

MODELADO DE LA RESPUESTA SÍSMICA DEL RESERVORIO TURBIDÍTICO CABI, DEL PALEOCENO - EOCENO CUENCA DE MAGALLANES

Ricardo Zapata¹, Cristóbal Agurto², Jesús Sánchez³, Aldo Carpinelli⁴

1: ENAP Magallanes, José Nogueira 1101, Punta Arenas, Chile. rzapatag@enap.cl

2: ENAP Magallanes, José Nogueira 1101, Punta Arenas, Chile. cagurto@enap.cl

3: ENAP Sipetrol, Avenida Apoquindo 2929, Piso 06, Santiago, Chile. jsanchez@sipetrol.cl

4: ENAP Sipetrol, Avenida Apoquindo 2929, Piso 06, Santiago, Chile. acarpine@sipetrol.cl

Palabras clave: Yacimiento Cahuil, Modelo directo, Cuenca de Magallanes

ABSTRACT

Cahuil gas field was discovered in 2016 at Magallanes basin, proving commercial gas in Upper Paleocene-Mid Eocene sandstones interbedded with the Bahía-Inútil-Group shales. Sandy intervals, referred as CABI (Complejo Arenoso del Grupo Bahía Inútil or Bahía-Inútil Group's Sandy Complex), represent submarine-fan distal deposition of multiple turbiditic channels at the continental slope's mid-section. The reservoir's stratigraphy allows us to identify several sand-channel cycles distributed as fan-shaped deposits originated in an incision of the shelf break aiming to the southwest. The present structure near Cahuil gas field was shaped by the last tectonic event, consisting mainly of Oligocene-to-present transcurrent deformation.

At channels depth, due to seismic vertical resolution, there is more uncertainty in evaluating the reservoir distribution and continuity, making difficult to distinguish between structural features, like inside-reservoir faults, and a more complex stratigraphic configuration like lateral-interlocking of channels. Hence, CABI seismic response was modelled through one- and two-dimensional normal-incidence synthetic seismographs.

One-dimensional modelling has allowed to establish a relationship between reservoir stratigraphy and the seismic amplitude attenuation observed on some wells of Cahuil gas field: seismic amplitudes dim proportionally to sand-shale interbedding for constant gross thickness.

On the other hand, two-dimensional modelling, confirmed the one-dimensional modelling results and led to propose a new idea for the reservoir's lateral configuration. The original hypothesis was that the observed reflector discontinuities were caused by faults. Now it is believed that the seismic response may be related to avulsion of turbiditic channels.

INTRODUCCIÓN

El área de estudio está situada en la Cuenca de Magallanes, aproximadamente a 120 km al noreste de la ciudad de Punta Arenas, Chile, al norte del Estrecho de Magallanes (Fig. 1a).

Las actividades de exploración de los últimos 10 años en el área se enmarcan en la operación del contrato de exploración y producción Bloque Dorado Riquelme (DR), que se sitúa en las cercanías de la refinería Gregorio de ENAP y de la localidad de Puerto Sara.

En este sector, en el año 2016 se demostró la existencia comercial de gas, contenido en areniscas intercaladas dentro de las arcillolitas del Grupo Bahía Inútil (Fig. 1 b y c). Estos intervalos arenosos fueron denominados en conjunto como el “Complejo Arenoso del Grupo Bahía Inútil” (CABI), definiéndose así, como una unidad informal de subsuperficie constituida por varios cuerpos de areniscas depositadas en un ambiente de plataforma marina profunda durante el Paleoceno (Pinto *et al.* 2019).

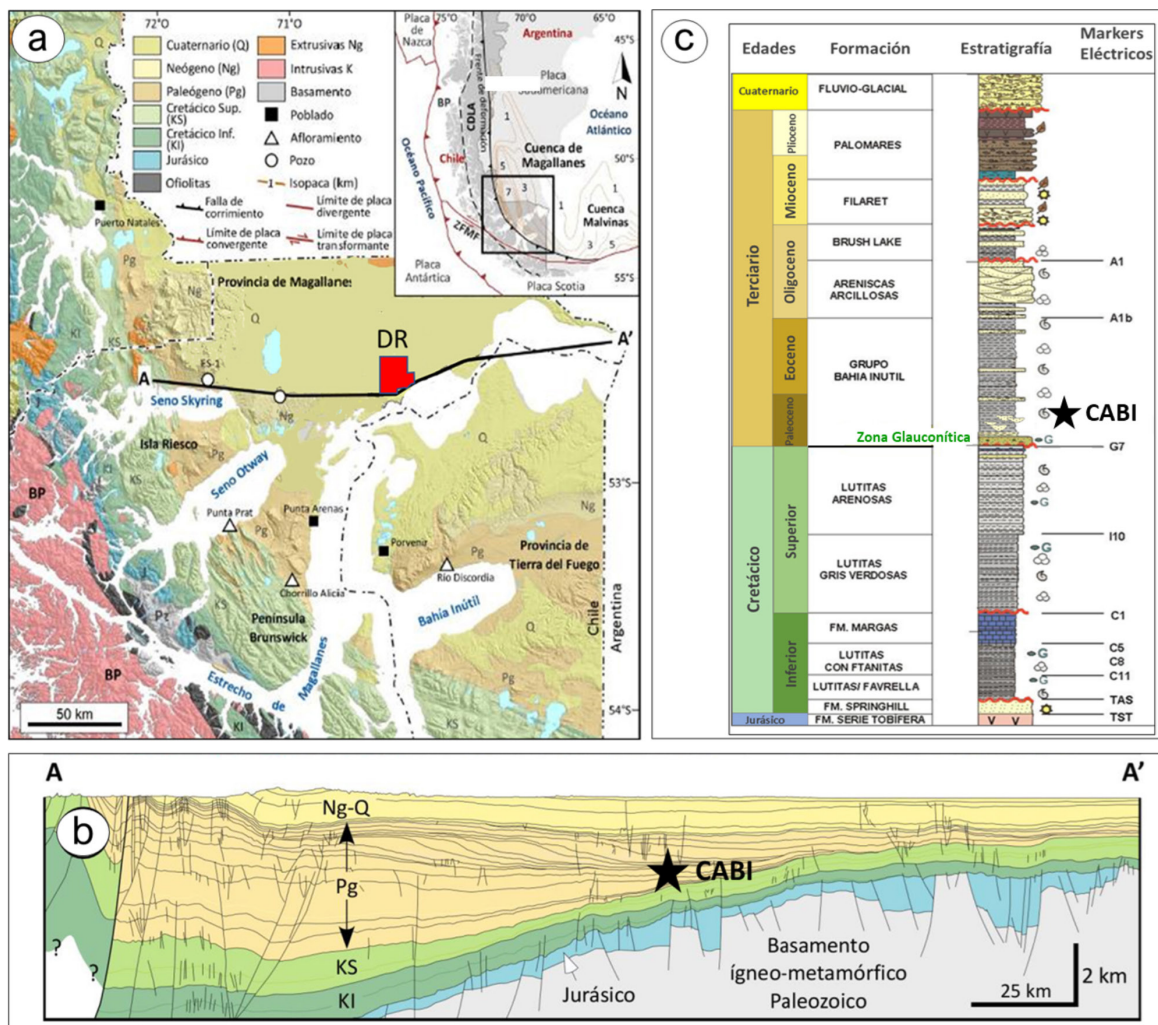


Figura 1. Ubicación y estratigrafía del bloque Dorado-Riquelme (DR). a) Mapa Geológico del área en el entorno del bloque DR (Pinto *et al.* 2018). b) Sección geológica construida a partir de sísmica y pozos mostrando las principales unidades geológicas de la cuenca indicando la posición en donde se ubica el reservorio CABI (ver texto). c) Columna estratigráfica general para el bloque DR (Pinto *et al.* 2018).

El espesor promedio del reservorio (CABI) es del orden de 30 m de areniscas uniformes, con escasas interrupciones arcillosas y algunos niveles con cemento calcáreo. Se identifica en la sísmica por corresponder a reflectores de alta amplitud, que se observan deformados, aislados y discordantes respecto a la estratigrafía regional, inmediatamente sobre el horizonte más regional y continuo que define el techo de la Zona Glauconítica (Fig. 2).

