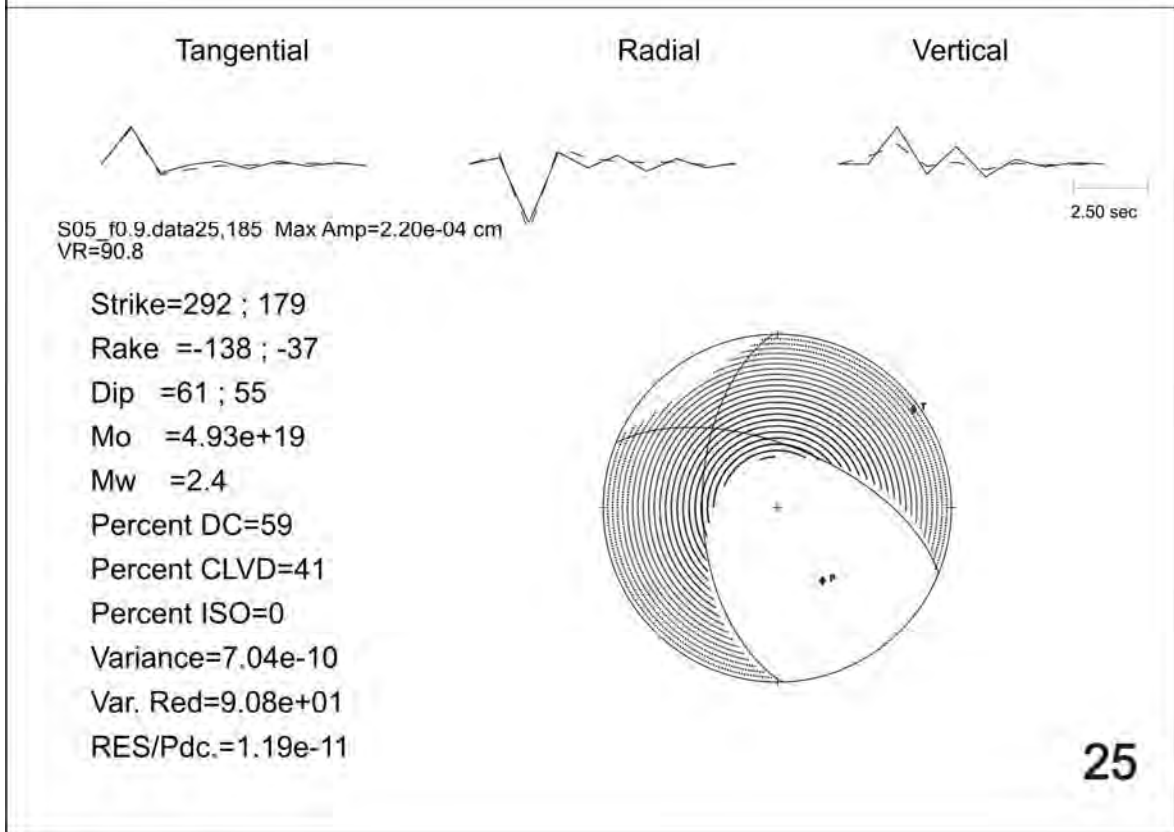
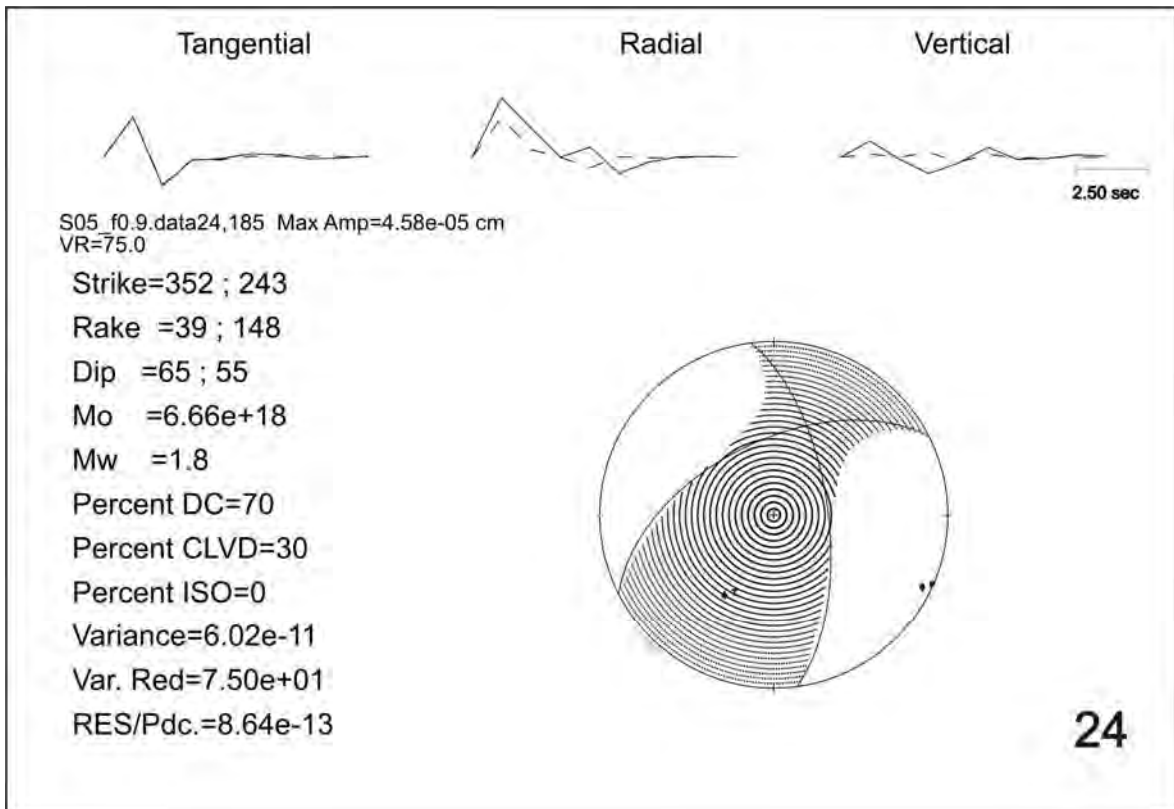


