



UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

Caracterización de Formación mediante Relación V_p/V_s obtenidas con Procesamiento de Onda P y PS

Carolina Buitrago Torres

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Ciencias, Departamento de Geociencias
Bogotá D.C., Colombia
2016

Caracterización de Formación mediante Relación V_p/V_s obtenidas con Procesamiento de Onda P y PS

Carolina Buitrago Torres

Tesis o trabajo de grado presentada(o) como requisito parcial para optar al título de:
Magister en Geofísica

Director:
Ph.D. Luis Alfredo Montes Vides

Línea de Investigación:
Prospección Sísmica

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Ciencias, Departamento de Geociencias
Bogotá D.C., Colombia
2016

Dedicatoria

A mi familia que es el pilar, a mi padre Gonzalo Buitrago por su constante apoyo y ejemplo de crecer diariamente como ser humano, a mi madre Helda Torres por su amor, comprensión y ejemplo de profesionalismo, mi hermana María del Mar, por confiar y su constante apoyo con todo su amor; a mi hermano Andrés por su alegría y sencillez con que me apoya.

En general a toda mi familia, que siempre me han acompañado y me inspiran a seguir los sueños y cumplir las metas. A mis amigos incondicionales que me han aportado sus conocimientos; gracias a todos ellos por ser parte de mi vida.

Agradecimientos

Quiero expresar mis más profundos agradecimientos, a aquellas personas y empresas que me colaboraron en el desarrollo de esta tesis, con su conocimiento, tiempo y comprensión.

A mi director de tesis, PhD. Luis Alfredo Montes Vides, por su discernimiento, orientación y motivación, quien ha sido fundamental para poder culminar con este trabajo. A la vez a entidades como Pacific Rubiales Energy por permitirme el uso de sus datos utilizados en el presente trabajo, especialmente al señor Gabriel Álvarez.

A la empresa Petroseis Ltda. por haber aceptado realizar mi tesis en tan prestigiosa compañía. Al señor Enrique García, por su invaluable apoyo, al señor Carlos Rodríguez por su conocimiento y tiempo. A la entidad Inforpetrol S.A, por permitirme desarrollar parte mi trabajo en esta renombrada empresa. A la Universidad Nacional de Colombia por haberme aceptado y abierto las puertas para poder estudiar la maestría, como también a los diferentes docentes que me compartieron sus conocimientos.

A mis apreciados compañeros Diana Marcela Rodríguez y Juan Guillermo Restrepo por socializar sus conocimientos y experiencia, por ayudarme a superar varias etapas de este proceso; gracias por su amistad.

Índice general

Agradecimientos	VII
Contenido	IX
Lista de figuras	X
Lista de tablas	XIII
Glosario	XV
Resumen	XVII
1. Introducción	1
1.1. Planteamiento del problema	1
1.2. Justificación	1
1.3. Objetivos	2
1.3.1. Objetivo general	2
1.3.2. Objetivos específicos	2
2. Marco Teórico	3
2.1. Onda convertida	3
2.2. Evaluación Petrofísica	11
3. Marco Geológico	13
3.1. Marco Estratigráfico	16
4. Metodología	18
4.1. Información Geofísica Disponible	18
4.2. Procesamiento de datos sísmicos	25
4.2.1. Procesamiento de onda P	25
4.2.2. Procesamiento de onda PS	30
5. Resultados	43
6. Conclusiones y recomendaciones	51
6.1. Conclusiones	51

6.2. Recomendaciones	51
A. Anexo No. 1: PSTM DE ONDA P	52
B. Anexo No.2: PSTM DE ONDA PS	54
C. Anexo No.3: MODELO DE VELOCIDAD DE ONDA P	55
D. Anexo No.4: MODELO DE VELOCIDAD DE ONDA PS	56
E. Anexo No.5: CÁLCULO DE LA RELACIÓN VP/VS CON VELOCIDADES SÍSMICAS	57
F. Anexo No.6: CÁLCULO DE LA RAZÓN de POISSON CON VELOCIDADES SÍSMICAS	59
Bibliografía	61

Índice de figuras

2-1. Esquema de una reflexión PS, adaptado de Stein and Wysession (2003).	4
2-2. Gráfica de ubicación del punto de conversión en función de la profundidad (Bautista, 2011).	6
2-3. Trayecto de rayo de onda convertida en un medio de capas horizontales (Tessmer and Behle, 1988).	7
3-1. Columna Estratigráfica generalizada de la Cuenda de los Llanos (ANH, 2012).	15
4-1. Ubicación de pozo en la línea sísmica.	18
4-2. Cálculo de RW.	21
4-3. Análisis de pozo para las formaciones reconocidas, aproximadamente de 1600 a 2300 pies.	22
4-4. Análisis de pozo para las formaciones reconocidas, aproximadamente de 2300 a 3100 pies.	24
4-5. Secuencia de procesamiento de Onda P.	26
4-6. Cálculo y aplicación de corrección estática por refracción de onda P, en el dominio de la fuente (azul) y en el dominio de receptor (rojo).	27
4-7. Campo de velocidades de onda P.	28
4-8. Migración pre-apilado en tiempo de onda P.	29
4-9. Secuencia de procesamiento de Onda PS.	31
4-10.Registro sin rotación a offsets negativos.	32
4-11.Registro con rotación a offsets negativos.	32
4-12.Cálculo y aplicación de corrección estática por refracción de la onda PS, en el dominio de la fuente (azul) y en el dominio de receptor (rojo).	33
4-13.Campo de velocidad de onda PS.	34
4-14.Migración pre-apilado en tiempo de onda PS.	35
4-15.Secciones sísmicas PSTM de onda P y onda PS convertidas a profundidad.	36
4-16.Sismograma sintético a partir de registros de pozo y datos sísmicos.	37
4-17.Amarre del sismograma sintético con la sección sísmica de onda P.	38
4-18.Interpretación sísmica de la PSTM de onda P.	39
4-19.Sismograma sintético a partir de registros de pozo y datos sísmicos de la onda PS.	40
4-20.Amarre del sismograma sintético con la sección sísmica de onda PS.	41
4-21.Interpretación sísmica de la PSTM de onda PS.	42

5-1. Secciones PSTM de onda P y PS, correlacionando los tiempos de los toques de las formaciones.	44
5-2. Secciones PSTM de onda P y PS, correlación de las velocidades promedio de la Formación León y Carbonera.	45
5-3. Correlación de la relación v_p/v_s de las formaciones reconocidas, entre la información sísmica y de pozo.	46
5-4. Crossplot entre v_p , v_s y GR, en la Formación León y Carbonera.	47
5-5. Crossplot entre v_p/v_s y v_p , y GR, en la Formación León y Carbonera.	48
5-6. Crossplot entre v_p/v_s y v_s , y GR, en la Formación León y Carbonera.	49
5-7. Crossplot entre v_p/v_s y Relación de Poisson, y GR, en la Formación León y Carbonera.	49
A-1. Interpretación de la migración pre-apilado en tiempo de onda P.	53
B-1. Interpretación de la migración pre-apilado en tiempo de onda PS.	54
C-1. Modelo de velocidad de ONDA P	55
D-1. Modelo de velocidad de ONDA PS.	56
E-1. Relación V_p/V_s calculada con Velocidades Sísmicas en profundidad.	58
F-1. Razón de Poisson calculada con Velocidades Sísmicas en profundidad.	60

Índice de cuadros

4-1. Parámetros de adquisición de la línea sísmica	19
4-2. Parámetros de adquisición de la línea sísmica	19
4-3. Tabla inventario de los registros de pozo referenciados en la tesis	20
4-4. Tabla inventario de los registros de pozo referenciados en la tesis	20
4-5. Descripción de las Formaciones reconocidas	21
4-6. Resultados de la caracterización, de las formaciones reconocidas	23

Glosario

Caracterización: La caracterización es un tipo de descripción cualitativa que puede recurrir a datos o a lo cuantitativo con el fin de profundizar el conocimiento sobre algo. Para cualificar ese algo previamente se deben identificar y organizar los datos, y a partir de ellos, describir (caracterizar) de una forma estructurada; y posteriormente, establecer su significado (sistematizar de forma crítica)(Bonilla, Hurtado, Jaramillo, 2009).

Onda P: Las ondas P (primarias o primae del verbo griego), son ondas longitudinales o compresionales, lo cual significa que el suelo es alternadamente comprimido y dilatado en la dirección de la propagación.

Onda S: El segundo tipo de ondas que se propagan en sólidos son las ondas de corte, llamadas ondas S. En este caso la deformación que sufre el sólido es en dirección perpendicular a la trayectoria del frente de ondas. La propagación de estas ondas produce un esfuerzo cortante en el medio de donde se origina el nombre de ondas de corte o cizalla.

Onda PS: se define como una onda P que incidente en una interface, se refleja como una onda S.

Migración Pre-Apilado en Tiempo (PSTM): La migración tiene como objetivo mover los reflectores buzantes a su verdadera posición y colapsar las difracciones, se realiza en el dominio del tiempo antes del apilado.

Relación de Poisson: Una constante elástica que es una medida de la compresibilidad de un material perpendicular al esfuerzo aplicado, o la relación entre la deformación latitudinal y la deformación longitudinal. Esta constante elástica debe su nombre al matemático francés Simeón Poisson (1781-1840). La relación de Poisson puede expresarse en términos de las propiedades que pueden medirse, incluyendo las velocidades de ondas P y ondas S.

Registro de Pozo: herramienta fundamental para determinar la litología en el subsuelo, permitiendo agregar información, que aunque indirecta es muy valiosa por las características de cada registro. Se puede realizar de acuerdo a la finalidad de cada uno y objetivo de estudio: la identificación litológica (Gamma Ray, SP y Caliper), fluidos de perforación (resistividades profunda, media, somera), porosidad (neutrón, sónico, densidad y efecto fotoeléctrico).

Resumen

En este estudio se caracterizó la Formación León y Carbonera, en la Cuenca de los Llanos utilizando el campo de velocidad de onda P y de onda S; para ello fue necesario establecer una secuencia de procesamiento para la onda S. Adicionalmente, con la información de un pozo ubicado en el punto fuente 1734 de la línea sísmica, usando los registros Gamma Ray, Potencial Espontáneo, Absorción fotoeléctrica, Caliper, Resistividad, Densidad; se realizó el análisis petrofísico con el cual se obtuvo como resultado la distribución de arcillas y arenas, de la Formación León y Carbonera.

Con los registros de pozo sísmico y dipolar, se calculó un campo de onda P y onda S, que permitió ver el comportamiento de las rocas ante cada uno de los campos. Después se hizo el procesamiento de la onda P y onda CS para obtener la respuesta en toda la sección sísmica, siendo necesario desarrollar la secuencia de procesamiento de la onda S, cuyo resultado fue obtener el campo de velocidad de la onda P y onda CS. Teniendo v_p y v_s , se calculó la relación v_p/v_s con las velocidades sísmicas y las velocidades instantáneas de pozo, y se pudo observar que las relaciones varían de la misma forma, y que la mejor forma de identificar los dos tipos de litología es con velocidad de la onda P, relación v_p/v_s y registro Gamma Ray.

Palabras clave: Caracterización, Relación v_p/v_s y Onda PS.

Abstract

In this study, the Leon and Carbonera Formation were characterized in the Llanos Basin using the P wave and S wave velocities; for this, it was necessary to establish a processing sequence for the S wave. Additionally, with the information from a well located at source point 1734 of the seismic line, using the Gamma Ray log, Spontaneous Potential, Photoelectric Absorption, Caliper, Resistivity, Density ; The petrophysical analysis was carried out with which the distribution of clays and sands of the León and Carbonera Formation was obtained.

With the sonic and dipole well logs, a P wave and S wave velocities was calculated, which allowed us to see the behavior of the rocks before each of the fields. Then the processing of the P wave and CS wave was done to obtain the response in the whole seismic section, being necessary to develop the sequence of processing of the S wave, whose result was to obtain the velocities of the P wave and CS wave. With v_p and v_s , the relation v_p/v_s was calculated with the seismic velocities and the intervalic velocities, and it was observed that the relations vary in the same way, and that the best way of identifying the two types of lithology is with P-wave velocity, v_p/v_s ratio and Gamma Ray log.

Keywords:Characterization, Ratio v_p/v_s y PS-Wave.

1. Introducción

En la cuenca de los Llanos orientales se han realizado diferentes estudios de geología y geofísica, entre otros; sin embargo aún se continúa la búsqueda de información en esta cuenca del país, innovando en el uso de nuevas tecnologías en los temas de adquisición, procesamiento e interpretación de datos sísmicos.

La caracterización de una Formación de interés a partir de campos de velocidad de onda P y CS, es un método que permite la identificación de variaciones litológicas y presencia de fluidos, ya que a partir de dicha información se pueden estimar características físicas como velocidad de las ondas sísmicas y la densidad, que pueden correlacionarse con el tipo de roca y presencia de fluidos en el subsuelo. Por tal motivo fue necesario desarrollar una secuencia de procesamiento de onda CS, que no existía en el país.

El presente trabajo busca caracterizar una Formación de interés en la cuenca de los Llanos a partir de campo de velocidad de onda P y CS.

1.1. Planteamiento del problema

Para caracterizar una formación de interés, las ondas compresionales no tienen la información suficiente acerca del medio en el cual se propagan; es necesario tener la información adicional de la onda CS (Garotta, 2000).

Un método para determinar el tipo de litología y posible presencia de fluidos, es caracterizar una Formación de interés a partir de datos de velocidad de onda P y onda S, para esto es necesario hacer procesamiento de onda P y PS (Garotta, 2000).

Adicionalmente en el país no había establecida una secuencia de procesamiento de la onda S; empresas como ICP envían a CGG veritas, sus datos sísmicos de onda convertida para que los procesen fuera del país, y lo mismo compañías como Pacific Rubiales.

1.2. Justificación

Las ondas de cizalla son más difíciles de procesar que las ondas compresionales, y a menudo no dan una mejor imagen, sin embargo el uso de la onda de cizalla está justificada por la información adicional que brinda (Garotta, 2000). La onda P y la onda convertida

(PS) tienen información acerca de las propiedades físicas del medio en el cual se propagan. Usando velocidad de onda P y de la relación v_p/v_s , se puede hacer una discriminación que proporciona información de la anisotropía, contrastes fuertes de velocidad por posibles cambios litológicos, y anomalías que pueden indicar la existencia de gas o fluidos (Stewart et al., 2003), permitiendo caracterizar litológica y estructuralmente una sección de interés.

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo general

Caracterizar una Formación en la Cuenca de los Llanos, con datos de velocidad de onda P y S, utilizando información sísmica y de pozo.

1.3.2. Objetivos específicos

Los objetivos específicos que contribuyen a lograr el objetivo general son:

- Evaluar la zona de estudio utilizando los registros de pozo, disponibles para esta investigación.
- Calcular los valores de velocidad de onda P y S, con los registros sónico y dipolar.
- Plantear e implementar una secuencia de procesamiento para onda convertida.
- Calcular los valores de velocidad RMS e interválicas para las ondas P y PS, usando información sísmica.
- Caracterizar una formación usando valores v_p , v_s y la relación v_p/v_s , a partir de datos sísmicos y de pozo.

2. Marco Teórico

2.1. Onda convertida

Una onda sísmica es una onda elástica que se propaga en el subsuelo, la velocidad de propagación de la onda depende de las propiedades físicas del medio en el cual se propaga. Cuando la onda propagada encuentra un cambio en el medio, se pueden generar varios tipos de ondas, como son onda compresional P y onda de cizalla S, entendiéndose que la onda P, es una onda longitudinal y la onda S, es una onda transversal (Stein and Wysession, 2003).

La onda compresional P, se propaga en la misma dirección en que el campo cambia, al irse propagando genera una compresión y extensión, haciendo que el volumen cambie. La ecuación de esta onda es:

$$\nabla^2\phi(x, t) = \frac{1}{v_p^2} \frac{\partial^2\phi(x, t)}{\partial t^2}, \quad (2-1)$$

donde:

$$v_p = \left(\frac{\lambda + 2\mu}{\rho} \right)^{1/2}, \quad (2-2)$$

λ = constante de Lamé

μ = constante de rigidez

ρ = densidad

En la onda de cizalla S, la dirección de propagación del campo es perpendicular a la dirección de propagación de la onda, esta onda no genera cambio en el volumen, genera un desplazamiento perpendicular a la dirección de propagación; la ecuación de esta onda es:

$$\nabla^2\Gamma(x, t) = \frac{1}{v_s^2} \frac{\partial^2\Gamma(x, t)}{\partial t^2}, \quad (2-3)$$

donde:

$$v_s = \left(\frac{\mu}{\rho} \right)^{1/2}. \quad (2-4)$$

μ = constante de rigidez

ρ = densidad

Esta onda se puede polarizar en dos direcciones: una se define como SV, onda de cizalla que tiene desplazamiento en el plano (X-Z) y SH que tiene desplazamiento en la dirección Y paralela a la superficie de la Tierra, ambas ondas SV y SH tienen desplazamiento perpendicular a la dirección de propagación.

Las ondas P y SV se acoplan entre sí, en contacto con una interface, mientras que SH permanece separada (Stein and Wysession, 2003). Ahora considerando el caso específico de una onda P incidente, en una interface, parte de la energía se refleja como una onda SV; como se muestra en la Figura 2-1:

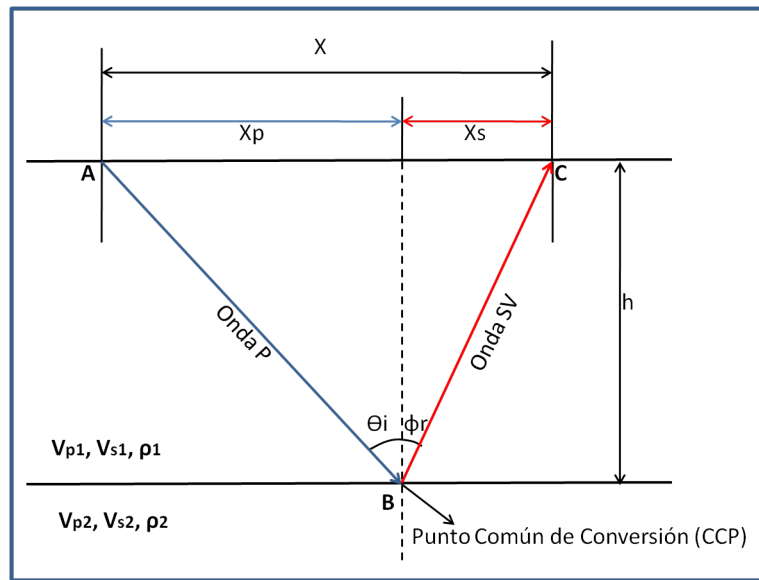


Figura 2-1.: Esquema de una reflexión PS, adaptado de Stein and Wysession (2003).

Para calcular el tiempo de viaje de la onda convertida desde A hasta C, se tiene:

$$t = \frac{AB}{v_{p1}} + \frac{BC}{v_{s1}}. \quad (2-5)$$

La ley de snell establece que:

$$p = \frac{\sin \theta_i}{v_{p1}} = \frac{\sin \phi_r}{v_{s1}}. \quad (2-6)$$

Por lo tanto, el cálculo de tiempo en términos de las velocidades, espesor y ángulos de incidencia:

$$t = \frac{h}{v_{p1} \cos \theta_i} + \frac{h}{v_{s1} \cos \phi_r}, \quad (2-7)$$

o

$$t = \frac{h}{v_{p1} \sqrt{1 - p^2 v_{p1}^2} + \frac{h}{v_{s1}} \sqrt{1 - p^2 v_{s1}^2}}. \quad (2-8)$$

Así como el tiempo de viaje cambia, considerando un cambio en la velocidad de la onda SV reflejada, el punto de reflexión también cambia, y se llama punto de conversión. La distancia x , entre la fuente y el receptor es:

$$x = x_p + x_s = t_p v_{p1} \sin \theta_i + t_p v_{s1} \sin \phi_r. \quad (2-9)$$

Para valores pequeños, en la relación entre la distancia fuente-receptor y la profundidad del horizonte de reflexión, x/h , y la razón entre los tiempos de viaje:

$$\frac{t_s}{t_p} \approx \frac{v_{p1}}{v_{s1}}. \quad (2-10)$$

El punto de conversión, según Tessmer and Behle (1988) y Thomsen(1999), es:

$$x_p \approx \frac{x}{1 + \frac{v_{s1}}{v_{p1}}}; x_s \approx \frac{x}{1 + \frac{v_{p1}}{v_{s1}}}. \quad (2-11)$$

A continuación, se muestra la gráfica de la distancia horizontal del punto de conversión de una reflexión PS, como función de h , para diferentes valores v_{p1}/v_{s1} . Para hacer esta gráfica se usó la ecuación Ecuación 2-11:

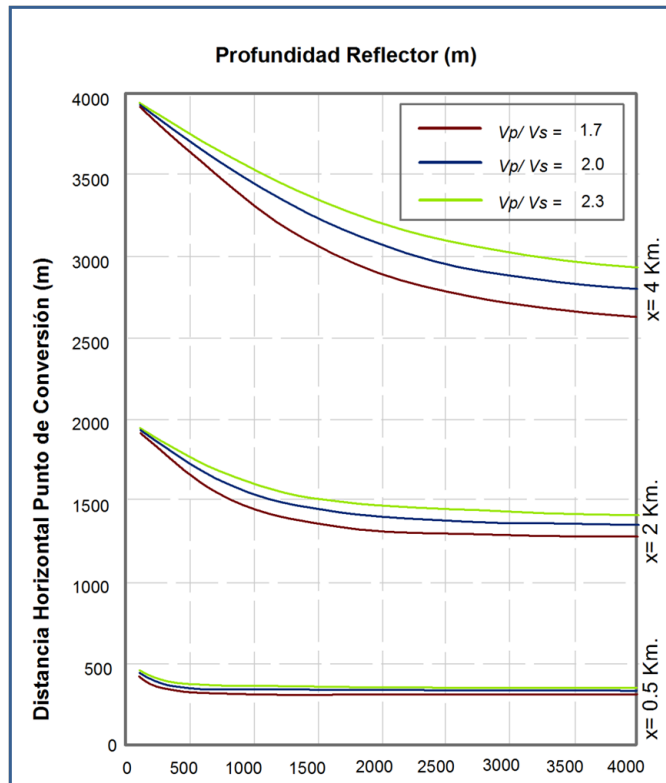


Figura 2-2.: Gráfica de ubicación del punto de conversión en función de la profundidad (Bautista, 2011).

