

Registro perfilado sísmico vertical (VSP) en el pozo inyector AZ-03 del campo geotérmico de Los Azufres.

Cecilia Lorenzo Pulido¹, Jorge Soto Peredo¹, Hugo Palma Guzmán¹, Heber Diez Leon², Héctor Pérez Esquivias³.

1)Departamento de Exploración-Subgerencia de Estudios-GPG

2)Departamento de Ingeniería de Yacimientos-Subgerencia de Estudios-GPG

3)Oficina Geología y Geofísica-Residencia de Estudios-RLA

Resumen

La aplicación de la tecnología de sísmica de pozo ha sido desarrollada principalmente en la industria petrolera, pero en esta ocasión ha sido aplicada en pozos geotérmicos con el fin de obtener información de velocidades y datos estructurales del área circundante al pozo. El desarrollo del registro requiere como etapa inicial la *evaluación de factibilidad de la adquisición* bajo las condiciones específicas del pozo y las condiciones geológicas del área. La segunda etapa es el *diseño del registro* en la que se determina la geometría a utilizar, el número de sensores y los parámetros de fuente mediante el uso de un camión vibro-sismo. La última etapa consiste en el *proceso e interpretación de los resultados*. En este caso se realizó el perfil sísmico vertical (VSP) mediante la corrida de dos registros (el primero ZVSP y el segundo OVSP) en el pozo inyector AZ-03 del campo geotérmico de Los Azufres, Mich. El objetivo fue obtener una imagen lateral del pozo y mapear la estructura geológica conocida como *El Chino*. El registro ZVSP se construyó con base en el modelo de la sección estructural y las velocidades medidas de la onda P, para "iluminar" por debajo del pozo. Para el registro OVSP la fuente se localizó en la plataforma del pozo AZ-54, obteniendo una imagen lateral hacia el norte del pozo inyector AZ-03, con una cobertura de 500 m en la zona de interés. Se identificaron discontinuidades laterales cercanas al pozo AZ-03: entre los 600 m y 1350 m de profundidad se observa un Sistema Este con dirección Norte; de 1350 m a 1950 m de profundidad se detectó presencia de fracturamiento; y de 2000 m a 2600 m de profundidad se identificó el sistema estructural de la falla El Chino. Los resultados obtenidos permiten concluir que el registro VSP es un apoyo en la etapa de exploración, porque permite identificar fallas y fracturas en zonas y campos geotérmicos que carecen de rasgos estructurales visibles en superficie. Asimismo, es una técnica adicional en el desarrollo de modelos geotérmicos conceptuales y en la propuesta de pozos productores e inyectores.

Palabras clave: Exploración geotérmica, Geofísica, Sísmica, estructuras, Perfil Sísmico Vertical (VSP), Los Azufres.

Abstract

The application of well seismic technology has been developed mainly for the oil industry, but in this case it has been applied for the geothermal wells to obtain information about velocity and structural data of the area nearby the well. Performing the seismic log requires as an initial step the evaluation of the *acquisition feasibility under* the specific well conditions and the geological characteristics of the area. The second step is the log design, *in which* the geometry to be used is selected, such as the number of sensors and the source parameters through the use of a vibro-sismo truck. The last step is *processing and interpretation of results*. In this case, a vertical seismic profile (VSP) through the performance of two processes (first ZVSP and second OVSP) in the injector well AZ-03 at Los Azufres Geothermal Field, Michoacán. The goal was to obtain a side image of the well and mapping the geological structure known as *El Chino*. The ZVSP registry was built based in the structural section model and the measured speeds of the P wave, to "illuminate" the area surrounding the well. For the OVSP log, the source was located in the platform of well AZ-54 getting a side image to the north of the injector well AZ-03, with 500m coverage in the interest zone. Side discontinuities have been identified close to the AZ-03 well: between 600m and 1350m depth fracture belonging to the east to north fracture system;

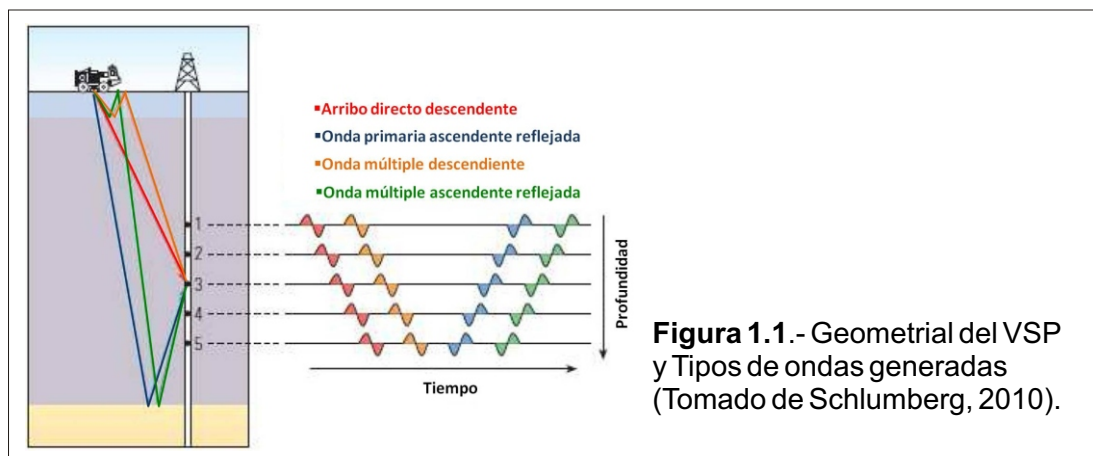
fracturing through 1350m 1950m depth; and from 2000m to 2600m depth the El *Chino* structural fault system. The VSP log results indicated that this type of log could be a good tool to support exploration tasks and well sitting, because allows the identification of fault and structural systems underground in geothermal places where no visible structural evidence is detected at surface. Besides, it is an additional technique to input information in the development of conceptual geothermal models and in the location of new production and injection wells.

Key Words: Geothermal exploration, Geophysics, seismic, structures, Vertical Seismic Profile (VSP), LosAzufres.

1. Introducción

Actualmente es una necesidad la localización de pozos productores y de inyección en los diferentes campos geotérmicos, teniendo como objetivo primordial la generación de energía eléctrica. Por ello, el buscar nuevas tecnologías como el “Perfil Sísmico Vertical”, que complementen los estudios de exploración.

El Perfil Sísmico Vertical (Vertical Seismic Profile o VSP) es la técnica mediante la cual se registra el tiempo que tarda una onda acústica en viajar al interior del subsuelo, desde una fuente de energía en superficie hasta los receptores que se encuentran dentro del pozo. En estudios terrestres la fuente es usualmente un camión vibrador y se coloca en la superficie. Los VSP's varían de acuerdo a la configuración del pozo, el número y localización de las fuentes y geófonos. La manera de correr la herramienta dentro del pozo es con cable. El VSP puede ser registrado en condiciones de pozo entubado o pozo en agujero descubierto (Figura 1.1).