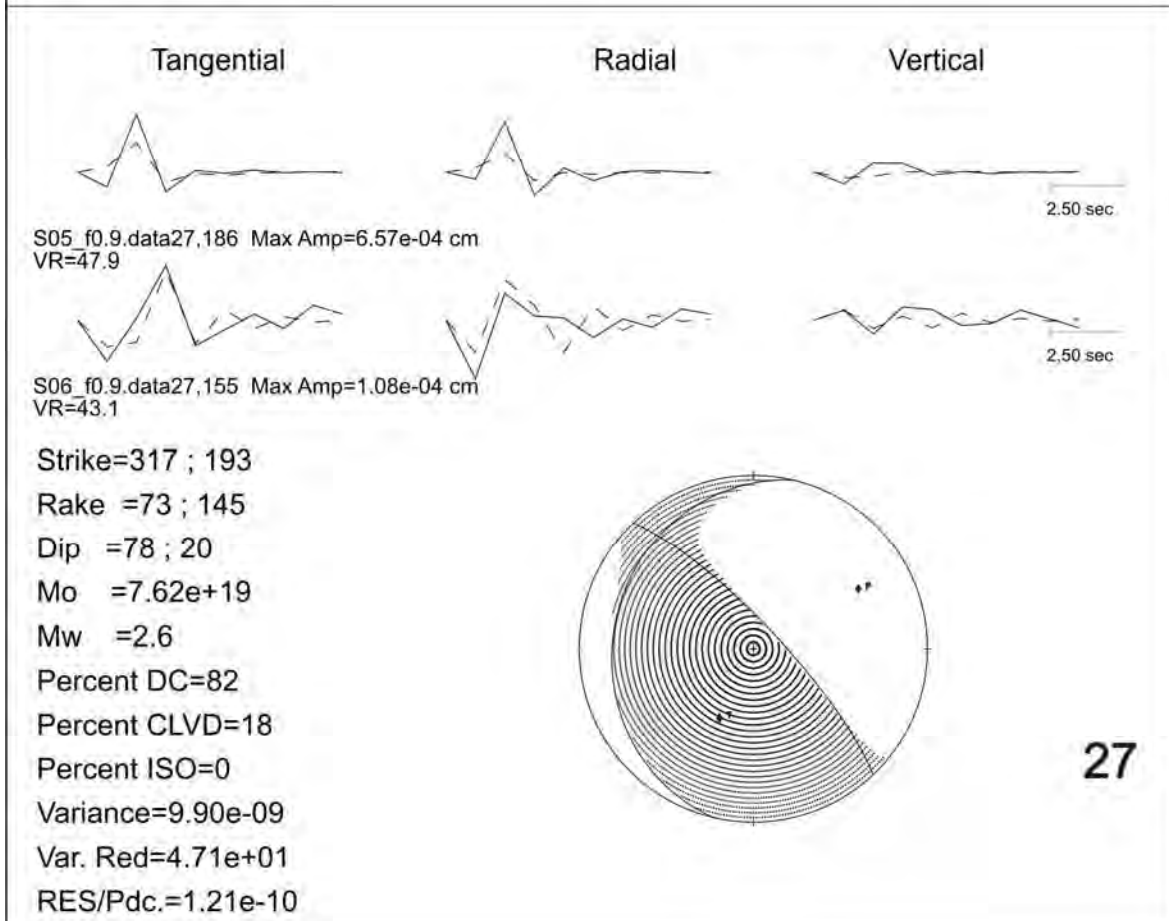
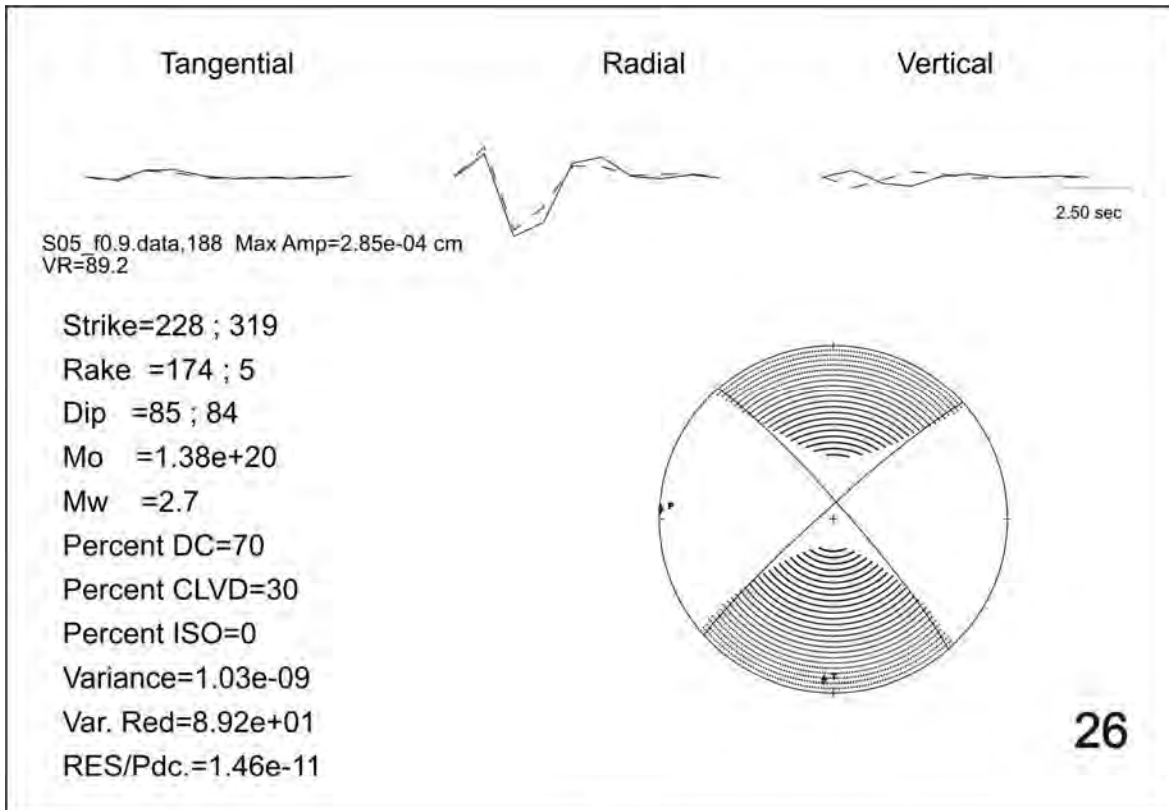


