

ANEXOS

A.1 TEORÍA DE ECUACIÓN DE ONDA. TIPOS DE ONDAS

A.1.1 Características elásticas de los sólidos [8]

El **esfuerzo** es la fuerza aplicada a un cuerpo que por lo general puede generar una **deformación** (cambio en la forma y volumen de un cuerpo).

El esfuerzo es un vector con dimensiones de fuerza por unidad de área.

$$S = \partial F / \partial A \quad (A1-1)$$

Si consideramos el cambio de posición de dos puntos de un sólido A y B, después de una deformación lineal.

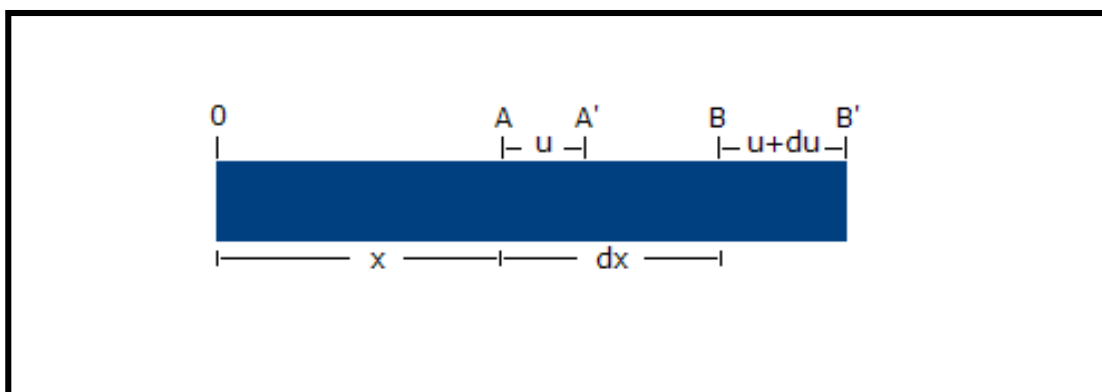


Figura A.1

La componente normal en la dirección X se expresa como: $\epsilon_x = \partial u / \partial x$.

De manera análoga si ∂v es la deformación en la dirección Y y ∂w en Z ,

$$\epsilon_y = \partial v / \partial y \quad \epsilon_z = \partial w / \partial z \quad (A1-2)$$

Si por el contrario, en lugar de aplicar un esfuerzo normal, se aplica un esfuerzo de cizalla la deformación se define como:

$$\begin{aligned} \epsilon_{xy} = \epsilon_{yx} &= \partial v / \partial x + \partial u / \partial y & \epsilon_{yz} = \epsilon_{zy} &= \partial w / \partial y + \partial v / \partial z \\ \epsilon_{zx} = \epsilon_{xz} &= \partial u / \partial z + \partial w / \partial x & & \end{aligned} \quad (A1-3)$$

Además de estas deformaciones, el cuerpo esta sujeto a rotación simple respecto a los tres ejes.

$$\begin{aligned}\theta_x &= dw/dy - dv/dz & \theta_y &= du/dz - dv/dx \\ \theta_z &= dv/dx - du/dy\end{aligned}\quad (A1-4)$$

Por tanto, la **deformación volumétrica** se definirá cuando un cuerpo experimente una deformación a lo largo de sus tres dimensiones.

$$\Delta = \epsilon_x + \epsilon_y + \epsilon_z \quad (A1-5)$$

Para calcular las deformaciones cuando se conocen los esfuerzos, se debe conocer la **relación esfuerzo-deformación**. Cuando las deformaciones son pequeñas, esta relación esta dada por la **Ley de Hooke**. Si se considera un medio isotrópico, la ley de Hooke se expresa como:

$$\sigma_{ii} = \lambda\Delta + 2\mu\epsilon_{ii} \quad i = x, y, z \quad (A1-6)$$

$$\sigma_{ij} = \mu\epsilon_{ij} \quad i, j = x, y, z \quad i \neq j \quad (A1-7)$$

Las cantidades λ y μ se conocen como constantes de Lamé. Sin embargo, si se considera un medio en que todos los esfuerzos son ceros, excepto σ_{xx} . Si se supone positiva σ_{xx} , mientras que ϵ_y y ϵ_z son negativas e iguales, se pueden definir el módulo de Young (E) y la relación de Poisson (σ) como:

$$E = \sigma_{xx}/\epsilon_{xx} \quad (A1-8)$$

$$\sigma = -\epsilon_{yy}/\epsilon_{xx} = -\epsilon_{zz}/\epsilon_{xx} \quad (A1-9)$$

A.1.2 Ecuación de onda

La forma general de la ecuación de onda que mejor representa la propagación de las ondas sísmicas a través de la tierra, asume la deformación en tres dimensiones, donde cada componente del esfuerzo es asociado con la deformación en más de una dirección.

Partiendo de la base que nos ofrecen las ecuaciones de fuerza y presión, $F = m \cdot a$ y $P = F/A$ y realizando varias sustituciones utilizando las ecuaciones A1-1 a A1-9, podemos escribir la ecuación de movimiento como:

$$\partial F = [S(x + dx) - S(x)] dA = E (\partial^2 u / \partial x^2) dx dA = \rho (\partial^2 u / \partial t^2) dx dA \quad (A1-10)$$

de aquí se obtiene la forma clásica de la ecuación de onda en una plana.

$$\partial^2 Q / \partial x^2 = V^{-2} \partial^2 Q / \partial t^2 \quad (A1-11)$$

donde V es la velocidad de propagación, definida por:

$$V = [E/\rho]^{1/2} \quad (A1-12)$$

La solución a la ecuación A1-10, es:

$$Q_{(x,t)} = A \sin k(Vt - x) \quad (A1-13)$$

La derivación de la ecuación tridimensional de onda es análoga a la de onda plana

$$\partial^2 \Delta / \partial x^2 + \partial^2 \Delta / \partial y^2 + \partial^2 \Delta / \partial z^2 = [\rho / (\lambda + 2\mu)] \partial^2 \Delta / \partial t^2 \quad (A1-14)$$

de donde se obtiene la velocidad de propagación de las ondas compresionales (ondas P) y de cizalla (ondas S):

$$V_p = [(\lambda + 2\mu) / \rho]^{1/2} \quad (A1-15) \quad V_s = [\mu / \rho]^{1/2} \quad (A1-16)$$

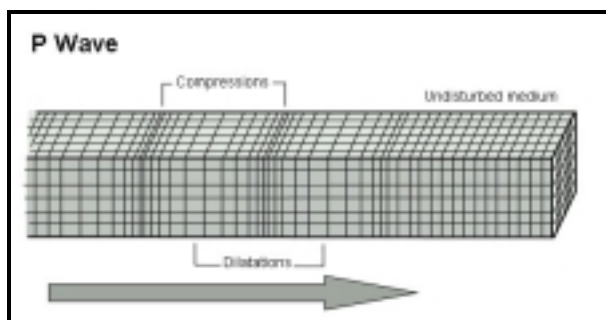
A.1.3 Tipos de Onda

En la sección anterior se definió la velocidad de propagación de las llamadas ondas de cuerpo, sin embargo también se debe considerar otro tipo de onda, las ondas que viajan a través de una superficie (Figura A.2).

