



## XVIII Congreso Peruano de Geología

# SÍSMICA PASIVA EN EL CAMPO GEOTÉRMICO DE LOS HUMEROS, PUEBLA-MÉXICO Y SU RELACIÓN CON LOS POZOS INYECTORES

Javier Lermo<sup>1</sup>, Cecilia Lorenzo<sup>2</sup>, Yanet Antayhua<sup>1,3</sup>, Erik Ramos<sup>1</sup> y Nallely Jiménez<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Instituto de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, México (jlermos@iingen.unam.mx)

<sup>2</sup> Gerencia de Proyectos Termoeléctricos, Subgerencia de Estudios, Departamento de Exploración, Morelia, México

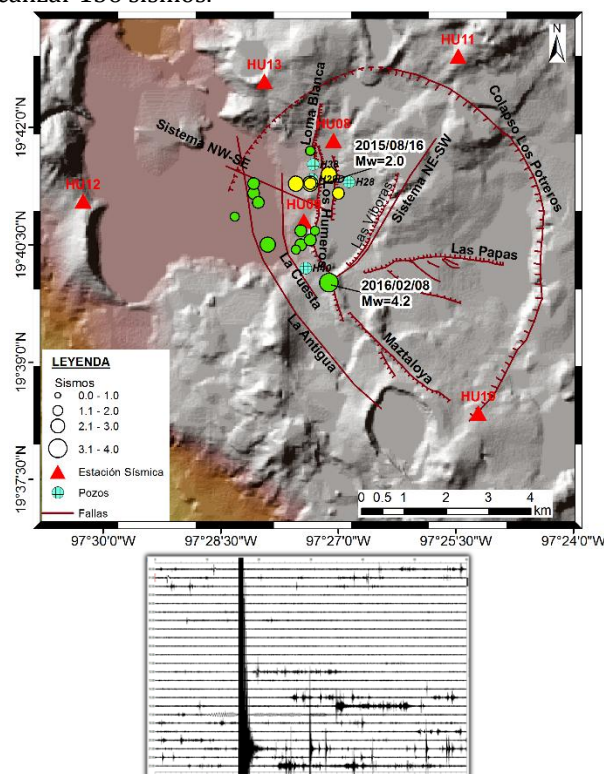
<sup>3</sup> Instituto de Geofísica, Universidad Nacional Autónoma de México, México

### 1. Introducción

Dentro del proyecto de investigación “Innovación en la aplicación de técnicas modernas de prospección geotérmica a partir de la integración de métodos geológicos, geoquímicos y geofísicos, caso de estudio del campo volcánico-geotérmico de Los Humeros”, dirigida por el Centro de Geociencias, de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), patrocinada por el Consorcio del Centro Mexicano de innovación en energía geotérmica (CEMIE-Geo), le asignó al Instituto de Ingeniería de la UNAM, el trabajo denominado “Monitoreo sísmico del campo geotérmico utilizando la red sísmica de Los Humeros (RSHU)”; con el objetivo de monitorear el campo geotérmico y procesar los registros continuos de las estaciones sísmicas de banda ancha, con el fin de analizar la sismicidad dentro del campo, resaltando nuevas zonas de enjambres sísmicos y su relación con los pozos productores e inyectores (Lermo et al., 2008; Antayhua et al., 2008).

La red sísmica permanente del campo geotérmico de Los Humeros, propiedad de la Comisión Federal de Electricidad-Residencia Los Humeros, consta de seis sismógrafos digitales de banda ancha, autónoma y distribuida alrededor del campo (RSHU), como se puede observar en la parte superior de la Figura 1. El análisis de los tipos de eventos sísmicos, se realizó aprovechando las características de un sismógrafo de banda ancha, que registra archivos de una hora. De esta manera, más de 300 sismos locales fueron registrados durante el periodo de

julio 2014 a febrero del 2016, de los cuales se pudo localizar 156 sismos.



**Figura 1.** Parte superior, distribución espacial del sismo del 16 de agosto de 2015 ( $M_w=2.0$ ) y sus réplicas (círculos amarillos); y del sismo del 08 de febrero de 2016 ( $M_w=4.2$ ) y sus réplicas (círculos verdes). Parte inferior, ejemplo del tambor de 24 horas de registro para el 8 de febrero del 2016, en la estación El Hillo (HU11).