En la Figura 2-2 se ve que el punto de conversión, depende de la distancia fuente-receptor, la profundidad del horizonte de reflexión y de la razón de las velocidades v_{p1}/v_{s1} . Al conocer los puntos de conversión, se pueden organizar las trazas de un programa sísmico de adquisición multicomponente, para obtener imágenes del subsuelo, según Tessmer and Behle (1988).

Para realizar el procesamiento y obtener un apilado de onda convertida, establecen dos pasos importantes, el primero se debe organizar las trazas sísmicas por punto común de conversión y el segundo paso es realizar un análisis de velocidades para onda convertida, desde tiempo de viaje y velocidades RMS.

EL primer paso es organizar la información por punto común de conversión, se debe tener en cuenta que este punto cambio con la profundidad del reflector y con la relación vp/vs .

Tessmer and Behle (1988), muestran una serie de expansión para onda convertida PS y SP en un medio de capas horizontales, donde el tiempo de viaje al cuadrado continúa siendo una función de x ; Como se muestra en la Figura 2-3:

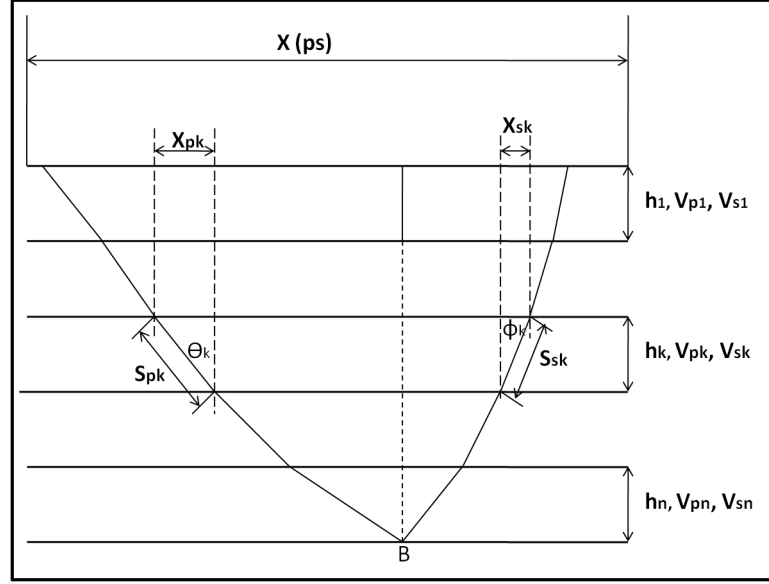


Figura 2-3.: Trayecto de rayo de onda convertida en un medio de capas horizontales (Tessmer and Behle, 1988).

La distancia fuente-receptor x_{ps} que se deduce de la Figura 2-3:

$$x_{ps} = \sum_{k=1}^n (x_{pk} + x_{sk}), \quad (2-12)$$

o

$$x_{ps} = \sum_{k=1}^n \left(\frac{h_k V_{pk}}{1 - p^2 v_{pk}^2} + \frac{h_k V_{sk}}{1 - p^2 v_{sk}^2} \right), \quad (2-13)$$

donde

h_k = espesor de la capa k

v_{sk} = velocidad de la capa k

v_{pk} = velocidad de la capa k

p = parámetro de rayo

y por ley de Snell:

$$p = \frac{\sin \theta_i}{v_{p1}} = \frac{x_{pk}}{s_{pk} v_{pk}} = \frac{\sin \phi_r}{v_{s1}} = \frac{x_{sk}}{s_{sk} v_{sk}}. \quad (2-14)$$

Así mismo, se deduce el tiempo de viaje de la onda convertida:

$$t_{ps} = \sum_{k=1}^n \left(\frac{s_{pk}}{v_{pk}} + \frac{s_{sk}}{v_{sk}} \right), \quad (2-15)$$

o

$$t_{ps} = \sum_{k=1}^n \left(\frac{\frac{h_k}{v_{pk}}}{\sqrt{1 - p^2 v_{pk}^2}} + \frac{\frac{h_k}{v_{sk}}}{\sqrt{1 - p^2 v_{sk}^2}} \right). \quad (2-16)$$

Con la información organizada por punto de conversión, se puede hacer un análisis de velocidades RMS, las cuales se utilizan en el procesamiento al momento de apilar; la ecuación de velocidades RMS para onda convertida, para n-esimo reflector son:

$$v_{psn} = \sqrt{\left[\frac{\sum_{k=1}^n (v_{pk} + v_{sk}) h_k}{\sum_{k=1}^n \left(\frac{1}{v_{pk}} + \frac{1}{v_{sk}} \right) h_k} \right]}, \quad (2-17)$$

donde v_{pk} y v_{sk} , son las velocidades de onda compresional y de cizalla desde la k-esima capa y h_k es el espesor.

Según Tessmer and Behle (1988), una secuencia de procesamiento convencional se puede aplicar a datos sísmicos PS ó SP, en un rango de offsets cercanos, y así obtener una sección apilada en tiempo de onda convertida para un reflector de interés. Como primer paso importante, las trazas sísmicas se organizan por grupos de Punto Común de Conversión (CCP), con una relación v_p/v_s estimada, y como segundo paso importante se debe hacer un análisis de velocidades con los datos sísmicos organizados por grupos de CCP; para determinar las velocidades para apilar.

Es necesario tener en cuenta, que inicialmente cuando las trazas sísmicas se organizaron por CCP, se hizo con una relación v_p/v_s estimada, pero con las velocidades de apilado y teniendo en cuenta la profundidad del reflector de interés, se debe re-organizar las trazas sísmicas por CCP para tener mayor precisión en el reflector de interés. Para obtener buena resolución del reflector de interés, se debe tener una adecuada relación v_p/v_s , con la cual se reorganizo las trazas y puede evaluarse comparando patrones de reflexión en la sección PS con los de la sección PP o SS.

Inicialmente para el análisis de velocidad de apilado de la sección PS, se puede tener un estimado desde el apilado PP, asumiendo que la razón de la velocidad compresional y de cizalla es la misma para todas las capas, como se puede observar a continuación.

$$\frac{v_{pk}}{v_{sk}} = \frac{v_p}{v_s} = \text{constante}. \quad (2-18)$$

Así, cuando usamos las velocidades rms como un estimado de la velocidad de apilado, una función de velocidad para reflexiones PS puede ser aproximadamente derivado desde las velocidades de apilado de la onda P, y algún estimado de una relación promedio v_p/v_s .

Normalmente las velocidades intervállicas se pueden calcular con una formula tipo DIX, tal formula puede ser también derivada para ondas convertidas.

$$v_{pn}v_{sn} = \frac{\tilde{v}_{psn}^2 t_{0n}^{(ps)} - \tilde{v}_{ps(n-1)}^2 t_{0(n-1)}^{(ps)}}{t_{0n}^{(ps)} - t_{0(n-1)}^{(ps)}}. \quad (2-19)$$

Debe tenerse en cuenta, que para ondas PS y SP esta fórmula únicamente permite el cálculo del producto $v_p v_s$, por lo tanto se requiere un análisis independiente para onda P y onda S. Las velocidades se pueden obtener únicamente de las velocidades intervállicas de onda compresional, y de cizalla; disponibles desde los análisis de velocidades respectivos. La relación de velocidades intervállicas, puede ser calculado directamente desde los tiempos de viaje, por intervalos de la onda convertida o por tiempos de viaje, en intervalos de la onda P o de la onda S en cada una de las secciones en tiempo, como se enseña en la siguiente ecuación:

$$\Delta t_n^{(ps)} = t_{0n}^{(ps)} - t_{0(n-1)}^{(ps)} = h_n \left(\frac{1}{v_{pn}} + \frac{1}{v_{sn}} \right), \quad (2-20)$$

y

$$\Delta t_n^{(ss)} = t_{0n}^{(ss)} - t_{0(n-1)}^{(ss)} = \frac{2h_n}{v_{sn}}, \quad (2-21)$$

o

$$\Delta t_n^{(pp)} = t_{0n}^{(pp)} - t_{0(n-1)}^{(pp)} = \frac{2h_n}{v_{pn}}, \quad (2-22)$$

respectivamente. Cancelando h_n , queda:

$$\frac{v_{pn}}{v_{sn}} = \frac{\Delta t_n^{(ss)}}{2\Delta t_n^{(ps)} - \Delta t_n^{(ss)}}, \quad (2-23)$$

y

$$\frac{v_{pn}}{v_{sn}} = \frac{2\Delta t_n^{(ps)} - \Delta t_n^{(pp)}}{\Delta t_n^{(pp)}}. \quad (2-24)$$

Este resultado está de acuerdo con la fórmula dada por Garotta (1987), para velocidades promedio.

Es esencial una correcta correlación de los eventos en la sección PP y esos mismos en la sección PS, aunque esto puede causar dificultades, cuando las propiedades de conversión en las interfaces son diferentes de las propiedades de reflexión. Adicionalmente se pueden presentar otros problemas, como por ejemplo: efectos de tuning causados por diferentes tipos de ondas en capas delgadas, por efectos de anisotropía o por problemas de correcciones estáticas de onda de cizalla. Sin embargo, considerando y teniendo en cuenta esos posibles problemas al momento de procesar datos sísmicos PS, Tessmer and Behle (1988) argumentan, que la

sección apilada por CCP de datos sísmicos PS, pueden confirmar o complementar información estructural que se evidencia en la sección apilada de datos sísmicos PP.

Para caracterizar la estructura interna de la tierra, y teniendo en cuenta que las velocidades de las ondas sísmicas dependen de las propiedades elásticas del subsuelo, se pueden usar las velocidades sísmicas, y la densidad para estudiarlo. Se puede hacer a partir de la forma como se propagan las ondas, usando la relación entre la velocidad compresional y la onda de cizalla, v_p/v_s . Las ecuaciones 2 y 4, son de las velocidades de onda compresional y de cizalla, dependen de las constantes elásticas del medio en el cual se propagan, ambas velocidades dependen del módulo de rigidez μ , pero únicamente la onda compresional P depende del módulo de Bulk κ , esto es porque la onda de cizalla S no se puede propagar en un fluido ideal ($\mu = 0$), pero la onda compresional P si puede propagarse en un fluido ideal con una velocidad proporcional a $\kappa^{1/2}$.

La relación de Poisson σ , es el cociente entre la deformación longitudinal y la deformación transversal de un cuerpo, en términos de las velocidades de onda p (que relaciona el cambio de volumen), y onda s (relaciona cambio de forma pero no de volumen); se define como:

$$\sigma = \frac{v_p^2 - 2v_s^2}{2(v_p^2 - v_s^2)} \quad (2-25)$$

El valor de esta relación cambia, si el valor de las velocidades cambia, y el valor de las velocidades sísmicas depende de muchos factores, incluyendo porosidad, litología, cementación, profundidad, edad, presión, fluido intersticial y otros cambios del medio en el cual se propagan.

Según Sheriff and Geldart (1995) por ejemplo: en las formaciones en las que hay arcilla se reduce la velocidad v_p como disminuye v_s , debido a que la arcilla reduce el módulo de rigidez, aumentando la proporción v_p/v_s , también se espera que en rocas, donde los sedimentos son poco consolidados, se presenten altos valores de v_p/v_s , y que en rocas duras, como son rocas clásticas consolidadas y carbonatos, los valores de v_p/v_s sean bajos.

Con respecto a la litología, los rangos de velocidad son tan generales, y hay varias coincidencias entre los rangos según el tipo de roca, haciendo que únicamente el valor de velocidad no proporcione un dato concluyente; que permita diferenciar la litología. Por último, la presencia de gas en el espacio poroso de la roca reduce el módulo de Bulk, así que, v_p disminuye en tanto que v_s permanece constante.

2.2. Evaluación Petrofísica

La evaluación petrofísica corresponde a un análisis básico en el que se determina contenido de arcilla, porosidad y saturación de agua.

El cálculo del volumen de arcilla (V_{shl}) se realizó por medio del registro Gamma Ray (GR), utilizando la Ecuación 2-26:

$$V_{shl} = \min \left\{ 1, \max \left\{ 0, \frac{GR - GR_{min}}{GR_{max} - GR_{min}} \right\} \right\}, \quad (2-26)$$

en donde GR corresponde a la medida del registro, GR_{min} corresponde a GR Línea Base arena limpia, y GR_{max} corresponde a la medida de GR Línea Base shale.

Se calcularon dos valores de porosidad, la porosidad neutrón (ϕ_N), que corresponde a la medida del registro del mismo nombre, y la porosidad densidad (ϕ_D), calculada por medio de la Ecuación 2-27:

$$\phi_D = \frac{\rho_M - \rho_B}{\rho_M - \rho_F}, \quad (2-27)$$

en donde ρ_M corresponde a la densidad de la matriz, con un valor de 2.65 g/cc, ρ_B corresponde a la medida del registro densidad, y ρ_F a la densidad del fluido con valor de 1 g/cc.

La porosidad total (ϕ_T) se calculó utilizando el promedio de la porosidad calculado a partir del registro densidad y del neutrón, Ecuación 2-28

$$\phi_T = \frac{\phi_D + \phi_N}{2}, \quad (2-28)$$

Finalmente la porosidad efectiva (ϕ_E) se obtuvo con la Ecuación 2-29:

$$\phi_E = \phi_A(1 - V_{shl}), \quad (2-29)$$

La resistividad del agua de formación se calculó por el método Rwa, el cual parte de la ecuación de Archie, Ecuación 2-32:

$$S_w^n = \frac{a}{\phi_E^m} \frac{R_t}{R_w}, \quad (2-30)$$

Los parámetros de la ecuación de Archie's, se asumieron de los valores reportados en la literatura para areniscas consolidadas: $a=0.62$ $m=2.15$ y $n=2$ (Crain, 2015), y la ecuación de Archie queda de la siguiente forma (Ecuación 2-31):

$$R_w = R_t \phi_E^2, \quad (2-31)$$

por último, para el calculo de la saturación de agua se uso la ecuación presentada en la publicación de Archie en 1942 y conocida como "Ecuación de Archie":

$$S_{wa} = \left(\frac{a R_w}{R_t \phi_A^m} \right)^{\frac{1}{n}}, \quad (2-32)$$

donde: a : factor de tortuosidad, m : exponente de cementación, n : exponente de saturación, ϕ_A : porosidad calculada de los registros de densidad, neutrón, sónico, resonancia magnética, R_w : resistividad del agua de la formación, R_t : resistividad de formación, S_w : saturación del agua por método de Archie.

3. Marco Geológico

De acuerdo con Cooper et al. (1995), el desarrollo de la Cuenca de los Llanos orientales se enmarca en la evolución de las Cuencas valle Medio del Magdalena y Cordillera Oriental, que constituyen las tres principales cuencas sedimentarias regionales desde el Triásico hasta el Mioceno medio. La evolución estructural puede dividirse en ocho eventos principales, que se describen a continuación:

Durante el Triásico y el Cretáceo Temprano (~ 235 -130 Ma), como resultado de la separación de Norte y Sur América, se desarrollaron cuencas de rift. Las rocas más antiguas del Cretáceo Tardío incluyen una sucesión de rocas metamórficas y sedimentarias del Paleozoico. De las rocas del Triásico – Cretáceo Inferior hay evidencia en pequeñas secuencias sinrift, encontradas en el graben de Arauca. Los estratos del Cretáceo Superior descansan directamente sobre rocas o sobre basamento ígneo metamórfico.

Un período prolongado de extensión episódica se produjo, representado en una serie de fallas extensionales durante el Barremiano y Maastrichtiano (~ 125 -74 Ma), junto con la subsidencia pasiva regional en una cuenca de retro-arco (Formación Une, Formación Gacheta y Formación Guadalupe).

En el Maastrichtiano – Paleoceno temprano (~ 74 -65 Ma.), el evento final de acreción de la Cordillera Occidental, causó levantamiento y erosión de la Cordillera Central (En este tiempo hay un hiato estratigráfico de 20 Ma).

Una sedimentación renovada comenzó aproximadamente en el Paleoceno tardío (60Ma), en respuesta a una transgresión de largo alcance. La Formación Barco se constituyó en la parte basal de dicha secuencia transgresiva, que fue depositada sobre una superficie de discordancia importante. La deposición del Paleoceno tardío terminó como una transgresión debilitada, y un sistema o trato relativo de mar alto. Durante la regresión posterior, la línea de costa regional, se desplazó gradualmente hacia el oeste. Los sedimentos depositados durante este nivel alto del mar fueron depósitos arcillosos, bajos de planicie costera (Formación Los Cuervos).

En el Eoceno tardío-Oligoceno tardío (~ 39 -29 Ma.), ocurrió subsidencia y fallamiento normal localizado, en respuesta a la flexión de la litosfera en la cuenca de antepaís, creado por

la carga de deformación de las cordilleras Occidental y Central (Formación Mirador).

La deformación en el valle del Cauca y Magdalena, ocurrió durante el Oligoceno tardío - Mioceno temprano y causó continuación de la subsidencia en la cuenca Llanos Orientales (~ 29-16,5 Ma.) (Formación Carbonera).

Una fase de subsidencia rápida ocurrió en el Mioceno medio (~ 16,5- 10,5 Ma), cuando deformación, levantamiento y erosión se iniciaron en la Cordillera Oriental, y se estableció el depocentro de cuenca de antepaís en el piedemonte de Llanos Orientales (Formación León).

La última fase de compresión, y de inversión asociados con el plegamiento frontal y cinturón de cabalgamiento de la Cordillera Oriental, ocurrió durante el Mioceno tardío – Reciente (10,5 Ma. Hasta el Presente) (Formación León y Formación Guayabo).

A continuación se muestra la columna estratigráfica de la Cuenca de los Llanos Figura 3-1:

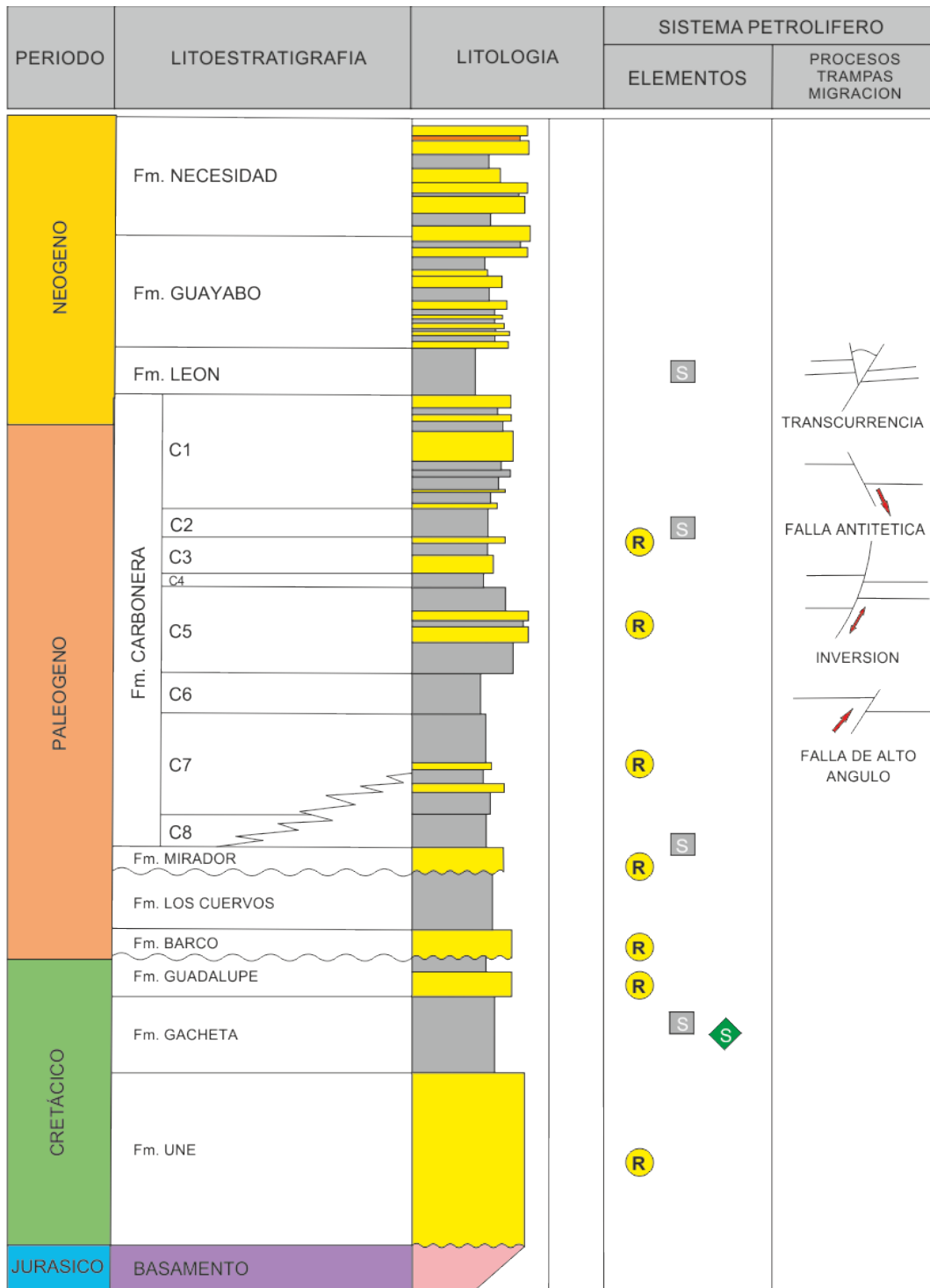


Figura 3-1.: Columna Estratigráfica generalizada de la Cuenca de los Llanos (ANH, 2012).

