

Análisis de efectos *pull-up* a través de modelado computacional de datos sísmico y migración en profundidad, llanos colombianos

Analysis of *pull-up* effects through seismic modeling and depth migration, colombian plains

Adelo Vieira[†]

Crelia Padrón[†]

Resumen

En geofísica llamamos *pull-up* a una elevación observada en la data sísmica que no responde a la forma de las estructuras geológicas sino a cambios laterales o locales de velocidad. Debido a la existencia de una considerable variación lateral e inversión de velocidad en la cuenca de los llanos colombianos, este efecto ha sido hipotéticamente asociado a los eventos plegados convexos hacia arriba que se observan en la data sísmica adquirida en la zona. Siendo estos reflectores, con cierre en cuatro direcciones, los que llaman la atención de los exploradores, es lógico que dicha hipótesis genere grandes dudas a la hora de fijar un punto de perforación.

En el presente estudio se realizan simulaciones sísmicas a partir de un modelo geológico de capas planas que reúne dos rasgos representativos del play de la cuenca llanos orientales de Colombia: fallamiento normal e inversión de velocidad; características que en conjunto dan pie a una atípica variación lateral de velocidad. Con este modelo, el trabajo aborda tres métodos de simulación: trazado de rayos normales, trazado de rayos preapilamiento y diferencias finitas. Esto permite visualizar la propagación de los rayos a través del modelo geológico, así como la generación de data sísmica sintética post y preapilamiento y su correspondiente secuencia de procesamiento. Los resultados demuestran y explican de una manera práctica y asimilable la aparición de *pull-up* en zonas aledañas a la falla de los eventos sintéticos correspondientes al bloque levantado. Estas elevaciones producidas por efectos *pull-up* coinciden relativamente con la ubicación de los altos sísmicos observados en los datos reales; resultados que sugieren la existencia de dicha anomalía en la data sísmica adquirida en los llanos orientales de Colombia.

Palabras claves: *Pull-up*, Modelado Sísmico, Migración en tiempo (*PreSTM*), Migración en profundidad (*PreSDM*).

[†]Universidad Simón Bolívar

Abstract

In geophysics is called *pull-up* to an uplift recognized in the seismic data that is not caused by the shape of geological structures; but by a local high velocity region or lateral velocity variations. Because there is a considerable lateral variation and a velocity inversion in the Colombian plain basin, this effect has been hypothetically associated with convex upward folded events observed in the seismic data acquired in the area. These reflectors, forming a four-way closure, keep the attention of explorers, making that hypothesis to cause big uncertainties on well planning processes.

In this work we perform seismic simulations from a flat layers geological model which bring together two representative features of the basin of Colombian eastern plains: normal faulting and velocity inversion; features that produce a singular lateral velocity variation. With this model, the paper discusses three simulation methods: normal ray tracing, prestack ray tracing and finite differences. This allows visualizing the rays propagation through the geological model, generate post an prestack synthetic seismic data and its corresponding processing sequence. The results show and explain the presence of *pull-up* in areas near the fault on synthetic events corresponding to the footwall block. These elevations produced by *pull-up* effects coincide relatively with the location of the uplifts observed in the real data; results suggest the existence of such anomaly in the seismic data acquired in the Colombian eastern plains.

Keywords: *Pull-up*, Seismic Modeling, Time migration (*PreSTM*), Depth migration (*PreSDM*).

1. Introducción

Ramon et al. (2006) advierte la existencia de una inversión de velocidad en la cuenca de los llanos colombianos debido a la presencia de la Fm. León. Ésta “es una secuencia arcillosa con un contenido anómalamente alto de fluidos de formación”[Ramon et al. (2006)]; característica que implica una disminución de las velocidades sísmicas. De aquí que la Fm. León tenga velocidades más bajas que la suprayacente formación Guayabo y mucho menores que la infrayacente formación Carbonera. Algo más, las fallas normales antitéticas inherentes al *Play* de dicha cuenca ponen en contacto lateral a rocas de diversas velocidades sísmicas, generando importantes variaciones laterales de velocidad.

El *pull-up* es un alto sísmico que surge por la presencia de una región local de alta velocidad o por variaciones laterales de velocidad. Por tanto, los eventos plegados convexos ha-

cia arriba que se observan en la data sísmica adquirida en los llanos colombianos, han sido hipotéticamente asociados a efectos *pull-up*.

En la Figura 1 se muestra la interpretación de una *inline PreSTM* correspondiente a la cuenca llanos orientales de Colombia. Allí, cada evento resaltado se encuentra acompañado por una línea recta que se ajusta muy bien (para la mayoría de los casos) a la interpretación en los puntos lejanos a la falla, permitiendo visualizar adecuadamente y cuantificar las deformaciones (plegamientos convexos hacia arriba) que se presentan al borde de la falla y han sido asociados a la presencia de efectos *pull-up*.

IGS Services & Consulting (2008) realizó un análisis de los registros sísmicos de dos pozos perforados en zonas cercanas a la *inline* de la Figura 1; encontrando velocidades de 2772, 2345 y 3048 *m/s*, para Sup.–Base Guayabo, León y Carbonera, respectivamente. Es importante notar que la falla normal pone

en contacto lateral a rocas de la Fm. Guayabo con las de la Fm. León; habiendo una inversión tan marcada (desde 2772 hasta 2345 m/s) esto produce también una sustancial variación lateral de velocidad que pudiera estar influyendo en la aparición de efectos *pull-up*.

El presente trabajo nace con la motivación de descifrar la existencia o no de efectos *pull-up* a partir de la configuración geológica del *play* de la cuenca de los llanos colombianos. Con tal fin, se realizaron simulaciones computacionales de la propagación de ondas sísmicas a partir de un modelos geológicos 2D que simplifica la geología del área de estudio. El trabajo aborda tres métodos de simulación: trazado de rayos normales, trazado de rayos preapilamiento y diferencias finitas. A los datos sintéti-

cos generados se aplicó una secuencia de procesamiento hasta migración preapilamiento en profundidad. Esto último busca precisar aspectos claves del procesamiento que permitan corregir anomalías de este tipo.

Todas las simulaciones sísmicas tratadas en este trabajo (trazado de rayos y ecuación de onda por diferencias finitas) se llevaron a cabo a través del programa *Seismic Unix*. Este *software* es distribuido gratuitamente y con acceso al código fuente; desarrollado y mantenido por el Centro para fenómenos ondulatorios de la Escuela de Minas de Colorado [Center for Wave Phenomena, Colorado School of Mines]. Para el procesamiento e interpretación de la data se utilizaron los programas de la compañía CGG-Veritas.

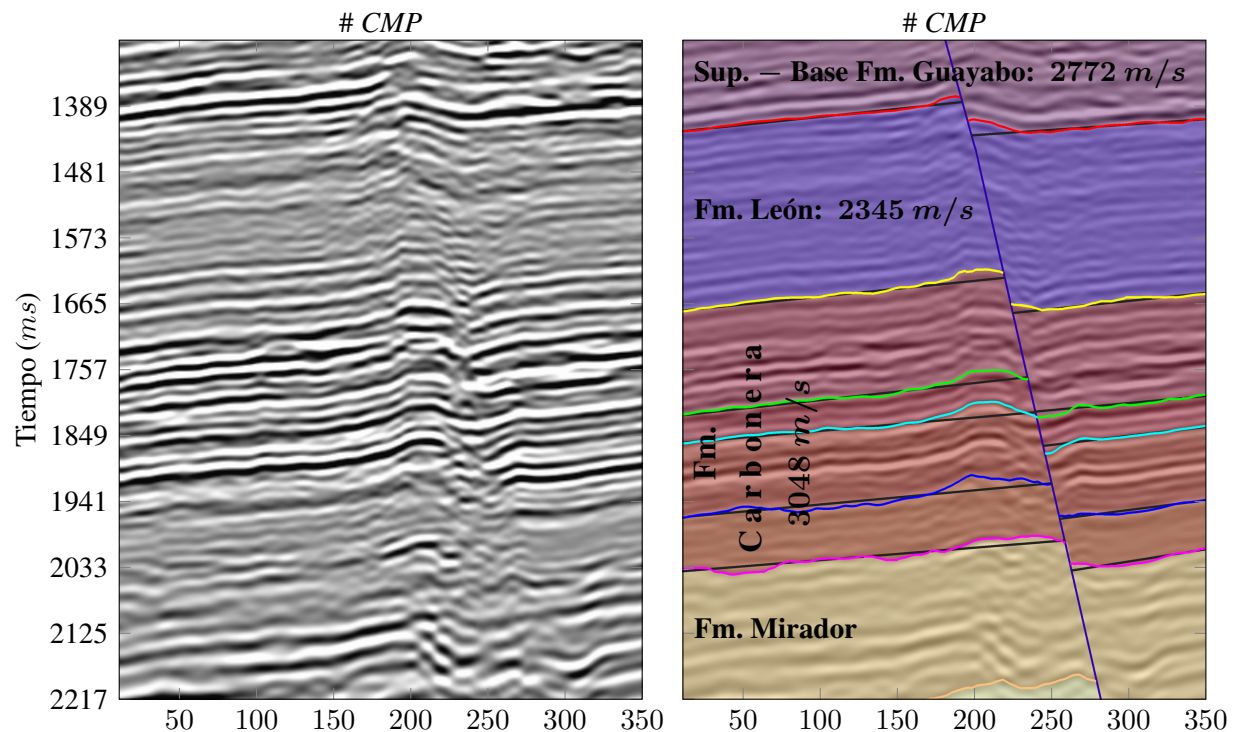


Figura 1: Interpretación de una *inline PreSTM* correspondiente a los llanos orientales de Colombia. Note los plegamientos convexos hacia arriba (hipotéticamente asociados a efectos *pull-up*) en las proximidades de la falla.