2. Registro VSP

El registro VSP se basa en el registro de primeros arribos de ondas compresionales para obtener valores de tiempo versus profundidad que ayuden a calibrar los modelos de velocidades hasta la obtención de imágenes bidimensionales del pozo. Las geometrías que se obtienen son las siguientes:

- ➔ **Checkshot**
- ➔ **VSP Cero Offset (ZVSP)**
- ➔ **VSP Offset (OVSP)**
- ➔ **VSP Walkaway**

En este trabajo solo se enfocará a dos geometrías VSP Cero Offset y VSP Offset.

VSP Cero Offset (ZVSP): En esta técnica, la fuente de energía se posiciona muy cercana a la vertical del pozo. Registra los primeros arribos de onda compresional y también arribos posteriores asociados a campos de ondas reflejados. EL ZVSP es adquirido mediante un arreglo de detectores a lo largo del pozo con un espaciamiento más corto. Los espaciamientos entre estaciones tienen por objetivo obtener un número adecuado de muestreo espacial para realizar la separación de los campos de onda, a su vez eliminar el aliasing espacial para obtener el máximo rango de recuperación de frecuencias (Figura 2.1).

Típicamente los espaciamentos del ZVSP son de 10, 20 o 25 m. Además se obtiene una respuesta sísmica reflectiva de las diferentes interfaces del subsuelo. La respuesta de reflexión de las diferentes interfaces es una respuesta unidimensional.

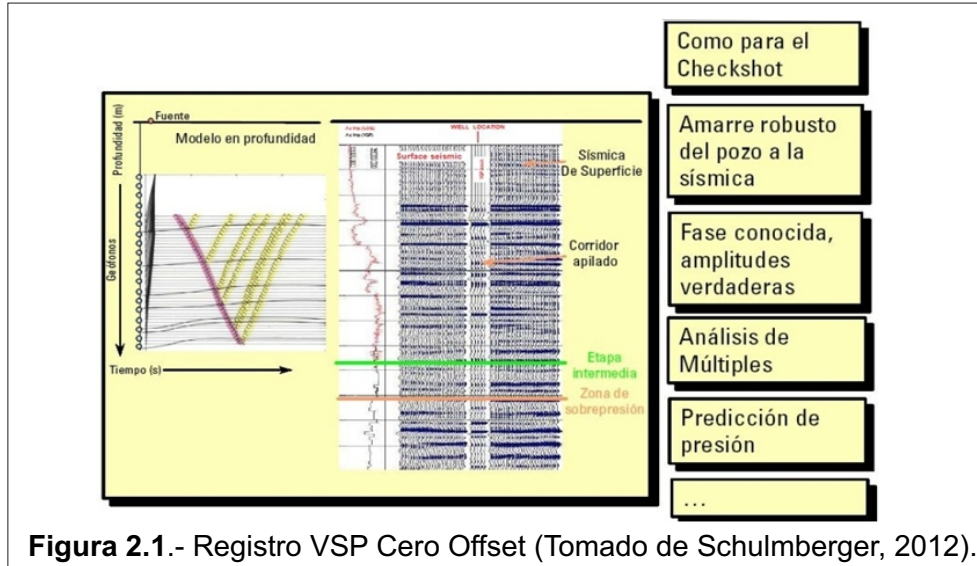


Figura 2.1.- Registro VSP Cero Offset (Tomado de Schulmberger, 2012).

VSP Offset (OVSP): En el OVSP la fuente de energía se aleja una cierta distancia con lo cual los puntos de reflejo se distribuyen en un plano y se obtiene imágenes bidimensionales (2D) en la dirección de la fuente. En esta técnica al igual que en el ZVSP la fuente permanece fija y los detectores se distribuyen a lo largo del pozo (Figura 2.2). La cobertura lateral dependerá de tres variables: profundidad de los objetivos, arreglo de detectores en el pozo y distancia de la fuente (offset).

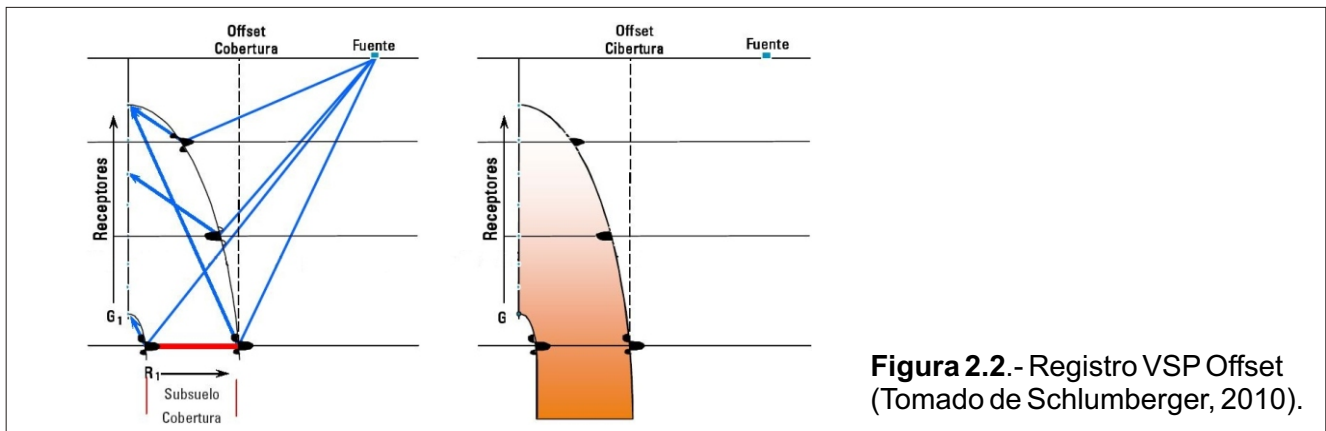


Figura 2.2.- Registro VSP Offset (Tomado de Schlumberger, 2010).

La aplicación puede abarcar correlaciones con información sísmica de superficie, identificación de fallas y echados, para obtener imágenes de onda compresional y de cizalla, así como sus respectivas velocidades (Figura 2.3).