Las geometrías ondulosas de estos reflectores, suavemente cóncavas y con trayectorias sinuosas que se conectan lateral y verticalmente (Fig. 2), permite inferir la existencia de más de un nivel de reservorio dentro del sistema de canales turbidíticos (Carpinelli *et al.* 2022). Lo anterior, ha quedado demostrado en la medida que se ha avanzado en el desarrollo del yacimiento. Las características petrofísicas más relevantes del reservorio se han mantenido relativamente constantes en diferentes pozos (espesor, porosidad, saturación), la correlación de estos cuerpos no es directa, evidenciado la existencia de un complejo de canales multiepisódicos (Fig. 3).

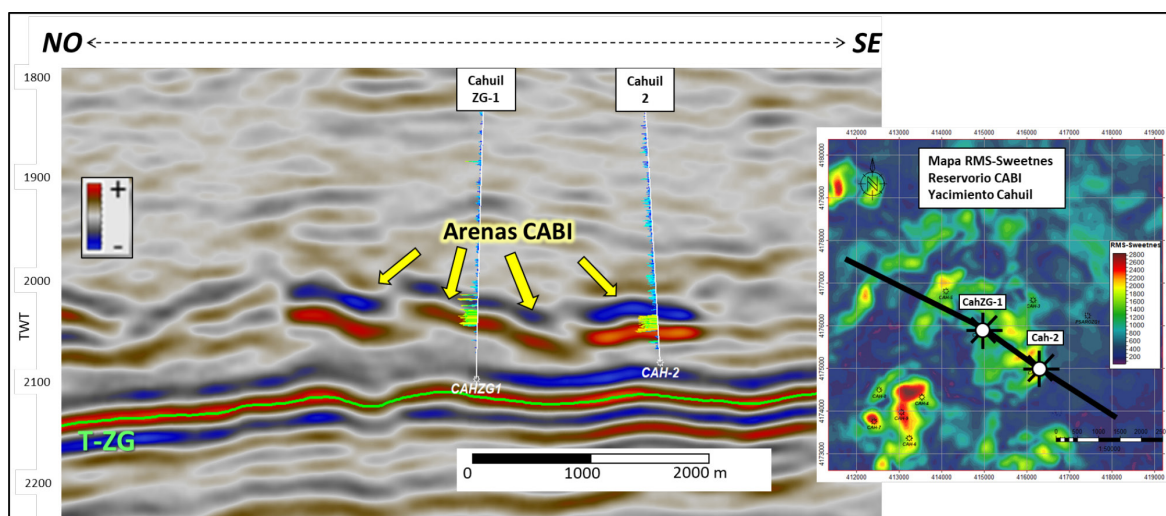


Figura 2. Línea sísmica entre el pozo Cahuil ZG-1 y Cahuil-2. Las areniscas CABI se presentan como reflectores discontinuos en el área del yacimiento Cahuil. Nota: En cada pozo se muestra en colores el perfil eléctrico de Rayos Gamma.

La configuración estructural del área donde se ubica el yacimiento es el resultado de una compleja historia de evolución tectónica que abarca al menos desde el Jurásico Medio hasta la actualidad. Está representada principalmente por deformación transcurrente asociada al evento tectónico del Oligoceno-actual que da origen a una gran flor positiva con rumbo NNE (Carpinelli *et al.* 2022).

Debido a la profundidad y el rango de espesores observado en los canales, la limitación en la resolución sísmica introduce mayor incertidumbre al inferir la distribución y continuidad del reservorio. Por este motivo se decidió modelar la respuesta sísmica del reservorio CABI, utilizando modelos de incidencia normal 1D y 2D, y así poder distinguir entre rasgos estructurales que podrían asociarse con fallas que afectan al reservorio, o una configuración estratigráfica más compleja como un engrane lateral de canales. El modelo 1D se utilizó para investigar la relación entre las amplitudes sísmicas con el espesor de las areniscas y con las intercalaciones arcillosas

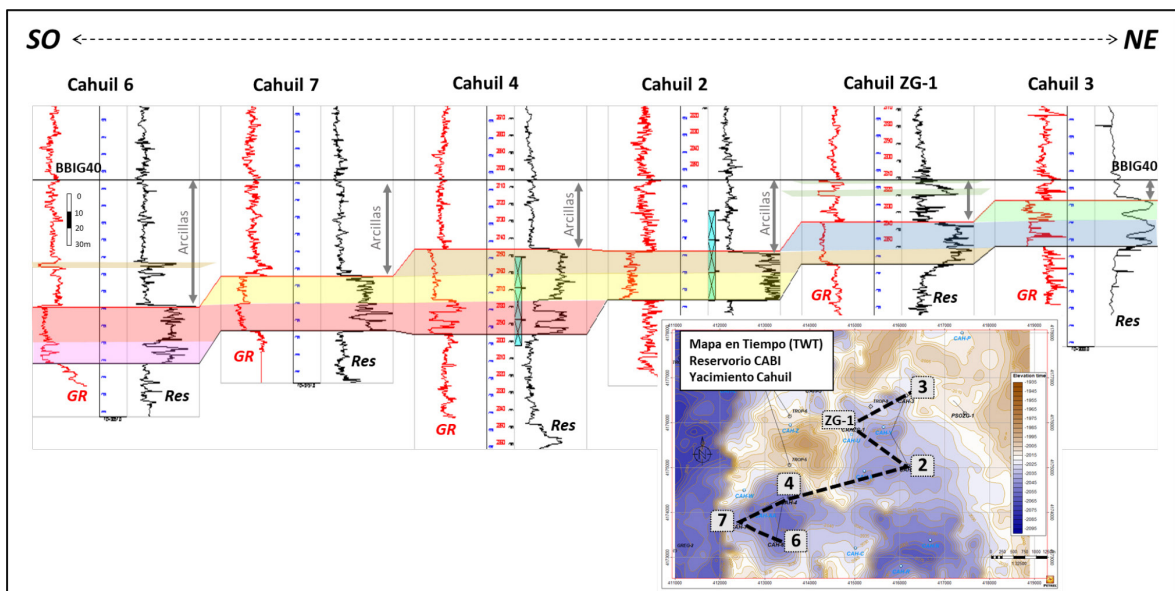


Figura 3. Sección estratigráfica entre los pozos Cahuil horizontalizada a un marker eléctrico sobre el reservorio arenoso CABI. Se muestra una interpretación geológica de los distintos ciclos arenosos (canales) amalgamados que pudieran encontrarse dentro del yacimiento a medida que se profundiza el sistema en dirección Suroeste.

dentro de éstas. Por su parte, el modelo 2D se utilizó para estudiar la distribución lateral del reservorio.

METODOLOGÍA

En el caso 1D se realizaron modelos de incidencia normal en el pozo Cahuil-2, con el objetivo de entender la respuesta de amplitud presente en los datos sísmicos de reflexión. Para esto se realizaron sismogramas sintéticos y se analizó la respuesta de amplitud en base a los

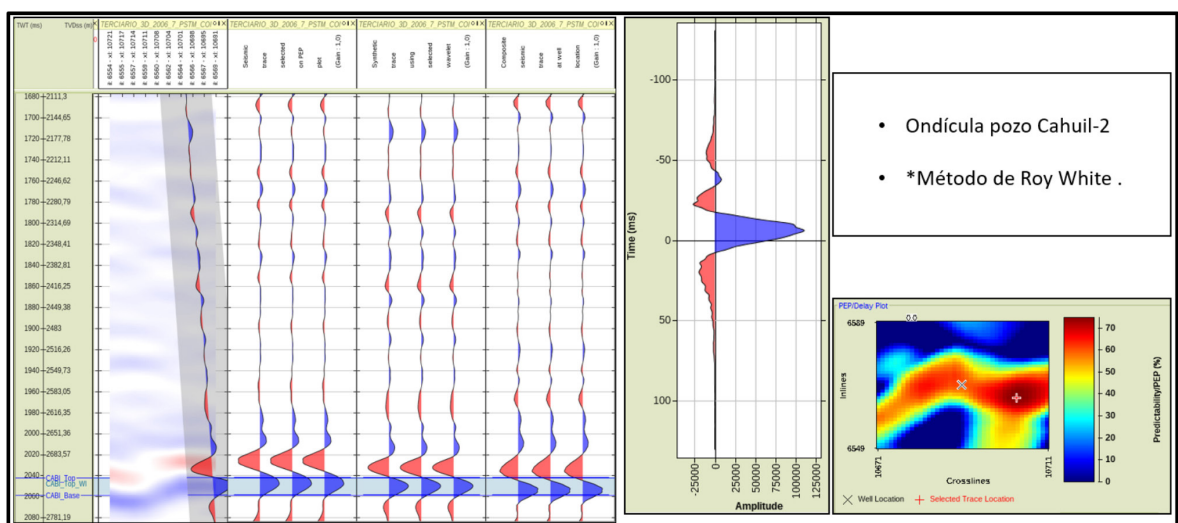


Figura 4. Sismograma sintético del pozo Cahuil-2 (izquierda). Ondícula extraída utilizando el método de Roy White (derecha).

cambios estratigráficos realizados en el pozo. Se utilizaron los registros de densidad y velocidad compresional adquiridos, los cuales posteriormente fueron modificados aumentando el espesor de la arena e incorporando intervalos arcillosos, con el objetivo de modelar y observar la respuesta de amplitud en base a estas modificaciones.

