



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE  
MÉXICO

---

---

FACULTAD DE INGENIERÍA  
DIVISIÓN DE INGENIERÍA EN CIENCIAS DE LA TIERRA

**“ADQUISICIÓN DE INFORMACIÓN MICRO-  
SÍSMICA ANTES, DURANTE Y DESPUÉS DE  
FRACTURAMIENTO HIDRÁULICO EN POZO”**

INFORME ESCRITO DE ACTIVIDAD PROFESIONAL

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:  
**INGENIERO GEOFÍSICO**

PRESENTA:

**LUIS FEDERICO LYNN**

DIRECTOR:  
**ING. HECTOR RICARDO CASTREJÓN PINEDA**

México D.F., Ciudad Universitaria, junio de 2013.



## Agradecimientos

Al universo

A mis padres y hermanos, por su amor y apoyo incondicional en la buena y en las malas

A mis amigos y compañeros, a todos los que formaron y/o forman parte de mi vida

A la madre naturaleza

A mis semejantes

A LA UNIVERSIDAD por permitirme recibir una formación profesional y ser mi segunda casa

A LA FACULTAD Y A MIS MAESTROS, por todos los conocimientos que me inculcaron

## RESUMEN

Durante los últimos años, la Cuenca de Chicontepec se ha convertido en una zona de gran interés económico debido al potencial petrolero que ahí se localiza; la complejidad de que los yacimientos produzcan en los campos de ésta cuenca, se resuelve a través de varias operaciones de terminación, estimulación y/o fracturamiento hidráulico, etc., según sea el caso, para una óptima producción de los yacimientos. Los ritmos de producción han aumentado sin precedentes a partir de los recursos no tradicionales, debido en gran parte al monitoreo micro-sísmico y el mapeo de estimulaciones hidráulicas.

Este trabajo tiene como propósito, reportar las operaciones y actividades de las distintas fases de la ejecución, de un servicio de adquisición de datos micro-sísmicos en un pozo de dicha zona. En el capítulo I se resalta la importancia de la realización de éste tipo estudios.

En el capítulo II se describen las actividades, metodologías y formas en que se realiza la gestión de permisos de servidumbre de paso, siendo ésta la primera fase de intervención para el inicio de las operaciones en el trabajo de campo. Se detalla la importancia de la recopilación y procesamiento de los aspectos topográficos donde se realizó el estudio. Y luego se mencionan las características y los requerimientos generales y específicos del monitoreo de registro de los eventos microsísmicos previos, durante y después a la prueba de fracturamiento hidráulico.

Como parte final del trabajo, se enlistan los formatos entregables (información, reportes, figuras, anexos y claro, los archivos de datos) de los resultados de los registros de adquisición de la información microsísmica generada en todas las etapas del proyecto.

# ÍNDICE

	Página
RESUMEN.....	
<b>I.INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>1</b>
<b>II.METODOLOGÍA EMPLEADA.....</b>	<b>3</b>
II.1 GESTORÍA.....	3
II.1.1 GENERALIDADES.....	3
II.1.2 LOCALIZACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO .....	5
II.1.3 LOGÍSTICA DE OPERACIÓN.....	5
II.1.4 DESCRIPCIÓN GENERAL DEL ÁREA.....	6
II.1.5 VÍAS DE COMUNICACIÓN.....	6
II.1.6 CLÍMA .....	6
II.1.7 TIPO DE TERRENO Y VEGETACIÓN.....	6
II.1.8 SEGURIDAD INDUSTRIAL, PROTECCIÓN AMBIENTAL Y CALIDAD..	7
II.2 PARÁMETROS TOPOGRÁFICOS Y METODOLOGÍA .....	8
II.2.1 PARÁMETROS DE CAMPO .....	8
II.2.2 PARÁMETROS GEODÉSICOS DE TRANSFORMACIÓN .....	8
II.2.3 PREPLOT .....	9
II.2.4 LOGÍSTICA OPERACIONAL DE TOPOGRAFÍA.....	10
II.2.5 ACONDICIONAMIENTO DE LÍNEA SÍSMICA .....	10
II.2.6 LEVANTAMIENTO TOPOGRÁFICO.....	11
II.2.7 PROCESADO DE DATOS TOPOGRÁFICOS .....	12
II.2.7.1 ESPECIFICACIONES TÉCNICAS .....	12
II.2.7.2CONTROL DE CALIDAD .....	13
II.2.7.3PROGRAMAS DE COMPUTACIÓN UTILIZADOS .....	14
II.2.7.4 RELIEVE DEL ESTUDIO DE MICROSÍSMICA .....	15
II.2.8 RELACIÓN DE EQUIPO TOPOGRÁFICO .....	15
II.2.8.1 EQUIPO PARA LEVANTAMIENTO GPS (RTK) .....	15
II.2.8.2EQUIPO DE OFICINA.....	17
II.3 GRABACIÓN DE DATOS MICROSÍSMICOS .....	17
II.3.1 REQUERIMIENTOS GENERALES.....	17
II.3.2 REQUERIMIENTOS ESPECÍFICOS.....	18
<b>III. ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN.....</b>	<b>22</b>
III.1 PROCESAMIENTO E INTERPRETACIÓN.....	22
III.2 RESULTADOS.....	23
<b>IV CONCLUSIONES.....</b>	<b>26</b>
BIBLIOGRAFÍA .....	27

**“Adquisición de Información Microsísmica Antes, Durante y Después de Fracturamiento Hidráulico en Pozo”**

## I. INTRODUCCIÓN

Bajo un contrato específico celebrado entre un centro de investigación, en éste caso el Instituto Mexicano del Petróleo (IMP), y una compañía de servicios de exploración, se le solicita realizar la ejecución del trabajo denominado “Servicio Integral de Adquisición y Procesamiento Especial de Información Micro-sísmica Antes, Durante y Después de la Creación de una Fractura Hidráulica Inducida”, en el campo Chicontepec (Activo Integral Aceite Terciario del Golfo), conforme a la designación del Grupo de Optimización de Terminaciones y Fracturas Hidráulicas, a un pozo de dicha zona, y contempla un informe final de actividades en sus etapas de gestoría, levantamiento topográfico y grabación de datos micro-sísmicos. El procesamiento e interpretación de datos y resultados se mencionan de manera somera para referencia, ya que esa etapa la realizó el IMP.

En el presente informe se describe el área del estudio, el desarrollo operacional de los trabajos de gestoría, levantamiento topográfico, grabación de datos microsísmicos, medidas de seguridad y equipos utilizados.

Los trabajos se realizaron por la Brigada del VSP de la compañía, las oficinas técnicas se ubicaron en una región cerca de dicho campo en el estado de Veracruz. El campamento para el personal de campo, se instaló en una comunidad muy cerca del pozo de estudio.

Los ritmos de producción han aumentado sin precedentes a partir de los recursos no tradicionales, debido en gran parte al monitoreo microsísmico y el mapeo de estimulaciones hidráulicas.

El monitoreo sísmico es el procedimiento de atender pasivamente, la actividad microsísmica causada por el fracturamiento hidráulico, subsidencia del yacimiento y la inyección o retiro de agua, y vapor o bióxido de carbono CO<sub>2</sub>. La actividad microsísmica pasiva se registra a través del tiempo produciendo imágenes 4D.

El desarrollo exitoso de los yacimientos no convencionales depende de un mejor entendimiento de la geometría de la fractura, y mejorando el volumen del yacimiento estimulado, ambos pueden ser alcanzados a través del monitoreo y mapeo microsísmico.

Un mayor conocimiento de la geometría de las fracturas, azimut, conectividad, densidad y extensión, permitirá mejorar en el programa de fractura, modificando la presión y el ritmo de bombeo. Adicionalmente, el desarrollo del campo puede ser reconsiderado, tanto como el espaciamiento del pozo, basado en el drenaje efectivo de pozos específicos. Un yacimiento de volumen estimulado permite aumentar las tasas de producción y las reservas disponibles.

Un adecuado conocimiento de la geometría y el comportamiento de las fracturas hidráulicas permiten a los equipos a cargo de los activos de las compañías operadoras, aumentar la efectividad de los tratamientos de estimulación, la productividad de los pozos y la recuperación de los hidrocarburos. Si bien los métodos sísmicos de

caracterización de fracturas hidráulicas existen desde hace varios años, los nuevos equipos y técnicas de procesamiento sísmico hacen que este tipo de monitoreo sea hoy más efectivo que en el pasado.