3.1. Marco Estratigráfico

Secuencias Paleozoicas

Las rocas del Paleozoico, conforman dos secuencias sedimentarias ambas limitadas por inconformidades al tope y a la base. La inferior corresponde a sedimentos marinos Cambro-Ordovícicos, y la superior corresponde a sedimentos marinos depositados desde el Devoniano hasta Carbonífero (esta secuencia no ha sido reportada en la cuenca Llanos Orientales). La parte paleozoica inferior, se compone de sedimentos ordovícicos marinos, en su mayoría lutitas grises a negras, fosilíferas, con intercalaciones de areniscas y limolitas.

Otro ejemplo de esta secuencia se encuentra en el pozo Chigüiro-1, que atravesó más de mil metros de Ordovícico lutítico. Particularmente, en los pozos Chaviva-1 y Trinidad-1, se han descrito capas paleozoicas rojizas, de facies similares a las del Triásico del sector de Arauca. En el área del Meta presenta un bajo grado de metamorfismo. La mayoría de las rocas del Paleozoico Temprano son del Ordovícico temprano. Las rocas paleozoicas más jóvenes (pozo Los Kioskos-1) corresponden al Ordovícico tardío (ANH, 2012).

Formación Carbonera

La Formación Carbonera, definida por Notestein (1944), de edad Eoceno-Mioceno, corresponde a una secuencia de arcillolitas, limolitas y areniscas intercaladas que descansan sobre los depósitos de la Formación Mirador y limita en el tope con los depósitos de la Formación León. La Formación Carbonera fue objeto de numerosos estudios (Cooper, 1995; Fajardo et al., 2000; Torrado et. al., 2014 y Arango, 2014) que la definen como una formación eminentemente continental, con cierta influencia de ambientes lacustres, donde la dinámica fluvial de canales meandriformes, de constante variación con llanuras de inundación, depósitos de desborde, humedales y otras estructuras de origen fluvial (Arango, 2014).

El Aquitainé dividió esta unidad en 8 miembros (Unidad C1 a C8) donde los miembros pares (C2-C4-C6-C8) corresponden a secuencias lodolíticas y arcillosas y los miembros impares (C1-C3-C5-C7) corresponden a secuencias más arenosas, las cuales, desde C7 a C3 son productores de hidrocarburos en varios sectores de la cuenca; en especial en C7. El contacto superior con la Formación León es conforme y gradual en la mayor parte de la cuenca (ANH, 2012).

Unidad C8: este miembro es predominantemente lutítico y arcilloso, producto de una deposición en ambientes continental a lacustre. Descansa sobre los depósitos con influencia marina de la Formación Mirador.

Unidad C7: es un miembro predominantemente arenoso producto del depósito de canales amalgamados de amplia extensión lateral (Torrado et al, 2014). Este miembro fue estudiado en detalle por (Arango, 2014), quien enuncia: “fueron depositadas principalmente en un

ambiente migratorio de canales que cortaban llanuras de inundación fluviales con zonas pantanosas y sectores con exposición sub-aérea que permitieron el desarrollo de paleosuelos. . . ”.

Unidad C6: está conformado por una secuencia monótona de arcillas de color gris a gris verdoso. Su ambiente deposicional es probablemente de planicie costera.

Unidad C5: está compuesta por alternancia de niveles de arcillolita y de arenisca, poco consolidada, de tamaño de grano, predominante medio, a veces grueso; en ocasiones ligeramente calcáreas, con glauconita.

Unidad C4: no siempre son evidentes las características litológicas de esta unidad, especialmente en el sector suroeste de la cuenca. Está compuesta por una alternancia rápida de capas de areniscas, limolitas y lutitas.

Unidad C3: está compuesta por alternancia de niveles de arenisca fina a gruesa, blanca a translúcida y algunos pies de limolitas y arcillolitas, de color gris verdoso; a veces con niveles carbonosos en la secuencia localizada en la parte central de la cuenca.

Unidad C2: después de la Formación León, es el sello mejor desarrollado, y el de mayor extensión hacia el Este. Está compuesta casi exclusivamente por lutitas grises y algunas limolitas. En sus límites norte y noreste de la cuenca, el porcentaje de arena aumenta, relacionado probablemente con ambiente deltaico en este sector.

Unidad C1: es la última, de las secuencias arenosas de la Formación Carbonera y se encuentra sellada por las lutitas de la Formación León. Está compuesta por una alternancia de cuerpos arenosos, separados por niveles delgados de limolitas oscuras y lutitas grises.

Formación León

Está compuesta por arcillolitas y lodolitas, con delgadas intercalaciones de areniscas las cuales se hacen más frecuentes hacia el tope de la unidad y hacia el occidente del área, cerca de la Cordillera Oriental. El ambiente de depósito corresponde a lagos, lagunas costeras, bahías o estuarios (ANH, 2012).

Formaciones Guayabo y Necesidad.

La Formación Guayabo descansa en contacto concordante sobre la Formación León, el límite es nítido cuando los niveles de arenas de la Formación Guayabo descansan sobre los shales de la Formación León. Por encima de esta se encuentra la Formación Necesidad en contacto, están compuestas por sedimentos clásticos continentales, los cuales provienen de la Cordillera Oriental (ANH, 2012).

4. Metodología

Se caracterizaron las Formaciones León y Carbonera en la Cuenca de los Llanos, usando análisis de velocidades v_p y v_s , con velocidades de sísmica multicomponente 2D adquirida en el año 2007 y velocidades de registros sísmico y dipolar.

Se procesaron las ondas P y CS, hasta migración pre-apilado en tiempo (PSTM) y como resultado se obtuvieron los campos de velocidad RMS y velocidad de intervalo.

Las velocidades instantáneas, se obtuvieron de los registros de pozo sísmico (DTTP) y dipolar (DTSM), el pozo está localizado sobre la proyección del punto de disparo 1734 de la línea sísmica, la profundidad final del pozo es de 3154 pies y la elevación del suelo es de 656 pies a nivel del mar; a nivel geológico la formación inicial es la Formación Guayabo, y finaliza en el Basamento económico de Edad Paleozoico.

4.1. Información Geofísica Disponible

La ubicación geográfica de la línea sísmica y de pozos, disponibles para este trabajo se muestra en la Figura 4-1.

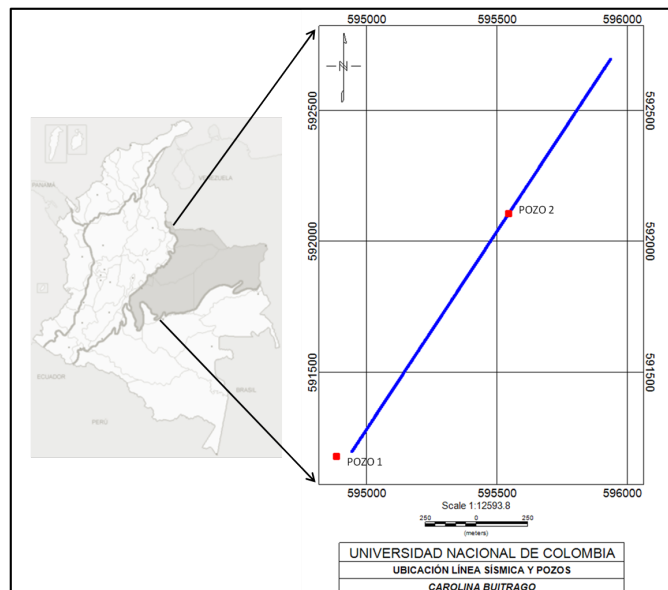


Figura 4-1.: Ubicación de pozo en la línea sísmica.

La información sísmica que se utilizó es de un programa multicomponente 2D adquirido en el año 2007, que tiene un total de 18 líneas, pero únicamente se escogió una línea por disponibilidad de información completa y autorizada. Los parámetros de adquisición se presentan en la tabla **4-1** y **4-2**.

Parámetros de adquisición	
Intervalo de receptor	15 m
Cantidad de receptores	1202
intervalo de fuente	22.5 m
Cantidad de puntos fuente	798
Número de canales	192
Tipo de tendido	Split-Spread
Máximo Cubrimiento	64

Cuadro **4-1.**: Parámetros de adquisición de la línea sísmica

Parámetros de adquisición	
Maximo Offset	1433 m
Intervalo de muestreo	2 ms
Longitud de registro	7 s
Tipo de fuente	Sismigel
Carga	900 g
Profundidad de carga	6 m
longitud de línea	18 Km

Cuadro **4-2.**: Parámetros de adquisición de la línea sísmica

Los registros de pozo disponibles para esta tesis se presentan en la tabla **4-3** y tabla **4-4**; con los datos de pozo se realizó una evaluación petrofísica, este procedimiento fue realizado en el módulo de Prizm, Well base y Zone manager de Geographix.

Registros de Pozo		
TIPO DE REGISTRO	REGISTRO	UNIDADES
Profundidad	DEPTH	ft
Resistividad	AHT30	.ohm.m
Resistividad	AHT60	.ohm.m
Resistividad	AHT90	.ohm.m
Registro dipolar	DT1	.us/ft
Registro dipolar	DT2	.us/ft
Registro dipolar	DTRS	.us/ft
Registro dipolar	DTSM	.us/ft
Registro dipolar	DTST	.us/ft
Registro sónico	DT4P	.us/ft
Registro sónico	DT5	.us/ft
Registro sónico	DTCO	.us/ft
Registro sónico	DTRP	.us/ft
Resistividad	AHT10	.ohm.m
Resistividad	AHT20	.ohm.m

Cuadro 4-3.: Tabla inventario de los registros de pozo referenciados en la tesis

Registros de Pozo		
TIPO DE REGISTRO	REGISTRO	UNIDADES
Profundidad	DEPTH	ft
Registro sónico	DTTP	.us/ft
Registro sónico	DTTS	.us/ft
Gamma Ray	GR	.API
Caliper	HCAL	.inches
Factor fotoeléctrico	PEFZ	
Densidad	RHOZ	.g/cm3
Resistividad de zona invadida	RXOZ	.ohm.m
Porosidad de Neutron	TNPH	.v/v

Cuadro 4-4.: Tabla inventario de los registros de pozo referenciados en la tesis

Los registros de pozos y los registros de desviación se cargaron en formato LAS, se incluyeron los topes de las formaciones y se realizó un control de calidad de las curvas. Del informe de pozo, se obtuvo la información de los topes de las formaciones, desde la Formación Guayabo hasta el Basamento económico de Edad Paleozoico, definiendo topes y base; como se muestra en la tabla 4-5.

Formaciones reconocidas				
FORMACIÓN	UNIDAD	TOPE	COTA	ESPESOR
Guayabo		Superficie		
León		1705	-1303	589 pies
Carbonera	C1	2294 pies	-1622	114 pies
	C2	2408 pies	-1736	98 pies
	Intermedia	2506 pies	-1834	454 pies
	Areniscas Basales	2960 pies	-2288	176 pies
Basamento		3136 pies	-2464	18 pies

Cuadro 4-5.: Descripción de las Formaciones reconocidas

Con la información cargada y topes definidos, se interpretan los registros de pozo, para las Formaciones León y Carbonera, (Unidades C1, C2, intermedia y Arenas Basales). A partir de los registros de pozo Gamma Ray (GR), Potencial Espontaneo (SP), absorción fotoeléctrica (PEF), Caliper, Resistividad, Densidad (RHOB), se realizaron los cálculos de volumen de shale, porosidad aparente, porosidad efectiva y saturación del agua.

El valor R_w se estableció a partir de los valores de salinidad del agua de formación, se obtuvo un valor de 5.85 ohm.m, a la condición de temperatura del yacimiento, muy similares a los reportados en el área de estudio, para este cálculo se uso la Ecuación 2-31.

En la Figura 4-2 se muestra las condiciones, que se tuvieron en cuenta.

CONDICIONES INICIALES		
Temperatura inicial		60
Temperatura final		145
Profundidad Total (TVD)		3154
Gradiente		0,02695
Profundidad de Carbonera	Formacion Unidad	2960 pies
Areniscas Basales		
Temperatura de la formacion.		140 °F
ESTIMACION DE RW		
NaCl (ppm)		1045
Rw a 60°F		5.85
Rw a 140°F		2.66

Figura 4-2.: Cálculo de R_w .

Las zonas con presencia de hidrocarburos se delimitaron usando los valores mínimos permitidos de porosidad de 0.1, volumen de arcilla (V_{shl}) de 0.3 y saturación de agua (S_w) de 0.6. Usando desde la Ecuación 2-26 a la Ecuación 2-32, y la información de registros eléctricos del pozo, se determinaron las propiedades petrofísicas, discriminación de litología, porosidad y densidad para dar paso así a la caracterización de la formación de interés y las demás formaciones.

La Figura 4-3 y Figura 4-4 muestra el resultado de las formaciones reconocidas, las cuales se describen de forma separada para visualizar los resultados.

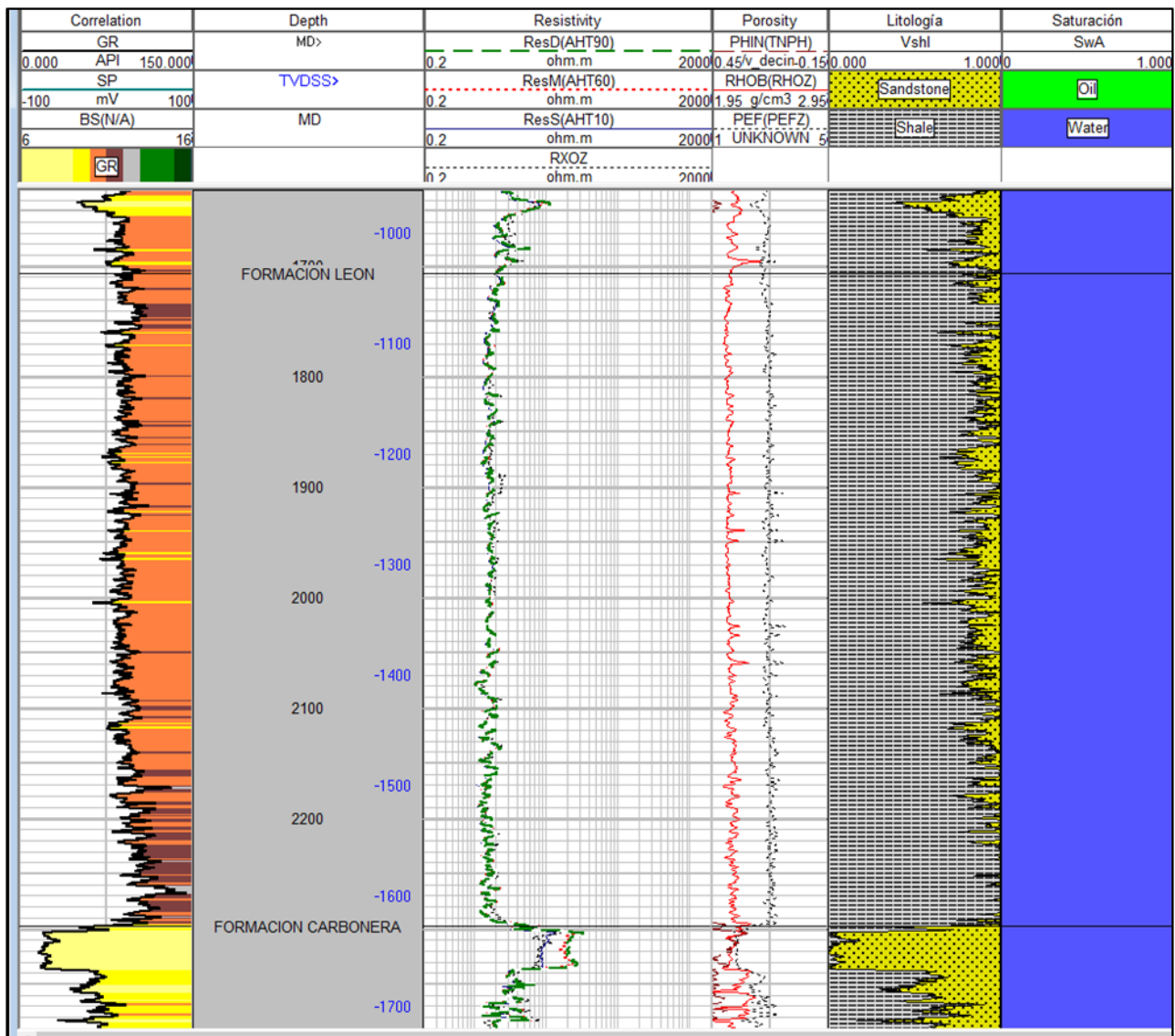


Figura 4-3.: Análisis de pozo para las formaciones reconocidas, aproximadamente de 1600 a 2300 pies.

En la Figura 4-3, se observa un contraste de impedancia acústica debido al cambio litológico de la Formación León a la Formación Carbonera, este valor en la impedancia acústica esta afectado en gran medida por el cambio de velocidad más que por el cambio de densidad entre las formaciones, como se observa en tabla 4-6.

FORMACIÓN	UNIDAD	POROSIDAD	DENSIDAD	v_p (pies/s)	v_s (pies/s)
León		0.0454	2.1131	6306.09	3561.52
Carbonera	C1	0.2058	2.1677	7844.51	3282.80

Cuadro 4-6.: Resultados de la caracterización, de las formaciones reconocidas

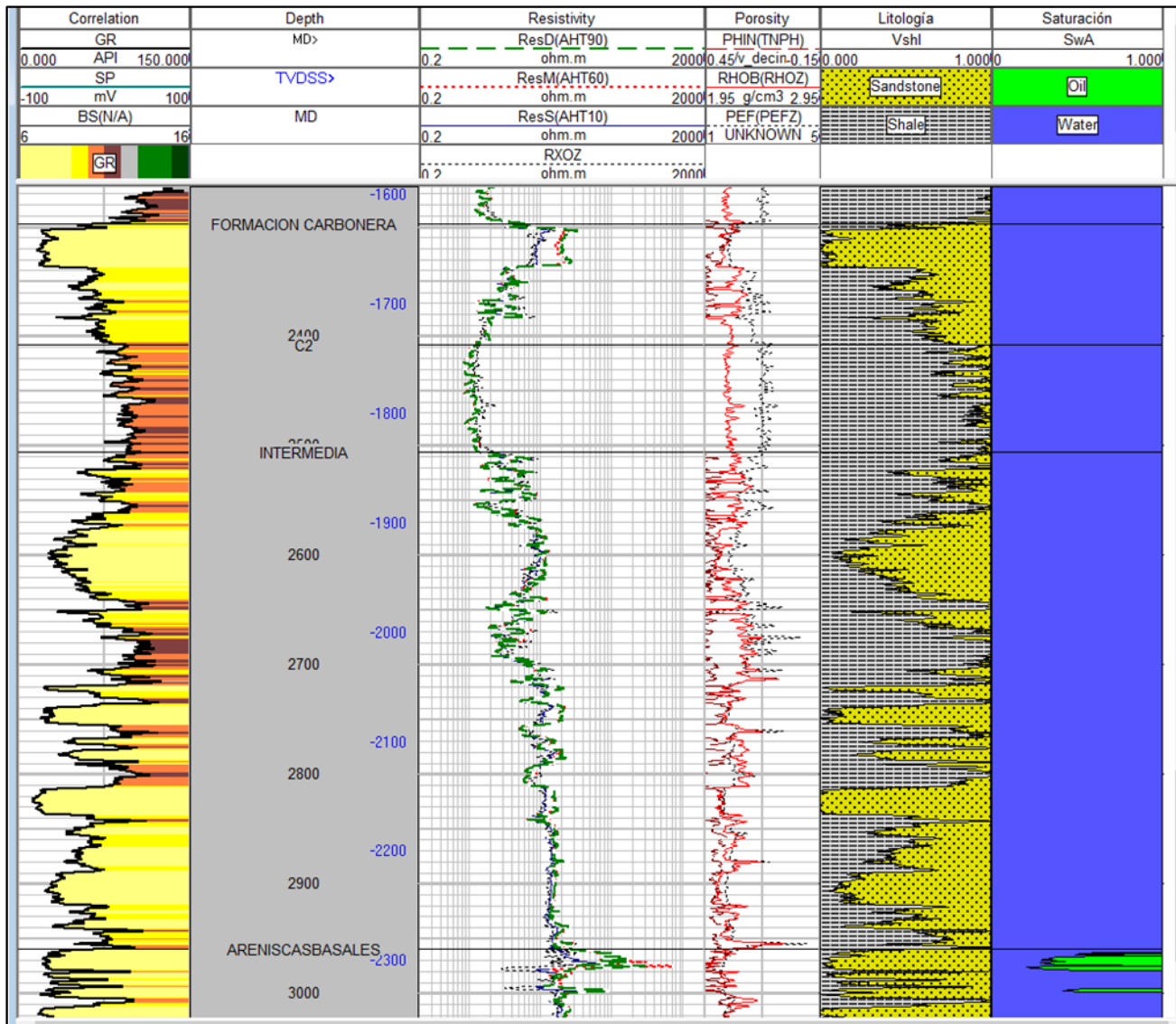


Figura 4-4.: Análisis de pozo para las formaciones reconocidas, aproximadamente de 2300 a 3100 pies.