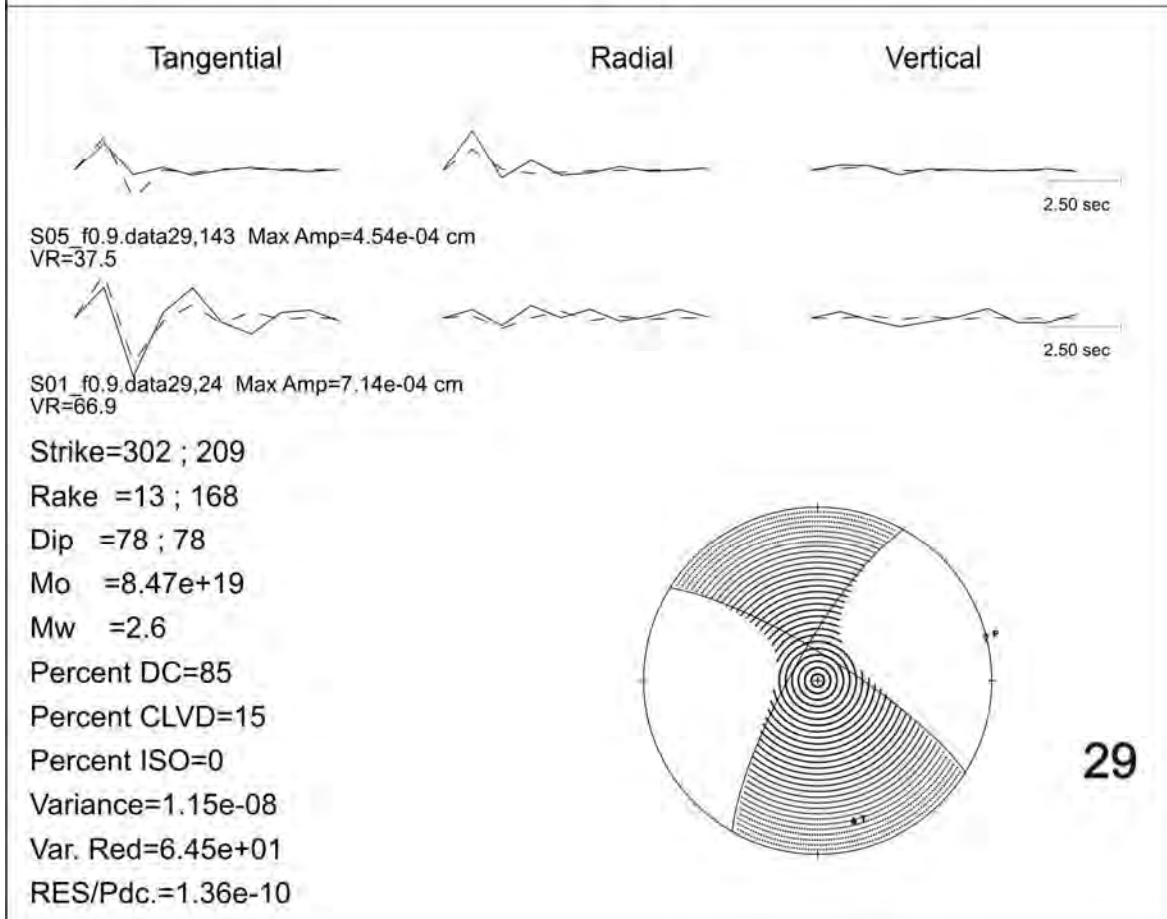
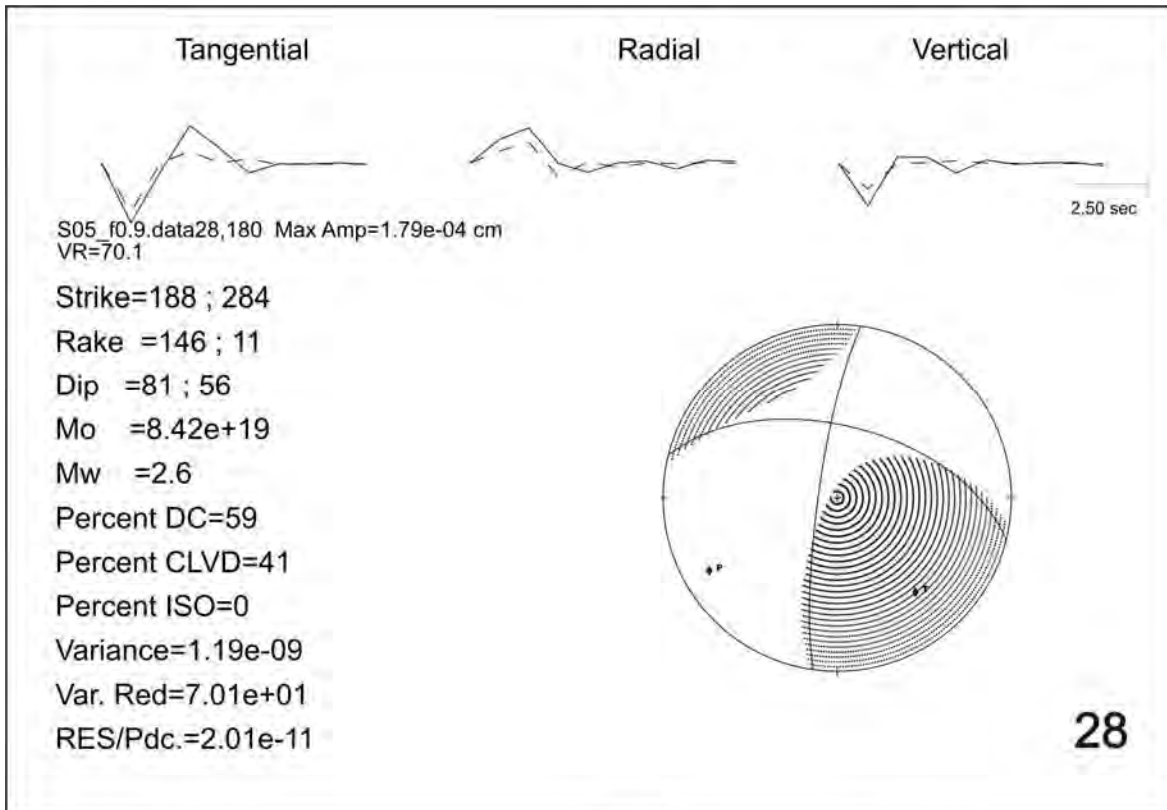