## **II. METODOLOGÍA EMPLEADA**

### **II.1 GESTORIA**

#### **II.1.1 GENERALIDADES.**

Para la realización de los Estudios Sismológicos dentro de la República Mexicana concesionados a la Compañía, es necesario contar con la gestión de permisos de servidumbre de paso, siendo esta la primera fase de intervención para el inicio de las operaciones y clave fundamental para lograr con éxito los objetivos planeados.

Una de las principales actividades realizadas por el Departamento de Gestoría, al inicio de los estudios de prospección sísmica, es la de efectuar una evaluación de la problemática social del área de estudio, con el fin de obtener una visión general de la aceptación de los trabajos de exploración sísmica que se proyecta realizar por parte de la compañía, para prever las problemáticas que pudieran presentarse durante los procesos de adquisición de datos sísmicos y las estrategias de solución de las mismas. Así mismo, poder crear un vínculo armonioso y una comunicación abierta entre la Compañía y los diversos núcleos poblacionales inmersos dentro de la zona de interés. En donde la diversificación social, económica y cultural son factores que influyen en la labor del sociólogo y gestor, por lo cual debe tenerlos en cuenta para desempeñar su quehacer de manera eficaz.

Es conveniente que el personal técnico de gestoría, cuente con experiencia en el ámbito de trabajo, así como, una amplia gama de conocimientos de las diversas actividades de campo (agrícola, ganadero y forestal), cívica y ética. Sobre todo debe tener sentido de responsabilidad y honestidad, esto con el fin de inspirar confianza en los núcleos poblacionales inmersos dentro del área de estudio.

En la actualidad el cliente y la Compañía han prestado gran interés en dar atención, así como solución y/o alternativas de solución, a las problemáticas presentadas a la Compañía durante los procesos de adquisición de datos sísmicos por las diversas autoridades locales, representantes de ejidos y pequeños propietarios; en donde se realizan los trabajos de exploración sísmica, con la finalidad de obtener una mejor imagen de la empresa paraestatal y de sus contratistas, lo cual facilitará los trabajos contemplados a futuro en relación con la actividad petrolera.

Para que se logren los objetivos planteados, el Departamento de Gestoría comprende facetas de apoyo (áreas de Intervención) tales como: Factibilidad Social, Delimitación de Predios, Obtención de Permisos, Inspección de Inmuebles, Inspección de Huertos, Levantamiento de Afectaciones, Pago de Finiquitos y Saneamiento de Caminos.



## **Solicitud de Permisos por servidumbre de paso**

Una vez que se hizo del conocimiento a las autoridades la presencia de la Compañía en la región, se procedió a la solicitud de permisos de servidumbre de paso, que se programó de acuerdo a la logística de las operaciones planteada por el área técnica.

Los permisos de paso se obtuvieron de manera individual y por escrito entrevistándose con cada uno de los propietarios de los predios inmersos en el área de estudio. En el caso de los Ejidos, se trabajó en coordinación con las autoridades de cada uno de ellos y se realizaron reuniones colectivas, donde los gestores y sociólogos de la compañía brindaron una explicación detallada de las distintas fases de la operación que se llevarían a cabo en cada predio tales como: topografía y observación y la forma de pago de afectaciones realizadas en sus propiedades de acuerdo al tabulador Instituto Nacional de Avalúos y Administración de Bienes Nacionales, INDAABIN (vigente).

En el formato del permiso de servidumbre de paso se especificaron las actividades que se realizarían en cada predio, se recabó la información de datos personales de cada propietario, así como el tipo de cultivo existente en el predio, haciendo énfasis que el trabajo era temporal y que se daría cumplimiento a los compromisos contraídos entre la empresa y el propietario (pagos de afectaciones y saneamiento de caminos utilizados para el estudio) con la finalidad de lograr el convencimiento de los asistentes en las asambleas llevadas a cabo.

Una vez obtenido el permiso de paso se hizo entrega de una copia al propietario y posteriormente se registró en la base de datos general, a los cuales se les asignó un número de folio para el control desde su identificación en el plano general, elaboración de finiquito y pago de finiquito.

Es pertinente hacer mención que conforme se iban obteniendo los permisos de servidumbre de paso, los avances se fueron plasmando en el plano general del estudio, de igual manera las delimitaciones de cada predio; identificándose en él los predios con permisos obtenidos, permisos negados y condicionados.

Los pagos de finiquitos por afectación fueron realizados y entregados por el área de gestoría, siendo el personal asignado a dicha actividad para visitar a los propietarios en sus domicilios; esto con el fin de cumplir con el compromiso llevado a cabo debido a su disposición para otorgar el permiso de paso.

## II.1.2 LOCALIZACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO.

El Estudio de microsísmica al pozo, se encuentra ubicado en la porción Norte del Estado de Veracruz, geográficamente está comprendido entre 20°20'14" y 20°22'23" de latitud Norte y entre 97°26' 40" y 97°28' 57" de longitud Oeste.

## II.1.3 LOGÍSTICA DE OPERACIÓN.

La logística para realizar el levantamiento topográfico del estudio se distribuyó en ocho líneas. Durante el desarrollo de los trabajos se realizó el levantamiento conforme el Departamento de Gestoría liberó los permisos de paso de los propietarios (fig. 1).

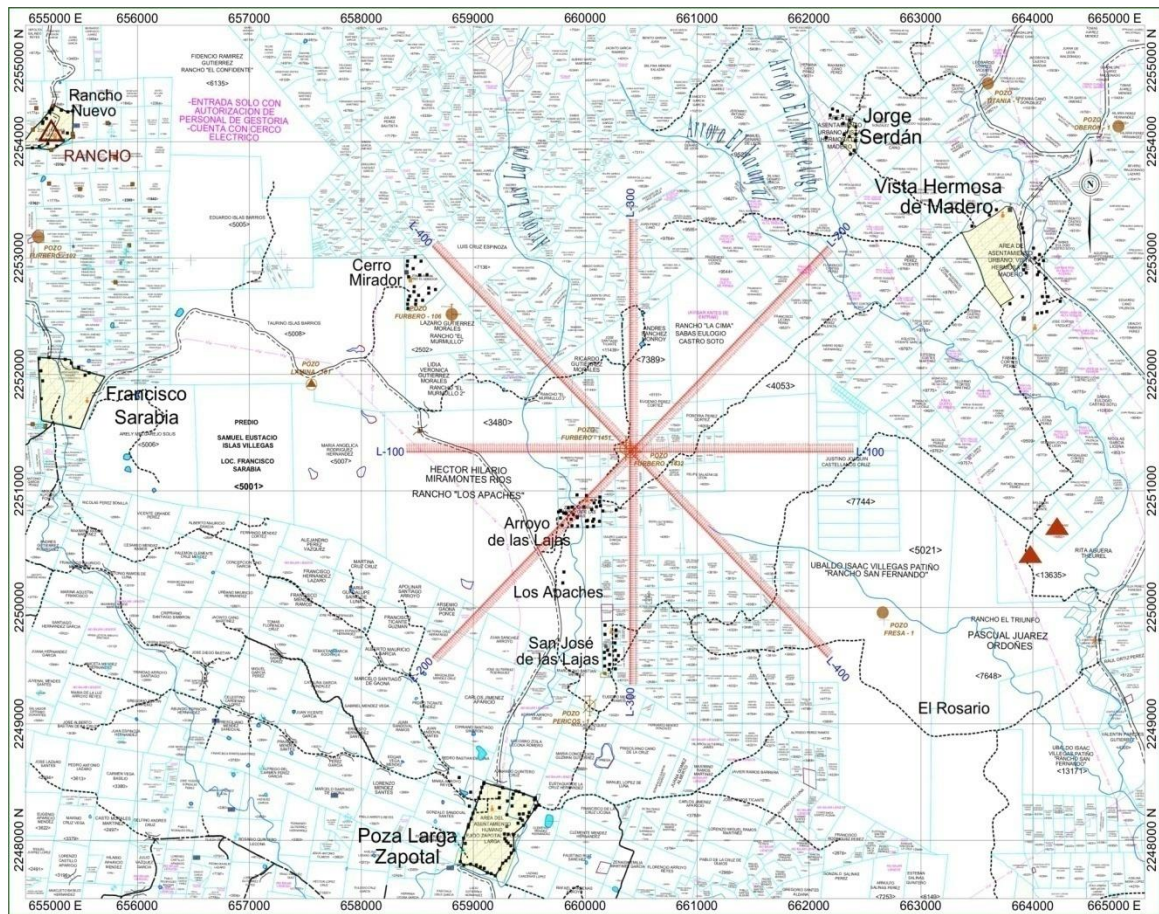


Figura 1. Logística operativa utilizada para el levantamiento de líneas para estudio microsísmico del pozo

#### **II.1.4 DESCRIPCIÓN GENERAL DEL ÁREA.**

El polígono del estudio encuentra ubicado en la zona Norte del Estado de Veracruz, a una altura de 220 metros sobre el nivel del mar.