**2. Procesado**

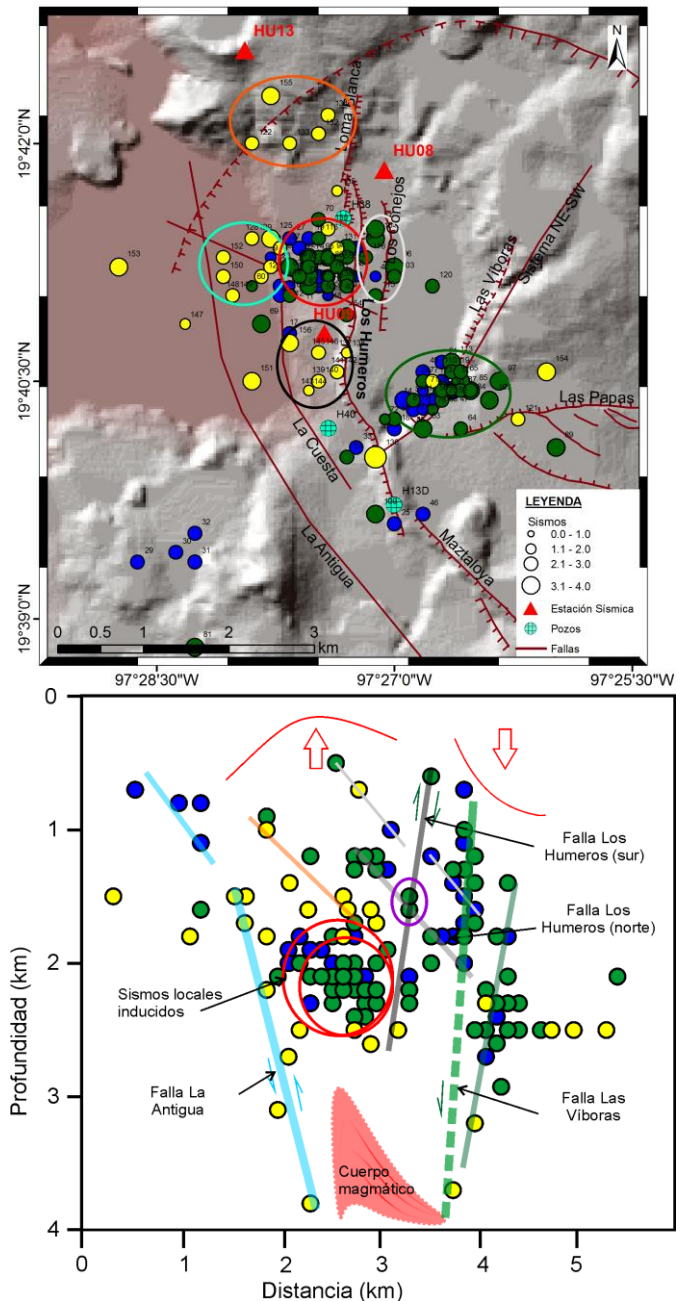
Para obtener los parámetros hipocentrales, se utilizó el programa de localización SEISAN v.10.1 (Otomoller et al., 2013). Este programa, además del modelo de velocidad de capas planas, relación de velocidad y lecturas de los tiempos de arribo (P y S), utiliza las coordenadas y elevación de las estaciones sísmicas, la duración del sismo y una ecuación para estimar la magnitud de coda (Md).  $Md = -1.59 + 2.4 \log_{10}(T) + 0.00046D$  (Havskov & Macías, 1983), donde Md es la magnitud de duración en grados, T la duración total del sismo en segundos y D la distancia epicentral en km. En la Tabla 1, se muestra el modelo de velocidad.

