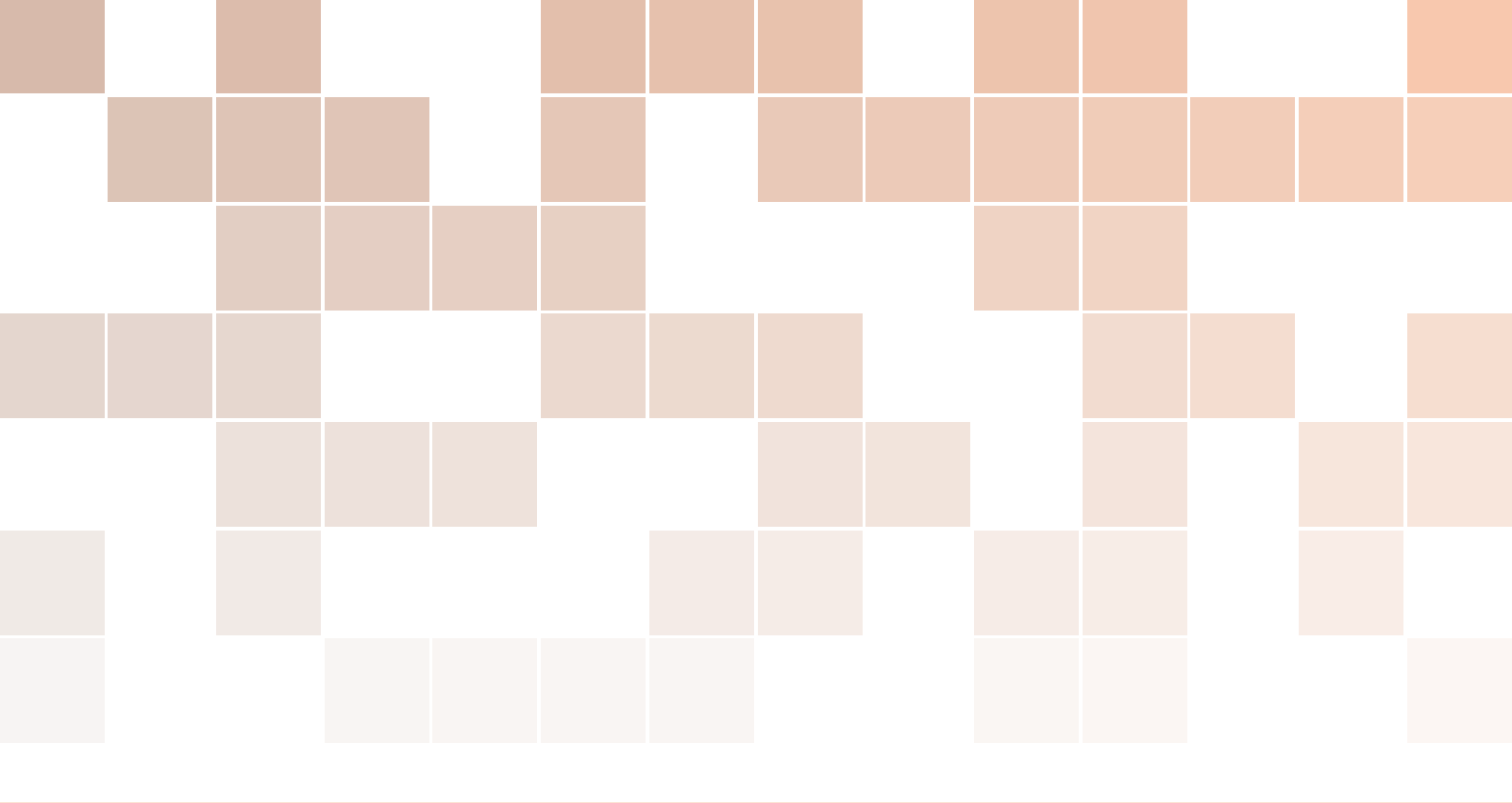
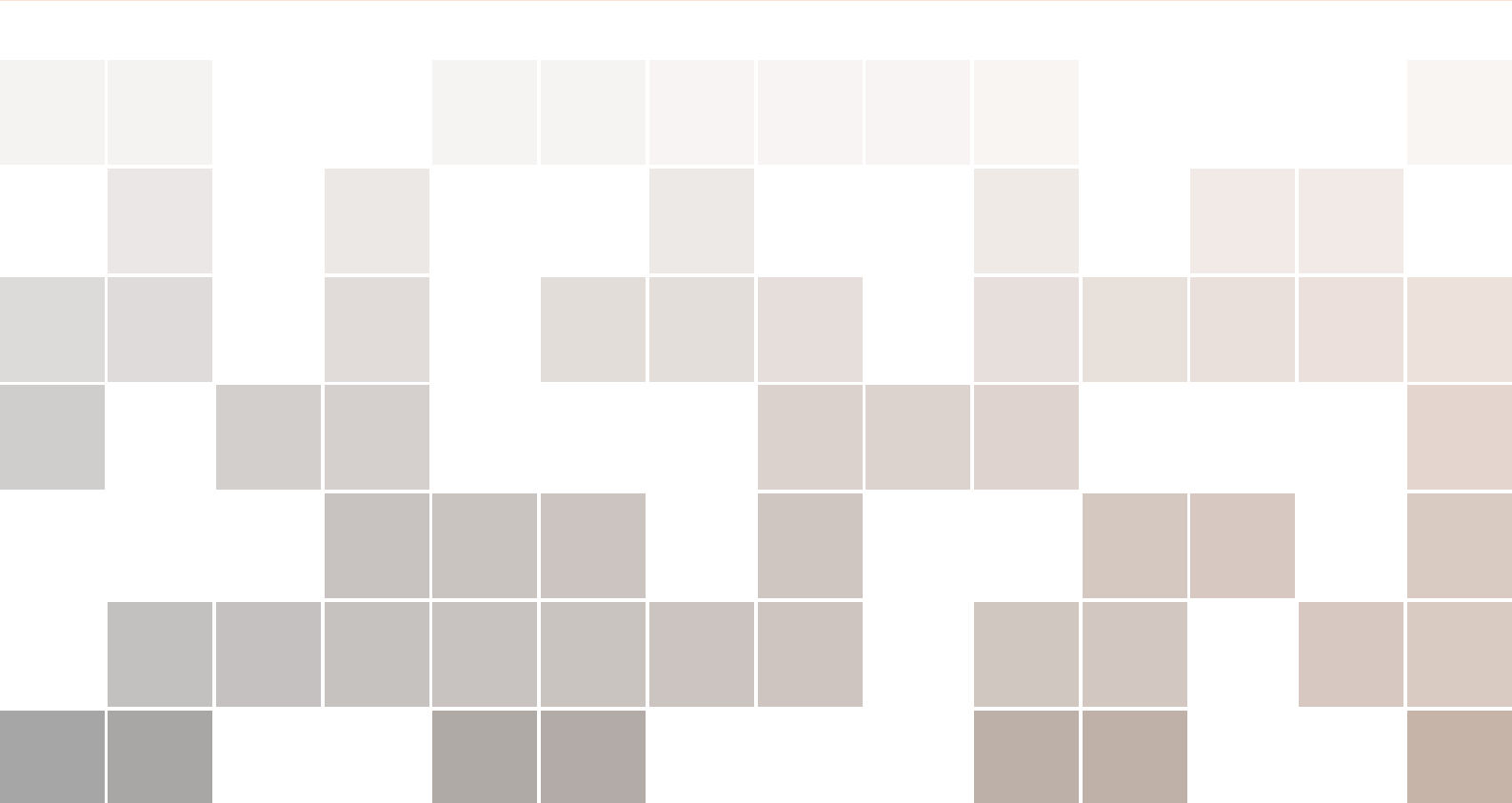




REFRACCIÓN SÍSMICA APLICADA A LA INGENIERÍA CIVIL Y GEOTECNIA

Teoría y ejemplos prácticos

Pedro Saúl Silva Camargo



REFRACCIÓN SÍSMICA APLICADA A LA INGENIERÍA CIVIL Y GEOTECNIA
Teoría y ejemplos prácticos

Pedro Saúl Silva Camargo
Codigo: 1 115 851 919

UNIVERSIDAD DE PAMPLONA
FACULTAD DE INGENIERIAS Y ARQUITECTURA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL, AMBIENTAL Y QUÍMICA
PROGRAMA DE INGENIERIA CIVIL PAMPLONA
2019

REFRACCIÓN SÍSMICA APLICADA A LA INGENIERÍA CIVIL Y GEOTECNIA
Teoría y ejemplos prácticos

Pedro Saúl Silva Camargo
Codigo: 1 115 851 919

Trabajo De Grado Presentado Como Requisito Para Optar Al Título De:
INGENIERO CIVIL

DIRECTOR M. Sc. MANUEL ANTONIO CONTRERAS

UNIVERSIDAD DE PAMPLONA
FACULTAD DE INGENIERIAS Y ARQUITECTURA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL, AMBIENTAL Y QUÍMICA
PROGRAMA DE INGENIERIA CIVIL PAMPLONA
2019

DEDICATORIA

Especialmente a mi madre Marilyn Camargo Bernal, por su apoyo incondicional, en toda mi trayectoria universitaria y mi vida, por ser mi motivación para salir adelante cada día que pasa, además de estar en cada momento en que pude haber cometido un error, pero sin importar que, hay estaba con sus palabras que me levantaban el ánimo, Para seguir mi camino para cumplir mis metas propuestas, simplemente eres mi gran orgullo te amo Madre mía.

A mis hermanos Martha Isabel Silva, María Victoria Silva, Diego Armando Silva, Viviana Silva, y especialmente a mi madrina Graciela Rincón y demás familiares que siempre me motivaron a salir adelante, y siempre aportaron su granito de arena, con consejos y motivación, para lograr esa meta que se convertirá en un logro de todos.

A Luz Mary Suescun, y toda su familia, quienes me acogieron, como un miembro más de ellos en su casa, y siempre, pude contar con el apoyo incondicional, que me motivó a salir adelante en la culminación de mi carrera universitaria.

A mi padre Pedro Antonia Silva que fue mi principal motivación, en el inicio de mi carrera, y que siempre quería sentirse orgulloso de tener un hijo ingeniero civil, pero que por circunstancias de la vida, ahora nos cuida desde el cielo para llenarnos de bendiciones a mí y a toda mi familia, además de cuidarme desde el paraíso y mantenerme siempre en el camino correcto. Padre este título obtenido te lo dedico con gran orgullo y sé que desde el cielo estarás orgulloso del gran hijo que soy y siempre seré.

A todos mis compañeros, de universidad, que con su apoyo de diferentes formas, en especial a Sergio Solarte, Francisco Cuellar, Y Deisy Milena Tellez Guerrero dado que fuimos la familia unipamplona, por lo cual, nos dábamos motivos para terminar nuestras metas propuestas desde que empezamos a formar parte de esta familia.

AGRADECIMIENTOS

Completamente agradecido a todos los docentes realizaron aportes con su conocimiento en la trayectoria de mi formación académica, a los docentes del programa de ingeniería civil, en especial a los que hicieron aportes en las áreas de profundización de mi carrera.

También quiero expresar mi gratitud a el grupo de Investigación en Geofísica y Geología PANGEA y ETENOA por permitirme participar en marco del proyecto interno titulado APLICACIÓN DE LAS TÉCNICAS AVANZADAS DE CARTOGRAFÍA, REFRACCIÓN SÍSMICA Y EXPLORACIÓN GEOELÉCTRICA DEL SUBSUELO PARA LA CARACTERIZACIÓN DEL SUBSUELO EN EL PREDIO DE LA UNIVERSIDAD DE PAMPLONA: SECTOR BIBLIOTECA, CANCHA DE FÚTBOL, INVERNADERO Y QUEBRADA RIO CHIQUITO. Como pasante investigador, con el fin de entregar este manual como resultado final.

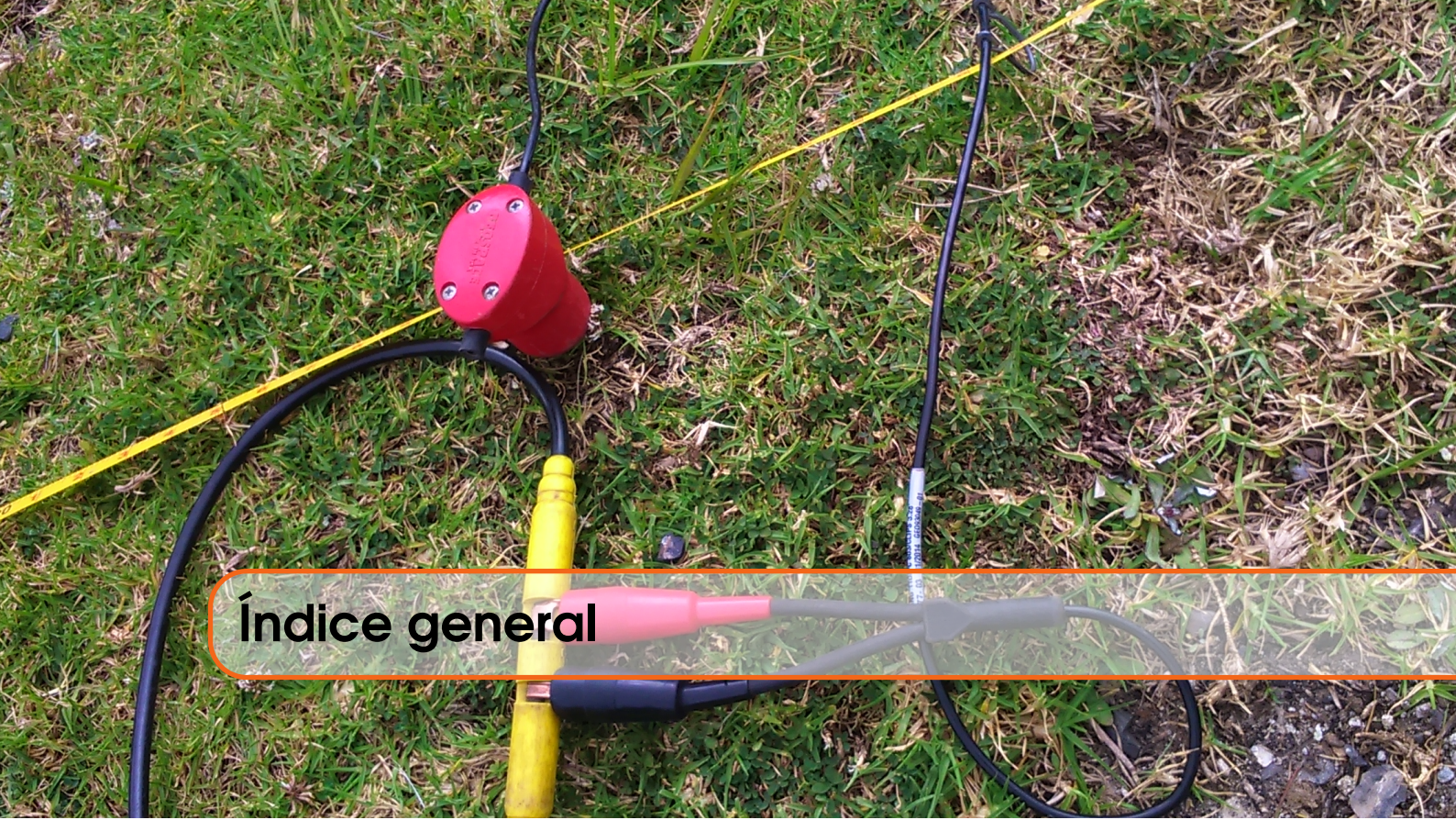
De la misma forma gracias al MSc. Manuel Antonio Contreras, por su conocimiento aportado para la culminación de este proyecto, que está enfocado en sus áreas del conocimiento, además de incentivar en la investigación sobre la geofísica.

Muy agradecido con el PhD Hernando Castañeda Marín, por sus aportes en el proyecto, Además de facilitar los permisos necesarios para el uso del equipo necesario para llevar a cabo la toma de datos y así desarrollar satisfactoriamente este proyecto.

Por ultimo gracias a el MSc Jairo Alberto Torres Peña, por su acompañamiento y orientación en la toma de datos vitales, para la realización y culminación de este proyecto.

INTRODUCCIÓN

En el marco del proyecto de la vicerrectoría de investigaciones, titulado APLICACIÓN DE LAS TÉCNICAS AVANZADAS DE CARTOGRAFÍA, REFRACCIÓN SÍSMICA Y EXPLORACIÓN GEOELÉCTRICA DEL SUBSUELO PARA LA CARACTERIZACIÓN DEL SUBSUELO EN EL PREDIO DE LA UNIVERSIDAD DE PAMPLONA: SECTOR BIBLIOTECA, CANCHA DE FÚTBOL, INVERNADERO Y QUEBRADA RIO CHIQUITO. Este proyecto es desarrollado por el Grupo de Investigación en Geofísica y Geología-PANGEA y de la Universidad de Pamplona. Un objetivo de este es, la realización de un Manual para la adquisición y procesamiento de datos sísmicos, basados en la técnica de Tomografía de Refracción Sísmica (TRS). Este proyecto se desarrolló, en modalidad Pasantía en Grupo de Investigación. Este manual expondrá los principios físicos y matemáticos de la técnica geofísica, juntamente explicará los pasos para el diseño, adquisición y procesamiento de los datos. Se conocerán los diferentes sismógrafos usados tradicionalmente en este tipo de ensayos y algunos casos de estudio de interés para la Ingeniería Civil y Geotecnia.



Índice general

I

Parte I

1	MÉTODO DE REFRACCIÓN SÍSMICA	11
1.1	DEFINICIÓN DE LA GEOFÍSICA	11
1.1.1	Geofísica pura:	11
1.1.2	Geofísica Aplicada:	11
1.2	INTRODUCCIÓN A LA REFRACCIÓN SÍSMICA (RS)	11
1.3	HISTORIA DE LA EXPLORACIÓN SÍSMICA	12
1.4	TABLA DE VELOCIDADES DE ONDAS PARA ROCAS Y MATERIALES	13
1.5	APLICACIÓN DEL MÉTODO DE TOMOGRAFÍA DE REFRACCIÓN SÍSMICA	14
1.5.1	Aplicaciones en la Ingeniería Civil y la Geotecnia	14
1.6	PRINCIPIOS FÍSICOS USADOS EN LA GEOFÍSICA	15
1.6.1	Ondas elásticas	15
1.6.2	Ondas longitudinales	15
1.6.3	Reflexión y transmisión	15
1.6.4	La onda bajo reflexión	16
1.6.5	Refracción de la onda	18
1.6.6	Principio de Huygens	18
1.6.7	Refracción: Ley de Snell	19
1.6.8	Principio de Fermat	19

2	DETERMINACIÓN DE TIEMPOS DE ARRIBO	21
2.1	Caso 1 Onda Refractada en Capa Horizontal	21
2.1.1	El tiempo de arribo para la onda directa, en términos de la distancia y la velocidad de la capa, es:	22
2.2	Caso 2 Onda Refractada en N capas planas	25
2.2.1	Determinación del Tiempo de Arribo de la Onda Refractada Críticamente para N Capas Planas	25
2.3	Caso 3 onda refractada para una capa inclinada	28
2.4	Caso 4 Onda Refractada Críticamente para N Capas Inclinadas con Igual Buzamiento	31

II

Parte II

3	EQUIPOS GEOFISICOS	37
3.1	SISMOGRAFOS	37
3.1.1	Sismógrafo Geode	37
3.1.2	Sismógrafo Terraloc	39
3.1.3	Sismógrafo MAE	40
3.1.4	Sismógrafo PASI	42
3.1.5	Sismógrafo SEIMEX	43
3.1.6	Sismógrafo de un Canal	44
3.2	FUENTES GENERADORAS DE ONDAS SÍSMICAS	44
3.3	DESCRIPCIÓN ESPECIFICA DEL EQUIPO Y SUS ACCESORIOS QUE USAREMOS PARA LA ADQUISICIÓN DE DATOS SÍSMICOS	46
3.3.1	Sismógrafo geode, marca geometrics	46
3.3.2	Conectores	46
3.3.3	Cables	50
3.3.4	Accesorios	53
4	TENDIDO SÍSMICO	57
4.1	PROCEDIMIENTO PARA REALIZAR UN TENDIDO SÍSMICO	57
4.1.1	Descripción	57
4.1.2	Equipo utilizado	58
4.1.3	Montaje	58
4.1.4	Descripción del Montaje	58

III

Parte III

5	PROCESAMIENTO DE DATOS	69
5.1	EJEMPLO DE PROCESAMIENTO	69
5.1.1	Fases	69
5.1.2	Corrección de la geometría	70
5.1.3	Editar Vistas	81
5.1.4	Asignación de Capas (Plotrefa)	93

5.1.5	Generar Modelos Iniciales	102
6	CONCLUSIONES	107
7	BIBLIOGRAFÍA	109
	LIBROS	109
	ARTÍCULOS Y TESIS	110
	FUENTES ELECTRÓNICAS	110
	NORMAS Y MANUALES	110

Parte I

1 MÉTODO DE REFRACCIÓN SÍSMICA 11

- 1.1 DEFINICIÓN DE LA GEOFÍSICA
- 1.2 INTRODUCCIÓN A LA REFRACCIÓN SÍSMICA (RS)
- 1.3 HISTORIA DE LA EXPLORACIÓN SÍSMICA
- 1.4 TABLA DE VELOCIDADES DE ONDAS PARA ROCAS Y MATERIALES
- 1.5 APLICACIÓN DEL MÉTODO DE TOMOGRAFÍA DE REFRACCIÓN SÍSMICA
- 1.6 PRINCIPIOS FÍSICOS USADOS EN LA GEOFÍSICA

2 DETERMINACIÓN DE TIEMPOS DE ARRI-BO 21

- 2.1 Caso 1 Onda Refractada en Capa Horizontal
- 2.2 Caso 2 Onda Refractada en N capas planas
- 2.3 Caso 3 onda refractada para una capa inclinada
- 2.4 Caso 4 Onda Refractada Críticamente para N Capas Inclinadas con Igual Buzamiento



1. MÉTODO DE REFRACCIÓN SÍSMICA

1.1 DEFINICIÓN DE LA GEOFÍSICA

Etimológicamente, la geofísica es la ciencia que se encarga del estudio de la física de la tierra. Como ocurre en otras ciencias, la geofísica se divide en dos partes, Geofísica pura, y Geofísica Aplicada (Cantos, 1973).

1.1.1 Geofísica pura:

Llamada También física del globo, se encarga del estudio de la gravedad, magnetismo, electricidad y sismología terrestre, pero también comprende la vulcanología, geodinámica, climatología, oceanografía, y otras ciencias relacionadas con la física de la tierra (Cantos, 1973).

1.1.2 Geofísica Aplicada:

Llamada También prospección geofísica, Es la ciencia que trata de la aplicación de la geofísica pura, es el arte de aplicar las ciencias físicas al estudio de la parte más superficial de la corteza terrestre, en este sentido sería la aplicación de los métodos geofísicos de prospección a la búsqueda de toda clase de recursos minerales útiles al hombre, o resolver problemas puramente geológicos (Cantos, 1973).

1.2 INTRODUCCIÓN A LA REFRACCIÓN SÍSMICA (RS)

Dentro de los métodos sísmicos de la geofísica aplicada se encuentra el de refracción sísmica. En este método se mide el tiempo de propagación de las ondas mecánicas, donde se generan ondas sísmicas y la llegada de éstas a diferentes puntos de observación. Para la realización de esto y generar estas ondas, dispone de una serie de sensores (Geófonos) en línea recta a distancias conocidas, formando lo que se conoce como tendido sísmico o línea de refracción. A una distancia conocida del extremo del tendido, en el punto de disparo, se generan ondas sísmicas, con la ayuda de un martillo, porra, pistola de aire o por la detonación de explosivos, las cuales inducen vibraciones en el terreno que son detectadas por cada uno de los sensores en el tendido. El equipo básico consiste de los sensores; la unidad de adquisición, en donde se almacenan los movimientos del terreno

detectados por cada sensor; los cables de conexión entre los sensores y la unidad de adquisición; el cable del trigger, que se encarga de marcar el momento de inicio de registro en la unidad de adquisición. Ver Figura 1.1 Los registros de cada sensor tienen información de los movimientos del terreno en función del tiempo y son conocidos como sismogramas. Estos son analizados para obtener el tiempo de llegada de los primeros arribos a cada sensor desde el punto de disparo. Estos tiempos de arribo están asociados a las primeras ondas de cuerpo, tanto ondas P como también las llegadas de la onda S, a cada sensor desde el punto de disparo. El análisis e interpretación de estos datos permite calcular las velocidades longitudinales (V_p [m/s]), además de la determinación de los refractores que se pueden asociar a interfaces de los materiales del subsuelo en profundidad, lo que a su vez se puede interpretar litológicamente (Rosales, 2001).

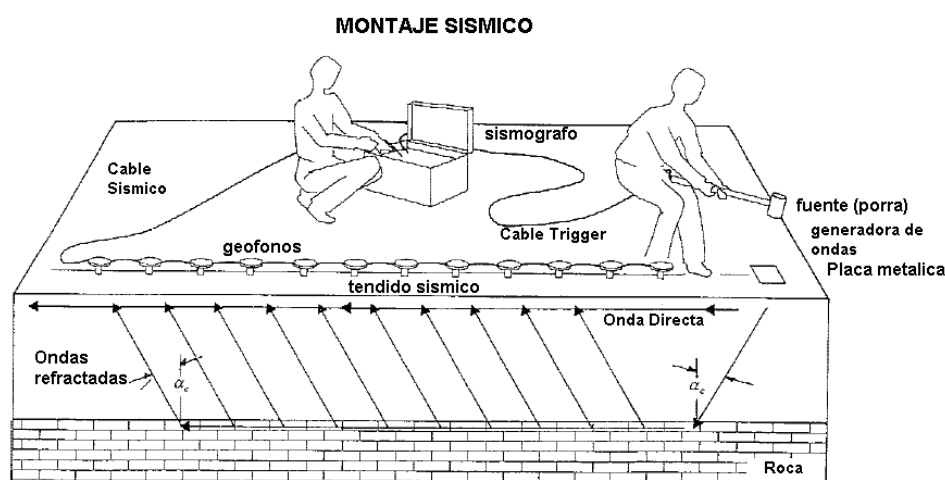


Figura 1.1: Montaje de una línea Refracción sísmica. Fuente: Tomado y modificado de ASTM D5777, (2011)

1.3 HISTORIA DE LA EXPLORACIÓN SÍSMICA

Inicialmente Aristóteles en (383 – 322 BC) es a el que se le asigna el crédito de haber realizado la primera publicación en el campo de la geofísica. Además de ver que en el 132 AD, Chang Heng utilizó su seismoscopio para indicar actividad sísmica y determinar la dirección y magnitud del temblor. Leonardo Da Vinci (1452 – 1519) identificó que las rocas de los Alpes estuvieron sumergidas alguna vez en el fondo marino, al conseguir fósiles de conchas marinas. Muchos científicos hicieron contribuciones importantes en las áreas de magnetismo, difracción y refracción de ondas, leyes de movimiento, movimiento de las placas tectónicas, etc. que son la fundamentación de la sísmica que se usa en la actualidad (Wren, 2005). A finales del siglo XIX se realizaron los primeros registros académicos de temblores. La geofísica se dividió en 4 áreas de estudio de las propiedades de la Tierra: gravimetría, magnetismo, electroquímica y comportamiento acústico. El método sísmico es el más usado en la exploración de hidrocarburos. En 1920 se utilizó por primera vez un terremoto artificial para retratar la geología del subsuelo. Durante la Primera Guerra Mundial, se utilizó la sísmica para avisar a los pobladores de París que pronto estarían bajo ataque. Los alemanes tenían un cañón muy grande de largo alcance llamado “Big Bertha”, el cual generaba una fuente de energía fuerte cada vez que disparaba su artillería. Dado que el sonido se propaga más rápido a través del subsuelo que a través del aire, la población de Paris contaba con cierto tiempo para protegerse (Gadallah y Fisher, 2005). Mintropp desarrolló más la técnica sísmica después de la guerra, y en 1923 fue invitado por la compañía Gulf Oil a ir a Estados Unidos, los cuales produjeron la identificación del domo de sal “Orchard” en Texas. (Herrera y Cooper, 2010)

1.4 TABLA DE VELOCIDADES DE ONDAS PARA ROCAS Y MATERIALES

Tipo de Roca o Materiales	Ref. 1	Ref. 2	Ref. 3
<i>Materiales no consolidados</i>	V_p (m/s)	V_p (m/s)	V_p (m/s)
Suelo		100-500	
Arenas (secas,sueltas)	200-1000	200-1000	460-915
Arenas y Gravas (superficiales)		400-2300	
Arenas (saturadas con agua,sueltas)	1500-2000	1500-2000	1220-1830
Arcillas	1000-2500	1000-2500	915-2750
Material superficial meteorizado			240 - 610
Lodos-arcilla (<i>Estuarine muds/clays</i>)	1000-2500	1000-2500	
Material Suelto de Limos y Arcillas (<i>Loose</i>)		300-600	
Terrazas Aluviales (<i>foodplain alluvium</i>)		1800-2200	
Sedimentos Glaciales (saturados con agua)	1500-2500		
Superficie de hielo (<i>permafrost</i>)	3500-4000	1500-4900	
Nieve		350-3000	
Hielo de Glacial Sólido		3000-4000	
<i>Rocas Sedimentarias</i>			
Areniscas	2000-6000	1400-4500	1830-3960
Calizas	2000-6000		2134-6100
Calizas blandas		1700-4200	
Calizas duras		2800-7000	
Lutitas (<i>shales</i>)		2800-7000	2750-4250
Dolomitas	2500-6500	2500-6500	
Tiza			1830-3960
Salt	4500-5000	4000-5500	
Arenas y Gravas (a 2km de profundidad)		3000-3500	
Anidrita	4500-6500	3500-5500	
Yeso	2000-3500	2000-3500	
<i>Rocas ígneas/Metamórficas</i>			
Granito	5500-6000	4600-6200	4575-5800
Basalto		5500-6500	
Gabro	6500-7000	6400-7000	
Roca metamórfica			3050 - 7000
Rocas Ultramáficas	7500-8500		
Serpentinita	5500-6500	5500-6500	
Periodotita		7800-8400	
Neis		3500-7600	
<i>Fluidos en los poros</i>			
Aire	300	330	
Agua	1400-1500	1450-1530	1430-1665
Agua de Mar			1450-1525
Hielo	3400		
Petróleo	1300-1400	1300-1400	
<i>Otros Materiales</i>			
Acero	6100		
Hierro	5800		
Aluminio	6600		
Concreto	3600		

Cuadro 1.1: Fuente: Cantos, (1973)y ASTM D5777, (2011)

1.5 APLICACIÓN DEL MÉTODO DE TOMOGRAFÍA DE REFRACCIÓN SÍSMICA

1.5.1 Aplicaciones en la Ingeniería Civil y la Geotecnia

Determinación de la profundidad de basamento

Por medio de la refracción sísmica podemos determinar la profundidad de basamento, que es; la capa de roca por debajo de la cual no se espera que existan yacimientos de hidrocarburos económicos, a veces aludida como basamento económico. El basamento corresponde normalmente a rocas ígneas o metamórficas deformadas, más antiguas, que rara vez desarrollan la porosidad y la permeabilidad necesarias para actuar como un yacimiento de hidrocarburos, y por debajo del cual las rocas sedimentarias no son comunes. Las rocas de basamento habitualmente poseen diferente densidad, velocidad acústica y propiedades magnéticas que las rocas suprayacentes, que generalmente se determinan en los proyectos de construcción de represas y grandes hidroeléctricas (Rosales, 2001).

Determinación de las condiciones (meteorización, fracturación) y competencia de la roca

Ya que debemos tener en cuenta que es donde se Asentarán las estructuras de las obras civiles, así como por donde se realizarán los túneles para la infraestructura vial, u otras excavaciones, como la minería (Infogeologia, 2018).

Detección de fallas geológicas

Teniendo en cuenta que una falla es una fractura, generalmente plana, en el terreno a lo largo de la cual se han deslizado los dos bloques el uno respecto al otro. Las fallas se producen por esfuerzos tectónicos, incluida la gravedad y empujes horizontales, actuantes en la corteza.

Detección del nivel freático

Corresponde al nivel superior de una capa freática o de un acuífero en general. También se conoce como capa freática, manto freático, napa freática, napa subterránea (del francés nappe=mantel), tabla de agua (traducción del inglés, "water table") o simplemente freático (Definicion).

Determinación de los Parámetros Dinámicos del Suelo

En la ingeniería civil el conocimiento de estos parámetros es fundamental en la rama de la geotécnica, ya que estos permiten conocer las propiedades elásticas y tener una mejor caracterización del suelo. La aplicación de los métodos geofísicos anteriormente estudiados es una herramienta interesante para la obtención de dichas propiedades. Seguidamente se formularán los módulos elásticos expresados en términos de las velocidades de onda P y S (Gutiérrez, y Buitrago, 2016) .

- Capacidad portante
- Módulo de poisson
- Módulo de rigidez
- Densidad del terreno
- Módulo de Young

Otras Aplicaciones

En el caso de contextos urbanos la refracción resulta útil para la determinación de la profundidad a basamento y el perfil de velocidades de onda P y S; y para la extrapolación lateral de perforaciones puntuales de suelos. El método utiliza la llegada de las primeras ondas a los géofonos, ondas P, pero como también las llegadas de las ondas S, de tal manera que se pueden determinar la relación de Poisson y otros módulos dinámicos. Sarria (1996) enuncia otras potenciales aplicaciones del método: a) utilización del ruido sísmico para determinar el módulo dinámico G en masas de arcilla; b) evaluación del amortiguamiento; c) evaluación de los límites de Atterberg; d) determinación de módulos E y G en mecánica de rocas; e) explotación de canteras; f) ubicación de sondeos en roca y g) para determinar la capacidad de carga de los pilotes (Rosales, 2001).

Alcances

- Detecta variaciones tanto en profundidad como en la horizontal de la velocidad de la onda P (y de la S).
- Permite la detección de la profundidad a basamento y de su relieve, dependiendo de variables como longitud del tendido, energía de la fuente sísmica, velocidades de los suelos (Rosales, 2001).

Limitaciones

- Sólo funciona cuando la velocidad de propagación de las ondas aumenta con la profundidad. En el caso de suelos con capas intermedias de menor velocidad el método arrojaría resultados erróneos.
- Para el caso de aplicaciones urbanas de la Ingeniería Civil, el Método de Refracción Sísmica está limitado por la disponibilidad de zonas descubiertas con suficiente extensión. La longitud del tendido en superficie está directamente relacionada con el alcance de la exploración en profundidad (Rosales, 2001).

1.6 PRINCIPIOS FÍSICOS USADOS EN LA GEOFÍSICA

1.6.1 Ondas elásticas

Si rompemos el equilibrio de un cuerpo isótropo y elástico mediante un esfuerzo instantáneo o sacudida aplicada en un punto cualquiera del mismo y expresamos analíticamente las ecuaciones de equilibrio de dicho cuerpo, obtenemos un sistema de ecuaciones de los cuales se han deducido cuatro soluciones que dan lugar a las ondas longitudinales, transversales, Rayleigh y Love. (Cantos, 1973).

1.6.2 Ondas longitudinales

Son aquellas en las que el movimiento de vibración de las partículas se produce en la misma dirección de propagación o formando un ángulo de 180 grados con ella. Estas ondas se llaman también ondas de compresión y dilatación o de condensación y rarefacción; los sismólogos las llaman ondas primarias u ondas P, por ser las primeras que llegan en los terremotos. Estas son las ondas que se utilizan en prospección sísmica por reflexión y refracción. (Cantos, 1973).

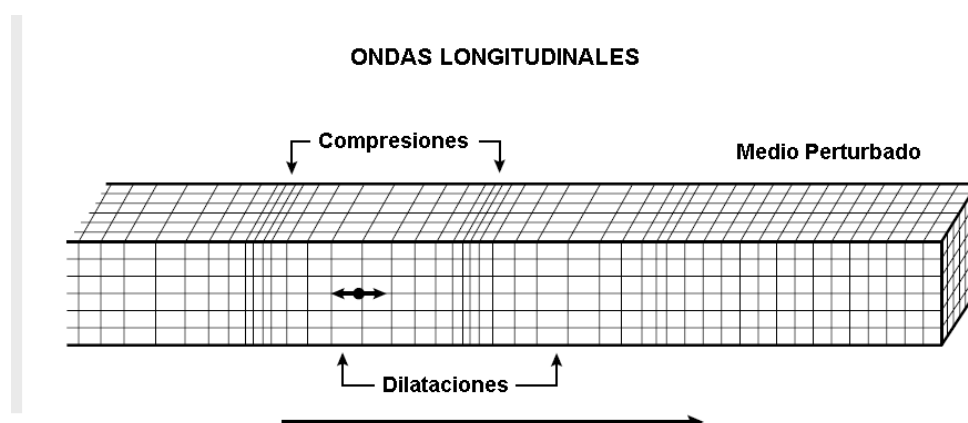


Figura 1.2: Ondas longitudinales. tomada y modificada de Fuente: Philip, k. Brooks, M. y Hill, I. (2002)

1.6.3 Reflexión y transmisión

El modelo de onda progresiva describe ondas que viajan a través de un medio uniforme sin interactuar con algo más en el camino. Ahora se considerará cómo una onda progresiva que es

afectada cuando encuentra un cambio en el medio. Por ejemplo, considere un pulso que viaja en una cuerda que está rígidamente unida a un soporte en un extremo, como en la figura 1.2. Cuando el pulso alcanza el soporte, se presenta un cambio severo en el medio: la cuerda termina. Como resultado, el pulso experimenta reflexión; es decir, el pulso se mueve de regreso a lo largo de la cuerda en la dirección opuesta. Note que el pulso reflejado está invertido. Esta inversión se explica del modo siguiente: cuando el pulso alcanza el extremo fijo de la cuerda, ésta produce una fuerza hacia arriba sobre el soporte. Por la tercera ley de Newton, el soporte debe ejercer sobre la cuerda una fuerza de reacción de igual magnitud y con dirección opuesta (hacia abajo). Esta fuerza hacia abajo hace que el pulso se invierta en la reflexión (Serway, y Jewett, 2008).

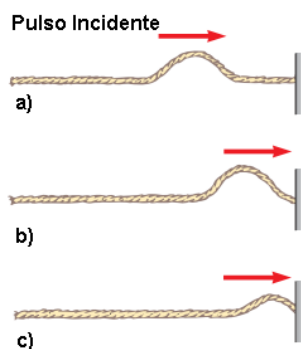


Figura 1.3: a) Reflexión de un pulso viajero en el extremo fijo de una cuerda estirada. b) El pulso reflejado está invertido, pero su forma no cambia de otra manera. Fuente: Serway, y Jewett, (2008)

Ahora considere otro caso. Esta vez, el pulso llega al final de una cuerda que es libre de moverse verticalmente, como en la figura 1.3. La tensión en el extremo libre se mantiene porque la cuerda está amarrada a un anillo de masa despreciable que tiene libertad para deslizarse verticalmente sobre un poste uniforme sin fricción. De nuevo, el pulso se refleja, pero esta vez no se invierte. Cuando llega al poste, el pulso ejerce una fuerza sobre el extremo libre de la cuerda, lo que hace que el anillo acelere hacia arriba. El anillo se eleva tan alto como el pulso entrante, y luego la componente hacia abajo de la fuerza de tensión jala el anillo de vuelta hacia abajo. Este movimiento del anillo produce un pulso reflejado que no se invierte y que tiene la misma amplitud que el pulso entrante (Serway, y Jewett, 2008).