Para el caso 2D se analizó la variación lateral de las arenas en el reservorio Cahuil, probándose directamente distintas configuraciones estratigráficas, por ejemplo Nelson (2008). En los modelos se utilizaron valores promedio de densidad y velocidad de los perfiles y la ondícula extraída en el pozo Cahuil-2.

Extracción de ondícula

Se realizó la extracción de ondícula para todos los pozos con perfiles de densidad y velocidad del reservorio Cahuil. Debido a que la característica de fase cero no se cumple en ninguna de las ondículas extraídas, se decidió utilizar la del pozo Cahuil-2 para todo el proceso del modelado, ya que es la que presenta el menor desfase, correspondiente a 6° . En la Figura 4 se presenta el sismograma sintético del pozo Cahuil-2, y su correspondiente ondícula, extraída desde los datos sísmicos con el método de Roy White (White 1980).

Modelo directo 1D

En la Figura 5 se muestra a la izquierda la ubicación del pozo Cahuil-2 sobre el mapa de atributo RMS Sweetness (p. ej. Hart 2008). A la derecha, en la parte superior, una sección

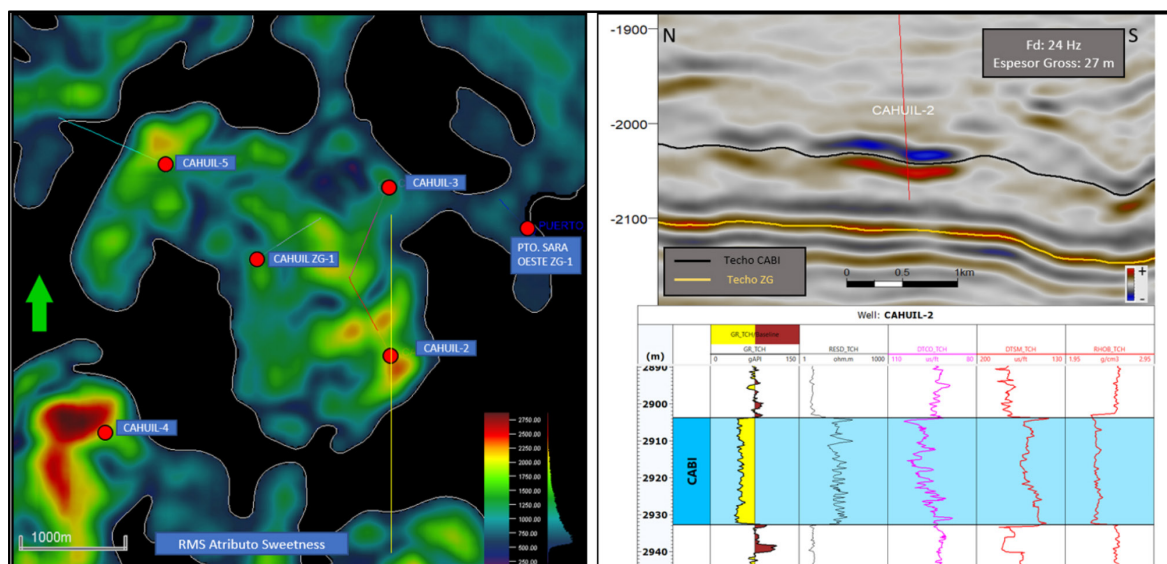


Figura 5. Mapa del atributo RMS Sweetness representando la anomalía de amplitud del yacimiento Cahuil (izquierda). Sección sísmica atravesando la ubicación del pozo Cahuil-2 (superior derecha). Registros de pozo adquiridos en el pozo Cahuil-2 (inferior derecha).

sísmica que pasa por la ubicación objetivo de este pozo, donde se presenta el techo del reservorio interpretado en la sísmica como un cruce por cero (horizonte negro), y un fuerte contraste de amplitud. En la parte inferior derecha se presentan los registros de pozo de rayos *gamma*, resistividad profunda, tiempo de tránsito compresional, tiempo de tránsito de corte y densidad respectivamente.

Con la información de los perfiles eléctricos se identifican 27 m *gross* de arena, espesor que está por debajo de la resolución sísmica vertical, la cual, en base a los datos de frecuencia y velocidad del área (23Hz y 3100 m/s respectivamente), se encuentra por sobre los 34 m.

Variación del espesor y estratigrafía

En la Figura 6 se muestra el procedimiento que se utilizó para la variación del espesor, proceso que es la base para el modelo directo 1D. Se utilizaron cuatro modelos con diferentes escenarios cada uno.

El primer modelo consiste en una arenisca continua de 27 m (*tracks* 1 al 3, Fig. 6). Se probaron dos escenarios: en el primero se introdujo un intervalo arcilloso de 10 m (*tracks* 4 y 5, Fig. 6) y en el segundo se introdujeron tres intervalos arcillosos de 4 m (*tracks* 6 y 7, Fig. 6). El siguiente modelo corresponde a una arenisca continua de 40 m (*tracks* 8 y 9, Fig. 6), al que se

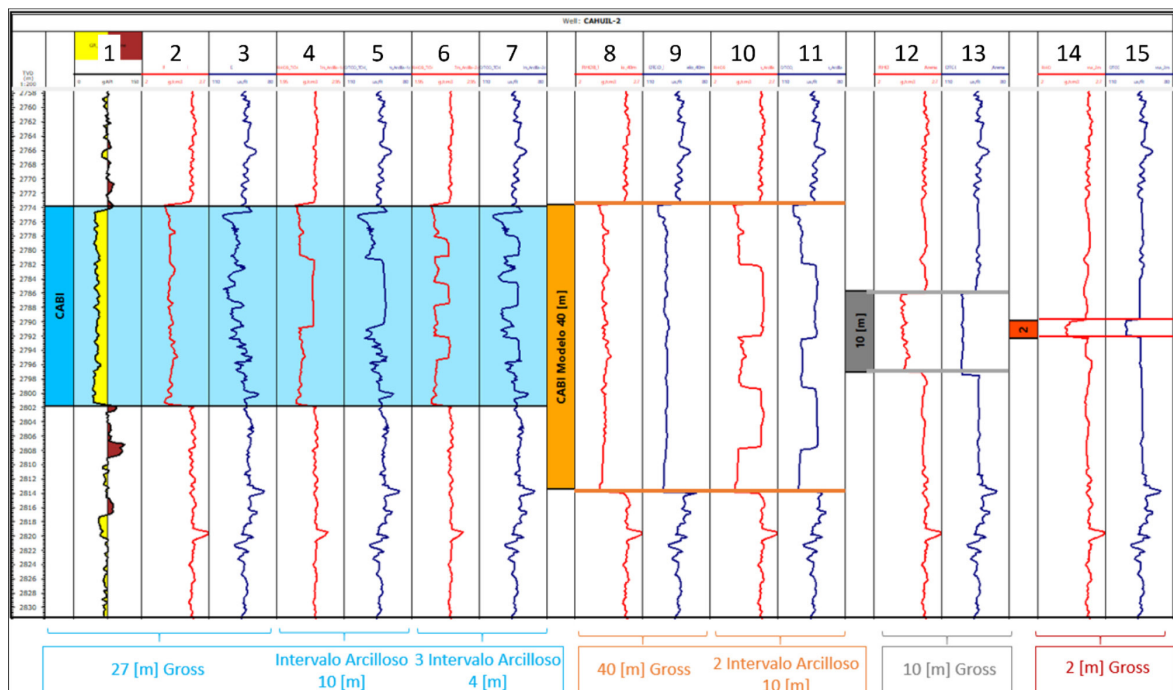


Figura 6. Cambio en el espesor del reservorio en el pozo Cahuil-2. En el track 1: se presenta el registro de rayos *gamma*. En los *tracks* 2 y 3, los datos wireline de densidad (rojo) y tiempo de tránsito compresional (azul). En los siguientes *tracks* se presentan las modificaciones de estos perfiles considerando un intervalo arcilloso de 10m (*tracks* 4 y 5), tres intervalos arcillosos de 4m cada uno (*tracks* 6 y 7), un intervalo de arena de 40m (*tracks* 8 y 9), dos intervalos arcillosos de 10m cada uno (*tracks* 10 y 11), un intervalo de arena de 10m y 2m respectivamente (*tracks* 12 al 15).

le incorporaron dos intervalos arcillosos de 10 m cada uno (*tracks* 10 y 11, Fig. 6). En el tercer modelo se consideró una arenisca continua de 10 m (*tracks* 12 y 13, Fig. 6), y finalmente en el cuarto modelo, una arenisca continua de 2 m (*tracks* 14 y 15, Fig. 6).