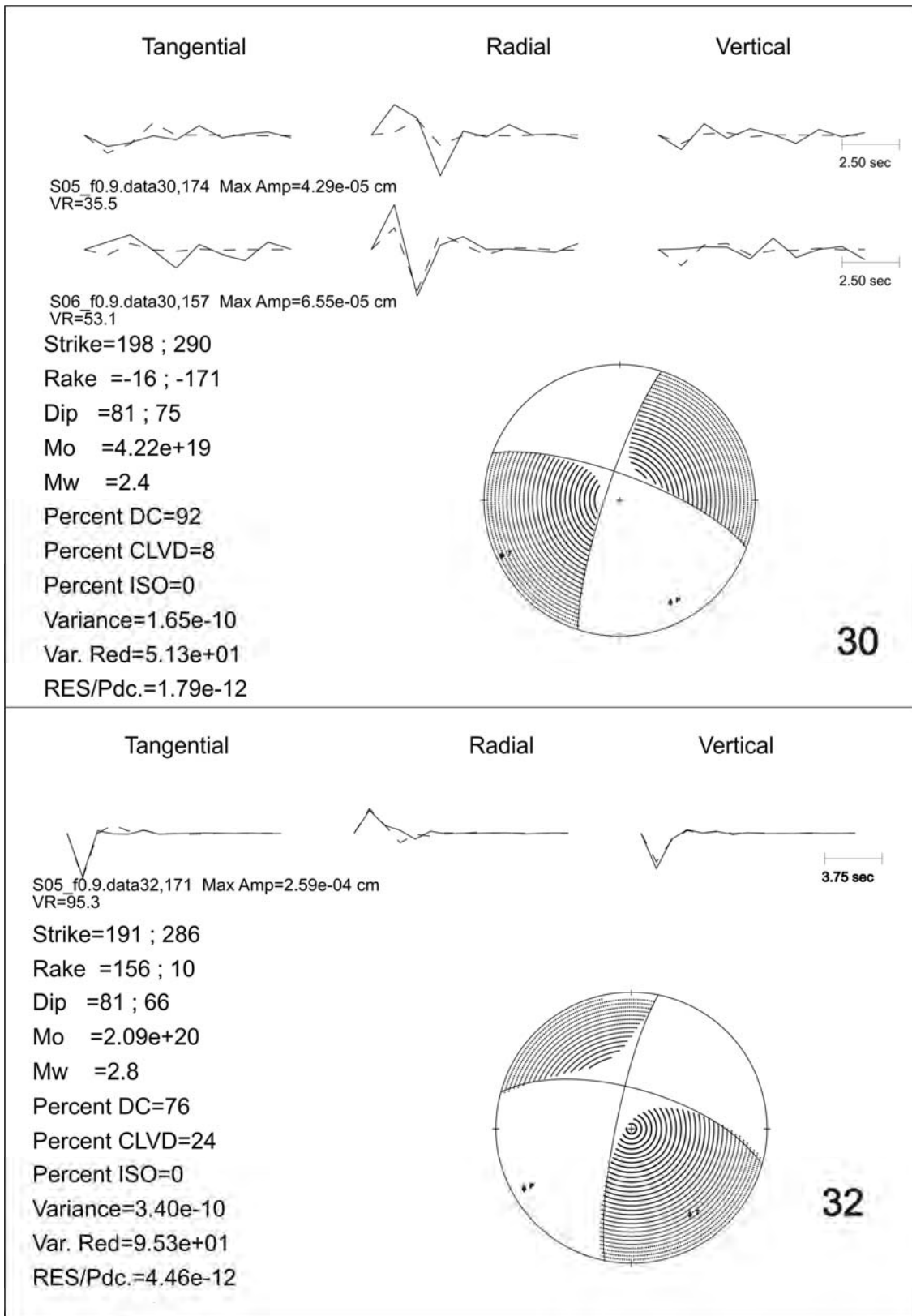


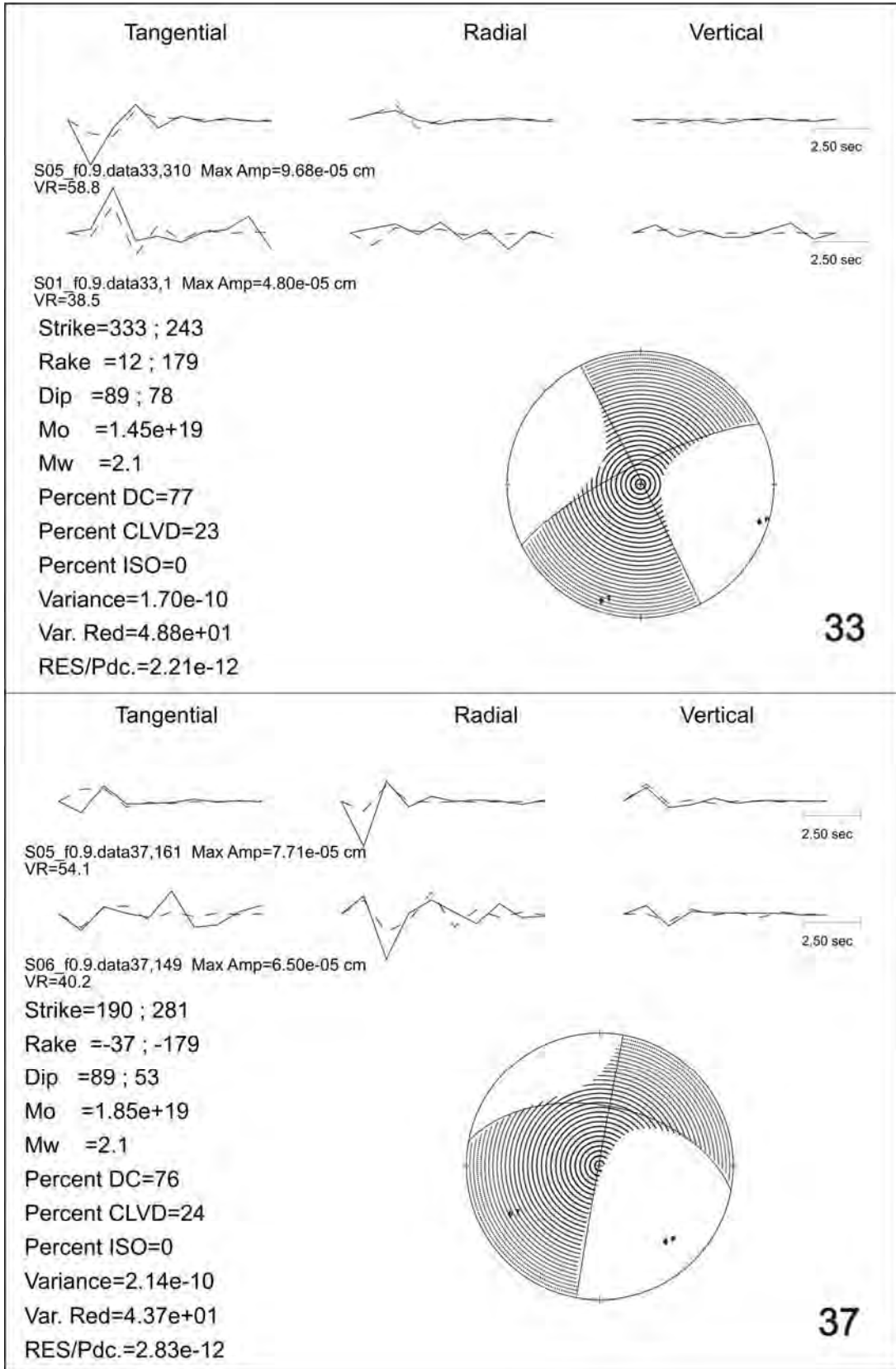