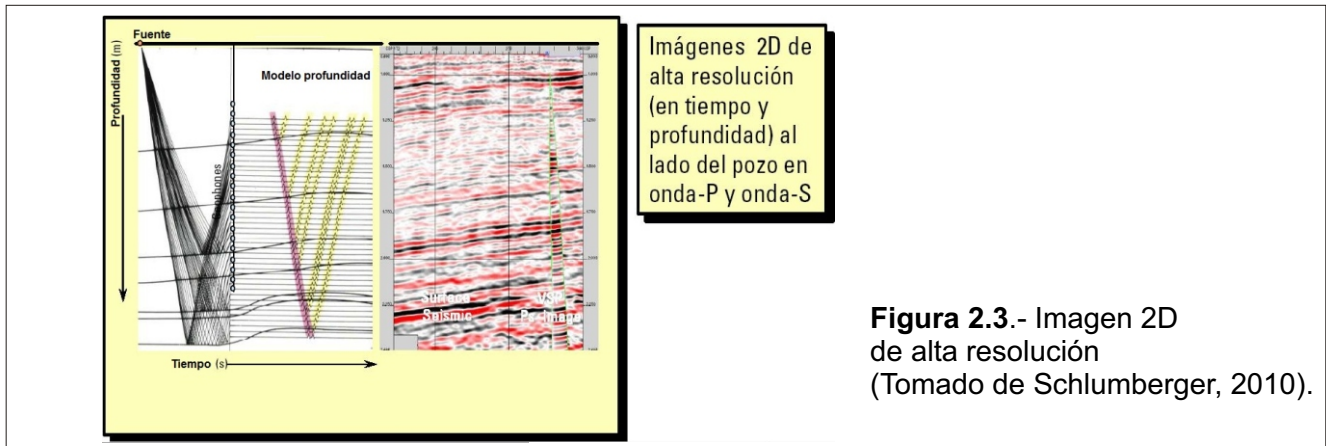


Figura 2.3.- Imagen 2D de alta resolución (Tomado de Schlumberger, 2010).

3. Metodología sísmica de pozos

El desarrollo del registro requiere como etapa inicial la *evaluación de factibilidad de la adquisición* bajo las condiciones específicas del pozo y las condiciones geológicas del área. La segunda etapa es el *diseño del registro* en la que se determina la geometría a utilizar, el número de sensores y los parámetros de fuente mediante el uso de un camión vibro-sismo. La última etapa consiste en el *proceso e interpretación de los resultados*.

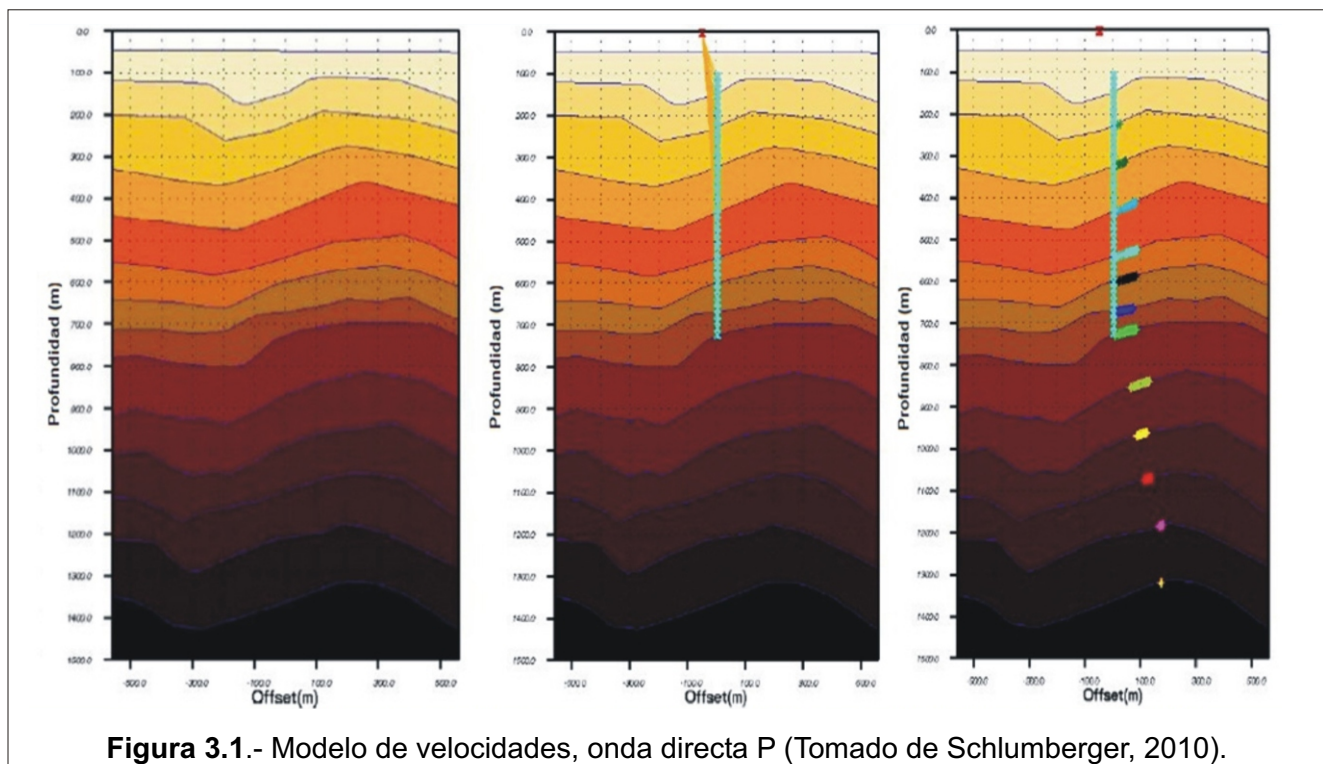
3.1 Evaluación de factibilidad de la adquisición

La etapa inicial de los trabajos de sísmica de pozo, consiste en la determinación de los parámetros de adquisición y la determinación de los productos a obtener. El modelado sísmico en esta etapa es fundamental para determinar la cobertura ya sea puntual o lateral de los reflectores a ser iluminados con el VSP. Se determinan a su vez los parámetros de fuente, offset y azimut. El modelado sísmico utiliza un modelo de velocidades y la interpretación estructural del área circundante al pozo, ambos, tanto el modelo de velocidades como la interpretación estructural, son generados en conjunto con el interprete geofísico.

La información requerida para el diseño de la toma del registro es el siguiente:

- ➔ Información sísmica existente
- ➔ Información estructural del área
- ➔ Información de velocidades sísmicas del área
- ➔ Objetivos o problemáticas que se buscan cubrir
- ➔ Estado mecánico del pozo

Con esta información se realizará una evaluación técnica que ayudará a determinar la aplicación de la sísmica de pozo y los resultados a obtener (Figura 3.1).



3.2 Diseño del registro

El paso siguiente es la revisión de condiciones de campo, cuyo objetivo es verificar accesibilidad y optimas condiciones de terreno. La fuente de energía utilizada en trabajos de geotermia ha sido camión vibrador.