Figure 1: Interpretations of a *PreSTM inline* corresponding to Colombian eastern plains. See the convex upward folded events (hypothetically associated with *pull-up* effects) near the fault.

2. Método

2.1. Construcción del modelo geológico

El modelo geológico se construyó con el propósito de obtener una configuración de capas muy simple que pudiera agrupar los dos rasgos característicos del *play* de la cuenca de los llanos colombianos: fallamiento normal e inversión de velocidad. En la Figura 2 se presenta la estructura geológica formada por tres capas planas, horizontales, homogéneas e isotrópicas y una falla normal con buzamiento de 45°. La primera capa representa la sección desde la superficie hasta la base de la Fm. Guayabo, la segunda a la Fm. León y la tercera representa a la Fm. Carbonera (ver Figura 1). Las velocidades han sido ajustadas de acuerdo

a los resultados hallados por IGS a través de la información de pozo. Como siempre, es importante notar que la capa 2 (correspondiente a la Fm. León) presenta una velocidad considerablemente menor que la capa suprayacente (*Inversión de velocidad*). Note también que la falla normal pone en contacto lateral a la capa 1 con la 2, ocasionando una importante *variación lateral de velocidad*.

2.2. Modelado sísmico por trazado de rayos normales

En el Vídeo 1 (Figura 3) se presenta el trazado de rayos normales sobre la base de la Capa 2. Allí, los rayos propagándose hacia abajo (antes de reflejarse en la interfaz entre la Capa 2 y la 3) se representan en color azul, y luego de la reflexión se muestran en color rojo.

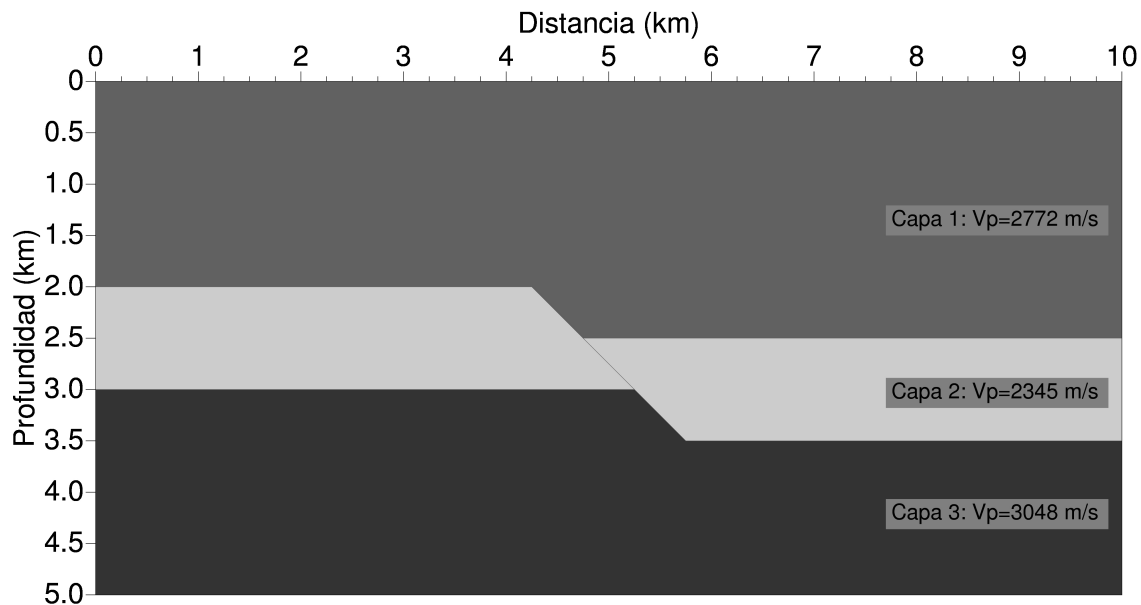


Figura 2: Modelo geológico. Las capas 1, 2 y 3 representan: la sección desde la superficie hasta la base de la Fm. Guayabo, la Fm. León y la Fm. Carbonera, respectivamente.

Figure 2: Geological model. The layer 1, 2 and 3 represent: The section between the surface and the base of Guayabo Fm., the León Fm. and the Carbonera Fm., respectively.

La Figura 3 congela el instante en que los rayos centrales (Aprox. desde 4,75 hasta 5,25 km) ya han llegado a superficie mientras que el grupo de rayos que se extiende desde 0 hasta Aprox. 4,25 km aún no toca superficie. Se debe notar que los dos grupos de rayos mencionados se reflejan en la misma interfaz y a la misma profundidad. Es decir, la señal grabada desde cero hasta 5,25 km corresponde a una interfaz horizontal; pero debido a la precipitada llegada de los rayos centrales, el evento sísmico resultante (en tiempo) no conservará la horizontalidad de la correspondiente interfaz. En otras palabras, la sísmica temporal no será fiel transcripción de la estructura geológica.

De la misma Figura 3 también se debe notar la causa del desfase entre los dos grupos de rayos citados. Debido a la presencia de la falla, el grupo de rayos centrales (en comparación

con el resto de los rayos que se reflejan en el bloque levantado) recorre mayor distancia por la Capa 1 y menor distancia a través de la Capa 2. Como la 1 es de mayor velocidad que la 2 (inversión de velocidad) los rayos centrales llegan a superficie en un menor tiempo.

Ahora detalle la resultante sección sísmica *zero offset* presentada en la Figura 4 y su acercamiento e interpretación de la anomalía en la Figura 5. De la última se reconoce la aparición de *pull-up* con magnitud de 71 ms en el evento correspondiente al bloque levantado; anomalía que lógicamente responde a la precipitada llegada de los rayos centrales. He aquí, en estas observaciones, el concepto de *pull-up*: una elevación sísmica que no obedece a la forma de las estructuras geológicas sino a cambios laterales o locales de velocidad.

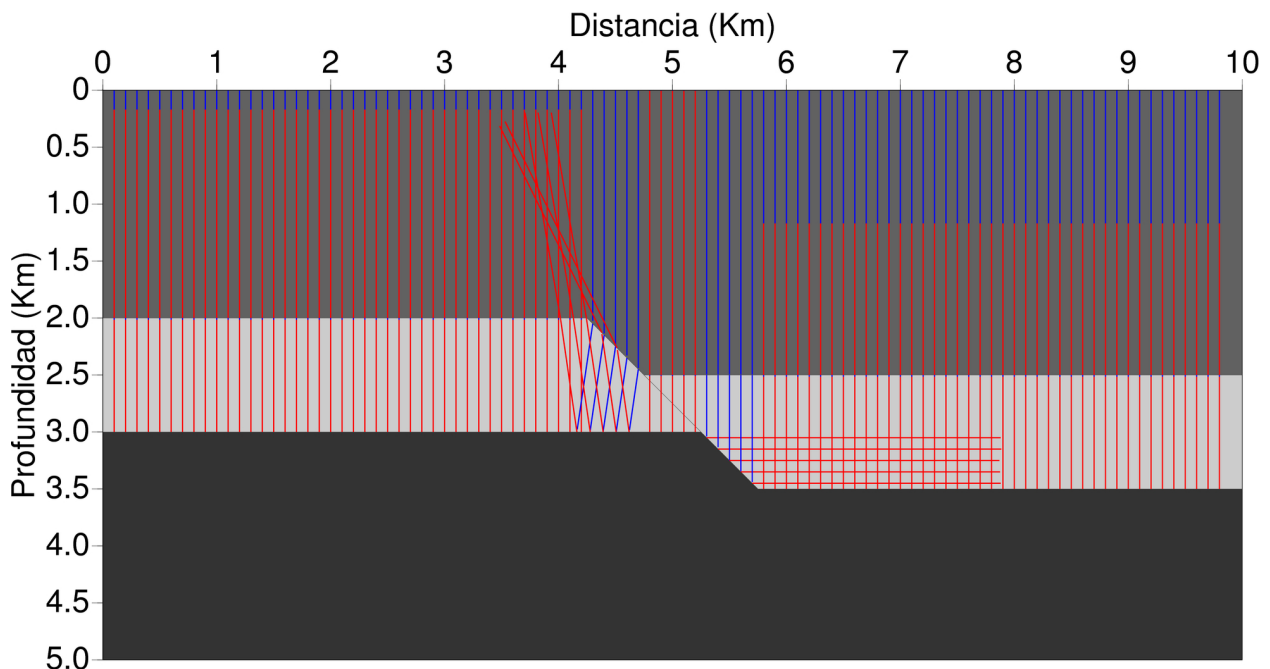


Figura 3: (Video 1) Animación del trazado de rayos normales sobre la base de la Capa 2.

Figure 3: (Video 1) Normal ray tracing on the base of layer 2.