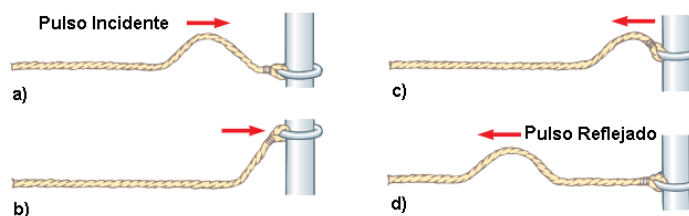


Figura 1.4: Reflexión de un pulso viajero en el extremo libre de una cuerda estirada. El pulso reflejado no está invertido. Fuente: Serway, y Jewett, (2008)

1.6.4 La onda bajo reflexión

El concepto de reflexión de ondas se introdujo en el análisis de las ondas sobre cuerdas en la sección anterior. Como con las ondas sobre cuerdas, cuando un rayo de luz que se desplaza en un medio encuentra una frontera con otro medio, parte de la luz incidente se refleja: para ondas sobre una

cuerda unidimensional, la onda reflejada necesariamente debe restringirse a una dirección a lo largo de la cuerda; para ondas de luz que viajan en el espacio tridimensional, no se aplican tales restricciones y las ondas de luz reflejadas pueden estar en direcciones distintas de la dirección de las ondas incidentes. La figura 1.4 muestra varios rayos de un haz de luz incidente en una superficie reflectora lisa, semejante a espejo. Los rayos reflejados son paralelos entre sí, como se indica en la figura. La dirección de un rayo reflejado está en el plano perpendicular a la superficie reflectora que contiene al rayo incidente. La reflexión de luz desde esta superficie lisa se denomina reflexión especular. Si la superficie reflectora es rugosa, como se ve en la figura 1.5, la superficie refleja los rayos no como un conjunto paralelo sino en varias direcciones. La reflexión desde cualquier superficie rugosa se conoce como reflexión difusa. Una superficie se comporta como superficie lisa mientras las variaciones de superficie son mucho menores que la longitud de onda de la luz incidente. La diferencia entre estas dos clases de reflexión explica por qué le es más difícil ver cuando circula en auto durante una noche lluviosa. Si el pavimento está mojado, la superficie lisa del agua refleja en forma especular casi toda la luz de los faros del auto y los aleja de éste (quizá hacia los ojos de conductores que circulan en sentido contrario). Cuando el pavimento está seco, su superficie rugosa refleja en forma difusa parte de los rayos de luz de los faros, hacia el conductor, lo cual permite ver con más claridad la carretera. En este libro sólo se analiza la reflexión especular y se usa el término reflexión, para dar a entender reflexión especular (Serway, y Jewett, 2008).

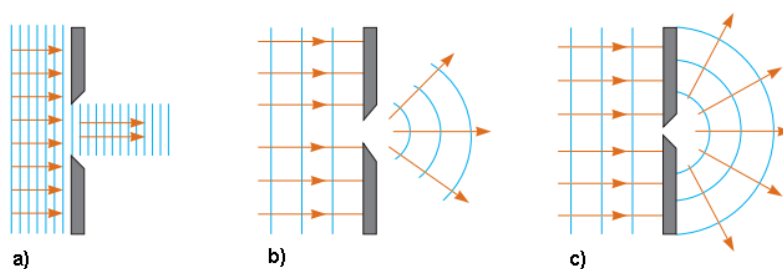


Figura 1.5: (Una onda plana con longitud λ incide sobre una barrera en la que hay una abertura de diámetro d . a) Cuando $\lambda \ll d$, los rayos siguen en una trayectoria en línea recta, y la aproximación de rayo continúa siendo válida. b) Cuando $\lambda \sim d$, los rayos se extienden después de pasar por la abertura. c) Cuando $\lambda \sim d$, la abertura se comporta como fuente puntual que emite ondas esféricas. Fuente: Serway, y Jewett, (2008)

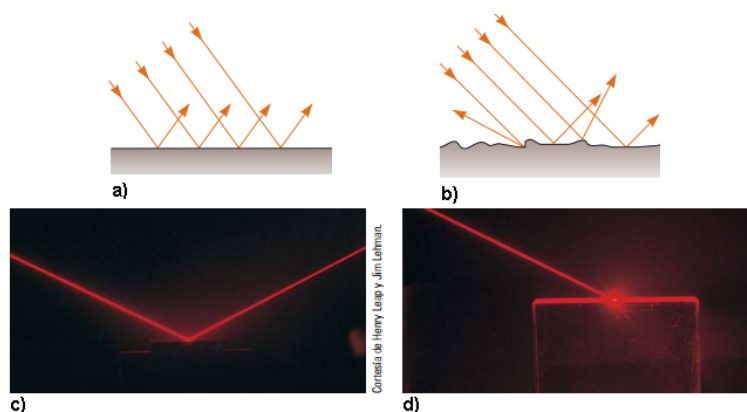


Figura 1.6: Superficie que refleja los rayos no como un conjunto paralelo sino en varias direcciones. Fuente: Serway, y Jewett, (2008)

1.6.5 Refracción de la onda

Además del fenómeno de la reflexión explicado para las ondas sobre cuerdas en la sección anterior, también se encontró que parte de la energía de la onda incidente se transmite en el nuevo medio. De igual modo, cuando un rayo de luz que se mueve por un medio transparente encuentra una frontera que lleva a otro medio de igual característica, como se ve en la figura 1.6, parte de la energía se refleja y parte penetra al segundo medio. Como con la reflexión, la dirección de la onda transmitida muestra un comportamiento interesante debido a la naturaleza tridimensional de las ondas de luz. El rayo que penetra al segundo medio se dobla en la frontera y se dice que se refracta. El rayo incidente, el rayo reflejado y el rayo refractado todos se encuentran en el mismo plano. El ángulo de refracción, θ_2 de la figura 1.6, depende de las propiedades de los dos medios y del ángulo de incidencia por medio de la correspondencia Serway, y Jewett, (2008).

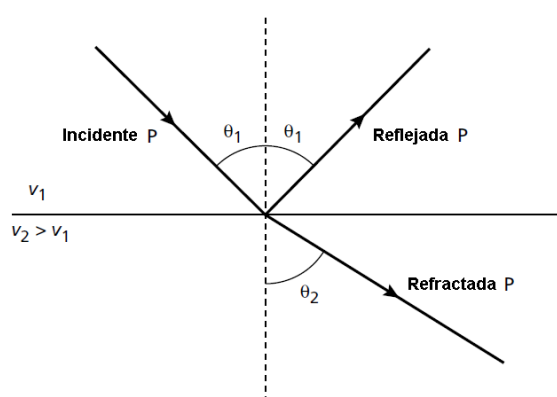


Figura 1.7: donde v_1 es la rapidez de la luz en el primer medio y v_2 es la rapidez de la luz en el segundo. La trayectoria de un rayo de luz que pasa por una superficie refractaria es reversible. Si el rayo se originó en B, viajaría a lo largo de la recta BA hasta llegar al punto A, y la parte reflejada apuntaría hacia abajo y a la izquierda del vidrio. tomada y modificada de Fuente: Philip, k. Brooks, M. y Hill, I. (2002)

1.6.6 Principio de Huygens

En esta sección se desarrollan las leyes de la reflexión y de la refracción mediante el uso de un método geométrico propuesto por Huygens en 1678. El principio de Huygens es una construcción geométrica para usar el conocimiento de un frente de onda anterior, para determinar la posición de un frente de onda nuevo en algún instante. En la construcción de Huygens todos los puntos en un frente de onda determinado se toman como fuentes puntuales para la producción de ondas esféricas secundarias, llamadas trenes de ondas, que se propagan hacia afuera por un medio con magnitudes de velocidad características de ondas en ese medio. Después de algún intervalo de tiempo transcurrido la nueva posición del frente de onda es la superficie tangente a los trenes de ondas. Primero considere una onda plana que se mueve en el espacio libre, como se muestra en la figura 1.7. En $t = 0$, el frente de onda está indicado por el plano marcado como AA. En una construcción de Huygens, cada punto de este frente de onda es considerado fuente puntual. Para hacerlo más claro, sólo se muestran tres puntos en AA. Con estos puntos como fuentes para los trenes de ondas, trace círculos, cada uno con un radio ct , donde c es la rapidez de la luz en el vacío y t es cierto intervalo de tiempo durante el cual se propaga la onda. La superficie trazada tangente a estos trenes de onda es el plano BB, que es el frente de onda en un tiempo posterior, y es paralelo a AA. De un modo semejante, la figura 1.8 muestra la construcción de Huygens para una onda esférica (Giancoli 2008).

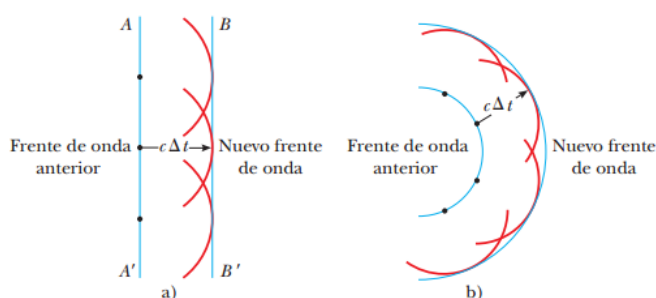


Figura 1.8: Construcción de Huygens para a) una onda plana que se propaga a la derecha y b) una onda esférica que se propaga a la derecha. Fuente: Giancoli, (2008)

1.6.7 Refracción: Ley de Snell

Cuando la luz pasa de un medio transparente a otro con un índice de refracción diferente, parte de la luz incidente se refleja en la frontera. El resto pasa hacia el nuevo medio. Si un rayo de luz incide en un ángulo con la superficie (de manera que no sean perpendiculares), el rayo cambia de dirección conforme entra al nuevo medio. Este cambio en dirección, o desviación, se llama refracción. El ángulo θ_1 es el ángulo que el rayo incidente forma con la normal (perpendicular) a la superficie y se llama ángulo de incidencia. El ángulo θ_2 es el ángulo de refracción, el ángulo que el rayo refractado forma con la normal a la superficie. Observe que el rayo se desvía hacia la normal cuando entra al agua. Éste siempre es el caso cuando el rayo entra a un medio donde la rapidez de la luz es menor (y el índice de refracción es mayor. Si la luz viaja de un medio a otro donde su rapidez es mayor, el rayo se desvía alejándose de la normal (Giancoli 2008).

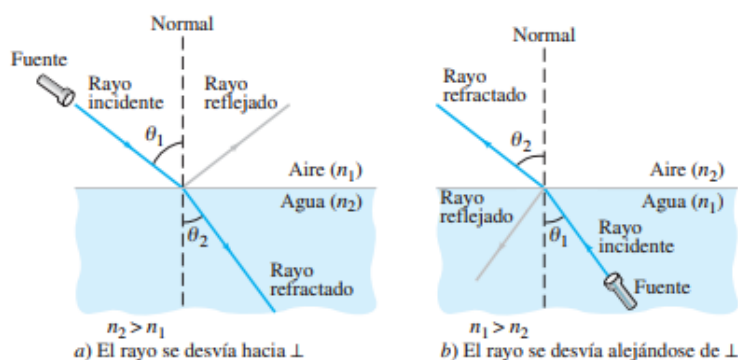


Figura 1.9: Construcción de Huygens para a) una onda plana que se propaga a la derecha y b) una onda esférica que se propaga a la derecha. Fuente: Giancoli, (2008)

1.6.8 Principio de Fermat

Principio de Fermat, o principio del tiempo mínimo, el cual incluye, la reflexión, como a la Refracción. Un haz de luz que atraviese una interfaz, no sigue una línea recta, o trayectoria espacial mínima: La trayectoria real que adopta un haz de luz entre dos puntos es aquella recorrida en el tiempo mínimo (Hecht, 2000).

2. DETERMINACIÓN DE TIEMPOS DE ARRIBO

Principios físicos y matemáticos de la Refracción Sísmica (RS) como ensayo geofísico, para una capa plana, n capas planas, una capa inclinada, y n capas inclinadas, según Stein, S. (2003)

2.1 Caso 1 Onda Refractada en Capa Horizontal

Suponiendo que una capa horizontal en un medio semi infinito, con una profundidad h_0 , cuya velocidad de la capa superior es V_0 y la capa inferior es V_1 , en donde $V_1 > V_0$, como se muestra en la figura 2.1.

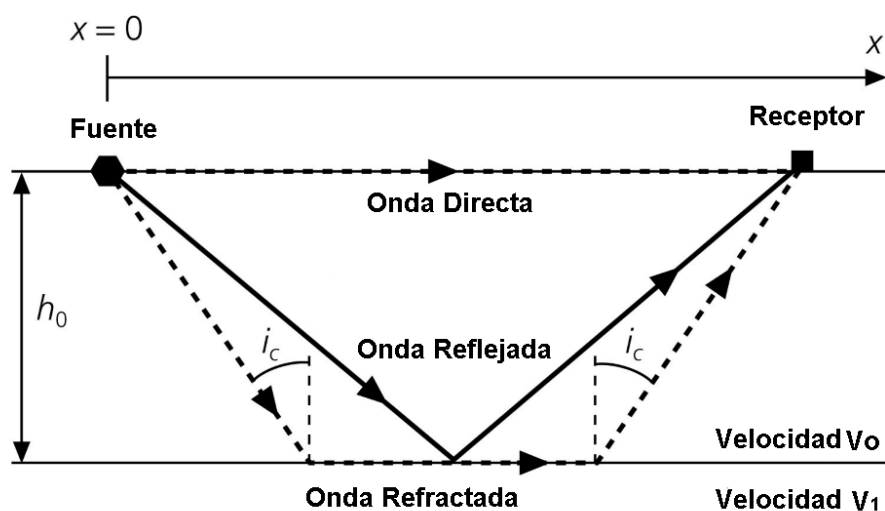


Figura 2.1: Medio semi infinito de Una Capa Horizontal. tomada y modificada de Fuente: Philip, k. Brooks, M. y Hill, I. (2002)

2.1.1 El tiempo de arribo para la onda directa, en términos de la distancia y la velocidad de la capa, es:

$$T_D(x) = \frac{X}{V_0} \quad (2.1)$$

En el caso de la onda reflejada, el tiempo de arribo, tendremos la siguiente ecuación la cual se resolverá a continuación

$$T_R(x) = \frac{2L_1}{v_0} \quad (2.2)$$

$$L_1 = \sqrt{h_o^2 + \frac{x^2}{4}} \quad (2.3)$$

$$T_R = \frac{2}{v_0} \sqrt{h_o^2 + \frac{x^2}{4}} \quad (2.4)$$

$x=0$

$$t_o = \frac{2h_0}{v_0} \quad (2.5)$$

$$T_H(x) = \frac{L_1}{V_0} + \frac{L_2}{V_1} + \frac{L_3}{V_0} \quad (2.6)$$

$$\cos(ic) = \frac{h_0}{L_1} \longrightarrow L_1 = \frac{h_o}{\cos(ic)} \quad (2.7)$$

$$\tan(ic) = \frac{a}{h_0} \longrightarrow a = h_0 \tan(ic) \quad (2.8)$$

$$L_2 = X - 2a$$

$$L_2 = (X - 2h_0 \tan(ic)) \quad (2.9)$$

$$T_H(x) = \frac{2h_0}{V_0 \cos(ic)} + \frac{x - 2h_0 \tan(ic)}{V_1} \quad (2.10)$$

Ecuación de la onda refractada en tiempo

$$T_H(x) = \frac{x - 2h_0 \tan(ic)}{V_1} + \frac{2h_0}{V_0 \cos(ic)} = \frac{x}{V_1} + 2h_0 \left(\frac{1}{V_0 \cos(ic)} - \frac{\tan(ic)}{V_1} \right) \quad (2.11)$$

$$th(x) = \frac{x}{V_1} + 2h_0 \left(\frac{1}{V_0 \cos(ic)} - \frac{\tan(ic)}{V_1} \right) \quad (2.12)$$

$$\sin(ic) = \frac{V_0}{V_1} \quad (2.13)$$

$$\cos(ic) = \sqrt{1 - \sin^2(ic)} \rightarrow \cos(ic) = \sqrt{1 - \frac{V_0^2}{V_1^2}} \quad (2.14)$$

$$\tan(ic) = \frac{\sin(ic)}{\cos(ic)} \rightarrow \tan(ic) = \frac{\frac{V_0}{V_1}}{\sqrt{1 - \frac{V_0^2}{V_1^2}}} \rightarrow \quad (2.15)$$

$$T_H(x) = \frac{x}{V_1} + 2h_0 \left(\frac{1}{V_0 \sqrt{1 - \frac{V_0^2}{V_1^2}}} - \frac{\frac{V_0}{V_1}}{V_1 \sqrt{1 - \frac{V_0^2}{V_1^2}}} \right) \rightarrow \quad (2.16)$$

$$T_H(x) = \frac{x}{v_1} + 2h_0 \left(\frac{1}{V_0 \sqrt{(\frac{V_1^2 - V_0^2}{V_1^2})}} - \frac{V_0}{V_1^2 \sqrt{(\frac{V_1^2 - V_0^2}{V_1^2})}} \right) \rightarrow \quad (2.17)$$

$$T_H(x) = \frac{x}{V_1} + 2h_0 \left(\frac{V_1^2}{V_1 V_0 \sqrt{V_1^2 - V_0^2}} - \frac{V_0}{V_0 V_1 \sqrt{V_1^2 - V_0^2}} \right) \rightarrow \quad (2.18)$$

$$T_H(x) = \frac{x}{v_1} + 2h_0 \left(\frac{V_1^2 - V_0^2}{V_1 V_0 (\sqrt{v_1^2 - V_0^2})} \right) \rightarrow \quad (2.19)$$

$$T_H(x) = \frac{x}{V_1} + 2h_0 \left(\frac{\sqrt{V_1^2 - V_0^2}}{V_1 V_0} \right) \rightarrow \quad (2.20)$$

$$T_H(x) = \frac{x}{V_1} + 2h_0 \left(\sqrt{\frac{V_1^2 - v_0^2}{V_1^2 - V_0^2}} \right) \quad (2.21)$$

$$\tan(ic) = \frac{\frac{V_0}{V_1}}{\sqrt{1 - \frac{V_0^2}{V_1^2}}} \quad (2.22)$$

$$X(ic) = \frac{2h_0 \frac{V_0}{V_1}}{\sqrt{1 - \frac{V_0^2}{V_1^2}}} \rightarrow \quad (2.23)$$

Distancia Crítica.

$$X(ic) = \frac{2h_0 v_0}{\sqrt{v_1^2 - v_0^2}} \quad (2.24)$$

Ecuación para el tiempo de refracción crítica en una capa horizontal

$$T_H(x) = \frac{x}{V_1} + \tau_1 \quad (2.25)$$

$$\tau_1 = 2h_0 \left(\sqrt{\frac{1}{V_0^2} - \frac{1}{V_1^2}} \right) \quad (2.26)$$

Distancia Crítica.

$$X_c = 2h_0 \tan(ic) \quad (2.27)$$

2.2 Caso 2 Onda Refractada en N capas planas

2.2.1 Determinación del Tiempo de Arribo de la Onda Refractada Críticamente para N Capas Planas

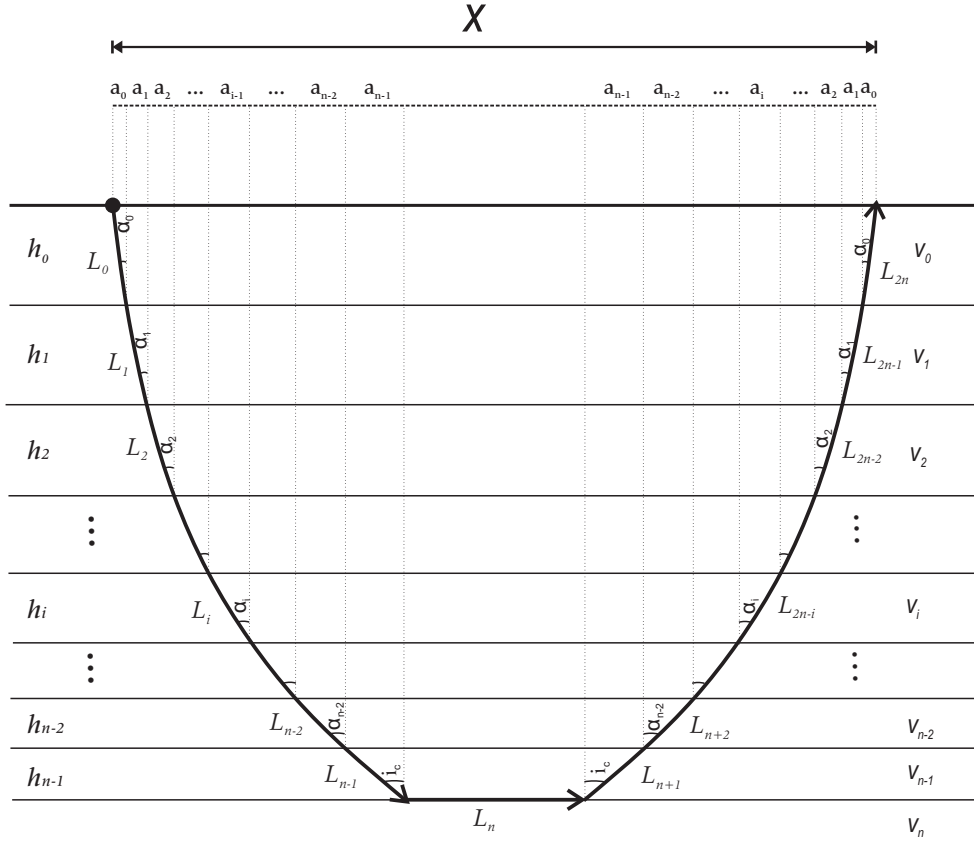


Figura 2.2: Onda Refractada Críticamente para N Capas Planas

Determinación de la Ecuación del Tiempo de Arribo

$$t_H = \frac{L_0}{v_0} + \frac{L_1}{v_1} + \dots + \frac{L_{n-1}}{v_{n-1}} + \frac{L_n}{v_n} + \frac{L_{n+1}}{v_{n-1}} + \dots + \frac{L_{2n-1}}{v_1} + \frac{L_{2n}}{v_0} \quad (2.1)$$

Con $L_0 = L_{2n}$; $L_1 = L_{2n-1}$; $L_2 = L_{2n-2}$; $L_{n-1} = L_{n+1}$

$$t_H = \frac{2L_0}{v_0} + \frac{2L_1}{v_1} + \frac{2L_2}{v_2} + \dots + \frac{2L_{n-1}}{v_{n-1}} + \frac{L_n}{v_n} \quad (2.2)$$

$$t_H = 2 \left(\sum_{j=0}^{n-1} \frac{L_j}{v_j} \right) + \frac{L_n}{v_n} \quad (2.3)$$

$$\sin i_c = \frac{v_{n-1}}{v_n}; \quad \cos i_c = \frac{h_{n-1}}{L_{n-1}} \rightarrow L_{n-1} = \frac{h_{n-1}}{\cos i_c}, \quad (2.4)$$

$$L_0 = \frac{h_0}{\cos \alpha_0}, L_1 = \frac{h_1}{\cos \alpha_1}, \dots, L_j = \frac{h_j}{\cos \alpha_j} \quad (2.5)$$

$$L_n = x - (2a_0 + 2a_1 + \dots + 2a_{n-1}) \quad (2.6)$$

$$L_n = x - 2 \left(\sum_{j=0}^{n-1} a_j \right) \quad (2.7)$$

Donde:

$$a_0 = h_0 \tan \alpha_0 \rightarrow a_j = h_j \tan \alpha_j$$

$$L_n = x - 2 \left(\sum_{j=0}^{n-1} h_j \tan \alpha_j \right), \alpha_{n-1} = i_c \quad (2.8)$$

En función del ángulo crítico

$$L_n = x - 2 \left(\sum_{j=0}^{n-2} h_j \tan \alpha_j + h_{n-1} \tan i_c \right) \quad (2.9)$$

Sustituyendo las expresiones para cada L_j en la ecuación 3 obtenemos el tiempo de arribo en términos de h_j, v_j, α_j :

$$t_H(x) = 2 \left(\sum_{j=0}^{n-1} \frac{h_j}{v_j \cos \alpha_j} \right) + \frac{x - 2 \left(\sum_{j=0}^{n-1} h_j \tan \alpha_j \right)}{v_n} \quad (2.10)$$

En términos del ángulo crítico; recordando que $\alpha_{n-1} = i_c$

$$t_H(x) = 2 \left(\sum_{j=0}^{n-2} \frac{h_j}{v_j \cos \alpha_j} + \frac{h_{n-1}}{v_{n-1} \cos i_c} \right) + \frac{x - 2 \left(\sum_{j=0}^{n-2} h_j \tan \alpha_j + h_{n-1} \tan i_c \right)}{v_n}, \quad (2.11)$$

$$t_H(x) = \frac{x}{v_n} + 2 \sum_{j=0}^{n-2} \frac{h_j}{v_j \cos \alpha_j} + 2 \frac{h_{n-1}}{v_{n-1} \cos i_c} - \frac{2 \sum_{j=0}^{n-2} h_j \tan \alpha_j}{v_n} - \frac{2 h_{n-1} \tan i_c}{v_n} \quad (2.12)$$

$$t_H(x) = \frac{x}{v_n} + 2 \sum_{j=0}^{n-2} \frac{h_j}{v_j \cos \alpha_j} + 2 \frac{h_{n-1}}{v_{n-1} \cos i_c} - \frac{2 \sum_{j=0}^{n-2} h_j \frac{\sin \alpha_j}{\cos \alpha_j}}{v_n} - \frac{2 h_{n-1} \sin i_c}{v_n \cos i_c} \quad (2.13)$$

Aplicando la ley de Snell

$$\frac{\sin \alpha_0}{v_0} = \frac{\sin \alpha_1}{v_1} = \dots = \frac{\sin \alpha_j}{v_j} = \frac{\sin i_c}{v_{n-1}} = \frac{1}{v_n} \quad (2.14)$$

$$v_n = \frac{v_0}{\sin \alpha_0} = \dots = \frac{v_j}{\sin \alpha_j} = \frac{v_{n-1}}{\sin i_c} \quad (2.15)$$

Utilizamos las relaciones en 15 para reemplazar v_n en la ecuación 13

$$t_H(x) = \frac{x}{v_n} + 2 \sum_{j=0}^{n-2} \frac{h_j}{v_j \cos \alpha_j} + 2 \frac{h_{n-1}}{v_{n-1} \cos i_c} - 2 \sum_{j=0}^{n-2} h_j \frac{\sin \alpha_j}{\cos \alpha_j} \frac{\sin \alpha_j}{v_j} - \frac{2h_{n-1} \sin^2 i_c}{v_{n-1} \cos i_c} \quad (2.16)$$

Reorganizando y factorizando términos semejantes

$$t_H(x) = \frac{x}{v_n} + 2 \frac{h_{n-1}}{v_{n-1} \cos i_c} (1 - \sin^2 i_c) + 2 \sum_{j=0}^{n-2} \frac{h_j}{v_j \cos \alpha_j} (1 - \sin^2 \alpha_j) \quad (2.17)$$

$$t_H(x) = \frac{x}{v_n} + 2 \frac{h_{n-1} \cos i_c}{v_{n-1}} + 2 \sum_{j=0}^{n-2} \frac{h_j \cos \alpha_j}{v_j} \quad (2.18)$$

$$t_H(x) = \frac{x}{v_n} + 2 \sum_{j=0}^{n-1} \frac{h_j \cos \alpha_j}{v_j}; \quad (\alpha_{n-1} = i_c) \quad (2.19)$$

$$\boxed{t_H(x) = \frac{x}{v_n} + \tau_{n-1}}; \quad \tau_{n-1} = 2 \sum_{j=0}^{n-1} \frac{h_j \cos \alpha_j}{v_j} \quad (2.20)$$

Tiempo de arribo en función de las velocidades Ahora se procede a obtener la ecuación en términos de las velocidades de las N capas

$$\sin i_c = \frac{v_{n-1}}{v_n}; \quad \cos i_c = \sqrt{1 - \left(\frac{v_{n-1}}{v_n}\right)^2} \quad (2.21)$$

$$\sin \alpha_j = \frac{v_j}{v_n}; \quad \cos \alpha_j = \sqrt{1 - \left(\frac{v_j}{v_n}\right)^2} \quad (2.22)$$

$$t_H(x) = \frac{x}{v_n} + 2 \sum_{j=0}^{n-1} \frac{h_j \sqrt{1 - \left(\frac{v_j}{v_n}\right)^2}}{v_j} \quad (2.23)$$

Realizando las simplificaciones matemáticas pertinentes, se obtiene la ecuación final presentada en el recuadro.

$$t_H(x) = \frac{x}{v_n} + 2 \sum_{j=0}^{n-1} h_j \left[\frac{1}{v_j^2} \left(1 - \left(\frac{v_j}{v_n} \right)^2 \right) \right]^{1/2} \quad (2.24)$$

$$t_H(x) = \frac{x}{v_n} + 2 \sum_{j=0}^{n-1} h_j \left(\frac{1}{v_j^2} - \frac{1}{v_n^2} \right)^{1/2} \quad (2.25)$$

$$\boxed{t_H(x) = \frac{x}{v_n} + \tau_{n-1}}; \quad \tau_{n-1} = 2 \sum_{j=0}^{n-1} h_j \left(\frac{1}{v_j^2} - \frac{1}{v_n^2} \right)^{1/2} \quad (2.26)$$

2.3 Caso 3 onda refractada para una capa inclinada

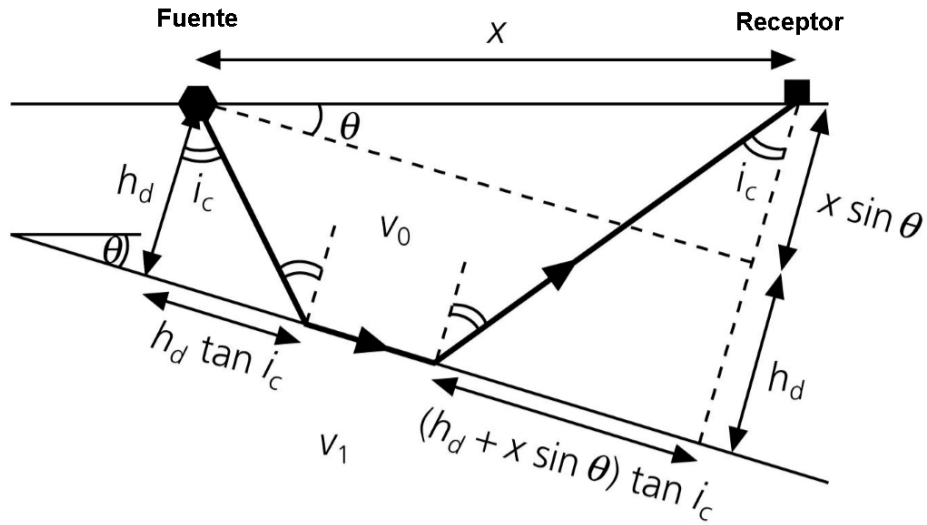


Figura 2.3: Onda refractada para una capa inclinada. tomada y modificada de Fuente: Philip, k. Brooks, M. y Hill, I. (2002)

$$t_H(x) = \frac{L_0}{v_0} + \frac{L_1}{v_1} + \frac{L_2}{v_0} \quad (2.1)$$

$$\cos(ic) = \frac{h_d}{L_0} \Rightarrow L_0 = \frac{h_d}{\cos(ic)} \quad (2.2)$$

$$L_1 = x \cos(\theta) - \{h_d \tan(ic) + [h_d + x \sin(\theta)] \tan(ic)\} \quad (2.3)$$

$$\cos(ic) = \frac{h_d + x \sin(\theta)}{L_2} \Rightarrow L_2 = \frac{h_d + x \sin(\theta)}{\cos(ic)} \quad (2.4)$$

Reemplazando (2), (3) y (4) en (1) obtenemos:

$$t_H(x) = \frac{h_d}{v_0 \cos(ic)} + \frac{x \cos(\theta) - 2h_d \tan(ic) - x \sin(\theta) \tan(ic)}{v_1} + \frac{h_d + x \sin(\theta)}{v_0 \cos(ic)} \quad (2.5)$$

$$t_H(x) = \frac{x \cos(\theta)}{v_1} + \frac{h_d}{v_0 \cos(ic)} + \frac{h_d}{v_0 \cos(ic)} + \frac{x \sin(\theta)}{v_0 \cos(ic)} - \frac{2h_d \tan(ic)}{v_1} - \frac{x \sin(\theta) \tan(ic)}{v_1} \quad (2.6)$$

Partiendo de la ley de Snell tenemos:

$$\frac{\sin(ic)}{v_0} = \frac{1}{v_1} \Rightarrow v_1 = \frac{v_0}{\sin(ic)}$$

Al reemplazar en (6) y hacer algunos ajustes matematicos; obtenemos:

$$t_H(x) = \frac{x \cos(\theta) \sin(ic)}{v_0} + \frac{2h_d}{v_0 \cos(ic)} + \frac{x \sin(\theta)}{v_0 \cos(ic)} - \frac{2h_d \sin^2(ic)}{v_0 \cos(ic)} - \frac{x \sin(\theta) \sin^2(ic)}{v_0 \cos(ic)} \quad (2.7)$$

Juntando terminos semejantes; obtenemos:

$$t_H(x) = \frac{x \cos(\theta) \sin(ic)}{v_0} + \frac{2h_d(1 - \sin^2(ic))}{v_0 \cos(ic)} + \frac{x \sin(\theta)(1 - \sin^2(ic))}{v_0 \cos(ic)} \quad (2.8)$$

sabemos de la trigonometria que:

$$\cos^2(ic) = 1 - \sin^2(ic) \quad \sin(\theta + ic) = \cos(\theta) \sin(ic) + \sin \theta \cos(ic)$$

Reemplazando y juntando terminos semejantes:

$$t_H(x) = \frac{x}{v_0} \{ \cos(\theta) \sin(ic) + \sin(\theta) \cos(ic) \} + \frac{2h_d \cos(ic)}{v_0} \quad (2.9)$$

$$t_H(x) = \frac{x}{v_0} \sin(ic + \theta) + \frac{2h_d \cos(ic)}{v_0} \quad (2.10)$$

La ecuacion (10) se puede ver como una linea recta de la siguiente forma:

$$t_H(x) = \frac{x}{v_d} + \tau_d$$

$$v_d = \frac{v_0}{\sin(ic + \theta)}$$

$$\tau_d = \frac{2h_d \cos(ic)}{v_0}$$

$$t_H(x) = \frac{L_0}{v_0} + \frac{L_1}{v_1} + \frac{L_2}{v_0} \quad (2.1)$$

$$\cos(ic) = \frac{h_u}{L_0} \Rightarrow L_0 = \frac{h_u}{\cos(ic)} \quad (2.2)$$

$$L_1 = x \cos(\theta) - \{h_u \tan(ic) + [h_u - x \sin(\theta)] \tan(ic)\} \quad (2.3)$$

$$\cos(ic) = \frac{h_u - x \sin(\theta)}{L_2} \Rightarrow L_2 = \frac{h_u - x \sin(\theta)}{\cos(ic)} \quad (2.4)$$

Reemplazando (2), (3) y (4) en (1) obtenemos:

$$t_H(x) = \frac{h_u}{v_0 \cos(ic)} + \frac{x \cos(\theta) - 2h_u \tan(ic) + x \sin(\theta) \tan(ic)}{v_1} + \frac{h_u - x \sin(\theta)}{v_0 \cos(ic)} \quad (2.5)$$

$$t_H(x) = \frac{h_u}{v_0 \cos(ic)} + \frac{x \cos(\theta)}{v_1} - \frac{2h_u \tan(ic)}{v_1} + \frac{x \sin(\theta) \tan(ic)}{v_1} + \frac{h_u}{v_0 \cos(ic)} - \frac{x \sin(\theta)}{v_0 \cos(ic)} \quad (2.6)$$

Partiendo de la ley de Snell tenemos:

$$\frac{\sin(ic)}{v_0} = \frac{1}{v_1} \Rightarrow v_1 = \frac{v_0}{\sin(ic)}$$

Al reemplazar en (6) y hacer algunos ajustes matematicos; obtenemos:

$$t_H(x) = \frac{2h_u}{v_0 \cos(ic)} - \frac{2h_u \sin^2(ic)}{v_0 \cos(ic)} - \frac{x \sin(\theta)}{v_0 \cos(ic)} + \frac{x \cos(\theta) \sin(ic)}{v_0} + \frac{x \sin(\theta) \sin^2(ic)}{v_0 \cos(ic)} \quad (2.7)$$

Juntando terminos semejantes; obtenemos:

$$t_H(x) = \frac{2h_u(1 - \sin^2(ic))}{v_0 \cos(ic)} - \frac{x \sin(\theta)(1 - \sin^2(ic))}{v_0 \cos(ic)} + \frac{x \cos(\theta) \sin(ic)}{v_0} \quad (2.8)$$

Reemplazando y juntando terminos semejantes:

$$t_H(x) = \frac{x}{v_0} \{ \cos(\theta) \sin(ic) - \sin(\theta) \cos(ic) \} + \frac{2h_u \cos(ic)}{v_0} \quad (2.9)$$

$$t_H(x) = \frac{x}{v_0} \sin(ic - \theta) + \frac{2h_u \cos(ic)}{v_0} \quad (2.10)$$

La ecuacion (10) se puede ver como una linea recta de la siguiente forma:

$$t_H(x) = \frac{x}{v_u} + \tau_u$$

$$v_u = \frac{v_0}{\sin(ic - \theta)}$$

$$\tau_u = \frac{2h_u \cos(ic)}{v_0}$$

2.4

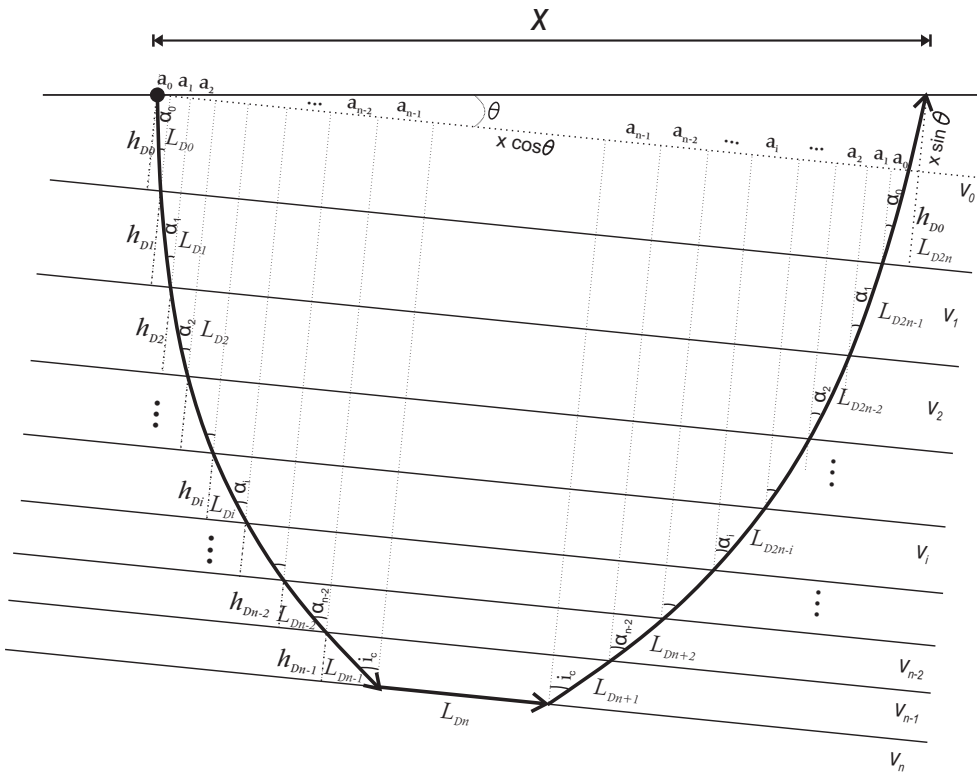


Figura 2.4: Onda Refractada Críticamente para N Capas Inclinadas con Igual Buzamiento

$$t_{Hd} = \frac{L_{d_0}}{v_0} + \frac{L_{d_1}}{v_1} + \dots + \frac{L_{d_{n-1}}}{v_{n-1}} + \frac{L_{d_n}}{v_n} + \frac{L_{d_{n+1}}}{v_{n-1}} + \dots + \frac{L_{d_{2n-1}}}{v_1} + \frac{L_{d_{2n}}}{v_0} \quad (2.1)$$

$$\text{Con } L_{d_1} = L_{d_{2n-1}} \quad ; \quad L_{d_2} = L_{d_{2n-2}} \quad ; \quad L_{d_3} = L_{d_{2n-3}} \quad ; \quad L_{d_{n-1}} = L_{d_{n+1}}$$

$$t_{Hd} = \frac{L_{d_0}}{v_0} + 2\frac{L_{d_1}}{v_1} + \dots + 2\frac{L_{d_{n-1}}}{v_{n-1}} + \frac{L_{d_n}}{v_n} + \frac{L_{d_{2n}}}{v_0} \quad (2.2)$$

$$t_{Hd} = \frac{L_{d_0}}{v_0} + 2 \left(\sum_{j=1}^{n-1} \frac{L_{d_j}}{v_j} \right) + \frac{L_{d_n}}{v_n} + \frac{L_{d_{2n}}}{v_0} \quad (2.3)$$