Los parámetros de adquisición son:

- Parámetros de fuente. Offset, azimut, número de barridos, potencia, frecuencias y tiempo de barrido.
- Distribución de receptores en el pozo. Distancia entre receptores y número de niveles a adquirir.
- Flujo de operación. Secuencia operacional a seguirse, describiendo las diferentes necesidades que se deben cubrir antes de la adquisición.
- Flujo de procesamiento de los datos y controles de calidad.
- Resultados a obtener y entregables.

3.3 Procesado e interpretación de los resultados

Los procesos más importantes para datos de VSP son la determinación de los tiempos de tránsito, primeros arribos, los cuales proporcionarán el campo de velocidades de ondas directas fuente-receptor y que ayudarán a tener un modelo de velocidades de alta exactitud en la vecindad del pozo. Esta relación tiempo profundidad controlará la conversión de dominios y a su vez servirá para la separación y migración de los campos de onda.

El siguiente proceso de importancia es la separación de los campos de onda, la sísmica de pozo registra campos de ondas descendentes y campos de ondas ascendentes (reflejados). El objetivo es separar a estos campos de onda de manera óptima. Los campos de ondas convertidos también son altamente registrados en los perfiles sísmicos verticales y de mayor resolución cuando la fuente presenta un offset lejano.

Posterior a la deconvolución se efectúa la migración de los datos para obtener las imágenes finales. En el caso de offset cercano (cero offset) la cobertura lateral es mínima lo cual se aproxima a una respuesta 1D, en el caso de Offset la migración proporcionará una imagen lateral de cobertura específica. La migración se efectúa en profundidad y se realiza la conversión a tiempo utilizando el modelo de velocidades obtenido del VSP.

4. Zona de Estudio

El campo geotérmico de Los Azufres se localiza en la Sierra de San Andrés, en el límite oriental del Estado de Michoacán, a 80 km al Oriente de la ciudad de Morelia y 250 km de la ciudad de México (Figura 4.1). Está enclavado en un complejo volcánico a una elevación que varía de 2500 a 3000 metros sobre el nivel del mar. La zona es montañosa y boscosa, considerada actualmente Zona de Reserva Forestal. Debido a las características geológicas, geoquímicas, de producción y de yacimientos, el campo geotérmico de Los Azufres se divide en dos zonas: sur y norte. La zona sur presenta las más altas temperaturas, asimismo el yacimiento se encuentra más somero que en la norte.

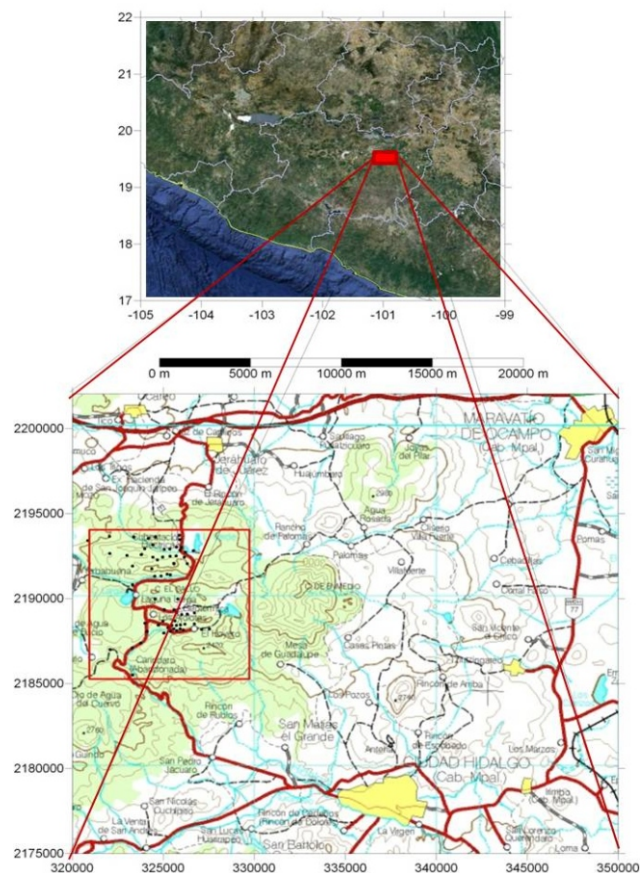


Figura 4.1. Localización de Los Azufres

Parte importante para la generación eléctrica es la etapa de exploración, para la localización de pozos productores e inyectores, siendo primordial la ubicación en superficie y subsuelo la identificación de fallas geológicas y fracturas naturales in situ, ya que estas son un medio de flujo de los fluidos geotérmicos.

Objetivo

Realizar el registro VSP con las geometrías de ZVSP y OVSP, para identificar la estructura geológica "El Chino". La estructura se localiza en la parte norte del campo geotérmico de Los Azufres, la cual se cortó con el pozo inyector AZ-03. Para realizar el registro OVSP se considera la plataforma del pozo AZ-54.

4.1 Evaluación de factibilidad de la adquisición pozo AZ-03

El objetivo es identificar la falla El Chino, la zona a iluminar es de 2000m a 3000m de profundidad, se eligió el pozo inyector AZ-03, que durante su construcción corto la falla a 2330 m de profundidad. La información que se requiere para el diseño de los registros ZVSP y OVSP es la siguiente:

Pozo Inyector AZ-03: Se localiza en la zona norte del campo en las cercanías de la Laguna Larga, en superficie a 390 metros el pozo se ubica la falla "El Chino", interceptada a los 2 330 metros de profundidad. El diseño mecánico del pozo se describe a continuación:

- Tipo de pozo: Vertical
- Profundidad Total: 2450 m
- Tubería: 9 5/8" Liner ciego hasta 1400 m
- Tubería: 8 1/2" Liner ciego de 1400 hasta 2200 m
- Tubería: 7" Liner ranurado de 2200 hasta 2400 m