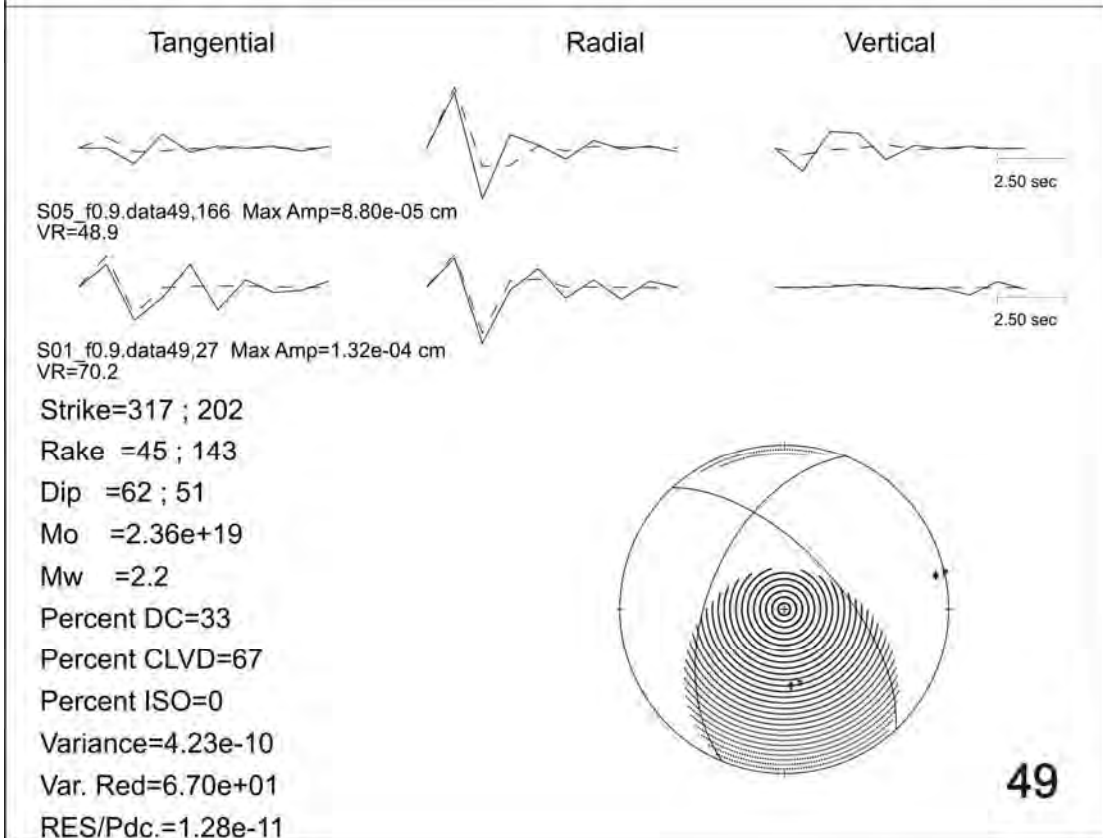
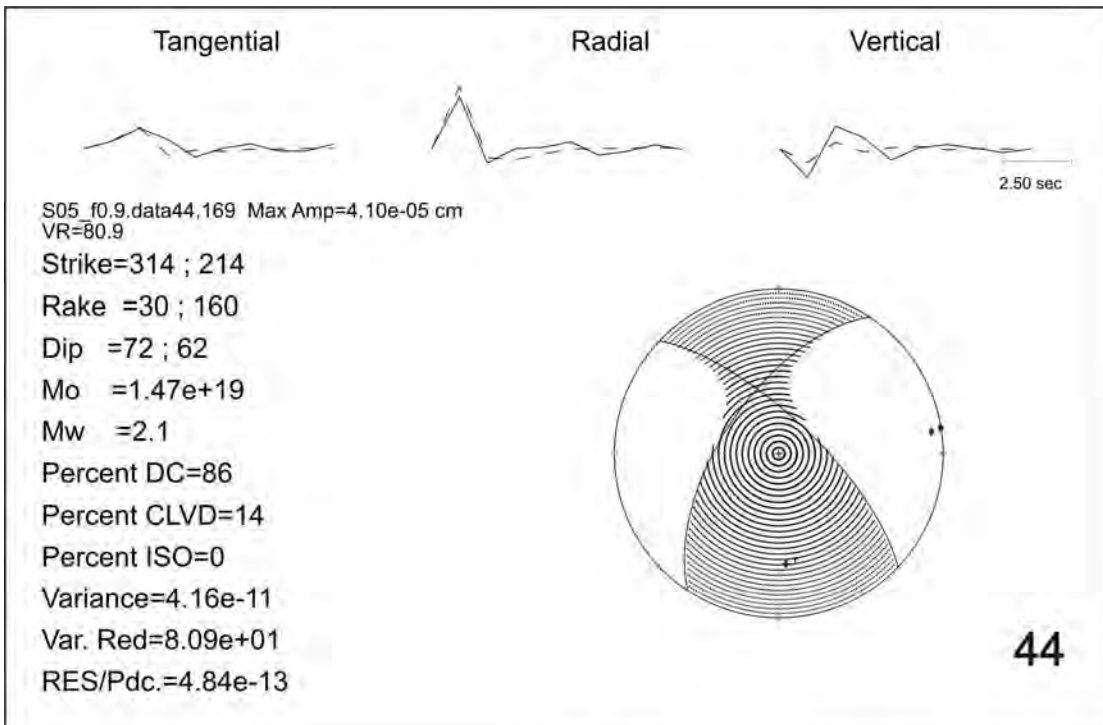