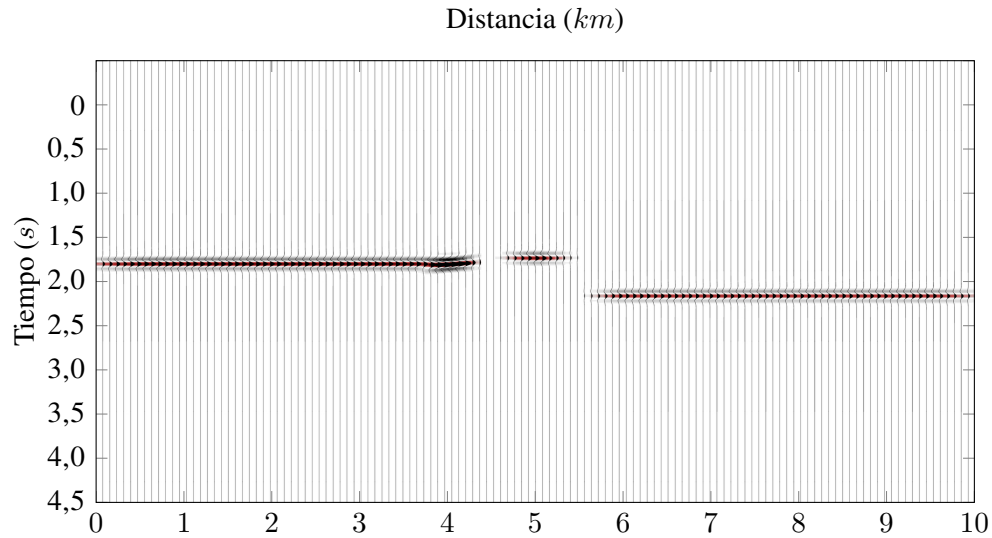


Figura 4: Sección sísmica *offset* cero. Note el efecto *pull-up* cercano al salto de falla.
 Figure 4: Zero *offset* seismic section. See the *pull-up* effect near the fault.

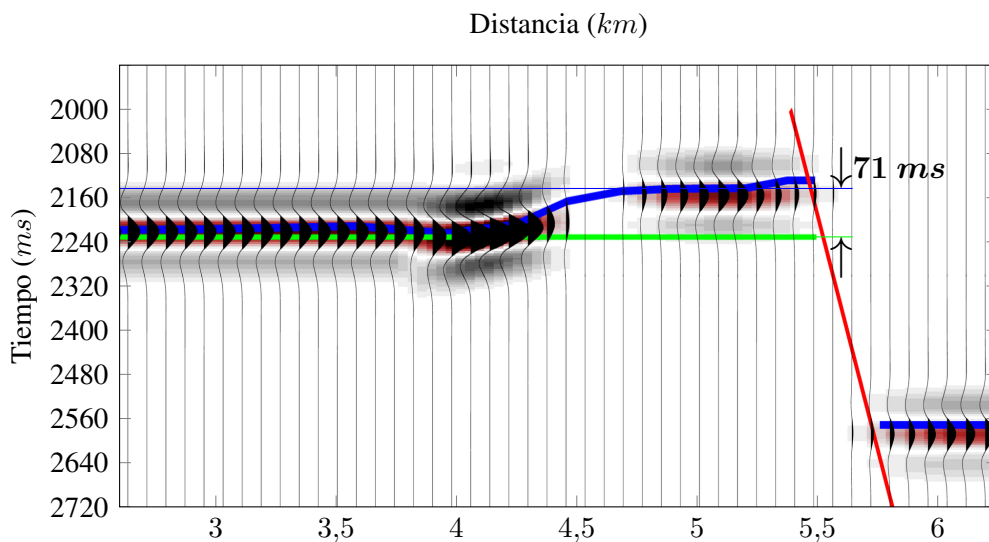


Figura 5: Acercamiento de la sección sísmica incluida en la Figura 4.
 Figure 5: Zoom in of the seismic section include in Figure 4.

2.3. Modelado sísmico por trazado de rayos

Partiendo del mismo modelo geológico (Figura 2) y a través la misma teoría de rayos, en esta parte se utilizó un método de simulación un poco más realista que el trazado de rayos normales. Este método busca recrear el proceso de adquisición de una línea sísmica con

el propósito de generar data sintética preapilamiento. Lo anterior implica simular la propagación de los rayos para un conjunto de disparos sobre toda la extensión de la estructura geológica. El diseño de adquisición está comprendido por los parámetros desplegados en la Tabla 1.

La Figura 6 resume gráficamente la simulación mostrando algunos de los disparos sobre toda la extensión del modelo. La data genera-

da está conformada por 80 *shot gathers* de 122 trazas (280 *CMP gathers* con cobertura máxima de 61).

Tabla 1: Parámetros de adquisición empleados en el modelado sísmico por trazado de rayos.
Table 1: Acquisition parameters used in the ray tracing seismic modeling.

| | |
|--|----------------|
| Tipo de tendido | <i>split</i> |
| <i>Offset</i> máximo | 3025 <i>m</i> |
| Intervalo entre grupos receptores | 50 <i>m</i> |
| Intervalo entre fuentes | 50 <i>m</i> |
| Grupos de receptores por disparo | 122 |
| Número de disparos | 80 |
| Posición <i>x</i> del primer receptor | 0 |
| Posición <i>x</i> del último receptor | 10000 <i>m</i> |
| Posición <i>x</i> de la primera fuente | 3025 <i>m</i> |
| Posición <i>x</i> de la última fuente | 6975 <i>m</i> |
| Profundidad de fuentes y receptores | 0 |
| Intervalo de muestreo | 4 <i>ms</i> |
| Tiempo de grabación | 5 <i>s</i> |

2.3.1. Procesamiento de la data sintética

La data sintética generada por trazado de rayos, y más aún sobre un modelo geológico simple, produce eventos muy bien definidos y completamente libres de ruido. El procesamiento abarca una secuencia estándar y muy elemental:

1. Conversión del formato de la data.
2. Creación de la Geometría.
3. Primer análisis de velocidad por semblanza.

4. Corrección NMO.
5. Apilamiento.
6. Migración en tiempo postapilamiento.
7. Migración en tiempo preapilamiento.
8. Segundo análisis de velocidad por semblanza: sobre los *gathers* obtenidos en la migración preapilamiento.
9. Migración en tiempo preapilamiento empleando el campo de velocidad obtenido en el segundo análisis de velocidad.

En la Figura 7 se ha incluido la sección apilada. Como era de esperar, la migración debe corregir sólo la señal proveniente de las reflexiones sobre la falla, y por supuesto, la señal que conforma al *pull-up*. La migración postapilamiento en tiempo se aplicó mediante tres algoritmos distintos:

- Migración de cambio de fase.
- Migración por diferencias finitas.
- Migración *Kirchhoff*.

Los tres procesos arrojaron resultados muy similares. Sin embargo, los datos más limpios se obtuvieron con el algoritmo de *Kirchhoff*.

La migración preapilamiento en tiempo, cuya sección se muestra en la Figura 8, se llevó a cabo sólo a través de *Kirchhoff*, desplegando resultados muy similares a los del proceso postapilamiento. En la Figura 9 se muestra un acercamiento de la sección *PreSTM* que deja ver la persistencia de *pull-up* con magnitud de 74 *ms*; valor muy similar a los 71 *ms* obtenidos mediante el trazado de rayos normales (ver Figura 5).

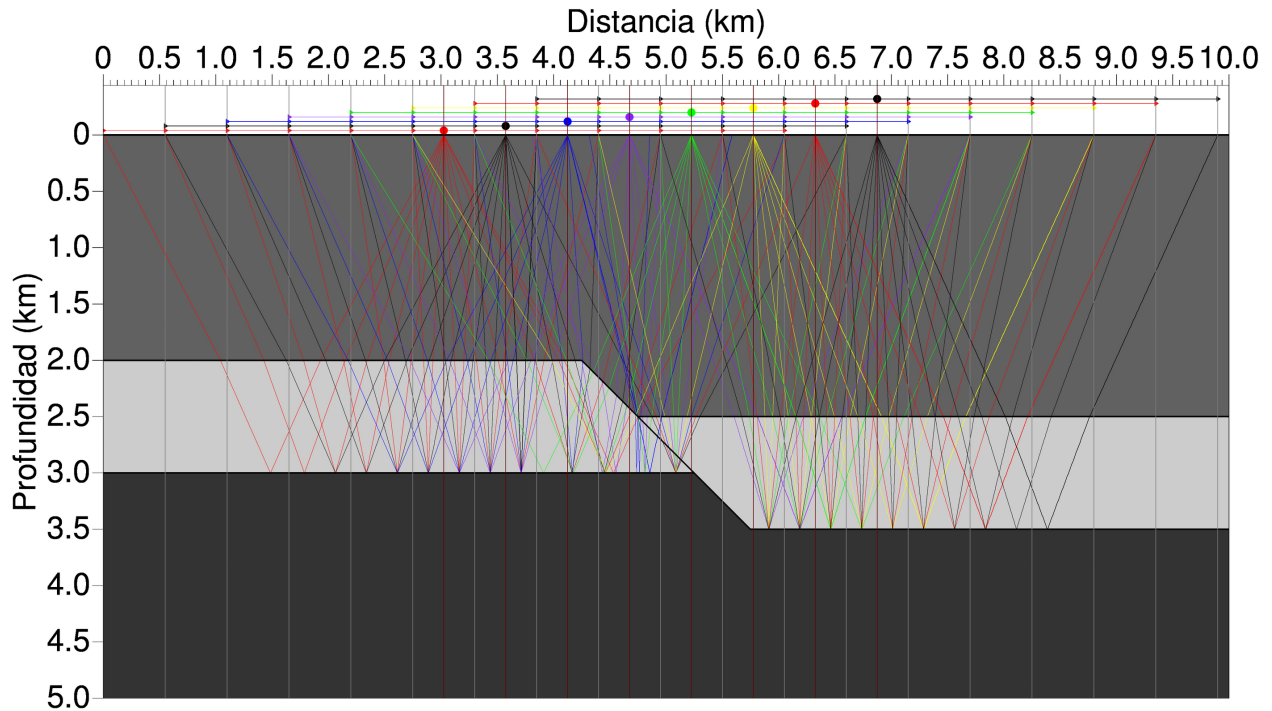


Figura 6: Trazado de rayos sobre la base de la capa 2 para un tendido *split*. Aquí se presenta un resumen de la simulación: ocho disparos separados cada 500 m; y para cada disparo, 12 puntos receptores dispuestos a lo largo de todo el tendido de *offset* máximo 3025 m.