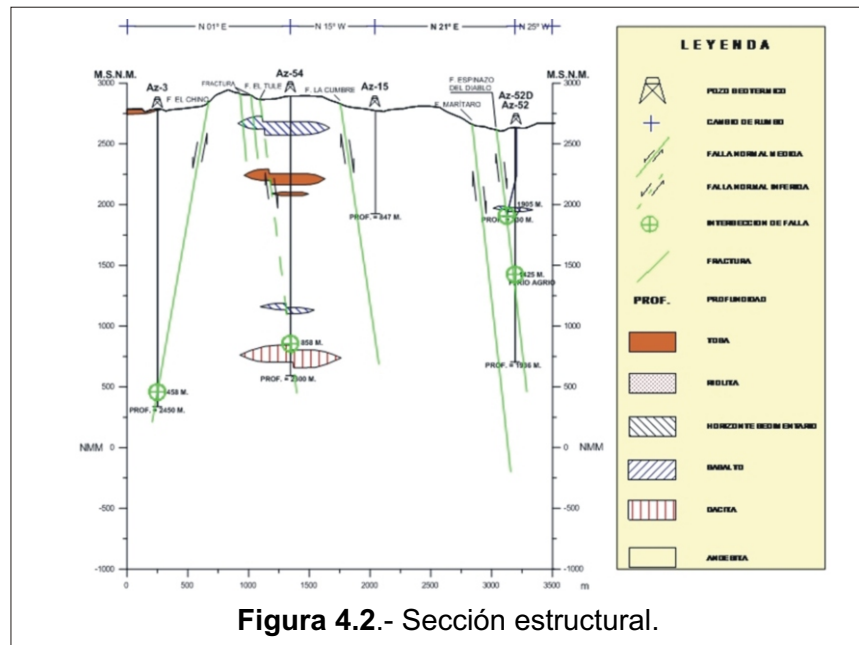
Registro Presión-Temperatura: Se tomó un registro de temperatura el 28 de junio del 2011, en fase de calentamiento, las condiciones del pozo fueron estático, con 3 horas de reposo sin inyección. A la profundidad de 2300 m se registro 60°C y la máxima temperatura se registro en el intervalo de 900 a 1000 m de 70°C. Con respecto al registro de presión tomado en la misma fecha con las mismas condiciones en el pozo, mostró que levanta presión aproximadamente a los 30 minutos que se deja de inyectar.

Datos de velocidad generales: Se realizó la comparación de los datos obtenidos con el registro geofísico Dipole Sonic Imager (DSI) con los valores utilizados en la localización de eventos sísmicos, se observa que el valor actualmente en uso de $V_p/V_s=1.78$, corresponde al medido registros DSI. Sin embargo, cabe señalar que en el rango en donde fue realizado el registro DSI, parece ser que la velocidad de onda P medida $V_p= 4.71$, difiere de la usada en sísmica pasiva que es de $V_p= 4.0$. El modelo de velocidades usado es el siguiente:

$$V_p/V_s = 1.78$$

Velocidad de onda P (km/s)	Profundidad al fondo de la capa (km)
3.5	1.0
4.0	3.0
6.0	15.0
6.5	semiespacio

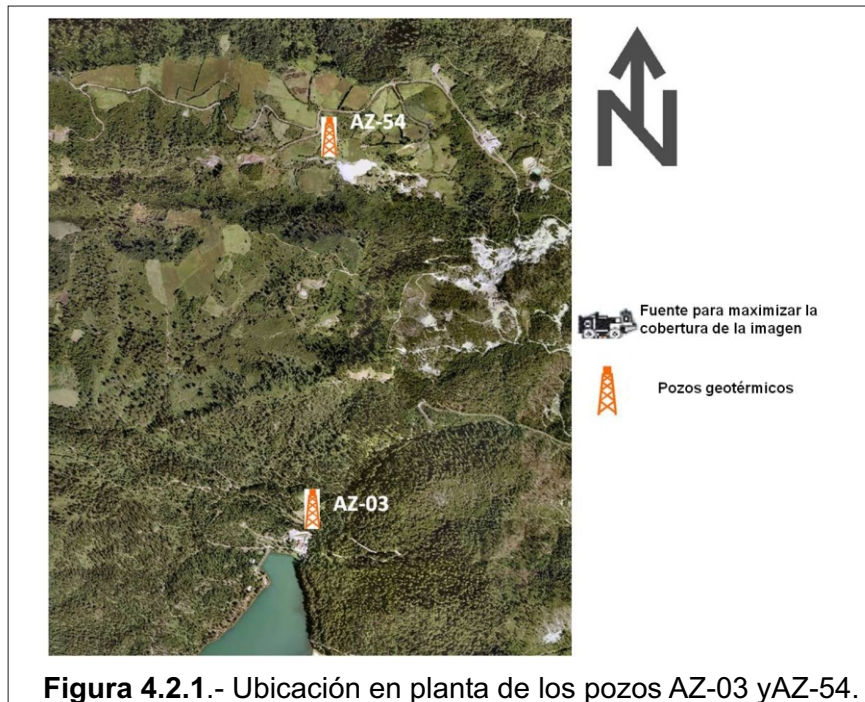
Datos geológicos estructurales: Se utilizó la siguiente sección estructural para identificar la falla El Chino. La estructura presenta un echado de 80° (Figura 4.2).



Pozo AZ-54: Se localiza en dirección Norte del pozo inyector AZ-03, la plataforma del pozo AZ-54 se utilizará para el registro OVSP, para iluminar la zona de interés a profundidad, misma que, será en forma lateral. Esto será por medio de ubicar en esta plataforma la fuente de energía (camión vibro-sismo), y esta energía será detectada en los geófonos ubicados dentro del pozo inyector AZ-03.

4.2 Diseño del registro VSP (ZVSP y OVSP)

En la figura 4.2.1 se muestran las ubicaciones de los pozos geotérmicos seleccionados para la toma del registro ZVSP y OVSP, donde se colocara la fuente de energía (camión vibro-sismo), ZVSP para pozo AZ-03 y OVSP para pozo AZ-54, en este pozo se obtendrá la cobertura de la imagen lateral 2D.



Trazado de rayos ZVSP

En la figura 4.2.2 se muestra la zona de interés iluminada, la cual es una imagen lateral hacia el norte del pozo inyector AZ-03. La cobertura diseñada con esta fuente es de 200 m (lateral) en la zona de interés.