Expresar las distancias L_{d_j} en términos de h_{d_j} y α_j

$$\sin i_c = \frac{v_{n-1}}{v_n}; \quad \cos i_c = \frac{h_{d_{n-1}}}{L_{d_{n-1}}} \longrightarrow L_{d_{n-1}} = \frac{h_{d_{n-1}}}{\cos i_c}, \quad (2.4)$$

$$L_{d_0} = \frac{h_{d_0}}{\cos \alpha_0}, L_{d_1} = \frac{h_{d_1}}{\cos \alpha_1}, \dots, L_{d_j} = \frac{h_{d_j}}{\cos \alpha_j}, L_{d_{2n}} = \frac{h_{d_0} + x \sin \theta}{\cos \alpha_0} \quad (2.5)$$

$$L_{d_n} = x \cos \theta - (2a_0 + 2a_1 + \dots + 2a_{n-1}) - x \sin \theta \tan \alpha_0 \quad (2.6)$$

$$L_{d_n} = x \cos \theta - 2 \left(\sum_{j=0}^{n-1} a_j \right) - x \sin \theta \tan \alpha_0 \quad (2.7)$$

Donde:

$$a_0 = h_{d_0} \tan \alpha_0 \rightarrow a_j = h_{d_j} \tan \alpha_j$$

$$L_{d_n} = x \cos \theta - 2 \left(\sum_{j=0}^{n-1} h_{d_j} \tan \alpha_j \right) - x \sin \theta \tan \alpha_0, \quad \alpha_{n-1} = i_c \quad (2.8)$$

En función del ángulo crítico

$$L_{d_n} = x \cos \theta - 2 \left(\sum_{j=0}^{n-2} h_{d_j} \tan \alpha_j + h_{d_{n-1}} \tan i_c \right) - x \sin \theta \tan \alpha_0 \quad (2.9)$$

Sustituyendo las expresiones para cada L_{d_j} en la ecuación 3 obtenemos el tiempo de arribo en términos de h_{d_j}, v_j, α_j :

$$t_{Hd}(x) = \frac{h_{d_0}}{v_0 \cos \alpha_0} + 2 \left(\sum_{j=1}^{n-1} \frac{h_{d_j}}{v_j \cos \alpha_j} \right) + \frac{x \cos \theta - 2 \left(\sum_{j=0}^{n-1} h_{d_j} \tan \alpha_j \right) - x \sin \theta \tan \alpha_0}{v_n} + \frac{h_{d_0} + x \sin \theta}{v_0 \cos \alpha_0} \quad (2.10)$$

$$t_{Hd}(x) = \frac{x \cos \theta}{v_n} + 2 \frac{h_{d_0}}{v_0 \cos \alpha_0} + 2 \sum_{j=1}^{n-1} \frac{h_{d_j}}{v_j \cos \alpha_j} - 2 \frac{\sum_{j=0}^{n-1} h_{d_j} \tan \alpha_j}{v_n} - \frac{x \sin \theta \tan \alpha_0}{v_n} + \frac{x \sin \theta}{v_0 \cos \alpha_0} \quad (2.11)$$

Aplicando la ley de Snell

$$\frac{\sin \alpha_0}{v_0} = \frac{\sin \alpha_1}{v_1} = \dots = \frac{\sin \alpha_j}{v_j} = \frac{\sin i_c}{v_{n-1}} = \frac{1}{v_n} \quad (2.12)$$

$$v_n = \frac{v_0}{\sin \alpha_0} = \dots = \frac{v_j}{\sin \alpha_j} = \frac{v_{n-1}}{\sin i_c} \quad (2.13)$$

$$t_{Hd}(x) = \frac{x \sin \alpha_0 \cos \theta}{v_0} + 2 \sum_{j=0}^{n-1} \frac{h_{d_j}}{v_j \cos \alpha_j} - 2 \frac{\sum_{j=0}^{n-1} h_{d_j} \sin^2 \alpha_j}{v_j \cos \alpha_j} - \frac{x \sin \theta \sin^2 \alpha_0}{v_0 \cos \alpha_0} + \frac{x \sin \theta}{v_0 \cos \alpha_0} \quad (2.14)$$

Factorizando términos semejantes

$$t_{Hd}(x) = \frac{x \sin \alpha_0 \cos \theta}{v_0} + \frac{x \sin \theta (1 - \sin^2 \alpha_0)}{v_0 \cos \alpha_0} + 2 \sum_{j=0}^{n-1} \frac{h_{d_j} (1 - \sin^2 \alpha_j)}{v_j \cos \alpha_j} \quad (2.15)$$

$$t_{Hd}(x) = \frac{x \sin \alpha_0 \cos \theta}{v_0} + \frac{x \cos \alpha_0 \sin \theta}{v_0} + 2 \sum_{j=0}^{n-1} \frac{h_{d_j} \cos \alpha_j}{v_j} \quad (2.16)$$

Simplificando se obtiene la expresión para el tiempo de arribo del recorrido DOWNDIP

$$t_{Hd}(x) = \frac{x \sin(\alpha_0 + \theta)}{v_0} + 2 \sum_{j=0}^{n-1} \frac{h_{d_j} \cos \alpha_j}{v_j}; \quad (\alpha_{n-1} = i_c) \quad (2.17)$$

$$\boxed{t_{Hd}(x) = \frac{x \sin(\alpha_0 + \theta)}{v_0} + \tau_{d_{n-1}}}; \quad \tau_{d_{n-1}} = 2 \sum_{j=0}^{n-1} \frac{h_{d_j} \cos \alpha_j}{v_j} \quad (2.18)$$

$$v_d = \frac{v_0}{\sin(\alpha_0 + \theta)} \quad (2.19)$$

La ecuación 3 sigue siendo válida para este caso; la diferencia radica en la dedfinición de L_{u_0} , L_{u_n} y $L_{u_{2n}}$

$$L_{u_0} = \frac{h_{u_0}}{\cos \alpha_0}, L_{u_{2n}} = \frac{h_{u_0} - x \sin \theta}{\cos \alpha_0} \quad (2.20)$$

$$L_{u_n} = x \cos \theta - 2 \left(\sum_{j=0}^{n-1} h_{d_j} \tan \alpha_j \right) + x \sin \theta \tan \alpha_0, \quad \alpha_{n-1} = i_c \quad (2.21)$$

Sustituyendo las expresiones para cada L_{u_j} en la ecuación 3 obtenemos el tiempo de arribo en términos de h_{u_j} , v_j , α_j :

$$\boxed{t_{Hu}(x) = \frac{h_{u_0}}{v_0 \cos \alpha_0} + 2 \left(\sum_{j=1}^{n-1} \frac{h_{u_j}}{v_j \cos \alpha_j} \right) + \frac{x \cos \theta - 2 \left(\sum_{j=0}^{n-1} h_{u_j} \tan \alpha_j \right) + x \sin \theta \tan \alpha_0}{v_n} + \frac{h_{u_0} - x \sin \theta}{v_0 \cos \alpha_0}} \quad (2.22)$$

$$t_{Hu}(x) = \frac{x \cos \theta}{v_n} + 2 \frac{h_{u_0}}{v_0 \cos \alpha_0} + 2 \sum_{j=1}^{n-1} \frac{h_{u_j}}{v_j \cos \alpha_j} - 2 \frac{\sum_{j=0}^{n-1} h_{u_j} \tan \alpha_j}{v_n} + \frac{x \sin \theta \tan \alpha_0}{v_n} - \frac{x \sin \theta}{v_0 \cos \alpha_0} \quad (2.23)$$

Aplicando la ley de Snell

$$\frac{\sin \alpha_0}{v_0} = \frac{\sin \alpha_1}{v_1} = \dots = \frac{\sin \alpha_j}{v_j} = \frac{\sin i_c}{v_{n-1}} = \frac{1}{v_n} \quad (2.24)$$

$$v_n = \frac{v_0}{\sin \alpha_0} = \dots = \frac{v_j}{\sin \alpha_j} = \frac{v_{n-1}}{\sin i_c} \quad (2.25)$$

Utilizamos las relaciones en 25 para reemplazar v_n en la ecuación 23:

$$t_{Hu}(x) = \frac{x \sin \alpha_0 \cos \theta}{v_0} + 2 \sum_{j=0}^{n-1} \frac{h_{u_j}}{v_j \cos \alpha_j} - 2 \frac{\sum_{j=0}^{n-1} h_{u_j} \sin^2 \alpha_j}{v_j \cos \alpha_j} + \frac{x \sin \theta \sin^2 \alpha_0}{v_0 \cos \alpha_0} - \frac{x \sin \theta}{v_0 \cos \alpha_0} \quad (2.26)$$

Factorizando términos semejantes

$$t_{Hu}(x) = \frac{x \sin \alpha_0 \cos \theta}{v_0} + \frac{x \sin \theta (\sin^2 \alpha_0 - 1)}{v_0 \cos \alpha_0} + 2 \sum_{j=0}^{n-1} \frac{h_{u_j} (1 - \sin^2 \alpha_j)}{v_j \cos \alpha_j} \quad (2.27)$$

$$t_{Hu}(x) = \frac{x \sin \alpha_0 \cos \theta}{v_0} - \frac{x \cos \alpha_0 \sin \theta}{v_0} + 2 \sum_{j=0}^{n-1} \frac{h_{u_j} \cos \alpha_j}{v_j} \quad (2.28)$$

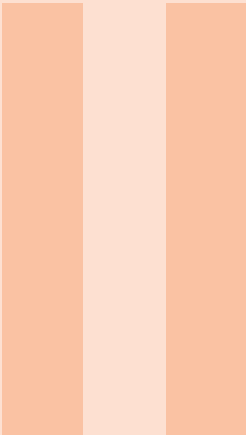
$$t_{Hu}(x) = \frac{x \sin (\alpha_0 - \theta)}{v_0} + 2 \sum_{j=0}^{n-1} \frac{h_{u_j} \cos \alpha_j}{v_j}; \quad (\alpha_{n-1} = i_c) \quad (2.29)$$

Obteniendo finalmente la expresión para el tiempo de viaje en la trayectoria UPDIP

$$\boxed{t_{Hu}(x) = \frac{x \sin (\alpha_0 - \theta)}{v_0} + \tau_{u_{n-1}}}; \quad \tau_{u_{n-1}} = 2 \sum_{j=0}^{n-1} \frac{h_{u_j} \cos \alpha_j}{v_j} \quad (2.30)$$

$$v_u = \frac{v_0}{\sin (\alpha_0 - \theta)} \quad (2.31)$$

Donde $\tau_{u_{n-1}}$ y v_u son el intercepto con el eje del tiempo y la velocidad aparente respectivamente.



Parte II

3	EQUIPOS GEOFISICOS	37
3.1	SISMOGRAFOS	
3.2	FUENTES GENERADORAS DE ONDAS SÍSMICAS	
3.3	DESCRIPCIÓN ESPECIFICA DEL EQUIPO Y SUS ACCESORIOS QUE USAREMOS PARA LA AD- QUISICIÓN DE DATOS SÍSMICOS	
4	TENDIDO SÍSMICO	57
4.1	PROCEDIMIENTO PARA REALIZAR UN TENDIDO SÍSMICO	

3. EQUIPOS GEOFISICOS

3.1 SISMOGRAFOS

En el mercado, encontramos variedad en los equipos especializados para realizar los ensayos de refracción sísmica (RS), con diferentes características, y especificaciones técnicas, tales como, la marca, aspecto físico, comodidad, nacionalidad, fabricante y funcionamiento, de los cuales, vamos a exponer algunos de ellos a continuación, Según los siguientes distribuidores, Geometrics , geosensor y directindustry.

3.1.1 Sismógrafo Geode



Figura 3.1: Sismógrafo Geode de 24 canales. Fuente: geometrics.com

Características

Sismógrafo Geode de la Empresa Geometrics, de 24 Canales

Descripción

Equipo compuesto por el geode, con 2 cables sísmicos de 120 metros, con separaciones cada 10 metros y unión central, geófonos de 4.5 hz, 12 hz, batería de 12 volteos, censor inercial con cable.

Nota: Para en funcionamiento adecuado, en la recolección de datos en una tomografía de refracción sísmica se debe conectar un computador.

Especificaciones técnicas

- Conversión A / D: resultado de 24 bits utilizando los conversores sigma-delta de Crystal Semiconductor y el sobre muestreo patentado de Geometrics.
- DynamicRange: 144 dB (sistema), 110 dB (instantáneo, medido) a 2ms, 24dB.
- Distorsión: 0.0005
- Ancho de banda: 1.75 Hz a 20 kHz. Opción de frecuencia de esquina baja disponible.
- Rechazo de modo común: >-100 dB a <= 100 Hz, 36 dB.
- Diafonía: -125 dB a 23,5 Hz, 24 dB, 2 ms.
- Nivel de ruido: 0.2uV, RFI a 2 ms, 36 dB, 1.75 a 208 Hz.
- Precisión del disparador de apilamiento: 1/32 del intervalo de muestra.
- Señal de entrada máxima: 2.8 VPP.
- Impedancia de entrada: 20 kOhm, 0.02 uf.
- Ganancias del preamplificador: el software SGOS habilita un par de ganancia seleccionable de 24 o 36 dB. Selección de software MGOS entre par de ganancia puenteado de 12 y 24 dB, par de ganancia de 24 y 36 dB o 0dB.
- Filtros anti-alias: -3 dB al 83
- Datos previos al disparo: hasta 4.096 muestras. El software opcional de detección de eventos habilita el sistema para el monitoreo de terremotos y vibraciones.
- Intervalo de muestra: 0.02, 0.03125, 0.0625, 0.125, 0.25, 0.5, 1.0, 2.0, 4.0, 8.0, 16.0 ms.
- Longitud de registro: 16,000 muestras estándar, 64,000 muestras opcionales 2
- Retraso: de 0 a 9999 ms en pasos de 1 ms.
- Transmisión de datos: utiliza conexiones Ethernet confiables y no requiere ningún software de transmisión personalizado. Interfaces directamente con el sistema operativo Windows.
- Canales auxiliares: todos los canales Geode se pueden programar como AUX o DATA.
- Pruebas de instrumentos: pruebas análogas incorporadas opcionales disponibles. Pruebas provistas: ruido, diafonía, distorsión armónica total, similitud de ganancia, precisión de ganancia, rechazo en modo común, precisión del disparador
- Adquisición y DisplayFilters:
 - LowCut: OUT, 10, 15, 25, 35, 50, 70, 100, 140, 200, 280, 400 Hz, 24 o 48 dB / octava, Butterworth.
 - Muesca: 50, 60, 150, 180 Hz y SALIDA, con 50 dB de ancho de banda de rechazo 2
 - HighCut: OUT, 250, 500 o 1000 Hz, 24 o 48 dB / octava.
- LineTesting: el monitor de ruido en tiempo real muestra en tiempo real la salida de geófonos. La prueba opcional de impulsos de geófonos ayuda a identificar geófonos malos y cables en cortocircuito o rotos.
- Almacenamiento de datos: se almacena en discos duros locales, RAID local o NAS. Soporte de cinta disponible en Windows XP.
- Activación: cierre positivo, negativo o por contacto, umbral ajustable por software.
- Formatos de datos: Estándar SEG-2 con SGOS. SEG-D y SEG-Y disponibles. 2
- Potencia: Requiere 12V de batería externa. Utiliza 0.65 W / canal durante la adquisición,

el modo de reposo y el consumo de energía en un 70 porciento mientras está en modo de espera.

- Plotters: maneja la mayoría de las impresoras y trazadores compatibles con Windows
- Medio ambiente: -30 a 75 grados C. Impermeable y sumergible. Soporta una caída de 1 m sobre concreto en 6 lados y 8 esquinas.
- Sistema operativo: Windows XP / W2K / ME / 98 / NT / Vista

3.1.2 Sismógrafo Terraloc



Figura 3.2: Terraloc 24 Canales. Fuente: geosensor.com

Especificaciones técnicas

Características

Sismógrafo Terraloc 24 Canales marca ABEM

Descripción

El ABEM Terraloc Pro es un sistema autónomo, moderno y de última tecnología que cuenta con una computadora incorporada, gran almacenamiento de datos, canales de medición e interfaz de usuario intuitiva. Las mediciones se realizan utilizando una interfaz gráfica en el mismo equipo, sin necesidad de descargar la información. El sistema está encerrado en una carcasa de aluminio robusta y portátil, que cumple con las clasificaciones IEC IP66 de manera que las mediciones se pueden realizar en todas las situaciones y entornos. ABEM Terraloc Pro está equipado con GPS, WiFi, Ethernet, USB y VGA.

- N° de Canales: 12, 24 y 48
- Canales adicionales: Fácilmente obtenidos enlazando dos o más unidades juntas
- Canal Up-hole: Sí, 2 canales adicionales independientes
- Velocidad de muestreo (seleccionable): 100 sps - 50 ksp (20 us - 10 ms)
- Longitud de grabación (seleccionable): Hasta 480 k muestras/ch. Equivalente a 5,1 ms - 80 min
- Registro pre-trig (seleccionable): 0 - 100
- Tiempo de retardo: Hasta 2 minutos
- Apilamiento: 32 bits, hasta 999 impactos
- Entradas de disparo: Bobina de activación, make/break, geófono, TTL

- Resolución del convertidor A/D: 24 bits
- Rango dinámico (teórico/medido): 144dB/>120 dB
- Rango de voltaje de entrada (seleccionable): 0,5 Vpp, 5 Vpp, 12,5 Vpp
- Ganancia de entrada (seleccionable): 0 dB, 12 dB, 24 dB, 36 dB, 48 dB
- Impedancia de entrada (seleccionable): 3 k, 20 k, 20 M
- Rango de frecuencia: DC a 20 kHz
- Distorsión armónica total: 0,0005
- Diafonía: -120 dB
- Monitor de ruido: Amplitud

3.1.3 Sismógrafo MAE



Figura 3.3: Sismógrafo MAE 12 Canales. Fuente: directindustry.es

Características

Sismógrafo 12 canales / 24 bits / multicanal

Descripción

El sismógrafo de 24 bits para prospección sísmica MAE A6000S se distingue por la plataforma de adquisición de datos combinada con el sistema operativo de última generación fácil de usar y organizado en un menú navegable, con diferentes funciones según el tipo de levantamiento sísmico seleccionado con un simple toque en el Pantalla táctil en color de pantalla grande. Una característica esencial de esta serie es la resolución de 24 bits para cada canal. Este resultado se logra mediante el uso de la nueva tarjeta de adquisición de datos MAE de 24 bits, que adopta un convertidor digital A / D para cada uno de los canales de entrada a los que pertenece el sismógrafo (SST). La adopción de esta arquitectura hace que sea ideal para el A6000S todo tipo de sísmica activa y pasiva, así como para estudios e inspecciones estructurales de edificios y proyectos de infraestructura.

Especificaciones técnicas

- Convertidores: resolución de 24 bits, tecnología sigma-delta
- Rango dinámico: 144 dB (teórico)
- Distorsión máxima: +/- 0.0010
- Ancho de banda: 2Hz-30KHz
- Rechazo de modo común: 110 dB a 60 Hz
- Conversación cruzada: -120dB a 20 Hz

- Umbral de ruido del amplificador programable: 27nV
- Precisión del disparador: 1/30 del tiempo de muestreo
- Rango de señal de entrada máxima: +/- 5V
- Impedancia de entrada a 1000 muestras / segundo: 20Mohm
- niveles de amplificación: 0 dB, 6 dB, 12 dB, 18 dB, 24 dB, 30 dB, 36 dB pueden establecerse individualmente para cada canal o para grupos de canales pueden ser organizados libremente
- filtro anti-aliasing: -3dB, el 80
- tiempo de pre-trigger: 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 50, 100, 200, 300, 400, 500ms
- intervalos de muestreo: 1/30, 1/15, 1 / 7,5, 1 / 3,75, 0,5, 1,0, 2,0, 10,0, 20,0 ms; 8,0, 4,0, 2,0 ms en grabación continua
- Número de muestras por evento: set 1024-21800 en incrementos de 512
- Interfaces disponibles: LAN, USB, VGA
- Modo de adquisición: con disparador externo en todos los canales y tiempo en máximo 12 canales.
- Canales: configuraciones de 12, 24 o 36. Capacidad para utilizar desde 1 al número máximo de canales instalados para cada adquisición.
- Prueba de instrumentación: autocalibración interna de los convertidores antes de cada adquisición.
- Filtros digitales: seleccionados automáticamente en función de la frecuencia de muestreo
- geófonos de prueba: la comprobación automática para detectar interrupciones de cables o geófonos roto o en cortocircuito.
- Visualización en tiempo real de las señales procedentes de los geófonos
- Almacenamiento de datos: memoria flash interna (hasta 3 GB disponibles) y / o pen drive-extraíble USB
- Disparador: positivo, negativo (opcional con cierre de contacto) con umbral ajustable por software
- Formato de los datos: SEG-2 estándar (32 bits entero largo) o ASCII
- Fuente de alimentación: 12V DC, suministrada por una caja de alimentación recargable especial. Absorción promedio: 1.5A
- Tamaño y peso: 40.4x17.4x33 cm, 5 kg (excluyendo cables y sensores)
- Pantalla: 10.4 "LCD con pantalla táctil, conexión óptica
- Condiciones ambientales: -20 / 80 grados C
- Sistema operativo: Windows Embedded Standard

3.1.4 Sismógrafo PASI



Figura 3.4: Pasi GEA24. Fuente: geosensor.com

Características

GEA24

Descripción

Sismógrafo de 24 canales de tamaño compacto, con una tarjeta de adquisición de datos de 24 bits y conexión con la PC o Tablet mediante interfaz USB. GEA-24 es una solución muy asequible para todos los usos profesionales e ideal para tantas aplicaciones de estudios sísmicos.

Especificaciones técnicas

- 24 canales y 01 canal auxiliar para trigger.
- 02 unidades en serie pueden hacer en total 48 canales.
- Digitalizador Sigma-Delta de 24 bits.
- Adquisición activa de hasta: 125us (8,000sps) en 24 canales y 31.25us (32,000sps) en 06 canales.
- Adquisición pasiva de hasta: 4,000us (250sps) en 24 canales y 500us (2,000sps) en 03 canales.
- 27,500 muestras en 24 canales más canal auxiliar.
- 174,000 muestras en 03 canales más canal auxiliar.
- Muestreo ilimitado para adquisición continua.
- Ganancia del preamplificador de 0 hasta 52dB, seleccionable por software.
- Filtro pasa bajo: 125, 200, 500 y 1000 Hz.
- Filtro pasa alto: 10, 20, 30, 40, 50, 70, 100, 150, 200, 300, 400 Hz.
- Trigger: Contacto cerrado, contacto de cierre (explosivos por ejemplo), señal analógica, TTL desencadenante y trigger ajustable por Software.
- Interfaz externa vía USB 2.0
- Formato de datos: SEG2, SAF (Otros formatos disponibles según solicitud)
- Suministro de energía: 5VDC desde USB, 0.25A
- Temperatura de Operación: (-30 a + 80 C)
- Dimensiones: 24 x 19.5 x 11 cm
- Peso: 2 Kg

3.1.5 Sismógrafo SEIMEX



Figura 3.5: SEIMEX Sismógrafo de 16 canales. Fuente: geosensor.com

Marca: Subsuelo3D

Características

Sismógrafo de 16 canales

Descripción

El sismógrafo SeismeX16 es un equipo geofísico de última generación que registra vibraciones sísmicas naturales o artificiales con el fin de visualizar el subsuelo. Este equipo es útil entre otros métodos para: Estudios de refracción sísmica; Refracción de Microtremores (ReMi); Multichannel Analysis of Surface Waves (MASW), Estudios de velocidades en pozo tipo Downhole; Reflexión sísmica somera.

Especificaciones técnicas

- Número de canales: 16
- Rango dinámico: 110 dB
- Rechazo en modo común: 100 dB
- Intervalo de muestreo: 0.25, 0.5, 1 ms
- Nivel de ruido: 0.2uV, RFI a 2 ms
- Fuente de alimentación: 12 VDC
- Display y almacenamiento de datos: Laptop (no se incluye)
- Comunicaciones: USB
- Geófonos: 16 Rt Clark (4.5 Hz)
- Cable: Para 16 canales con separación de 8 metros entre receptores.
- Software: SEISMIDAQ para adquisición de datos: Refracción Sísmica (Vp-Vs), ReMi, ensayo de pozo o Downhole.

3.1.6 Sismógrafo de un Canal



Figura 3.6: SuperOne Sismógrafo de 1 canal. Fuente: geosensor.com

Características

- Ideal para profundidad a la roca madre.
- Inmersión de la capa.
- Espesor y velocidades sísmicas de las capas superiores.
- Vp y Vs refracción sísmica.
- Determinación de módulos geotécnicos.
- Geometría y espesor de la capa meteorizada.
- Geometría y espesor de la capa meteorizada.

Descripción

El sismógrafo SuperOne es un equipo versátil de un solo canal, económico y fácil de usar y transportar. Se pueden realizar con él adquisiciones de perfiles sísmicos con menores costos en logística. El equipo puede ser utilizado, entre otros servicios, para: Estudios de refracción sísmica, Análisis de velocidades de onda P en capas superficiales.

3.2 FUENTES GENERADORAS DE ONDAS SÍSMICAS

Tenemos las siguientes fuentes generadoras de ondas, según oilfield glossary en español, (Schlumberger): donde el campo petrolero interactúa con el diccionario

Pistolas de Aire

Un método de adquisición sísmica que utiliza cargas detonadas en el aire o en polos sobre el terreno como fuente. La técnica de tiros en el aire también se conoce como método de Poulter, en honor al geofísico norteamericano Thomas Poulter (glossary Schlumberger).

Camión vibrador

Un camión vibrador equipado con ruedas anchas para posibilitar el acceso a terrenos accidentados o húmedos y a la vez producir menos daño al medio ambiente.

En la adquisición sísmica vibratoria, se utiliza un dispositivo montado en un camión, denominado vibrador, para generar ondas de energía sísmica. Los vibradores se emplean en la adquisición terrestre de datos de sísmica de superficie o datos de perfiles sísmicos verticales (VSP), en áreas en las que no pueden emplearse fuentes explosivas, y donde puede utilizarse más de un camión vibrador, simultáneamente para mejorar la calidad de los datos (glossary Schlumberger).

Efecto Burbuja

Los pulsos de burbuja o el ruido de burbuja que afecta la calidad de los datos. En adquisición sísmica marina, la burbuja de gas producida por un cañón de aire oscila y genera pulsos subsiguientes que producen ruido generado por la fuente. El uso cuidadoso de múltiples cañones de aire puede producir la interferencia destructiva de los pulsos de burbuja y aliviar el efecto de burbuja. Para disipar la energía y reducir el efecto de burbuja se puede utilizar una caja, o un cerramiento de acero alrededor de una fuente sísmica (glossary Schlumberger).

Cavitación

Una implosión producida por la existencia de una presión localmente baja, tal como el colapso de una burbuja de gas en un líquido (cuya energía se utiliza como fuente de energía sísmica proveniente de los cañones de aire) (glossary Schlumberger).

Pistola Hidráulica

Una fuente de energía para la adquisición de datos sísmicos marinos que tira agua desde una cámara de la herramienta hacia un cuerpo de agua más grande, lo cual produce el fenómeno de cavitación. La cavidad es un vacío e implosiona sin crear burbujas secundarias. Esto proporciona un carácter único de corto plazo y mayor resolución que una fuente de tipo cañón de aire (glossary Schlumberger).

Dinamita

Un tipo de explosivo utilizado como fuente de energía sísmica durante la adquisición de datos. Originalmente, el término "dinamita" se refería específicamente a un explosivo a base de nitroglicerina, formulado en el año 1866 por Alfred Bernhard Nobel (1833-1896), el inventor suizo que fundó los premios Nobel. El término se utiliza incorrectamente para indicar cualquier explosivo, en vez de la formulación original (glossary Schlumberger).

Cañón de Aire

Una fuente de energía sísmica utilizada en la adquisición de datos sísmicos marinos. Este cañón libera aire altamente comprimido en el agua. Los cañones de aire se utilizan además en piletas llenas de agua, emplazadas en tierra firme, como fuente de energía durante la adquisición de perfiles sísmicos verticales (Schlumberger).

Porra, o Maso Metálico

De 15 y 20 lb con mango en madera fina, con el cual se aplican caídas del peso del mismo a una placa metálica, para generar las ondas. Placa Metálica. Placa metálica de acero de más o menos 20 cm de diámetro y 2 cm de espesor (glossary Schlumberger).

Pistola de Gas

una mezcla de butano o propano con oxígeno o aire se explota bajo el agua usando una pistola de gas, alternatively, la mezcla se detona dentro de una bolsa de goma resistente que se expande para contener la explosión y luego se colapsa creando una implosión que es la fuente principal del pulso. Los gases de escape se ventilan desde el manguito hasta la manguera a la superficie para que no haya pulso de burbujas. uno de los principales nombres comerciales es Aquapulse y el sistema se utiliza bajo licencia por varios contratistas sísmicos(Reynolds,1997).

3.3 DESCRIPCIÓN ESPECIFICA DEL EQUIPO Y SUS ACCESORIOS QUE USAREMOS PARA LA ADQUISICIÓN DE DATOS SÍSMICOS

3.3.1 Sismógrafo geode, marca geometrics

Geode ultra-lite: de la empresa GEOMETRICS, con referencia SN 5701-G24, Equipo compuesto por el geode, con 2 cables sísmicos de 120 metros, con separaciones cada 10 metros y unión central, geófonos de 4.5 hz, 12 hz, batería de 12 volteos, censor inercial con cable.de 24 canales, este recibe las señales captadas por lo receptores (geófonos) ver Figura 3.1.

3.3.2 Conectores

A continuación, se realizara una descripción detallada de los diferentes conectores que contiene el equipo geode, teniendo en cuenta que el geode cuenta con una serie de conectores en las partes derecha e izquierda, y se hará la descripción de los conectores del equipo, comenzando por la parte derecha y luego la izquierda.

Conectores del Lado Derecho del Equipo

- Conector del Adaptador del Computador.
- Conector del Trigger o Censor Inercial.
- Conectore del Cable Sismico.

Conectores del lado Izquierdo del Equipo

- Conector de la Fuente de Energia.
- Conector para Montajes en Serie.

Conectores del Lado Derecho del Equipo

En el lado derecho del equipo, encontramos los conectores, que describiremos de arriba hacia abajo, como lo podemos visualizar en la figura 3.8, que tambien se describiran uno a uno, y se referenciaran y ubicaran en la parte inferior de cada enunciado.

Conectores



Figura 3.7: Conectores derecha.

Conector del Adaptador del Computador

El primero es el conector del convertidor, o adaptador el cual cuenta con una salida adecuada para conectar un computador donde almacenamos todos los datos recolectados. El cual es necesario, porque el equipo no cuenta con la salida adecuada para conectar directamente al computador, en este conector encontraremos un aviso que dice, fuera (out), como lo podemos visualizar en la Figura 3.9.



Figura 3.8: Conectores derecha.

Conector del Trigger o Censor Inercial

De acuerdo a la descripción inicial, de segundo encontraremos el conector del trigger o censor inercial, como lo podremos visualizar en la Figura 3.10.



Figura 3.9: Conector del trigger.

Conector de la Fuente de Energía

En la parte izquierda, encontraremos dos conectores, donde el primero de la parte de arriba, es el conector de la fuente de energía, donde debemos conectar una cable que tenga una división positiva y negativa, para conectar una batería de 12 voltios, que nos aporta la energía, para encender el geode, como lo podemos visualizar en la Figura 3.13.



Figura 3.12: Conector de la batería.

Conector para Montajes en Serie

En seguida encontraremos un conector, que nos permite realizar montajes con sismógrafos con geodes en serie y aumentar el número de canales de 24 en 24, como lo podemos visualizar en la Figura 3.14.



Figura 3.13: Conector que nos permite realizar montajes con sismógrafos en serie.

Led de encendido

También encontraremos en la parte izquierda en la parte de arriba un indicador de luz azul (led azul), que se enciende cuando conectamos el equipo, como lo podemos visualizar en la Figura 3.15.



Figura 3.14: Indicador de luz azul.

3.3.3 Cables**Cable Sísmico (cable de recolección)**

Es el cable que va conectado desde el geode a los 24 geófonos ubicados en un tendido sísmico, con 24 canales o conectores para los geófonos, separaciones cada 10 metros. En los conectores que son de color amarillo, encontramos dos ranuras, para conectar los geófonos, de la siguiente forma, cable rojo en la ranura ancha y cable negro en la ranura delgada. En este caso tendremos dos cables de 120 metros, como lo podemos visualizar en la Figura 3.16.

Cable Sísmico

Figura 3.15: Cable sísmico.

Este es el conector que va en la parte del geode, teniendo en cuenta que el cable sísmico cuenta con dos conectores en sus puntas, el que va al geode es el conector hembra, como lo podemos visualizar en la figura 3.17.



Figura 3.16: Cable sísmico.

Unión de Cable Sísmico

Esta es la que nos permite unir los dos cables sísmicos de 120 metros para completar el tendido de los 24 canales y conectar los 24 geófonos, como lo podemos visualizar en la Figura 3.18.



Figura 3.17: Unión de cable sísmico.

Cable del Trigger, o Censor Inercial

Este cable es el que conectamos desde el geode al trigger o censor inercial, este que usaremos cuenta con una longitud de 92 metros teniendo en cuenta que, este debe tener una longitud mayor a las longitudes, en que realizamos los tendidos sísmicos, porque se debe extender desde el inicio al final del tendido. Podemos visualizar el cable en la Figura 3.19.



Figura 3.18: Cable del trigger.

Trigger

Al igual que los geófonos el trigger es un sensor inercial o de movimiento que se encarga de activar la señal de los geófonos en el momento de la adquisición, siempre debe ir ubicado cerca de la fuente que genera las ondas sísmicas, porque es el que activa el tendido sísmico y permite la toma de los datos. Como lo podemos visualizar el trigger en la Figura 3.20.



Figura 3.19: Trigger.

3.3.4 Accesorios

Geófonos Azules

se utilizan para los métodos de refracción sísmica, son los encargados de la recolección de los datos ubicados en el tendido sísmico, estos captan las ondas P y tienen una frecuencia de 14.5 Hz, como los podemos visualizar en la figura 3.21.



Figura 3.20: Geófonos.

Batería de 12 voltios

Es la que nos proporciona la energía al geode, para la adquisición de los datos, la podemos visualizar en la Figura 3.22.



Figura 3.21: Bateria.

Computador

Teniendo en cuenta que el equipo geone no cuenta con un computador incorporado, debemos conectar un computador de preferencia debe ser un computador portátil, con características, batería de alta duración, ya que los tendidos sísmicos se realizan en zonas abiertas, como lo podemos visualizar en la Figura 3.23.



Figura 3.22: computador portátil.

Mazo metálico

Este debe ser un mazo metálico, con el que proporcionaremos golpes a una placa metálica, que ubicaremos en los disparos (shots) coordinantes, que emitirá las ondas con las cuales meditemos los tiempos de propagación, como lo podemos visualizar en la Figura 3.24.



Figura 3.23: Mazo metálico.

Placa metálica

Esta es una placa de preferencia metálica que ubicaremos en los disparos (shots) coordinantes, que emitirá las ondas con las cuales meditemos los tiempos de propagación, como la podemos visualizar en la Figura 3.25.



Figura 3.24: Placa metálica.



4. TENDIDO SÍSMICO

4.1 PROCEDIMIENTO PARA REALIZAR UN TENDIDO SÍSMICO

4.1.1 Descripción

Se realizara la descripción de todo el procedimiento, para realizar un tendido sísmico paso a paso, con el cual se realizara la toma de datos de refracción sísmica, teniendo en cuenta el equipo que se usará y sus accesorios, además de las conexiones ideales, de los cables, accesorios, la instalación correcta de los mismos con y las medidas de todo el tendido.

En este caso, expondremos, la ejecución del montaje de un tendido sísmico, que se realizó en universidad de pamplona extensión villa del rosario. Donde realizamos el tendido sísmico, en la parte noroeste, al lado del bloque gramalote y bienestar universitario, ver figura 4.1.

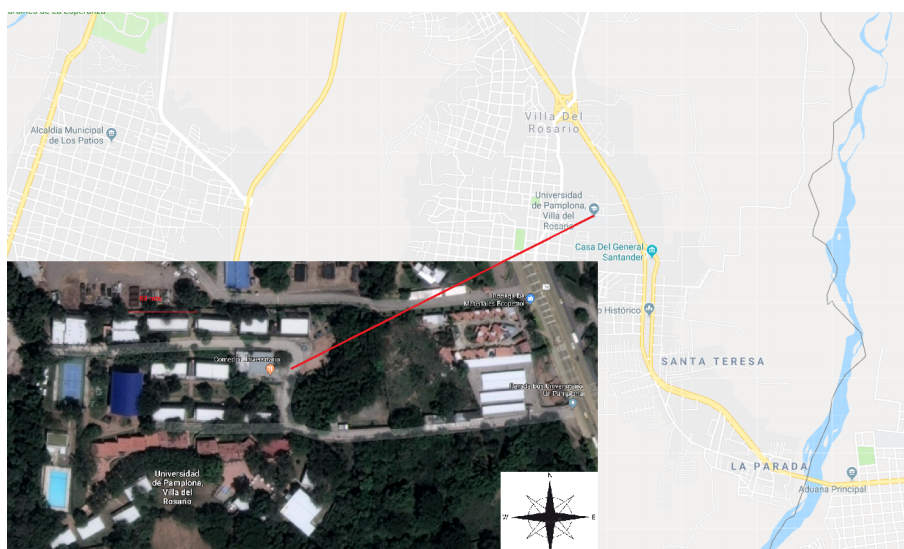


Figura 4.1: Imagen satelital Extensión Villa del Rosario.

4.1.2 Equipo utilizado

El montaje sísmico se llevó a cabo con un equipo Geode: de la empresa GEOMETRICS, con referencia SN 5701-G24, de fabricación en Estados Unidos (USA), el equipo compuesto por el geode, con 2 cables sísmicos de 120 metros, con separaciones de los canales cada 10 metros y unión central, 24 geófonos de 4.5 hz de color rojo, trigger o sensor inercial con cable, adaptador para conectar un equipo de cómputo, y adicionalmente, una cinta métrica de 100 metros, también usaremos como fuente de energía una batería de 12 voltios, y como fuente generadora de ondas sísmicas una porra de 14 libras y una placa metálica de 20 por 20.