En la Figura 4-4, se observa en verde, la zona saturada con hidrocarburo, de 2960 a 3002 pies, distribuidos en dos zonas, de 2960 a 2980 pies y de 2995 a 3002 pies; separados por intercalaciones de arcilla-arena. El conocimiento geológico y geofísico del área son primordiales antes de iniciar el procesamiento de la información sísmica.

4.2. Procesamiento de datos sísmicos

Para obtener, los campos de velocidades RMS e interválicas de los datos sísmicos de onda P y onda PS, fue necesario realizar el procesamiento, el cual se describe en este capítulo por medio de cada una de las secuencias; se realizaron hasta migración pre-apilado en tiempo (PSTM).

4.2.1. Procesamiento de onda P

Del procesamiento de la onda P, se mostrarán los resultados de cálculo y aplicación de estáticas por refracción y campo de velocidades de onda P, resultados que en los siguientes procesos fueron utilizados, como en el procesamiento de la onda convertida y en el análisis v_p y v_s . También se muestran las imágenes de apilado y migración pre-pilado en tiempo (PSTM); como resultado del procesamiento de la onda P.

La secuencia de procesamiento aplicada para los datos de la onda P, hasta migración pre-apilado en tiempo se presenta en la Figura 4-5.

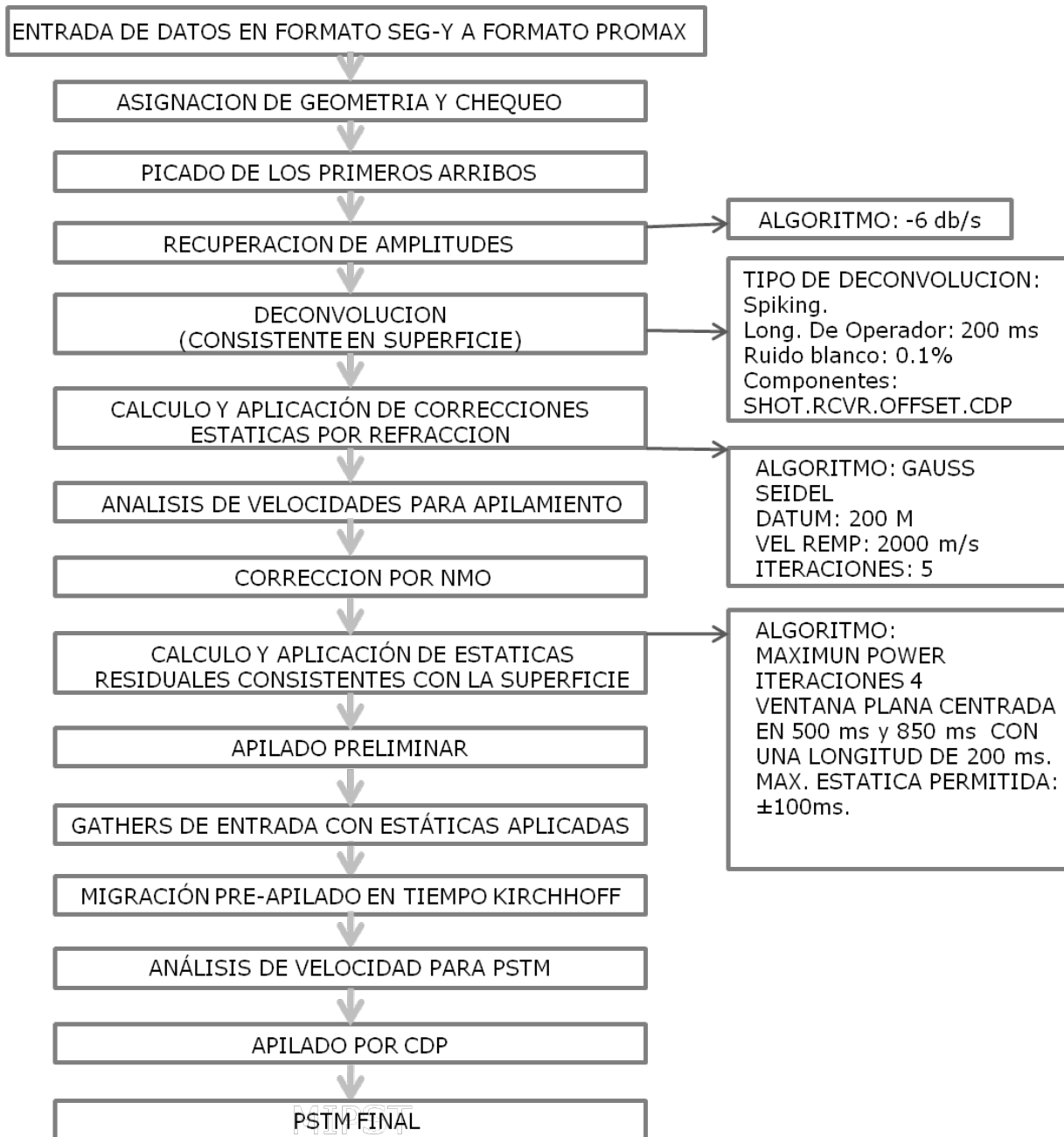


Figura 4-5.: Secuencia de procesamiento de Onda P.

Las estáticas por refracción de la onda P, se muestran en la Figura 4-6, las cuales fueron obtenidas mediante un algoritmo Gauss Seidel, a datum de 200m y velocidad de reemplazamiento de 2000 m/s, en azul se muestra la corrección estática en el dominio de la fuente y en rojo se muestra la corrección estática en el dominio de receptor. Estas estáticas, posteriormente fueron utilizadas en el procesamiento de la onda PS, en el dominio de la fuente.



Figura 4-6.: Cálculo y aplicación de corrección estática por refracción de onda P, en el dominio de la fuente (azul) y en el dominio de receptor (rojo).

Luego se muestra el campo de velocidad de onda P, el cuál se utilizó en el procesamiento de la onda convertida y en el análisis de v_p y v_s . Para obtener este resultado se realizaron varios pasos de análisis de velocidades. En el primer paso, se obtienen las primeras funciones de velocidad. Para este paso, se utilizan "supergathers" que combinan la información de varios CDPS adjuntos; permitiendo mejorar la relación señal-ruido, y escoger los primeros valores de velocidad.

En los siguientes pasos se refinan las velocidades, que mejor se ajusten a las condiciones de la zona y que son consistentes con los registros de pozo. El modelo de velocidades que resultado de este análisis, se muestra en la Figura 4-7, donde esta la sección migrada PSTM de la onda P, y superpuesta a ella, el campo de velocidad de la onda P; se observa que los reflectores son planos y constantes, con variaciones muy leves asociadas al ambiente de formación. Utilizando las siguientes herramientas:

- Apilado con soluciones por elevación y refracción.
- Segundo análisis de velocidades.

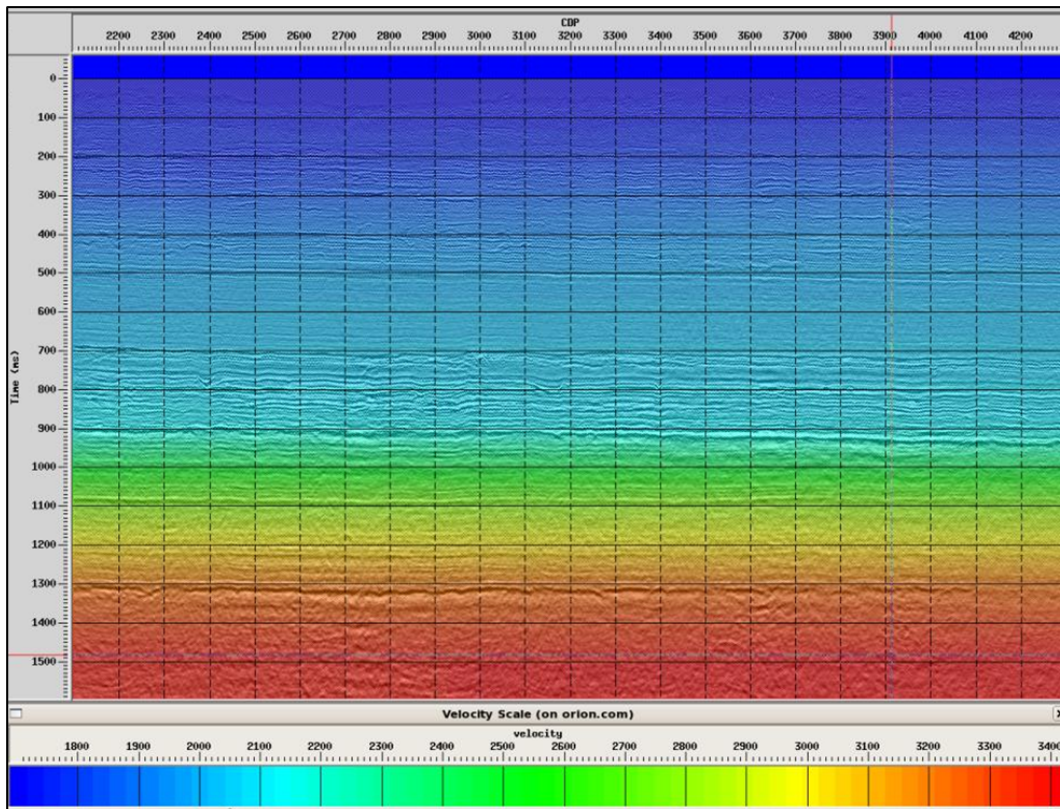


Figura 4-7.: Campo de velocidades de onda P.

- Apilado con soluciones por elevación y refracción con segundo análisis de velocidades.

- Estáticas residuales.

en la Figura 4-8, se muestra la migración pre-apilado en tiempo (PSTM) de la onda P, a 500ms está el tope de la Formación León, que no muestra contrastes de impedancia acústica, en 700 ms está el tope de la Formación Carbonera, en las unidades C1 y C2 que tienen continuidad en los reflectores, se ven bien marcados, y en las unidades Intermedia y Arenas Basales no hay continuidad lateral definida, mostrando una variación facial lateral entre esos reflectores, consecuencia del ambiente de formación, posiblemente transicional, posiblemente hay presencia de canales, en 900ms está el tope del Basamento económico. Las unidades presentan un buzamiento hacia el suroeste, en el CDP 2002 el tope de carbonera está a 700ms y en el cdp 4345 está a 720 ms:

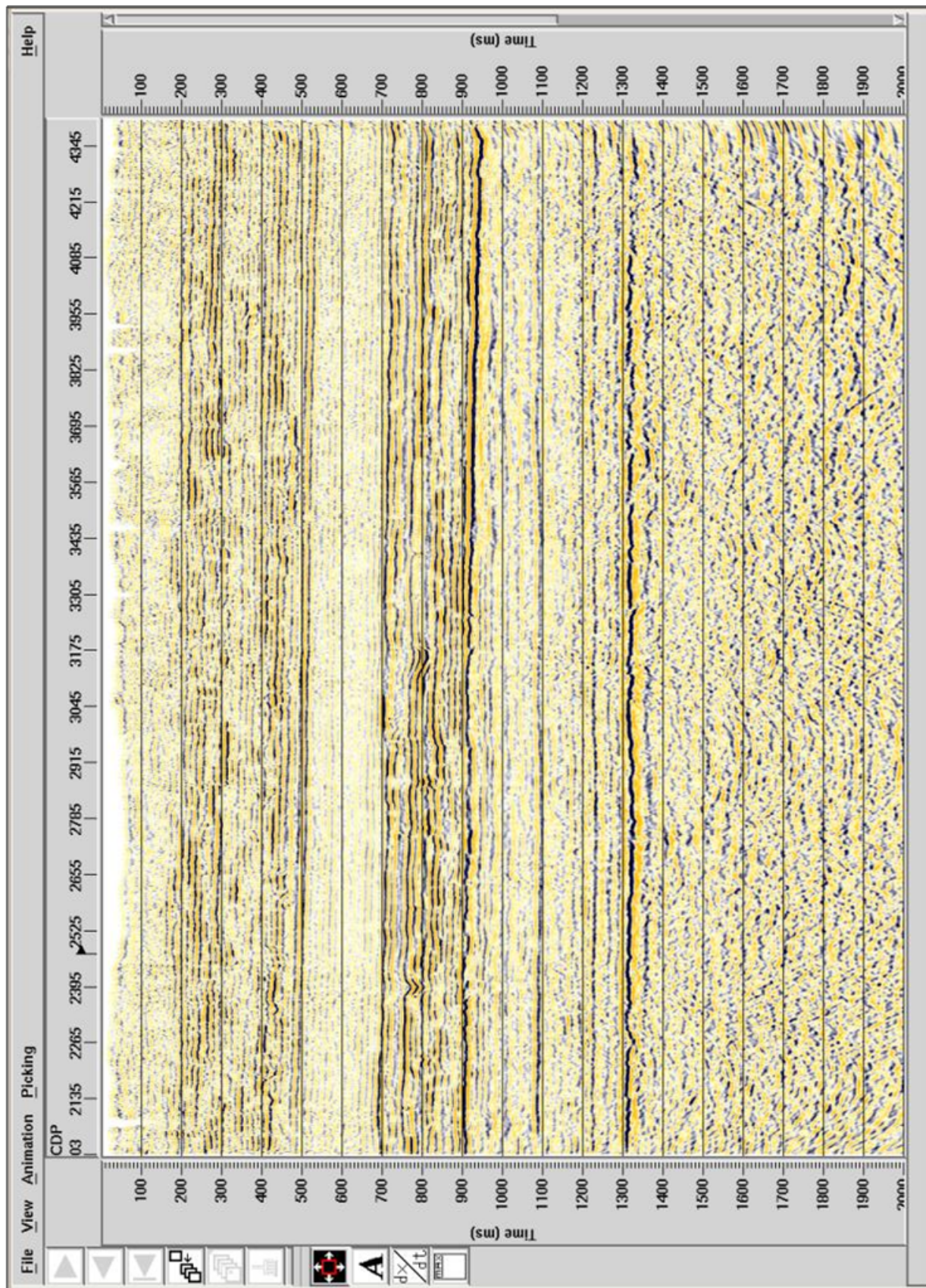


Figura 4-8.: Migración pre-apilado en tiempo de onda P.

4.2.2. Procesamiento de onda PS

Como primer paso, para el procesamiento de onda convertida, es el procesamiento de datos sísmicos de onda P hasta obtener un apilado óptimo. La solución de onda P, para la corrección de estáticas se usa como la primera aproximación a la corrección estática de la onda PS. Adicionalmente, el apilado de la onda P es muy útil para guiar el procesamiento de la onda PS (Garotta, 2000).

Para apilar onda convertida, se requiere organizar la información sísmica por punto verdadero de reflexión común, para el caso de onda convertida (CCP). Las coordenadas del punto de conversión de onda PS, en un medio de una capa homogénea se calculan como función de offset, profundidad del reflector y la relación v_p/v_s . Para obtener un apilado según Tessmer and Behle (1988), las coordenadas del CCP son calculadas para una profundidad dada según el reflector de interés y con calculo a priori de un promedio de la relación v_p/v_s .

En el procesamiento de onda convertida, es muy importante tener un buen cálculo de v_p/v_s , para así obtener un apilado, con interés en un reflector a una profundidad dado. Es esencial una correcta correlación de eventos de la sección sísmica PP en la sección sísmica PS.

Tessmer and Behle (1988), consideran que los primeros pasos hacia apilar por punto común de reflexión, son dos pasos, primero, sortear u organizar los datos sísmicos por punto común de conversión. Segundo, considerar tiempos de viaje y velocidades RMS para onda convertida.

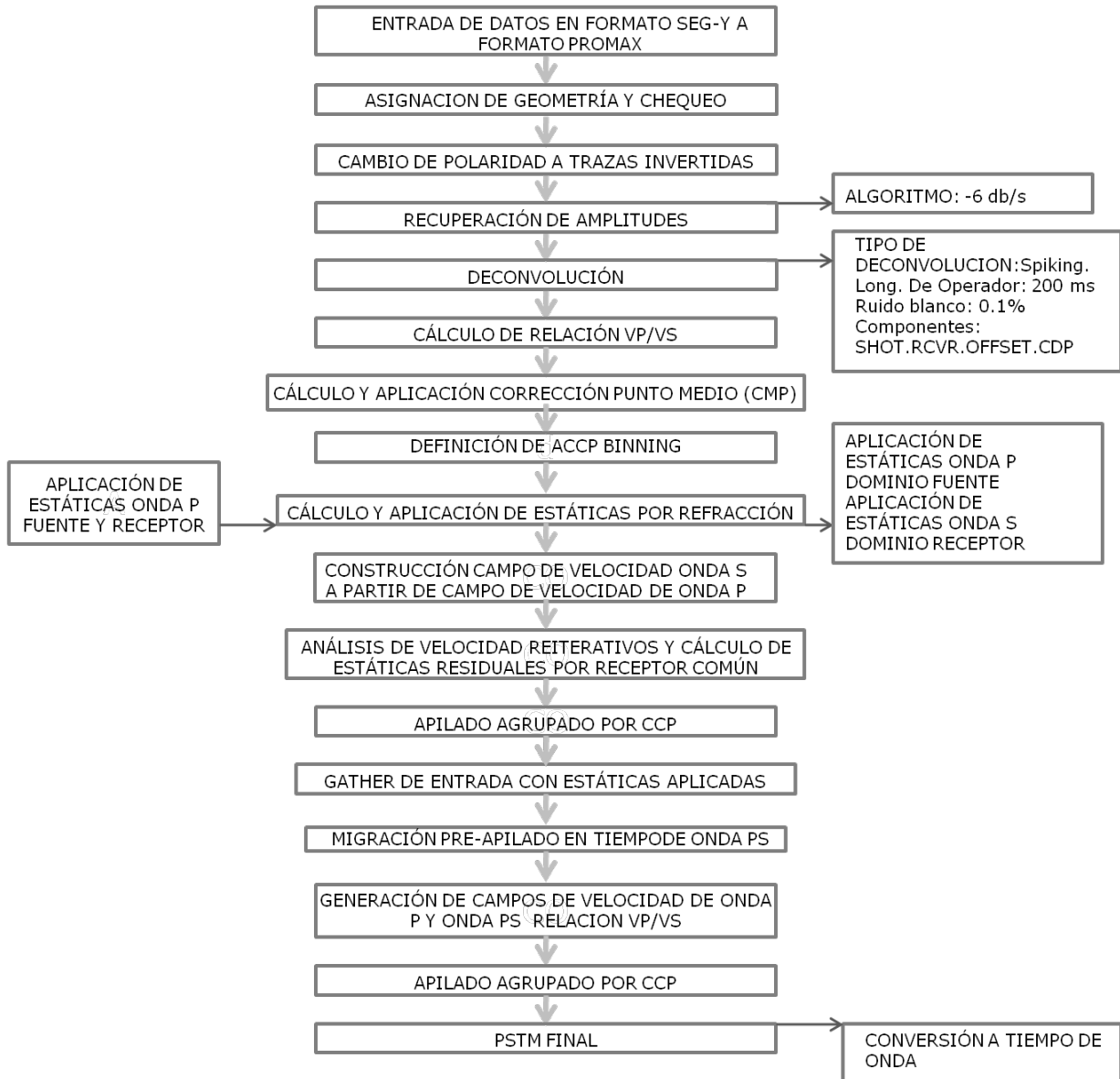


Figura 4-9.: Secuencia de procesamiento de Onda PS.

Corrección de polaridad

Según Garotta (2000), debido al desplazamiento horizontal de la onda convertida en el medio de propagación, las trazas con offset negativo son grabadas con su polaridad invertida; por lo tanto se hace necesario invertir la polaridad de esas trazas. Como se muestra en la Figura 4-10 y la Figura 4-11.

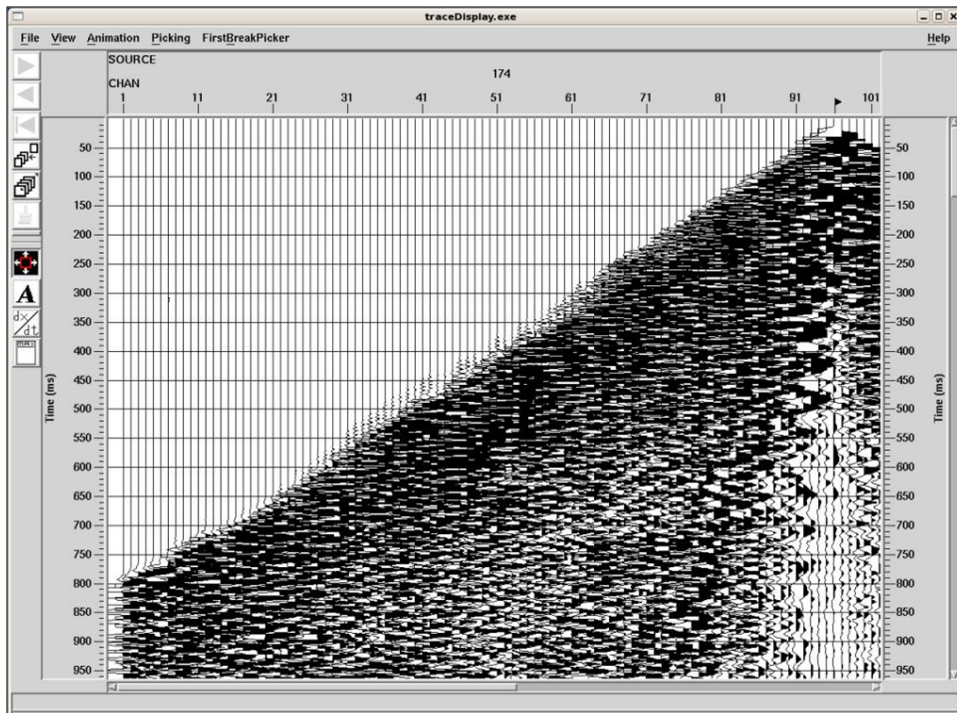


Figura 4-10.: Registro sin rotación a offsets negativos.