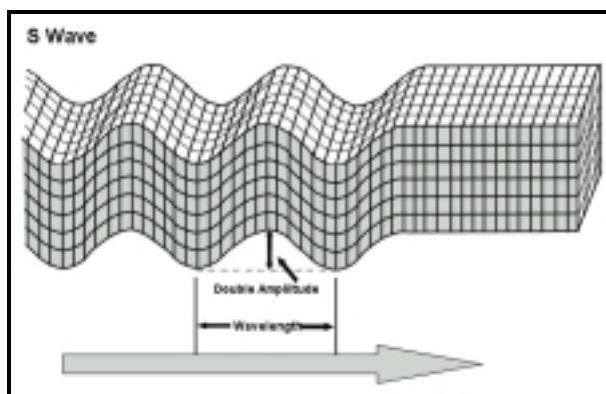
Las ondas P (primarias) son las que van a mayor velocidad, consisten en la transmisión de compresiones (el movimiento de las partículas se realiza en la dirección de propagación) y se propagan a través de material sólido o líquido. Las ondas S o de cizalla, se propagan solo a través de sólidos y el movimiento de las partículas es siempre perpendicular a la dirección de propagación.

Existe otro tipo de onda, llamadas superficiales debido a que solo se propagan a través de una superficie libre, este es el caso de las ondas Rayleigh. El movimiento de las partículas es elíptico retrogrado y se realiza siempre sobre un plano vertical. Su amplitud decrece exponencialmente con la profundidad y su velocidad es menor que la de las ondas corporales.

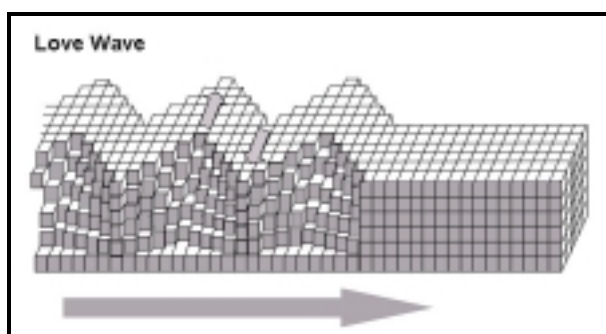
U último tipo de onda, usualmente mal ubicado dentro de las ondas superficiales. Las ondas Love se propagan solo en las capas mas superficiales de la tierra, sin embargo no viajan a través de una superficie libre, se originan en la interfase de dos medios con propiedades mecánicas diferentes y el movimiento de las partículas, al igual que en el caso de las ondas S, es perpendicular a la dirección de propagación.



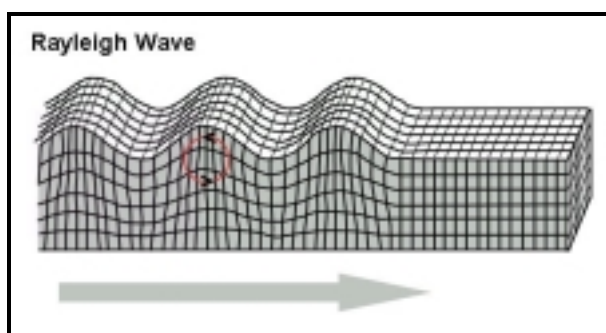
Las ondas P (o de compresión) son ondas internas que se producen cuando la energía pasa a través de las partículas moviéndolas en la dirección de su propagación. Son las que viajan con más velocidad y se pueden transmitir a través de medios sólidos o fluidos.



Las ondas S (o de cizalla) son ondas internas que se producen cuando la energía pasa a través del medio moviendo las partículas en direcciones perpendiculares (S_H y S_V) a la propagación. Son menos rápidas y este movimiento solo puede darse en los sólidos.



Las ondas Love Son ondas superficiales que ocasionan, en las partículas, un movimiento transversal a la dirección de la propagación. Son las más rápidas de las superficiales.



Las ondas Rayleigh son ondas superficiales que presentan un movimiento elíptico retrógrado sobre el plano vertical; similar al de las ondas marinas.

Las ondas Rayleigh generadas por los grandes terremotos son las que causan daños ya que, a parte de las características del movimiento del subsuelo, suelen ser las ondas de mayor amplitud.

La flecha indica la dirección de la propagación

Figura A.2

A.2 OPERACIONES BÁSICAS EN TRATAMIENTO MULTISEÑAL

Autocorrelación: Es el caso especial en el que un conjunto de datos es correlacionado consigo mismo

$$\text{Corr}(f,f) = \int_{-\infty}^{\infty} f_{(t+s)} f_{(s)} ds \quad (A2-1)$$

- **Convolución:** Es la operación matemática, en el dominio del tiempo, que reemplaza cada elemento de una función de entrada por una función de salida de acuerdo a la magnitud del elemento de entrada.

$$f * g = \int_{-\infty}^{\infty} f_{(t-s)} g_{(s)} ds \quad (A2-2)$$

- **Correlación:** Es una medida de la similitud entre dos conjuntos de datos. Cuando los conjuntos son casi iguales el valor de la correlación es grande, si por el contrario los conjuntos son diferentes, el valor será pequeño. A diferencia de la convolución, la correlación no es conmutativa. La correlación de dos señales, f y g, se expresa como

$$\text{Corr}(f,g) = \int_{-\infty}^{\infty} f_{(t+s)} g_{(s)} ds \quad (A2-3)$$

- **Transformada de Fourier:** Operación matemática usadas para convertir funciones que están en el dominio del tiempo en funciones pertenecientes al dominio de la frecuencia.

$$\mathbf{F}f_{(w)} = [2\pi]^{-1/2} \int_{-\infty}^{\infty} f_{(t)} e^{-iwt} dt \quad (A2-4)$$

La **antitransformada** de Fourier es el proceso inverso

$$f_{(t)} = [2\pi]^{-1/2} \int_{-\infty}^{\infty} F_{(w)} e^{iwt} dw \quad (A2-5)$$

A.3 MÉTODO DE INVERSIÓN DE RAYO [15]