**Tabla 1. Modelo de velocidad obtenido por Lermo (2001).**

Prof (km)	0.00	0.24	0.65	1.25	1.79	1.93	2.13	2.37	30.0
Vp (km/s)	1.24	1.94	2.85	3.54	3.69	3.90	4.14	5.18	6.00

La distribución espacial de los 179 sismos localizados se pueden observar en figura 2. Donde los sismos presentan magnitudes Md entre 0.9 y 3.6, mientras que la profundidad de los mismos se concentran desde 0.6 hasta 3.8 km. Los errores de localización hipocentral (latitud, longitud y profundidad) son menores a 0.3 km. En la misma figura, se muestra una interpretación preliminar de la sismicidad en planta y en perfil oeste-este. Para iniciar esta interpretación hemos introducido a este modelo un cuerpo magmático interpretado recientemente por métodos de tomografía sísmica por atenuación a partir de ondas de coda Qc y magnetotelúricos (Antayhua et al., 2008; Arzate et al., 2016 en elaboración). Este cuerpo magmático se muestra en la parte sur del campo, debajo del cruce de las fallas activas de los Humeros y las Víboras, donde precisamente tuvo su origen el sismo más grande (Mw=4.2) que se ha registrado dentro de este campo geotérmico, como se puede observar en la Figura 1.

En el perfil oeste-este de la Figura 2, este intrusivo magmático se muestra esquematizado en color rojo, la cual se encuentra ejerciendo un empuje tectónico hacia arriba, el cual provoca la activación de por lo menos seis sistemas de fallas activos dentro del campo geotérmico: Loma Blanca, Los Humeros, Las Víboras, Las Papas, La Cuesta y La Antigua. En el perfil se resalta la localización de los sismos inducidos por el pozo inyector H38 con un círculo rojo, así como el trazo del sistema de fallas Los Humeros que muestran dos partes, resaltándolos con dos elipses grises, la parte sur con gris oscuro y la parte norte con gris claro. El sismo del 16 de agosto del 2015 (Mw=2.0), interpretado como un precursor del sismos principal del 8 de febrero del 2016 (Mw=4.2) presenta una distribución de sus réplicas hacia el este como lo sugiere el echado del sistema de fallas Los Humeros para esta parte norte (líneas rojas); mientras que las réplicas del sismos principal, presentan una distribución hacia el oeste, como también lo sugiere el echado o buzamiento de la falla mostrada con líneas rojas. Por ultimo las líneas rojas delgadas nos muestran la dirección del posible movimiento de estas fallas.



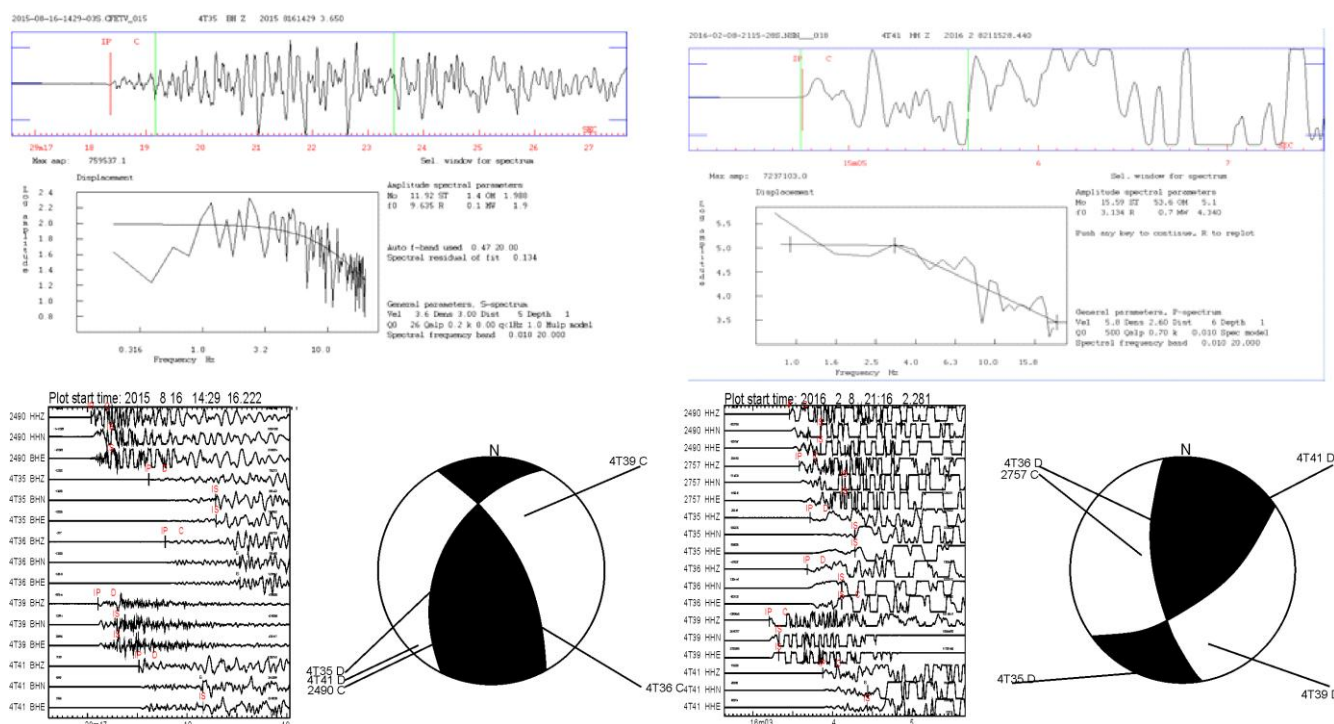
**Figura 2.** Parte superior, distribución espacial de la sismicidad para el periodo 2014 (círculos azules), distribución espacial de la sismicidad para el periodo 2015 (círculos verdes) y para los dos meses del 2016 (círculos amarillos). Parte inferior, perfil de oeste a este y distribución en planta de la sismicidad para los mismos periodos; con rayas de diferentes colores se muestra la continuación en profundidad de los sistemas de fallas activos dentro del campo, así como su desplazamiento (líneas rojas delgadas). También se han incluido la zona de sismos inducidos (círculo rojo), la ubicación de los dos sismos de mayor magnitud (círculo morado) y el cuerpo magmático que está ocasionando el estado de esfuerzos en las fallas activas.