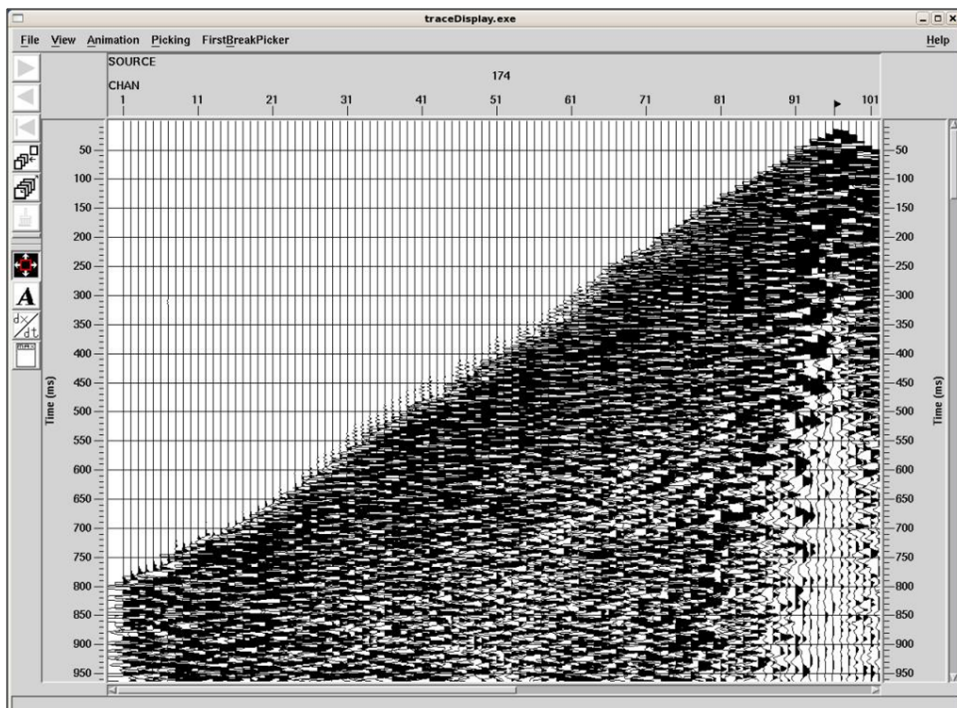


Figura 4-11.: Registro con rotación a offsets negativos.

Corrección estática

Según Garotta (2000), para el cálculo y aplicación de correcciones estáticas por refracción, la corrección estática de la fuente se define en el procesamiento de la onda P, y es aplicada al procesamiento de la onda convertida. Para la corrección estática de la receptora de onda convertida se inició con el cálculo de estática para la onda P, después se realizaron varias iteraciones hasta obtener el mejor apilado. La corrección estática por refracción se muestra en la Figura 4-12, donde la línea azul indica los tiempos de corrección para fuente, la cual es la misma que para onda P, y la línea roja indica la corrección estática para las receptoras.



Figura 4-12.: Cálculo y aplicación de corrección estática por refracción de la onda PS, en el dominio de la fuente (azul) y en el dominio de receptor (rojo).

Velocidad de onda PS

Para analizar la velocidad de la onda CS, se trabajó con la función de velocidad del apilado de la onda acústica (Figura 4-7), y se calculó un primer estimado de relación v_p/v_s (Tessmer and Behle, 1988), con el cual se obtuvo un apilado de control.

Luego con la sección ya migrada, se calculó el campo de velocidad de onda CS, teniendo en cuenta que el campo de velocidad de onda P, es el campo de velocidad de la onda incidente, y para obtener el campo de velocidad de la onda S reflejada, se realizaron varias iteraciones, con variaciones de velocidad desde 500 m/s hasta 1500m/s, cada 50m/s. Este análisis, se refinó hasta obtener el campo de velocidad final, el cual se usó para la migración PSTM de onda CS; en el control de calidad de velocidad de PSTM, se verificó comparando la sección migrada con la de la onda P, en los reflectores mas importantes, tope de la Formación León, Carbonera y Basamento Económico, y con una buena alineación de los reflectores a

nivel de gathers y a nivel de apilado. Con la relación v_p/v_s también se hizo control de calidad, que fuera consistente con la información de pozo. En la Figura 4-13 se muestra el campo de velocidad obtenido de esta onda:

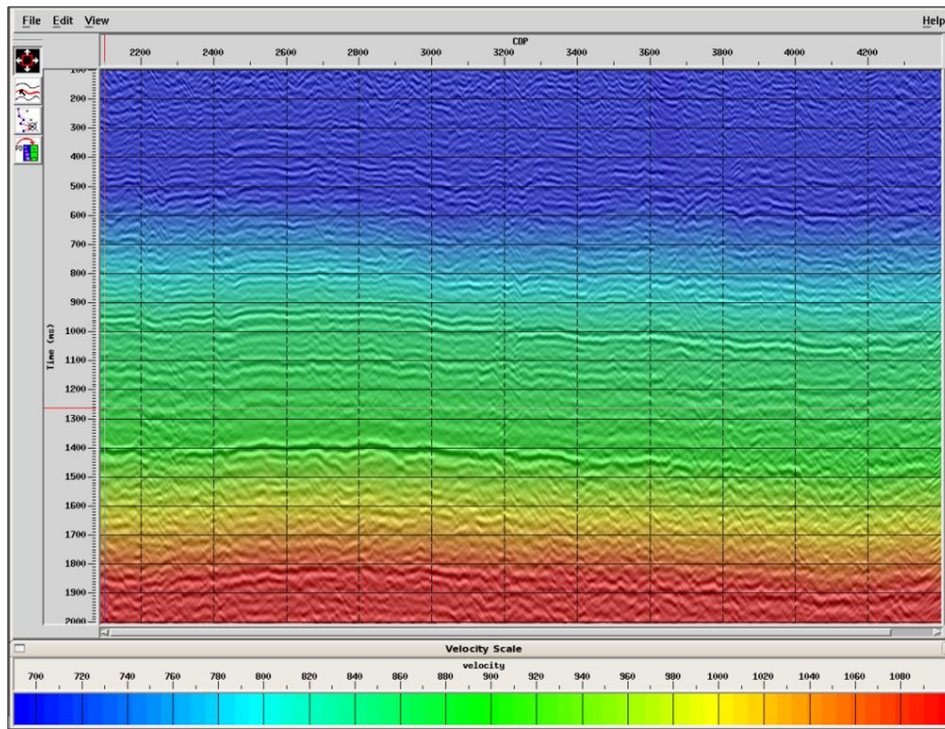


Figura 4-13.: Campo de velocidad de onda PS.

La Figura 4-14 muestra la migración PSTM de la onda CS, esta imagen es diferente a la de la sección de la onda P, por la variación lateral fuerte en la zona. En 1000 ms, esta el tope de la Formación León, se ven mas reflectores que no se veían en la sección de la onda P, porque es mas sensible desde el punto de vista litológico a los cambios de la onda S. En 1400 ms, esta el tope de la Formación Carbonera, por lo contrario en la Formación Carbonera, los reflectores no se ven tan continuos, tienen un comportamiento caótico. A los 1900ms esta el tope del Basamento Económico. Comparando las imágenes Figura 4-8 y Figura 4-14, la información que proporcionan acerca del medio es diferente, complementándose, por eso es importante tener la información de las dos ondas.

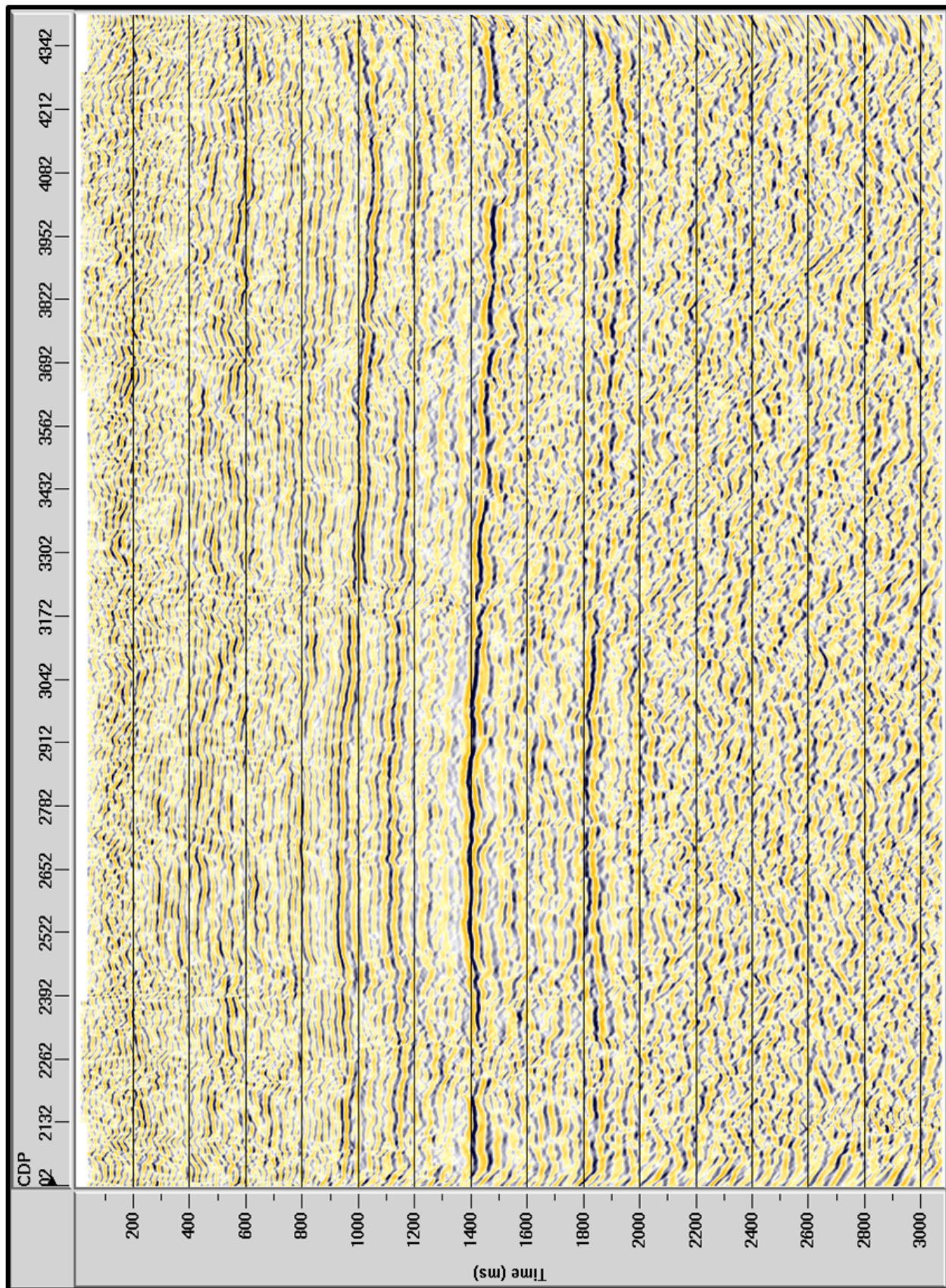


Figura 4-14.: Migración pre-apilado en tiempo de onda PS.

Según Tessmer and Behle (1988), en el procesamiento de onda convertida, se requiere una correlación de eventos de la sección sísmica PP en la sección sísmica PS.

Por lo tanto, luego de tener la sección final de onda PS se observa que los eventos están a mayor tiempo que en la sección final de onda P, esto se debe a la naturaleza de la onda PS, la cual viaja a menor velocidad. Con el fin de verificar que los eventos sean correlacionables, se hizo la conversión a profundidad.

En la Figura 4-15 se observan las PSTM de la onda P y de la onda PS en profundidad, con los topes de las formaciones León (aprox 500m), Carbonera (aprox 700m) y Paleozoico (aprox 1000m); como eventos de correlación; esta información se validó con la información de pozo.

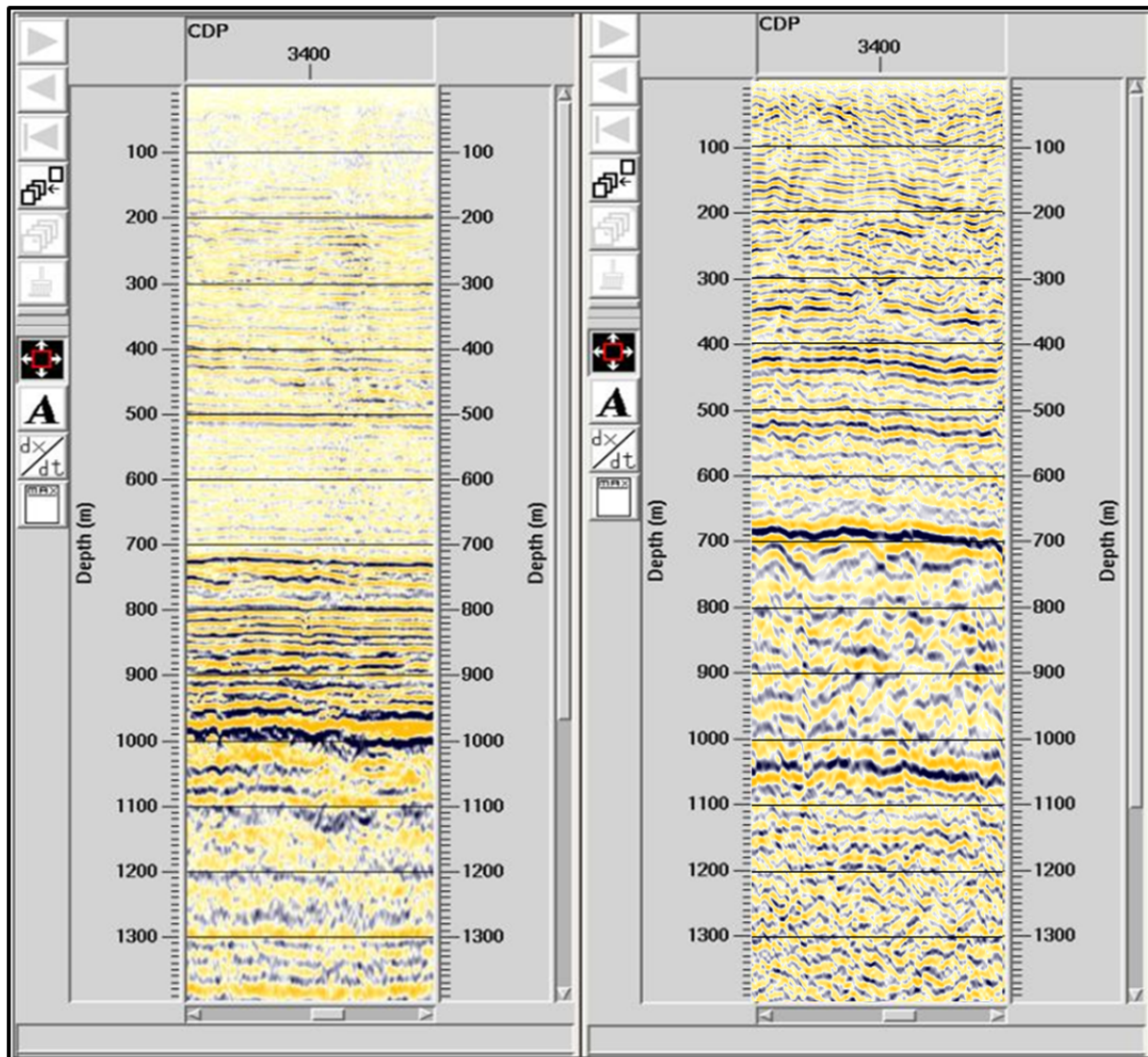


Figura 4-15.: Secciones sísmicas PSTM de onda P y onda PS convertidas a profundidad.

Con las PSTM de onda P y PS en formato seg-y, fueron cargadas en software de interpretación donde se amarro la información sísmica con la información del registro sísmico, integrado del pozo y fue corregido con tabla de velocidad – profundidad. En la Figura 4-16, se muestra el sismograma sintético generado a partir del registro sísmico y densidad, usado para calibrar la PSTM de onda P y de pozo.

Como datos de entrada se usó una tabla tiempo - profundidad (en la columna T-D Chart), para desplegar la información, y los registros, sísmico (en la columna DT4P) y densidad (en la columna RHOZ); a partir de los cuales se obtienen perfiles de impedancia acústica.

El coeficiente de reflectividad, es convolucionado con una ondícula extraída de la información sísmica, con la cual finalmente se genera el sismograma sintético, con polaridad positiva y negativa, se compara con una traza cercana al pozo; este modelamiento me permite saber cuál es la respuesta sísmica del medio y por ende identificar en la sección, el reflector que seguí como tope de la formación.

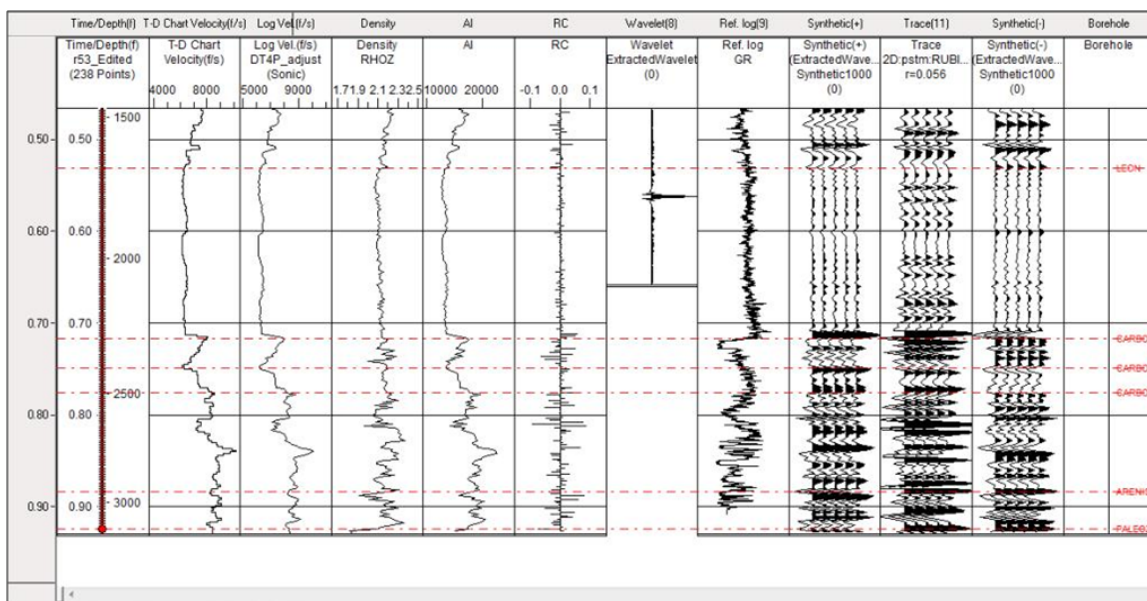


Figura 4-16.: Sismograma sintético a partir de registros de pozo y datos sísmicos.

Con el resultado de la Figura 4-16, se hace correlación entre el pozo con la PSTM de la onda P. Resultado que se complementa con la Figura 4-17, donde se hace un acercamiento, indicando el buen amarre de la sección sísmica con la información de pozo.

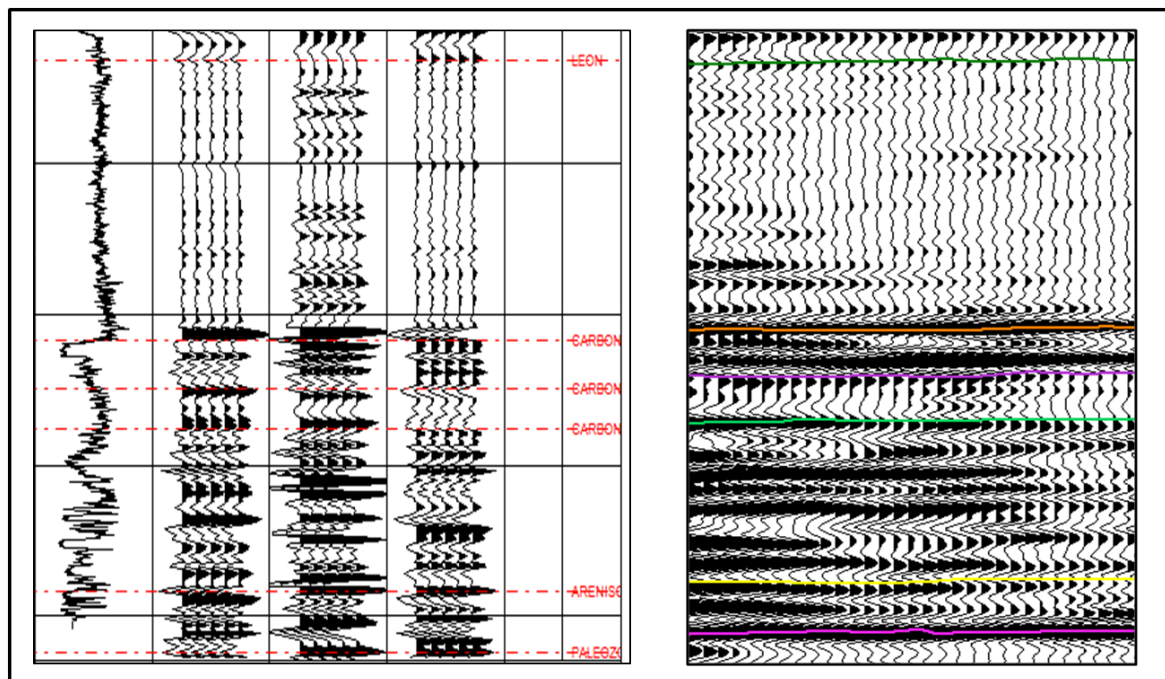


Figura 4-17.: Amarre del sismograma sintético con la sección sísmica de onda P.