4.1.3 Montaje

Se llevó a cabo el montaje sísmico con un tendido de longitud de 69 metros, para toma de datos de refracción sísmica (RS), en donde distribuiremos 5 disparos (shots).

Para cualquier tendido sísmico, que se realice con un equipo geode de 24 canales, se toma la distancia completa del tendido, y se divide en 23 que son los números de separaciones entre canales y nos dará la distancia de distribución de los geófonos, en este caso son 69 dividido en 23, tendremos una separación entre geófonos de 3 metros.

Los disparos (shots), se distribuyen uniformemente de tal forma que no quede recargado uno de los dos cables sísmicos, en este caso ubicaremos los disparos en los puntos, el primero a 0 metros, en el geófono número 1, el segundo a 12 metros, en el geófono número 5, el tercero a 33 metros, en el geófono número 11, el cuarto a 57 metros, en el geófono número 21 y el quinto a 69 metros, en el geófono número 24, ver figura 4.2.

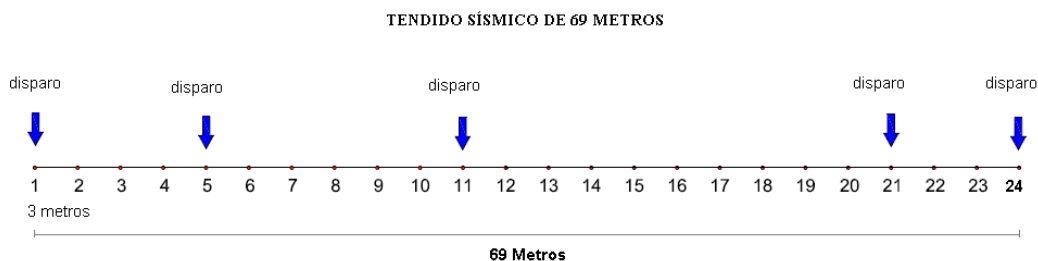


Figura 4.2: Tendido Sísmico.

4.1.4 Descripción del Montaje

Medidas

Una vez determinado la distribución de los geófonos y los disparos, damos inicio a realizar la medida del terreno, teniendo en cuenta la topografía del mismo, para no incurrir en errores con las alturas del terreno, dado que las debemos tener en cuenta en las medidas. En este caso realizamos la medida de los 69 metros, con una cinta métrica de 100 metros, Marcando el punto inicial y final con estacas, donde se ubicaran los geófonos con separación de 3 metros respectivamente, como lo podemos visualizar en la Figura 4.3.

Nota: Cuando se realicen las medidas iniciales debemos dejar las cintas métricas extendidas donde realizaremos el montaje, para luego ubicar los geófonos, y relajar los disparos.

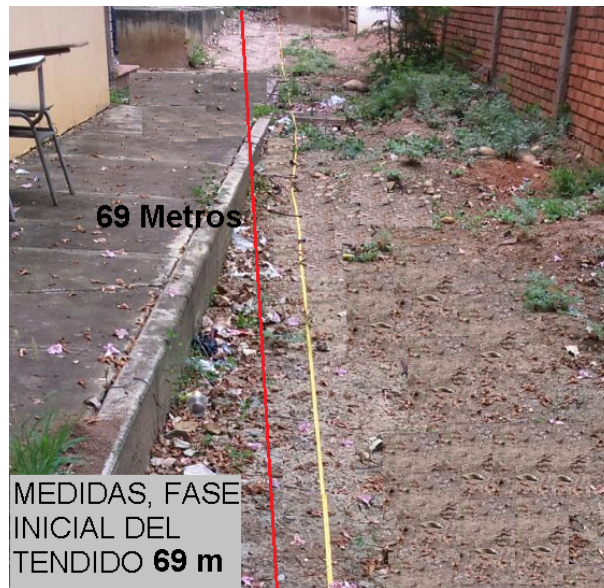


Figura 4.3: Medida inicial del terreno.

Cable Sísmico

Luego de realizar las medidas, procedemos a extender el cable sísmico, teniendo en cuenta, que la distribución del tendido sísmico es de 3 metros, y el cable sísmico cuenta con separaciones de 10 metros entre cada canal de conexión, debemos ubicar la parte sobrante, de tal forma que no interfiera en el momento de realizar los disparos, como lo podemos visualizar en la Figura 4.4.

Nota: Debemos tener cuidado en el momento de extender el cable, evitar pisarlo, evitar que se enrede, no generar ni dejar nudos, ubicarlo hacia un solo lado de tal forma que se pueda transitar por el lado contrario con el cable del trigger sin enredarlos.



Figura 4.4: Extensión del cable sísmico.

Geófonos

Seguido, realizamos la ubicación de los geófonos, que deben ir debidamente incrustados en el terreno de forma vertical y buscando la orientación de los conectores con el cable sísmico, en este caso, lo realizaremos cada tres metros teniendo en cuenta que nos quedan ubicados, los 24 geófonos, 23 espacios, y 69 metros de longitud, como lo podemos visualizar en la figura 4.5.

Nota: En el momento de instalar los geófonos, no debemos golpearlos con ningún objeto.



Figura 4.5: Instalación de los geófonos en el tendido sísmico.

Conexión Geófonos

Una vez ubicados los geófonos, procedemos a la conexión de los mismos. En este caso debido a las características del equipo, los geófonos tienen dos pinzas conectoras, una roja y una negra, las cuales deben ir conectadas en los canales de conexión del cable sísmico, que son de color amarillo en la misma, donde cuenta con dos espacios, uno grande y uno pequeño, donde ubicamos el rojo en el espacio grande, y el negro en el espacio pequeño, como lo podemos visualizar en la Figura 4.6.



Figura 4.6: Conectores de los geófonos.

Unión del Cable Sísmico

Una vez conectados los geófonos, procedemos a realizar la unión de los cables, teniendo en cuenta que tenemos dos cables de 120 metros con una unión central, incrustando la unión como lo especifican los 5 pines, ubicados alrededor del eje de conexión y los indicadores descritos desde la letra A hasta PP, como lo podemos visualizar en la Figura 4.7.



Figura 4.7: Unión del cable sísmico.

Conexión Cable Sísmico al Geode

Luego procedemos a realizar la conexión de todos los cables al sismógrafo geode, conectando inicialmente el cable sísmico de recolección, que de la misma forma que la unión, deben coincidir los pines en el momento de conectar, como lo podemos visualizar en la Figura 4.8.



Figura 4.8: Conexión cable sísmico de recolección.

Conexión Cable del Trigger

Luego procedemos a seguir con la conexión de los cables al geode, conectando enseguida el cable del trigger o sensor inercial, que cuenta con tres pines y tres orificios que deben coincidir con el conector del geode, como lo podemos visualizar en la Figura 4.9.



Figura 4.9: Conexión cable del trigger.

Conexión Cable del Adaptador para Conectar el Computador

Luego procedemos a seguir con la conexión de los cables al geode, conectando enseguida el cable del adaptador para conectar el computador donde se van a almacenar los datos obtenidos, como lo podemos visualizar en la Figura 4.10.



Figura 4.10: Conexión adaptador para conectar el computador.

Conexión Cable Fuente de Energia

Finalmente procedemos a conectar el cable de la fuente de energia que en este caso es una batería de 12 voltios, que nos genera la energía y con esto tenemos conectados todos los cables del equipo para iniciar la recolección de datos, como lo podemos visualizar la conexión en la Figura 4.11.



Figura 4.11: Conexión Cable de la Fuente de Energia.

Conexión Fuente de Energia

Una vez conectado todos los cables al equipo, procedemos a conectar los accesorios, como lo es la batería, teniendo en cuenta que se debe conectar correctamente, para no generar daños a el equipo, en este caso se tienen dos pinzas, negativa color negra, y positiva color roja, y se debe conectar, como lo indica el signo más y el menos en la batería, como lo podemos visualizar en la Figura 4.12

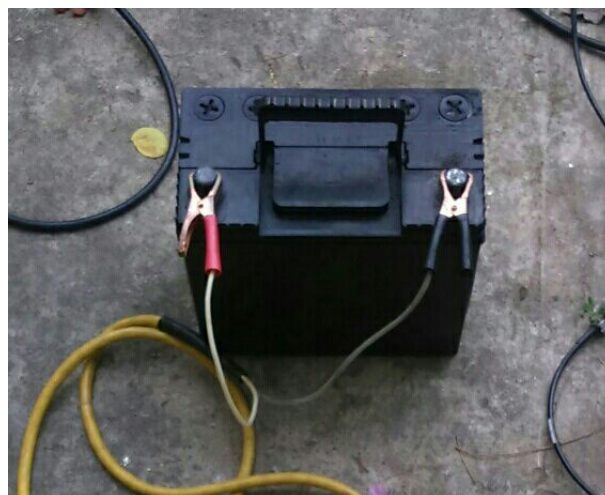


Figura 4.12: Conexión Fuente de Energia

Ubicación del Equipo

Es muy importante la ubicación final del equipo, teniendo en cuenta que sea un lugar seco, tratar de que este plano o estable, para evitar algún movimiento en el momento de estar tomando datos,

como lo podemos visualizar en la Figura 4.13



Figura 4.13: Ubicación del Equipo

Montaje completo

El montaje completo se finaliza, cuando se conecta el computador, que es donde se almacenan nuestros datos a recolectar, como lo podemos visualizar en la figura, 4.14



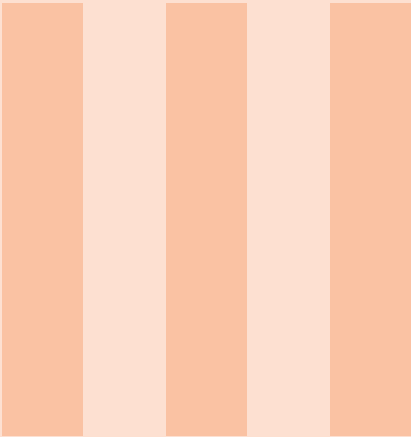
Figura 4.14: Montaje completo

Fuente Generadora de Ondas Sísmicas

Una vez realizado el montaje completo ubicamos la fuente generadora de ondas sísmicas en nuestro punto de inicio, y procedemos a tomar los datos, como lo podemos visualizar en la figura 4.15



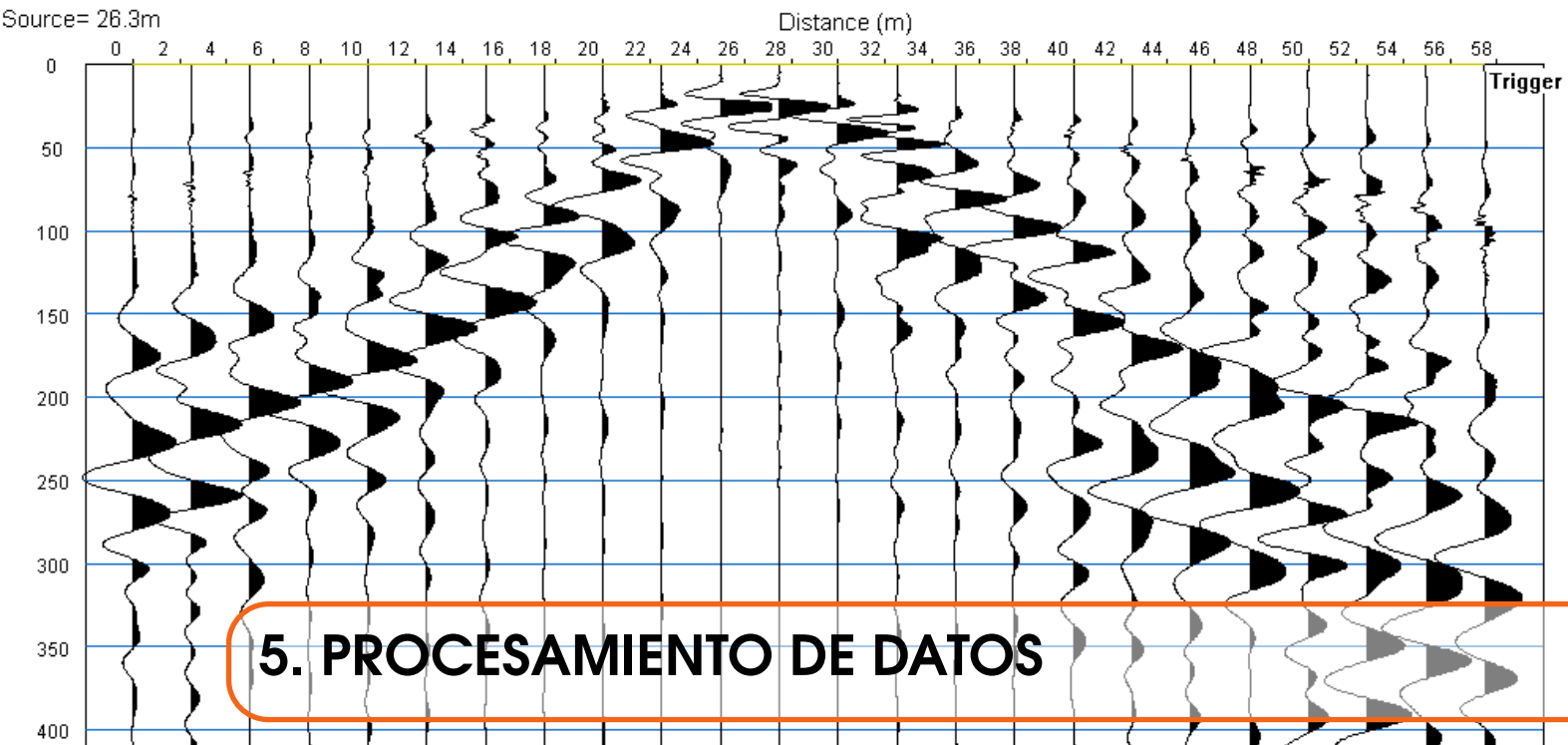
Figura 4.15: Fuente Generadora de Ondas Sísmicas



Parte III

5	PROCESAMIENTO DE DATOS	69
5.1	EJEMPLO DE PROCESAMIENTO	
6	CONCLUSIONES	107
7	BIBLIOGRAFÍA	109
	LIBROS	
	ARTÍCULOS Y TESIS	
	FUENTES ELECTRÓNICAS	
	NORMAS Y MANUALES	

Source= 26.3m



5.1 EJEMPLO DE PROCESAMIENTO

Este ejemplo de procesamiento lo realizaremos una vez más con el software Seis Imager, en el cual se procesaran datos recolectados, con una distribución de geófonos a una distancia de tres metros, y una longitud total de la línea, de 69 metros, que se recolecto en el bloque gramalote, en la extensión villa del rosario de la universidad de pamplona. Este ejemplo de procesamiento lo realizaremos en cuatro fases, en las cuales se dará una explicación paso a paso, para no generar dudas en el procedimiento.

5.1.1 Fases

- Corrección de la geometría
- Picados (Pckwin)
- Asignación de capas (Plotrefa)
- Generar modelos iniciales

5.1.2 Corrección de la geometría

Sin Datos de Forma de Onda

Una vez abierto el Pickwin, tendremos una vista inicial, donde daremos inicio al procesamiento de los datos adquiridos en campo. En el cual nos muestra un enunciado inicial, sin datos de forma de onda, (no waveform data) que nos indica que no se ha dado inicio a el procesamiento de ningún dato, como lo podemos visualizar el la Figura 5.1.

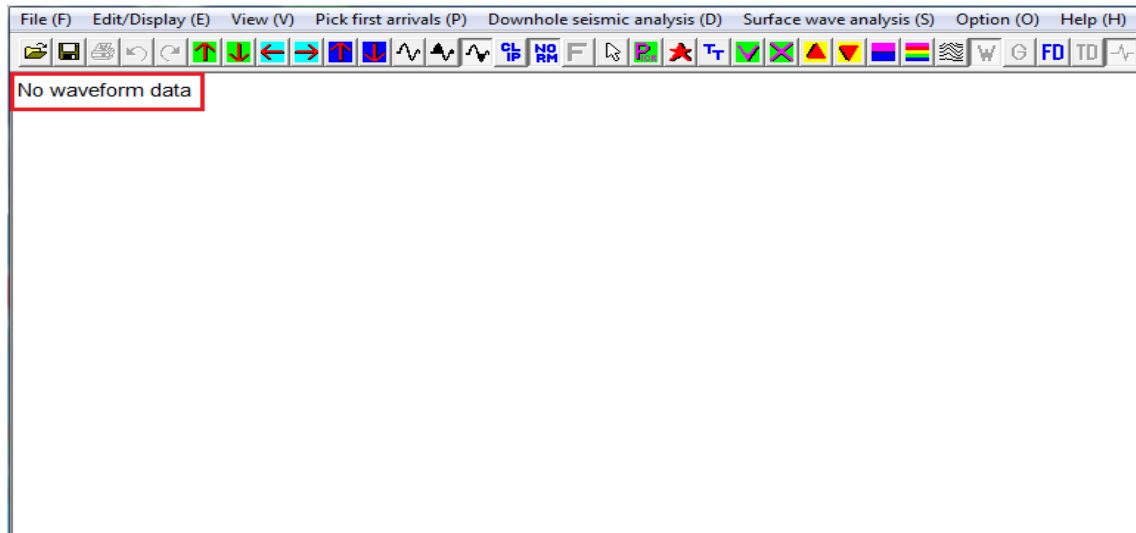


Figura 5.1: Sin datos de forma de onda.

Abrir Datos

Daremos inicio al procesamiento abriendo nuestro primer dato. Iremos a la parte superior izquierda, donde encontraremos archivo (F)(File (F)) donde le daremos clic, inmediatamente se nos despliega una pestaña con varias opciones, escogeremos la primera, donde daremos clic en, abrir archivo SEG2 (Open SEG2 file), como podemos visualizar en la Figura 5.2.

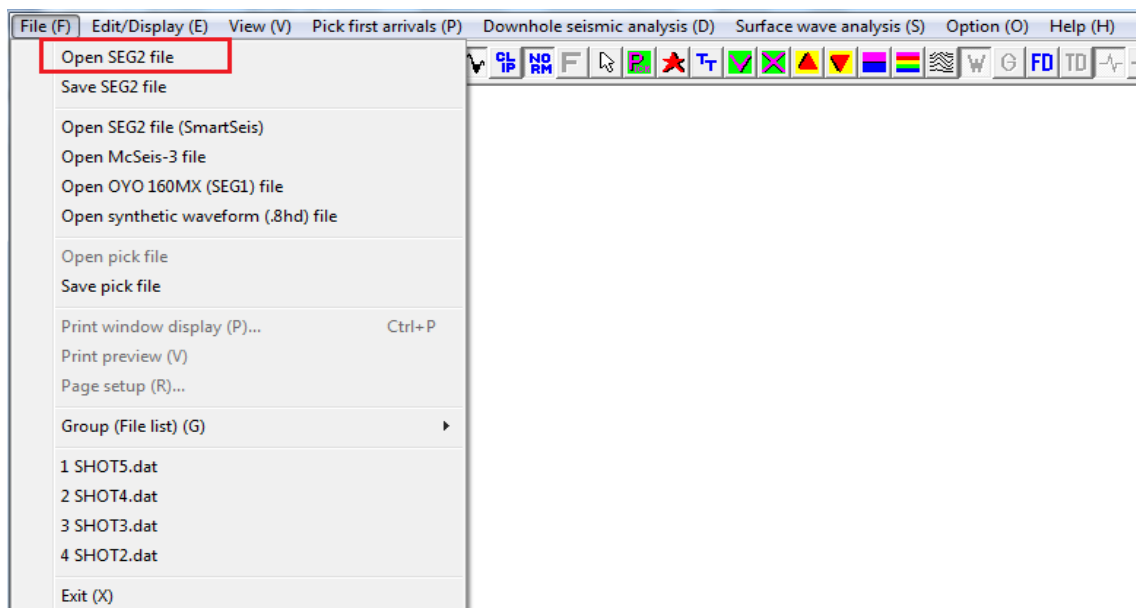


Figura 5.2: Abrir archivo SEG2.

Buscar Datos Guardados

Inmediatamente se abrirá una ventana de búsqueda, donde iremos al lugar donde tenemos nuestros datos guardados, desde el momento de la adquisición en campo. En este caso tenemos cinco carpetas diferentes, donde tenemos los datos de cinco adquisiciones diferentes, guardadas de la siguiente manera: all24canales4.5hz datos biblioteca24canales4.5hz TRS075m24canales4.5hz TRS1.5m24canales4.5hz TRS3.m24canales4.5hz, como lo podemos visualizar en la Figura 5.3.

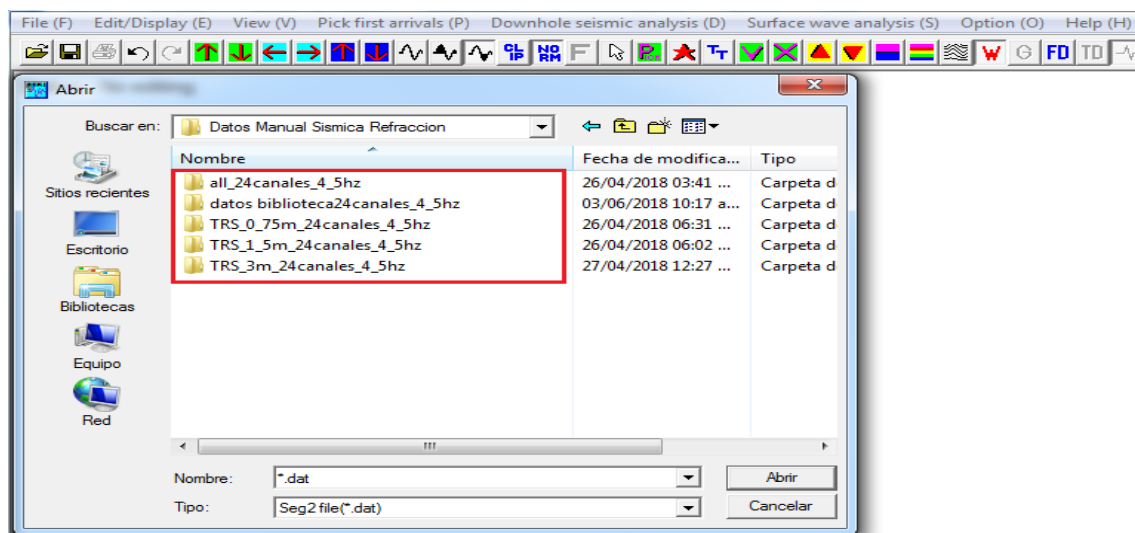


Figura 5.3: Carpetas con datos de cinco adquisiciones.

Datos Guardados

En este caso vamos a escoger la carpeta donde se encuentran guardados los datos Adquiridos en el montaje que se realizó junto a la biblioteca, que esta guardada con el nombre: datos biblioteca24canales4.5hz, y daremos clic para abrir el primer dato, del conjunto de datos guardados, como lo podemos visualizar en la Figura 5.4.

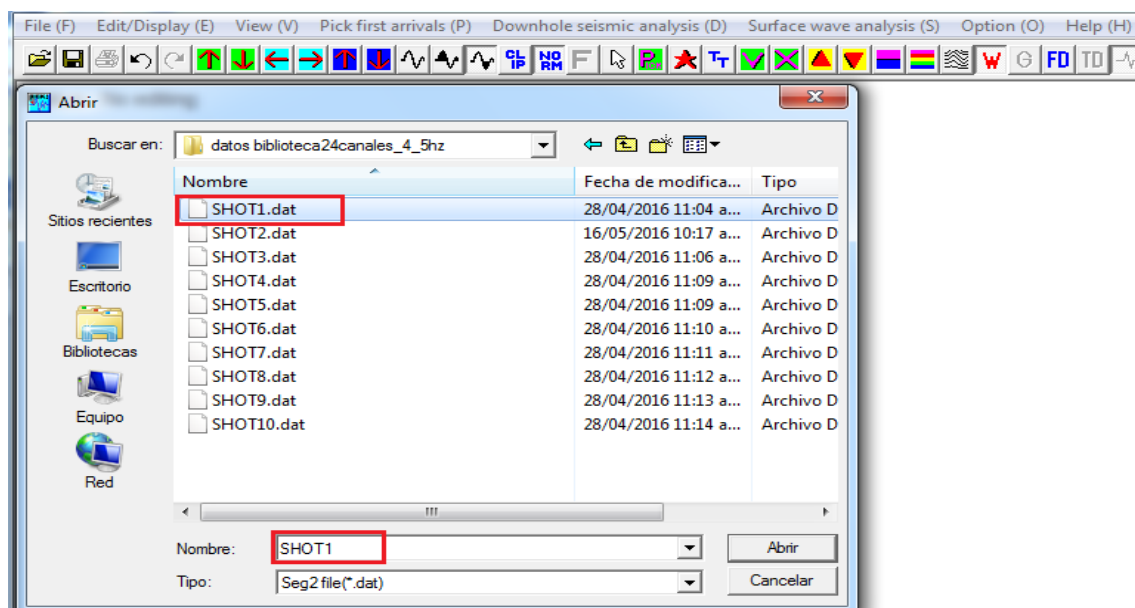


Figura 5.4: Datos en carpeta datos biblioteca24canales4.5hz.

Abrir Archivo de Datos

El programa nos muestra una imagen inicial del primer dato abierto, haciendo la claridad que es un dato crudo, en el cual vamos iniciar el procesamiento. Debemos tener en cuenta que si abrimos un dato inicialmente, y luego queremos abrir un dato nuevo, si haber cerrado el anterior, nos aparece una ventana que nos pregunta Abrir archivo de datos (Open data file), la cual le vamos a dar clic en ok, como lo podemos visualizar en la Figura 5.5.

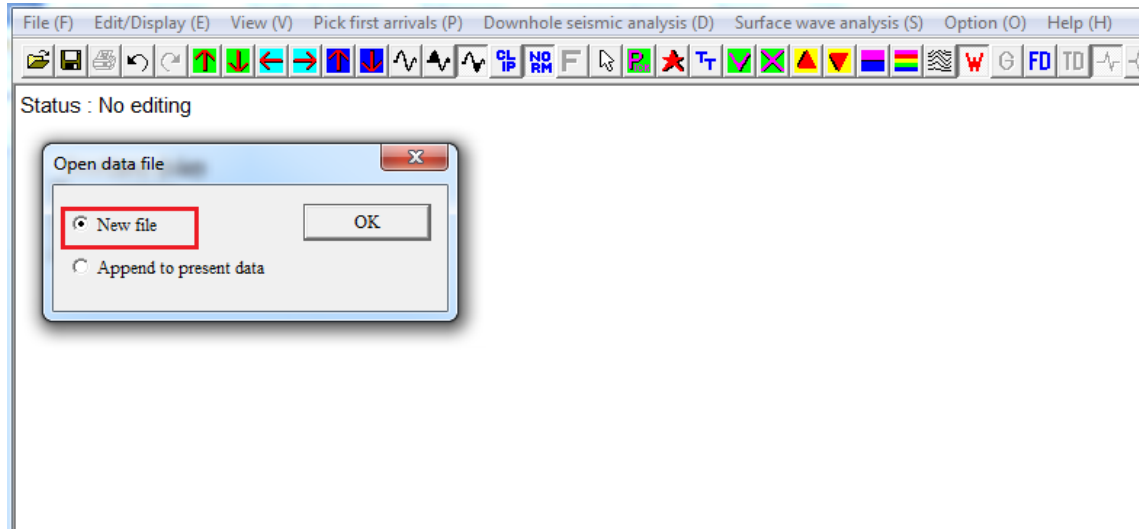


Figura 5.5: Abrir archivo de datos.

Dato sin Ediciones

Una vez abierto el dato, tendremos la vista de un dato sin ninguna modificación, que nos muestra el estado del dato, en este caso el estado del dato nos dice que el dato no ha sido editado (Status: no editing), como lo podemos visualizar en la Figura 5.6.

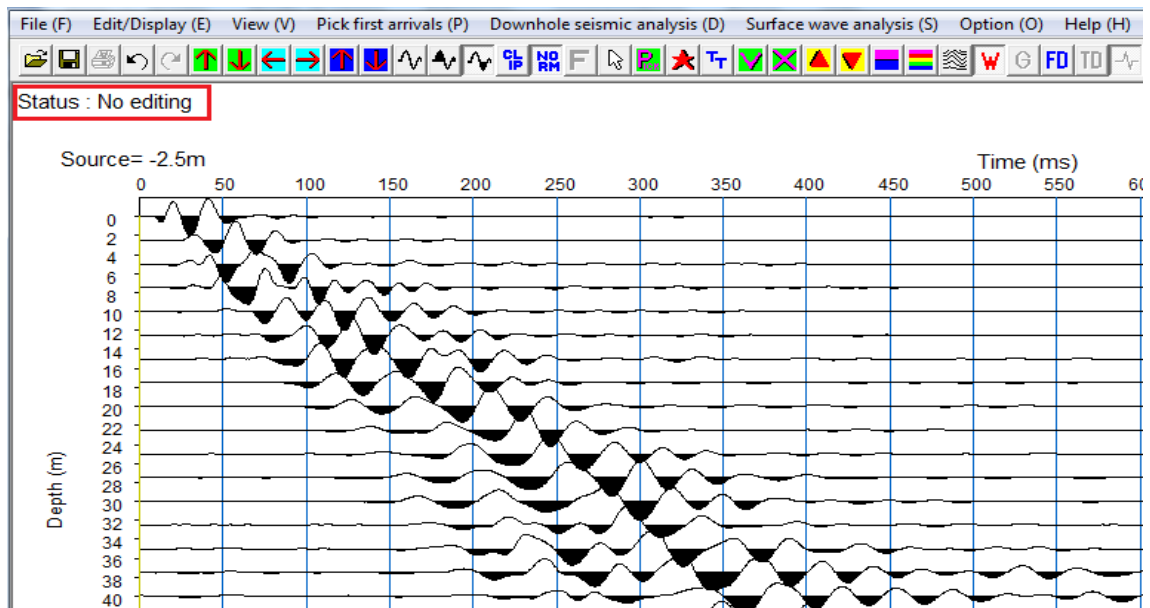


Figura 5.6: Dato sin ediciones.

Editar Visualización

Una vez abierto el dato debemos hacer las respectivas revisiones de la geometría, para tener la certeza de que el dato contiene la geometría especificada en el momento de la adquisición, en caso de tener errores debemos corregirlos, esto lo realizaremos, en editar visualización (E) (Edit/Display(E)), en el que haremos clic, como lo podemos visualizar en la Figura 5.7.

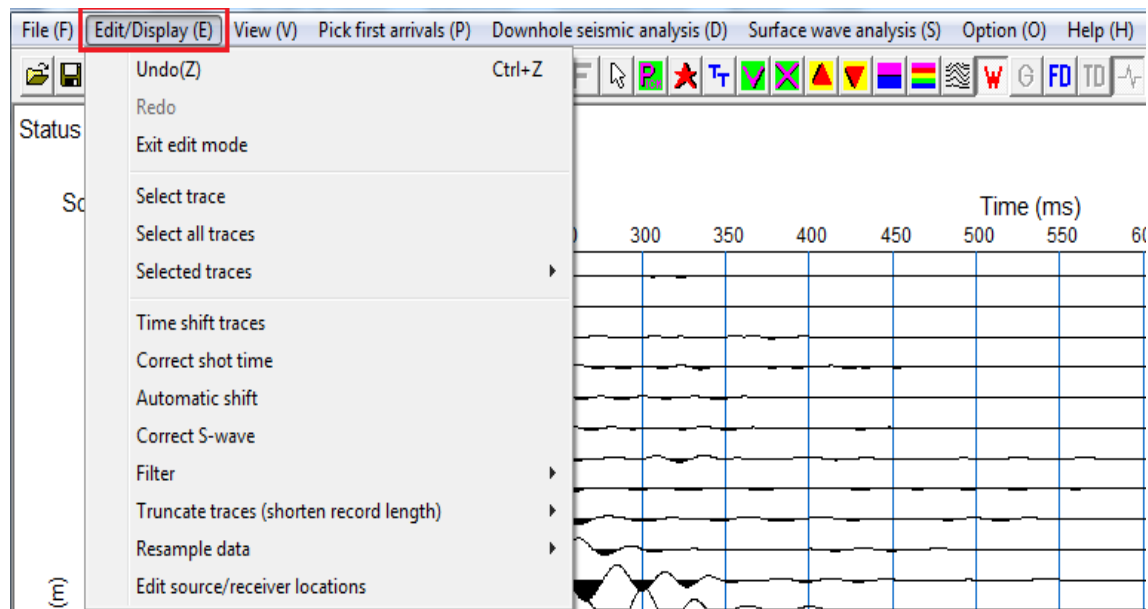


Figura 5.7: Editar visualización.

Editar Fuentes

Para realizar la edición de la geometría de este dato, iremos a Editar fuentes / ubicaciones del receptor (Edit source/ receiver location), en el que daremos clic, como nos como lo podemos visualizar en la Figura 5.8.

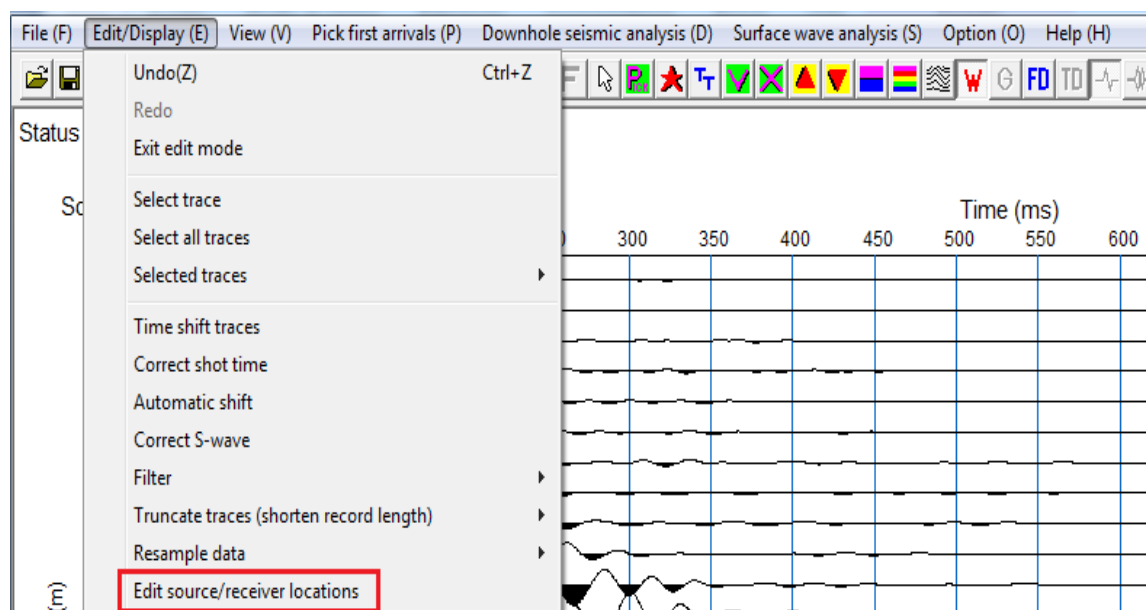


Figura 5.8: Editar fuentes / ubicaciones del receptor.

Geometría

Esto nos dará paso a una ventana que se llama Geometry(Geometría), en la que encontraremos, las diferentes opciones para corregir la geometría del dato, En este caso veremos que nuestra primera coordenada debe tiro (shot) debe estar en -2.5 m ya que es la inicial, que los intervalos sean de 2.5 m y que las unidades estén en metros, como lo podemos visualizar en la Figura 5.9. Nota: Siempre debemos revisar la geometría, para tener claridad de la misma en los datos.

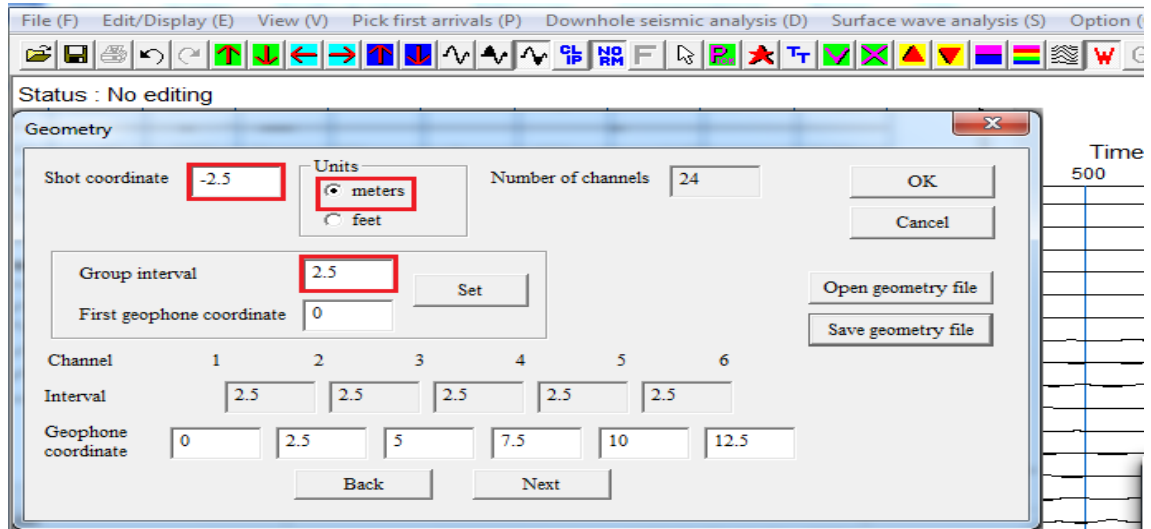


Figura 5.9: Geometría.

Dato con la Corrección de la Geometría

Seguido tendremos una vista del dato con las primeras modificaciones que realizamos, donde debemos visualizar, que las unidades estén en metros (m), la coordenada de tiro sea de -2.5 m, y la distribución sea de 2.5m, como lo podemos visualizar en la Figura, 5.10.

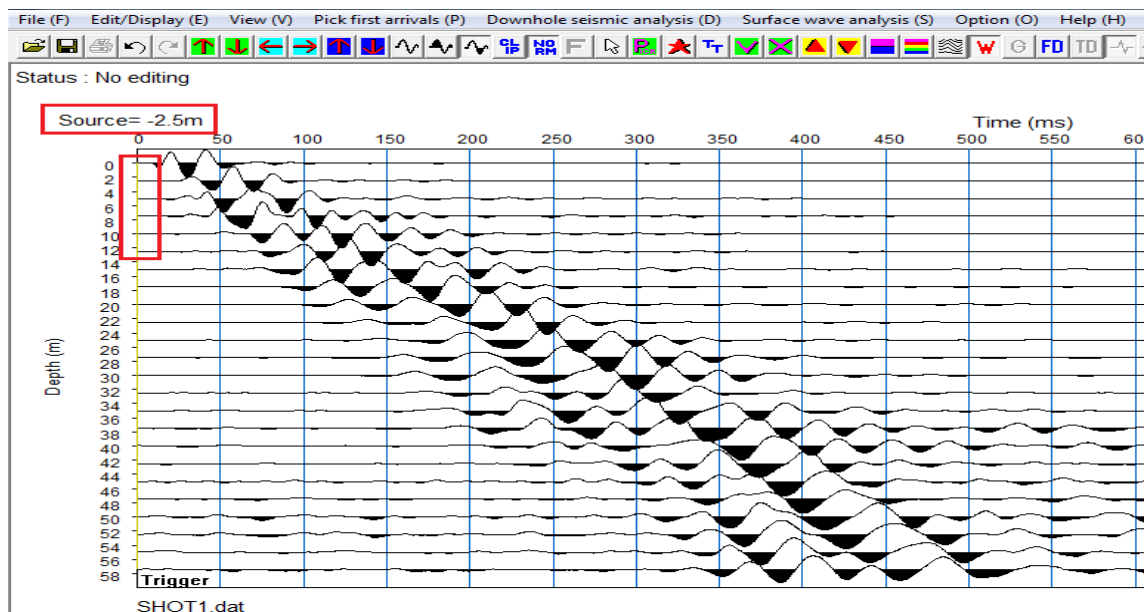


Figura 5.10: Dato con la corrección de la geometría.