El cálculo de los perfiles de refracción se ha realizado de modo paralelo utilizando el *software* Rayfract (V2.47) que calcula el campo de velocidades $V(X, Z)$ a partir de los tiempos de primeras llegadas utilizando el algoritmo de tomografía Delta T-V ¹. A grandes rasgos, los pasos seguidos han sido:

- 1- Lectura de las primeras llegadas de cada traza para cada uno de los tiros de las líneas sísmicas (Figura A.3).
- 2- Determinación de los puntos de inflexión de las curvas espacio-tiempo para definir las distintas velocidades aparentes.
- 3- A partir de la combinación entre estas velocidades y sus respectivos puntos de intercepción sobre el eje espacial, se construye un modelo inicial de distribución de las velocidades en profundidad que sirve de entrada para el cálculo del trazado de rayos.
- 3- El método Delta T-V utiliza la ecuación eikonal para este trazado de estos rayos (*Wavepath Eikonal Traveltime*). Se calculan tantas trayectorias (así como sus correspondientes tiempos de trayecto) como parejas emisor-receptor posea la línea sísmica. El conjunto de tiempos teóricos calculado se compara con los tiempos leídos, de forma que las diferencias temporales se utilizan para modificar el campo de velocidades. El proceso iterativo finaliza cuando las diferencias se han minimizado lo suficiente.

A continuación se describe brevemente la base teórica que se utiliza en el trazado de rayos:

¹ El método Delta T-V esta ampliamente explicado por Gebrande y Miller (1985).

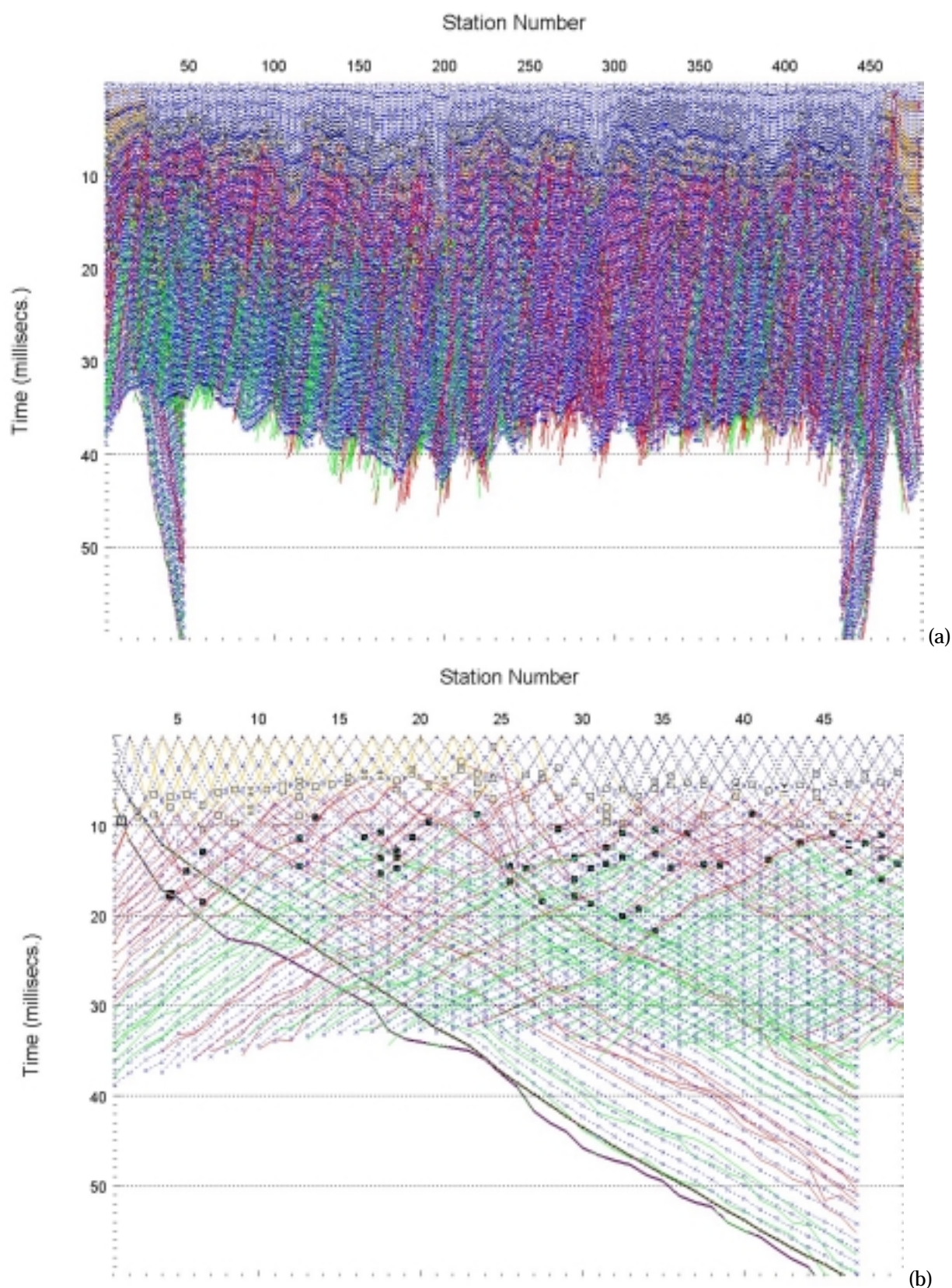


Figura A.3. Curvas espacio-tiempo (dromocronas) construidas a partir de las lecturas de los tiempos de primeras llegadas. (a) Visión general de todas las dromocronas del perfil PS-1. (b) Detalle de las 50 primeras estaciones sensoras. Las señales indican los diferentes puntos de inflexión y definen los intervalos de velocidad aparente. Para el perfil PS-1 se han realizado 22389 lecturas.

Considérese la superficie refractante P que separa dos medios con velocidades V_1 y V_2 (Figura A.4) y se dispara un tiro desde S cuya energía es capturada por varios receptores (R). Si se toma a SF como la representación del rayo que incide con ángulo límite de reflexión en P, entonces X_c representa la distancia entre S y R a partir de la cual, para geófonos situados a distancias mayores (B) se obtienen ondas de cabecera (rayos críticos). El objetivo del método cálculo es determinar la posición del punto F, para así determinar la superficie refractora que quedará tanto mejor definida como mayor número de disparos y geófonos disponga el perfil sísmico.