La PSTM de la onda P, se interpretó dando continuidad a los eventos ya identificados, como topes de cada una de las formaciones León, Carbonera (C1, C2, intermedia y areniscas basales) y Paleozoico, adicionalmente, se identificaron algunas fallas normales, características de la zona de estudio. En el anexo No. 1 se encuentra la sección completa interpretada.

En la Figura 4-18 se muestra un acercamiento, indicando los topes de las formaciones y las fallas, el tope de la Formación León está indicado en color verde, tope de la Formación Carbonera en color naranja, tope de la Formación Carbonera unidad Areniscas Basales se indica con color amarillo y el tope de la Formación Paleozoico en color fucsia. Es importante resaltar que la línea sísmica tiene dirección NE-SW, perpendicular al buzamiento regional de las capas y a las principales estructuras identificadas en la cuenca de los Llanos.

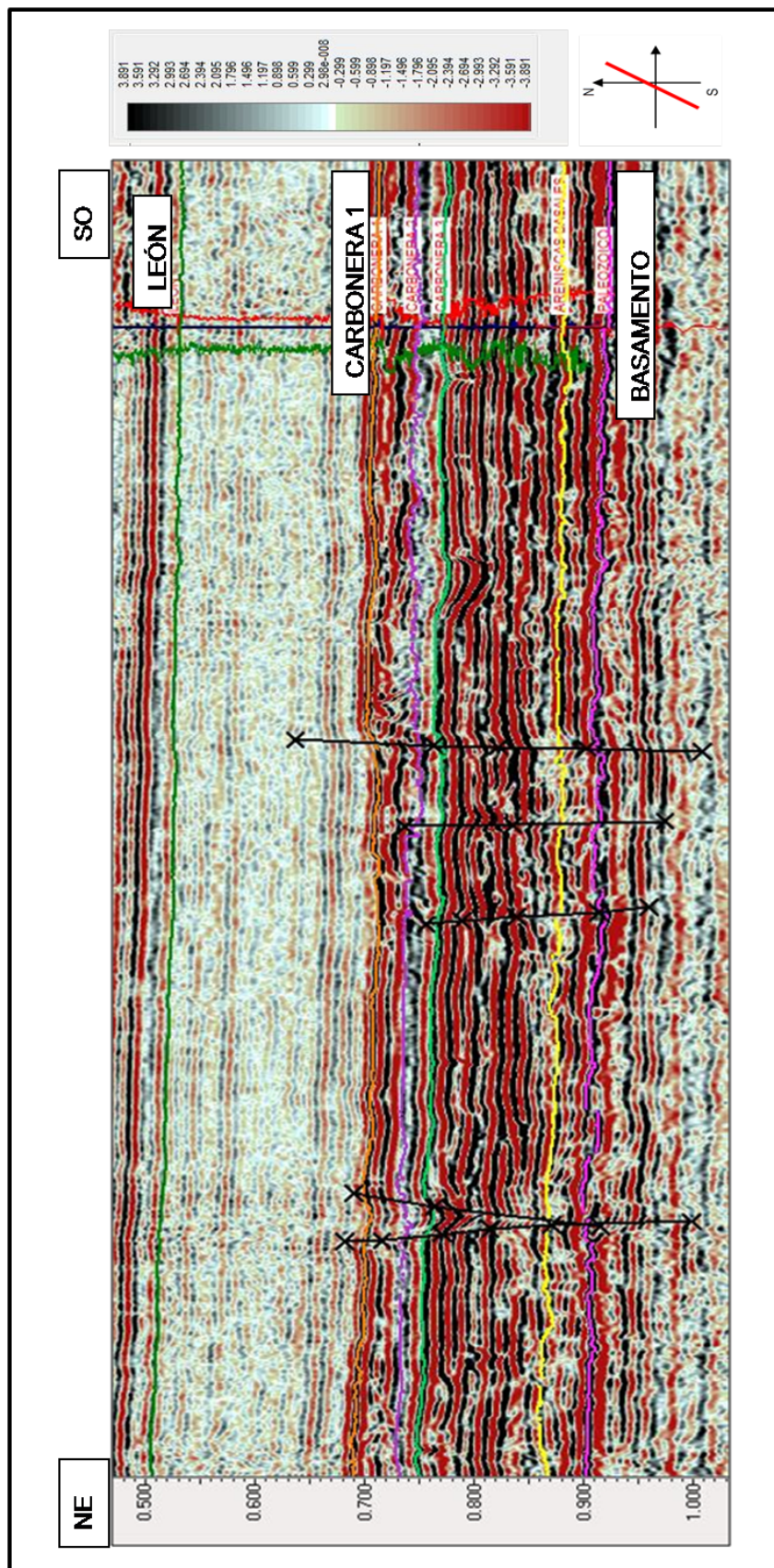


Figura 4-18.: Interpretación sísmica de la PSTM de onda P.

Se continuo el procedimiento con los datos de la onda PS, con el sismograma sintético que se muestra en la Figura 4-19, pero para la onda PS se utilizó registro dipolar y densidad, usado para calibrar la información sísmica de onda PS y registro de pozo.

Como datos de entrada, se usó una tabla tiempo - profundidad (en la columna T-D Chart), para desplegar la información, con los registros dipolar (en la columna DTSM) y densidad (en la columna RHOZ); se obtienen perfiles de impedancia elástica.

El coeficiente de reflectividad, para la onda convertida es convolucionado con una ondícula extraída de la información sísmica, con la cual finalmente se genera el sismograma sintético, con polaridad positiva y negativa, se compara con una traza cercana al pozo; sirve también como control de calidad para verificar la polaridad de la sección sísmica.

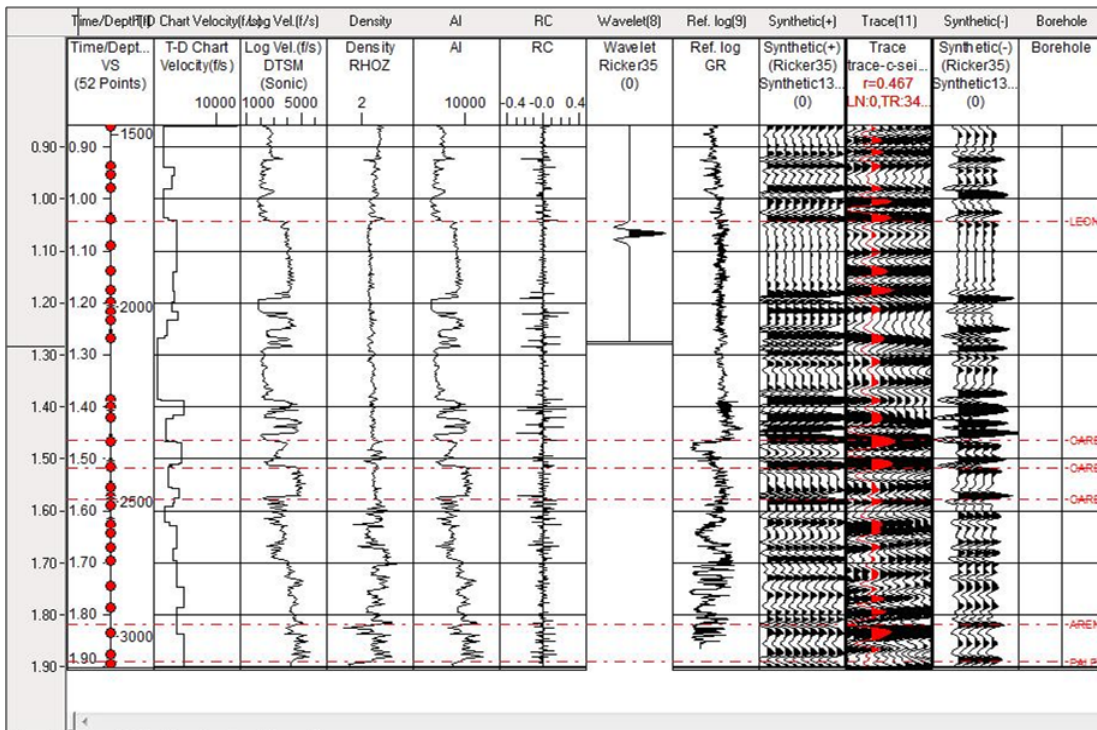


Figura 4-19.: Sismograma sintético a partir de registros de pozo y datos sísmicos de la onda PS.

Con el resultado de la Figura 4-19, se hace correlación entre el pozo con la PSTM de la onda PS. Resultado que se muestra en la Figura 4-20, donde se hace un acercamiento alrededor del pozo, indicando el buen amarre de la sísmica con la información de pozo.

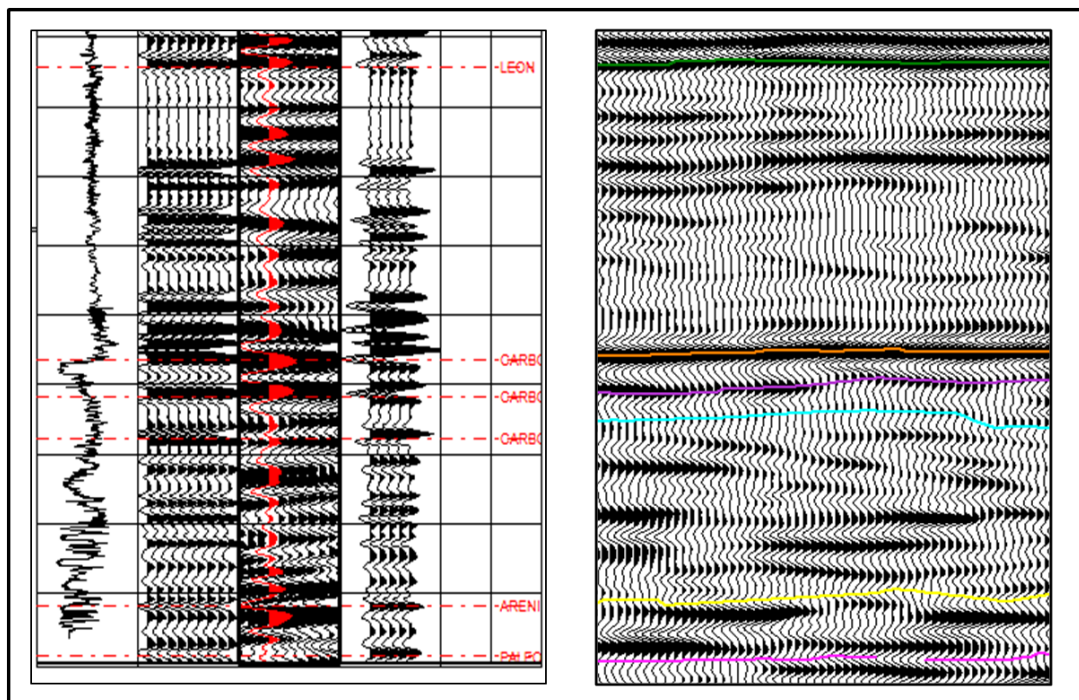


Figura 4-20.: Amarre del sismograma sintético con la sección sísmica de onda PS.

La PSTM de la onda PS, se interpretó dando continuidad a los eventos ya identificados, como topes de cada una de las formaciones León, Carbonera (C1, C2, intermedia y areniscas basales) y Paleozoico. Adicionalmente, se interpretaron algunas fallas normales características de la zona de estudio, concordantes con la de PSTM de la onda P. En el anexo No. 2 se encuentra la sección completa interpretada. En la Figura 4-21 se muestra un acercamiento, indicando los topes de las formaciones y las fallas, con el mismo procedimiento de la onda P. El tope de la Formación León está indicado en color verde, tope de Formación Carbonera en color naranja, tope de Formación Carbonera unidad Areniscas Basales se indica con color amarillo y tope de Formación Paleozoico en color fucsia. la línea sísmica tiene dirección NE-SW, perpendicular al buzamiento regional de las capas y a las principales estructuras identificadas en la cuenca de los Llanos.

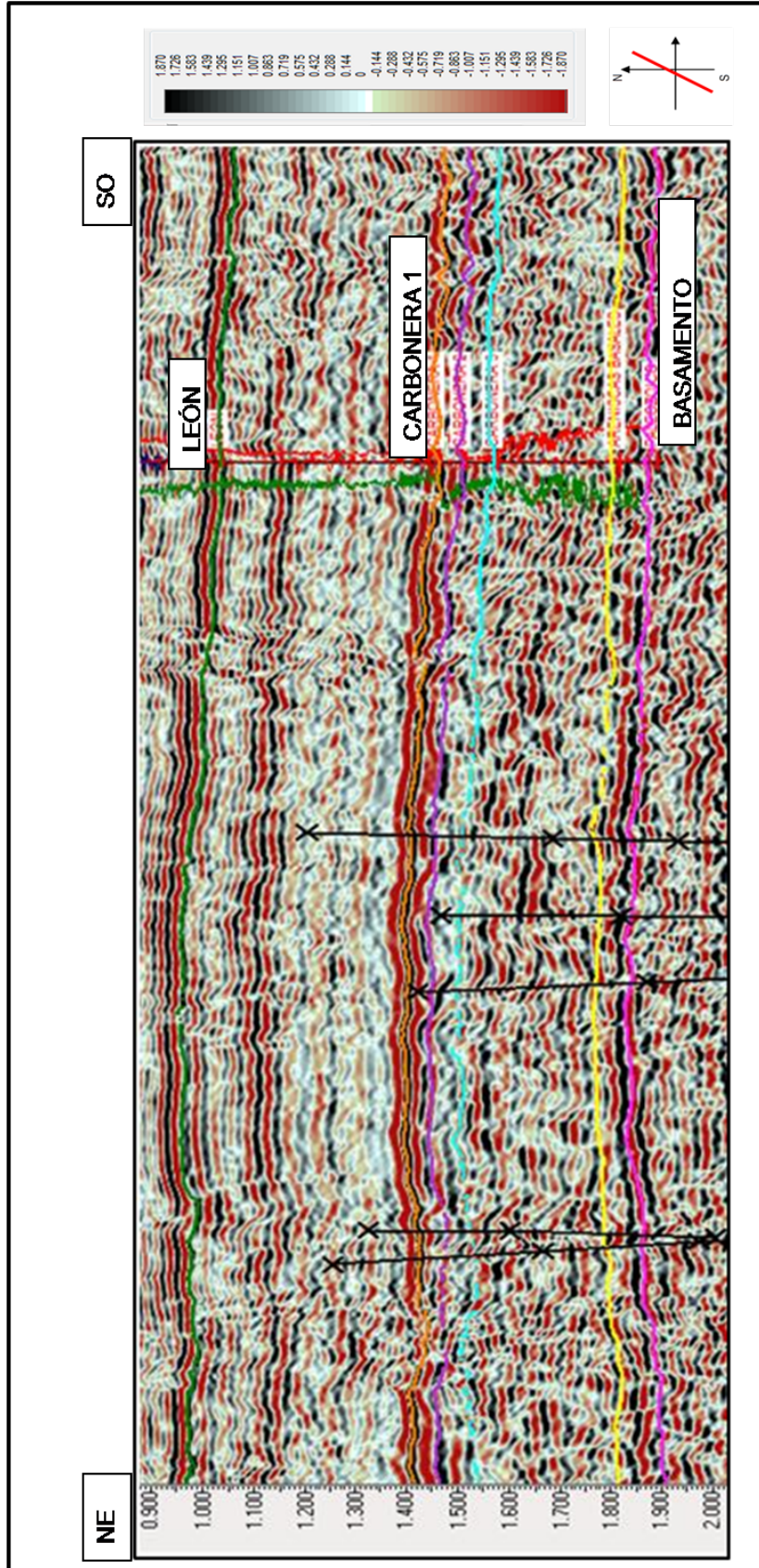


Figura 4-21.: Interpretación sísmica de la PSTM de onda PS.

5. Resultados

La Figura 5-1 muestra el intervalo de CDP de 3400 a 3600 de las secciones PSTM de la onda P y PS, donde los tiempos de la sección CS son aproximadamente el doble de tiempo de la sección P.

La Formación León, en la sección PS tiene contenido moderado de frecuencias, mayor amplitud y mayor continuidad en los reflectores, esto se observa en la Figura 4-14 y la Figura 5-1; mientras que la sección P, tiene menor contenido de frecuencias, baja amplitud y poca continuidad en los reflectores, esto se observa en la Figura 4-8 y la Figura 5-1. El tope de esta formación se ve más marcado en la sección de la onda PS, se debe a que la Formación León es más sensible a la onda S desde el punto de vista litológico.

La Formación Carbonera, por el contrario de la Fm. León, en la sección de la onda P tiene mayor contenido de frecuencias, mayor amplitud y mayor continuidad en los reflectores, como se observa en la Figura 4-8 y la Figura 5-1, mientras que en la sección PS tiene bajo contenido de frecuencias, baja amplitud y poca continuidad en los reflectores, como se observa en la Figura 4-14 y la Figura 5-1, indicando variación lateral fuerte y mejor respuesta a cambios faciales.

Como se menciona anteriormente, la información que proporciona cada onda, acerca del medio es diferente y se complementa, por eso es importante tener la información de las dos ondas.

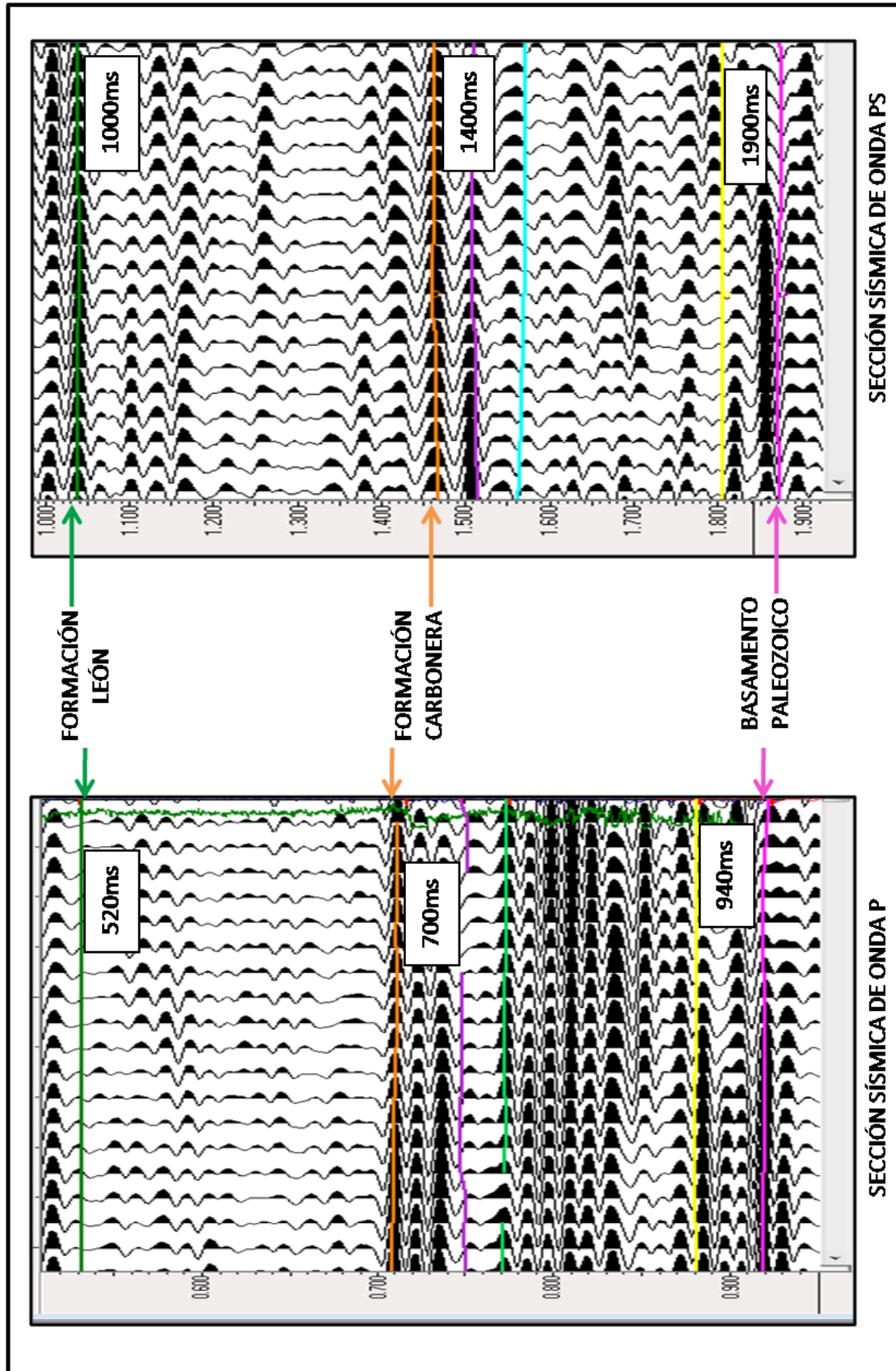


Figura 5-1.: Secciones PSTM de onda P y PS, correlacionando los tiempos de los topes de las formaciones.