**2.1. Análisis del temblor de Los Humeros, Pue., del 8 febrero de 2016 (Mw=4.2)**

El 16 de agosto del 2015 a las 14:29 horas y el 08 de febrero del 2016 a las 21:15 horas (GMT) se registraron dos sismos fuertes que fueron localizados sobre la traza del sistema de

fallas Los Humeros, como se puede observar en la Figura 1. Estos dos sismos fueron reportados por el Servicio Sismológico Nacional (SSN) a 24 km al noroeste de Libres, Puebla a una profundidad de 29 km y una magnitud M3.5; mientras que el sismo principal fue localizado a 7 km hacia el este de Teziutlan, Puebla a una profundidad de 20 km y magnitud M4.6. Para la determinación de su mecanismo focal, se utilizó las polaridades de los primeros arribos de los registros de la componente vertical de las cinco estaciones sísmica que conforman la RSHU. La Figura 3 muestra la ampliación de los primeros arribos de los 5 registros que captaron este sismo, con el objeto de

observar su polaridad, junto con el mecanismo focal simple obtenido, cuya solución se interpreta como una falla inversa, tomando como solución al plano de falla que tiene los siguientes parámetros: rumbo=332°, echado=61° y un desplazamiento en la falla de 42°. De igual forma para el evento principal (Figura 3) se muestran los mismos parámetros de fuente, así como su mecanismo focal simple; cuya solución también se interpreta como falla inversa, y se seleccionó los siguientes parámetros: rumbo=169°, echado=61° y un desplazamiento en la falla de 42°.