Gran parte de la vegetación natural de la zona ha sido modificada a terrenos agrícolas, principalmente para cultivos de maíz.

El área de estudio en forma general está constituido por:

- 1) Potreros.
- 2) Huertos de naranja.
- 3) Cultivos temporales (maíz).
- 4) Pasadas de Monte alto

#### **II.1.5 VÍAS DE COMUNICACIÓN.**

El área del estudio está comunicada por terracerías que van de Papanltla a diferentes comunidades cercanas al área como son Poza Larga, San José y Arroyo de las Lajas

Para minimizar el daño a los caminos de acceso, los vehículos transitaron por los caminos principales hasta el lugar más cercano a las líneas de trabajo, y de allí el personal continuó caminando hasta el sitio donde iniciaban diariamente sus actividades.

#### **II.1.6 CLÍMA.**

En general el clima en la región fue caluroso húmedo durante los días de la operación.

Las precipitaciones pluviales fueron abundantes, durante los días en que se realizó el estudio. Esto influyó notablemente en la operación, ya que hubo zonas en el área donde crecieron los arroyos rápidamente bloqueando así el paso de los vehículos.

#### **II.1.7 TIPO DE TERRENO Y VEGETACIÓN.**

El estudio se situó en la región Norte del Estado de Veracruz, la topografía del área en general fueron lomeríos. Las elevaciones obtenidas mediante el levantamiento topográfico en el área del estudio son: la mínima 105 m. y la máxima 222 m. sobre el nivel medio del mar.

El área es principalmente dedicada al cultivo de maíz y huertos de cítricos. La fauna presenta especies tales como: conejos, mapaches y aves diversas. Las principales actividades económicas en el área son la agricultura y ganadería (fig. 2).



Figura 2. Tipo de terreno y vegetación del área de estudio.

### **II.1.8 SEGURIDAD INDUSTRIAL, PROTECCIÓN AMBIENTAL Y CALIDAD.**

Todos los empleados, son responsables de su seguridad personal, así como la de sus compañeros de trabajo. Esta cultura de seguridad es extensiva al cliente y proveedores dentro de las instalaciones de la Compañía.

Las medidas de seguridad implementadas para los trabajos de campo fueron: el uso del equipo proporcionado: overol, chaleco salvavidas, casco, guantes, calzado apropiado (botas), fundas para machetes. En los vehículos, el uso de cinturón de seguridad, radio comunicación y botiquín de primeros auxilios

En todos los trabajos se respetaron las normas de protección al medio ambiente, evitando contaminar el área con basura doméstica y desechos de tipo industrial.

Se prohibió la caza de animales silvestres. Así como en el acondicionamiento de línea, se respetaron los arbustos con tallo mayor de 10 cm. de diámetro.

## II.2 PARÁMETROS TOPOGRÁFICOS Y METODOLOGÍA

### II.2.1 PARÁMETROS DE CAMPO.

AZIMUT DE LÍNEA RECEPTORA 100	090° 00' 00"
AZIMUT DE LÍNEA RECEPTORA 200	045° 00' 00"
AZIMUT DE LÍNEA RECEPTORA 300	000° 00' 00"
AZIMUT DE LÍNEA RECEPTORA 400	315° 00' 00"
DISTANCIA ENTRE ESTACAS RECEPTORAS	20 m
ACONDICIONAMIENTO EN LÍNEAS RECEPTORAS	UN METRO DE ANCHO.

### II.2.2 PARÁMETROS GEODÉSICOS DE TRANSFORMACIÓN.

Los parámetros de transformación del Datum WGS-84 al Datum México NAD-27 son:

DATUM NORTEAMERICANO DE 1927 (MÉXICO NAD- 27):

Datum:	NAD 1927 (México)
Elipsoide:	Clarke 1866
Semi-eje mayor:	6,378,206.400 m
Semi-eje menor:	6,356,583.800 m
Aplanamiento (1/f):	294.9786982140
Excentricidad:	0.082271854225
Excentricidad <sup>2</sup> :	0.006768657997

PROYECCIÓN UNIVERSAL TRANSVERSA DE MERCATOR (C.U.T.M):

Zona geográfica	14-N
Meridiano central	99° W
Este falso	500,000.00 m
Norte falso	0.0 m
Factor de escala	0.9996

SISTEMA GEODÉSICO MUNDIAL 1984 (WGS-84):

Datum:	WGS-84
Elipsoide:	WGS-84
Semi eje mayor:	6378137.000 m
Semi eje menor:	6356752.3142 m
Aplanamiento (1/f):	298.257223563
Excentricidad:	0.081819190843
Excentricidad <sup>2</sup> :	0.0066943799902

### MARCO DE REFERENCIA GEODÉSICO INTERNACIONAL (ITRF-92):

Datum:	ITRF-92
Elipsoide:	GRS-80
Semi eje mayor:	6378137.000 m
Semi eje menor:	6356752.3142 m
Aplanamiento (1/f):	298.2572221010
Excentricidad:	0.081819191043
Excentricidad <sup>2</sup> :	0.0066943800229

### PARÁMETROS DE TRANSFORMACIÓN DE DATUM WGS-84 A NAD-27 (MÉXICO):

$$\begin{aligned}\Delta X &= -12.0 \\ \Delta Y &= +130.0 \\ \Delta Z &= +190.0\end{aligned}$$

### II.2.3 PREPLOT.

El diseño sísmico original (PREPLOT) del estudio, propuesto por el IMP es en forma de estrella (fig. 3), generado en coordenadas C.U.T.M. de la zona 14 y conforme a los parámetros establecidos en el contrato.

<b>LÍNEAS RECEPTORAS</b>	<b>4</b>	<b>900 PUNTOS RECEPTORES</b>
<b>KILOMETROS PARA RECEPTORAS</b>	<b>18.00 Km</b>	

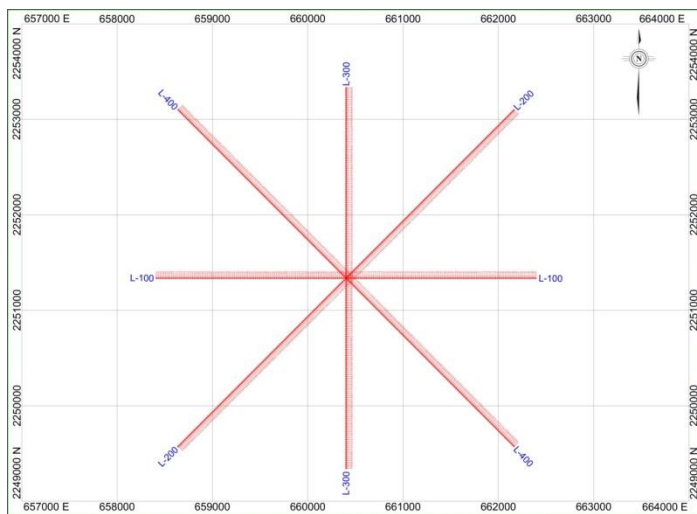


Figura 3. Diseño de preplot teórico.

## **II.2.4 LOGÍSTICA OPERACIONAL DE TOPOGRAFÍA.**

Las actividades operativas de campo de la sección de Topografía, se coordinaron con las operaciones de las secciones de Gestoría.

Para el apoyo logístico en el traslado del personal se utilizó transporte terrestre tipo D-350 (1 unidad), Pick-up D-250 (1 unidad), todos equipados con dispositivo de control de velocidad (drive right), radio VHF, bancas con cinturón de seguridad y botiquín de primeros auxilios.

Los problemas de campo presentados, fue la negativa de permiso para trabajar por parte de algunos propietarios

Otro factor que influyó en el avance de levantamiento, fue un temporal de lluvia que afectó al inicio de los trabajos de levantamiento y acondicionamiento de las líneas.