En la Figura 5-2 se muestra la correlación con los valores de las velocidades RMS en las formaciones León y Carbonera. En la Formación León, en la sección de la onda P, las velocidades varían entre 2015,4 m/s y 2040,7 m/s y en la sección PS, las velocidades varían entre 968,7 m/s y 1001,2 m/s.

En la Formación carbonera, en la sección de la onda P, las velocidades varían entre 2066 m/s y 2095,2 m/s y en la sección de la onda PS, varían entre 1013,2 m/s y 1127,9 m/s.

En la Formación Paleozoico, las velocidades en la sección de la onda P varían entre 2290 m/s y 2641 m/s y en la sección de la onda PS, entre 1144 m/s y 1150 m/s.

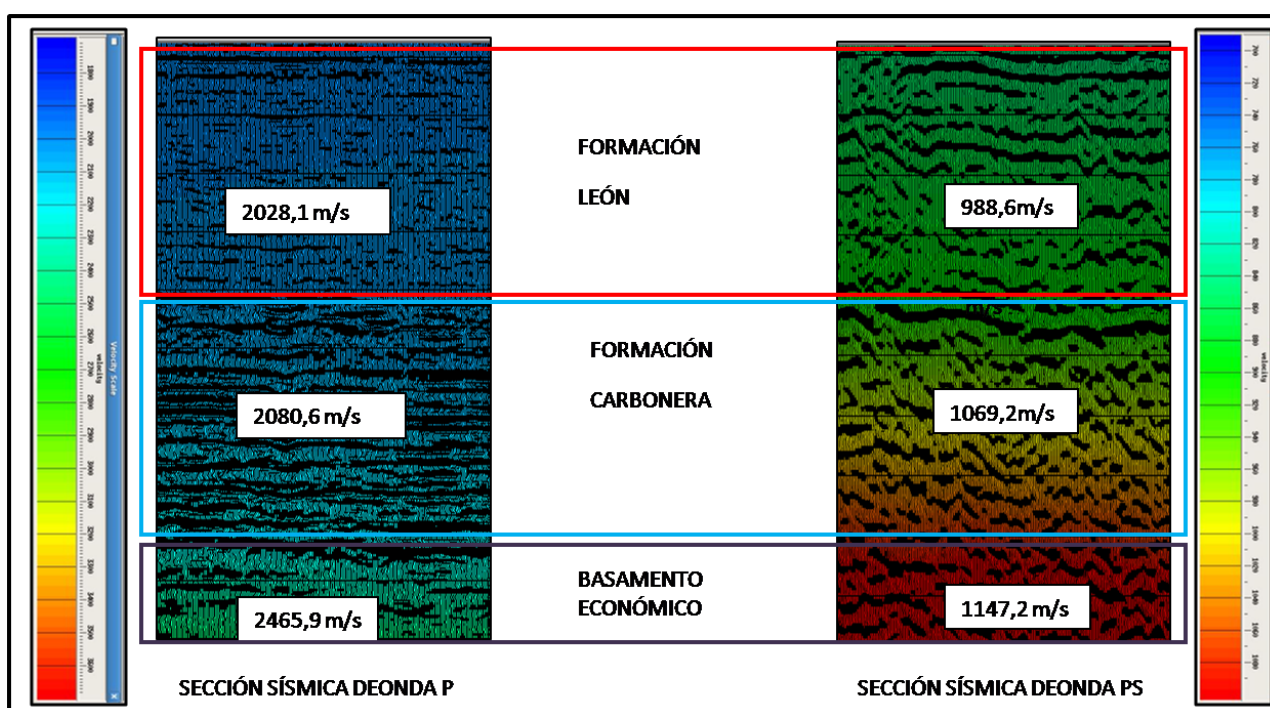


Figura 5-2.: Secciones PSTM de onda P y PS, correlación de las velocidades promedio de la Formación León y Carbonera.

Se estiman las velocidades de intervalo de las velocidades RMS de onda P y CS, usando la ecuación de Dix (1955) en profundidad, luego se calculó la relación v_p/v_s . La Figura 5-3 muestra la sección migrada PSTM de la onda P y superpuesta a ella, la relación v_p/v_s , calculada con las velocidades de intervalo; al lado esta la relación v_p/v_s calculada con los registros sísmico y dipolar. La relación v_p/v_s en la Formación León, entre 520m a 700m, varía entre 2,0 y 1,5. En La Formación Carbonera, entre 700m a 950m, la relación v_p/v_s varía entre 1,5 y 2. Las velocidades de intervalo en profundidad de las ondas sísmicas tienen el mismo comportamiento que las velocidades instantáneas de los registros sísmico y dipolar, este resultado valida el campo de velocidad de onda P y CS.

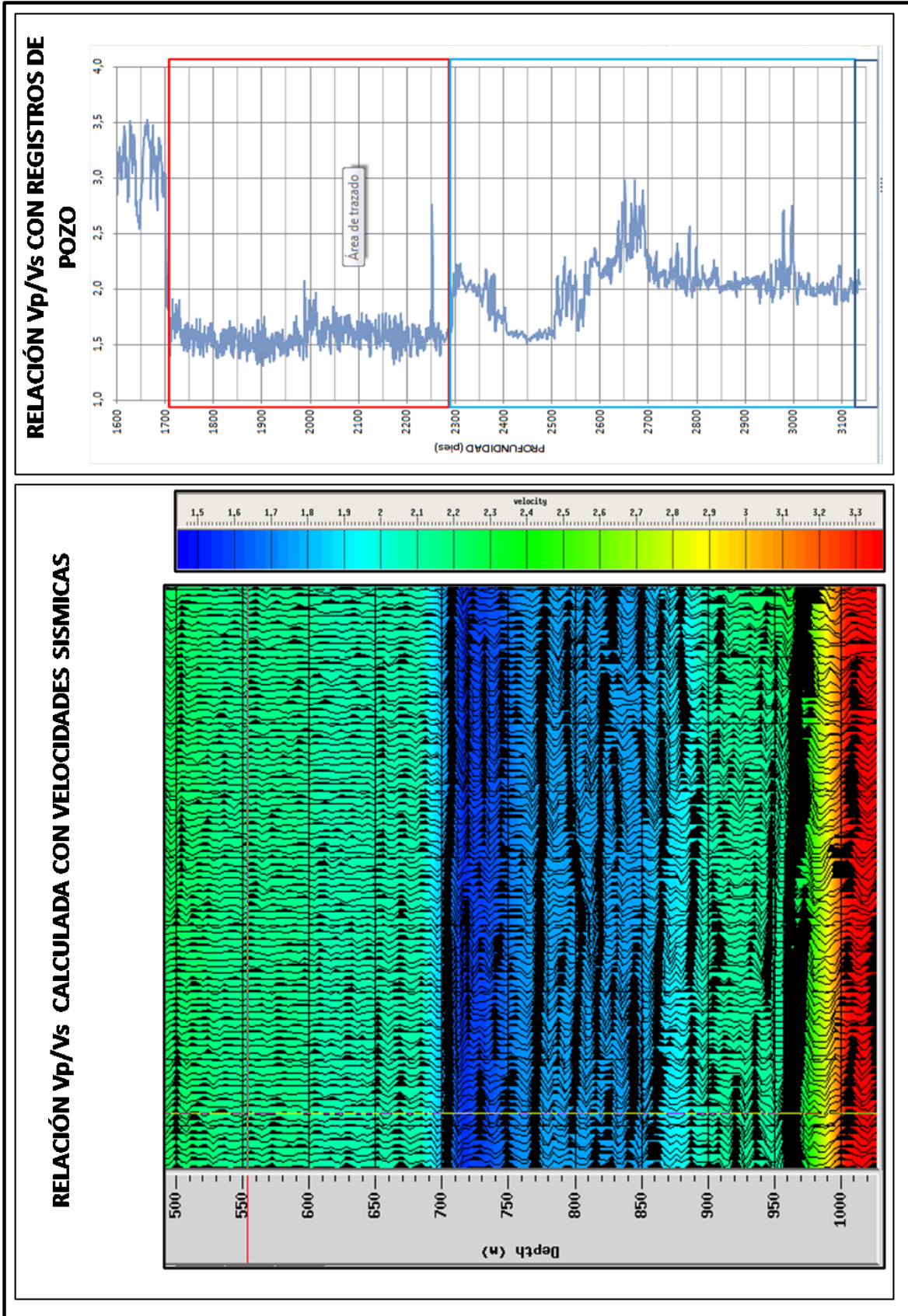


Figura 5-3.: Correlación de la relación v_p/v_s de las formaciones reconocidas, entre la información sísmica y de pozo.

Adicionalmente, con los registros de pozo, registros sónico DTTP y dipolar DTSM se realizaron crossplots entre v_p , v_s y v_p/v_s . En la Figura 5-4 se muestra v_p contra v_s , y GR, el cual permite discriminar dos tipos de litología. Las lutitas de la Formación León y Formación Carbonera unidad C2, señaladas en el recuadro verde, se caracterizan por tener v_p baja, v_s media a alta, y GR alto.

Las rocas de la Formación Carbonera, unidades C1, Intermedia, Areniscas Basales, compuestas por limolitas, arenas muy arcillosas y arcillolitas con contenido de arenas, señaladas en el recuadro fucsia, se caracterizan por tener v_p media a alta, v_s media a alta, y GR medio a bajo.

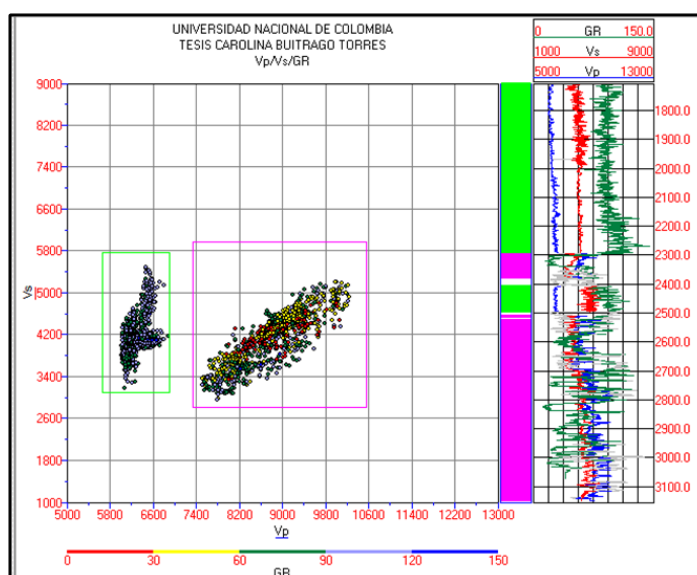


Figura 5-4.: Crossplot entre v_p , v_s y GR, en la Formación León y Carbonera.

En los siguientes dos crossplots se muestran v_p y v_s contra la relación v_p/v_s , en estos gráficos se sigue diferenciando los dos tipos de litología, identificados en Figura 5-4.

En la Figura 5-5 se muestra v_p contra v_p/v_s , y GR, las lutitas de la Formación León y Formación Carbonera unidad C2, señaladas en el recuadro verde, se caracterizan por tener v_p y v_p/v_s bajos, y GR alto; en esta zona no se tiene conocimiento que las lutitas tengan contenido de gas o agua, por lo tanto se atribuye el bajo valor de v_p/v_s a compactación y cementación a esas profundidades.

Según Qin (2013), "los valores de v_p y v_s son afectados por compactación, cementación, porosidad, contenido de fluidos, mineralogía, maduración, etc. Por ejemplo, durante la formación de las lutitas, el lodo está siendo compactado y cementado, con lo cual incrementa los valores de los valores de v_p y v_s , pero decrece la relación v_p/v_s . Esto es porque al estar la roca

más compactada y cementada, incrementa significativamente la resistencia a la deformación de cizalla; v_s incrementa más rápido que v_p ”.

Las rocas de la Formación Carbonera, unidades C1, Intermedia, Areniscas Basales, compuestas por limolitas, arenas muy arcillosas y arcillolitas con contenido de arenas, señaladas en el recuadro fucsia, se caracterizan por tener v_p y v_p/v_s media a alta, y GR medio a bajo.

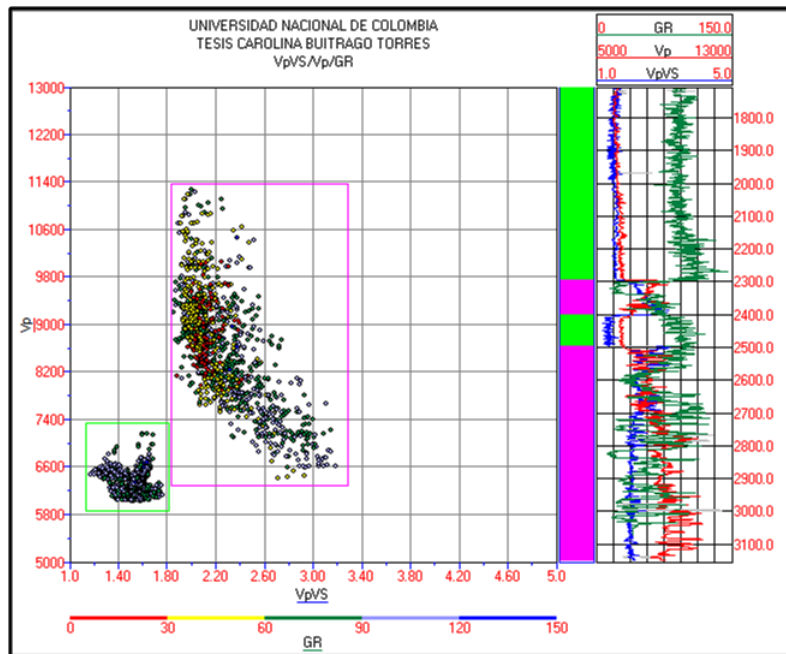


Figura 5-5.: Crossplot entre v_p/v_s y v_p , y GR, en la Formación León y Carbonera.

En la Figura 5-6 se muestra v_p/v_s contra v_s , y GR; v_s oscila entre 3000 pies/s y 6200 pies/s para los dos tipos de litología, sin mostrar cambio que permita la discriminarlas; la relación v_p/v_s si muestra variación, las lutitas de la Formación León y Formación Carbonera unidad C2, señaladas en el recuadro verde, tiene v_p/v_s bajo; y las rocas de la Formación Carbonera, unidades C1, Intermedia, Areniscas Basales, compuestas por limolitas, arenas muy arcillosas y arcillolitas con contenido de arenas, señaladas en el recuadro fucsia, tienen valores altos v_p/v_s .

Según Castagna et al. (1985), al aumentar el contenido de arcilla de una roca, tanto v_p como v_s disminuyen. El rango de variación en el contenido de arcilla puede ser mucho mayor que las variaciones de porosidad, por lo que el valor de la relación v_p/v_s puede depender fuertemente del contenido de arcilla. La relación v_p/v_s es sensible a la litología y contenido de fluido, por eso puede ser usado como indicador de litología.

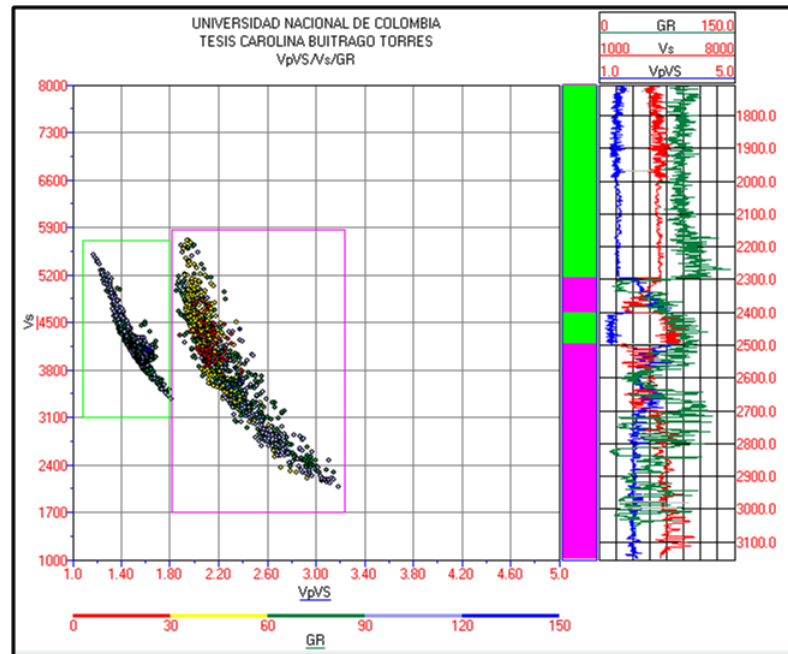


Figura 5-6.: Crossplot entre v_p/v_s y v_s , y GR, en la Formación León y Carbonera.

En la Figura 5-7 se muestra el crossplot de v_p/v_s contra la razón de Poisson, y GR, las lutitas de la Formación León y Formación Carbonera unidad C2, tienen v_p/v_s y razón de Poisson bajos, y las rocas de la Formación Carbonera, unidades C1, Intermedia, Areniscas Basales, compuestas por limolitas, arenas muy arcillosas y arcillolitas con contenido de arenas, tienen v_p/v_s y razón de Poisson alto.

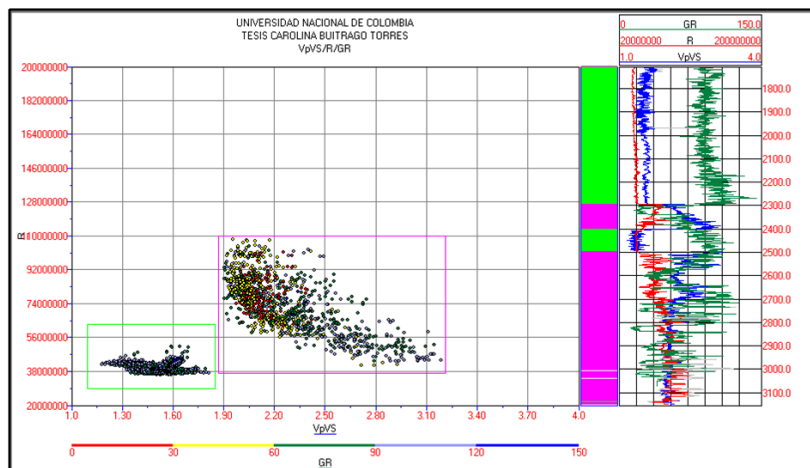


Figura 5-7.: Crossplot entre v_p/v_s y Relación de Poisson, y GR, en la Formación León y Carbonera.

De estos crossplots se evidencia que los paquetes de lutitas de la Formación Carbonera, no son fáciles de distinguir excepto la unidad C2, siendo el paquete con mayor espesor de lutitas dentro de Carbonera, esta Formación tiene espesor aproximadamente de 98 pies (30m).

En la Formación Carbonera unidad C1, Intermedia y Arenas Basales; hay porosidades que varían entre 0.17, en la unidad Intermedia, y 0.24, en la unidad Arenas Basales.

A partir del análisis de los crossplots, se encontró que la mejor forma de identificar litología es con velocidad de onda P y la relación v_p/v_s , y Gamma Ray.

6. Conclusiones y recomendaciones

6.1. Conclusiones

- Se caracterizó la Formación León y Carbonera usando velocidad de onda P y S, con datos sísmicos y de pozo.
- Con los registros de pozo Gamma Ray, Potencial Espontáneo, Resistividad, Densidad, Factor fotoeléctrico, Porosidad de Neutrón, se obtuvo como resultado la distribución de arcillas y arenas, de la Formación León y Carbonera.
- Los campos de velocidad de onda P y S de los registros de pozo me permitieron conocer cuál es la respuesta petrofísica de las rocas ante cada campo de onda.
- Para obtener el campo de velocidad de onda P y PS de los datos sísmicos, fue necesario desarrollar la secuencia de procesamiento de la onda CS.
- A partir del análisis de velocidad se encontró que la mejor forma de identificar litología es con V_p , la relación V_p/V_s y GR.

6.2. Recomendaciones

- Para trabajar con datos sísmicos de onda PS, el diseño del programa de adquisición sísmica, debe ser enfocado a obtener este tipo de onda, es decir, tener presente que el diseño de onda convertida está ligado a la impedancia elástica de las rocas presentes en la zona.
- Probar la metodología en este trabajo expuesta, con una línea de buzamiento, ya que por motivos de disponibilidad de información completa, se trabajó con una línea de rumbo.
- Se recomienda a futuros estudiantes realizar migración anisotrópica VTI, para la onda P y PS, teniendo en cuenta los cambios verticales dentro de las formaciones y realizar comparación entre los resultados.