Ver Vista del Dato

Seguido de corregir la geometría, podemos tener diferentes vistas del dato, como: la orientación del tiempo, el tiempo del dato, las unidades, entre otras que veremos a continuación, para esto iremos a ver, (view (v)), que nos permitirá modificar la vista del dato, en los aspectos antes nombrados, el donde le daremos clic, como lo podemos visualizar en la Figura 5.11.

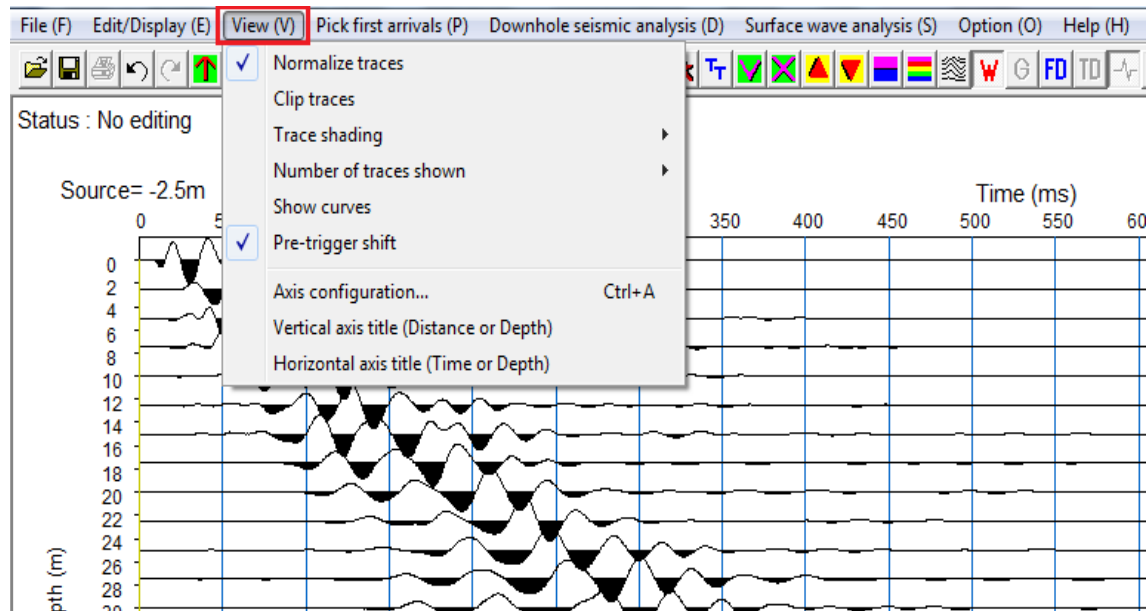


Figura 5.11: Ver vista del dato.

Configuración de Ejes

Seguido de dar clic en ver, iremos a Configuración de ejes (Axis configuration), en donde daremos clic, como lo podemos visualizar en la Figura 5.12.

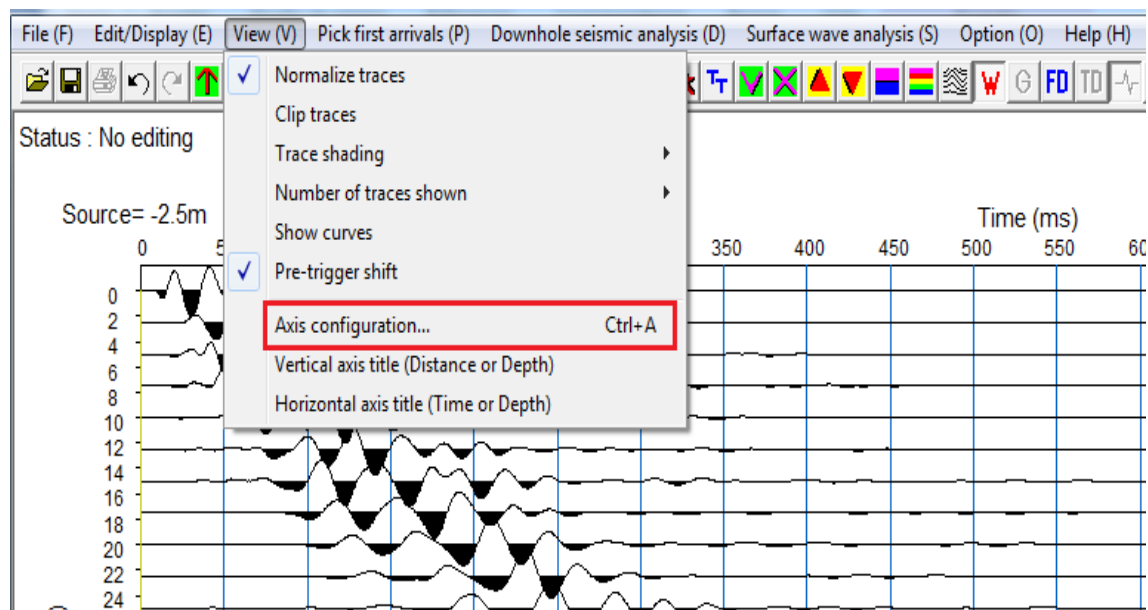


Figura 5.12: Configuración de ejes.

Configuración de Ejes

Esto nos dará paso a la ventana, configuración de ejes, (Axis configurations), donde realizaremos las respectivas modificaciones necesarias para tener una mejor vista del dato, además de verificar que las medidas sean las especificadas en el montaje que realizamos en nuestra recolección, en este caso veremos que la orientación del dato sea de forma horizontal, que el tiempo final del eje sea de 1000 msec, que la distancia de profundidad fina sea de 57.5 m y que los intervalos sean de 2.5m, como lo podemos visualizar en la Figura 5.13.

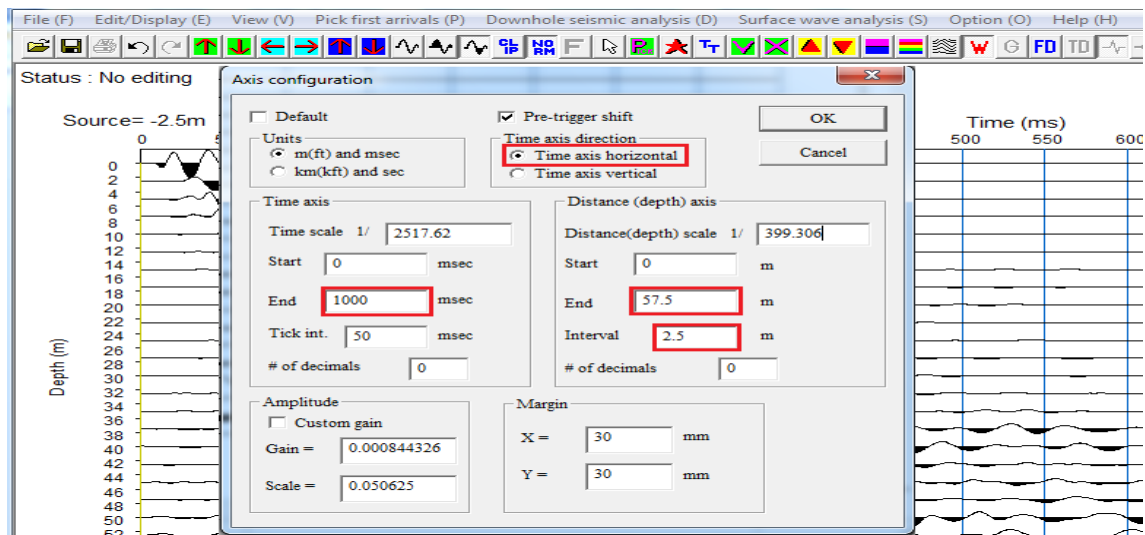


Figura 5.13: Configuración de ejes.

Modificaciones de la Vista del Dato

Seguido tendremos una vista del dato con las modificaciones que realizamos, y verificamos que sean las adecuadas, que las unidades estén en metros (m), la profundidad de 57.5 m, el tiempo final del eje sea de 1000 m, y la distribución sea de 2.5m, como lo podemos visualizar en la Figura 5.14.

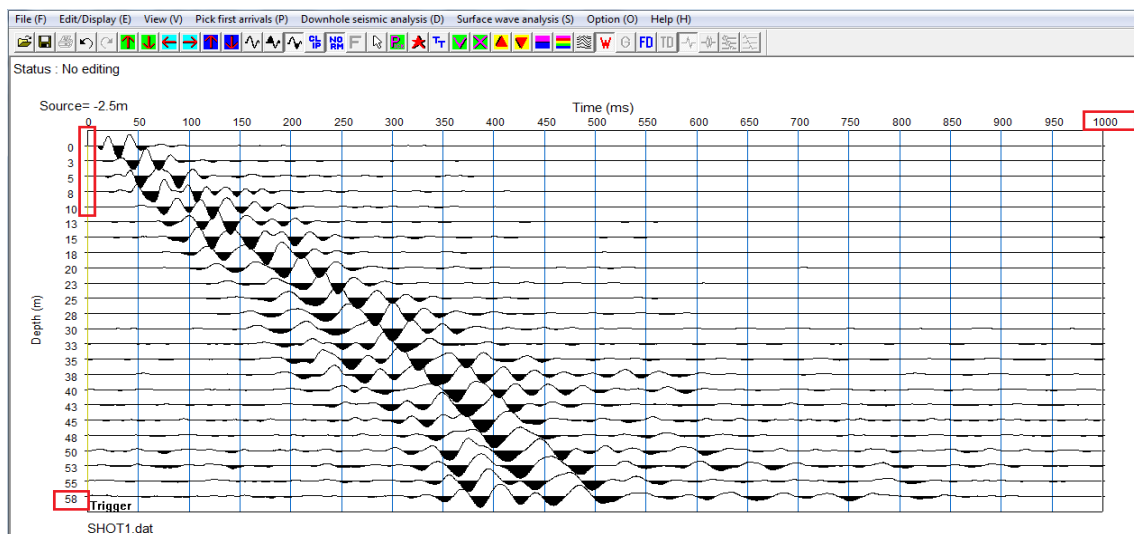


Figura 5.14: Modificaciones de la vista del dato.

Guardar Datos Editados

Lo ideal es realizar las modificaciones y correcciones a todo el conjunto de datos que tenemos en la carpeta que guardamos los datos adquiridos. En este caso realizamos 10 Disparos (10 shots), entonces debemos realizar las respectivas correcciones a los 10 datos obtenidos, ya que debe coincidir, la geometría, las unidades de medida, la distribución, los intervalos, y posteriormente guardarlos, nuevamente en archivo (F), (File(F)) como lo podemos visualizar en la Figura 5.15.

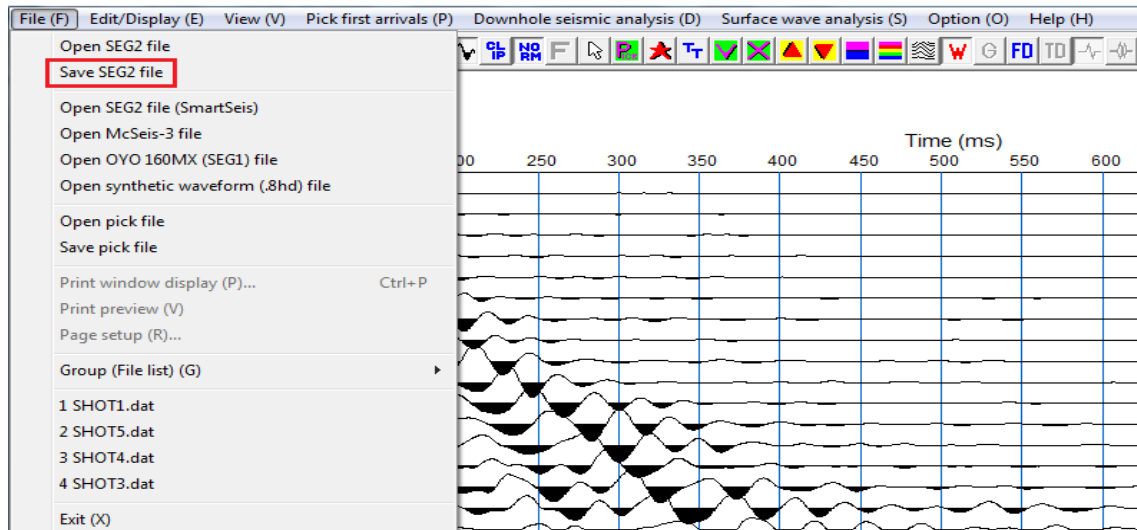


Figura 5.15: Guardar datos editados.

Guardar Archivo SEG2

En el momento de realizar la modificación y edición de cada uno de los datos, procederemos a realizar el proceso de guardado, que debe realizarse de forma inmediata, uno por uno, y esto lo realizaremos en File (F), donde iremos a Guardar Archivo SEG2 (Save SEG2 file), en donde daremos clic, como lo podemos visualizar en la Figura 5.16.

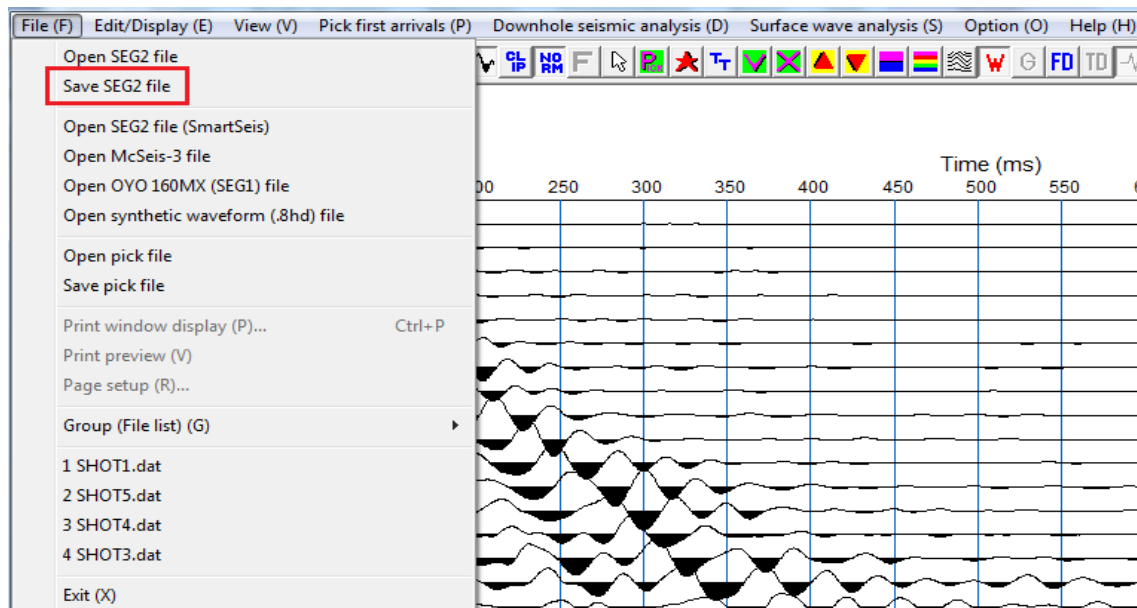


Figura 5.16: Guardar archivo SEG2.

Carpeta de Datos Guardados

Una vez empezamos a guardar los datos corregidos debemos realizar el proceso de guardado de todos los datos en una misma carpeta, para que de la misma forma tenerlos todos juntos, para el debido procesamiento, para esto, crearemos una carpeta nueva, en la que guardaremos los 10 datos ya corregidos, en este caso, crearemos una carpeta que llamaremos, Datos Editados, como lo podemos visualizar en la Figura 5.17.

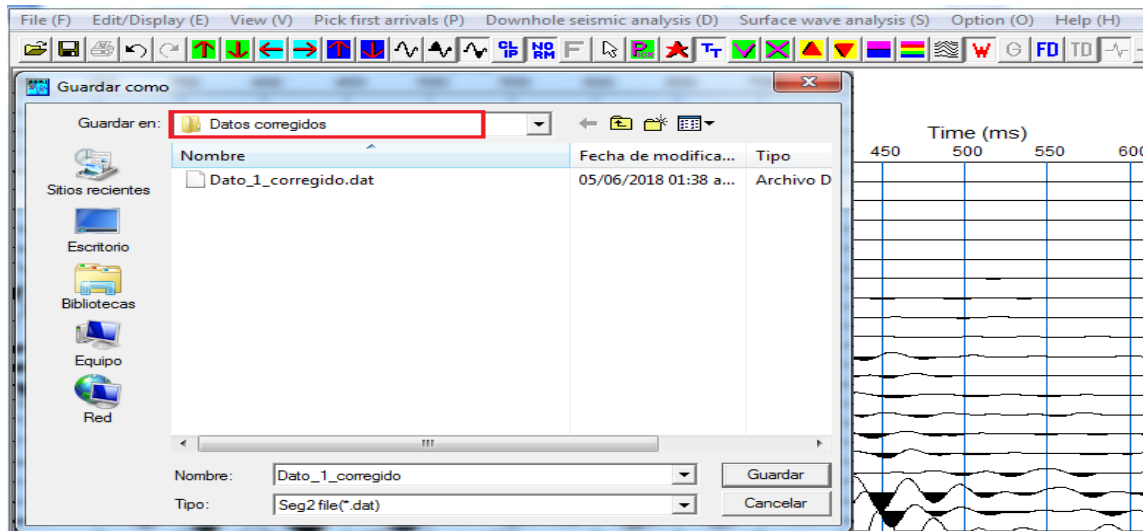


Figura 5.17: Carpeta de datos guardados.

Sobre Escribir Datos

Una vez hecho clic en guardar, nos aparecerá una ventana que nos preguntará, ¿Estás seguro que quieres sobre escribir? (Are you sure you want to over write), en donde daremos clic en aceptar, para guardar los datos los datos ya corregidos, como lo podemos visualizar en la Figura 5.18.

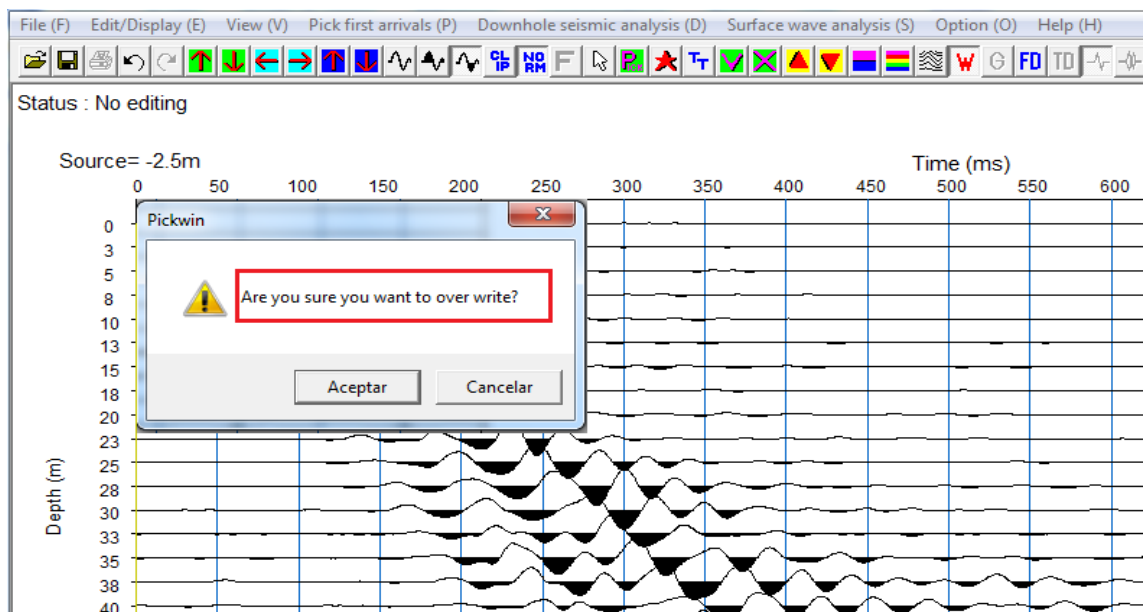


Figura 5.18: ¿Estás seguro que quieres sobre escribir?

Datos Guardados

De la misma forma realizamos el proceso de guardado para los 5 datos corregidos en la carpeta datos editados, como lo podemos visualizar en la Figura 5.19.

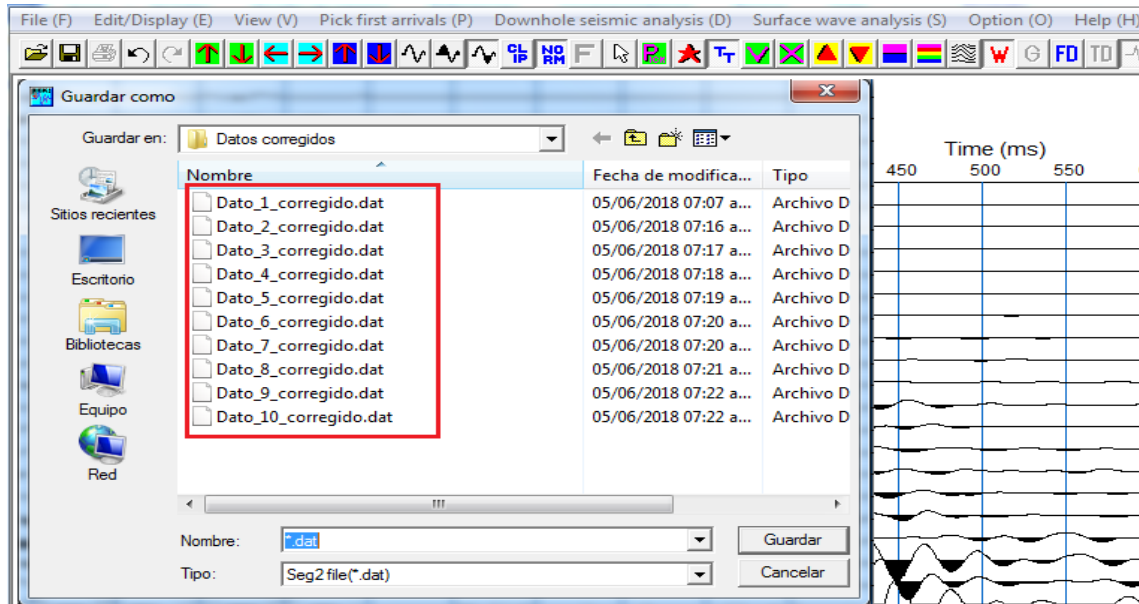


Figura 5.19: Datos guardados.

Abrir Datos para Picar

Seguido de tener los datos, con sus respectivas modificaciones, y debidamente guardados en una misma carpeta, procederemos a abrir uno a uno, para realizar el procesamiento, iniciando con el proceso de picado, como lo podemos visualizar la apertura en la Figura 5.20.

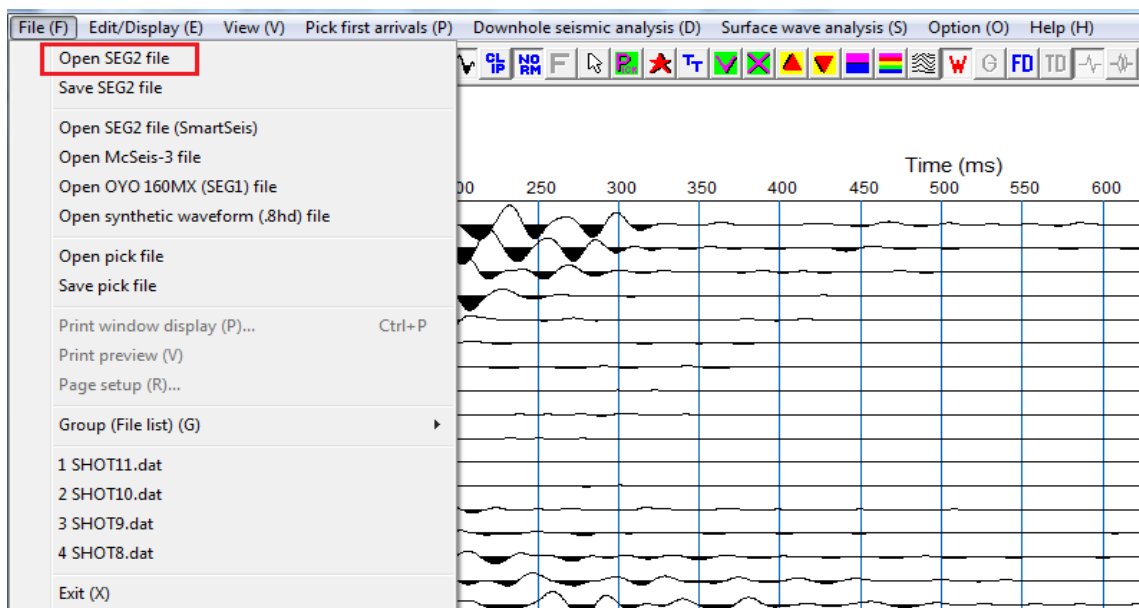


Figura 5.20: Abrir datos para picar.

Abrir Archivo de Datos

Los datos que procedemos a abrir, serán los mismos que guardamos en la carpeta que creamos anteriormente. Una vez modificados y corregidos, ya que esto nos garantiza que son los datos con las modificaciones necesarias, para la ejecución de un procesamiento con éxito como lo podemos ver en la Figura 5.21.

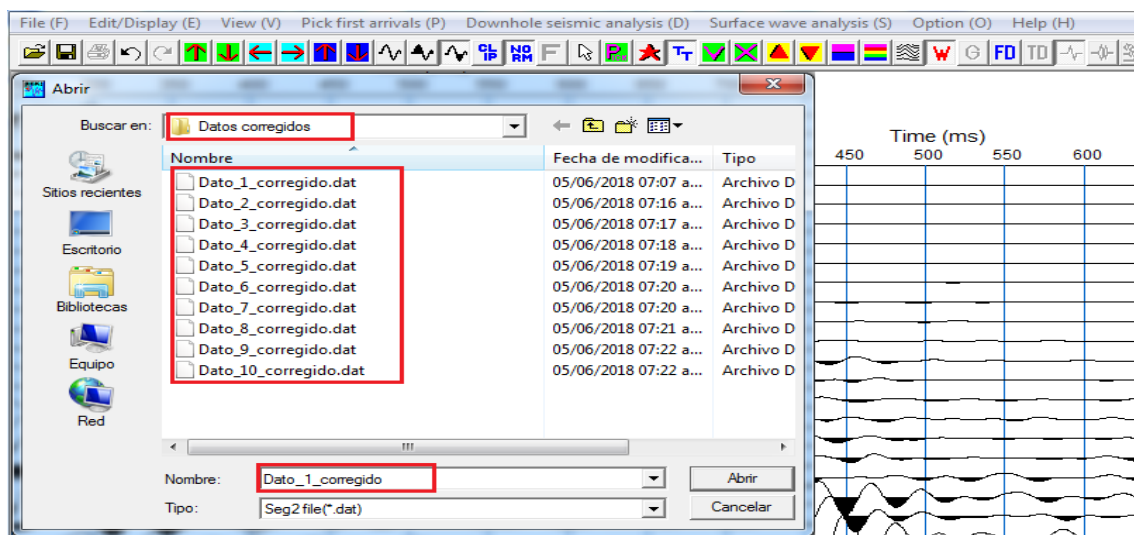


Figura 5.21: Abrir datos editados.

Abrir Archivo de Datos

Una vez corregido nuestros datos y guardados en una carpeta procedemos a realizar la apertura uno a uno para realizar el procesamiento, dando inicio con los respectivos picados. Entonces Procedemos a abrir nuestro primer dato, para realizar el picado, Como lo podemos verificar en la Figura 5.22.

Nota: Debemos verificar que cuente con las modificaciones, que realizamos anteriormente.

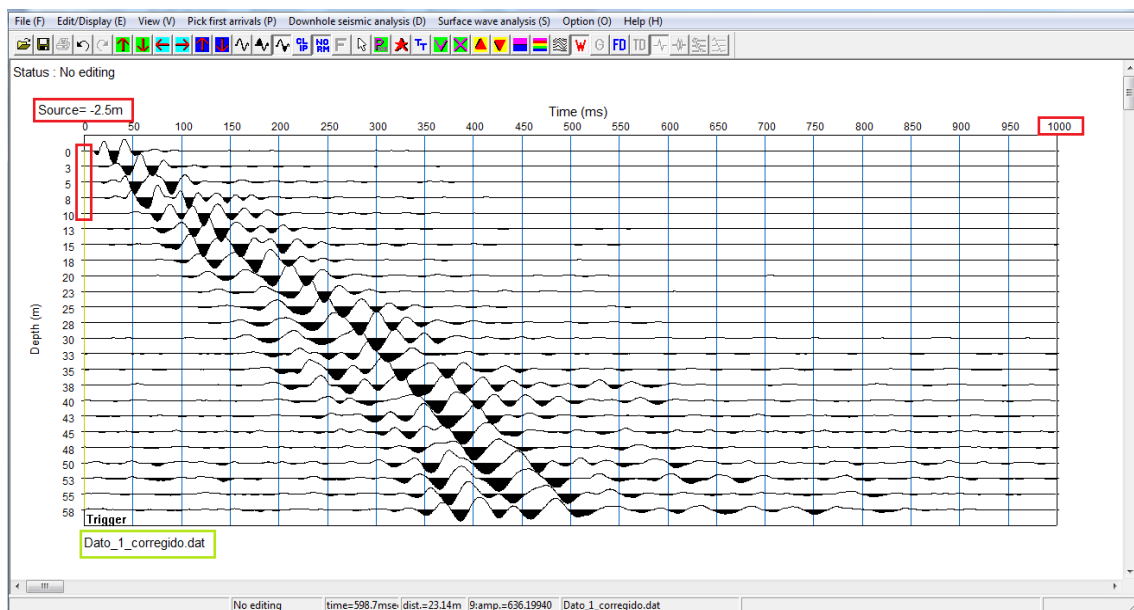


Figura 5.22: Dato modificado y corregido, para inicio de procesamiento.

5.1.3 Editar Vistas

Editar Visualización

Una vez abierto nuestro primer dato, lo revisaremos, para verificar que las características del mismo, sean de un buen dato, donde podamos realizar nuestro picado. Una de características más importantes del dato, es ver que todos los geófonos registraron de forma correcta tiempos de arribo. Para seguir con el procesamiento. En caso de tener un mal registro en uno de los geófonos, debemos ir a editar visualización (Edit/Display(E)), como lo podemos visualizar en la Figura 5.23.

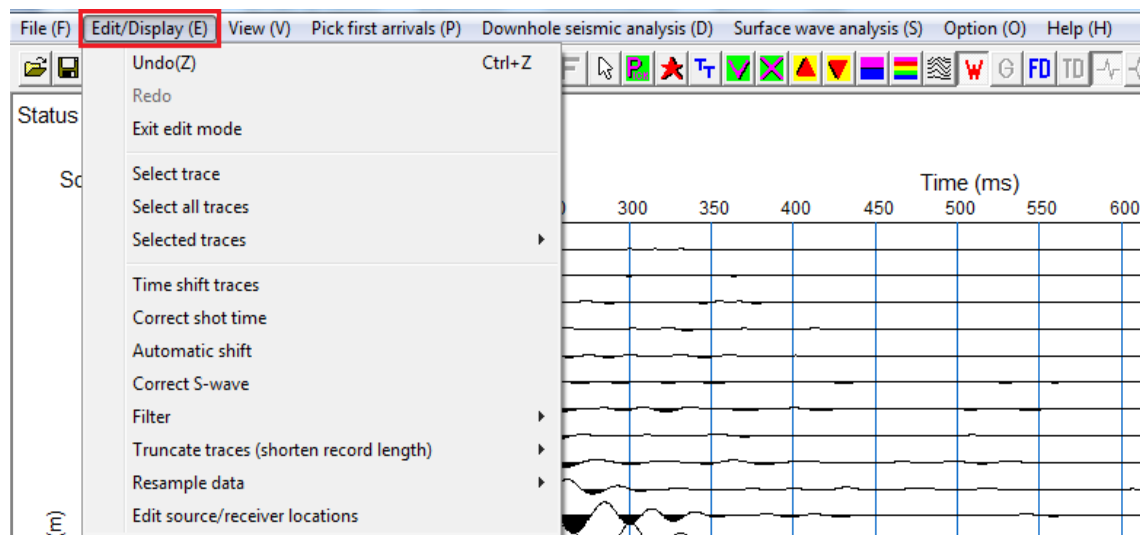


Figura 5.23: Editar visualización.

Seleccionar Trazo

Seguido seleccionaremos con clic, seleccionar traza (select trace), como lo podemos visualizar en la Figura 5.24.

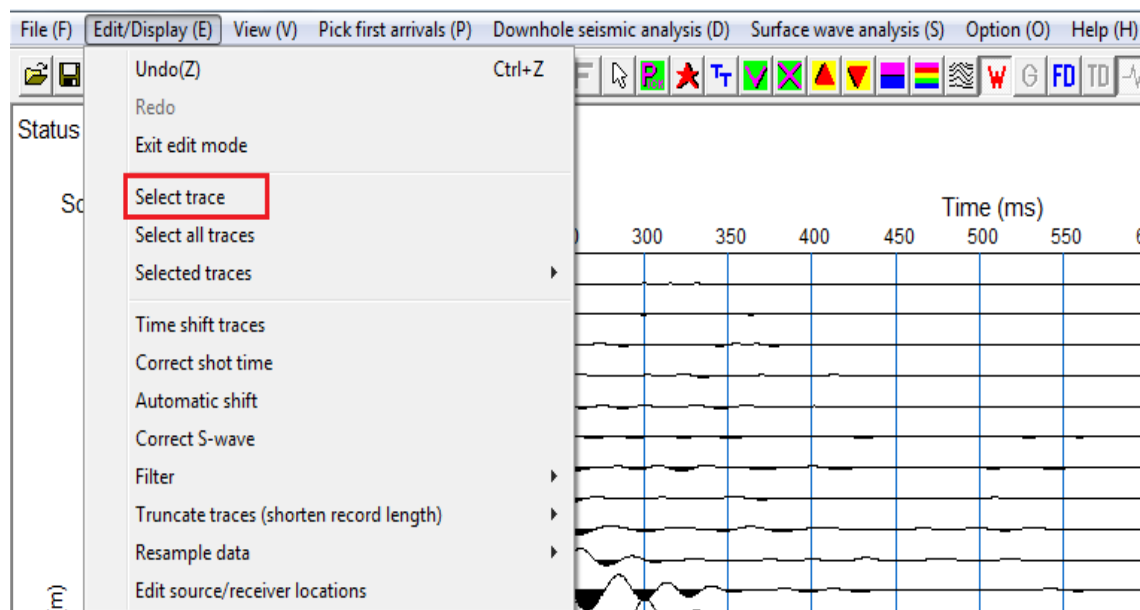


Figura 5.24: Seleccionar traza.

Seleccionar Trazas

En este caso vamos a realizar un ejemplo y vamos a seleccionar dos trazas, asumiendo que no tuvieron un buen registro de los geófonos 8 y 13, que están ubicados en las medidas, 40 y 28, para tener una visión más clara de este procedimiento, como lo podemos visualizar en la Figura 5.25.

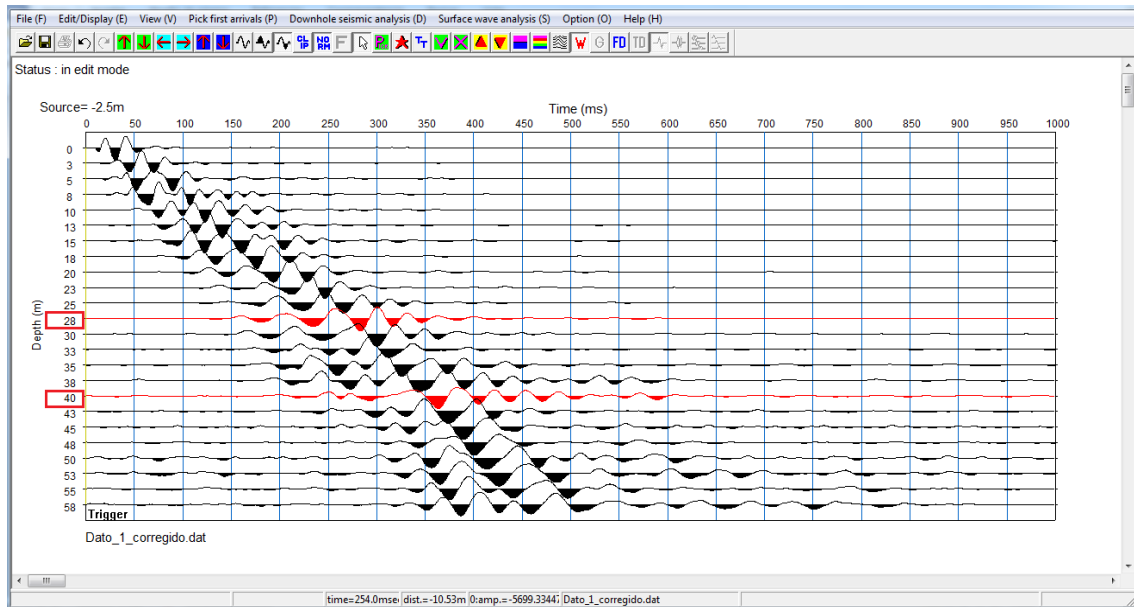


Figura 5.25: Seleccionar trazas.

Seleccionar traza

Seguido de seleccionar las trazas, y ver que ahora son de color rojo, iremos nuevamente a editar visualización (Edit/Display(E)), y damos clic en seleccionar traza (selected traced), como lo podemos visualizar en la Figura 5.26.

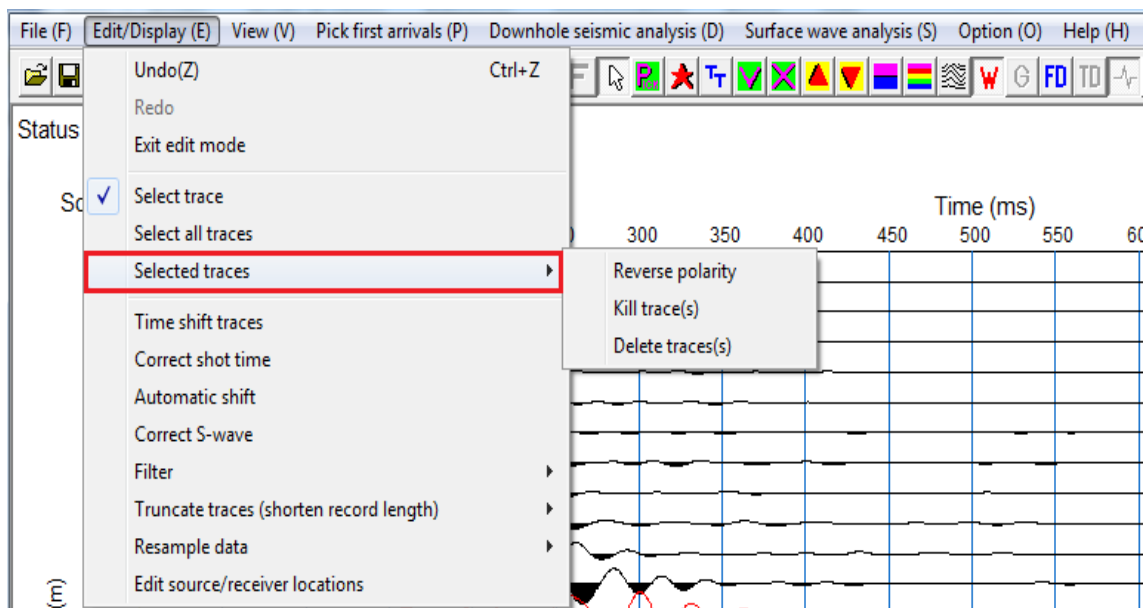


Figura 5.26: Seleccionar traza.