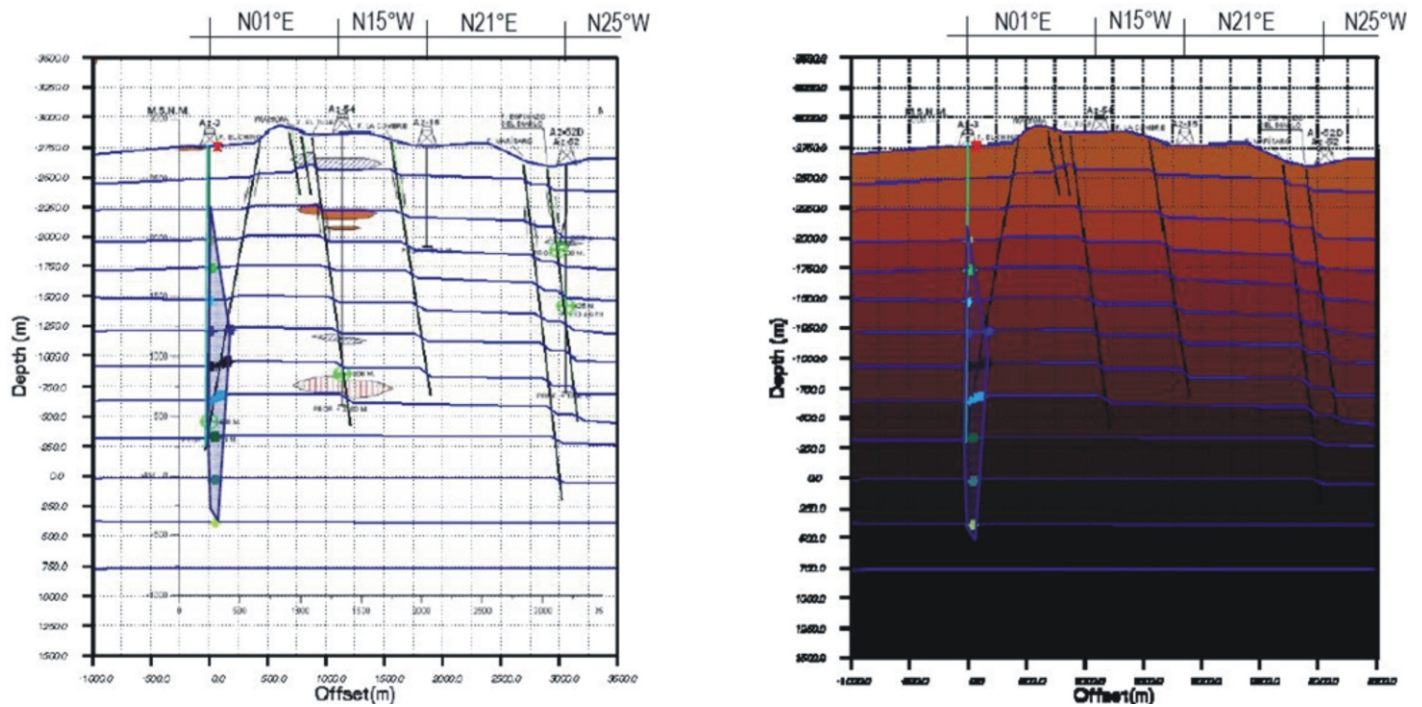


Figura 4.2.2.-Diseño ZVSP (Tomada de Peralta-Ortega, 2011).

Trazado de rayos OVSP

En la figura 4.2.3 se muestra la zona de interés iluminada, la cual es una imagen lateral hacia el norte del pozo inyector AZ-03. La cobertura diseñada con esta fuente es de 500 m (lateral) en la zona de interés.

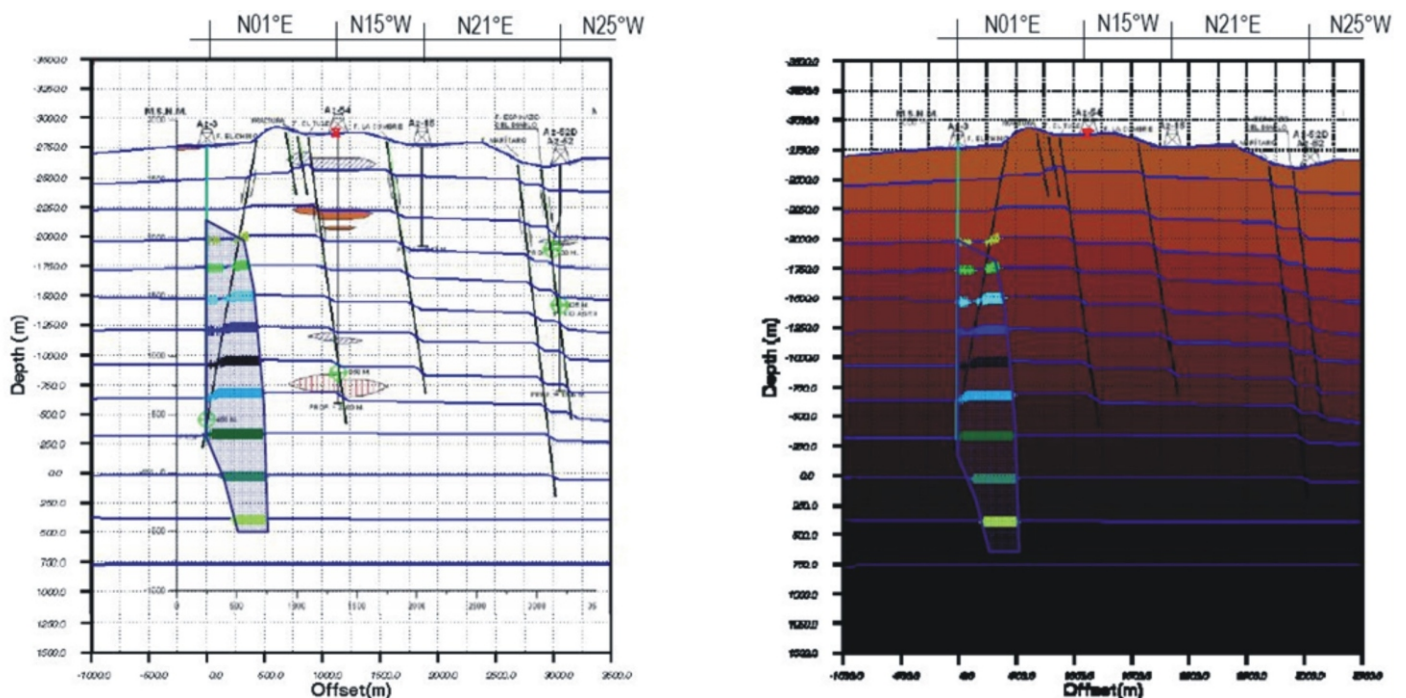
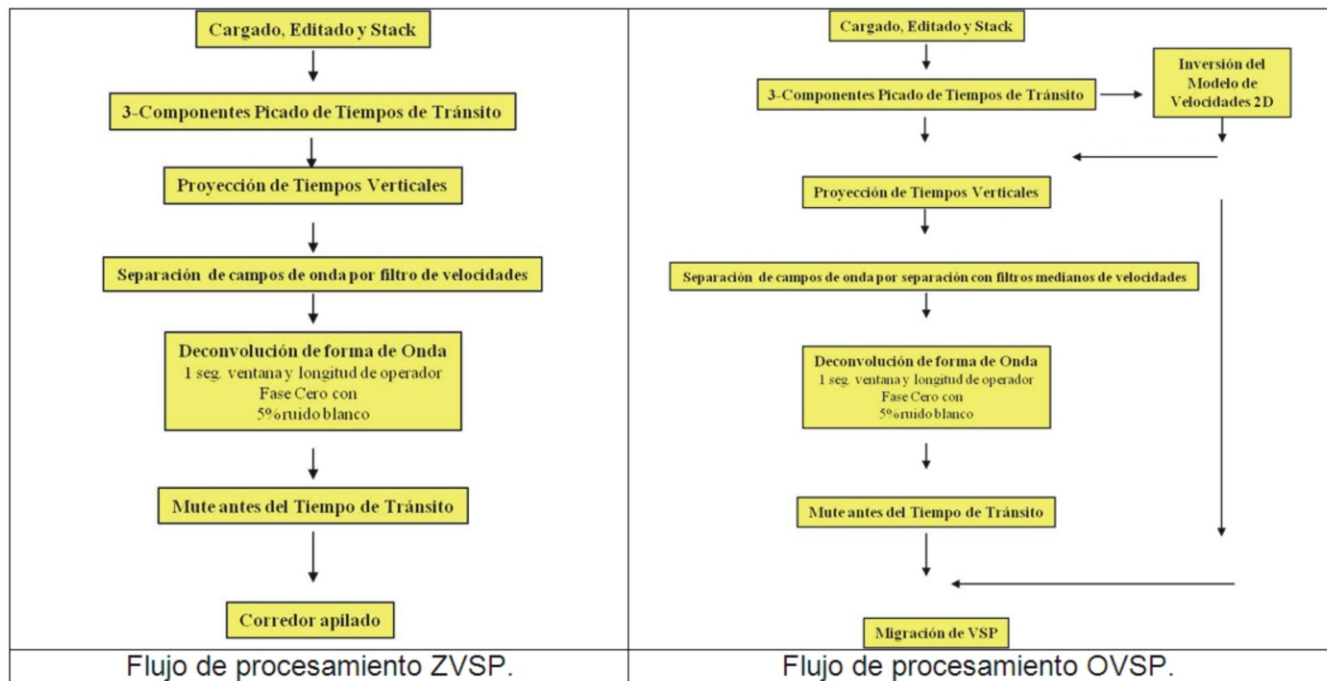