Para cada uno de estos modelos se utilizaron las curvas de densidad y velocidad compresional, que fueron modificadas para asignarles los valores asociados a arcilla y arenisca según corresponde en cada escenario a ser modelado.

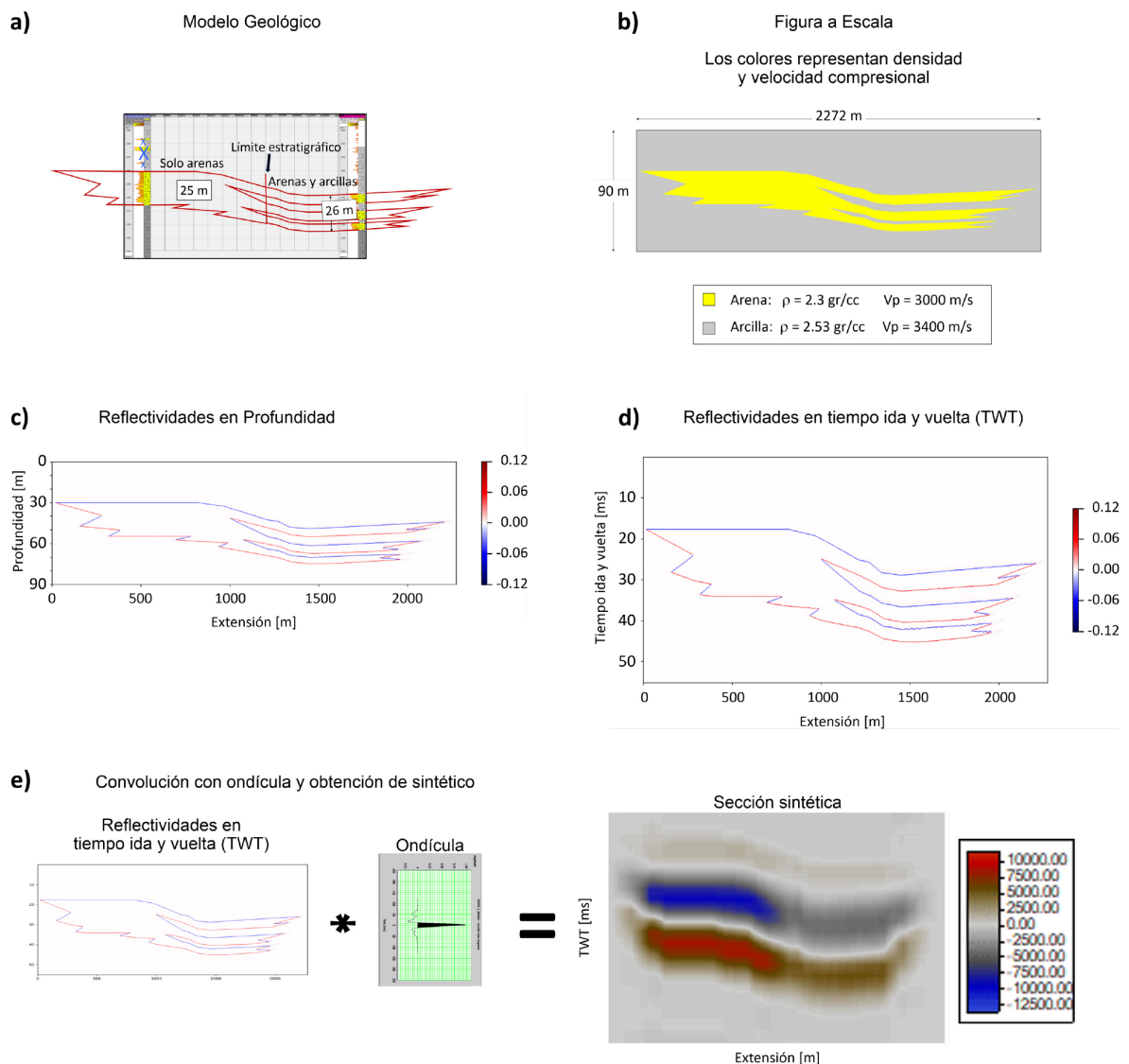


Figura 7. Elaboración una sección sísmica desde un modelo estratigráfico. a) Correlación estratigráfica entre dos pozos. b) Imagen creada a partir del modelo. c) Reflectividades en profundidad. d) Reflectividades en tiempo de ida y vuelta. e) Se obtiene la sección sísmica sintética al muestrear espacialmente la convolución entre las reflectividades en tiempo de ida y vuelta y la ondícula extraída del pozo Cahuil-2 La sección se exporta a formato SEG-Y.

Modelado directo 2D

Para realizar la modelación 2D se escribió un programa capaz de leer el modelo estratigráfico (Fig. 7a) como una imagen en que los colores representan los valores de densidad y velocidad compresional de los cuerpos interpretados a partir de la información de los pozos (Fig. 7b). Desde aquí se calculan las impedancias y las reflectividades (Fig. 7c), estas últimas se transforman al dominio de tiempo de ida y vuelta, utilizando los tiempos de tránsito obtenidos desde las velocidades compresionales (Fig. 7d) y se realiza la convolución con la ondícula, obteniéndose la sección sintética (Fig. 7e), la cual se muestrea espacialmente a la distancia de la sección sísmica que se quiere comparar y finalmente se exporta a formato SEG-Y para ser utilizada en los distintos programas de interpretación.

RESULTADOS

Se presentan los resultados obtenidos en la modelación directa. En el caso 1D se presenta el estudio realizado en el pozo Cahuil-2, mientras que en el caso 2D se presenta el estudio de dos secciones que atraviesan algunos pozos del yacimiento Cahuil.

Modelo directo 1D

Las figuras 8, 9 y 10 muestran los resultados de los modelos directos 1D que fueron construidos a partir de las variaciones estratigráficas explicadas en la sección de metodología. La Figura 8

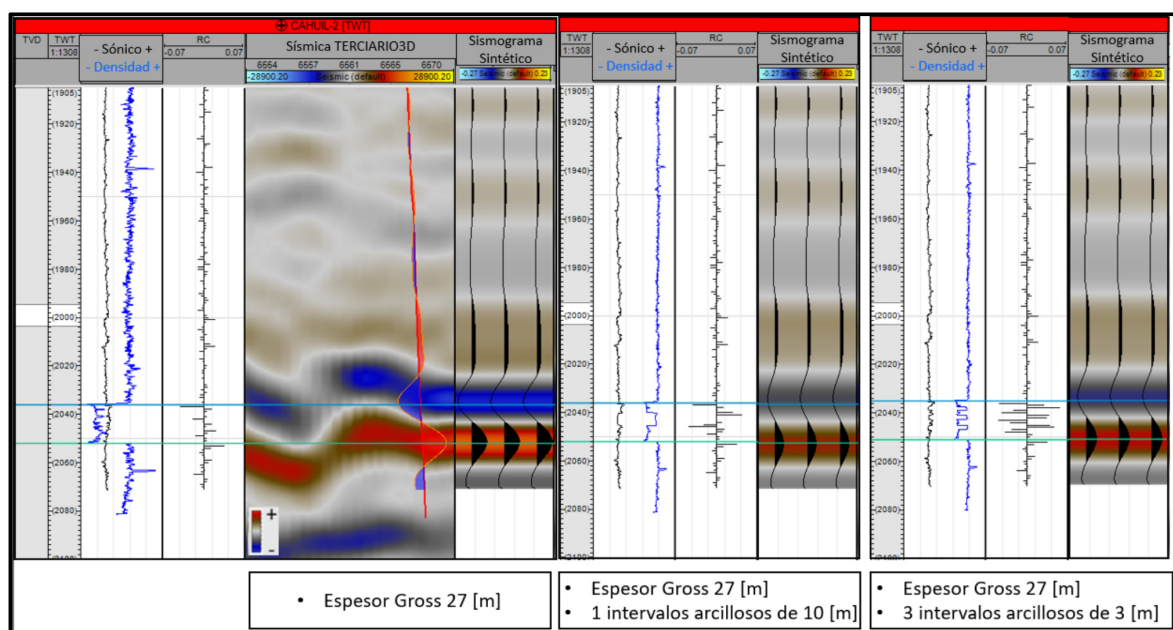


Figura 8. Modelo 1: Espesor de 27m de arena continua al que luego se le agregan dos modificaciones. La primera con un intervalo arcilloso de 10m, y la segunda con tres intervalos arcillosos de 3m. En cada uno de los modelos se observa la respuesta sísmica sintética al cambio de espesor del reservorio identificado en el pozo Cahuil-2.

muestra el modelo 1, que corresponde a una arena continua de 27 m con dos escenarios diferentes de intercalaciones de arcilla. La Figura 9 corresponde al modelo 2, con un espesor gross de 40 m y dos escenarios, el primero con un intervalo de arcilla de 10 m y el segundo con dos de 10 m. La Figura 10 corresponde a los modelos 3 y 4, con un espesor de arena continua de 10 y 2 m respectivamente.