Figure 6: Ray tracing on the base of layer 2 using a split spread. Here is a resume of simulation: eight shots separated 500 m each and twelve receiver points for each shot along the total spread extension with maximum offset 3025 m.

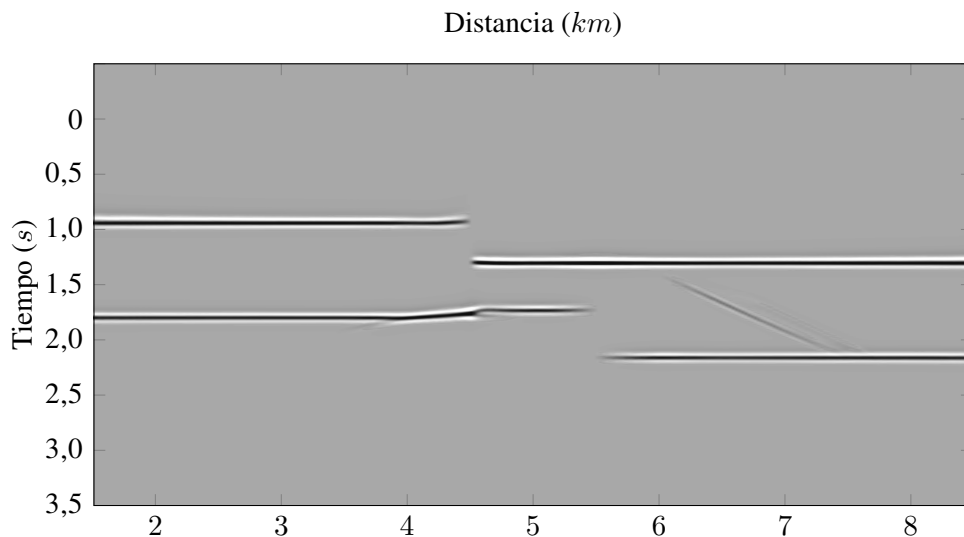


Figura 7: Sección apilada obtenida a partir del trazado de rayos sobre el modelo geológico de la Figura 2.

Figure 7: Stack section obtained from ray tracing based on the geologic model in Figure 2.

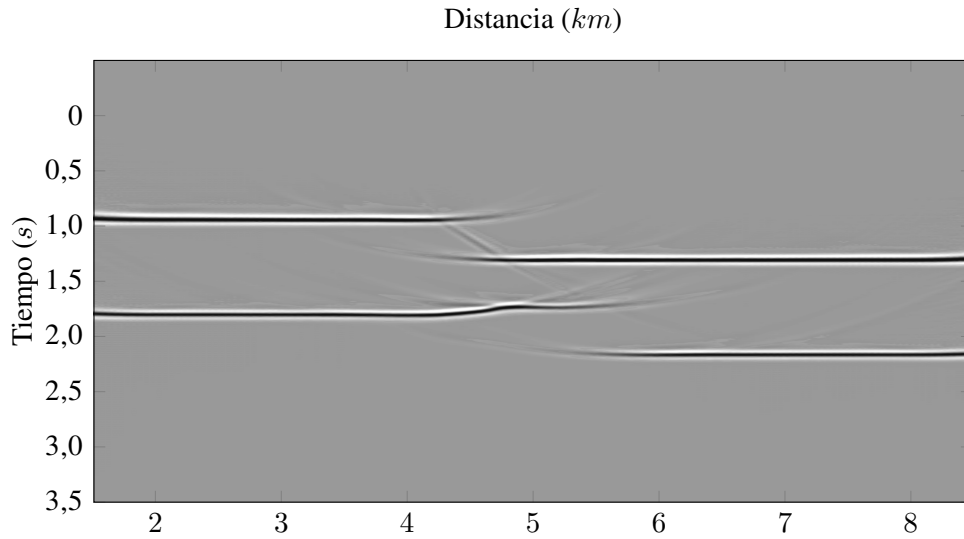


Figura 8: Migración *Kirchhoff* preapilamiento en tiempo (*PreSTM*) correspondiente al trazado de rayos basado en el modelo geológico de la Figura 2.

Figure 8: *Prestack Kirchhoff time migration (PreSTM)* corresponding to ray tracing based on geologic model in Figure 2

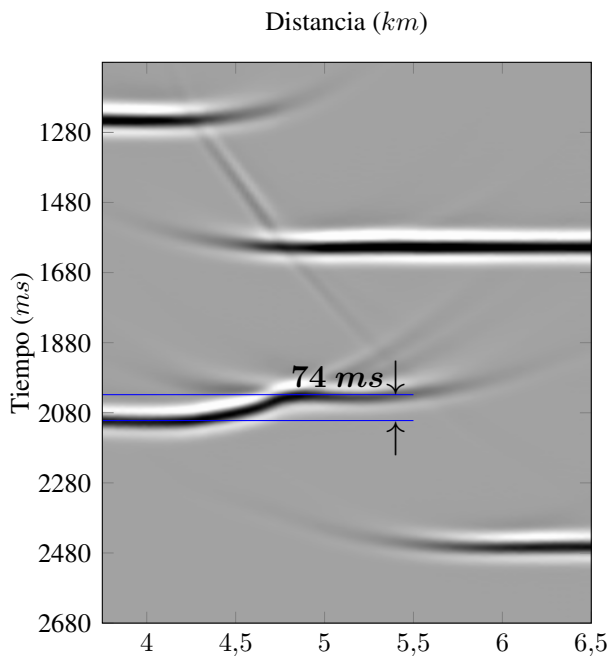


Figura 9: Acercamiento de la sección *PreSTM* incluida en la Figura 8.

Figure 9: Zoom in of the *PreSTM* section showed in Figure 8.

2.4. Modelado sísmico por diferencias finitas

Otro de los métodos numéricos más comunes para realizar modelado de datos sísmicos es la resolución de la ecuación de onda mediante la aproximación de diferencias finitas. A través de esta vía se pueden generar datos más realistas que los obtenidos con trazado de rayos; esto porque la aproximación genera resultados más precisos de la amplitud y porque la data contiene gran parte de los fenómenos ondulatorios grabados en una adquisición sísmica, tales como: onda directa, refracciones críticas, difracciones, múltiples y reverberaciones. También cabe mencionar que la aplicación del método de diferencias finitas implica algunas nuevas complicaciones, como las condiciones de estabilidad del sistema (en el esquema explícito) y el gran costo computacional.

Utilizando los mismos parámetros de adquisición empleados en el trazado de rayos (Tabla 1) con excepción del intervalo de muestreo que es ajustado por el software para garantizar la estabilidad del sistema, se llevó a cabo una simulación sísmica a partir de la misma estructura geológica mostrada en la Figura 2 utilizando un esquema explícito de diferencias finitas. De nuevo, se obtuvieron 80 *shot gathers* de 122 trazas (280 *CMP gathers* con cobertura máxima de 61). El Vídeo 2 despliega animaciones de los frentes de onda generados en las posición 2, 5 y 8 *km*; la correspondiente Figura 10 muestra un instante del frente de onda generado en 5 *km*.

2.4.1. Procesamiento de la data sintética

La secuencia convencional (hasta migración preapilamiento en tiempo) es igual a la empleada para la data generada por trazado de rayos (Sección 2.3.1) pero eludiendo la migración postapilamiento. Asimismo, los procedi-

mientos en general desplegaros resultados muy similares.

Con el campo de velocidades derivado del primer análisis por semblanza se obtuvo la sección apilada incluida en la Figura 11(a). Es claro que la diferencia sustancial entre ésta y la data generada por trazado de rayos (Figura 7) radica en la señal difractada. En la Figura 11(a) se observan las hipérbolas convexas hacia arriba propias de las ondas difractadas en las esquinas del modelo geológico. También, con un poco de cuidado, se puede notar el evento correspondiente a las reflexiones sobre la falla, que a diferencia de la sección obtenida por trazado de rayos, se encuentra solapado por el ruido que introduce las difracciones. Por último, no olvide apreciar el *pull-up* que aparece de forma semejante a las anteriores simulaciones en la señal correspondiente a la segunda interfaz del bloque levantado. Estas observaciones están en concordancia con la metodología de modelado por diferencias finitas, la cual ofrece una mejor aproximación del proceso de propagación sísmica en la tierra.