Eliminar Trazas

Seguido le daremos clic en la opción matar rastro (kill trace(s)), el cual nos eliminara el registro que teníamos en estas trazas, como lo podemos visualizar en la Figura 5.27. Nota: También podemos corregir algunos detalles de Eliminar Trazas, con: Ctrl H, que será una herramienta que usaremos.

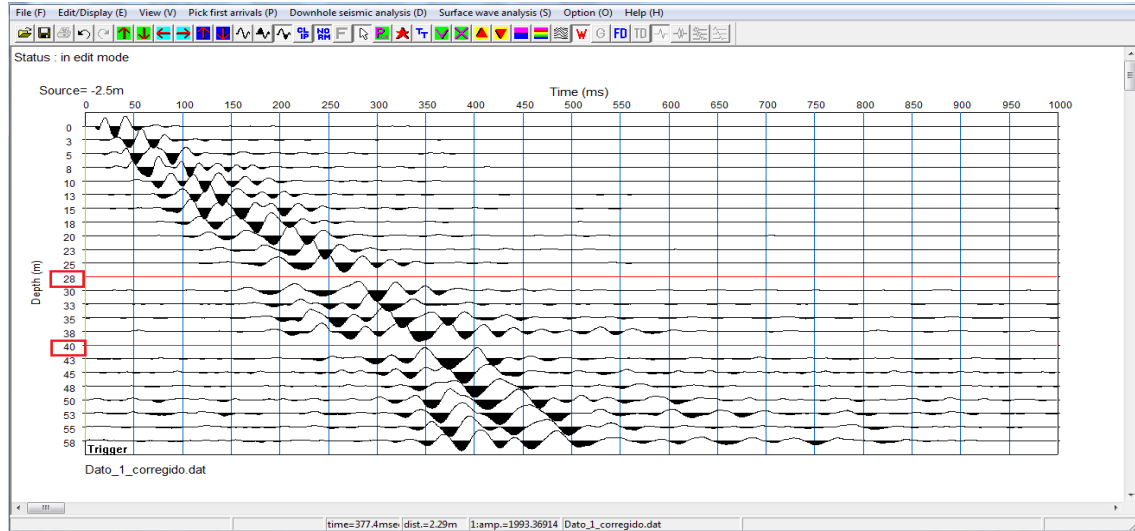


Figura 5.27: Eliminar Trazas.

Picado automatico

Seguido de haber abierto nuestro primer dato, y realizar el ejemplo de eliminar traza, revertiremos el mismo, ya que contamos con un buen dato, con buenos registros en cada uno de los geófonos, y proseguimos a realizar el picado, inicialmente realizaremos un picado automático, el cual se visibiliza con segmentos de líneas rojas, como lo podemos visualizar en la Figura 5.28.

Nota: En la figura, podemos observar que el picado automático, no tiene una secuencia lineal, si no que contiene varios saltos entre los registros de los tiempos.

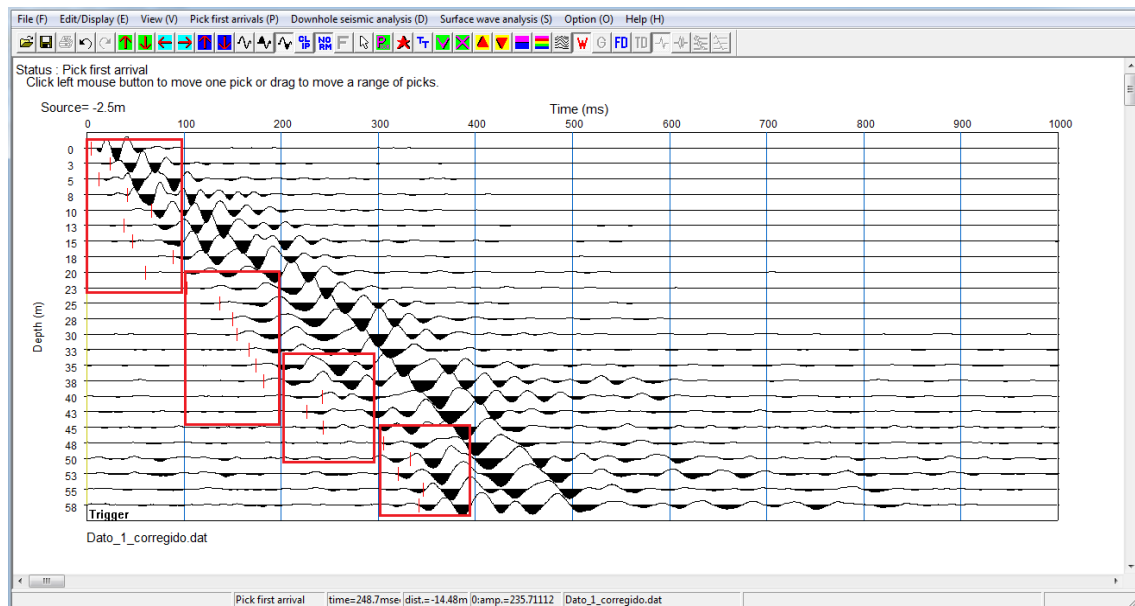


Figura 5.28: Picado automatico.

Mejorar Picado

Una vez realizado el picado automático, nuestro dato cambia el estado de Sin editar, (no editing) a Recoger la primera llegada, haga clic en el botón izquierdo del mouse para mover una selección o arrastre para mover un rango de selecciones, (pick first arrival, click left mouse button to move one pick or drag to move a range of picks), que nos expone como mejorar nuestro picado, como lo podemos visualizar en la Figura 5.29.

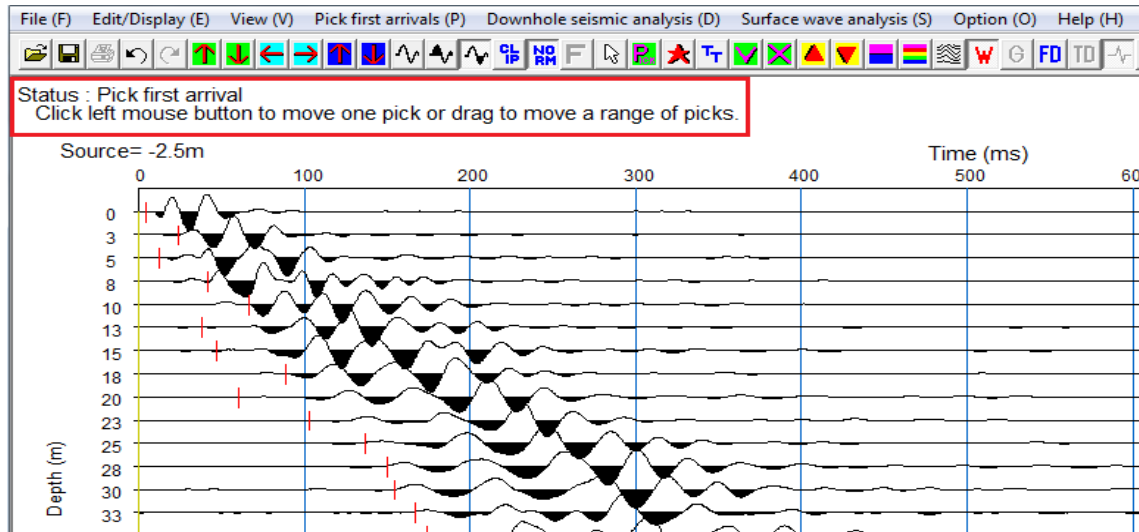


Figura 5.29: Mejorar picado.

Mejoramiento de Picado

Para mejorar el picado, lo realizamos, como no lo expone el anuncio de nuestro dato, con clic sostenido y arrastrando, teniendo en cuenta de realizarlo en conjunto de tres o cuatro líneas y pasando por los primeros arriros, para que sea continúa la dirección de nuestro picado y mejoramos nuestro picado, como lo podemos visualizar en la Figura 5.30.

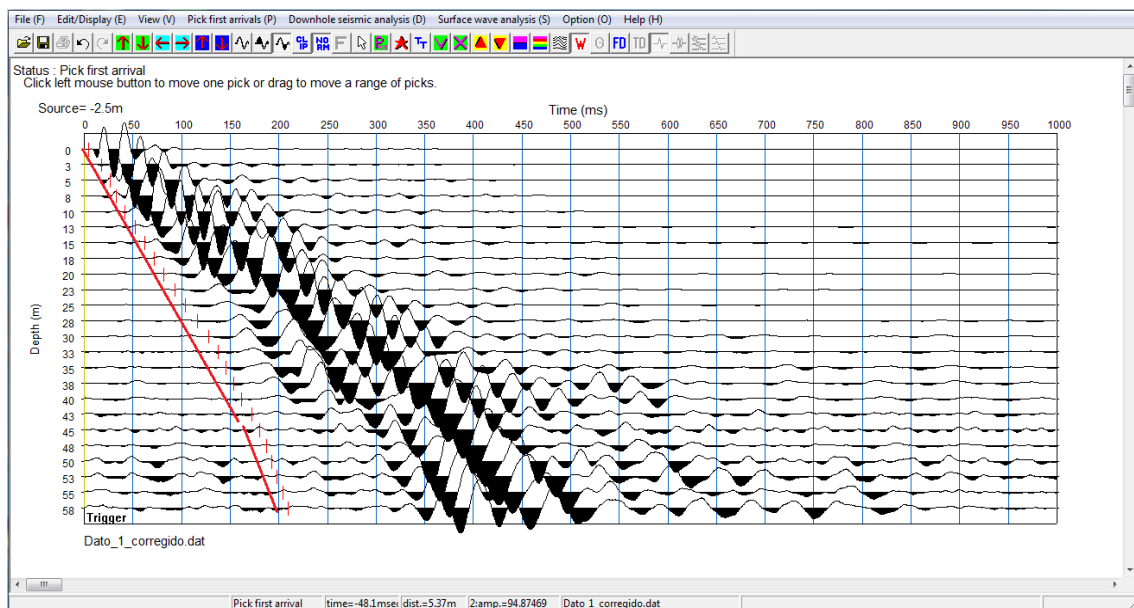


Figura 5.30: Mejoramiento picado.

Demarcación del Picado

Seguido de haber mejorado nuestro picado, con el clic sostenido y arrastrando debemos dar una demarcación de la dirección, por donde pasa nuestro picado, y esto lo realizaremos con el botón que está en la parte superior central que tiene forma de una estrella de 5 picos, como lo podemos visualizar en la Figura 5.31.

Nota: En la figura podemos observar, una flecha indicando la estrella de 5 picos, además, podemos observar una línea continua color violeta, que une el picado.

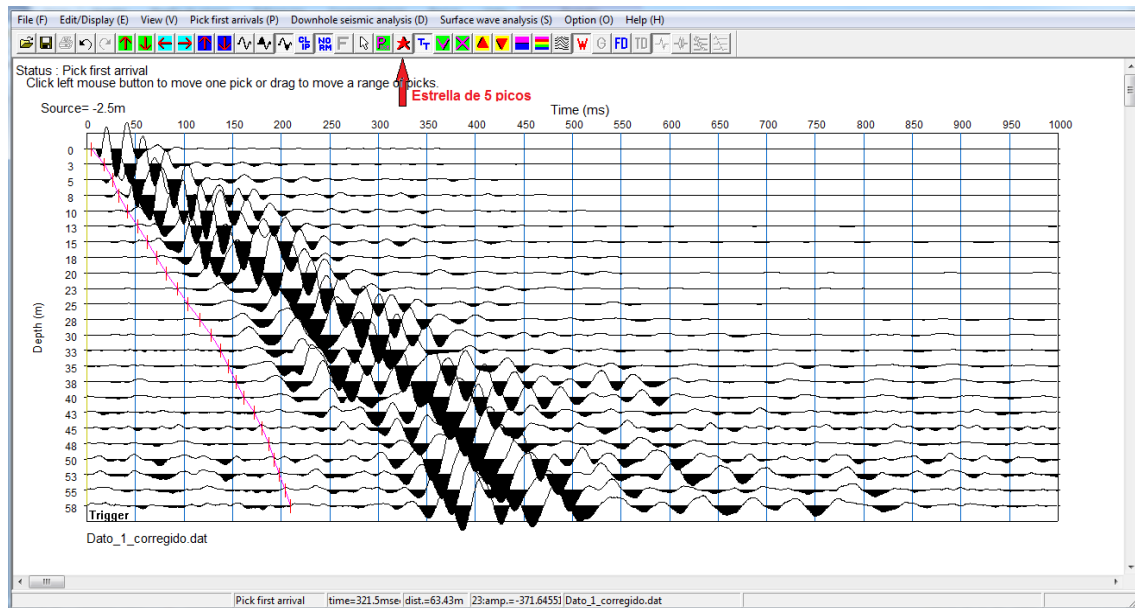


Figura 5.31: Demarcación del picado.

Guardar Archivos de Picado

Seguido de demarcar la dirección del picado y tener una línea continua por donde pasa el picado realizado, procedemos a guardarlo, en (Archivo (F), File (F), en la opción, guardar archivos de picado, Save pick file, lo podemos visualizar en la Figura 5.32

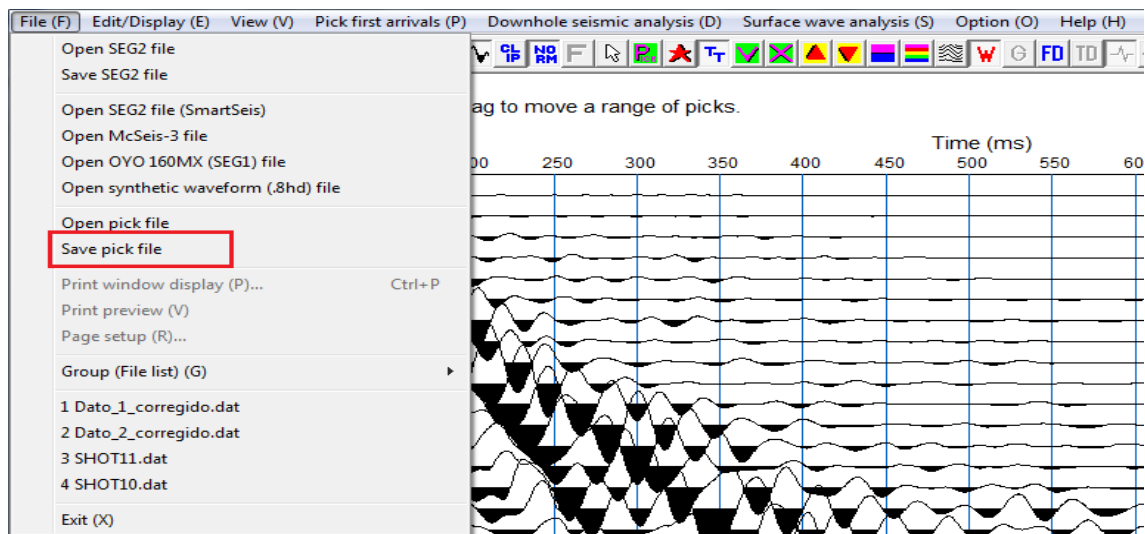


Figura 5.32: Guardar archivos de picado.

Guardar Archivos de Picado

Seguido de esto el programa automáticamente, nos enviara a la carpeta donde tenemos nuestros datos guardados, pero como no tenemos ningún picado guardado, no nos mostrara nada en la carpeta, en este caso guardaremos el picado, como Picado 1, y le daremos guardar como lo podemos visualizar en la Figura 5.33.

Nota: en el momento de guardar el picado, debemos colocar un nombre que tenga alguna coincidencia, con los datos anteriormente guardados, o no nos permitirá guardarlo.

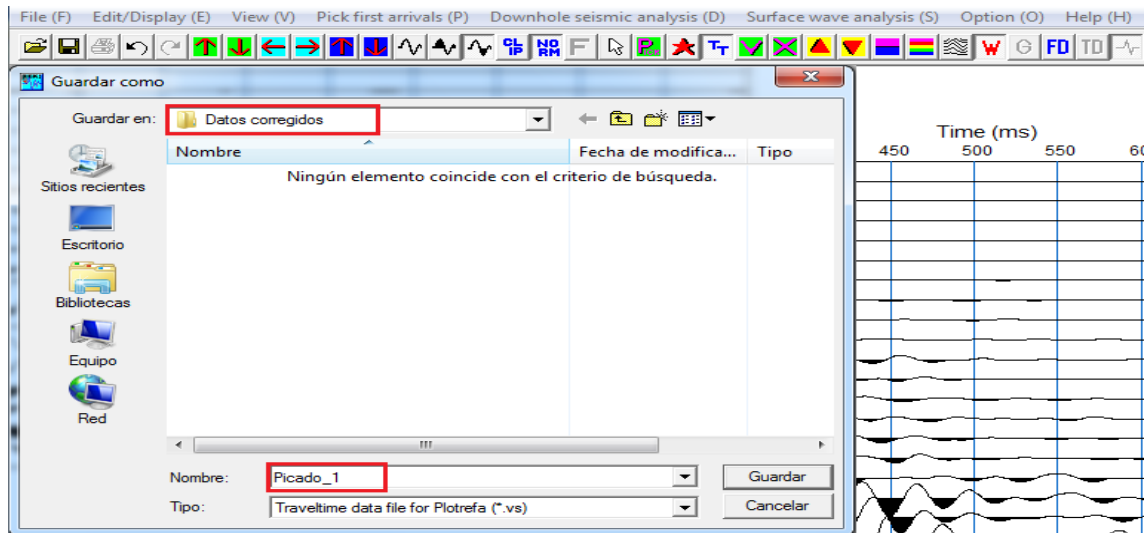


Figura 5.33: Guardar archivos de picado.

Tiempo de Viaje de Plotrefa se ha Guardado

Seguido de nos enviara a la ventana principal, donde nos mostrara una ventana que nos pregunta, El archivo de datos de tiempo de viaje de plotrefa se ha guardado (Traveltime data file for plotrefa has been saved) en el cual debemos dar clic en aceptar, como lo podemos visualizar en la Figura 5.34.

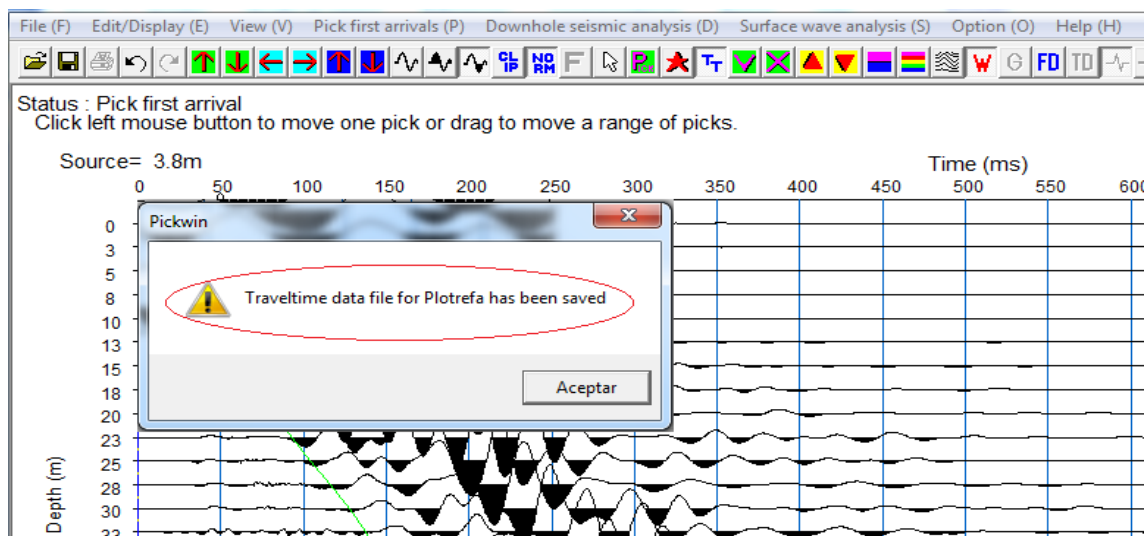


Figura 5.34: Tiempo de viaje de plotrefa se ha guardado.

Abrir los Datos Restantes

Una vez guardado el primer picado, proseguimos a abrir todos los datos restantes uno por uno, realizando los picados y guardando, hasta realizar todos los picados, como lo podemos visualizar en la Figura 5.35.

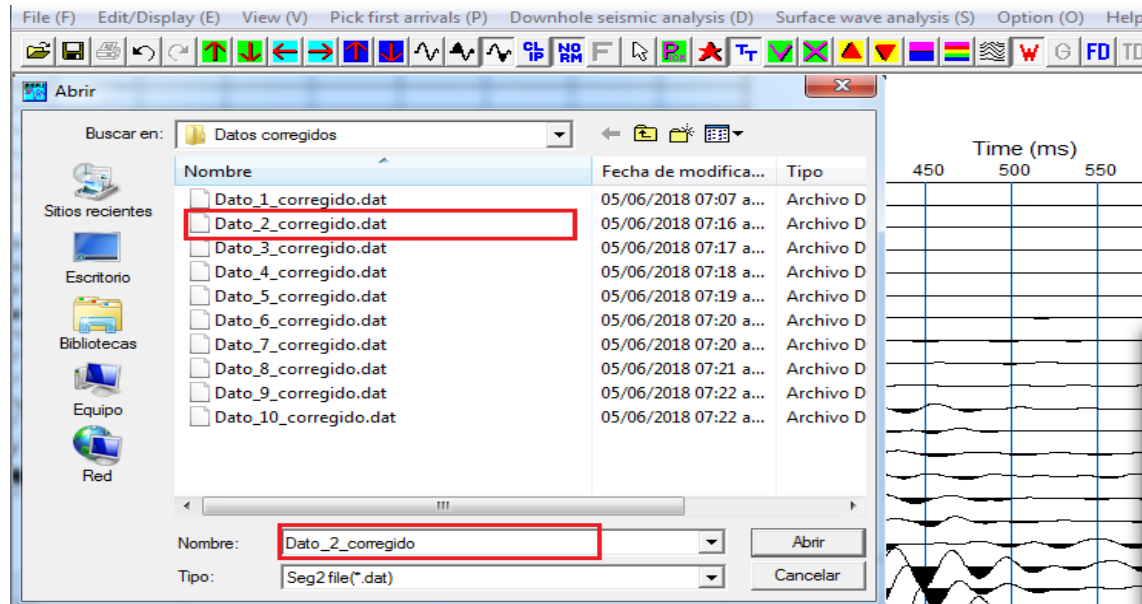


Figura 5.35: Abrir los datos.

Nuevo Archivo

Seguido de darle la opción de abrir al siguiente dato, el programa nos muestra una vista del dato anterior con su respectivo picado, y nos despliega una ventana que nos pregunta, Abrir archivo de datos (Open data file), y seleccionamos Nuevo archivo, (New file) y damos clic en ok, como lo podemos visualizar en la Figura 5.36.

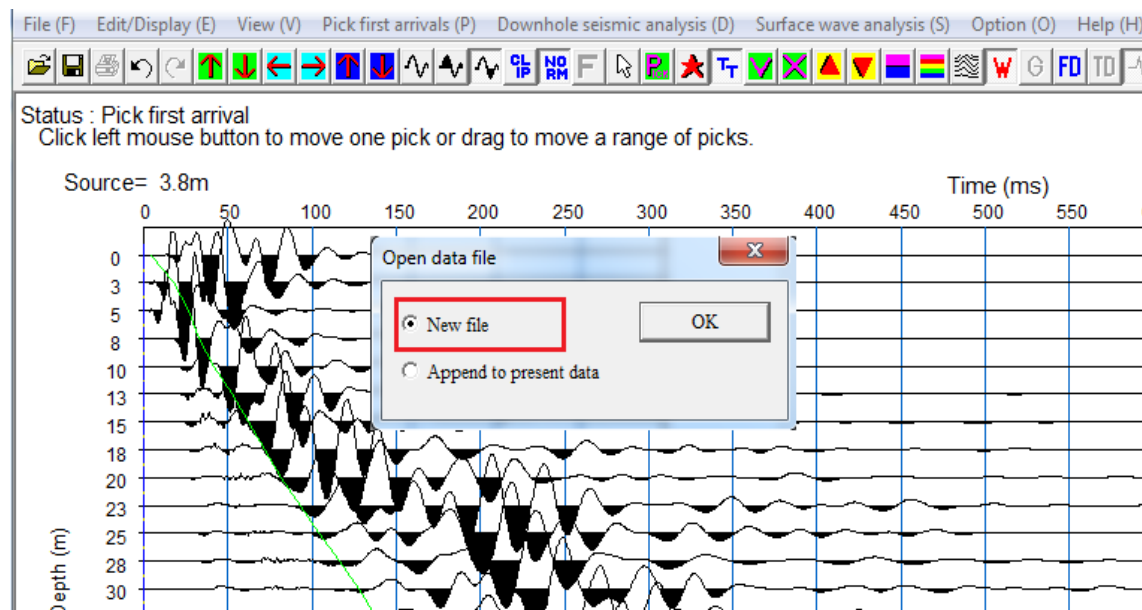


Figura 5.36: Nuevo archivo.

Realizar un Picado Conjunto

Una vez abierto el segundo dato, tenemos una vista del nuevo dato, pero con el anterior picado que se realizó, resaltado en color verde, que nos indica que vamos a realizar un picado conjunto, como lo podemos visualizar en la Figura 5.37.

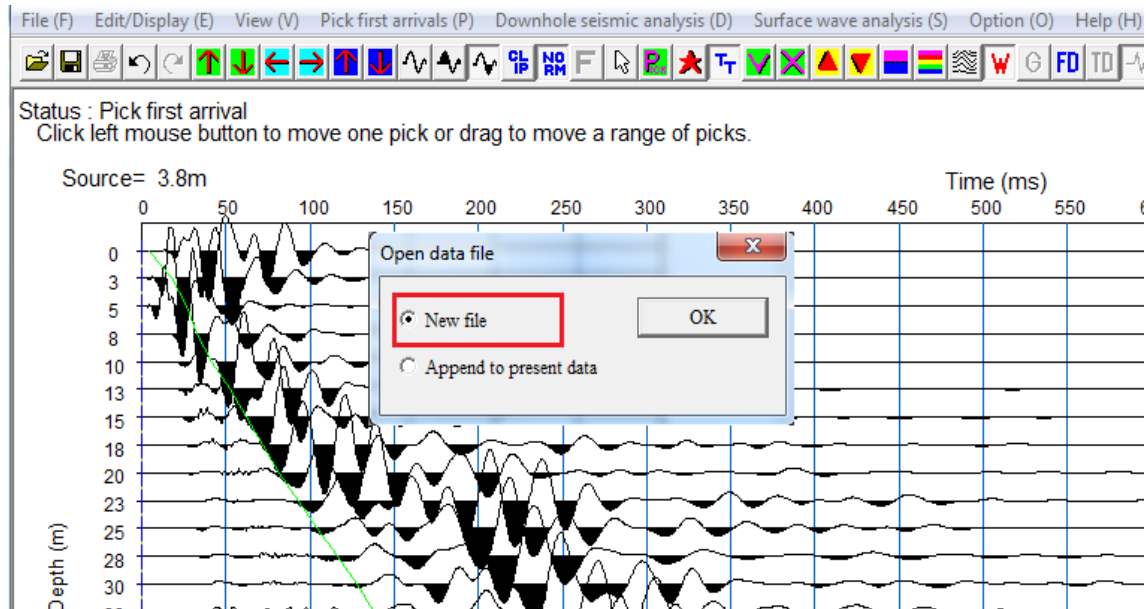


Figura 5.37: Realizar un picado conjunto.

Segundo Picado Automatico

Seguido de esto realizaremos nuevamente el picado automático, que de nuevo nos dará un indicio de la dirección del segundo picado, como lo podemos visualizar en la Figura 5.38.

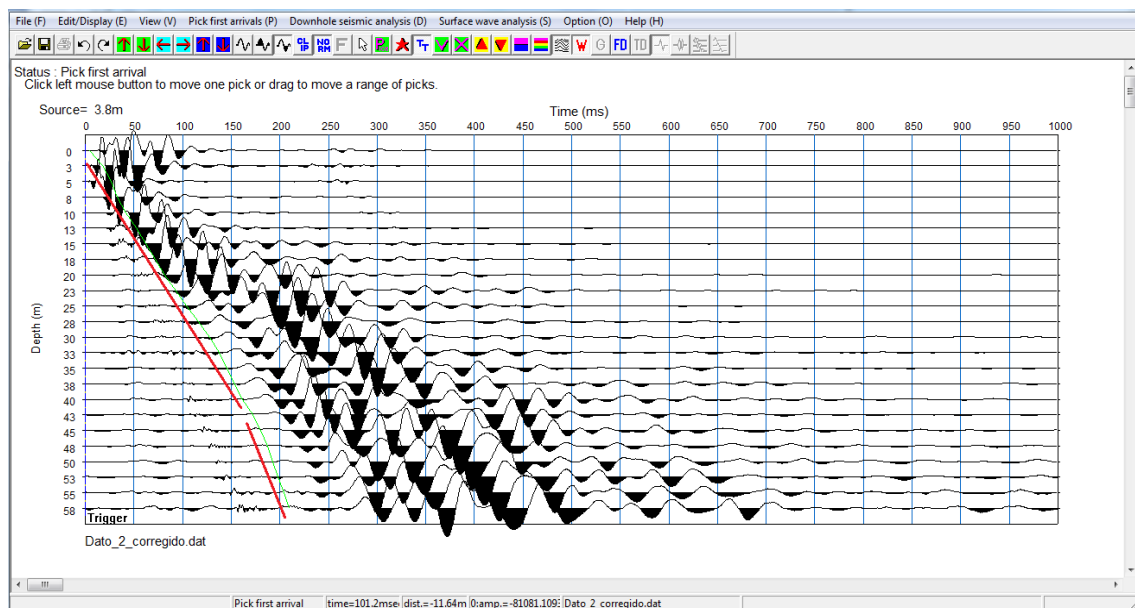


Figura 5.38: Segundo picado automatico.

Picados Mejoramos

Seguido, corregiremos la dirección del picado como no lo expone el anuncio de nuestro dato, con clic sostenido y arrastrando, teniendo en cuenta los primeros arribos y mejoramos nuestro picado, como lo podemos visualizar en la Figura 5.39.

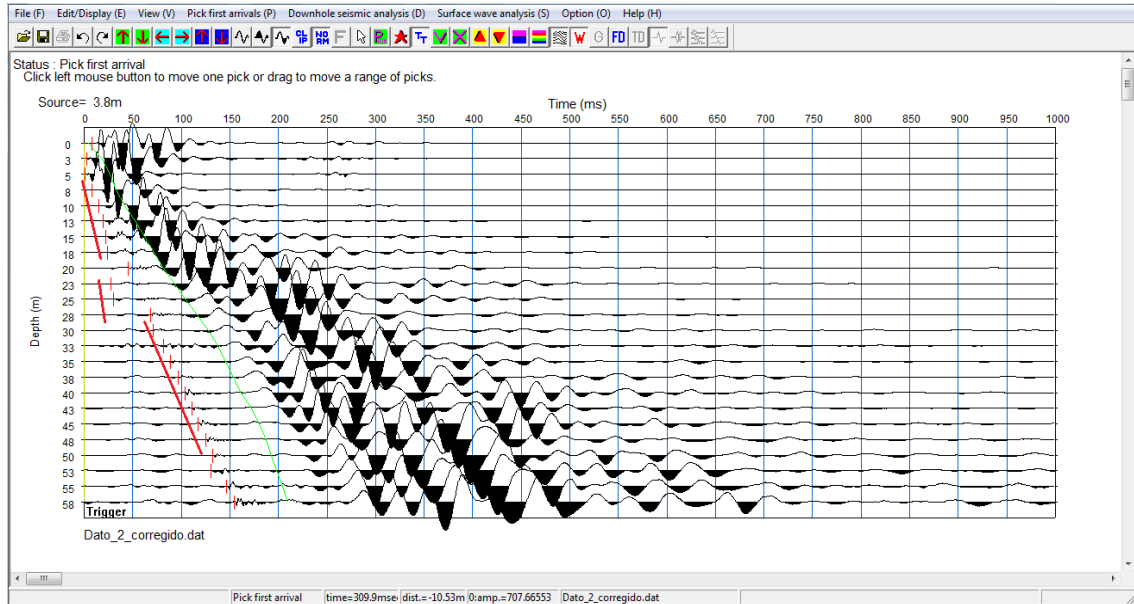


Figura 5.39: Picados Mejoramos.

Demarcación, del Picado

Seguido de haber mejorado el picado, con el clic sostenido y arrastrando debemos dar nuevamente una demarcación, por donde pasa nuestro picado, y esto lo realizaremos con el botón que está en la parte superior central que tiene forma de una estrella de 5 picos, como lo podemos visualizar en la Figura 5.40.

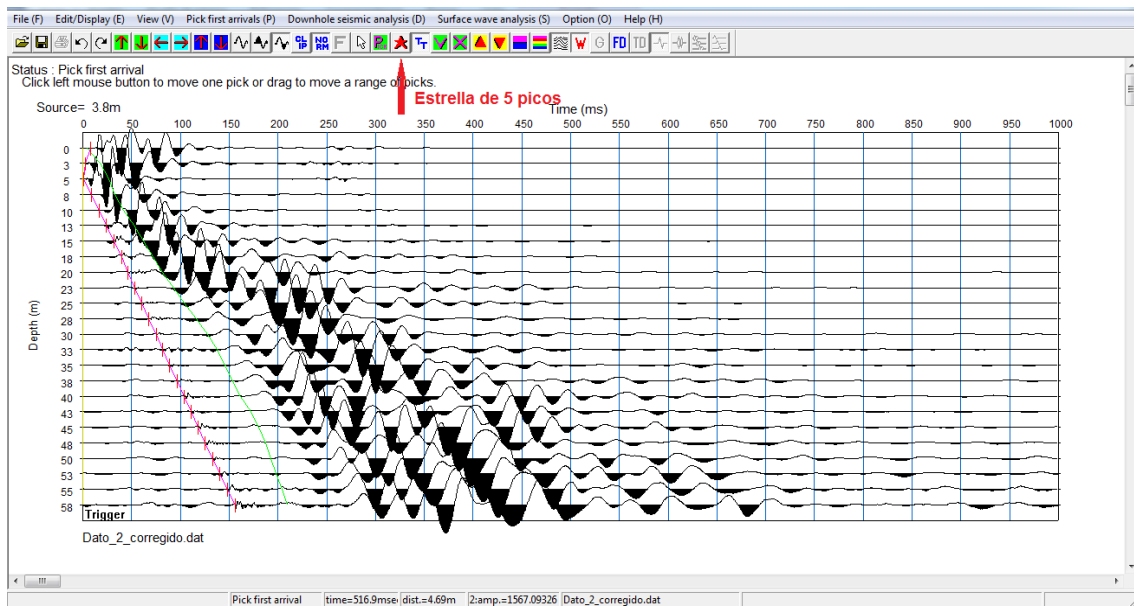


Figura 5.40: Demarcación, del picado.

Guardar Archivo de Picado

Seguido procedemos a guardar el segundo picado, de la misma forma que el anterior, vamos a Archivo F, en (File (F)), Guardar archivo de picado, en Save pick file donde daremos clic, como lo podemos visualizar en la Figura 5.41.

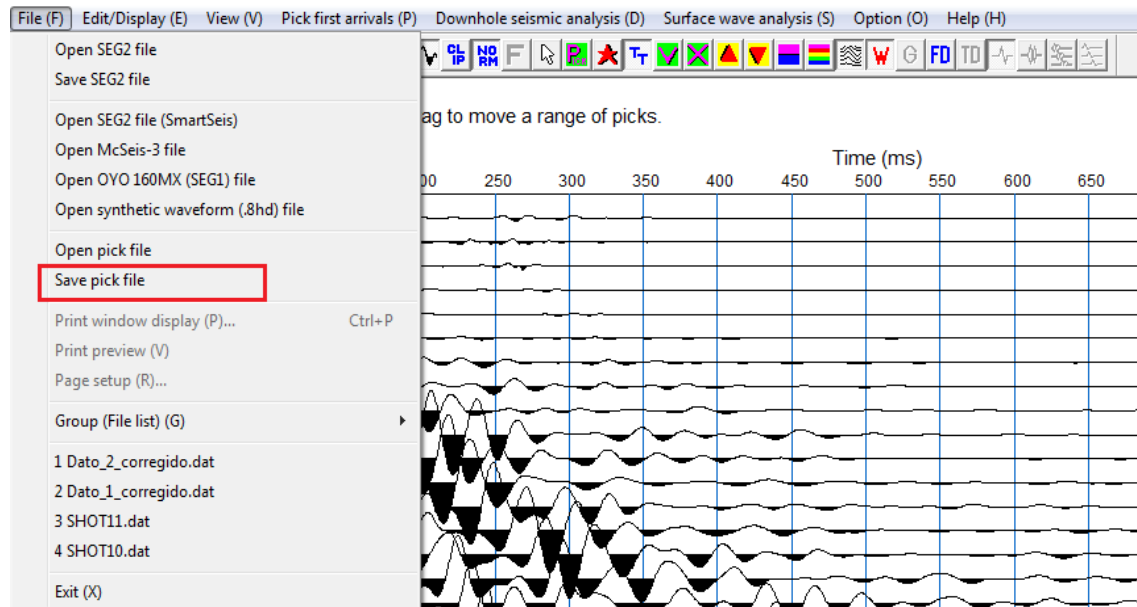


Figura 5.41: Guardar archivo de picado.

Guardar el Segundo Picado

Para guardar el segundo picado, se nos abrirá una ventana que nos mostrara, únicamente el picado que guardamos anteriormente, que será el que seleccionaremos, para guardar nuestro nuevo picado, con el anterior picado y daremos clic en guardar, como lo podemos visualizar en la Figura 5.42.

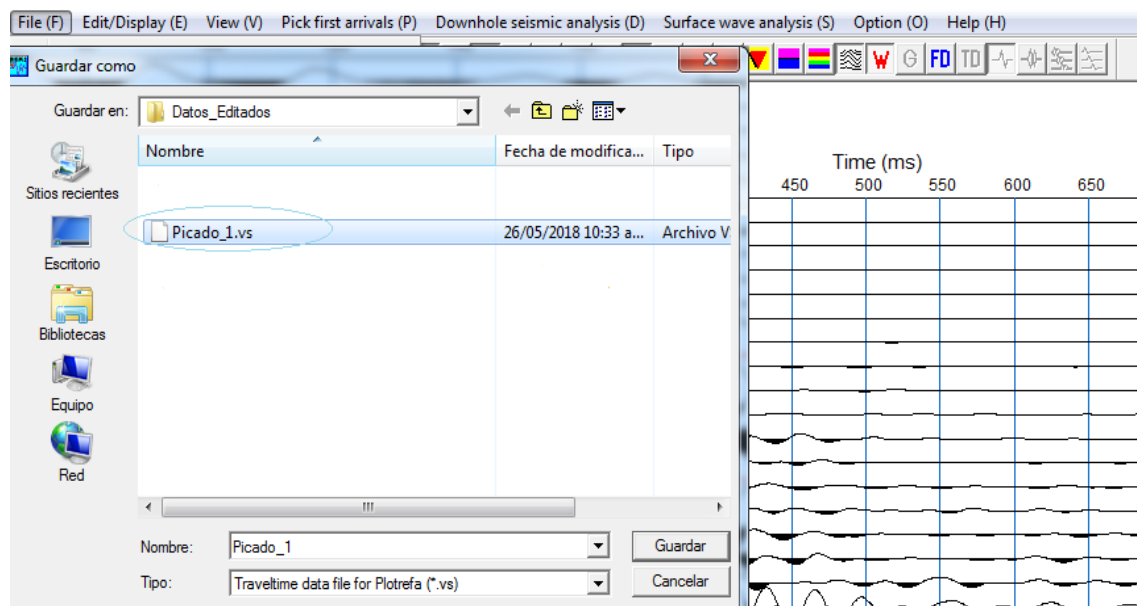


Figura 5.42: Guardar el segundo picado.