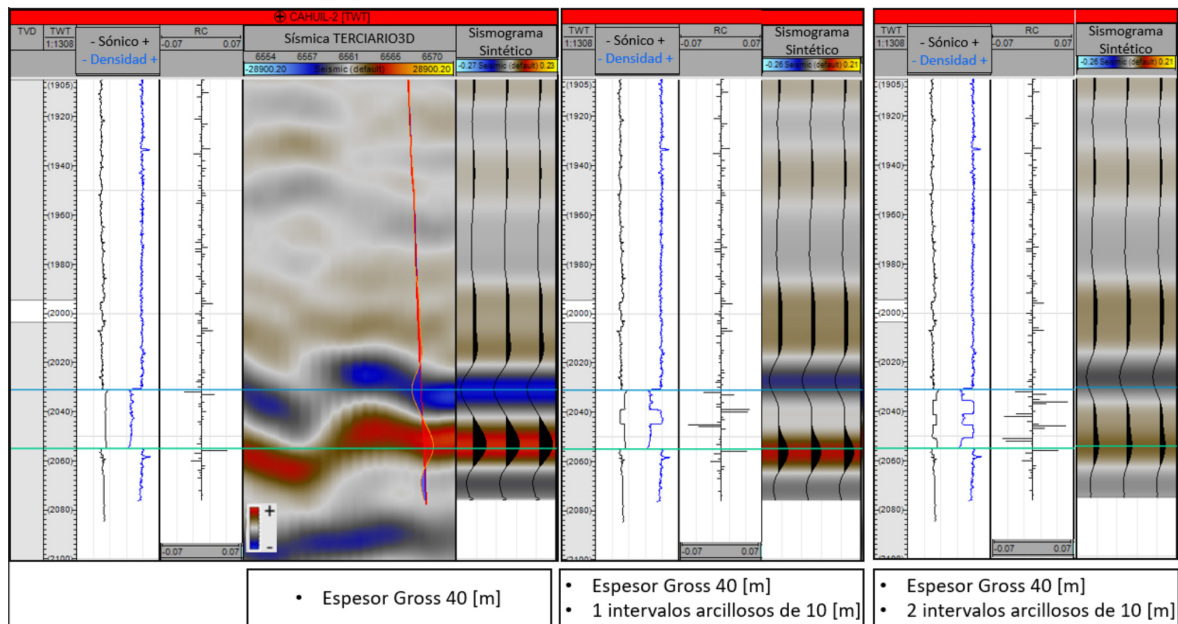


Figura 9. Modelo 2: Espesor de 40m de arenisca continua al que luego se le agregan dos modificaciones. La primera con un intervalo arcilloso de 10m, y la segunda con dos intervalos arcillosos de 10m. En cada uno de los modelos se observa la respuesta sísmica sintética al cambio de espesor del reservorio identificado en el pozo Cahuil-2.

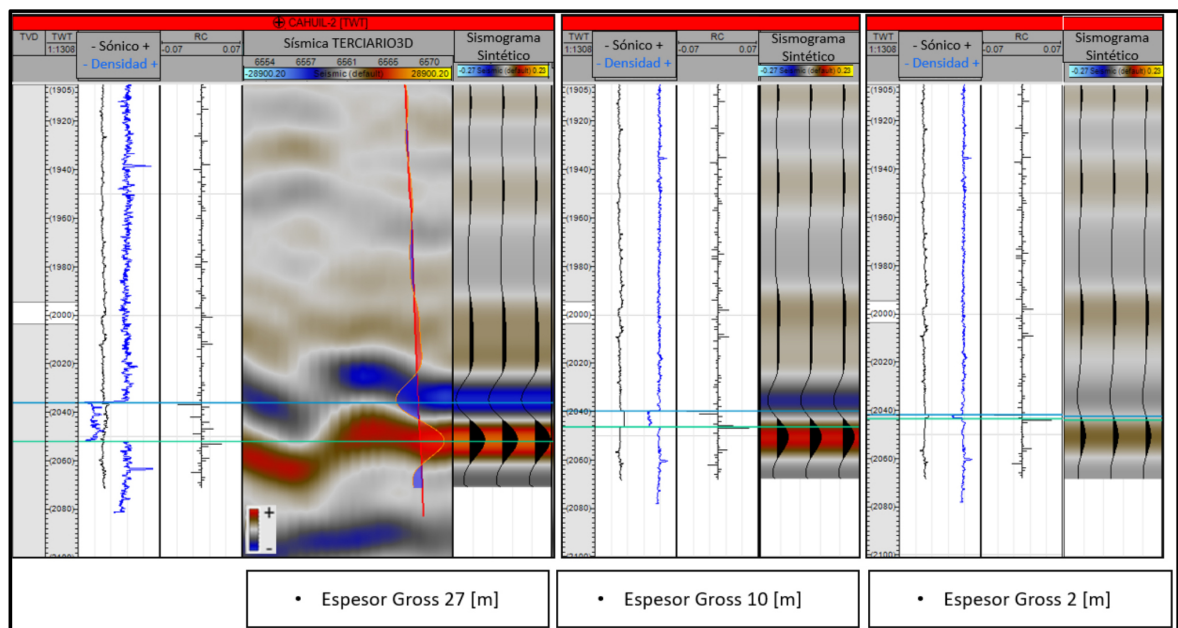


Figura 10. Modelos 3 y 4: Espesor de 27m de arena continua que luego se reduce a 10 y 2m respectivamente. En cada uno de los modelos se observa la respuesta sísmica sintética al cambio de espesor del reservorio identificado en el pozo Cahuil-2.

Es relevante destacar dos aspectos principales. El primero está relacionado con la incorporación de intervalos arcillosos, lo que produce una disminución de la amplitud en el modelo generado, comportamiento que se observa en la Figura 8. El segundo tiene que ver con el efecto que genera el considerar un espesor de arena de 10m, menor a la resolución sísmica, y que su respuesta produce una alta amplitud, fenómeno que se puede explicar por contrastes muy altos de impedancia acústica generando altos valores de coeficiente de reflexión, sin que la sísmica logre definir el techo y base del reservorio.

Modelo directo 2D

A continuación, se presentan los resultados del modelo 2D para dos secciones estratigráficas interpretadas en algunos pozos del yacimiento (Fig. 11). Para cada interpretación se tienen dos versiones, una antes y otra después de perforar pozos dentro de la sección.