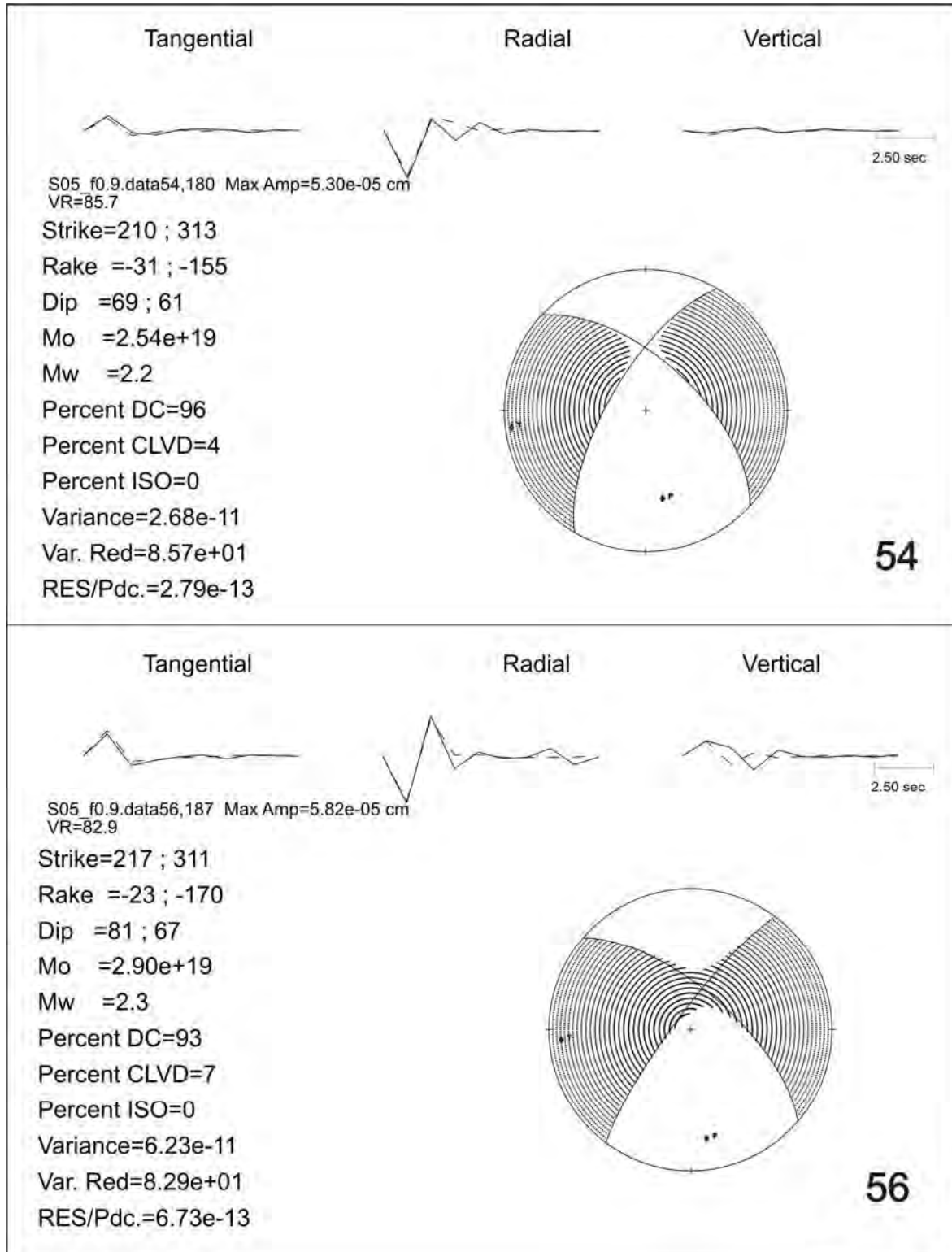


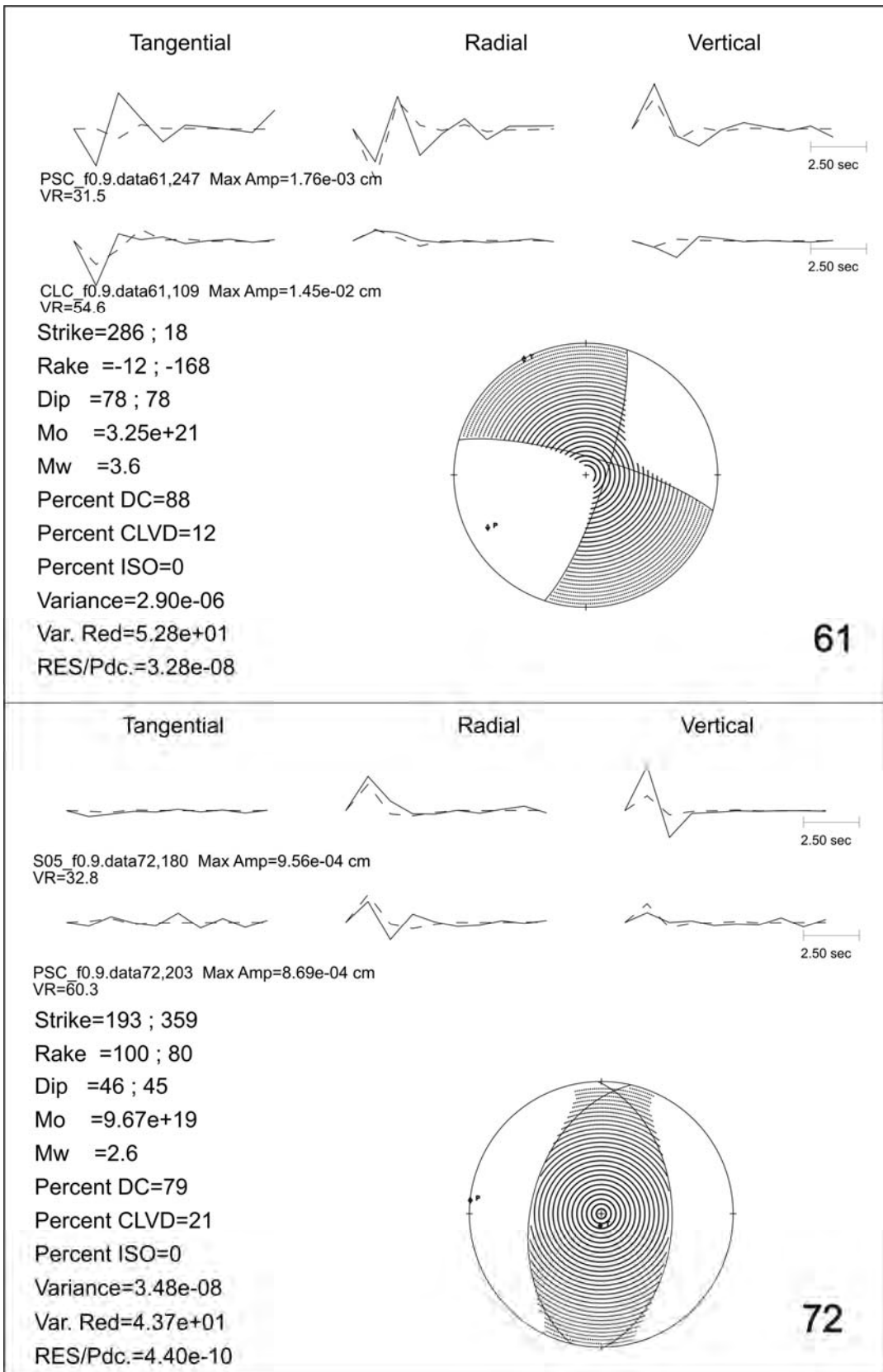


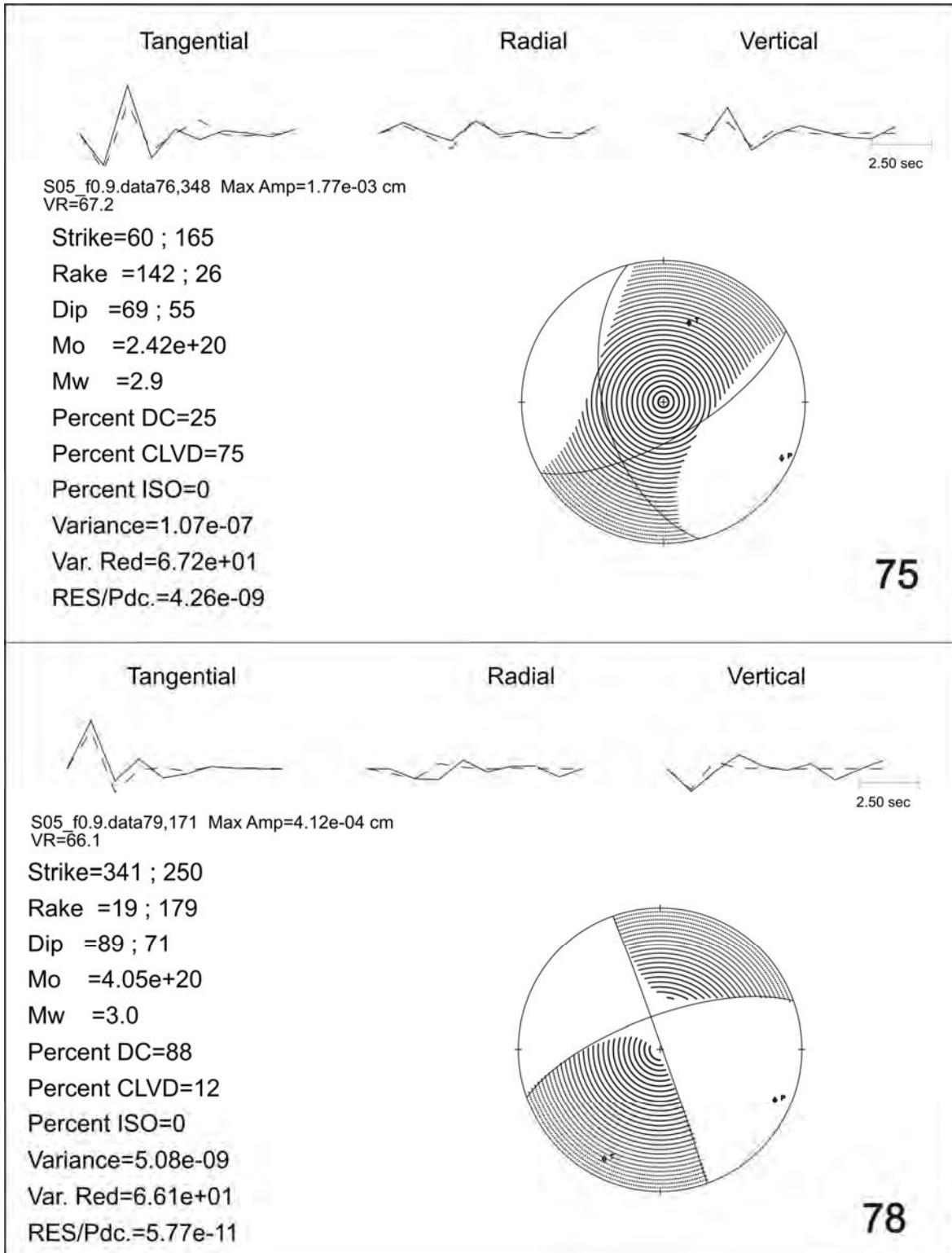


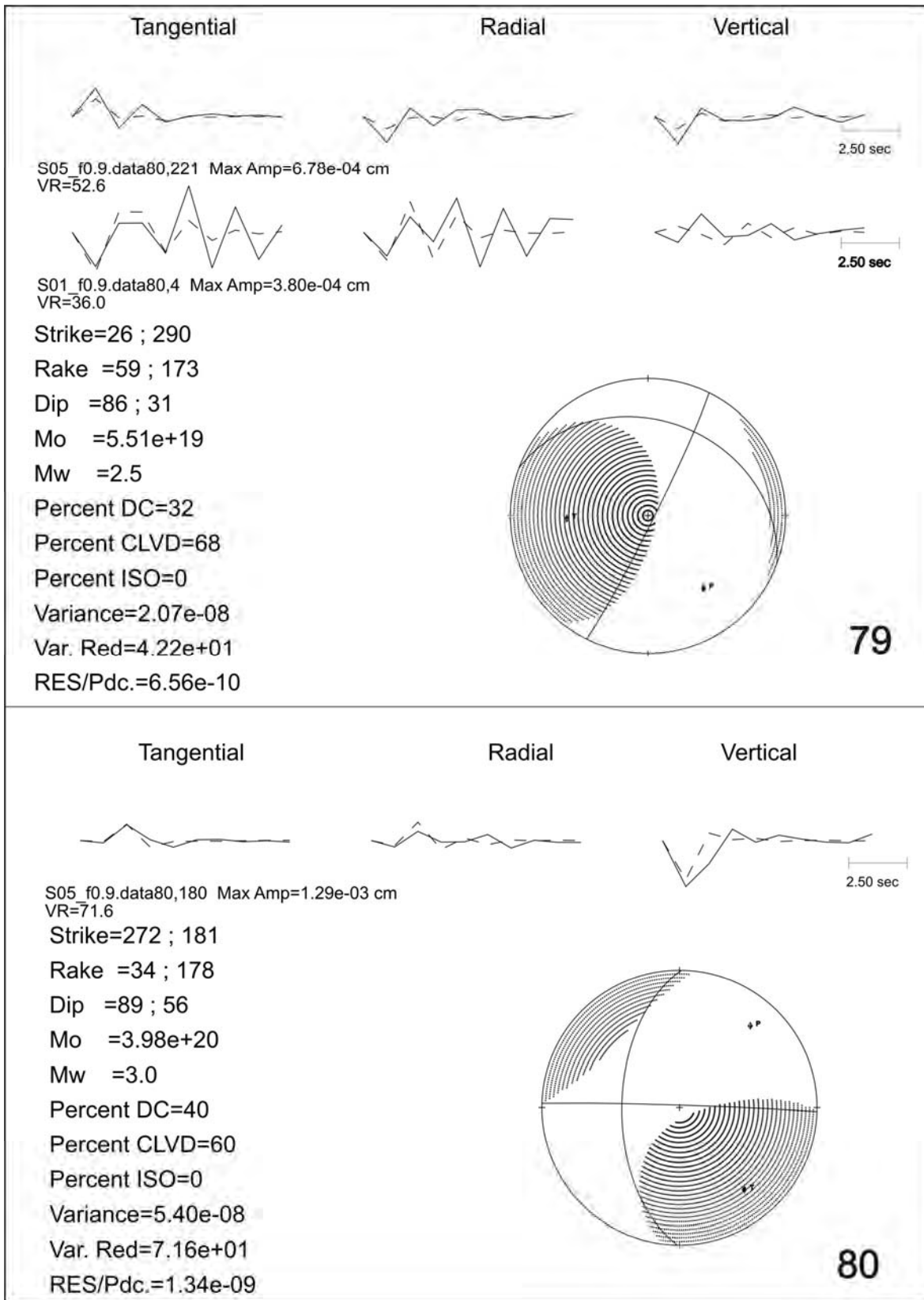


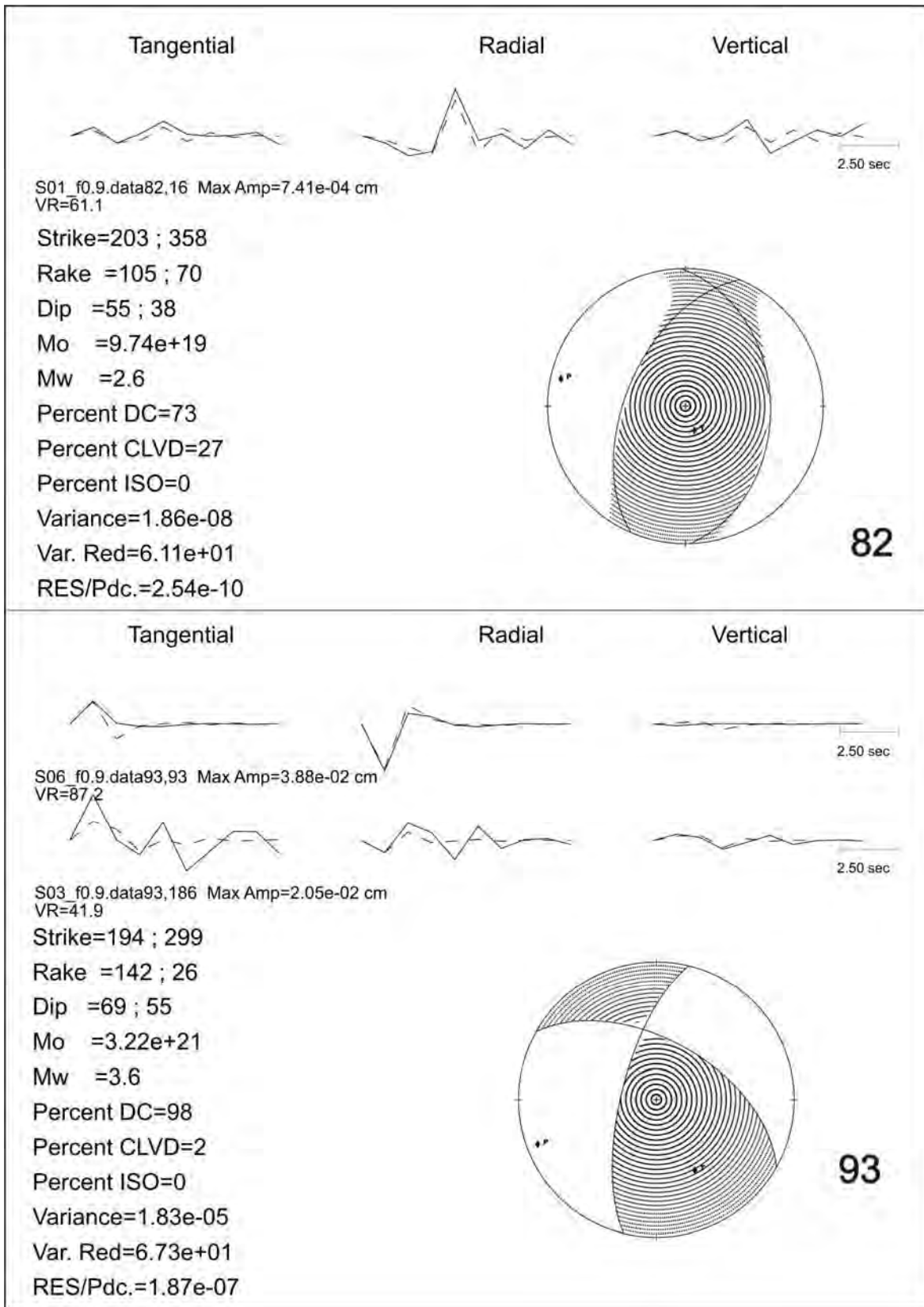












ANEXO 3

MAGNITUD DE DURACIÓN CORREGIDA (Md*)

En la presente Tabla, se presenta la magnitud de duración corregida de los sismos localizados en el campo geotérmico de Los Humeros, utilizando para ello la ecuación propuesta en este estudio. En color rojo, se resalta los sismos invertidos (Tabla 6) con el tensor de momento y con los cuales se propuso Md*. La magnitud de duración ha sido corregida solamente en la estación S06. Los asteriscos (***) muestran que para ese número de sismos, la Md no ha sido calculada, ya que no tiene el registro de duración en la estación S06.

<i>NºSismo</i>	<i>Md inicial</i>	<i>Mw</i>	<i>T (s)</i>	<i>D (km)</i>	<i>Md* propuesto</i>
1	***				
2	0.9		13	5.3	1.43
3	0.9		12	4.7	1.40