Archivo Guardado

Seguido de haber dado clic en guardar, el programa nos asegurara el guardado, desplegando una ventana que dirá, El archivo de datos de tiempo de viaje de plotrefa se ha guardado, (Traveltime data file for plotrefa has been saved) en el cual debemos dar clic en aceptar, como lo podemos visualizar en la Figura 5.43.

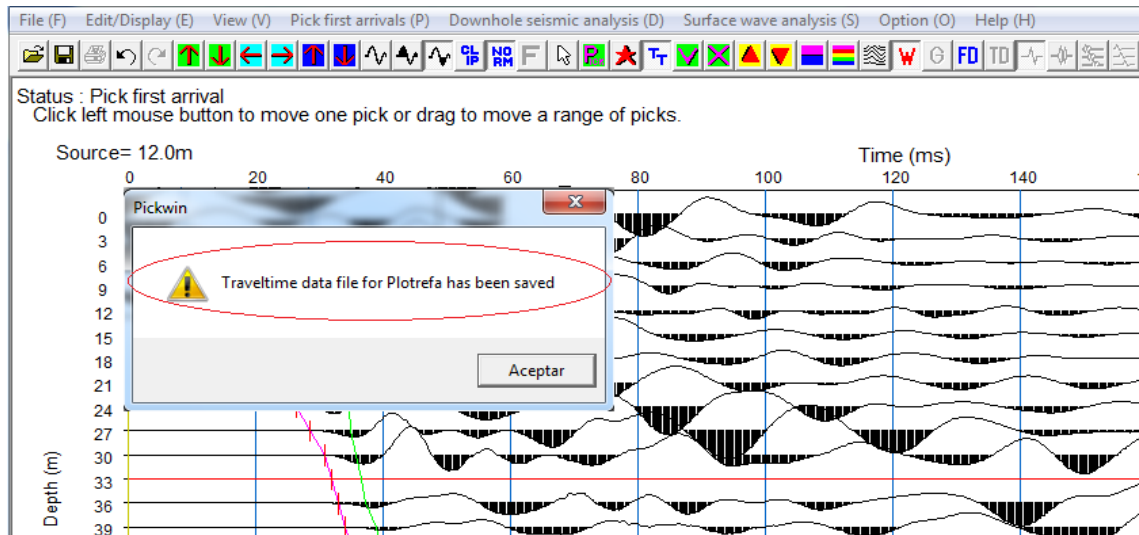


Figura 5.43: El archivo de datos de tiempo de viaje de plotrefa se ha guardado.

Guardar Picado Sobre Picado

Simultáneamente debemos realizar los picados para cada uno de los datos recolectados de nuestro tendido sísmico, guardándolo de la misma forma, uno por uno siempre sobre el anterior, teniendo en cuenta, que todos los picados se guardan sobre el primero que se guardó, que será el conjunto de picados que necesitaremos para continuar con el procesamiento de los datos. Podemos observar que vamos a guardar el picado del dato número 10, en nuestro conjunto de picados, como lo podemos visualizar en la Figura 5.44.

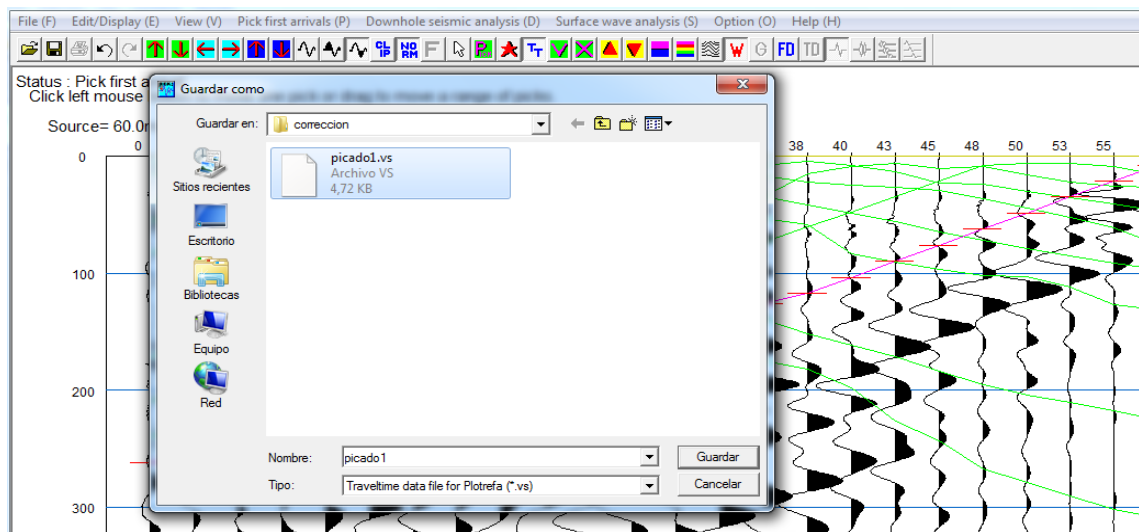


Figura 5.44: todos los picados se guardan sobre el primero.

Mapa de Picados Finales

Finalmente, cuando realizamos los 10 picados tendremos una vista de todas las líneas que indican que se guardaron con éxito, sobre el primero que se realizó, como lo podemos visualizar en la Figura 5.45. Nota: debemos tener en cuenta que las secciones iniciales de cada picado y las finales, no se deben cruzar, sin excepciones.

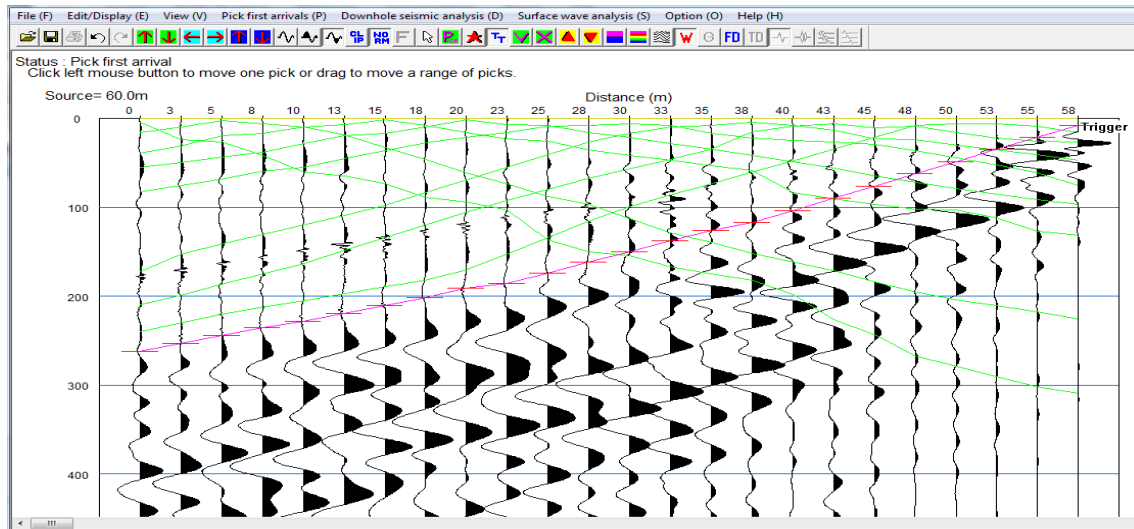


Figura 5.45: Mapa de picados finales.

Cerrar Pickwin

Una vez terminado el proceso de picado, y queremos cerrar el pickwin, vamos a cerrar el programa, en la esquina superior izquierda, donde le daremos clic, enseguida nos aparecerá una ventana que se llama pickwin, donde nos muestra una pregunta, ¿ Seguro que quieres salir? (Are you sure you want to exit), en donde le daremos clic en aceptar, como nos muestra la Figura 5.46.

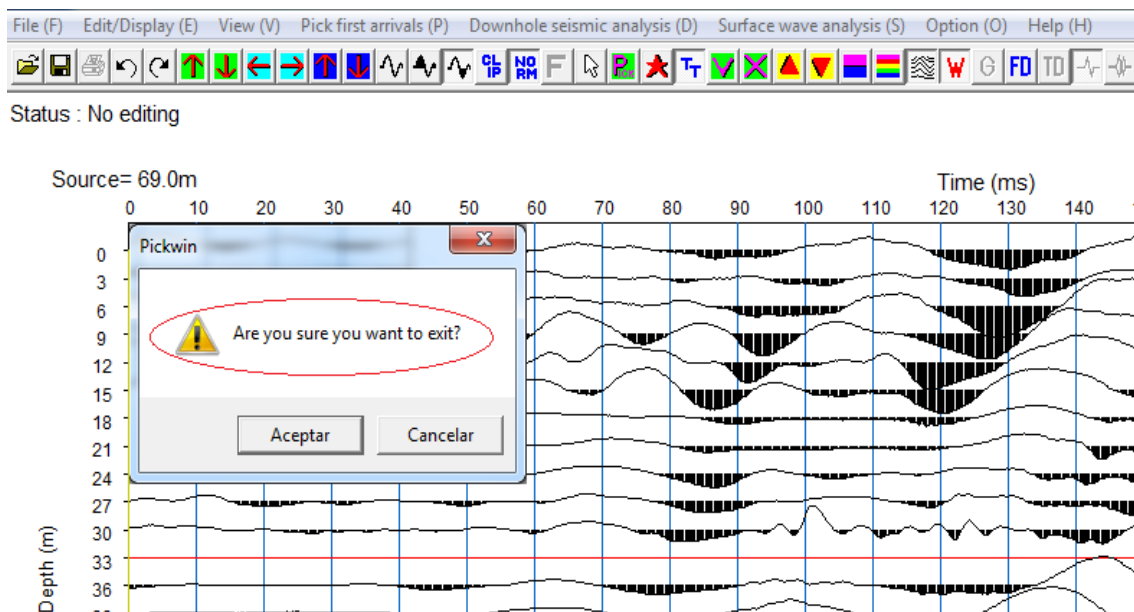


Figura 5.46: Cerrar Pickwin.

5.1.4 Asignación de Capas (Plotrefa)

Abrir el Plotrefa

Seguido de haber realizado todos los picados en los datos, procedemos a abrir el Plotrefa, para seguir con el procesamiento de nuestros datos una vez abierto el Plotrefa, tendremos una vista inicial, donde empezaremos el procesamiento de los datos adquiridos. La cual nos muestra un enunciado inicial sin datos de forma de onda (no travelttime data), que nos indica que no se ha abierto ningún dato, como nos muestra la Figura 5.47.



No travelttime data

Figura 5.47: abrir el Plotrefa.

Asignación de capas

Daremos inicio al procesamiento abriendo nuestro primer dato. Iremos a la parte superior izquierda, donde encontraremos, Archivo (F), File (F), le damos clic, inmediatamente se nos despliega una pestaña con varias opciones, escogeremos la primera y daremos clic, que es, abrir archivo de poltrefa, datos de tiempo de viaje y modelo de velocidad (Open plotrefa file) (travelttime data and velocity model) , como nos muestra la Figura 5.48.

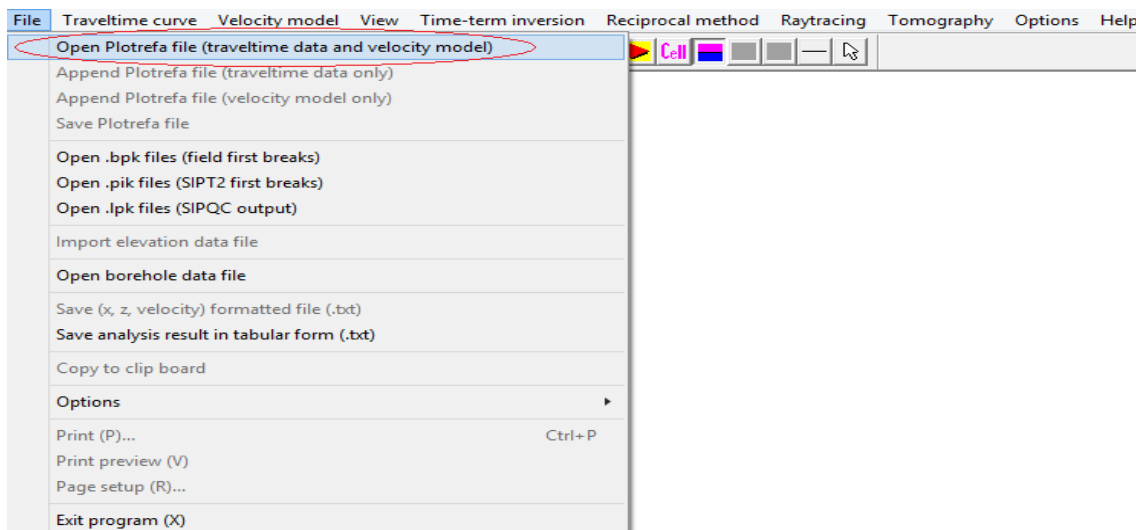


Figura 5.48: Asignación de capas.

Buscar Datos

Inmediatamente se abrirá una ventana, donde tenemos nuestros datos guardados, desde el momento de la adquisición, en este caso tenemos, tres carpetas diferentes, donde tenemos los datos de tres adquisiciones diferentes, con separaciones de 3 mts. 1.5 mts y 0.75 mts, como nos muestra la Figura 5.49.

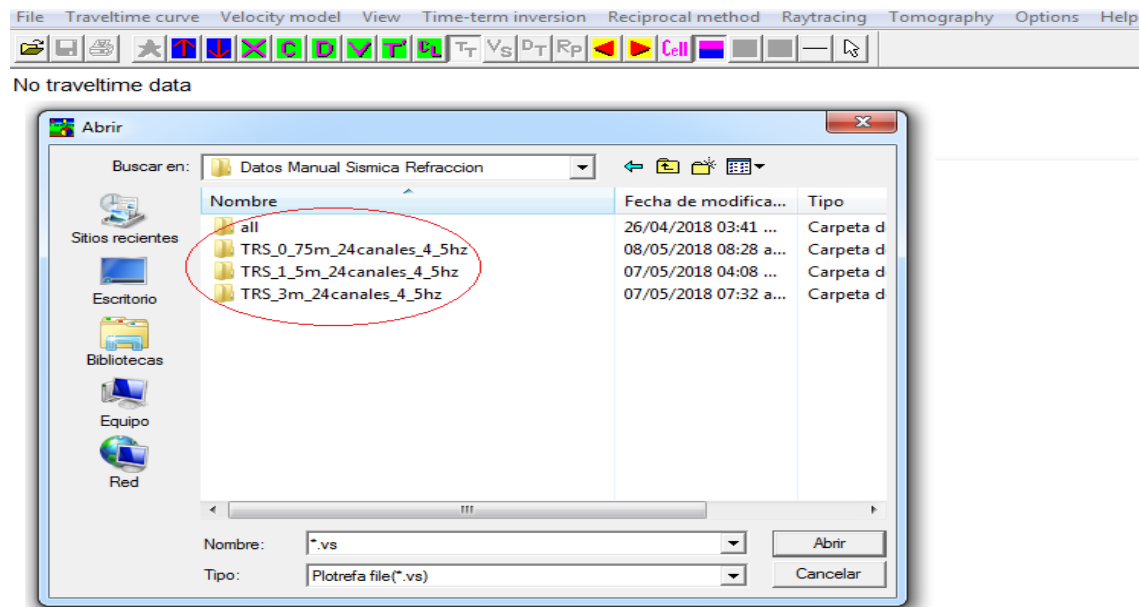


Figura 5.49: Buscar Datos.

Abrir Datos

En este caso vamos a dar clic y abrir los datos, del montaje de una línea con una distribución de 3 metros, donde tendremos la carpeta con los datos editados, como lo muestra la Figura 5.50.

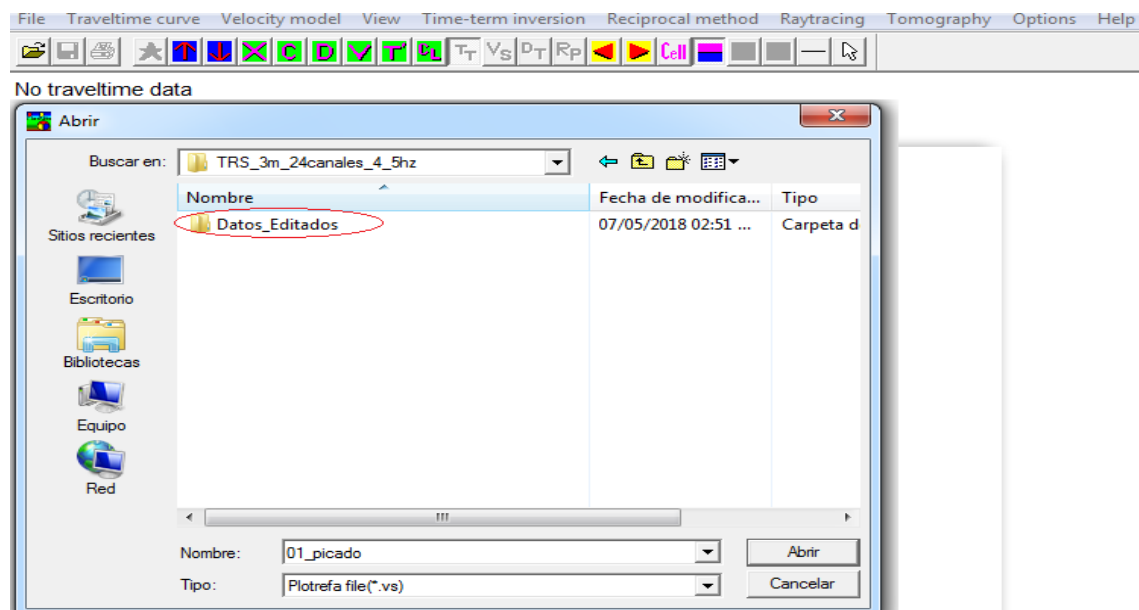


Figura 5.50: Abrir Datos.

Picado VS

Seguido, encontraremos el archivo Picado vs. Que es donde guardamos los 5 picados realizados en el pickwin, y le damos clic para abrir, como nos muestra la Figura 5.51.

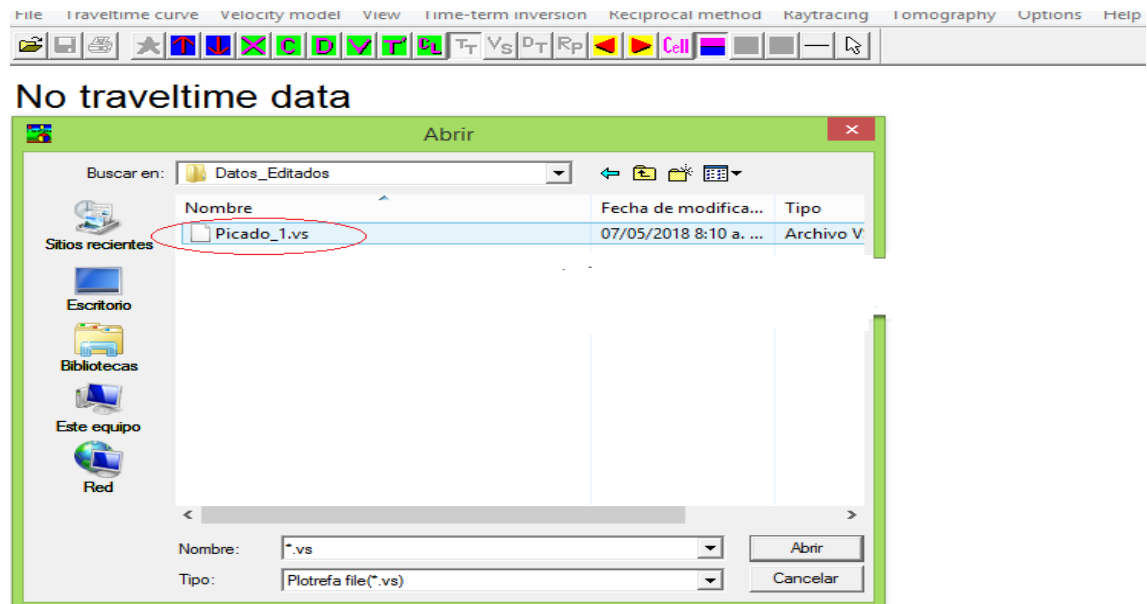


Figura 5.51: Picado VS.

Dato sin Editar

Seguido de la apertura de nuestros datos tendremos una vista de nuestros datos muy similar a la que nos muestra la Figura 5.52.

Nota: la imagen nos muestra que no ha sido editada (Status: No editing)

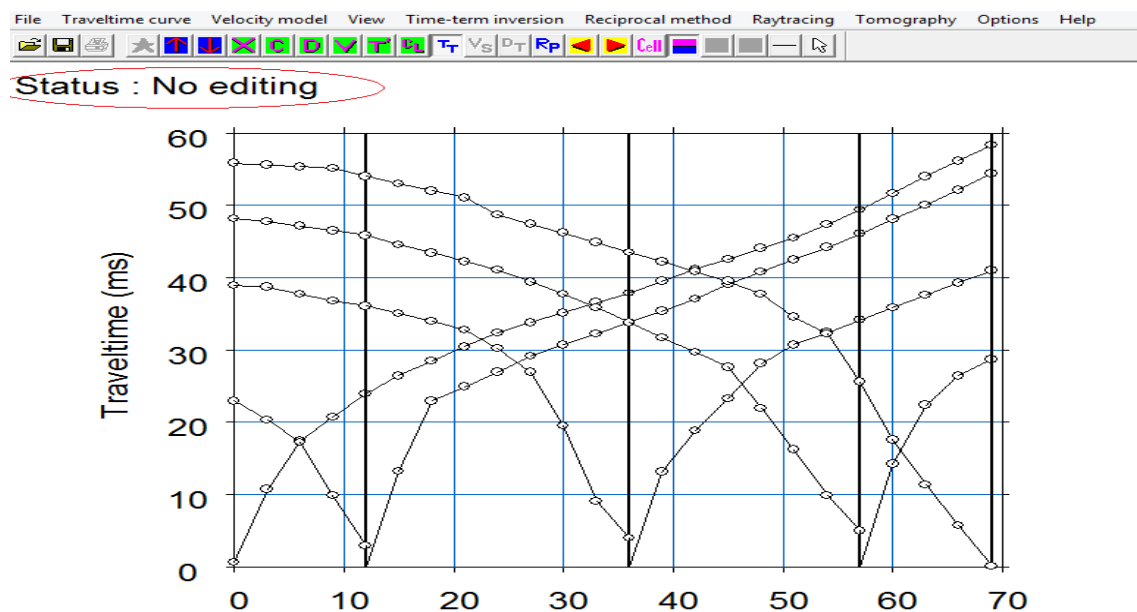


Figura 5.52: Dato sin Editar.

Curva de Tiempo de Viaje

Seguido de esto, una vez en pantalla nuestros datos, les vamos a realizar algunas correcciones, para que los porcentajes de error sean mínimos, esto lo realizaremos en (Traveltime curve), donde le daremos clic, como nos muestra la Figura 5.53.

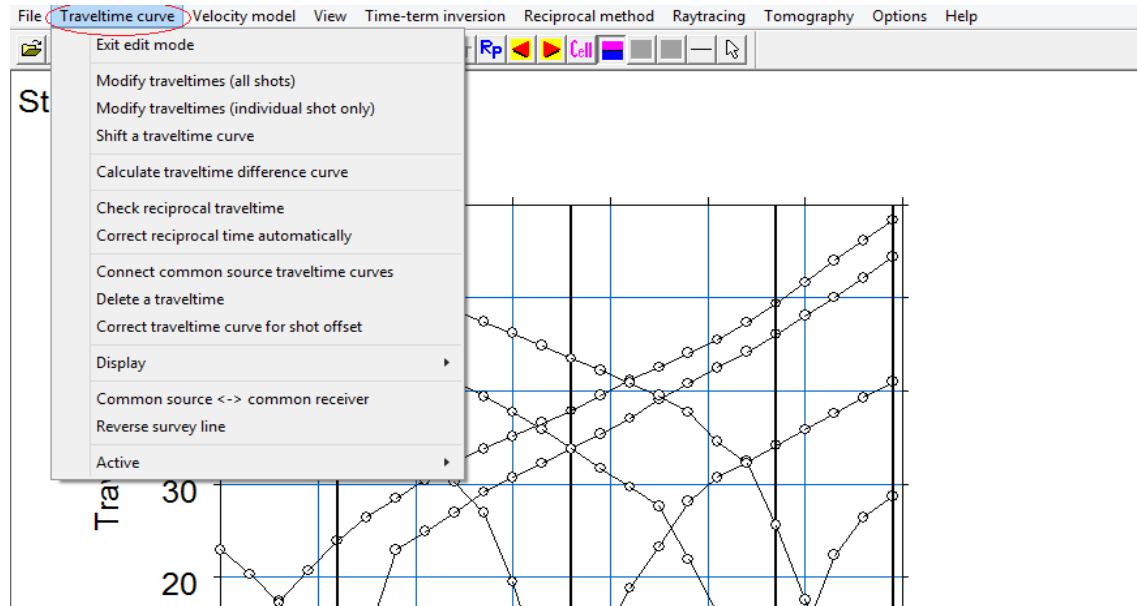


Figura 5.53: Curva de tiempo de viaje.

Eliminar un Tiempo de Viaje

Seguido de esto, le daremos clic en eliminar un tiempo de viaje, (delete a traveltime), que nos permitirá, borrar trazas como nos muestra la Figura 5.54.

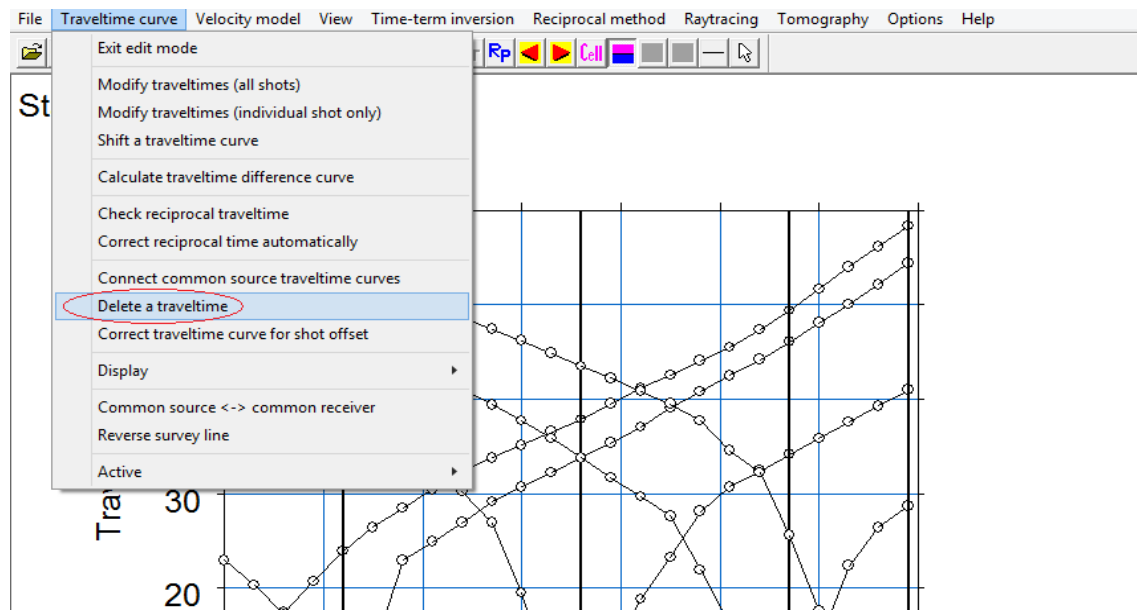


Figura 5.54: eliminar un tiempo de viaje.

Seleccionar un Tiempo de Viaje para ser Eliminado

Inmediatamente el estado del data cambia, a estado, Eliminar un tiempo de viaje y Seleccionar un tiempo de viaje para ser eliminado (Status: Delete a traveltime and Select a traveltime to be deleted), como nos lo muestra la Figura 5.55.

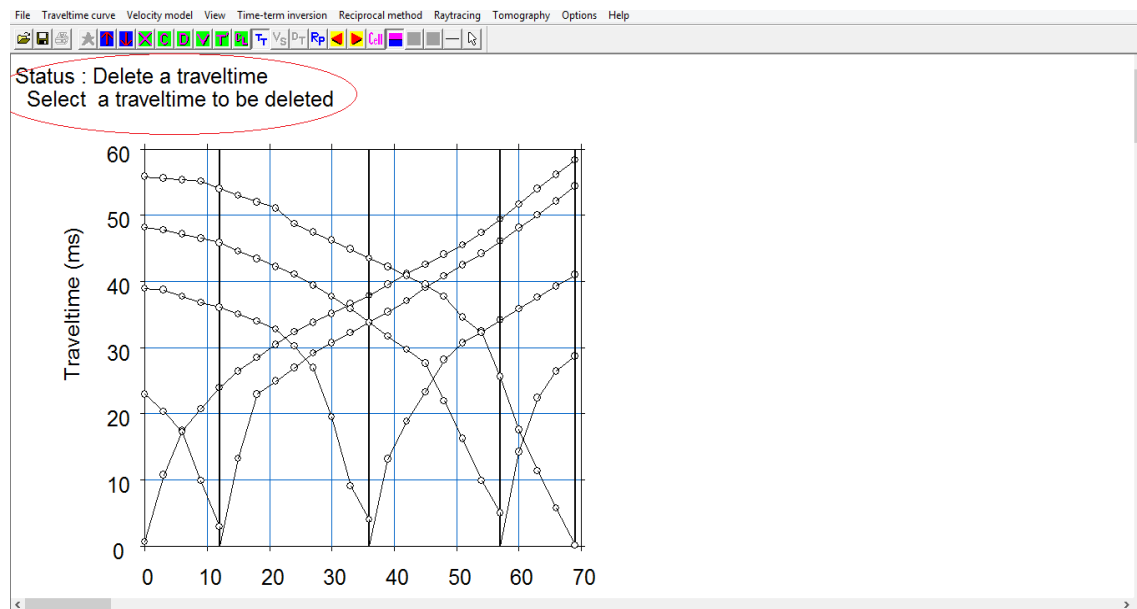


Figura 5.55: Seleccionar un tiempo de viaje para ser eliminado.

Nueva Vista de los Datos

Seguido de haber realizado la eliminación de tiempo de viaje, tenemos una nueva vista de los datos, como lo muestra la Figura 5.56.

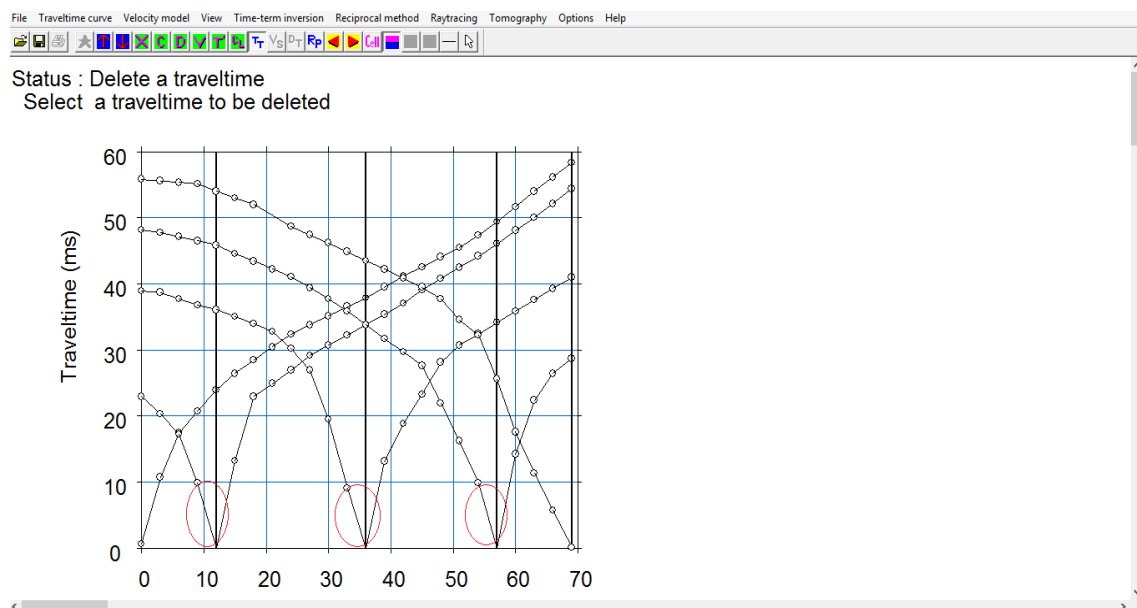


Figura 5.56: nueva vista de los datos.

Tiempo de inversión

Seguido iremos a la parte superior donde encontraremos termino de tiempo, (Time – term) inversión, donde le daremos clic, como lo muestra en la Figura 5.57.

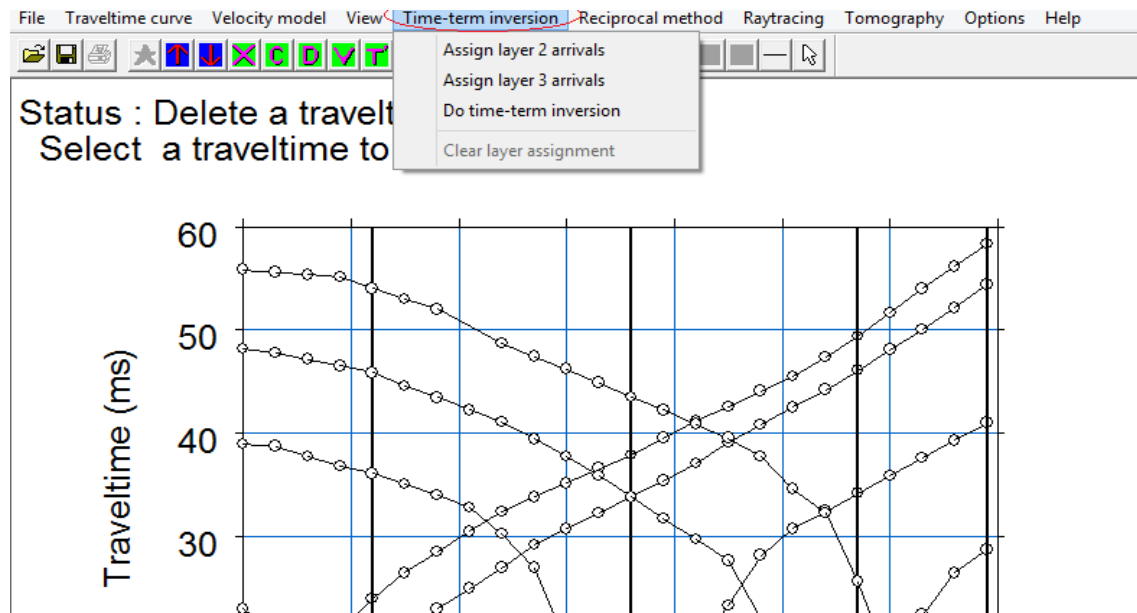


Figura 5.57: Tiempo de inversión.

Asignar Capas

Seguido vamos a hacer clic en Asignar 2 llegadas de capa (Assing layer 2 arrivals), como nos muestra la Figura 5.58.

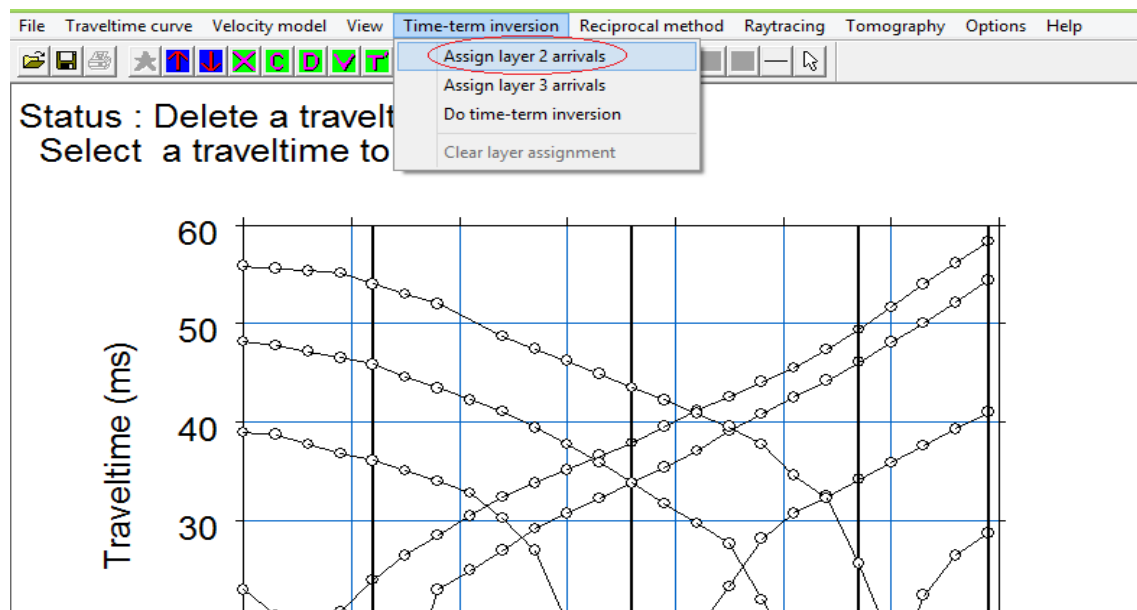


Figura 5.58: Asignar Capas.

asignación de Capa

Inmediatamente nos cambia el estado del dato, Estado: asignación de capa Nivel de capa = 2 (Status : Layer assignment Layer no. =2), que nos indica que le asignaremos 2 capas, como nos muestra la Figura 5.59.

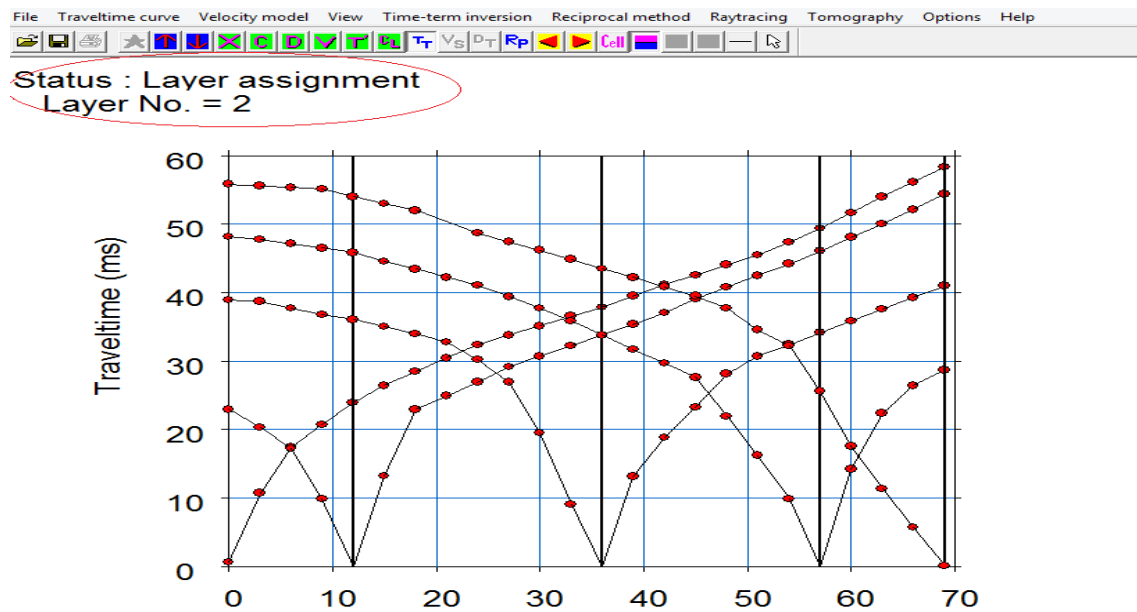


Figura 5.59: Asignación de Capa.