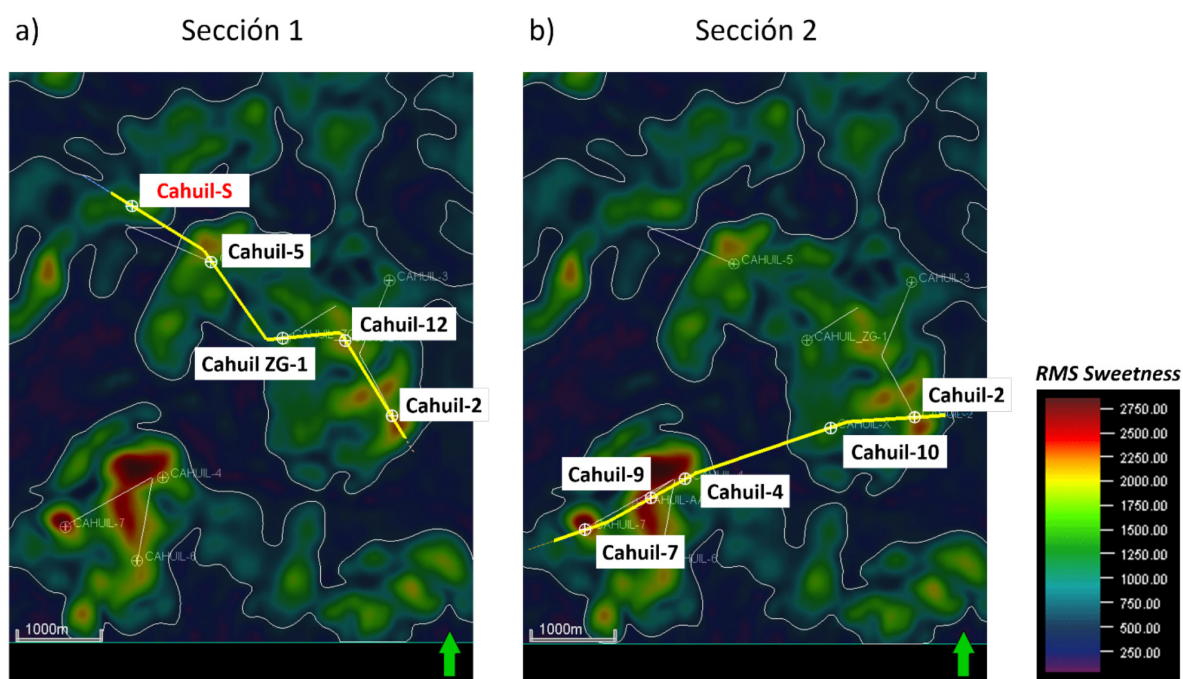


Figura 11. Ubicación de las secciones utilizadas en el modelado directo 2D. a) La sección 1 incluye la propuesta Cahuil-S y los pozos Cahuil-5, Cahuil ZG-1, Cahuil-12 y Cahuil-2. b) La sección 2 incluye los pozos Cahuil-7, Cahuil-9, Cahuil-4, Cahuil-10 y Cahuil-2. En colores se muestra la anomalía de RMS Sweetness.

El primer caso consiste en varios cuerpos arenosos desconectados o mínimamente conectados, con terminaciones de intercalaciones de arenas y arcillas (Fig. 12 a y b). Al centro de la sección y en la parte más somera se modelaron cuerpos delgados que no se resuelven en la sísmica, pero atenúan las amplitudes de los cuerpos ubicados inmediatamente bajo ellos, actuando de la misma forma que las intercalaciones entre arenas y arcillas (Fig. 12c). Se confirman los resultados del

modelo directo 1D en cuanto a los efectos en la amplitud sísmica debido a intercalaciones de arcillas y variación en los espesores de los cuerpos de arena.

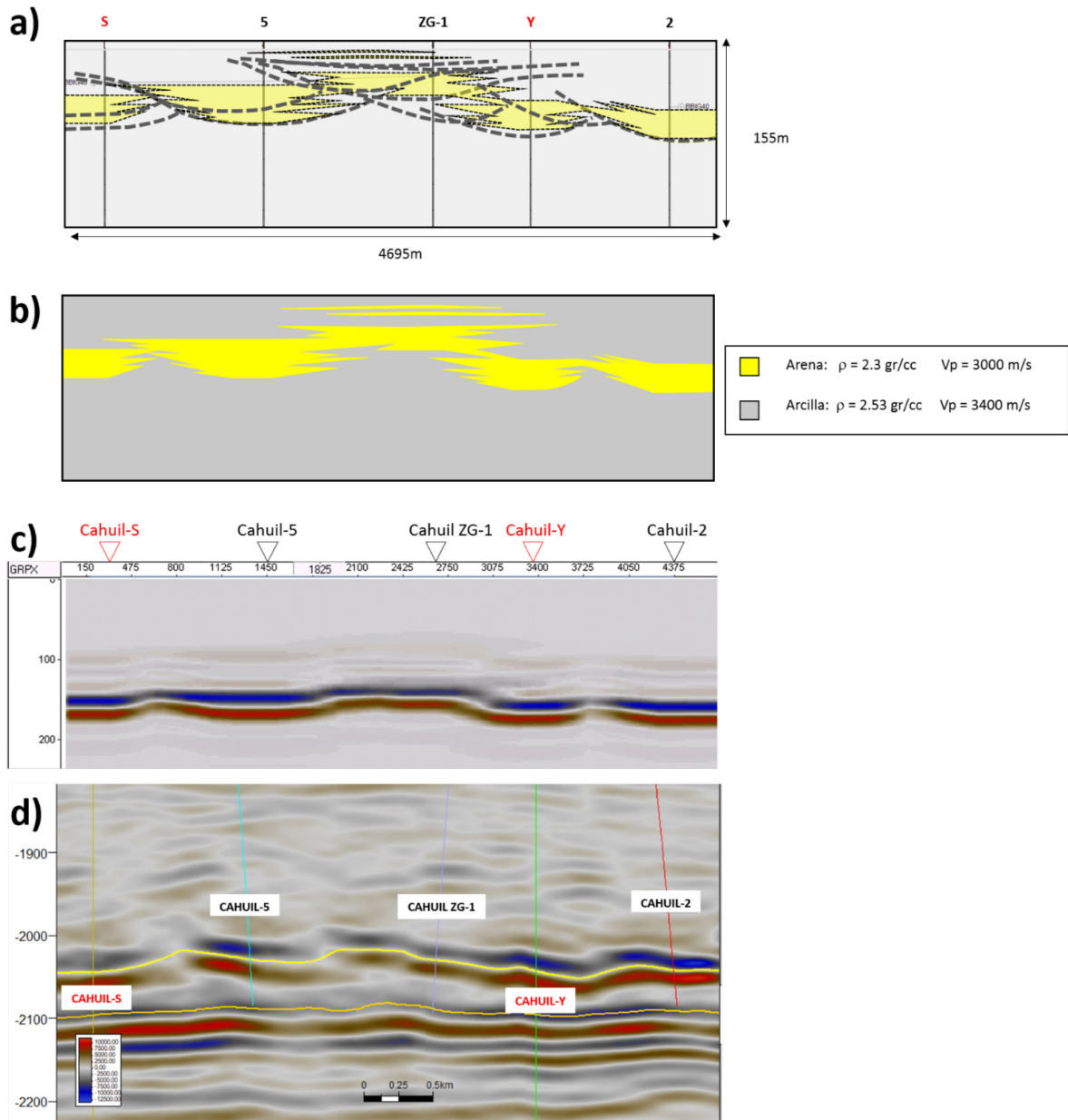


Figura 12. Modelo directo 2D, caso 1, versión 1. a) Correlación estratigráfica entre los pozos Cahuil: "S", 5, ZG-1, "Y" y 2. b) Imagen creada a partir de (a) donde los colores representan valores de impedancia. c) Sección sintética generada a partir de (b). d) Sección sísmica correspondiente a la zona de correlación.

Se realizó una segunda interpretación después de la perforación del pozo Cahuil-12 (previamente denominado Cahuil-"Y"), en que se elevó la posición del cuerpo atravesado por este pozo y además se agregaron valores de densidad y velocidad, pasando de un solo tipo de arena a

tres tipos (Fig. 13 a y b). Además, luego de comparar las secciones sintética y sísmica, se decidió conectar el cuerpo arenoso central con los lentes que se encuentran inmediatamente sobre éste (Fig. 13b).