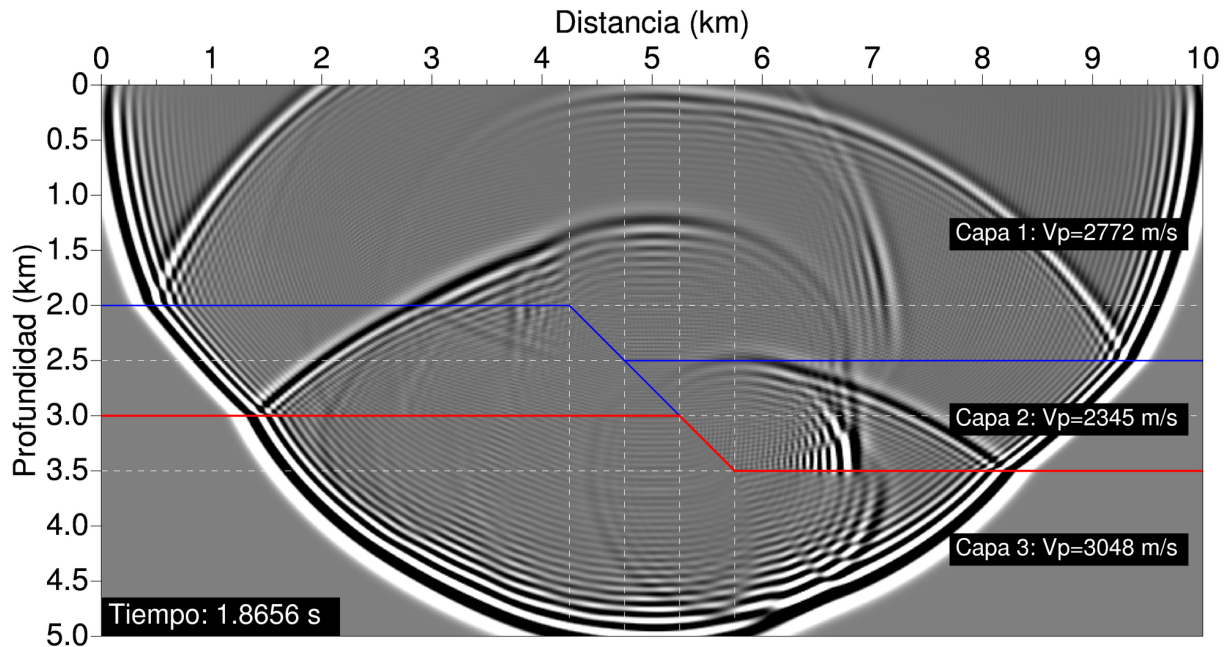


Figura 10: (Vídeo 2) Propagación del frente de onda modelado por diferencias finitas.

Figure 10: (Video 2) Wavefront propagation modeling by finite differences.

La migración preapilamiento en tiempo (Figura 11(b)) colapsó las hipérbolas de difracción y ubicó correctamente la señal correspondiente a las reflexiones sobre la falla, dando lugar a una sección muy similar a la obtenida con el trazado de rayos. Con el fin de resaltar la persistencia de la anomalía sísmica, la Figura 12 presenta un acercamiento de la zona central y señala un *pull-up* de 77 ms.

Los resultados obtenidos recuerdan que, bajo la presencia de variaciones laterales o locales de velocidad, no es posible obtener una imagen sísmica temporal que sea fiel transcripción de la forma de las estructuras geológicas. Para comprender la idea se debe notar que, pensando en términos temporales, cada una de las

secciones sísmicas incluidas en las Figuras 5, 9 y 12 es una correcta representación del modelo geológico de la Figura 2. Es decir, el tiempo doble de viaje de las ondas p (en trayectoria vertical) desde la superficie hasta la interfaz entre la capa dos y la tres, para la zona comprendida entre Aprox. 4,75 y 5,25 km de distancia, está correctamente señalado por las tres secciones temporales a través del evento que se ha definido como *pull-up*, cuyo tiempo es claramente menor que el asociado a la misma interfaz desde 0 hasta 4,5 km. Ahora bien, si la elevación persiste luego de hacer la transformación de tiempo a profundidad, es evidente que la sección resultante sí sería una representación errada del correspondiente modelo geológico.

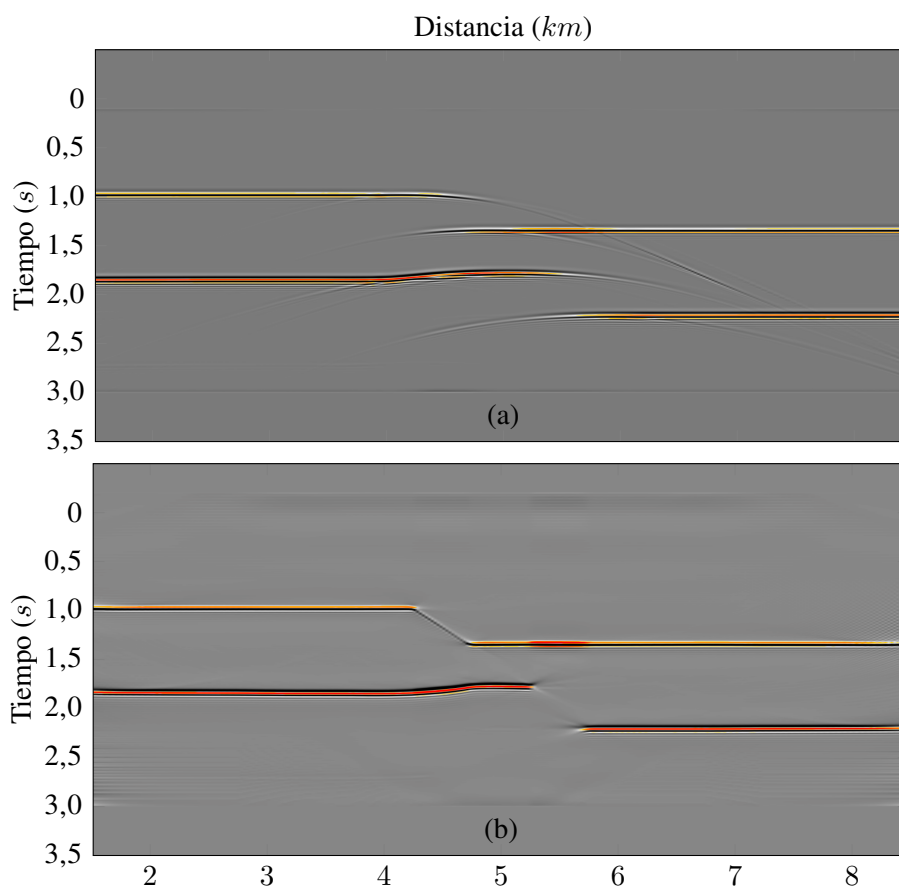


Figura 11: (a) Sección apilada y (b) Migración *Kirchhoff* preapilamiento en tiempo (*PreSTM*) correspondientes al modelado con diferencias finitas basado en la estructura de la Figura 2.

Figure 11: (a) Stack section and (b) Prestack Kirchhoff time migration (PreSTM) corresponding to finite differences modeling based on the structure in Figure 2.

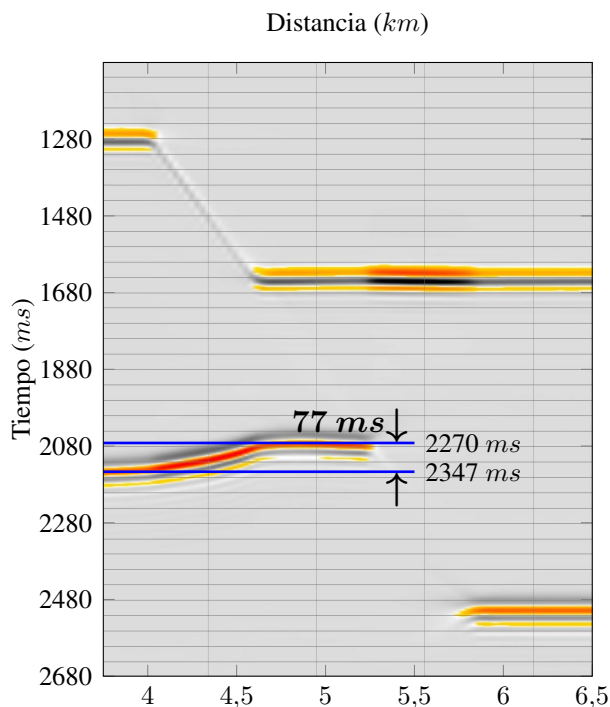


Figura 12: Acercamiento de la sección *PreSTM* incluida en la Figura 11(b). Note la persistencia del *pull-up* con magnitud de 77 *ms*.

Figure 12: Zoom in of previous section (Figure 11(b)). Observe: *pull-up* = 2347 – 2270 = 77*ms*.