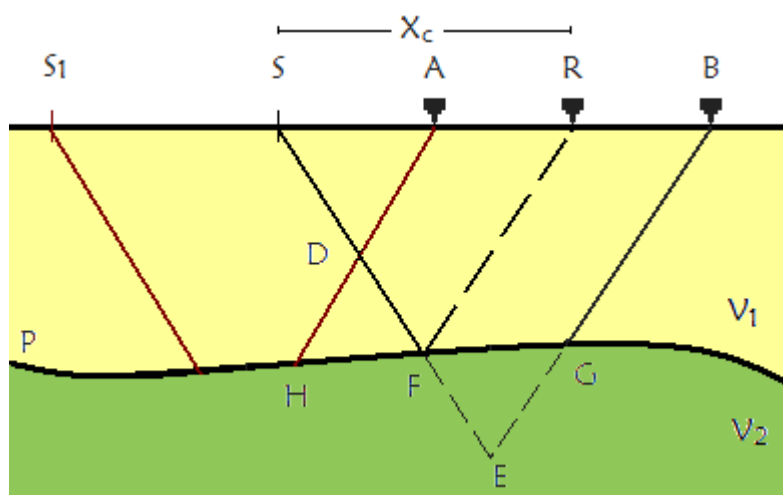


Figura A.4

Para determinar F consideremos los receptores A y B. t_{SB} el tiempo que tarda en llegar la onda desde S a B, y S_1 una fuente distante desde la cual se miden los tiempos de llegada t_{S1A} y t_{S1B} en A y B respectivamente.

Si se pueden definir t_{SB} y $t_{S1B} - t_{S1A}$ como

$$t_{SB} = (SF + GB)/V_1 + FG/V_2 \quad (1)$$

$$t_{S1A} - t_{S1B} = (GB - HA)/V_1 + HG/V_2 \quad (2)$$

$$\text{Entonces, } t_{SA} = t_{SB} - [t_{S1B} - t_{S1A}] = (SF + HA)/V_1 - HF/V_2 \quad (3)$$

Si se consideran los trayectos SDA y SEB, formados por la intersección de los rayos provenientes de S.

$$t'_{SB} = (SF + GB)/V_1 + (FE + EG)/V_1 \quad (4)$$

$$t'_{SA} = (SF + HA)/V_1 - (DF + HD)/V_1 \quad (5)$$

Ahora, si t_{SA} , t_{SB} , t'_{SA} y t'_{SB} son graficados (Figura A.5) versus la distancia horizontal desde S y asumiendo que la distancia HG es una recta; se pueden unir mediante líneas rectas los puntos, entonces la intersección de ambas rectas será la distancia crítica X_c , en un tiempo t_{SFC} . Una vez que el tiempo y la distancia crítica son conocidos, el punto F puede determinarse interpolando el rayo SE entre D y E para obtener el punto en el cual el tiempo calculado para SFC es igual al tiempo t_{SC} .

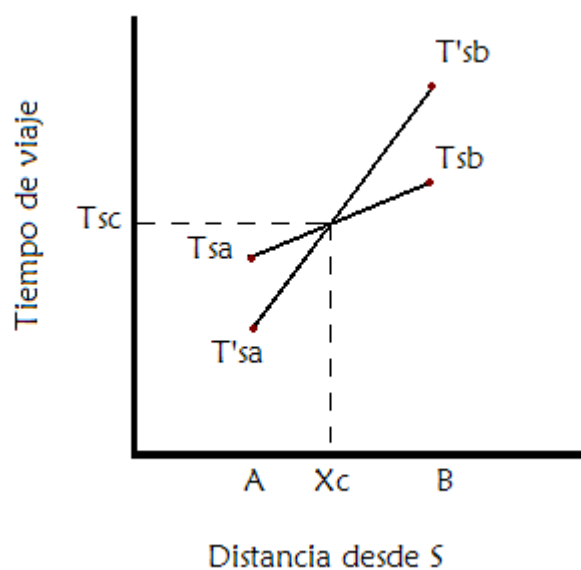


Figura A.5

Para cada disparo pueden ser determinados dos puntos sobre la superficie refractante y mediante de la unión de estos puntos se puede obtener la forma de la primera capa. Una vez conocida P, el tiempo de viaje de las fuentes al refractor y del refractor a los receptores puede ser calculado. La sustracción de estos tiempos a los observados por la onda de cabecera suministra los tiempos de viaje a lo largo del refractor, de donde la velocidad del refractor puede ser calculada.

A.4 COLUMNAS LITOLÓGICAS

A continuación se presentan las columnas litológicas de los distintos sondeos mecánicos que se realizaron con extracción de testigo continuo. Su ubicación se presenta en las Figuras IV.4 y IV.5 (Capítulo IV). Una vez obtenida la sección sísmica correspondiente a los perfiles PS-1, PS-2 y PS-3 estas columnas, junto con el campo de velocidades obtenido por refracción, han servido de calibración para establecer la conversión del tiempo doble de la sección sísmica a profundidad.