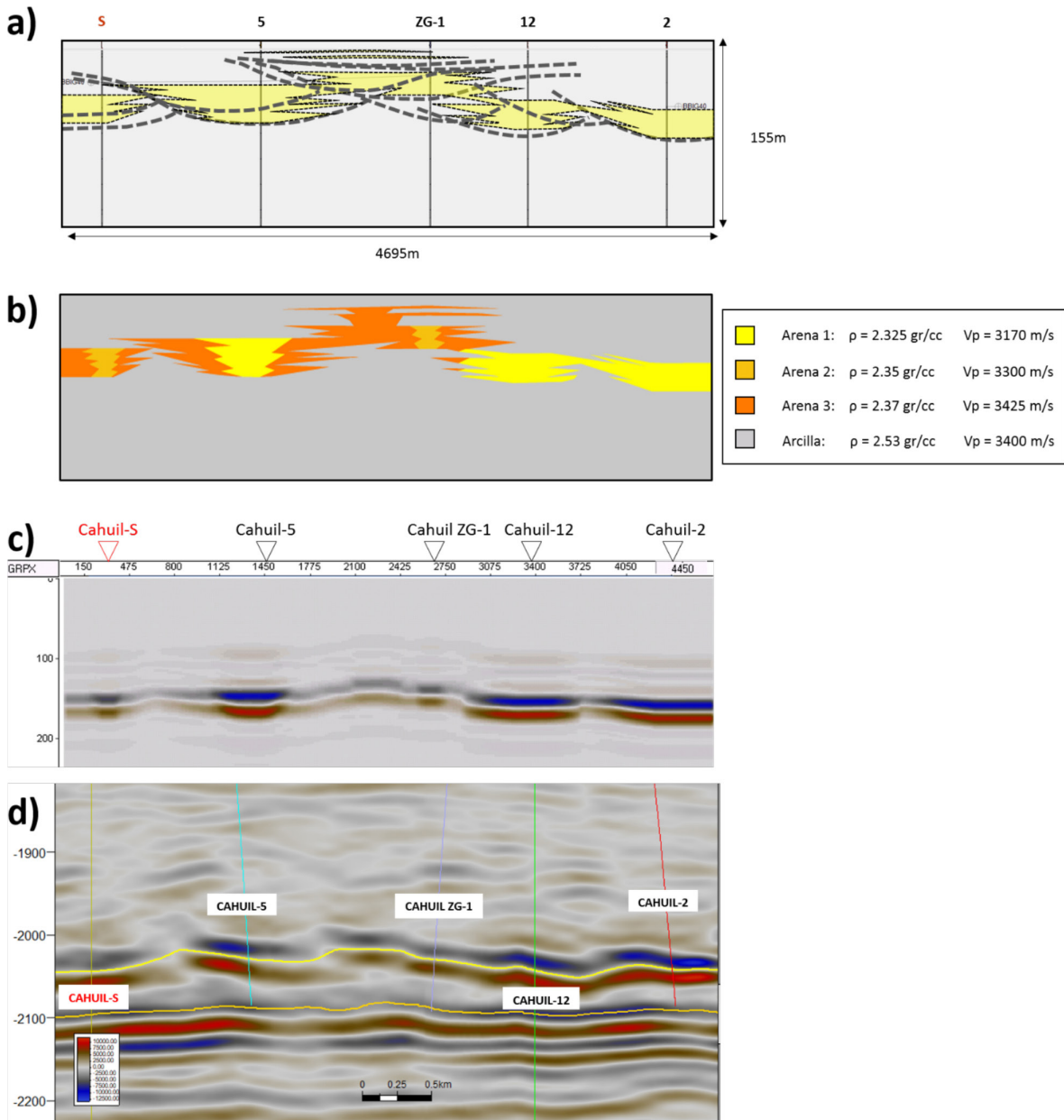


Figura 13. Modelo directo 2D, caso 1, versión 2. a) Correlación estratigráfica entre los pozos Cahuil: "S", 5, ZG-1, 12 y 2. b) Imagen creada a partir de (a) donde los colores representan valores de impedancia. c) Sección sintética generada a partir de (b). d) Sección sísmica correspondiente a la zona de correlación.

Al comparar las secciones sintéticas de ambas interpretaciones (Fig. 12c y Fig. 13c) se observa que agregar diferentes tipos de arena generó una mejor correspondencia entre las amplitudes del sintético y las amplitudes de la sísmica. Además, al conectar los cuerpos ubicados al centro de

la sección se logró una mejor expresión de las fallas aparentes que se observan entre los pozos Cahuil-5 y Cahuil ZG-1. Por otro lado, en ninguno de los casos se logró que la posición relativa de los reflectores en los sintéticos corresponda a la sísmica real. Esto se debe principalmente a que se modela solamente una sección de la subsuperficie, no se consideran las variaciones de impedancia entre la superficie y el reservorio y tampoco se considera la topografía (en algunas zonas se llegan a diferencias en las elevaciones de hasta 300m).

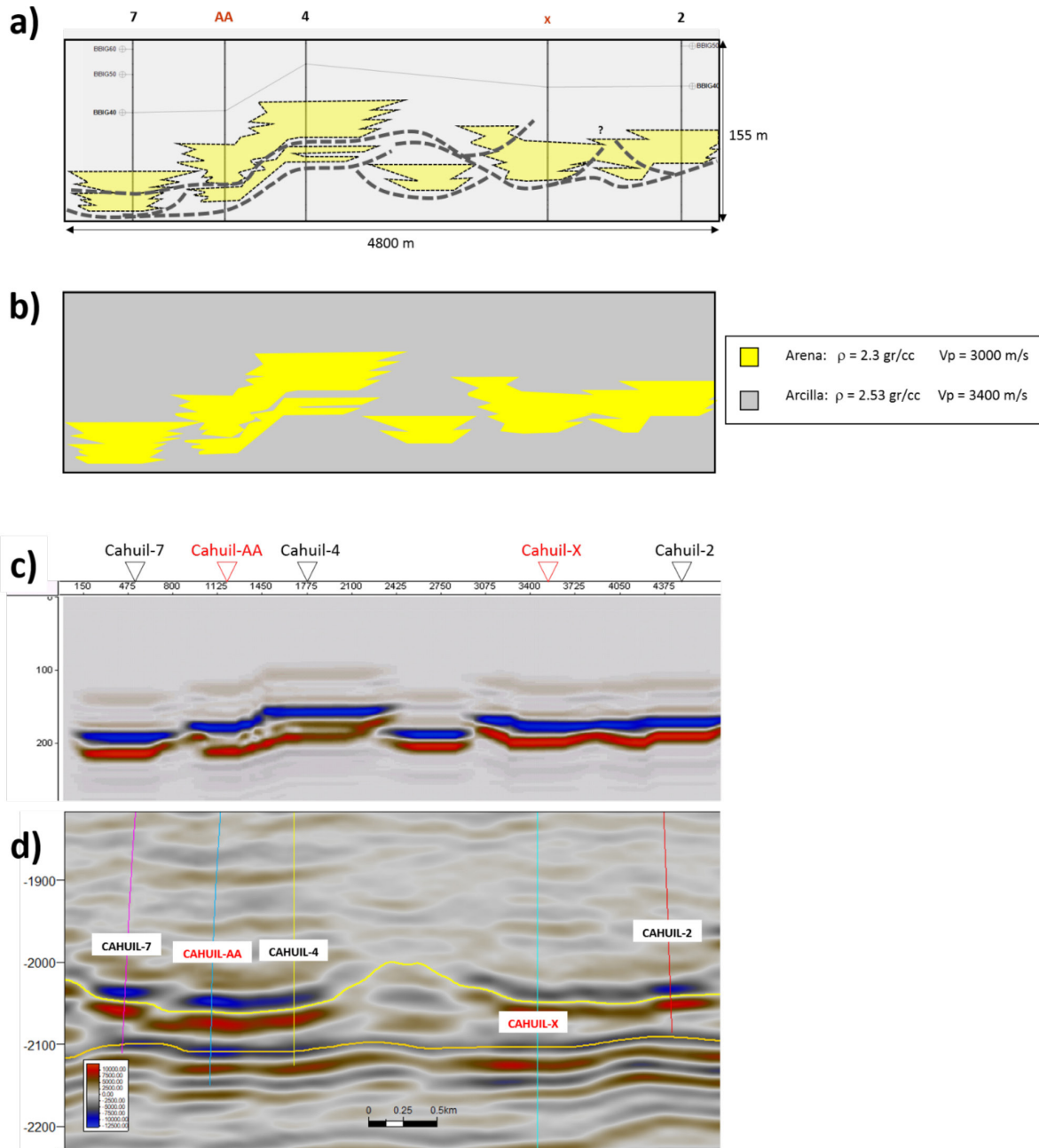


Figura 14. Modelo directo 2D, caso 2, versión 1. a) Correlación estratigráfica entre los pozos Cahuil: 7, “AA”, 4, “X” y 2. b) Imagen creada a partir de (a) donde los colores representan valores de impedancia. c) Sección sintética generada a partir de (b). d) Sección sísmica correspondiente a la zona de correlación.

En el segundo caso se modelaron cuatro grupos de cuerpos arenosos amalgamados (Fig. 14 a y b). Al comparar el sintético con la sísmica se observan varias discrepancias (Fig. 14 c y d). por un lado, el sintético no presenta una variación de amplitudes consistente con la sísmica, lo que es más evidente en el cuerpo ubicado al centro de la sección. Por otro lado, en la zona de Cahuil-“AA”, cercano a los 200 ms, se generan artefactos no presentes en la sísmica (Fig. 14c).