### **Pruebas a equipos GPS**

Para el levantamiento topográfico de estaciones receptoras dentro del estudio de microsísmica se utilizaron equipos GPS-RTK de la marca Trimble modelos R8/3 GNSS, los cuales ofrecen un rastreo de señales y un rendimiento de alta calidad, esto en mejoría con la introducción de las nuevas señales L2C, L5 y GLONASS, la alimentación de antena de 4 puntos patentada del receptor de doble frecuencia incorporado del sistema, presenta una estabilidad submilimétrica del centro de fase para lograr una máxima precisión. Por característica de los equipos difícilmente presentan algún desperfecto de medición, sin embargo por contrato se realiza una prueba, la cual comprueba el óptimo estado del equipo para ser utilizado durante la nivelación de puntos sobre el estudio.

Diariamente se activa la Estación Base con la cual se trabajará durante el día, el vértice es seleccionado con anticipación, previo análisis del tipo de topografía que prevalece y que dará óptimos resultados en la recepción de señal de radio para los equipos móviles.

Los equipos GPS-RTK realizan la grabación de un punto sobre un vértice conocido donde se realiza el chequeo diario. Posteriormente se confirman coordenadas, se revisan los valores obtenidos por cada equipo y se determina que las coordenadas obtenidas están exentas de cualquier error en valores (X, Y, Z) y el equipo está en condiciones óptimas de ser utilizado durante el día.

## **II.2.5 ACONDICIONAMIENTO DE LÍNEA SÍSMICA.**

El acondicionamiento de línea sísmica se realizó de acuerdo a las especificaciones del contrato:

- Un metro de ancho en líneas receptoras.

- Las estaciones en las líneas receptoras, se marcaron con estacas de madera identificadas con pintura azul.
- Las actividades se realizaron respetando las normas de seguridad, ecología y medio ambiente. Para el acondicionamiento de líneas receptoras se utilizaron herramientas manuales (machetes), se prohibió cortar arbustos cuyo tallo midiera más de 10 cm de diámetro.
- Todas las operaciones sobre las líneas se efectuaron a pie. El vehículo trasladó al personal solamente por los caminos principales.

## **II.2.6 LEVANTAMIENTO TOPOGRÁFICO.**

El acondicionamiento de brecha y levantamiento Topográfico, inició el día 23 de Julio de 2010 y terminó el día 04 de Agosto de 2010. Previo al acondicionamiento de brecha y Levantamiento Topográfico, se efectuó un reconocimiento físico. En este estudio se empleó el método de levantamiento GPS-RTK.

### **LEVANTAMIENTO TOPOGRÁFICO SISTEMA GPS-RTK.**

Este método de levantamiento se utiliza en lugares despejados o con vegetación baja, de modo que permita la recepción de satélites de la constelación NAVSTAR. Tiene la ventaja de simplificar los cálculos en gabinete, aumenta la producción, excelente precisión, facilidad para obtener coordenadas y sobre todo reduce el tiempo de operación.

Se utilizaron receptores marca Trimble, modelo R8-3 empleando el método de posicionamiento RTK (cinemático en tiempo real), que funciona con un enlace entre la estación maestra de GPS en la cual se le introducen coordenadas conocidas, ésta funciona como emisora y transmite un mensaje de corrección CMR plus propiedad de Trimble Navigation LTD, hacia uno o más receptores remotos los cuales usan la información para que se calcule un vector preciso entre la base y el receptor remoto.

Usando este método se pueden esperar precisiones de  $1\text{cm} \pm 2\text{ ppm}$  (nota del fabricante en los manuales de operación).

El procedimiento que se sigue para trabajar es el siguiente:

1) Se instala el receptor GPS base en un vértice de Red geodésica de GPS de acuerdo a la logística de operación. Este receptor se inicializa introduciendo las coordenadas geográficas y altura del vértice en valores WGS-84 (ITRF-92).

2) Antes de empezar el levantamiento, se verifica el funcionamiento correcto de los receptores colocando los equipos remotos en otros vértices de la red, la posición no debe de variar más de 0.10 m en horizontal y 0.20 m en vertical. Esta verificación se hace todos los días.

3) Las coordenadas teóricas (preplot), se transfieren de la computadora al colector de datos, con este se navega a la posición requerida (generalmente una línea



de puntos en secuencia), se graban las coordenadas reales a una distancia no mayor de 0.20 m de la estación teórica (preplot), las coordenadas de cada una de estas estaciones son obtenidas en coordenadas WGS-84.

4) En gabinete se recibe el colector de datos, se transfiere el archivo a una computadora, se realiza la transformación de coordenadas de sistema WGS84 a NAD27 y la altura elipsoidal a altura ortométrica, utilizando el programa GPSeismic.

5) En las partes bajas se utilizaron radios modem configurados como repetidores, para que los receptores móviles recibieran la señal de radio transmitida desde la estación base GPS (figura 4).



Figura 4. Levantamiento con sistema GPS-RTK.

## II.2.7 PROCESADO DE DATOS TOPOGRÁFICOS.

### II.2.7.1 ESPECIFICACIONES TÉCNICAS.

De acuerdo con el contrato, las especificaciones técnicas necesarias para dar cumplimiento al Levantamiento Geodésico y Topográfico de las líneas sísmicas fueron:

#### Sistemas De Referencia:

Elementos de Referencia	Sistema de Coord. Geodésicas Local	Sistema Satelital GPS	Sistema de Coord. Geodésicas ITRF92
- Datum	NAD-27 (México)	WGS-84	ITRF-92
- Elipsoide:	CLARKE 1866	WGS-84	GRS-80
- Semieje mayor:	6,378,206.4 m	6,378,137.0000 m	6,378,137.0000 m

- Semieje menor:	6,356,583.8 m	6,356,752.3142 m	6,356,752.3142 m
- Aplanamiento (1/f)	294.9786982140	298.2572235630	298.2572221010
- Unidad:	Metro Internacional	Metro Internacional	Metro Internacional
-Excentricidad <sup>2</sup> :	0.006768657997	0.00669437999020	0.006694380022930

El estudio se sitúa en la zona geográfica 15-N de la proyección C.U.T.M; se utilizó un preplot teórico generado en dicha zona.

#### Parámetros de Proyección Cartográfica:

- Proyección:	C.U.T.M
- Zona Geográfica:	14-N
- Meridiano Central:	99° W
- Latitud origen:	00° N
- Factor de escala:	0.9996
- Falso Norte:	0.00 m
- Falso Este:	500,000 m Meridiano central
- Unidad:	Metro Internacional

Para el tipo de levantamiento topográfico-geodésico dentro de la sísmica, se tomaron en cuenta tolerancias y estándares ya establecidos. En el presente estudio se cumplieron los requerimientos de medición, superándose incluso las tolerancias mínimas las cuales se mencionan a continuación:

#### Especificaciones para el control geodésico:

- Resistencia vectorial para cierres	1.00 ppm
- PDOP:	< 5
- Número de satélites	>= 5
- Altura sobre el horizonte:	> 15°
-Tiempo de sincronización estático	15 seg.

#### Especificaciones para el control topográfico:

- Tolerancia en posición horizontal respecto a la original	$\pm 0.20$ m
- Tolerancia lineal para poligonales convencionales:	1: 5,000
- Tolerancia de cierre vertical	0.10 m $\sqrt{K}$

K = Desarrollo en Kilómetros.

#### II.2.7.2 CONTROL DE CALIDAD.

Para el control de calidad se utilizó la base de datos GPSQL del programa GPSeismic versión 2006; esta base acumula toda la información del levantamiento GPS-RTK y pueden crearse tablas con una información ordenada en campos con los

datos que se necesiten. El GPSQL nos permite seleccionar, actualizar y desplegar datos; de igual forma se pueden crear y relacionar campos, crear archivos de coordenadas y exportarlos en diferentes formatos (SP1, UKOOA, SPS, etc.).

Esta base de datos se forma de archivos procesados en la utilidad QuikView y que son almacenados en otro archivo llamado \*.mdb, llevando un control de estaciones fuentes y receptoras.

Con la base de datos se detectan:

- ❖ Estaciones con nombre equivocado.
- ❖ Estaciones duplicadas o faltantes.
- ❖ Estaciones fuera de tolerancia.
- ❖ Estaciones medidas dentro de un mismo bin.
- ❖ Valores de PDOP fuera de tolerancia
- ❖ Número de satélites de cada estación
- ❖ Valores de residuales altos.