Migración en profundidad

Campo de velocidades de pozo En primera instancia, se lleva a cabo la migración preapilamiento en profundidad utilizando las velocidades sugeridas por los registros sísmicos del área, velocidades que justamente fueron las utilizadas para construir el modelo geológico a partir del cual se obtuvo la correspondiente data sintética. En estos casos, se interpretan los eventos en la sección sísmica temporal y se asigna a cada capa la velocidad correspondiente. La Figura 13(a) presenta el modelo de velocidades obtenido. El punto A en dicha figura señala el tiempo del segundo evento a los 4 *km* de distancia. Pues bien, 2,347 *s*, como es su-

gerido por los segmentos trazados en la figura, es igual a la suma del tiempo de propagación de la onda en la capa 1 (1,48 *s*) más el tiempo a través de la capa 2 (0,867 *s*). Utilizando las velocidades de cada capa para transformar este punto a profundidad tenemos:

Profundidad de A =

$$\frac{1,48 \text{ s}}{2} \cdot 2772 \frac{\text{m}}{\text{s}} + \frac{0,867 \text{ s}}{2} \cdot 2345 \frac{\text{m}}{\text{s}} \simeq 3068 \text{ m}.$$

Aplicando un procedimiento similar para el punto B se obtiene:

Profundidad de B =

$$\frac{1,850 \text{ s}}{2} \cdot 2772 \frac{\text{m}}{\text{s}} + \frac{0,43 \text{ s}}{2} \cdot 2345 \frac{\text{m}}{\text{s}} \simeq 3068 \text{ m};$$

lo que demuestra que ambos puntos corresponden a la misma profundidad.

Con la noción anterior se llevó a cabo la conversión a profundidad del campo de velocidades en tiempo; los resultados reseñados en la Figura 13(b) muestran un modelo de velocidades en profundidad que no presenta la elevación asociada al *pull-up*, siendo éste una correcta representación de la estructura geológica inicial (Figura 2). Lógicamente, si se utiliza el mismo principio para transformar la sección sísmica temporal, los eventos en profundidad deben seguir el mismo patrón observado en la Figura 13(b). Sin embargo, dicha transformación se ha hecho a través del método teóricamente más apropiado: la migración preapilamiento en profundidad. En este sentido, la Figura 13(c) muestra la data *PreSDM* sobre el campo de velocidades en profundidad. Como era de esperar, la migración ha corregido el efecto temporal del *pull-up*, dando lugar a una correcta representación de las estructuras geológicas del modelo de la Figura 2.

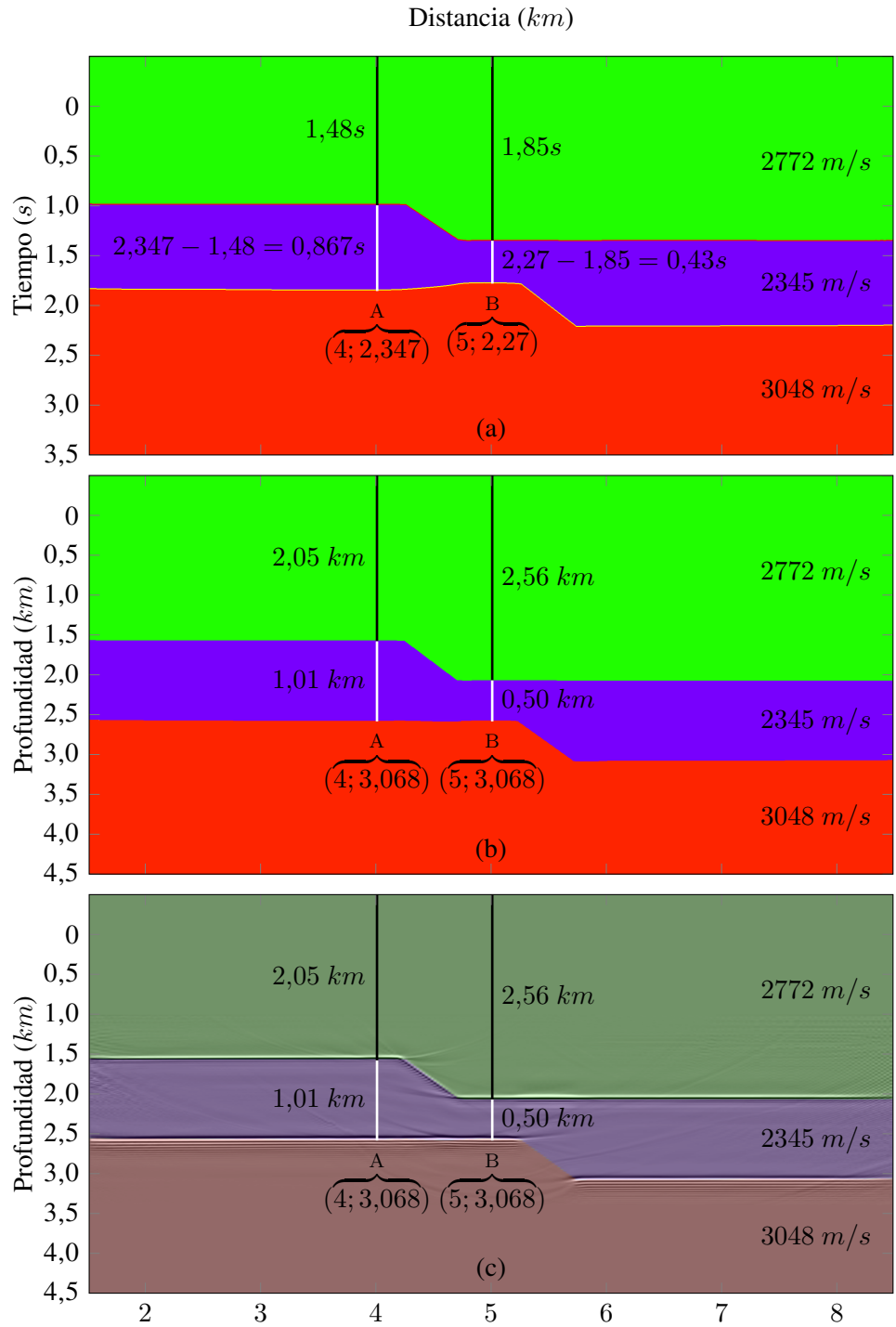


Figura 13: (a) Campo de velocidades en tiempo construido a partir de la interpretación de los eventos en la data *PreSTM* (Figura 11(b)) y de los registros sísmicos del área. (b) Campo de velocidades en profundidad obtenido de la conversión del modelo en tiempo. (c) Sección *Kirchhoff PreSDM* graficada sobre el respectivo modelo de velocidades.

Figure 13: (a) Velocity field in time built from *PreSTM* events interpretation (Figura 11(b)) and sonic logs in the area. (b) Velocity field in depth obtained after converting the model in time showed above. (c) *Kirchhoff PreSDM* section co-rendered with the respective velocity model.

Campo de velocidades derivado del *moveout* (sin suavizar) En la práctica habitual del procesamiento, son muchos los casos en los que la mejor aproximación que se tiene del campo de velocidades, es la que se deriva del análisis de velocidad por semblanza sobre los *gathers* migrados en tiempo.

Como punto de partida, se aplicó el algoritmo empleando el modelo de velocidades interválicas sin suavizar. De la data migrada (Figuras 14(a)) es claro que el procedimiento ha fallado. La migración, en vez de corregir el efecto temporal del *pull-up*, lo ha incrementado escabrosamente además de generar (en el evento más profundo) una fuerte deformación convexa hacia abajo desde 3 hasta 4,5 *km* aproximadamente.

De la misma Figura 14(a) se deben destacar las siguientes características:

- El modelo de velocidades interválicas delinea adecuadamente el salto de falla.
- Con algunas excepciones, que luego serán puntualizadas, las velocidades se asemejan a las del modelo geológico de la Figura 2: la primera capa presenta una velocidad aproximada de 2760 *m/s* y la segunda de 2350 *m/s*; valores similares a los 2772 y 2345 *m/s*, respectivamente, del modelo geológico inicial (Figura 2).
- Recordemos que la data sintética está formada, esencialmente, por dos eventos sísmicos, siendo el más profundo el correspondiente a la interfaz entre la capa 2 y la 3. Debido a esto, por debajo de dicha interfaz no es posible hacer un cálculo de la velocidad interválica. Lo anterior implica que los valores arrojados para la tercera capa no tienen sentido geofísico; se han graficado sólo para delimitar las tres capas.
- Se muestra una disminución abrupta de

la velocidad justamente en la zona fallada (donde se genera el *pull-up*) que difiere enormemente de las velocidades del modelo geológico.

- En algunas zonas, señaladas en la figura, se observan adicionales variaciones laterales de velocidad.

Las observaciones anteriores hacen notar que la *PreSDM* ha fracasado debido a que el modelo de velocidades interválicas presenta, en algunas zonas, diferencias sustanciales con respecto al modelo geológico inicial (Figura 2). Lo anterior es evidente en la zona central del modelo, donde la velocidad promedio de la segunda capa (≈ 2350 *m/s*) ha disminuido hasta ≈ 1650 *m/s*. Un cambio de velocidad tan repentino tiene que producir una disminución, también abrupta, en la profundidad de la posición del evento ubicada justamente por debajo del foco de baja velocidad; disminución que se ha materializado en el incremento del *pull-up*. En cuanto a las deformaciones adicionales de los eventos, note que también se presentan en zonas donde hay variaciones laterales de velocidad. En este sentido, la deformación convexa hacia abajo que se origina en el segundo evento, alcanza su máximo en los puntos que se encuentran por debajo de una zona donde la velocidad ha ascendido hasta Aprox. 2430 *m/s*.