Figura 4.2.3.-Diseño OVSP, con la fuente en la pera del pozo AZ-54 (Tomada de Peralta-Ortega, 2011).

4.3 Diagrama de procesado para los registros ZVSP y OVSP

A continuación se muestra los diagramas de flujo correspondiente por cada registro obtenido.



Al término de cada etapa del flujo de procesamiento para los registros ZVSP y OVSP, se obtuvo las imágenes 1D y 2D, mismas que se tienen integradas en una imagen.

4.4 Resultados Obtenidos

La identificación de los primeros arribos con la adquisición del ZVSP permitió el picado del tiempo sobre las ondas descendentes, donde se obtuvo la relación Tiempo-Profundidad (TZ), y con la que se puede calcular las velocidades del medio (Figura 4.4.1).

El registro OVSP logró una cobertura de 500 m laterales en dirección norte, fue posible identificar discontinuidades laterales cercanas del pozo inyector AZ-03. Las cuales se interpretan como; *Sistema Este con dirección al Norte* en el intervalo de 500 m a 1350 m de profundidad; *Zona de fracturamiento* en el intervalo de 1350 m a 1800 m de profundidad; y la identificación de la *Falla El Chino* aproximadamente de 1500 m a 2800 m de profundidad (Figura 4.4.2).

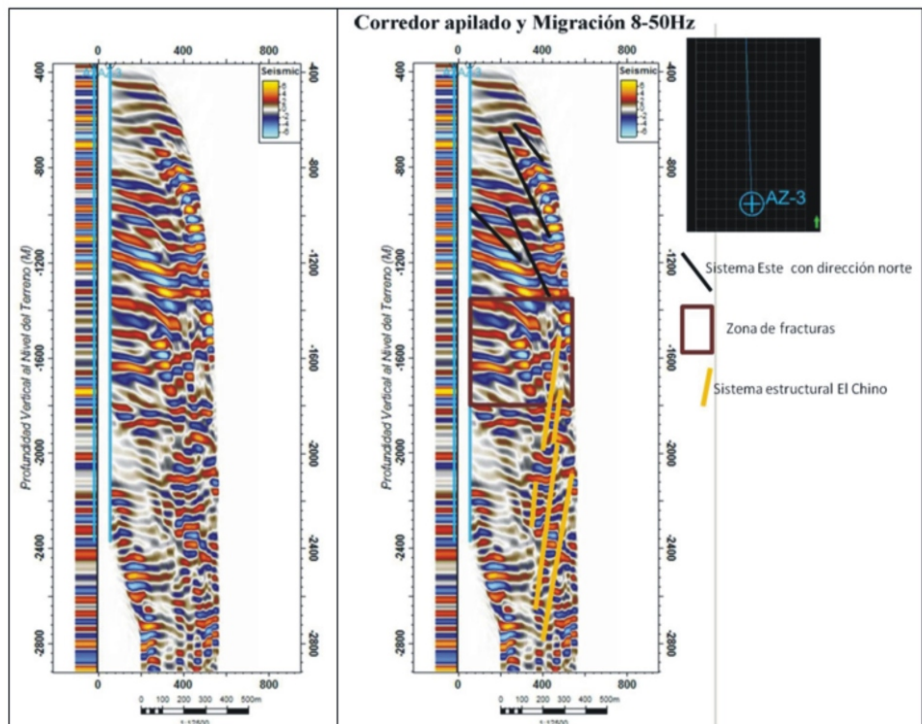


Figura 4.4.1.-Imagen 1D (ZVSP) y 2D (OVSP) (Tomada de Parga-García, 2011).

Figura 4.4.2.-Interpretación del registro OVSP.

Se realizó un compuesto con las gráficas obtenidas, la primera son las pérdidas de circulación registradas durante la perforación del pozo AZ-03, la segunda es el registro de Temperatura tomado en el pozo Az-03 el 28 de junio de 2011 y la última es el registro de velocidad obtenido del VSP.

En la figura 4.4.3 se observa que el intervalo identificado como el *Sistema Este*, en el registro de pérdidas de circulación durante la perforación se registraron pérdidas de circulación de 1 a 15 m^3/h (rectángulo amarillo), asimismo, se observa en el intervalo de 1000 m a 1200 m de profundidad pérdidas de 9 a 15 m^3/h (rectángulo naranja), que a su vez se ve reflejado con el cambio de velocidad en el registro (velocidades VSP), el cual también se interpreta como un cambio de litología a esta profundidad. La *zona de fracturamiento* (rectángulo azul) tiene correspondencia con el registro de pérdidas de circulación registrándose pérdidas de 5 y 16 m^3/h en el intervalo de profundidad de 1400 m a 1850 m, así como, el registro de temperatura aumenta y se mantiene a 60°C .