### **II.2.7.3 PROGRAMAS DE COMPUTACIÓN UTILIZADOS.**

- **GPSEISMIC Versión 2006.**

Programa diseñado para levantamientos topográficos con equipo GPS por el método RTK, con las siguientes utilidades:

- QuikLoad: genera coordenadas de preplot de diferente diseño sísmico y con distintos Datums y sistemas, carga los colectores de datos TSC-1, TSCe ACU y TSC-2. Así mismo, transforma coordenadas geográficas a distintos Datums y proyecciones.
- QuikView: procesa los datos del levantamiento GPS-RTK. Transforma coordenadas de WGS-84 a coordenadas locales, convierte alturas elipsoidales a ortométricas y realiza controles de calidad.
- GPSQL: base de datos que permite llevar un buen control de calidad de los levantamientos GPS-RTK, el usuario desarrolla una biblioteca de consultas para estaciones fuentes, receptoras, detalles culturales, calidad de levantamiento por estaca, etc. Genera reportes de coordenadas en diferentes formatos.
- QuikMap: ordena, interpola, ejecuta proximidades entre puntos, calcula intersecciones, crea zonas de exclusión, deja que el usuario despliegue la capa inicial y secundaria, y utilice como fondo imágenes en formatos convencionales.

- **GEOGRAPHIC CALCULATOR Versión 3.09.**

Para transformación de coordenadas entre diferentes Datums.

- **MÉXICO 97C**

Para calcular la ondulación Geoidal.

### II.2.7.4 RELIEVE DEL ESTUDIO DE MICROSÍSMICA.

En base a las alturas ortométricas H y las coordenadas C.U.T.M. X y Y de las estaciones fuentes y receptoras, se obtuvo el relieve topográfico del área del estudio de Microsísmica al pozo (fig. 5).

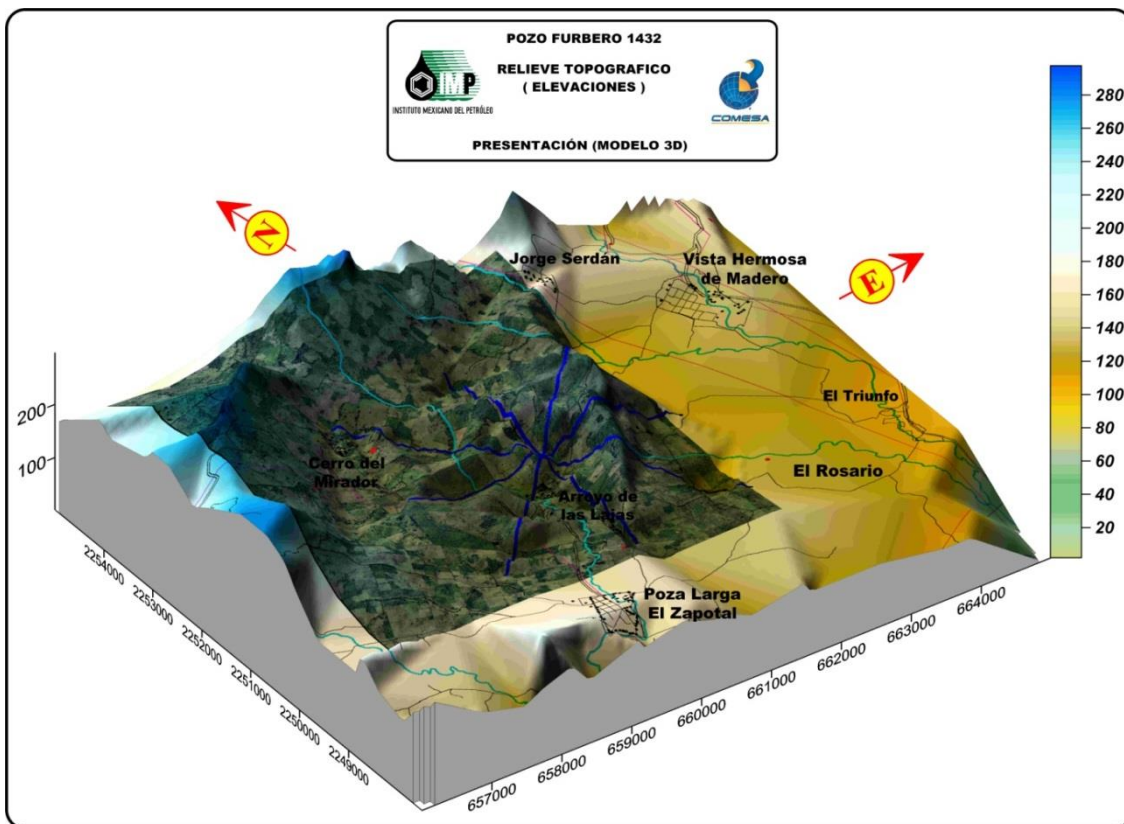


Figura 5. Modelo del relieve topográfico de líneas al pozo Furbero 1432.

### II.2.8 RELACIÓN DE EQUIPO TOPOGRÁFICO.

#### II.2.8.1 EQUIPO PARA LEVANTAMIENTO GPS (RTK).

EQUIPO GPS MARCA TRIMBLE R8-3 (fig. 6).

DESCRIPCIÓN	CANTIDAD
RECEPTORES GPS MODELO R8-3 GLONASS GNSS, DE DOBLE FRECUENCIA	3
RADIO MODEM MODELO HPB-450 (MASTER), DE 35 WATTS	1
RADIO MODEM MODELO HPB-450 (REPETIDOR), DE 35 WATTS	2
GPS PORTATIL MARCA GARMIN MODELO 76	2
COLECTOR DE DATOS TRIMBLE MODELO TSC2	3



Figura 6. Equipo GPS R8.

## II.2.8.2 EQUIPO DE OFICINA.

DESCRIPCIÓN	CANTIDAD
COMPUTADORA MARCA HP COMPAQ, MODELO dc 7900, CON PROCESADOR INTEL CORE DUO, 4096 MB DE MEMORIA RAM Y DISCO DURO DE 160 GB.	1
COMPUTADORA MARCA HP COMPAQ, MODELO dc 7900, CON PROCESADOR INTEL CORE DUO, 4096 MB DE MEMORIA RAM Y DISCO DURO DE 160 GB.	1
PC LAPTOP MARCA HP, MODELO 6730b, CON PROCESADOR CORE 2, 4,096 MB DE MEMORIA RAM Y DISCO DURO DE 160 GB.	1
PLOTTER HEWLETT PACKARD DESIGNJET 5500PS	1
ESCANER IMPRESORA HP PSC-1410	1



Figura 7. Equipo de oficina.

## II.3 GRABACIÓN DE DATOS MICROSÍSMICOS

### II.3.1 REQUERIMIENTOS GENERALES.

El servicio consistió en registrar los eventos microsísmicos generados durante la generación de una fractura hidráulica a fin de saber su orientación y dimensiones. Para lograr esto, se realizó una prueba de campo en la cual se colocan un número

determinado de estaciones (las cuales tenían conectados seis geófonos de alta resolución) en un arreglo geométrico radial. Es importante mencionar que el número de estaciones requeridas depende de la profundidad a la cual se vaya a efectuar la fractura hidráulica, la cual se encuentra en el rango de 1.2 a 2.5 km. Dicha profundidad a su vez depende de la zona en la que se encuentre el pozo seleccionado para la prueba. Dicho arreglo radial tuvo ocho brazos, seis con un rango de longitud de 1.5 a 2.5 km, y dos brazos con un rango de longitud de 2 a 3 km (orientación NE-SO); la separación entre estaciones fue de 20 m. De acuerdo a lo anterior, para la realización de este tipo de pruebas se requiere un mínimo de 650 estaciones y un máximo de 1050 estaciones. El número de estaciones a emplear depende del pozo que sea asignado por el cliente, y el diseño se hace sobre la base del máximo número de estaciones (fig. 8).