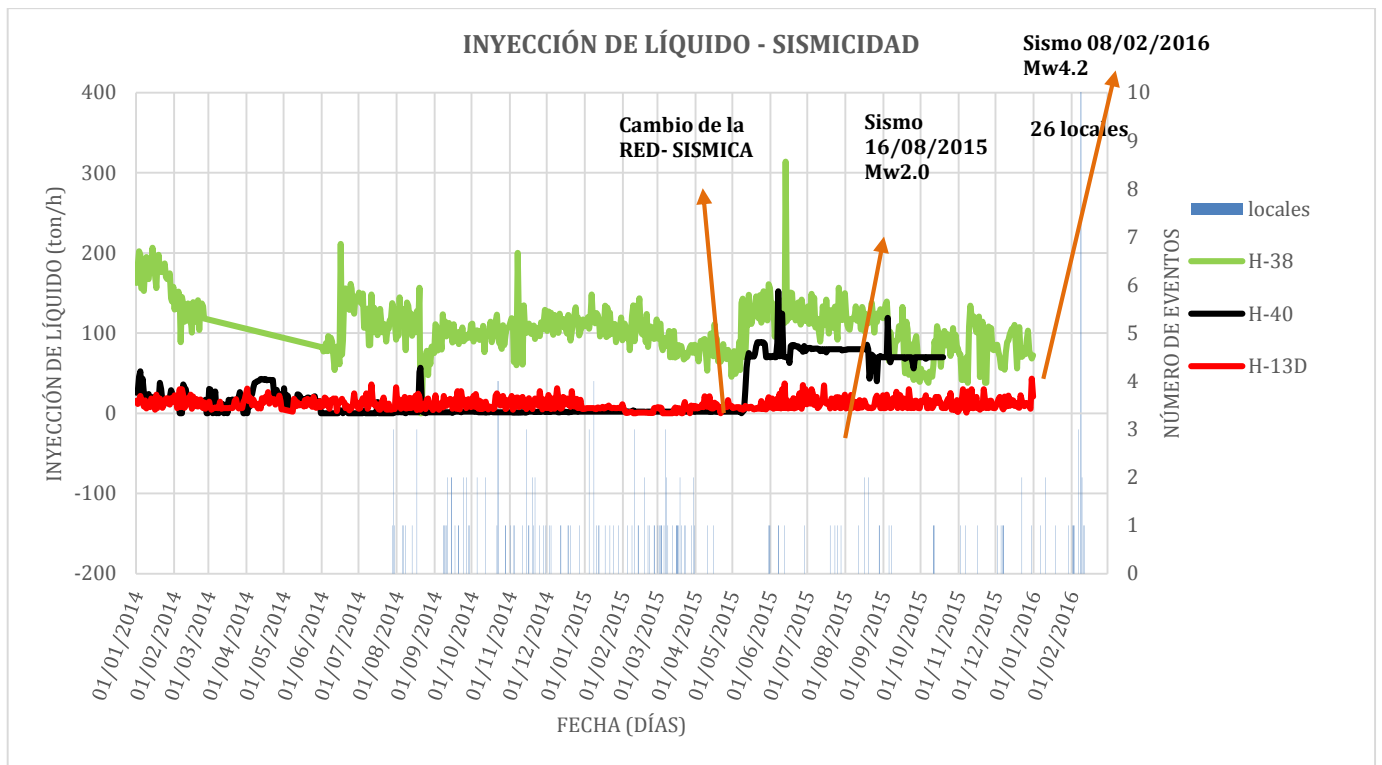
**Figura 3.** Parte izquierda, parámetros de fuente estimados en el registro de la componente vertical corregida de la estación HU12; parte inferior, magnificación de los primeros arribos de los 5 registros que captaron el sismo del 16/08/2015, para determinar el mecanismo focal simple, cuya solución se interpreta como una falla inversa. Parte derecha, parámetros de fuente estimados para el sismo principal en la estación HU11; parte inferior, mecanismo focal simple, cuya solución se interpreta como una falla inversa.

**2.2. Eventos locales y su relación con los pozos de inyección**

Ahora observaremos la relación de los eventos sísmicos con los gastos de los pozos H13D, H38 y H40. (Figura 1). Para lo cual se han graficado los gastos de estos tres pozos inyectoros a partir del 2014 vs el número de sismos locales registrados en por lo menos una estación HU11 (El Hilillo), como se puede observar en la figura 4, donde se pudo contar hasta 26 sismos locales después del evento principal. El pozo que tuvo un mayor gasto durante el periodo (2014-2015) fue el H38 con un gasto máximo de 314 ton/hr el 13 de junio del 2015 y con una producción promedio de 115 ton/hr, de igual forma unos días antes (07/06/2015) el pozo H40 presenta también su mayor gasto (152 ton/hr), habiéndose reiniciado su inyección el 11 de mayo del 2015, después de más de un año con casi nula inyección. El pozo H13D tuvo una producción promedio de 11.95 ton/hr durante el periodo.

La influencia por la inyección del líquido al subsuelo se ve reflejada en la actividad sísmica del campo geotérmico (Figura 4). Esto debido a que la inyección de un fluido a una temperatura diferente a la del sistema en el subsuelo, desestabiliza las estructuras geológicas y estas liberan energía en forma de sismos. Ejemplo de lo anterior es la variación de la sismicidad relacionada con la inyección de líquido en el pozo H-38, mostrado en la figura 4 para el del 2014. Sin embargo, de la gráfica observamos que después de los dos gastos máximos producidos por los pozos inyectoros H38 y H40, solo pasaron aproximadamente dos meses para que se iniciara la activación de la falla Los Humeros con el precursor del 16 de agosto del 2015. Aun cuando, no se tenga los gastos para los dos primeros meses del 2016, es importante notar que un gasto de más de 300 ton/hr, provocado el 13 de junio del 2015 por el pozo inyector H38, podría ser la causante del disparo o reactivación de este sistema de fallas Los Humeros, que ya

conocemos su potencial sísmicos desde el 25 de noviembre de 1994 (Lermo et al., 2001).