Ahora, ¿por qué el cálculo de la velocidad interválica (V_{int}) en las cercanías de la falla produjo valores errados? El comando utilizado para calcular V_{int} a partir de V_{RMS} se basa en la Fórmula hallada por Dix (1955) (Ecuación 1). Esta aproximación funciona bajo la suposición de reflectores horizontales, capas homogéneas e isotrópicas, “generando valores ficticios si ambos reflectores no son planos, si hay variaciones laterales de velocidad entre o por encima de ellos, o si el intervalo es muy amplio” [Sheriff (2002)]. La pregunta formulada queda aclarada al notar que justamente en la zona cen-

tral del modelo se presenta la variación lateral de velocidad.

$$V_{int} = \left[\frac{V_n^2 \cdot t_n - V_{n-1}^2 \cdot t_{n-1}}{t_n - t_{n-1}} \right]^{\frac{1}{2}}, \quad (1)$$

donde V_n es la velocidad RMS y t_n el tiempo *offset cero* para el n -ésimo reflector.

Primer suavizado del campo de velocidades derivado del *moveout* El suavizado se llevó a cabo sobre el modelo de velocidades interválicas en tiempo a través de una ventana de 3 *km* en distancia por 300 *ms* en tiempo. La data migrada utilizando el modelo de velocidades transformado a profundidad se muestra en la Figura 14(b). De aquí hay que decir que nuevamente la migración en profundidad ha fallado; si bien es claro que los resultados son ampliamente mejores que los obtenidos con el modelo de velocidades sin suavizar y que el *pull-up* ha disminuido, dicho efecto aún persiste y además se han generado nuevas deformaciones en el evento sísmico más profundo. Para comprender los resultados se debe notar lo siguiente:

- A diferencia del modelo sin suavizar (Figura 14(a)) se han graficado sólo los valores de V_{int} que pueden ser calculados a partir de los dos eventos sísmicos obtenidos en la simulación (ver tercer ítem listado en el apartado anterior). Por esto, el modelo de velocidades resultante no muestra las tres capas de la estructura geológica incluida en la Figura 2.

- Salta a al vista la corrección de los valores ficticios observados en el centro del modelo de velocidades sin suavizar (Figura 14(a)). Como era de esperar, las velocidades no presentan cambios laterales tan abruptos y en general concuerdan con las del modelo geológico inicial. Sin embargo, aunque no se percibe a simple vista, el modelo resultante mantiene considerables variaciones laterales que no han sido corregidas por el suavizado y han afectado la forma de los eventos en profundidad. El cambio más importante, es una disminución de la velocidad promedio de la segunda capa hasta Aprox. 2270 *m/s*, ocasionando una gran elevación en el evento sísmico más profundo.
- Se puede decir que el salto de falla se encuentra medianamente definido. A pesar de que se sigue observando con claridad la presencia de la falla, el suavizado ha afectado la exacta delineación del escalón, impidiendo una absoluta corrección del *pull-up* en la zona central del modelo.

Segundo suavizado del campo de velocidades derivado del *moveout* Un suavizado de mayor intensidad se llevó a cabo a través de una ventana de 6 *km* en distancia por 600 *ms* en tiempo. Los resultados han sido incluidos en la Figura 14(c). El modelo de velocidades interválicas ya no muestra considerables variaciones laterales y por ende el segundo evento no presenta deformaciones adicionales. Sin embargo, el suavizado ha borrado la adecuada delineación del escalón correspondiente al salto de falla, lo que deja inhabilitado al modelo de velocidades para corregir el *pull-up*.

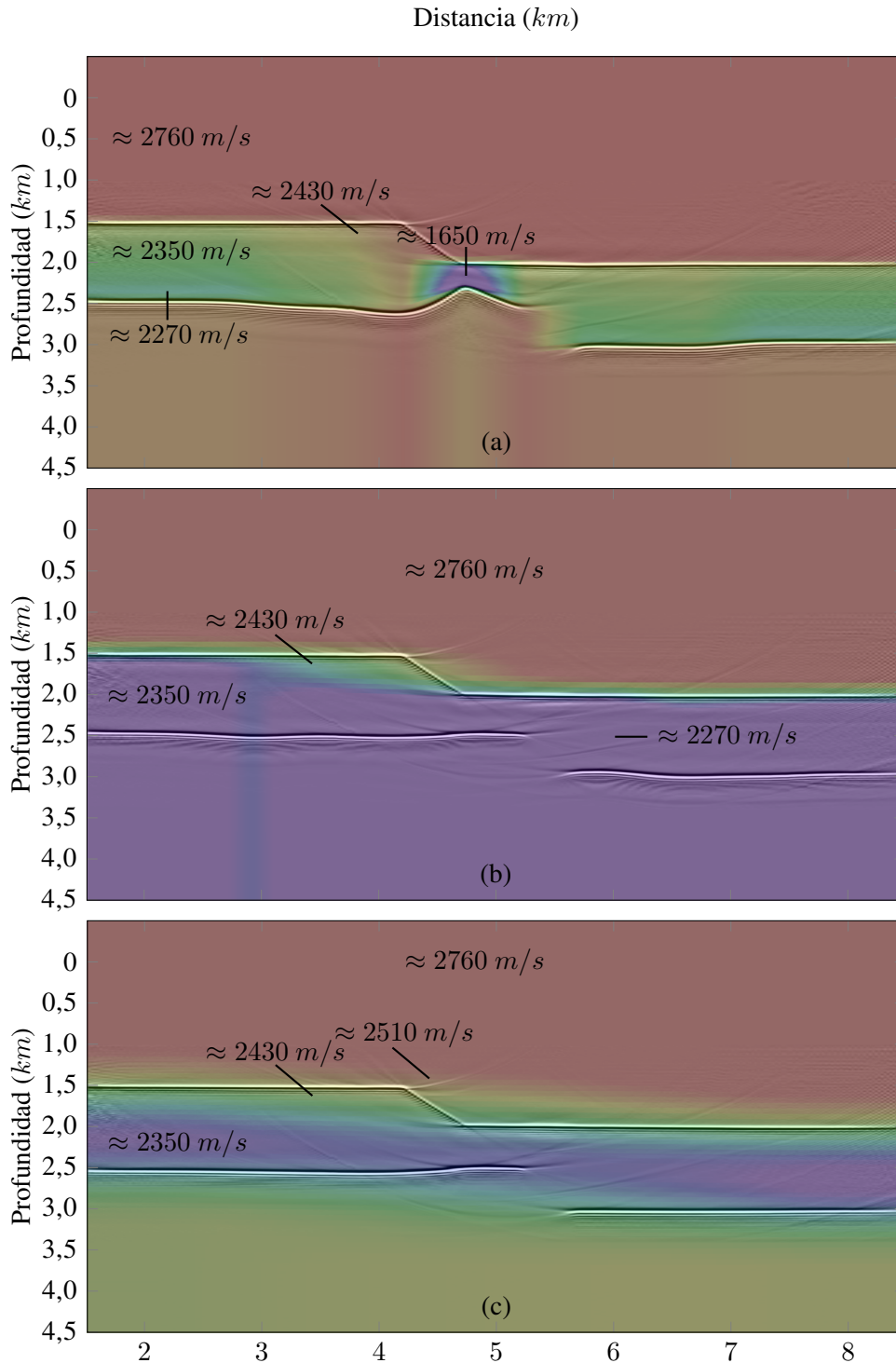


Figura 14: Secciones *Kirchhoff PreSDM* obtenidas con el modelo de velocidades derivado del *moveout*. (a) Modelo de velocidades sin suavizar. (b) Suavizado de nivel medio y (c) Suavizado intenso.

Figure 14: Kirchhoff PreSDM using the velocity model obtained from moveout. (a) Velocity model with no smooth applied. (b) Velocity model with first order smooth and (c) Velocity model with second order smooth.

3. Resultados

La data sintética en tiempo generada a partir del modelo geológico de la Figura 2 muestra *pull-up* en la señal correspondiente a la interfaz entre la capa 2 y la 3 del bloque levantado. Este resultado ha sido ratificado mediante tres métodos de modelado sísmico. Las Figuras 5, 9 y 12 señalan *pull-up* de 71, 74 y 77 *ms* en las secciones temporales obtenidas con el método de trazado de rayos normales, trazado de rayos preapilamiento y diferencias finitas, respectivamente.

La migración preapilamiento en profundidad (de la data sintética generada por diferencias finitas) utilizando el modelo de velocidad sugerido por los registros sísmicos del área (velocidades que justamente fueron las utilizadas para construir el modelo geológico a partir del cual se obtuvo la correspondiente data sintética) logró colapsar adecuadamente la elevación producida por el efecto *pull-up*. Por el contrario, la *PreSDM* aplicada a través del modelo de velocidad derivado del *moveout* de los *CMP gathers* sintéticos en tiempo no fue capaz de colapsar el *pull-up*.