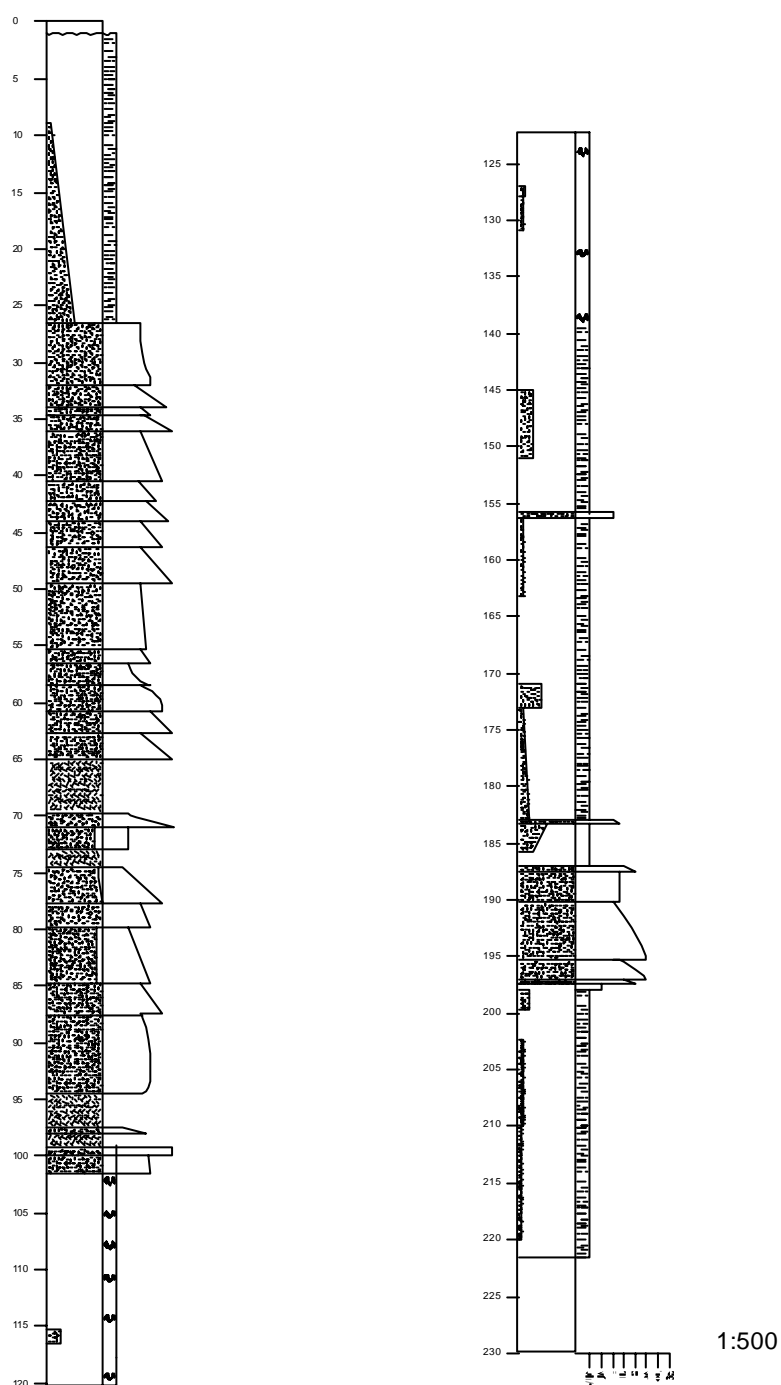


Figura A.6 Pozo A-1

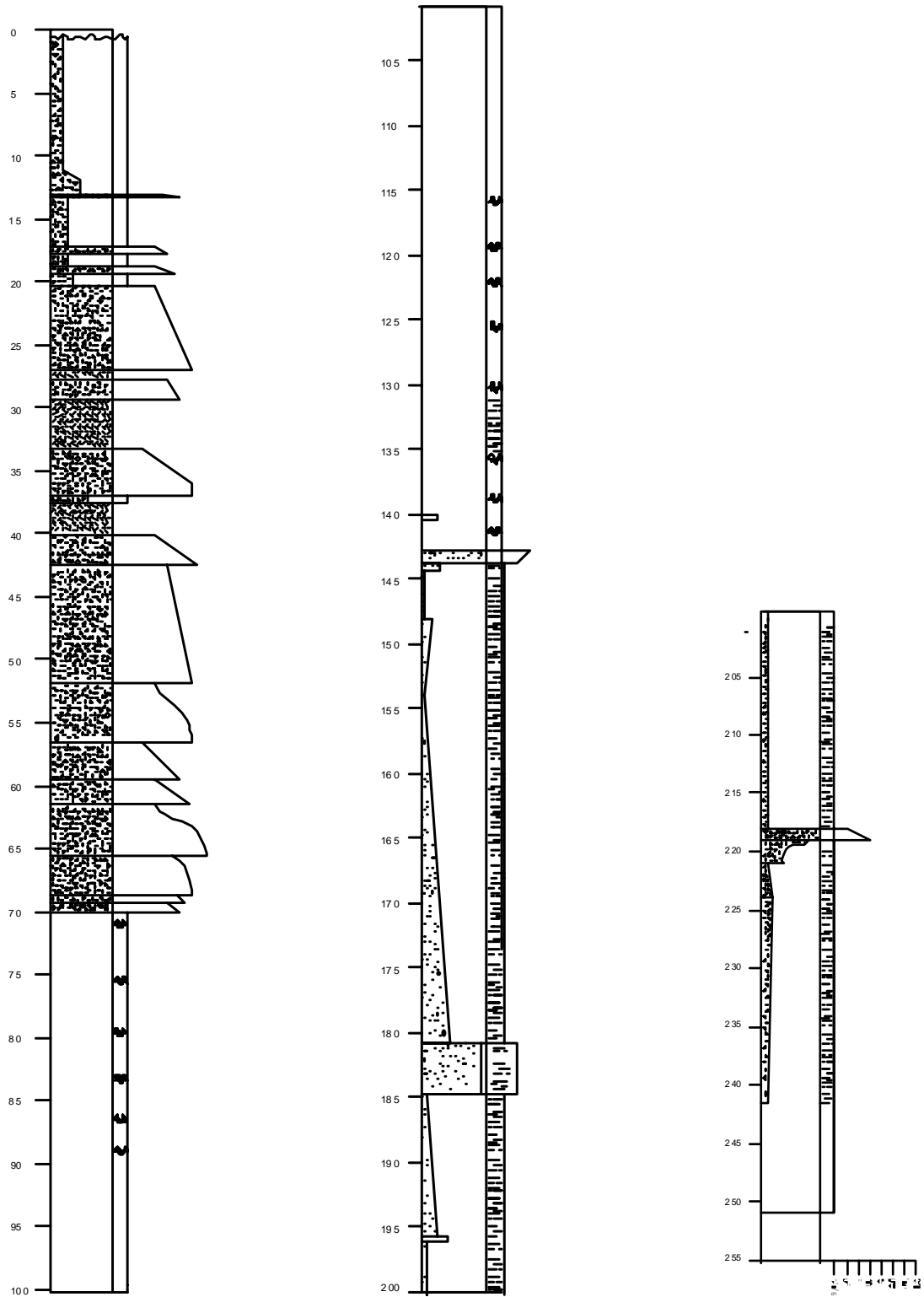


Figura A.7 Pozo A-2

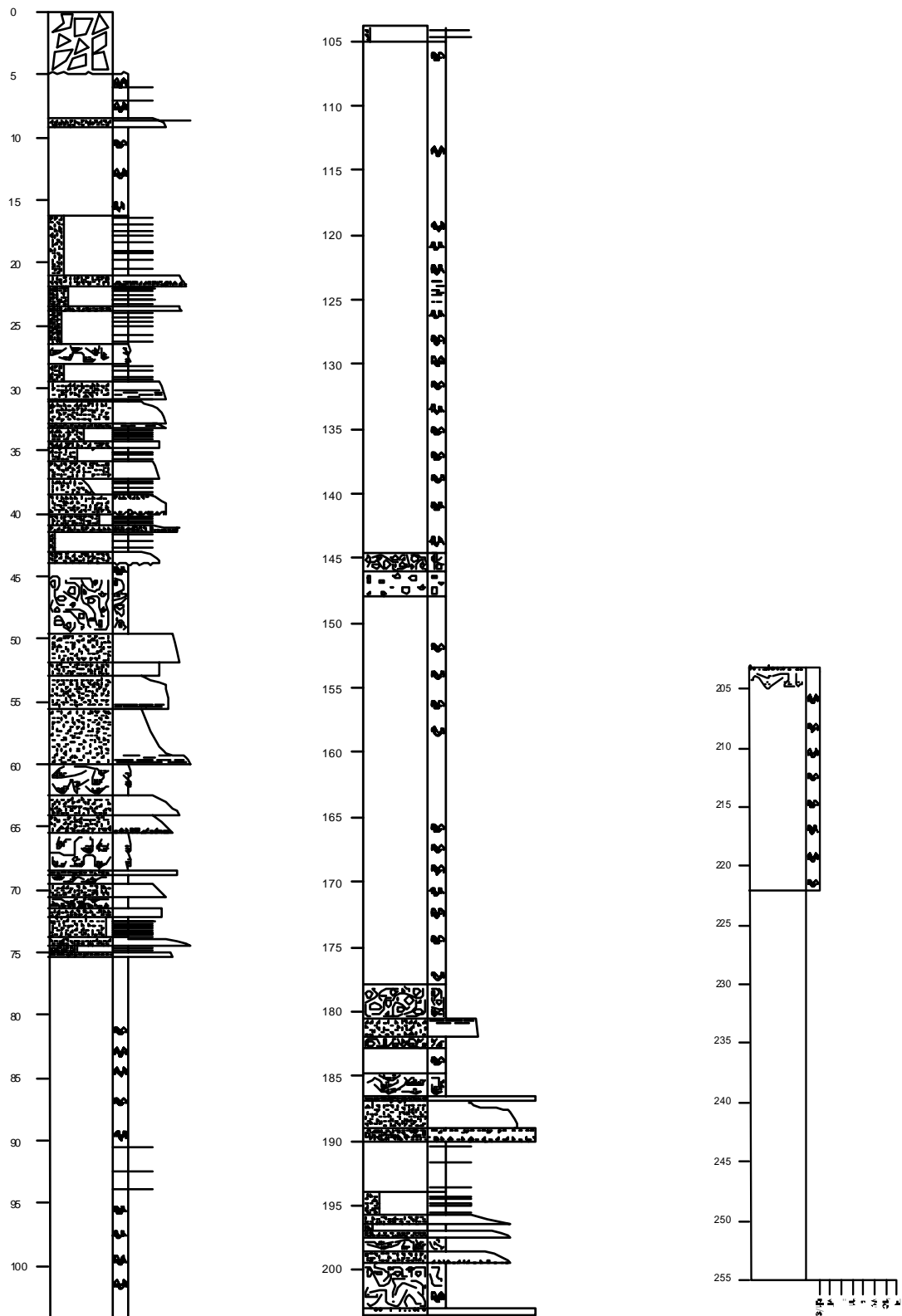


Figura A.8 Pozo A-3

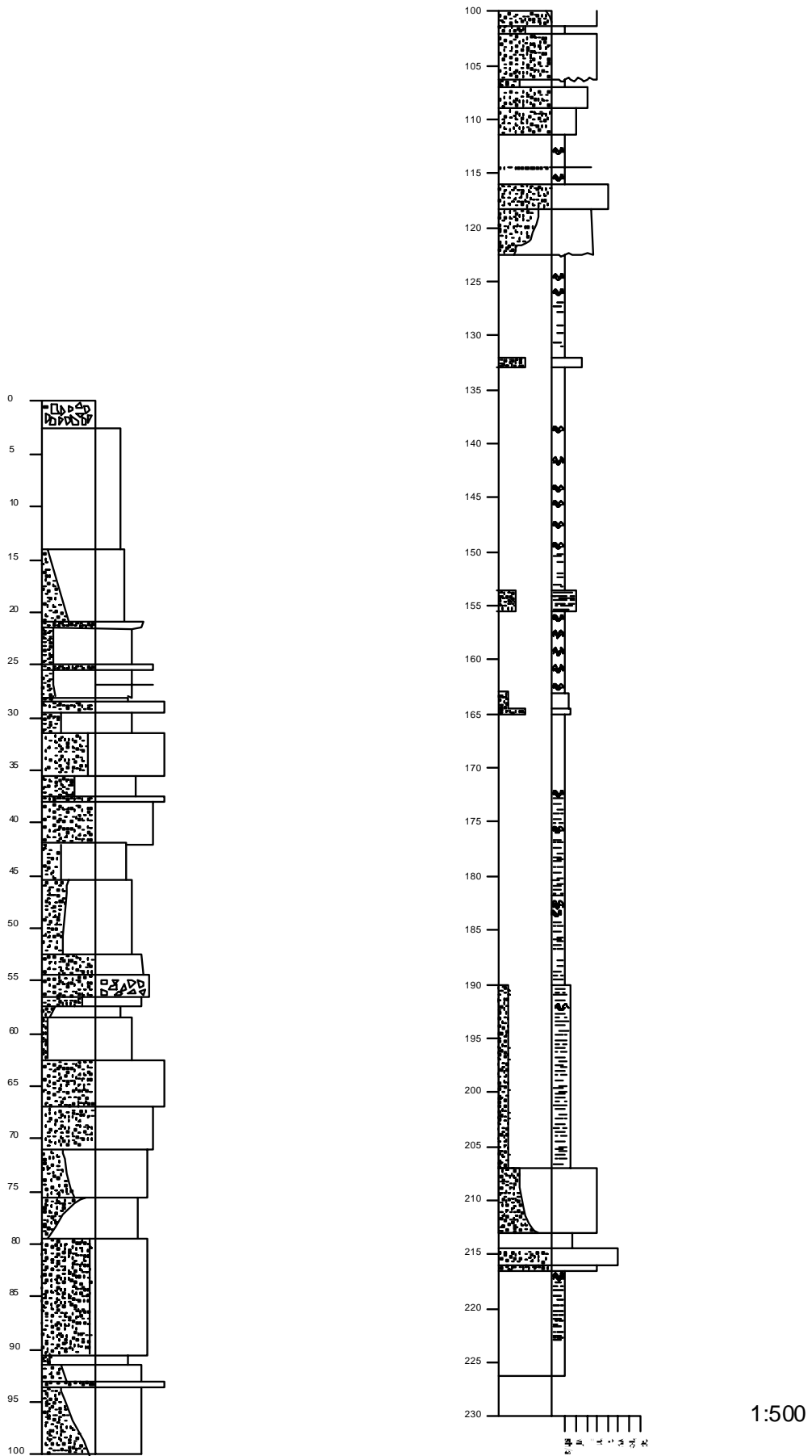


Figura A.9 Pozo L1

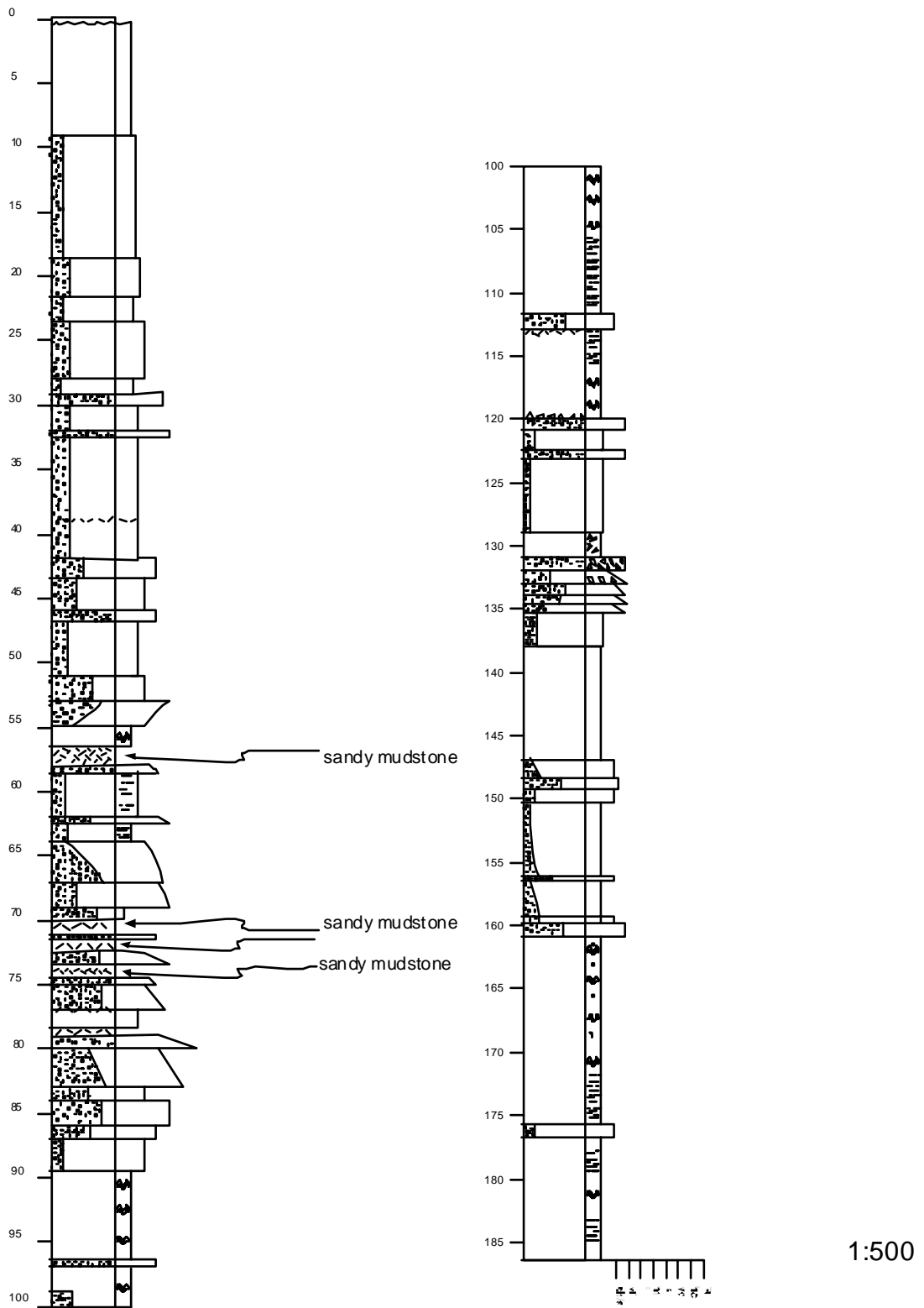


Figura A.10 Pozo L2

Pozo A-1

A continuación se presenta la litología de cada uno de los sondeos realizados.

| Complejo Ainsa 2 | |
|------------------|---|
| 0 – 0.75 m | Recubrimiento de arcillas y rocas. |
| 0.75 – 4 | Margas compactadas. |
| 4 – 24.7 | Margas y alternancias de areniscas con estratificación milimétrica. |
| 24.7 – 64.7 | Alternancia de margas y areniscas con capas de grosor variable que no superan el metro. |