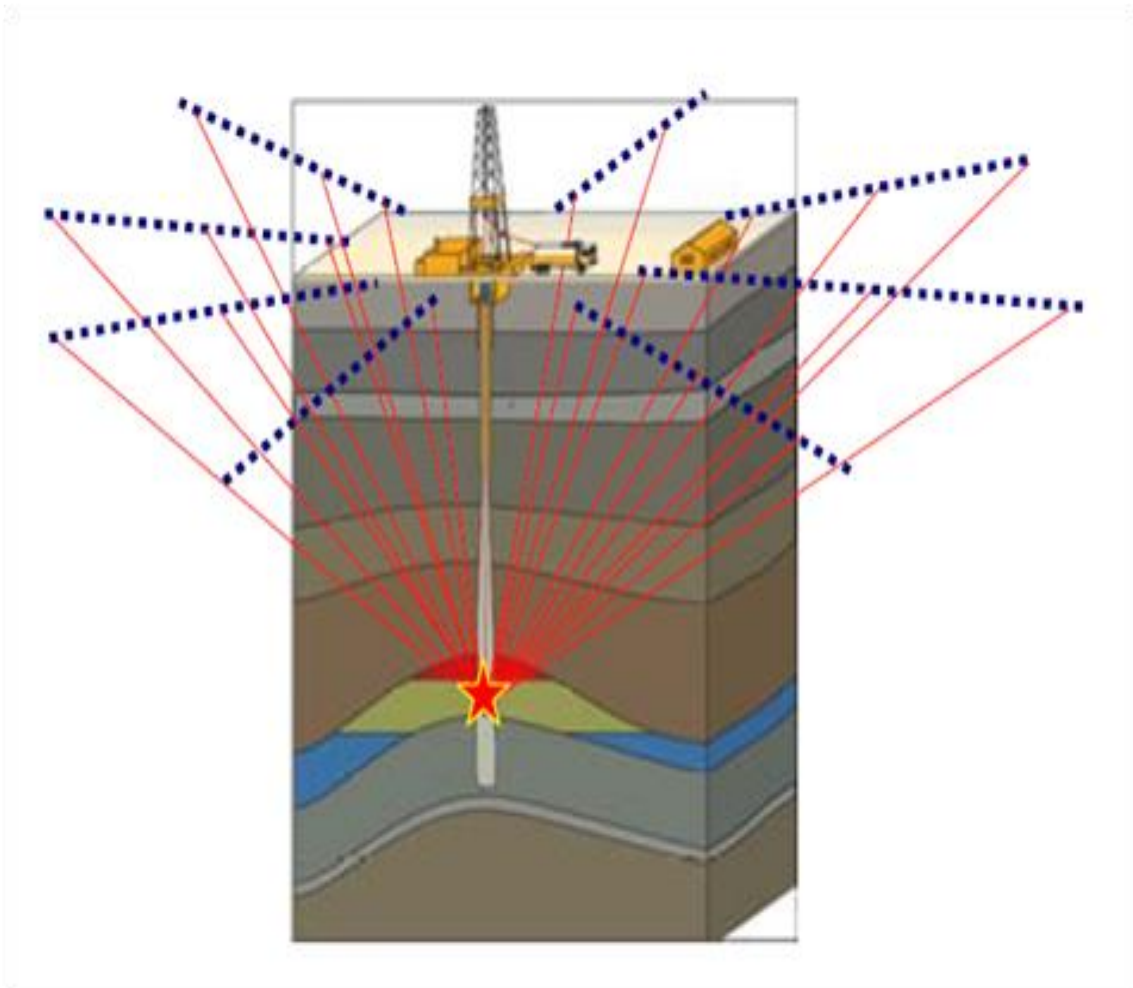


Figura 8. Arreglo de levantamiento microsísmico.

### II.3.2 REQUERIMIENTOS ESPECÍFICOS.

Se registró el ruido de fondo que impera en los alrededores del pozo, en el cual se llevó a cabo la prueba de fracturamiento hidráulico. Las posibles fuentes de dicho ruido de fondo son: viento, ganado, transporte de vehículos, lluvias, etc. Además, se grabaron los disparos previos a la prueba de fracturamiento hidráulico para determinar un modelo

de velocidades sísmicas preliminar. Posteriormente, se grabaron los campos de ondas producidos durante las diferentes etapas de la prueba de fracturamiento hidráulico y los eventos microsísmicos susceptibles de ser detectados al término de dicha prueba. Al mismo tiempo, se registraron todos los parámetros relacionados con el bombeo, como por ejemplo el flujo de fluidos. Para asegurar una mejor calibración del monitoreo microsísmico se colocó una estación en el árbol de válvulas. A continuación se describen los parámetros físicos y de medición para las diferentes etapas de grabación de los ruidos de fondo y la actividad microsísmica.

1) Emisiones acústicas de los disparos realizados a la formación (fig. 9):

- Intervalo de grabación: 0.002 s
- Frecuencia Nyquist ( $\frac{1}{2}$  intervalo de grabación): 250 Hz
- Frecuencia central: 60 Hz
- Tiempo de duración < 10 min (detectar primeros arribos)
- Creación de archivos SEG-Y a 1.0 s
- Coordinarse con el equipo de bombeo para determinar el  $T_0$
- Rango dinámico automático para detección de disparos
- Amplitudes y ganancias móviles para detectar los disparos en la mayoría del arreglo

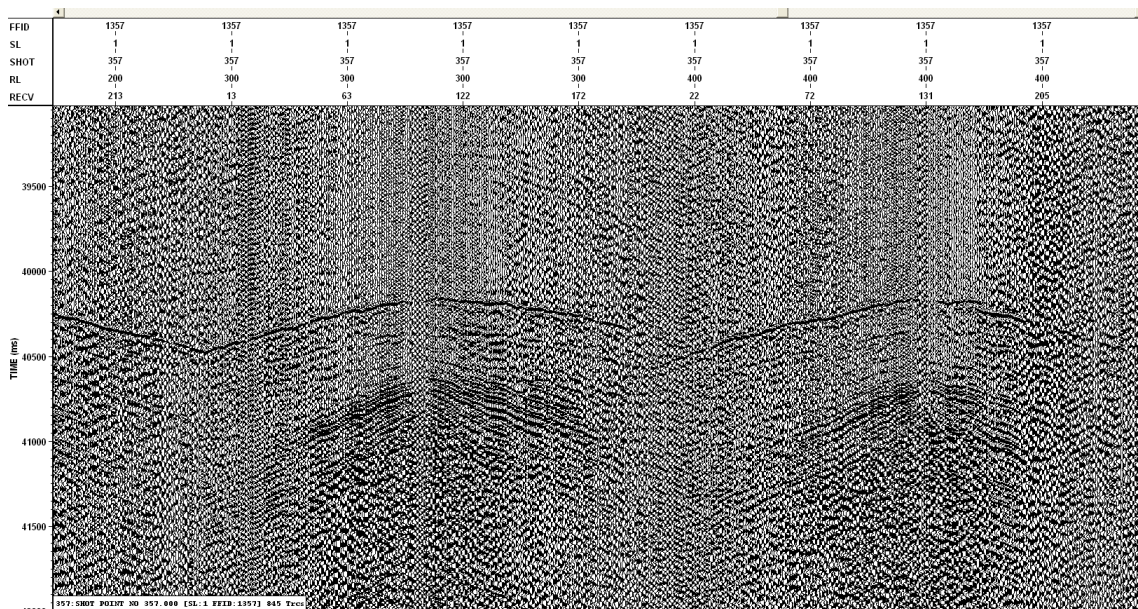


Figura 9. Primer disparo.

2) Monitoreo previo a la prueba de fracturamiento hidráulico (fig. 10):

- Intervalo de grabación: 0.002 s
- Frecuencia Nyquist ( $\frac{1}{2}$  intervalo de grabación): 250 Hz
- Frecuencia central: 60 Hz
- Tiempo de duración: 20 min (intervalos para grabación continua)
- Creación de archivos SEG-Y a 1.0 s



- Medición de ruido ambiental
- Rango dinámico automático para detección de ruidos
- Aplicar filtros FK para identificar y eliminar ruidos de equipo de bombeo
- Amplitudes móviles para minimizar ruido.



Figura 10. Macropera del área de estudio.