4	1.3		16	3.9	1.64
5	***				
6	1.3		20	4.0	1.80
7	0.9		13	3.8	1.50
8	1.7		36	4.9	2.17
9	1.2		13	4.2	1.48
10	***				
11	0.9		11	3.9	1.38
12	1.3		18	4.2	1.71
13	1.1	1.9	14	3.0	1.88
14	1.7	2.6	26	3.0	2.32
15	1.5	2.2	21	3.0	2.17
16	1.5	2.1	21	3.0	2.17
17	1.1	1.9	15	4.0	1.98
18	***				
19	***				
20	1.3		14	4.1	1.54
21	1.5		16	4.1	1.63
22	1.0	1.8	13	4.0	1.88
23	1.3		15	4.0	1.59
24	1.5		17	4.5	1.66
25	1.9		14	4.5	1.52
26	2		18	5.3	1.66
27	2.0	2.6	35	3.0	2.57
28	1.9		18	4.5	1.70
29	2.0	2.6	35	4.0	2.58
30	1.8	2.4	30	4.0	2.47
31	1.6		17	5.8	1.59
32	***				
33	1.6	2.1	23	2.0	2.19
34	1.7		19	4.3	1.74
35	1.7		22	4.5	1.84
36	1.7		19	4.5	1.73
37	1.5	2.1	22	4.1	2.26
38	1.6		17	4.4	1.66
39	***				
40	1.5		22	4.5	1.84
41	1.4		15	4.0	1.59
42	***				
43	1.4		16	4.6	1.61
44	1.7		22	5.3	1.80
45	1.5		20	4.7	1.76
46	1.6		19	4.2	1.75

<i>NºSismo</i>	<i>Md inicial</i>	<i>Mw</i>	<i>T (s)</i>	<i>D (km)</i>	<i>Md* propuesto</i>
47	1.7		19	5.4	1.69