A. Anexo No. 1: PSTM DE ONDA P

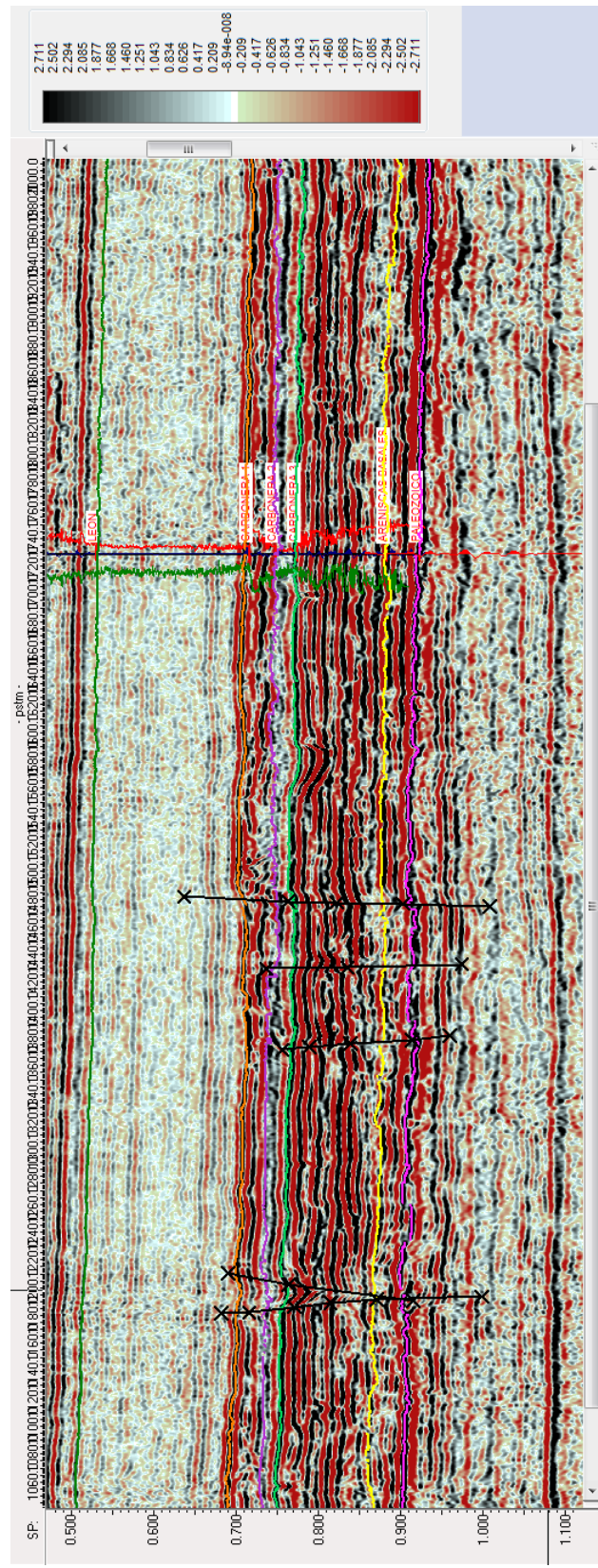


Figura A-1.: Interpretación de la migración pre-apilado en tiempo de onda P.

B. Anexo No.2: PSTM DE ONDA PS

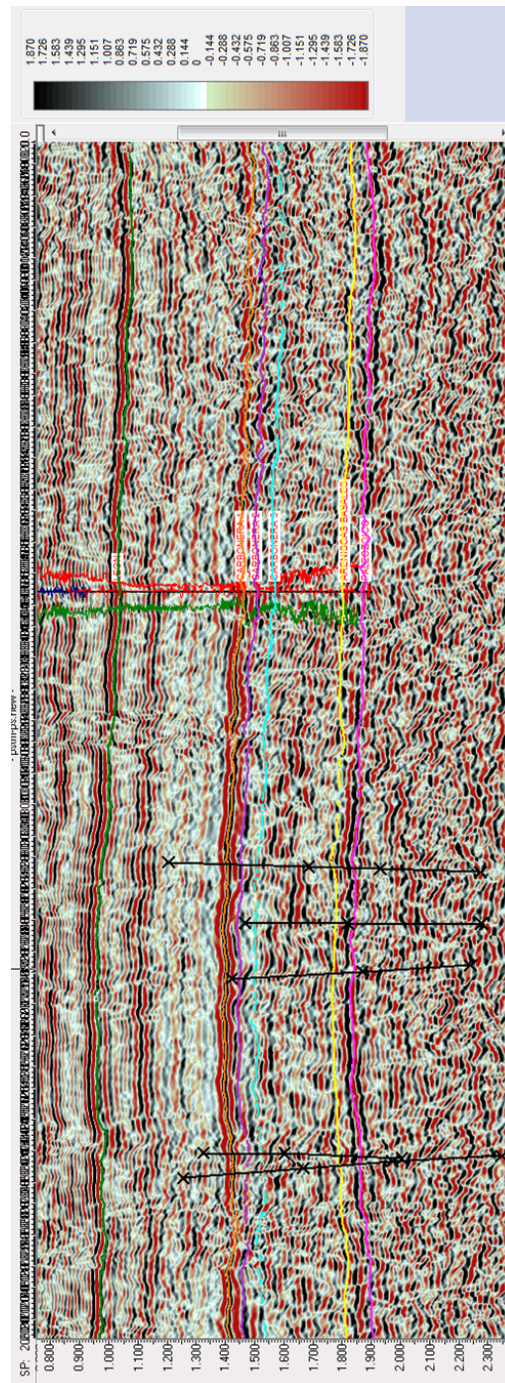


Figura B-1.: Interpretación de la migración pre-apilado en tiempo de onda PS.

C. Anexo No.3: MODELO DE VELOCIDAD DE ONDA P

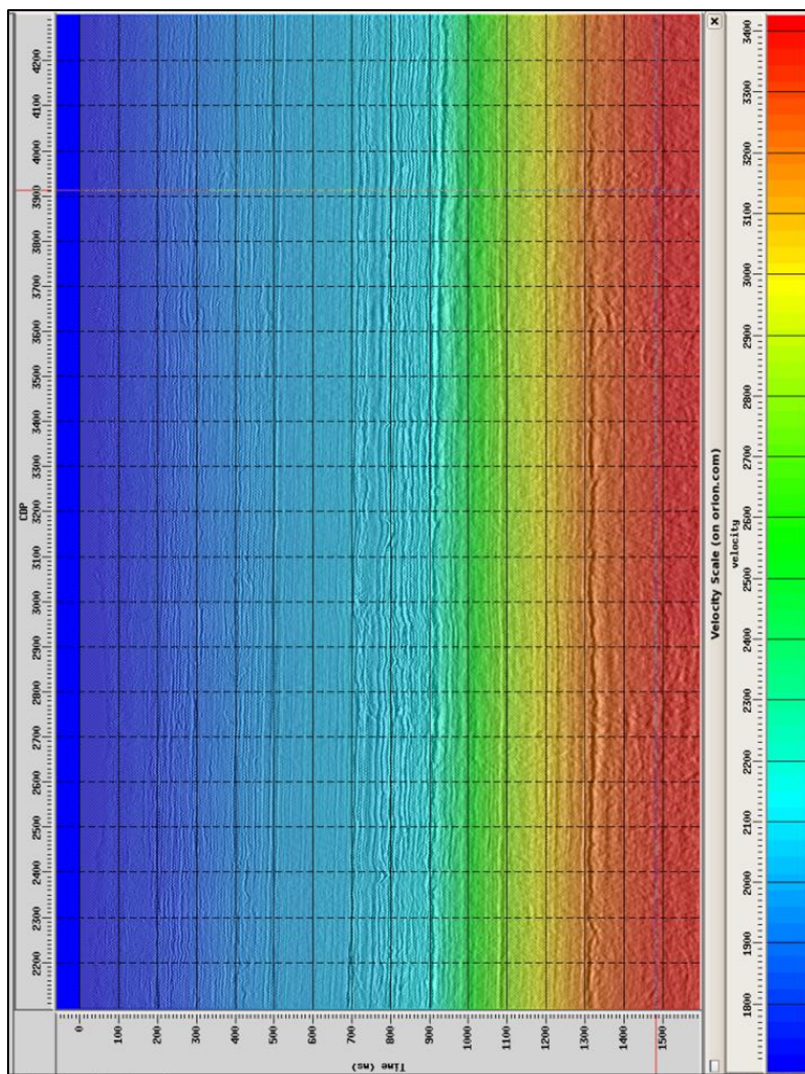


Figura C-1.: Modelo de velocidad de ONDA P

D. Anexo No.4: MODELO DE VELOCIDAD DE ONDA PS

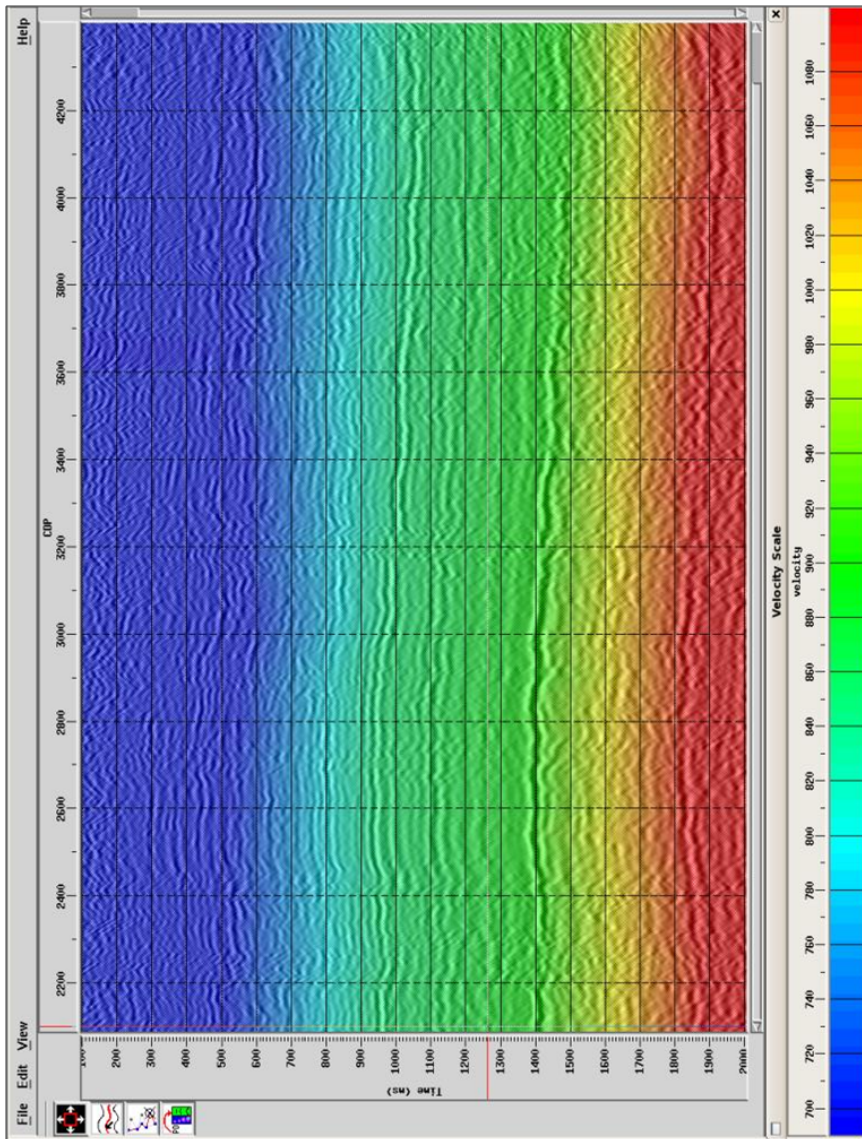


Figura D-1.: Modelo de velocidad de ONDA PS.

E. Anexo No.5: CÁLCULO DE LA RELACIÓN V_p/V_s CON VELOCIDADES SÍSMICAS

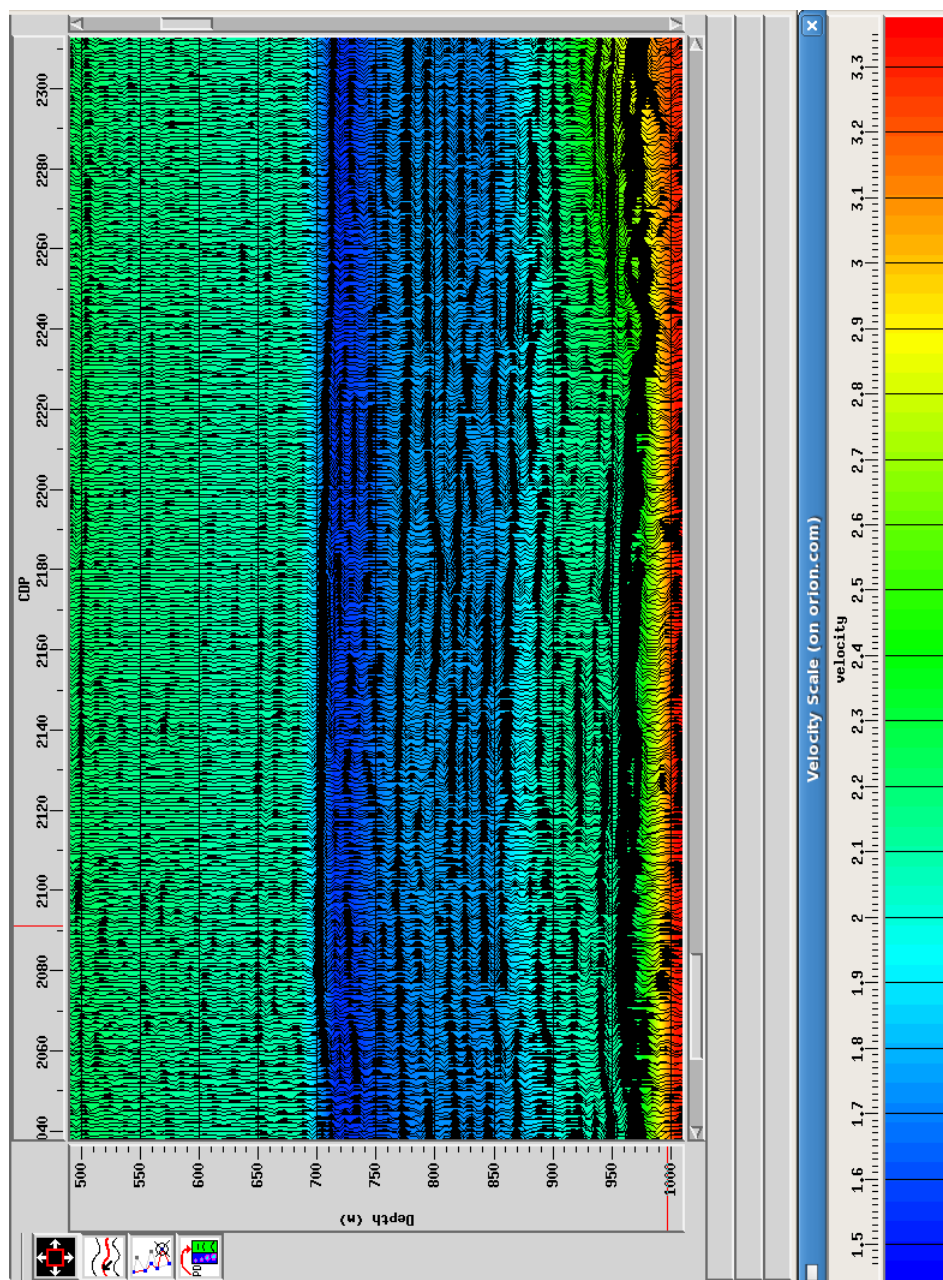


Figura E-1.: Relación V_p/V_s calculada con Velocidades Sísmicas en profundidad.

F. Anexo No.6: CÁLCULO DE LA RAZÓN de POISSON CON VELOCIDADES SÍSMICAS

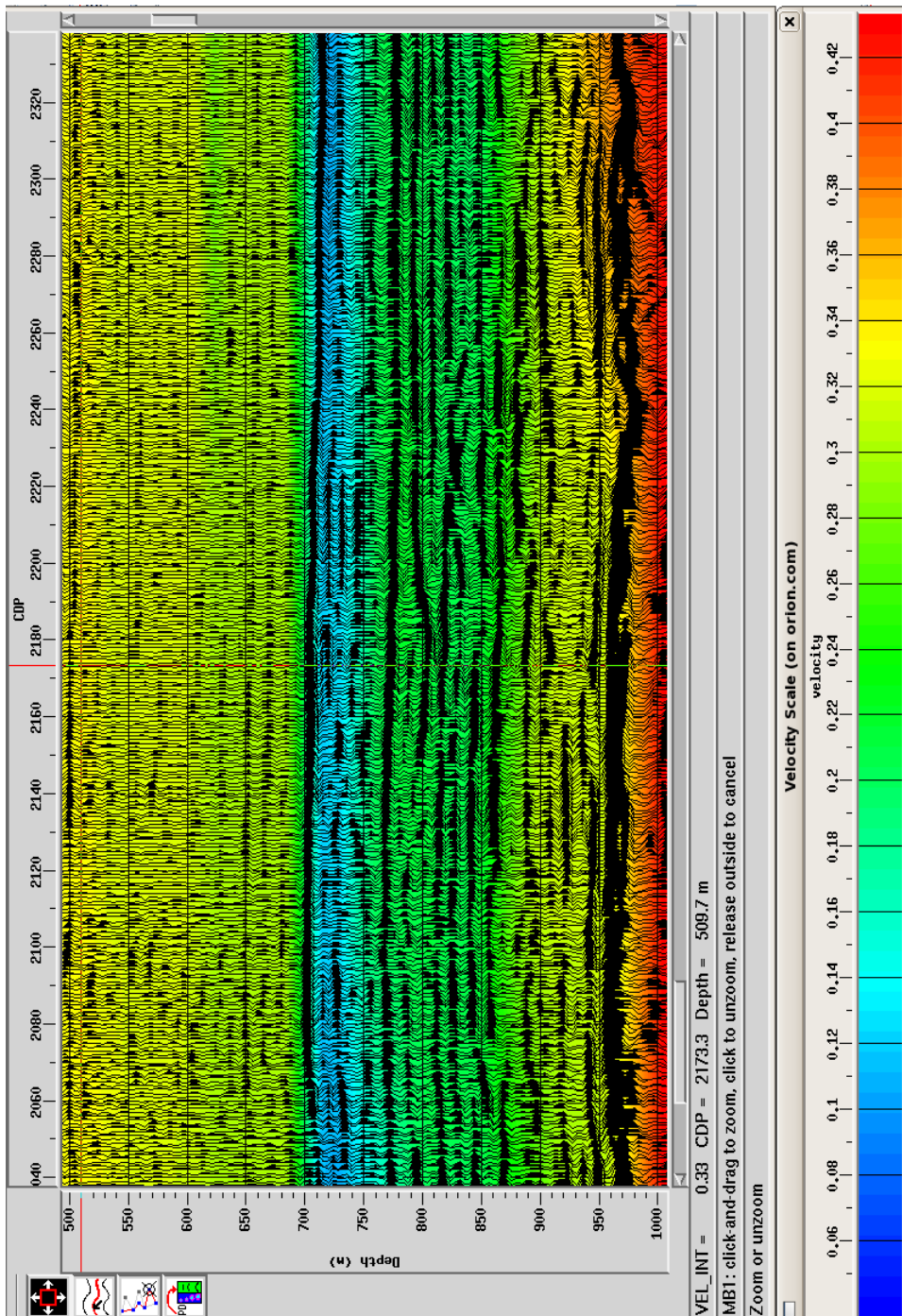


Figura F-1.: Razón de Poisson calculada con Velocidades Sísmicas en profundidad.

Bibliografía

- ANH (2012). Cuenca llanos orientales, integración geológica de la digitalización y análisis de núcleos. Technical report, INGRAIN, Digital Rock Physics Lab.
- Arango, A. (2014). Analisis sismoestratigrafico de la formación carbonera miembro c7 (municipios de orocué y san luis de palenque, cuenca llanos orientales), colombia. Master's thesis, Universidad Nacional de Colombia.
- Bautista, C. (2011). Punto de conversión común para la obtención de imágenes sísmicas de onda convertida (ps) a partir de sísmica multicomponente. Master's thesis, Universidad Nacional de Colombia.
- Castagna, J., Michael, L., and Raymond, L. (1985). Relationships between compressional-wave and shear-wave velocities in clastic silicate rocks. *Geophysics*, 50(4):571–581.
- Cooper, M., Addison, F.T. and Álvarez, R., Coral, M., Graham, R. H., Hayward, A. B., Howe, S., Martínez, J., Naar, J., Peñas, R., Pulham, A. J., and Taborda, A. (1995). Basin development and tectonic history of the llanos basin, eastern cordillera, and middle magdalena valley, colombia. *American Association of Petroleum Geologists, AAPG*, 79(10):1421–1443.
- Crain, E. (2015). Crain's petrophysical handbook.
- Garotta, R. (1987). Two-component acquisition as a routine procedure. in: shear-wave exploration. *Geophysics Developments*, 1:122–136.
- Garotta, R. (2000). Shear waves from acquisition to interpretation. In *Distinguished Instructor Series*, number 3.
- Qin, X. (2013). Vp-vs relations of organic-rich shales. Master's thesis, University of Houston.
- Sheriff, R. and Geldart, L., editors (1995). *Exploration Seismology*. University of Cambridge, New York.
- Stein, S. and Wysession, M., editors (2003). *An Introduction to seismology earthquakes and earth structure*. Blackwell, Malden.
- Stewart, R., Gaiser, J., Brown, J., and Lawton, D. (2003). Tutorial converted wave seismic exploration: Applications. *Geophysics*, 68(1):40–57.

Tessmer, D. and Behle, A. (1988). Common reflection point data-stacking technique for converted waves. *Geophysics*, 36(1):671–688.