Por último la *Falla El Chino*, con la imagen 2D se observa desde los 1500 m hasta los 2800 que fue la zona que se iluminó, aunque el pozo AZ-03 se terminó a la profundidad de los 2440 m, se puede observar que las mayores pérdidas de circulación es en el fondo de pozo siendo de 60 m^3/h , así como, el reporte geológico de que el pozo cortó la falla a los 2300 m de profundidad.

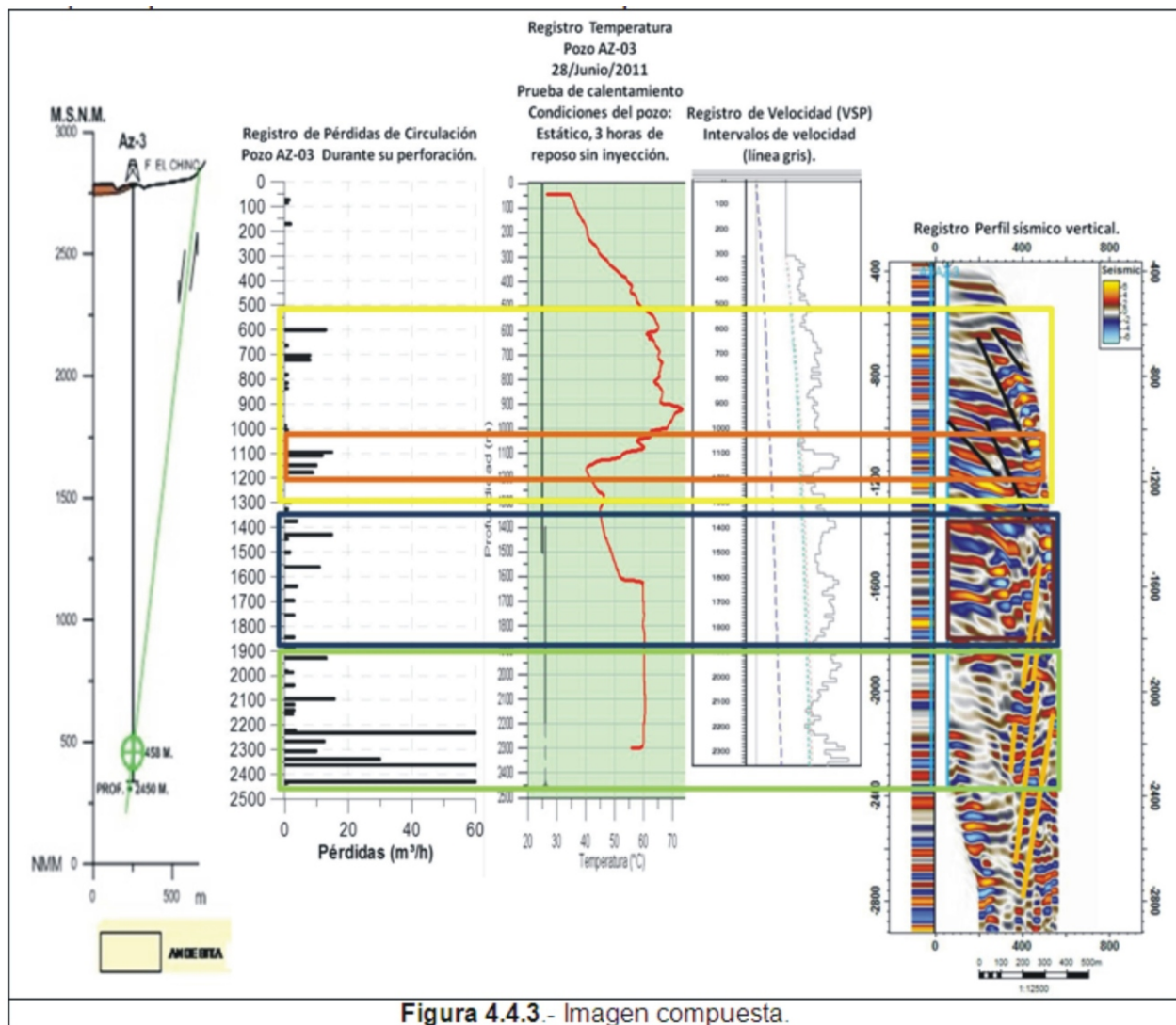


Figura 4.4.3.- Imagen compuesta.

5. Conclusión

Se identificaron discontinuidades laterales cercanas del pozo inyector AZ-03 siendo las siguientes:

- *Sistema Este con dirección al Norte* en el intervalo de 500 m a 1350 m de profundidad
- *Zona de fracturamiento* en el intervalo de 1350 m a 1800 m de profundidad
- Identificación de la *Falla El Chino* aproximadamente de 1500 m a 2800 m de profundidad

Los resultados obtenidos permiten concluir que el registro VSP es un apoyo en la etapa de exploración, porque permite identificar fallas y fracturas en zonas y campos geotérmicos que carecen de rasgos estructurales visibles en superficie. Asimismo, es una técnica adicional en el desarrollo de modelos geotérmicos conceptuales y en la propuesta de pozos productores e inyectores.

Agradecimientos

A la Residencia de Los Azufres Ing. Alfredo Mendoza Covarrubias, por su apoyo para realizar la prueba tecnológica, así como, a la Residencia de Estudios Biól. Emigdio Casimiro Espinoza, Ingeniería de Yacimientos Ings. Elvia Medina Barajas, Alejandro Sandoval Medina, Arturo Pérez Nieto; Oficina Geología y Geofísica Geóloga Ana Garciadiego Martínez; Oficina de Mantenimiento Alfonso Velázquez García, Roberto Patiño Correa, Leopoldo Mondragón Mondragón, Rubén García Luna, Miguel Abad Cruz, Ángel García Sánchez; Manejo de equipo de alta presión (patín cementador), Alfredo Soto Castro, José Flores Ramírez; y Segurista Miguel Hoyos Smith. Ya que con su apoyo se logró el éxito en el desarrollo del VSP, obteniendo excelentes resultados en la aplicación en pozo geotérmico.

Referencias

1. Peralta Ortega Sergio, Parga García Francisco. (2011). Modelado de sísmica de pozo para Azufres-3.
2. Parga García Francisco. Diciembre 2011. Perfil sísmico vertical Cero Offset VSP y Offset VSP.
3. Schlumberger, Septiembre 2010. Sísmica de pozo perfil sísmico vertical (Preparado para CFE).