| 64.7 – 69.7 | <i>Sandy-mudstone</i> con <i>slump</i> . |
| 69.7 – 73 | Alternancias de areniscas y margas. |
| 73 – 74.5 | <i>Sandy-mudstone</i> con pliegues. |
| 74.5 – 94.5 | Alternancia de areniscas y margas con grosor superior a 1m. |
| 94.5 – 96.7 | <i>Sandy-mudstone</i> con pliegues. |
| 96.7 – 98 | <i>Slump</i> . |
| 98 – 99.3 | <i>Sandy-mudstone</i> con pliegues. |
| 99.3 – 101.5 | Alternancia de areniscas y margas, las capas de areniscas superan el metro de espesor. |
| Complejo Ainsa 1 | |
| 101.5 – 114.9 | <i>Slump</i> . |
| 114.9 – 119 | Margas con intercalaciones de areniscas. |
| 119 – 120.5 | <i>Slump</i> |
| 120.5 – 123 | Margas. |
| 123 – 132 | <i>Slump</i> . |
| 132 – 136 | <i>Slump</i> . |
| 136 – 145 | Margas compactadas. |
| 145 – 151 | Margas compactadas con intercalaciones de areniscas. |

Pozo A-2

| | |
|-----------------|---|
| 0 – 0,6m | Relleno. |
| 0.6 – 17 | Margas con niveles de areniscas que no superan los 10 cm. |
| 17 – 29 | Areniscas. |
| 29 – 33 | <i>Debris Flow</i> (arenas y códulos). |
| 33 – 37.2 | Alternancia de areniscas y margas. |
| 37.2 – 40 | <i>Debris Flow</i> . |
| 40 – 70 | Areniscas con intercalaciones de margas. |
| 70 – 142.25 | Margas (<i>slump</i>). |
| 142.25 – 144.25 | Areniscas. |
| 144.25 – 182 | Margas. |
| 182 – 185 | Areniscas. |
| 185 – 218 | Margas. |
| 218 – 220 | Areniscas. |
| 220 – 250.9 | Margas. |