Capas

Seguido le asignaremos las capas, donde la primera capa nos muestra de color rojo y la segunda de color verde, como nos muestra la Figura 5.60.

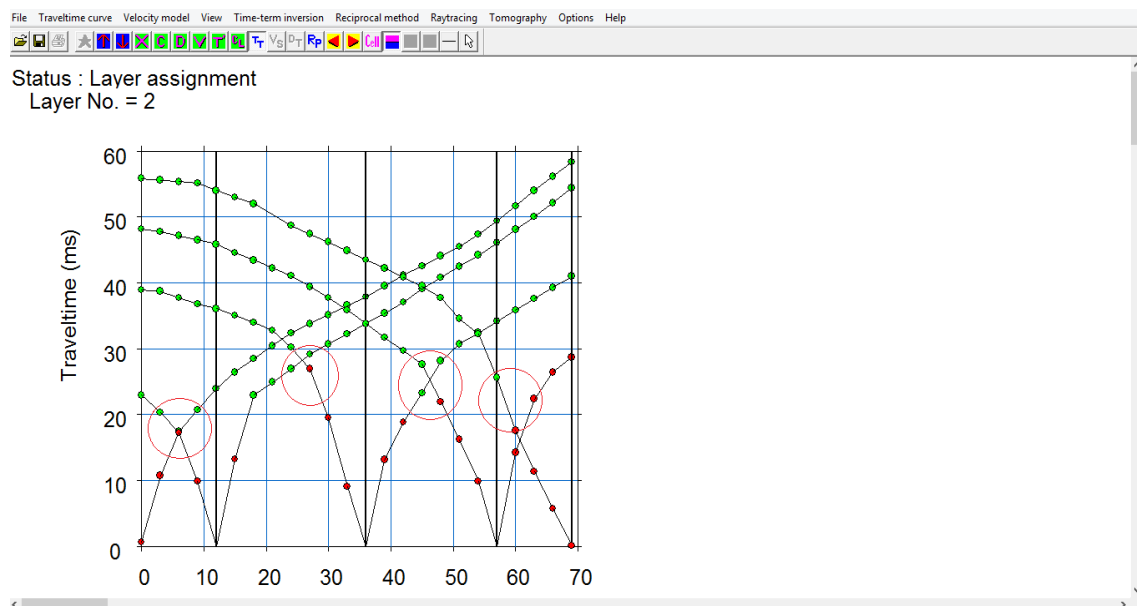


Figura 5.60: Capas.

Inversión a Largo Plazo

Seguido iremos nuevamente a Inversión a plazo (Time - term inversión), y buscaremos la opción Hacer inversión a largo plazo (Do time – term inversión), donde le daremos clic, como nos muestra la Figura 5.61.

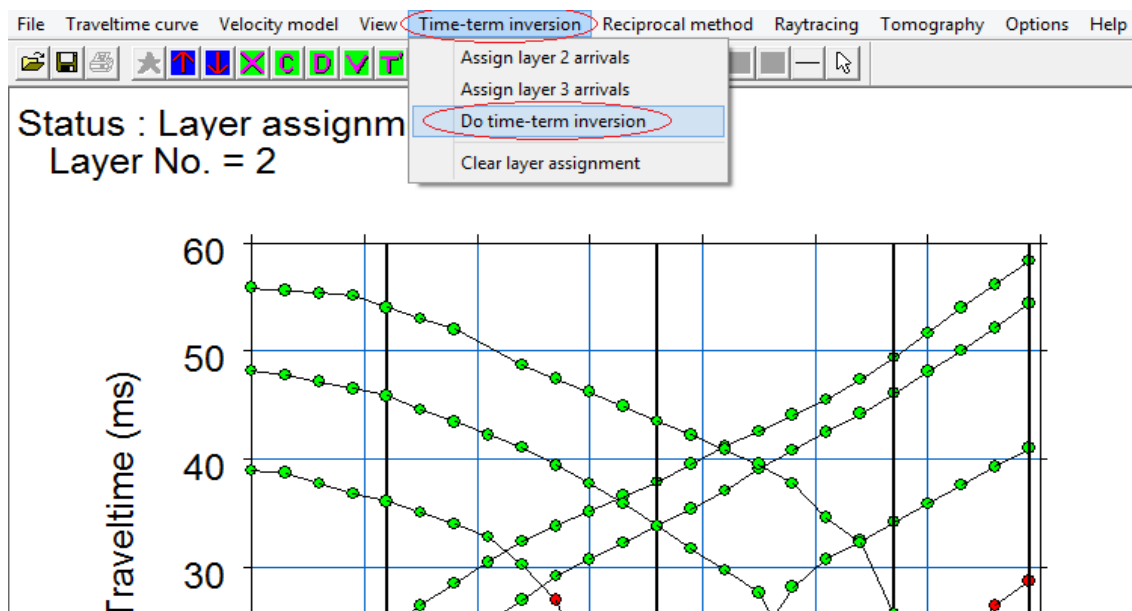


Figura 5.61: inversión a largo plazo.

Topografía

Seguido se nos despliega una ventana que se llama Topografía (Topography) con dos opciones, Superficie plana y Abrir archivo de datos de elevación (Flat Surface y Open elevation data file), donde seleccionaremos superficie plana (Flat Surface), y le daremos clic en ok, como nos muestra la Figura 5.62.

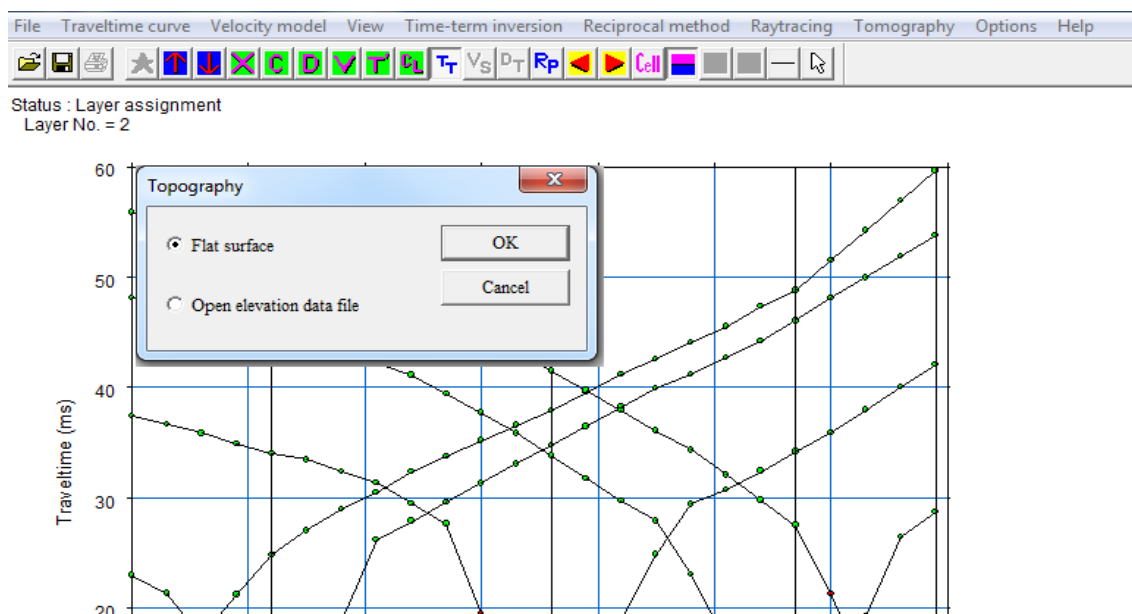


Figura 5.62: Topografía.

Tamaño de Celda

Seguido nos muestra otra ventana que se llama, Tamaño de celda (Cell size), donde nos dice, Automático (espacio entre geófonos) (Automatic (from geophone spacing)), y Manual, donde daremos clic en manual y luego clic en ok como nos muestra la Figura 5.63.

Nota: en este caso tendremos una asignación manual donde la distancia es de 0 a 69 m y los intervalos son de 3m.

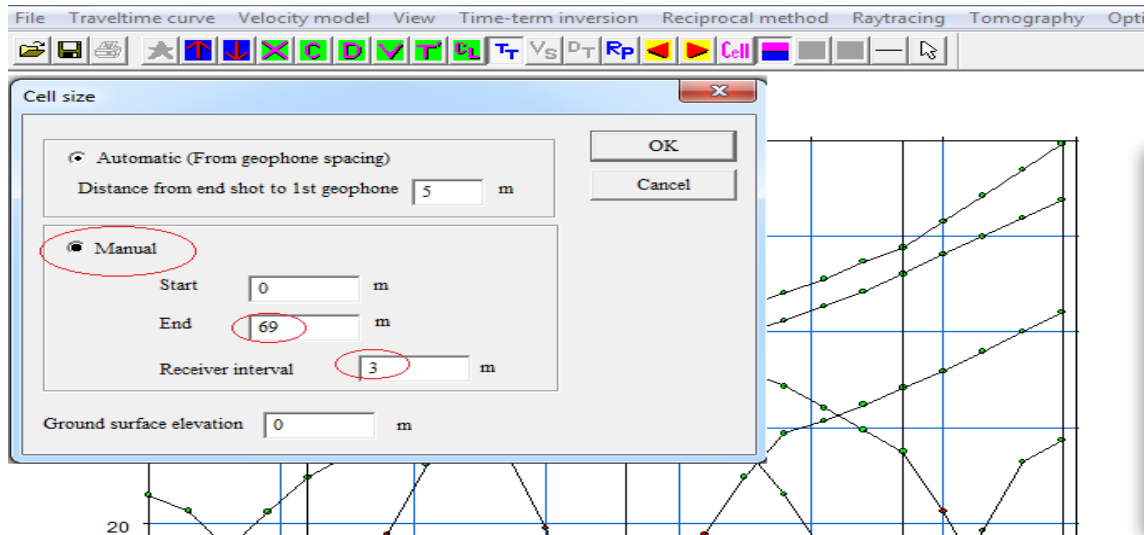


Figura 5.63: Tamaño de celda.

Error en la Inversión

Seguido nos muestra una ventana, que se llama Plotrefa donde nos muestra RMS error en la inversión de la matriz es =0,776545 (RMS error in matrix inversion is = 0,776545 msec), y le damos clic en aceptar, como nos muestra la Figura 5.64. Nota: en este caso el error permisible es de máximo 1 msec, eso nos quiere decir que si estamos dentro del el margen permitido.

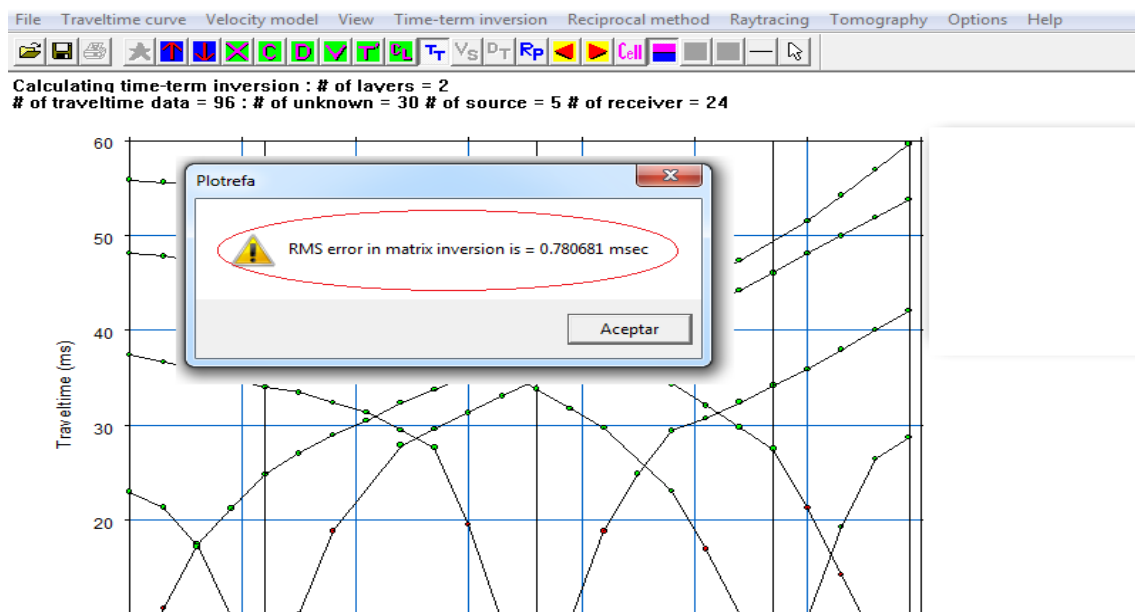


Figura 5.64: error en la inversión.

Modelo en Capas

Seguido tendremos Modelo en capas: de capas = 2, (Layered model: of layers =2,), tendremos una visión inicial de velocidades en las dos capas asignadas, de 0,3 km/s y 1,7 km/s, como nos muestra la Figura 5.65.

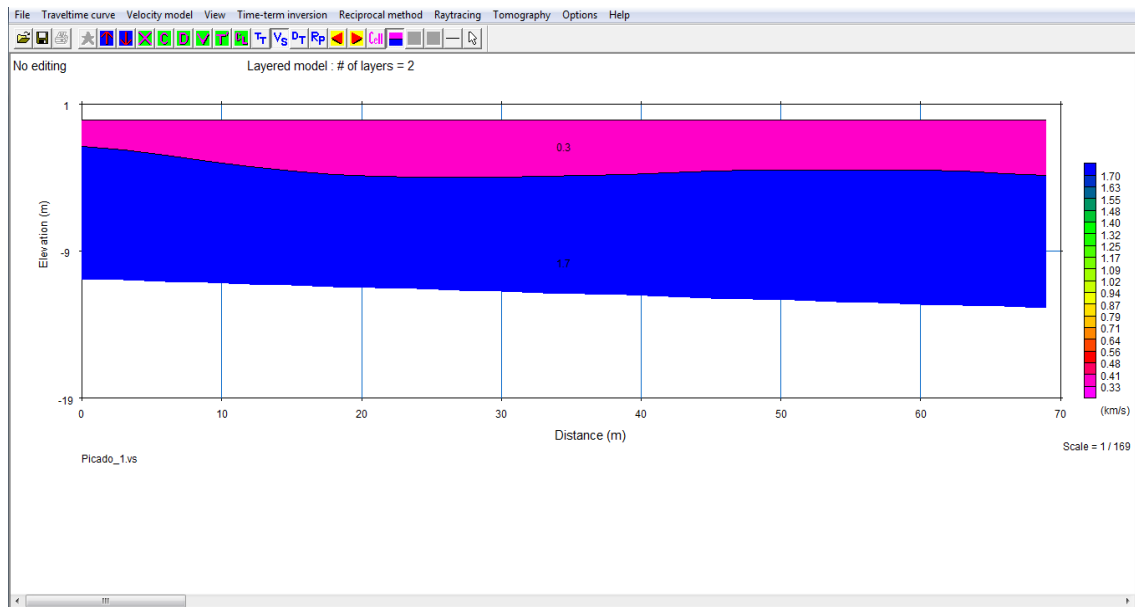


Figura 5.65: Modelo en capas.

5.1.5 Generar Modelos Iniciales

Trazado de Rayos

Seguido iremos a Trazado de rayos (Raytracing), donde le daremos clic en la opción, ejecutar (Execute), como nos muestra la Figura 5.66.

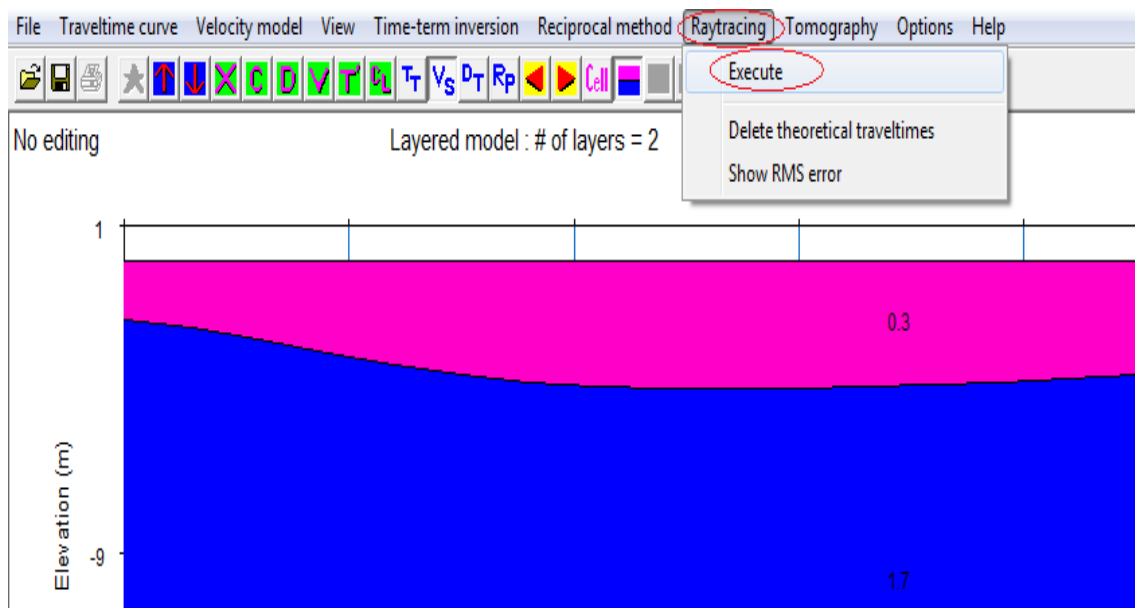


Figura 5.66: Trazado de rayos.

Plotrefa

Inmediatamente, nos muestra una venta, que se llama Plotrefa, donde nos muestra $RMSE = 1,068306$ ms donde daremos clic en aceptar, como nos muestra la Figura 5.67.

Nota: en este caso, el error máximo permisible es de 5ms, eso nos quiere decir que si estamos dentro del el margen permitido.

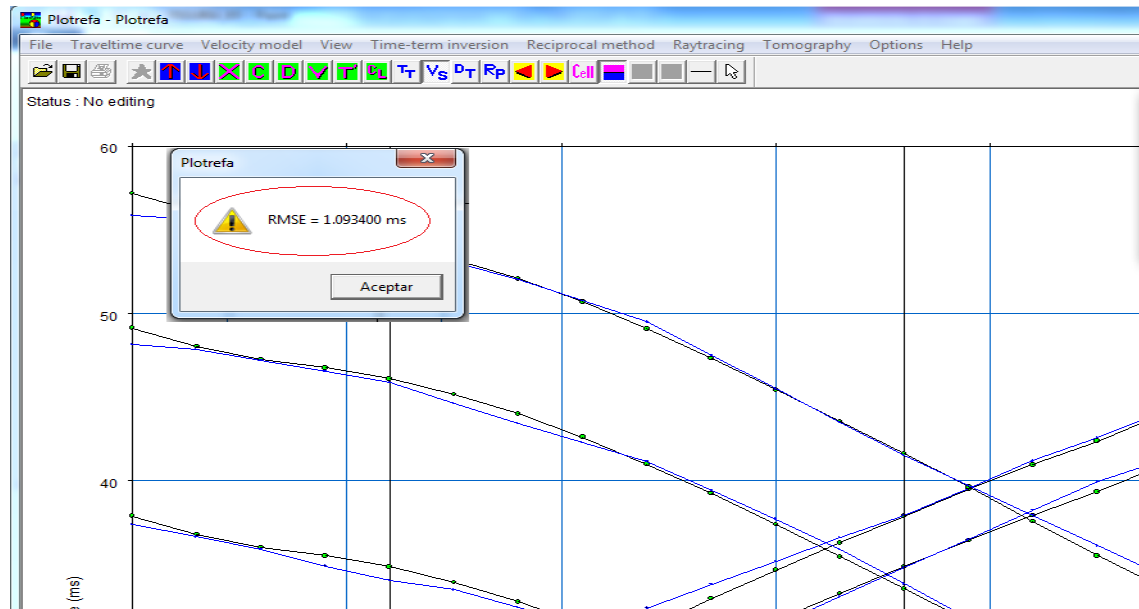


Figura 5.67: Plotrefa.

Observado y Calculado

Seguido de esto tenemos una mejor visión de nuestros datos, donde nos muestra, nuestro dato observado y nuestro dato calculado, como lo muestra la Figura 5.68.

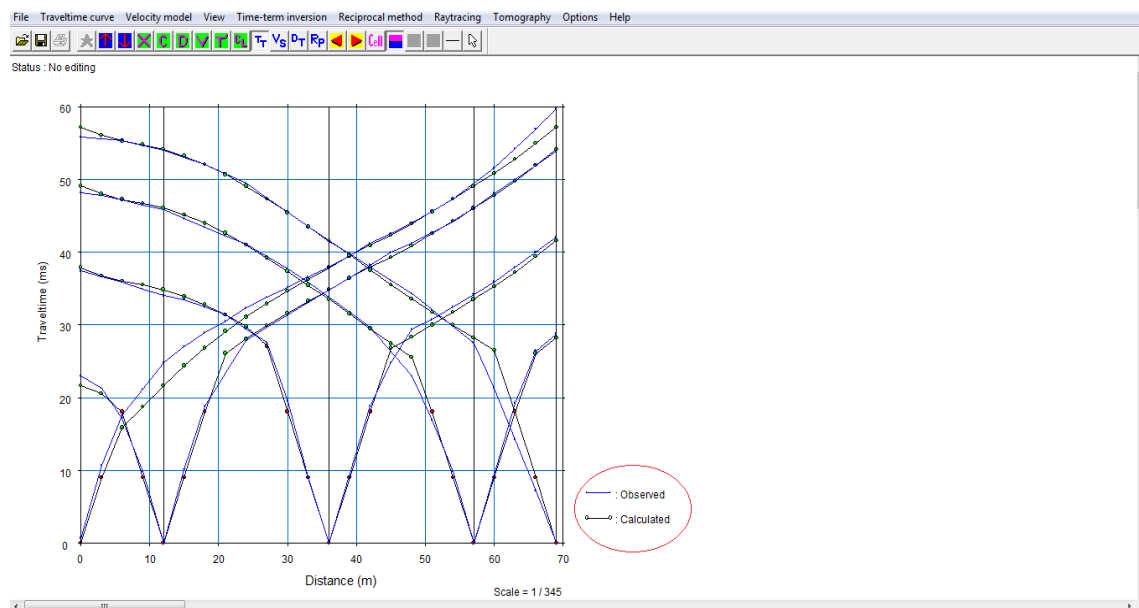


Figura 5.68: FIGURA 67.

Tomografía

Seguido vamos a Tomografía (Tomography), donde le daremos clic a la opción Generar un modelo inicial (Generate initial model), como nos muestra la Figura 5.69.

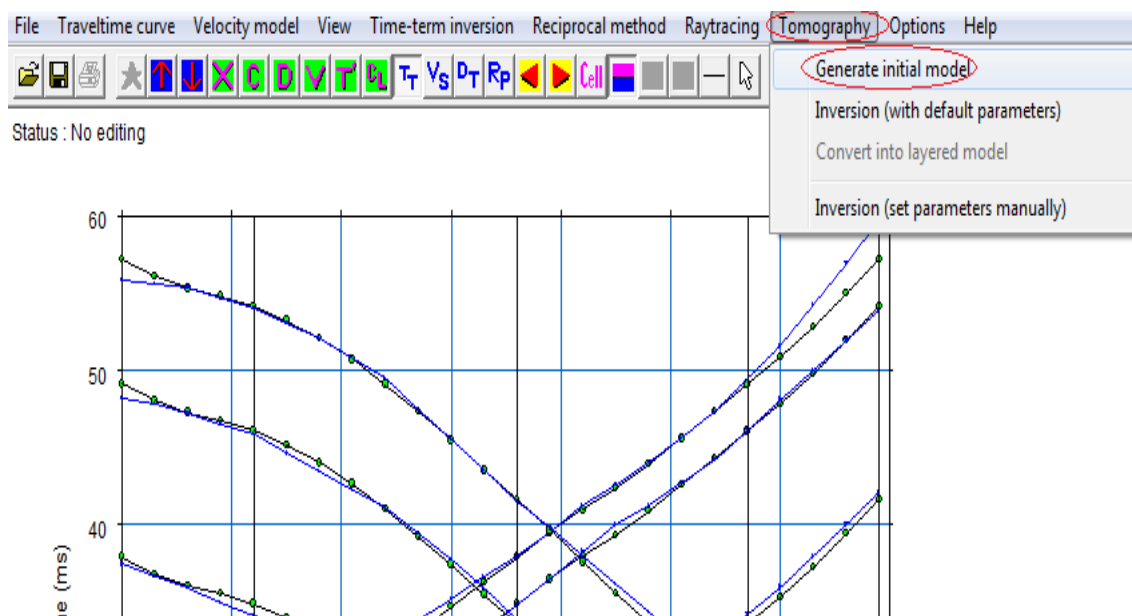


Figura 5.69: Tomografía.

Modelo Inicial

Inmediatamente, nos muestra una ventana que se llama, Modelo inicial para tomografía (modelo de velocidad suave), (Initial model for tomography (smooth velocity model)), donde le daremos clic en ok, como nos muestra la Figura 5.70.

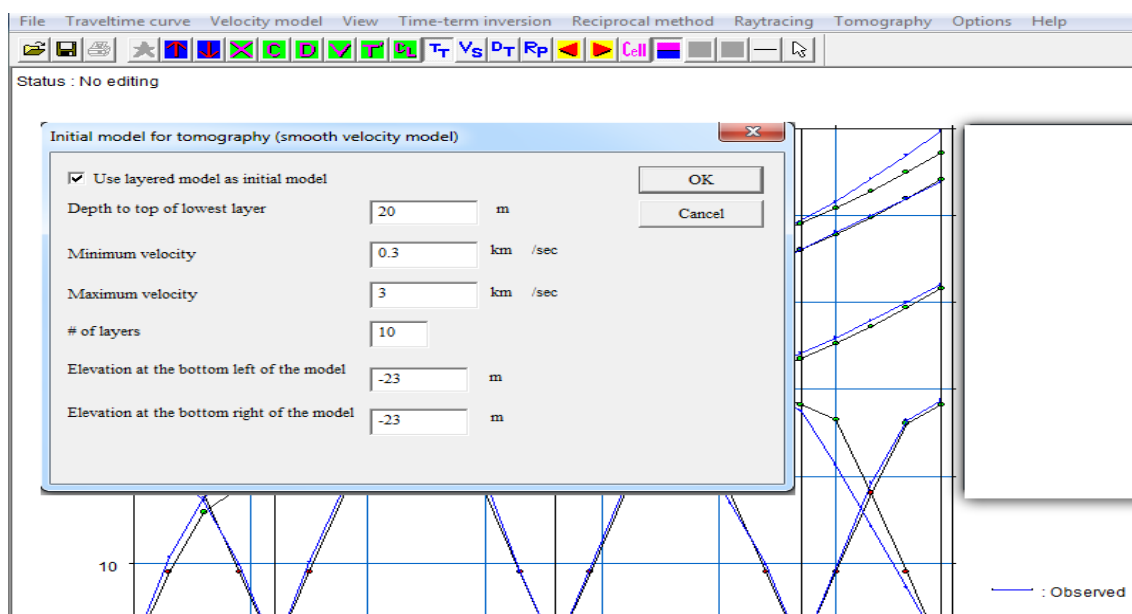


Figura 5.70: Modelo inicial.

Modelo Inicial sin Editar

Seguido tendremos el modelo inicial sin editar, Modelo liso: numero de capas = 10 (Smooth model: numero of Layers = 10), como nos muestra la Figura 5.71.

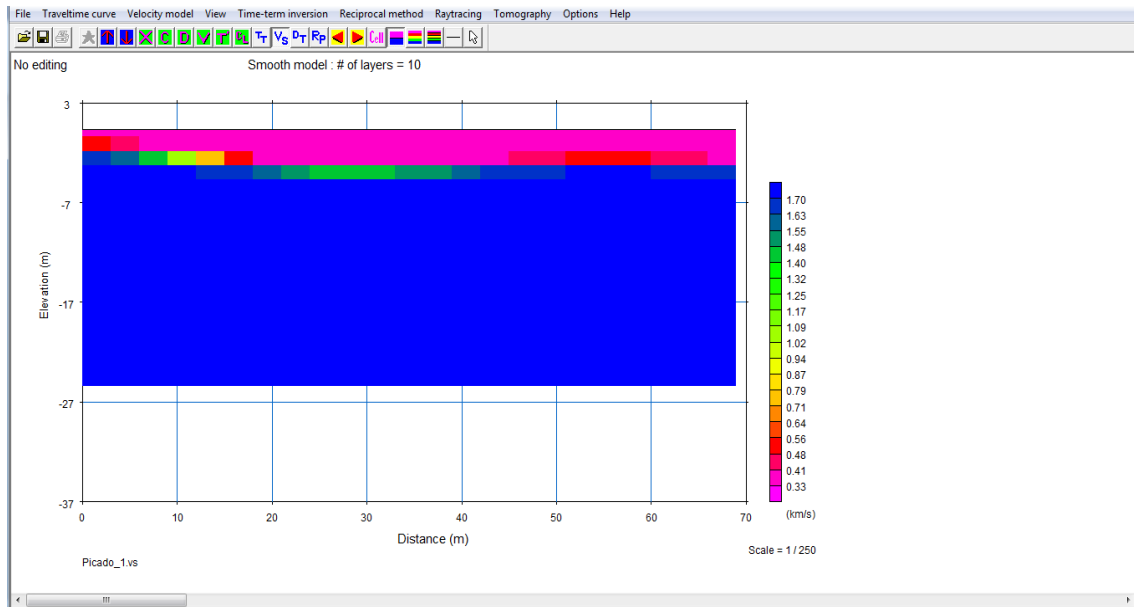


Figura 5.71: modelo inicial sin editar.

Modelo Inicial

En este modelo inicial, podemos observar la profundidad que alcanzaron la velocidades, en este caso es de 8,44 m además de los espesores de la capas, como nos muestra la Figura 5.72.

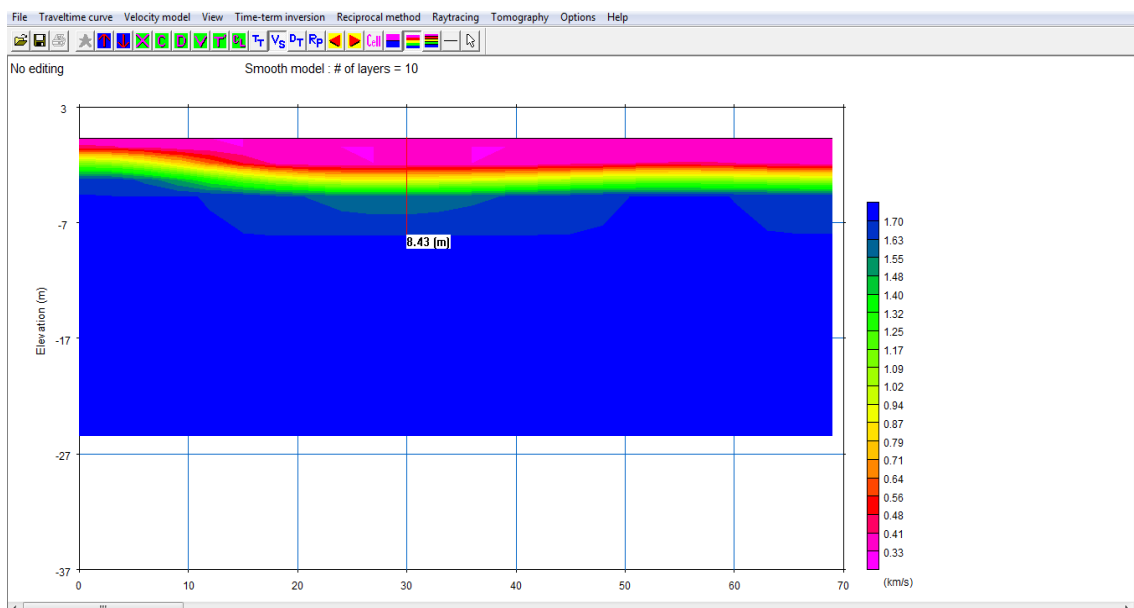


Figura 5.72: FIGURA 71.

Modelo Final

Observamos el espesor de la primera capa, que es de 2,44 m y los diferentes espesores y colores, como nos muestra la Figura 5.73.

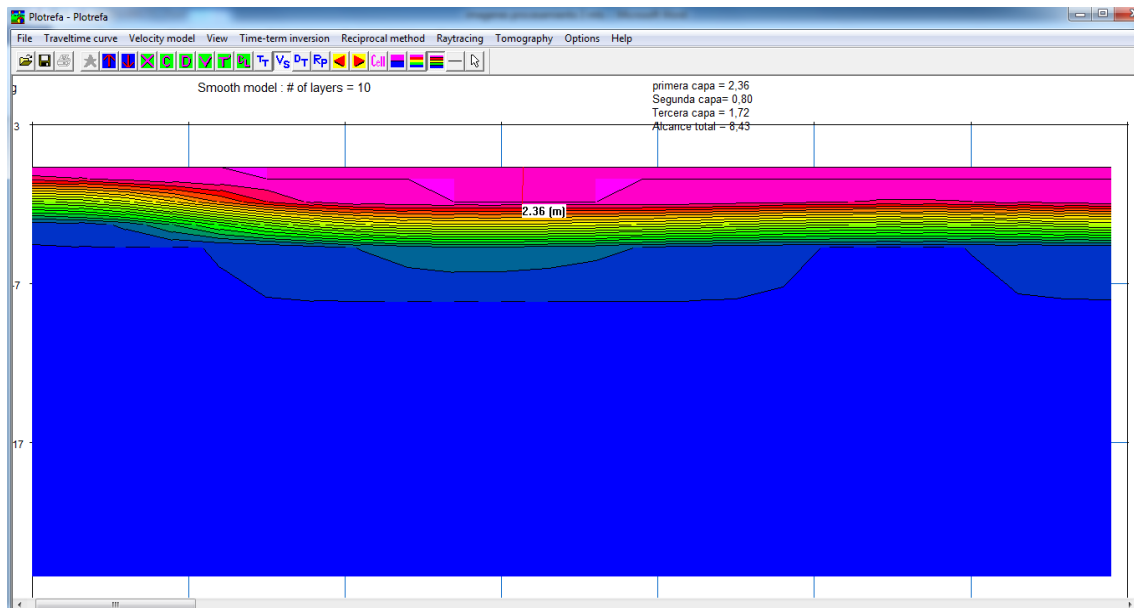


Figura 5.73: Modelo Final.



6. CONCLUSIONES

- Se realizó una revisión minuciosa de diferente bibliografía, de donde obtuvimos los principios físicos y matemáticos que debemos tener en cuenta en la geofísica, y todas sus aplicaciones, como lo es la refracción sísmica, aplicada a los diferentes campos del conocimiento.
- Se expusieron y entendieron los principios físicos y matemáticos de la Refracción Sísmica (RS) como ensayo geofísico, para una capa plana, n capas planas, una capa inclinada, y n capas inclinadas.
- Se conocieron las características de algunos equipos y de los accesorios usados para realizar un ensayo de Refracción Sísmica, especialmente los diferentes sismógrafos que existen en el mercado, con las especificaciones técnicas y sus características.
- Se explicó la metodología convencional para el diseño de ensayos geofísicos basados en la técnica de Refracción Sísmica (RS) y algunos diseños modernos aplicados a problemas de ingeniería civil y geotecnia.
- Se expusieron, las etapas básicas para realizar el procesamiento de los datos sísmicos adquiridos con el fin de generar imágenes en dos dimensiones de las velocidades sísmicas de onda P.



7. BIBLIOGRAFÍA

LIBROS

- Cantos, J. (1973). Tratado de la geofísica aplicada. Madrid, España.
- Reynolds, j. (1998). An Introduction to Applied and Environmental Geophysics
- Reynolds, J (1997). An Introduction to Applied and Environmental Geophysics.
- Stein, S. (2003) An Introduction to Seismology, Earthquakes, and Earth Structure.
- Philip, k. Brooks, M. y Hill, I. (2002). An Introduction to Geophysical Exploration.
- Milsom, J. (1989). Field Geophysics.
- Lowre, W. (2007). Fundamental of Geophysics. Zurich, suiza.
- Hecht, E. (2000) Óptica. Volumen 3. Tercera Edición.
- Serway, R. Jewett, J (2008) Física para ciencias e ingeniería con Física Moderna. Volumen 1. Séptima edición.
- Serway, R. Jewett, J (2008) Física para ciencias e ingeniería con Física Moderna. Volumen 2. Séptima edición.
- Giancoli, D (2008). Física para Ciencias e Ingeniería con Física moderna. Volumen II cuarta edición.

ARTÍCULOS Y TESIS

- Herrera, Y., y Cooper, N. (2010). Manual para la adquisición y Procesamiento de sísmica terrestre y su aplicación en Colombia.
- Wren, E (2005). Simplifying seismic. Reservoir. Vol 32, No. 1: 34-36.

- Gadallah, M., y Fisher R (2005). Applied Seismology.
- Griess P.R (1946): Colombia's Petroleum Resources. Consultado el 10 de marzo de 2018.
- Hernández G.H (2004): Impacto de las regalías petroleras en el departamento del Meta.
- Ensayos sobre Economía regional. Banco de la República. Consultado el 10 de marzo de 2018.
- Rosales, C. (2001) Sobre el Comportamiento Sísmico de los Depósitos de Suelos Del Área de Cañaveralejo, Cali, Colombia.
- A.Macau, S. Figueras, B. Benjumea, G. Domènech Energía de terremotos y de ondas sísmicas Energy of earthquakes and seismie sources
- Benrro,B, Cabañas, L. 1999. Caracterización Geofísica del suelo de las estaciones sísmicas de Llívia (NE de España)
- Gutiérrez, K. y G Buitrago 2016 Caracterización Geofísica del Subsuelo Mediante las Técnicas de Refracción sísmica, Reflexión Sísmica, Masw y Remi en Depósitos Superficiales y Zonas Críticas de la Universidad de Pamplona

FUENTES ELECTRÓNICAS

- <http://www.directindustry.es/prod/mae.srl.104001.html.product.item.1052553>
- <http://www.banrep.gov.co>.
- <http://www.jstor.org/pss/141235>.
- <https://www.geosensor.com.pe/productos/sismografos.1.html>
- <http://www.geometrics.com/geometrics.products/seismographs/geode/>
- <https://infogeologia.wordpress.com/2018/03/19/meteorizacion/>
- <https://www.windows2universe.org/earth/geology/fault.html#langsp>
- <https://www.definicionabc.com/geografia/nivel-freatico.php>

NORMAS Y MANUALES

- Herrera, Y., y Cooper, N. (2010). Manual para la adquisición y Procesamiento de sísmica terrestre y su aplicación en Colombia.
- Norma ASTM D5777 Standard Guide for Using the Seismic Refraction Method for Subsurface Investigation.
- Norma Sismo Resistente, (2010) Título H Estudios Geotécnicos NSR-10
- SeisImager/2DTM Examples 2005, Manual de procesamiento de datos de geofísica.