### 3) Monitoreo de las distintas etapas del fracturamiento hidráulico (fig. 11):

- Intervalo de grabación: 0.002 s
- Frecuencia Nyquist ( $\frac{1}{2}$  intervalo de grabación): 250 Hz
- Frecuencia central: 60 Hz
- Tiempo de duración: 20 min (intervalos para grabación continua)
- Creación de archivos SEG-Y a 1.0 s
- Medición en las 8 ó 10 etapas de bombeo
- Coordinarse con el equipo de bombeo para indicar principio y fin de cada etapa
- Rango dinámico para detección de las emisiones microsísmicas de la fractura hidráulica
- Aplicar filtros FK para identificar y eliminar ruidos de equipo de bombeo
- Amplitudes y ganancias móviles para detectar las emisiones microsísmicas de la fractura hidráulica en mayoría del arreglo

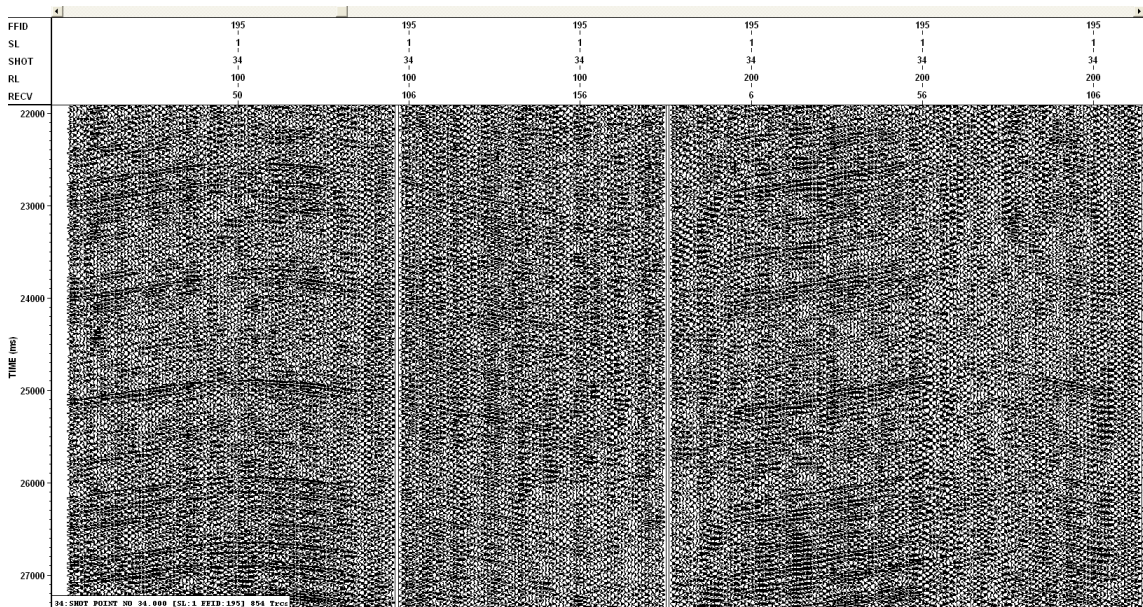


Figura 11. SEG-Y donde se muestra el registro de la segunda fractura.

4) Monitoreo después de la prueba de fracturamiento hidráulico (fig. 12):

- Intervalo de grabación: 0.002 s
- Frecuencia Nyquist ( $\frac{1}{2}$  intervalo de grabación): 250 Hz
- Frecuencia central: 60 Hz
- Tiempo de duración: 20 min
- Creación de archivos SEG-Y a 1.0 s
- Medición sin equipo de bombeo presente ni actividad industrial
- Rango dinámico automático para detección de ruido ambiental
- Aplicación de filtros para identificación de ruidos.

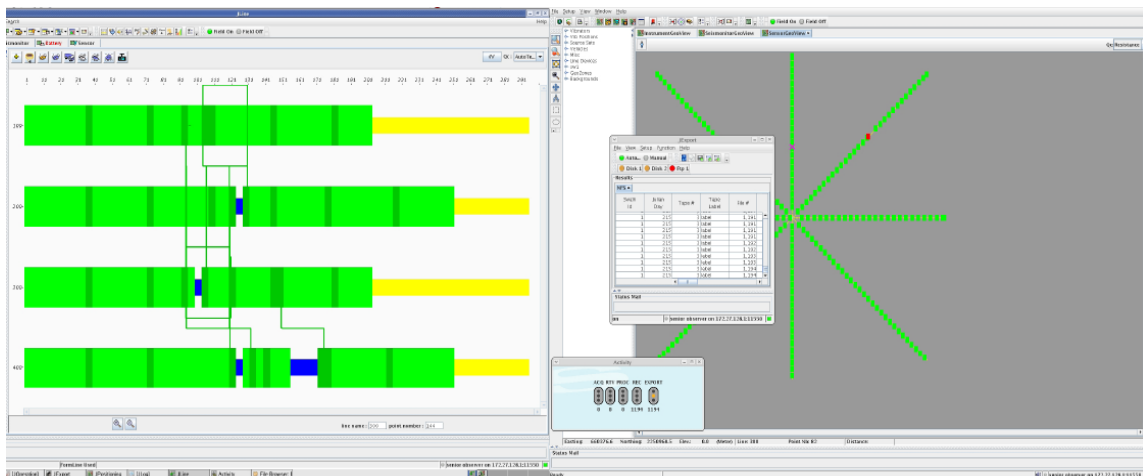
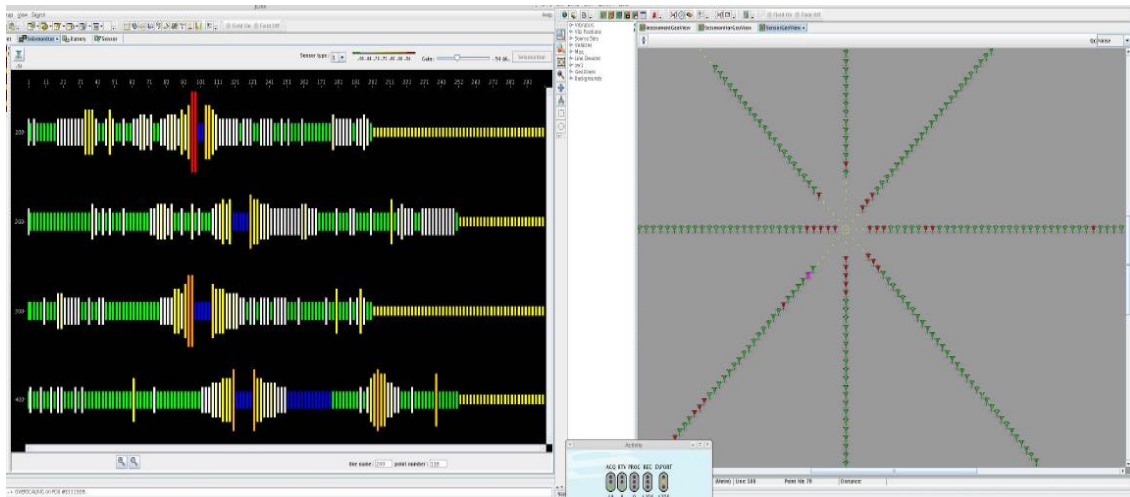


Figura 12. Imágenes del tendido durante la observación de datos.

### III. ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN

#### III.1 PROCESAMIENTO E INTERPRETACIÓN.

El Procesamiento Especial de Datos Microsísmicos incluye el tratamiento de la información microsísmica derivada de la prueba de campo, con el fin de poder determinar la orientación y dimensiones de la fractura hidráulica. Toda esta etapa del trabajo se realizó en el IMP.

El tratamiento de la información microsísmica se apoyó en el análisis de los registros geofísicos de pozo y la sismología de exploración disponibles. Aplicar los métodos de inversión geofísica para solucionar problemas de anisotropía y para la interpretación cuantitativa de registros de pozos en Petrofísica. Realizar el procesamiento de señales y registros sísmicos, tales como STC (Slowness Time Coherence), SFC (Slowness

Frequency Coherence), anisotropía, atenuación y dispersión. Modelar los registros sísmicos y el procesamiento digital de señales de perfiles sísmicos verticales (VSP). Se desarrolló la programación estructurada para codificar los algoritmos que se requieren para el procesamiento y análisis de la información microsísmica, a fin de hacer más eficiente las tareas requeridas para determinar la orientación y dimensiones del fracturamiento hidráulico inducido.

El procesamiento e interpretación de la información se desarrolló conforme a las siguientes actividades:

- 1) Realizar el procesado microsísmico especial de las trazas adquiridas antes, durante y después de una prueba de fracturamiento hidráulico.
- 2) Proveer resultados numéricos y gráficos a partir del estudio de las trazas en tiempo y proponer modelos para la localización de los eventos microsísmicos provenientes de la fractura hidráulica inducida.
- 3) Interpretar cuantitativamente los datos microsísmicos adquiridos y el estudio estadístico de errores para mejorar los modelos de velocidades.

### **III.2 RESULTADOS.**

Entregables:

- 1) Toda la información microsísmica, los reportes, las figuras y los anexos técnicos se entregaron en formatos digitales contenidos en USB o discos de almacenamiento externos portátiles. La empresa que prestó el servicio deberá conservar dos copias de los datos digitales y los entregables que reciba el IMP, a fin de tener un respaldo.
- 2) Los datos de la adquisición microsísmica para el monitoreo de fracturas hidráulicas inducidas se entregaron en formato SEG-Y, con la descripción de los campos utilizados en el formato y se incluyó el registro del observador (observers log).
- 3) Los archivos generados durante la adquisición de la información microsísmica contienen un segundo de duración de grabación cada uno y están referenciados en espacio y tiempo.