**Figura 4.** Gráfica que muestra la sismicidad registrada del periodo de julio 2014 a febrero del 2016, con la correlación de la producción de los pozos inyectoros H13D, H40 y H38 dentro del Campo Geotermico de los Humeros.

### 3. Conclusiones y Recomendaciones

1. En este periodo de 14 meses (enero-2015 a febrero 2016) se pudo localizar 179 sismos locales, los cuales podemos agruparlos en dos zonas conocidas, dos enjambres fuera de estas y dos zonas epicentrales con el sismo precursor (16/08/2015, Mw2.0) y sus réplicas y el sismo principal (08/02/2016, Mw4.2) y sus réplicas. Agrupando la sismicidad en planta y perfil (oeste-este) para el periodo jul 2014-feb 2016, presentamos una interpretación dinámica, introduciendo a este modelo un cuerpo magmático.

2. El análisis de la relación de los eventos sísmicos locales identificados en la estación HU11 (El Hillo) desde julio 2014 a diciembre 2015, con los gastos de los pozos inyectoros H13D, H38 y H40, confirman que la mayoría de esta sismicidad es inducida o dispara a las fallas que se encuentran activas tanto dentro y fuera del campo.

3. Es urgente tomar medidas preventivas para disminuir el impacto de estos temblores grandes que ocurren dentro del campo, y que ahora presentan un aumento en su magnitud, así como en los daños que provoca a la infraestructura del campo geotérmico y a los poblados cercanos a este. Estas medidas pueden ser: *i*). Estudiar a detalle, la relación de la sismicidad vs gastos de los pozos inyectoros en cada uno de los tres o cuatro pozos inyectoros activos en el campo, aumentando el monitoreo sísmico cerca de estos pozos; *ii*). Una mayor comunicación entre el grupo de yacimientos, geología y geofísica del campo y autoridades de la CFE.

### Agradecimientos

Se agradece al Consorcio del Centro Mexicano de innovación en energía geotérmica (CEMIE-Geo) por el patrocinio de esta investigación, así como al Instituto de Ingeniería de la UNAM, por el apoyo en cuanto al trabajo de campo para la reinstalación de la red sísmica del campo, así como en el mantenimiento mensual de dicha red. Asimismo se agradece a la residencia del campo geotérmico de Los Humeros de la Comisión Federal de Electricidad (CFE).

### Referencias

- Antayhua, Y., Lermo, J. & Vargas, C. 2008. Estudio sísmológico del Campo Geotérmico de Los Humeros, Puebla, México. Parte II: Tomografía sísmica por atenuación a partir de ondas de coda (Qc) de sismos locales, *Geotermia*, Revista Mexicana de Geoenergía, 21-2, 29-42.
- Havskov, J., & Macías, M. 1983. A coda-length magnitude scale for some Mexican stations: *Geofísica Internacional*, 22, No.3, p. 205-213.
- Lermo, J., Soto, J. & Flores y Hurtado, A. 2001. Estudio de la sismicidad del campo geotérmico de Los Humeros, Puebla. Fase III, Informe Técnico Final, Instituto de Ingeniería, UNAM, elaborado para la CFE- Gerencia de proyectos Geotermoelectricos, DEX-HU-00/2001, proyecto 0563, Enero del 2001.
- Lermo, J., Antayhua, Y., Quintanar, L., and Lorenzo, C. 2008. Estudio sísmológico del campo geotérmico de Los Humeros, Puebla, México. Parte I: Sismicidad, mecanismos de fuente y distribución de esfuerzos, *Geotermia*, Revista Mexicana de Geoenergía, 21-1, 25-41.
- Ottmøller, L., Voss, P. & Havskov, J. 2013. Seisan Earthquake Analysis Software, version 10.0. 402 p.