Pozo L-1

| Complejo Ainsa 2 | |
|------------------|--|
| 0 – 2.35 m | Gravas y materiales arcillosos de río. |
| 2.35 – 13 | Arcillas y limos muy compactados. |
| 13 – 20 | Arcillas con intercalaciones de capas delgadas con menos del 50% de limo. |
| 20 – 42 | Areniscas y arcillas. |
| 42 – 63 | Alternancias de arenas y arcillas. |
| 63 – 111 | Areniscas compactadas. |
| 111 – 116 | Margas slumpizadas. |
| 116 – 123 | Areniscas. |
| 123 – 207 | Margas con intercalaciones de areniscas. |
| Complejo Ainsa 2 | |
| 207 – 217 | Capas de areniscas y arcillas alternantes (capas delgadas, en ocasiones 1 m de areniscas compactadas). |
| 217 – 220 | Arcillas y margas estratificadas compactadas. |
| 220 – 226.4 | Arcillas y margas estratificadas compactadas. |

Pozo L-2

| | |
|---------------|--|
| 0 – 0.25 m | Cobertura vegetal. |
| 0.25 – 9 | Margas compactadas. |
| 9 – 16.5 | Margas compactadas con pequeñas capas de arenas finas. |
| 16.5 – 35 | Margas compactadas alternando con capas de areniscas. |
| 35 – 42 | Margas con capas de areniscas. |
| 42 – 73 | Margas con capas de areniscas (menores a 50 cm). |
| 73 – 86 | Margas con capas de areniscas mas potentes (1 m). En medio <i>sandy-mudstone</i> . |
| 86 – 120 | Margas compactadas. |
| 120 – 124 | Margas compactadas con tres capas potentes de areniscas (50 cm). |
| 124 – 128 | Margas compactadas. |
| 128 – 131.9 | Brechas diagenéticas. |
| 131.9 – 136 | Alternancias de margas y capas de areniscas de hasta 50 cm de potencia. |
| 136 – 138.5 | Margas compactadas. |
| 138.5 – 147 | <i>Slump</i> . |
| 147 – 150.5 | Margas y areniscas estratificadas. |
| 150.5 – 152 | Margas compactadas. |
| 152 – 154.5 | <i>Slump</i> . |
| 154.5 – 157.2 | Margas con intercalaciones de areniscas. |
| 152.2 – 159.5 | Margas Compactadas |
| 159.5 – 161.2 | Areniscas y Margas. |
| 161.2 – 171.3 | <i>Slump</i> . |
| 171.3 – 180.4 | Margas compactadas. |
| 180.4 – 183.5 | <i>Slump</i> . |
| 183.5 – 186.7 | Margas compactadas. |

A.5 TÉRMINOS ESPECÍFICOS USADOS EN LA MEMORIA

TÉRMINOS TÉCNICOS

- **Aliasing:** Es el solapamiento entre altas y bajas frecuencias producida por un muestreo inadecuado de la señal.
- **Cobertura (*Fold*):** Número de trazas que ha sido sumado para formar una sola traza CMP en la nueva sección apilada.
- **CDP y CMP:** En sísmica multicanal, donde las capas no buzcan, el punto común a profundidad que indica la mitad del camino recorrido por la onda desde la fuente al receptor se le denomina CDP (Punto Común en Profundidad); en este caso de horizontes planos, el CDP esta ubicado verticalmente debajo del CMP (Punto Medio Común), que es el punto medio entre la fuente y receptor, en superficie.
- **Difracción:** Es un tipo de especial de reflexión, pero a diferencia de esta los eventos de difracción se presentan con una curvatura mayor. Cuando la onda sísmica se propaga por un medio en el que encuentra una discontinuidad o un cambio abrupto de las propiedades físicas, el frente de onda que choca con la discontinuidad se dispersa radialmente generando varios frentes de ondas.
- **Filtro:** Proceso o algoritmo que emplea limites preestablecidos con el fin de eliminar porción de la data sísmica que se considere no deseada
- **Header** (Cabecera): Fichero en donde se encuentran alguno de los parámetros de posición, adquisición y procesamiento, además de alguna otra información perteneciente a cada traza o registro sísmico.
- **Impedancia Sísmica:** Es el producto entre la densidad del medio y la velocidad de la onda de propagación a través de ese medio. El contraste de impedancia entre las capas, causan las reflexiones registradas en los perfiles de sísmicos.

- **Muestreo:** Es el paso de la señal en formato analógico a digital, la señal continua es reemplazada por una serie de valores a intervalos finitos en tiempo.
- **Ondícula fase cero:** Es la ondícula (*wavelet*) que tiene su espectro de fase igual a cero. Es simétrica respecto al pico central, el cual tiene la amplitud máxima.
- **Ruido:** Cualquier energía registrada en los tiros de campo distinta a la señal deseada (reflexiones) . Puede ser coherente (energía sísmica que presenta una fase constante entre traza y traza, como por ejemplo los múltiples y el *ground roll*) o aleatorio (puede tener varias fuentes, un geófono mal plantado, el viento, movimiento en los alrededores, etc).
- **Tomografía Sísmica:** Es una técnica que utilizada para medir la distribución (3D) de la velocidad o la reflectividad en un volumen de datos, usando numeras fuentes y receptores. El espacio es dividido en celdas, cada una con una velocidad y reflectividad especifica. El modelo final es el que mejor describe el subsuelo.

TÉRMINOS GEOLÓGICOS

- **Debris flow:** Nombre que se le da a la corriente de derrubios.
- **Flysch:** Nombre que se da a las formaciones sedimentarias masivas potentes, mayoritariamente turbidíticas, depositadas en regiones orogénicas antes de su deformación.
- **Margas:** Roca sedimentaria arcillosa que contiene de un 35 a un 65% de carbonato cálcico. Tiene un aspecto terroso de color variable entre rojizo y blanco, y entre gris oscuro y gris azulado.
- **Olitostromo:** Depósito sedimentario que consiste en una masa rocosa caótica, contiene clastos grandes compuestos de material más antiguo que la secuencia sedimentaria circundante. Tales depósitos se forman generalmente por material deslizado bajo efecto gravitatorio.

- **Sandy-Mudstone:** Roca carbonática constituida esencialmente por micrita, que contiene menos de un 10% de granos, partículas de diámetro 1/16 mm y se forma en aguas tranquilas.
- **Slump:** Mecanismo de transporte que experimentan los fluidos en inercia, involucra una mezcla íntima entre arcilla y agua que al desplazarse sufre un cizallamiento generalizado.
- **Turbidita:** Capa de sedimentos depositados en un solo episodio por una corriente de turbidez. En su forma más completa puede ser descrita por la secuencia tipo de *Bouma*. La repetición de capas de turbiditas puede generar potentes series turbidíticas en zonas de talud y de llanura abisal.