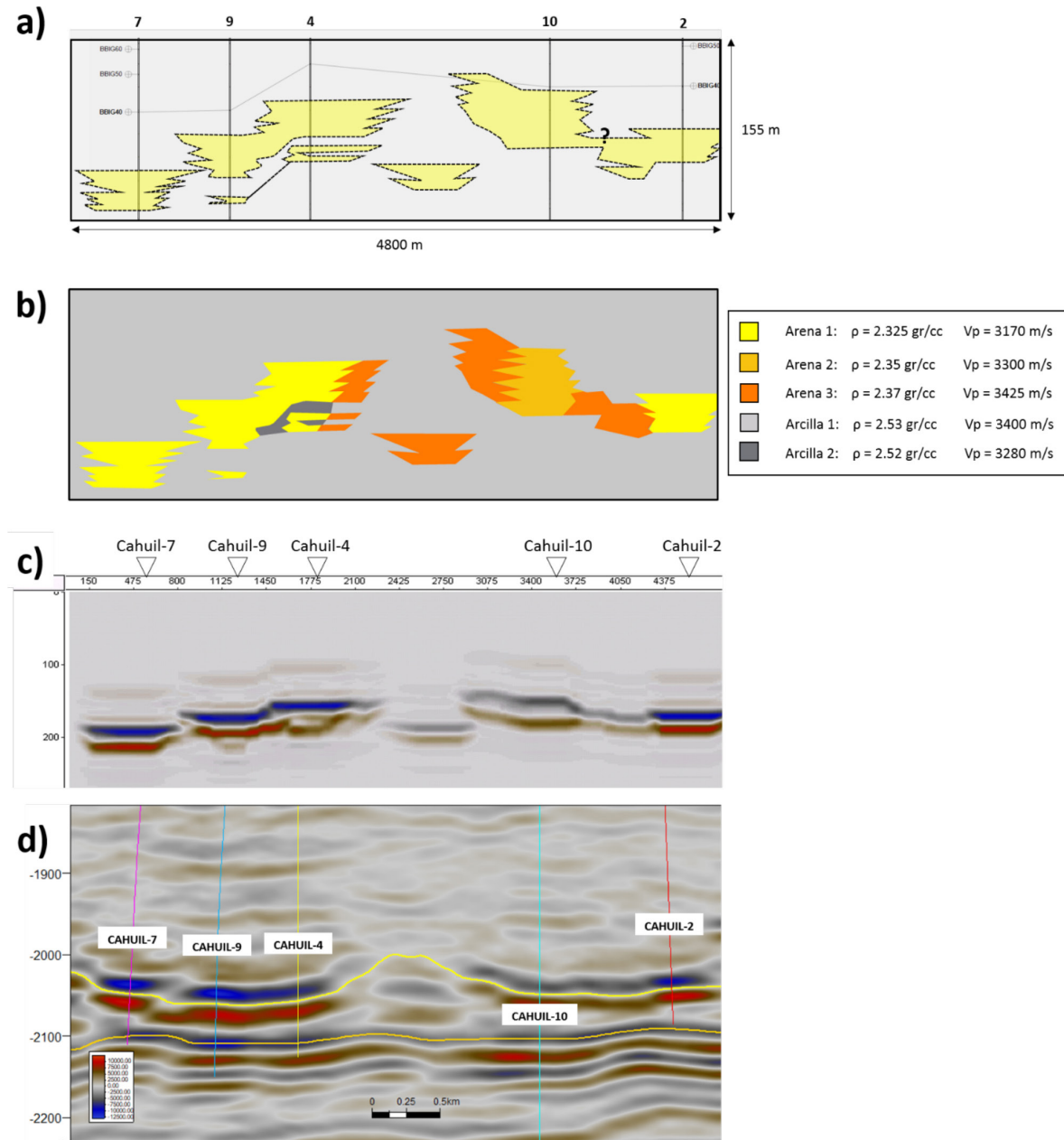


Figura 15. Modelo directo 2D, caso 2, versión 2. a) Correlación estratigráfica entre los pozos Cahuil: 7, 9, 4, 10 y 2. b) Imagen creada a partir de (a) donde los colores representan valores de impedancia. c) Sección sintética generada a partir de (b). d) Sección sísmica correspondiente a la zona de correlación.

Considerando las discrepancias detectadas entre la primera versión del modelo con los datos sísmicos y aprovechando la perforación de los pozos Cahuil-9 y Cahuil-10, se modeló nuevamente, agregando dos tipos de arena y un tipo de arcilla para honrar los valores de densidad y velocidad obtenidos en estos nuevos pozos. Además, se elevó y aumentó considerablemente el espesor del cuerpo atravesado por el pozo Cahuil-10 (Fig.15 a y b). Con estos cambios las amplitudes de la sección sintética correlacionan mejor con los datos sísmicos, en especial desde el cuerpo aislado, localizado al centro de la sección, hasta los pozos Cahuil-10 y Cahuil-2 (Fig. 15 c y d). Por otro lado, al agregar un segundo tipo de arcillas entre los cuerpos arenosos de los pozos Cahuil-9 y Cahuil-4, se logra eliminar los artefactos que generó el modelo anterior, aunque las amplitudes asociadas a Cahuil-4 aún no coinciden satisfactoriamente con la sísmica.

CONCLUSIONES

Se confirma que distintos modelos estratigráficos generan respuestas sísmicas similares entre sí. Por un lado, la disminución de las amplitudes se puede generar a través del aumento de la impedancia acústica para disminuir el contraste con las arcillas, la introducción de intercalaciones arcillosas o la disminución de espesores de los cuerpos arenosos. Por otro lado, contactos entre cuerpos de distintas impedancias acústicas genera una respuesta sísmica muy similar a la respuesta de una falla estructural.

Sin perjuicio de lo anterior, los modelos estratigráficos con multiplicidad de canales son los que generan los modelos sintéticos más comparables a la sísmica real. En otras palabras, la compleja expresión sísmica que posee CABI se representa de forma más exacta mediante modelos estratigráficos multicanales, donde las variaciones de amplitud y geometría son, en una primera aproximación, reflejo en las variaciones de espesor y extensión de los reservorios canalizados. Por otra parte, la aparente presencia de fallas en la sísmica puede corresponder a la expresión de canales discretos con valores de impedancias contrastantes con el medio arcilloso y no necesariamente a fallas con desplazamientos decimétricos.

Finalmente, el modelo no es capaz de predecir las posiciones estructurales de los reflectores observadas en los datos sísmicos. Para esto se necesitaría modelar toda la sección sísmica hasta la superficie.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece a ENAP por permitir la publicación de este trabajo interno elaborado para ir probando distintas hipótesis sobre la geometría y densidad de roca que podrían tener los reservorios arenosos en el yacimiento Cahuil dentro del bloque Dorado Riquelme.

REFERENCIAS CITADAS

- Caprinelli, A., Zurita, E., Valderrama, J.M., Soto, L., Radic, J.P., Agurto, C., Sánchez, J., 2022. Exploración y desarrollo en complejos turbidíticos del Paleoceno Tardío - Eoceno Medio en la cuenca de Magallanes, Chile. 11° Congreso de Exploración y Desarrollo de Hidrocarburos, IAPG, Mendoza, Argentina.
- Hart, B.S., 2008. Channel detection in 3-D seismic data using sweetness. AAPG Bulletin, 92(6), pp. 733-742.
- Nelson, A., 2008. Using RMS amplitudes from forward seismic-reflectivity modelling channelized deep-water slope deposits to inform stratigraphic interpretation and sub-seismic scale architecture, Tres Pasos formation, Magallanes basin, Patagonia, Chile. Department of Geosciences, Colorado State University.
- Pinto, J.A., González, Mella, P., Zapata, R., Aguirre, G., Carpinelli, C. y Zurita, E., 2018. Removilización e Inyección de arena en el Paleoceno-Eoceno de la Cuenca de Antepaís Magallanes, Chile: Características e Implicancias para la Exploración y Producción Petrolífera del Paleógeno. 10° Congreso de Exploración y Desarrollo de Hidrocarburos (CONEXPLO), pp. 891-915.
- Pinto, J. A., Gonzalez, D. L., Agurto, C., Pérez, Á. y Mella, P., 2019. Cronoestratigrafía y Potencial Petrolífero de la Antefosa Cenozoica de la Cuenca de Antepaís Magallanes: Área Cabo Negro – Dorado Riquelme. Informe interno, ENAP.
- White, R.E., 1980. Partial coherence matching of synthetic seismograms with seismic traces. Geophysical Prospecting, 28, pp. 333-358.