48	1.2		13	4.6	1.46
49	1.6	2.2	24	4.0	2.31
50	1.5		16	4.5	1.61
51	1.5		13	4.7	1.46
52	1.6		17	4.4	1.66
53	1.6		22	4.8	1.82
54	1.3		15	5.3	1.53
55	1.3		12	2.6	1.50
56	1.2		16	4.5	1.61
57	1.4		20	4.2	1.79
58	1.1		16	5.4	1.57
59	1.5		15	2.0	1.69
60	1.6		22	5.1	1.81
61	2.2	2.9	45	6.0	2.86
62	***				
63	***				
64	***				
65	1.2		18	5.0	1.67
66	***				
67	***				
68	***				
69	***				
70	***				
71	***				
72	2.1	2.6	40	4.0	2.67
73	***				
74	***				
75	***				
76	1.1		15	4.4	1.57
77	***				
78	1.3		19	5.0	1.71
79	1.4	2.5	20	4.0	2.18
80	1.3		20	5.1	1.74
81	1.6		17	4.4	1.66
82	1.4		18	4.1	
83	1.0		13	3.8	1.50
84	***				
85	1.2		18	2.7	1.78
86	1.0		11	1.5	1.49
87	1.4		20	4.7	1.76
88	1.0		15	4.1	1.59
89	1.5		22	4.8	1.82
90	1.2		14	4.2	1.53
91	1.3		18	4.4	1.70
92	1.6		25	4.1	1.95
93	3.2	3.6	180	1.9	3.64

<i>NºSismo</i>	<i>Md inicial</i>	<i>Mw</i>	<i>T (s)</i>	<i>D (km)</i>	<i>Md* propuesto</i>
94	1.7		26	4.2	1.97
95	1.8		32	4.1	2.12