El registro del observador contiene la descripción de los aparatos detectores empleados en la prueba de campo, ubicación espacial de los aparatos detectores, prueba de control de calidad, el registro de mediciones relacionadas con el fracturamiento tales como, presión, volúmenes inyectados y tiempos de bombeo (esta información se debe solicitar a la compañía que realiza la prueba de fracturamiento hidráulico y se relacionó con los tiempos de registro en el monitoreo), los datos de tiempo en formato seg-y necesitan ser calibrados/conectados con los tiempos de la realización de la prueba de fracturamiento hidráulico.

Entregables en el procesado de la información microsísmica:

- 1) Descripción detallada del método (o los métodos) empleados para detectar eventos microsísmicos y determinar sus ubicaciones.
- 2) Una lista completa de los eventos microsísmicos detectados con los tiempos de los aparatos detectores, o intervalos de tiempo con respecto a otro evento (reporte escrito y archivo electrónico)
- 3) Cada evento microsísmico detectado en una ventana de tiempo se graba en un archivo seg-y independiente, para facilitar su graficación y procesamiento futuros. Cada evento microsísmico se etiquetaría como un tiro diferente. Por ejemplo, 600 geófonos, 1000 muestras, 2 bytes y 1000 eventos serían 1.2 gigabytes (archivos electrónicos).
- 4) Descripción detallada de la localización y tiempo de cada evento detectado (reporte escrito y archivo electrónico)
- 5) El software libre, las metodologías de procesamiento y los resultados se entregaron organizados en un sistema software-hardware especializado, a fin de que personal pueda tener acceso rápido a dichos resultados.

Dependiendo de la calidad de la información adquirida durante la prueba de campo, se trataron de detectar los eventos microsísmicos y hacer las localizaciones por medio del empleo de varias metodologías. El éxito de los resultados se verifica hasta que se trabaja con la información. Sí se logra este objetivo por medio del uso de software libre y de dominio público con sólo un poco de codificación, entonces también se incluyen en los entregables.

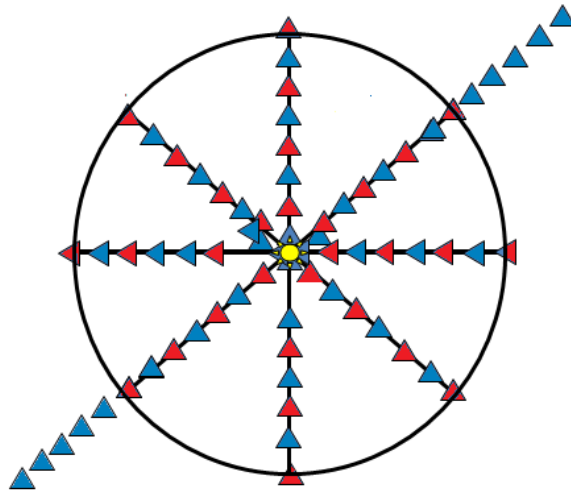


Figura 12. Arreglo geométrico espacial de geófonos empleados en la prueba de microsísmica en campo. Los triángulos rojos representan las ubicaciones de los geófonos cuya información fue analizada (100m, 500m, 1000m y 2000m).

**Resultados del análisis del escalamiento dinámico de las fluctuaciones de la información microsísmica antes y durante el tratamiento de fracturamiento hidráulico:**

<b>ORIENTACION</b>	<b>DIFERENCIA (100 M)</b>	<b>DIFERENCIA (500M)</b>	<b>DIFERENCIA (1000 M)</b>	<b>DIFERENCIA (2000 M)</b>
<b>0°</b>	<b>0.065700</b>			<b>0.150300</b>
<b>45°</b>	<b>0.441600</b>	<b>0.156400</b>	<b>0.015000</b>	<b>0.015900</b>
<b>90°</b>	<b>0.062700</b>			<b>0.089900</b>
<b>135°</b>	<b>0.037940</b>			<b>0.036200</b>
<b>180°</b>	<b>0.046900</b>			<b>0.182200</b>
<b>225°</b>	<b>0.312000</b>	<b>0.120200</b>	<b>0.030900</b>	<b>0.059100</b>
<b>270°</b>	<b>0.004500</b>			<b>0.073300</b>
<b>315°</b>	<b>0.073600</b>			<b>0.001800</b>

En esta tabla se puede observar que existe mayor densidad de información de los datos analizados de manera estadística, donde acentúa en los dos brazos del arreglo radial a los 45° y a los 225° azimutales, y también que conforme la diferencia de la distancia del centro del arreglo hacia los extremos, en un escalamiento dinámico del comportamiento de los eventos microsísmicos, en las diferentes en las etapas de la prueba.

#### **IV. CONCLUSIONES**

Este reporte incluye un trabajo de adquisición, procesamiento e interpretación de datos de un estudio geofísico moderno y de gran utilidad en exploración.

Se verifica la importancia de la coordinación de operaciones con los equipos de trabajo de geología, topografía y observación, involucrados en este tipo de trabajos de campo.

Se constata que una compañía de exploración mexicana mantiene contacto con las actividades de investigación a través del IMP, posibilitando el flujo de conocimiento y tecnologías.

No se incluyen todos los resultados del estudio, sobre todo en la parte de interpretación, debido a que la información es confidencial y no se pudo disponer de los resultados y figuras para incluirlos en este reporte.

Este trabajo ha servido al autor para consolidar los conocimientos teóricos adquiridos en las aulas, mediante la práctica en un estudio real en campo; así como adquirir las habilidades necesarias y la experiencia de trabajo.

## BIBLIOGRAFÍA

1. BASSIOUNI, Z.; "Theory, Measurement and Interpretation of Well Logs" Tulsa, OK, SPE Textbook Series 4, 1994
2. BATEMAN, R.M.; "Open-Hole Log Analysis and Formation Evaluation"; Boston; International Human Resources Development Corporation, 1985
3. ELLIS, D.W.; "Well Logging for Earth Scientists"; Elsevier; Amsterdam, 1987
4. Pirak-Nolte, Laura J., Myer, Larry R., Cook, Neville G. W.; "Anisotropy in Seismic Velocities and Amplitudes From Multiple Parallel Fractures"; JOURNAL OF GEOPHYSICAL RESEARCH. VOL. 95, NO. B7, PAGES 11,345-11,358, JULY 10, 1990
5. Pirak-Nolte, Laura J.; "Frequency dependence of fracture stiffness"; GEOPHYSICAL RESEARCH LETTERS, VOL. 19, NO. 3, PAGES 325-328, FEBRUARY 7, 1992
6. Oligier, A., Nolte, D. D., Pyrak-Nolte, Laura J.; "Sismic focusing by a single planar fracture"; GEOPHYSICAL RESEARCH LETTERS, VOL. 30, NO. 5, 1203, 2003
7. Pyrak-Nolte, Laura J., Nolte, David D.; "Wavelet analysis of velocity dispersion of elastic interface waves propagating along a fracture"; GEOPHYSICAL RESEARCH LETTERS, VOL. 22, NO. 11, PAGES 1329-1332, JUNE 1, 1995
8. Pirak-Nolte, Laura J., Myer, Larry R., Cook, Neville G. W.; "Transmission of Seismic Waves Across Single Natural Fractures"; JOURNAL OF GEOPHYSICAL RESEARCH. VOL. 95, NO. B6, PAGES 8,617-8,638, JUNE 10, 1990
9. Pyrak-Nolte, L. J., Morris J. P.; "Single fractures under normal stress: The relation between fracture specific stiffness and fluid flow"; International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences 37 (2000) 245-262
10. Xun Li, Laura J. Pirak-Nolte; "Acoustic monitoring of sediment-pore fluid interaction"; GEOPHYSICAL RESEARCH LETTERS, VOL. 25, NO. 20, PAGES 3899-3902, OCTOBER 15, 1998
11. SECRETARÍA DE ENERGÍA, NORMA Oficial Mexicana NOM-026-SESH-2007, Lineamientos para la los trabajos de prospección sísmológica petrolera y especificaciones de los niveles máximos de energía. DIARIO OFICIAL, Miércoles 29 de agosto de 2007
12. NORMA Oficial Mexicana NOM-116-SEMARNAT-2005, Que establece las especificaciones de protección ambiental para prospecciones sísmológicas terrestres que se realicen en zonas agrícolas, ganaderas y eriales.