Con el fin de resumir los resultados de la migración en profundidad aplicada sobre la data generada por diferencias finitas, en la Figura 15 se han superpuesto los eventos interpretados en cada una de las secciones *PreSDM* que fueron obtenidas con los distintos modelos de velocidad utilizados. La línea negra representa a los eventos correctamente migrados a través de las velocidades empleadas en la construcción del modelo geológico a partir del cual se obtuvo la correspondiente data sintética (Figura 2) (velocidades derivadas de registros sísmicos adquiridos en los llanos orientales de Colombia). Esta línea nos permite medir las deformaciones de los eventos incorrectamente migrados con las velocidades calculadas a partir del *moveout* de los *CMP gathers* en tiempo.

La variación lateral de velocidad que se presenta en la parte central del modelo geológico (Figura 2) impide realizar cálculos válidos de las velocidades interválicas a través de las velocidades RMS desprendidas del *moveout* de los correspondientes *CMP gathers* sintéticos. En otras palabras, la fórmula comúnmente usada (Ecuación 1) para calcular V_{INT} a partir de V_{RMS} no funciona en zonas donde se presentan variaciones laterales de velocidad. Lo anterior es evidente al notar que el modelo de velocidad (sin suavizar) derivado del *moveout* (Figura 14(a)) presenta valores extremadamente bajos en su zona central, conllevando a resultados incorrectos de la migración en profundidad.

A pesar de aplicar distintos niveles de suavizado al modelo de velocidad derivado del *moveout* con el fin de depurar las zonas que presentan velocidades ficticias, los modelos de velocidad suavizados no permitieron una adecuada migración del *pull-up*. Esto se debe a que el suavizado afecta la exacta delineación del escalón correspondiente al salto de falla. Las observaciones relacionadas a la Figura 13 explican porqué es vital para la migración en profundidad que el modelo de velocidad refleje adecuadamente el salto de falla, pero explicándolo en pocas palabras, basta con notar que justamente la variación lateral de velocidad que introduce el salto de falla es la causa de la aparición del *pull-up*, y la única forma de que la *PreSDM* corrija dicha anomalía es a través de un modelo de velocidad que sugiera adecuadamente la aparición de *pull-up*.

4. Conclusiones

Al comparar la data real adquirida en los llanos orientales de Colombia (Figura 1) con las secciones sísmicas sintéticas (Figuras 5, 9 y 12) obtenidas en las simulaciones basadas en el modelo geológico de la Figura 2, se puede notar que la ubicación de los altos sísmicos observados en la data real coincide, relativamente,

con la del *pull-up* modelado. Ambas elevaciones se perciben en los eventos correspondientes al bloque levantado y en zonas cercanas a la falla. Esta observación sugiera la existencia de efectos *pull-up* en la data sísmica adquirida en los llanos colombianos. Sin embargo, aunque el modelo geológico tratado en este trabajo presenta los rasgos característicos del *play* de la cuenca de los llanos colombianos, es necesario hacer un estudio basado en simulaciones sísmicas a partir de un modelo geológico extraído

de la propia interpretación de la data real. El modelo de la Figura 2 permite entender el problema de una forma práctica, proporcionando una base conceptual sólida que será vital para abordar las situaciones más complejas desprendidas de simulaciones sísmicas sobre modelos geológicos más realistas.

Los resultados de la migración en profundidad aplicada sobre la data sintética generada por diferencias finitas

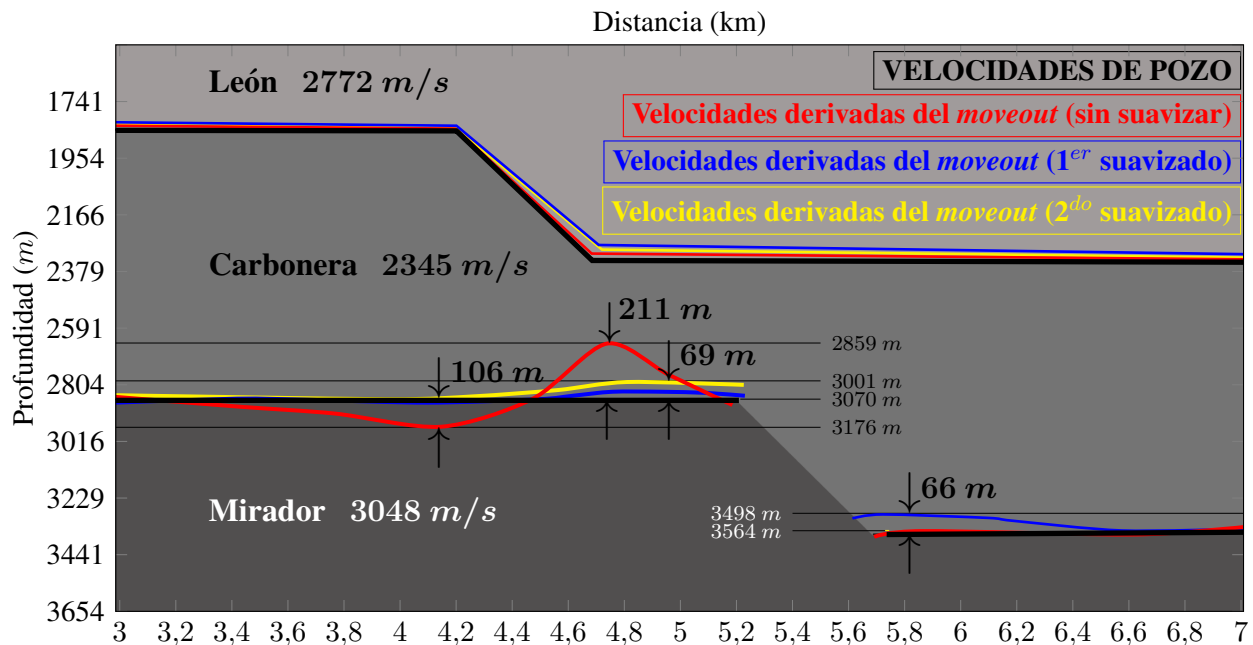


Figura 15: Superposición de los eventos interpretados en las secciones *PreSDM* obtenidas con distintos modelos de velocidad. La línea negra representa a los eventos correctamente migrados con las velocidades de pozo (Figura 13(c)) la roja a los obtenido con el modelo de velocidad derivado del *moveout* (sin suavizar) (Figura 14(a)) la azul se corresponde con el primer suavizado del modelo de velocidad derivado del *moveout* (3 *km* en distancia y 300 *ms* en tiempo) (Figura 14(b)) y la amarilla con el segundo suavizado del modelo derivado del *moveout* (6 *km* en distancia y 600 *ms* en tiempo) (Figura 14(c)).

Figure 15: Events interpretation based on the *PreSDM* obtained from the different velocity fields. The black, red, blue and yellow lines represent the events migrated using the velocity model built from sonic logs (Figura 13(c)) velocity model from *moveout* with no smooth applied (Figure 14(a)) velocity model from *moveout* with first order smooth (using a window of 3 *km* by 300 *ms*) (Figure 14(b)) and velocity model from *moveout* with second order smooth (window of 6 *km* by 600 *ms*) (Figure 14(c)) respectively.

Referencias

- Mario I. Caicedo y Plácido J. Mora. *Temas de Propagación de Ondas*. Universidad Simón Bolívar, 2004. URL <http://www.fis.usb.ve/~mcaicedo>.
- Center for Wave Phenomena, Colorado School of Mines. Página web: documentación y descarga del paquete *Seismic Unix*. URL <http://www.cwp.mines.edu>.
- CGGVeritas. *Informe Final de Procesamiento (Migración post y pre apilamiento en tiempo, Migración pre apilamiento en profundidad); Levantamiento Moriche 3D*, 2008.
- C. Hewitt Dix. Seismic velocities from surface measurements. *Geophysics*, 20(1):68–86, Enero 1955.
- David Forel, Thomas Benz, y Wayne D. Pennington. *Seismic Data Processing with Seismic Unix*. Course notes No. 12. Society of Exploration Geophysicists, 2005.
- IGS Services & Consulting. *Reporte migración prestack en profundidad y efecto Pull-up/Push-down en datos sísmicos pertenecientes al campo Moriche, Colombia*, 2008. Realizado para Pacific Rubiales Energy.
- José Antonio Lara. *Modelado Sísmico con Seismic Unix*. Universidad Simón Bolívar, 2007. URL <http://www.gc.usb.ve/geocoordweb/Relatesispregrado.htm>.
- Verónica Y. Pérez. *Utilización del paquete Seismic Unix para la enseñanza de la sísmica*. Universidad Simón Bolívar, 2008. URL <http://www.gc.usb.ve/geocoordweb/Relatesispregrado.htm>.
- Juan C. Ramon, Phil Frank, y JO Prigmore. Una revisión al estado del arte del play de fallas antitéticas en la cuenca llanos orientales, Colombia. Asociación Colombiana de Geólogos y Geofísicos del Petróleo, 9th Simposio Bolivariano - Exploración Petrolera en las Cuencas Subandinas, Septiembre 2006.
- Robert E. Sheriff. *Encyclopedic Dictionary of Applied Geophysics*. Geophysical References No. 13. Society of Exploration Geophysicists, cuarta edición, 2002.
- Adelo A. Vieira. *Modelado básico de datos sísmicos preapilados y su correspondiente secuencia de procesamiento utilizando los programas del paquete Seismic Unix*. Universidad Simón Bolívar, 2007. URL <http://www.gc.usb.ve/geocoordweb/Relatesispregrado.htm>.