

10º Congreso de Exploración y Desarrollo de Hidrocarburos
Simposio de Geofísica: La Geofísica como vínculo entre el conocimiento de la tierra y la sociedad

CARACTERIZACIÓN SÍSMICA DE LA FM. VACA MUERTA EN CUENCA NEUQUINA: CÓMO APROVECHAR AL MÁXIMO LA INFORMACIÓN DISPONIBLE, MANEJANDO SUS INCERTIDUMBRES. ANÁLISIS PRE Y POST-DRILLING

María Emilia Muzzio¹, Sebastián María¹

1: Pluspetrol, mmuzzio@pluspetrol.net, smaria@pluspetrol.net

Keywords: Gas somero, análisis AVO, facies sísmicas

ABSTRACT

Seismic characterization of Vaca Muerta Fm.: how to optimize the use of existing information, managing uncertainties. Pre & post-drilling analysis

La Calera area, located in the center of the Neuquén Basin, presents high prospectivity in the unconventional shales of Vaca Muerta Fm. The neighboring blocks of Loma Campana and Aguada Pichana have several unconventional wells drilled, with good hydrocarbon productions.

Prior to drilling the first unconventional well in La Calera in 2017 several works were performed. Since the well information available was limited (only 5 existing wells in La Calera had reached Base of Vaca Muerta), the use of vintage 3D seismic was proposed to achieve the best possible characterization of Vaca Muerta Fm. The initial steps included seismic reprocessing using an AVO compliant sequence, detailed seismostratigraphic interpretation and a post-stack inversion.

Given that the P-impedance derived from the post-stack inversion achieved a high correlation with the well logs, pre-stack inversions were performed too. These type of inversions generate P-impedance, S-impedance and density cubes. These products can be combined using calibrated petrophysical and geomechanical equations to predict more useful properties that characterize unconventional reservoirs, such as TOC, Poisson's ratio, Young's modulus, etc. All these derived properties were used to populate a 3D static model of the area that helped to locate and to navigate the first unconventional well.

One of the challenges that had to be addressed was that full band seismic inversions require a low frequency model that is built using well logs and horizons. Since there was only one well in the area with S-velocity information, several models were tested and alternative inversions were run and used to manage the uncertainties. Once the vertical pilot well was drilled in 2017 a complete set of logs was run and inversion products could be compared with this new information. This helped understand better the sensitivity of the results and concluded with an updated inversion and 3D static model.

INTRODUCCIÓN

El área La Calera se encuentra ubicada en la provincia de Neuquén, Argentina, en el centro del engolfamiento neuquino (Figura 1). Limita al este con Loma Campana, al oeste con Aguada

Pichana, al sur con Bloque 2/ Fortín de Piedra y al norte con Bajada de Añelo. Los yacimientos de Loma Campana y Aguada Pichana cuentan a la fecha con numerosos pozos No Convencionales estimulados en Fm. Vaca Muerta con importantes producciones de hidrocarburos. Sin embargo, hasta 2017 en La Calera existían sólo 5 pozos que atravesaban Fm. Vaca Muerta, sin tenerla como objetivo, por lo que la información disponible para un análisis y modelado detallado era escasa.

Como ya han descripto numerosos autores la impedancia-P es una propiedad de suma utilidad para describir las facies de la Fm. Vaca Muerta (Reijenstein *et al.*, 2017), y para predecir el contenido orgánico de los shales (Gading *et al.*, 2013). Por ese motivo se realizaron en una primera instancia inversiones post-stack en La Calera y luego, con la intención de obtener aún más información de la sísmica 3D, se generaron cubos de impedancia-S y densidad a través de inversiones pre-stack.

El objetivo fue intentar predecir propiedades petrofísicas y geomecánicas de la Fm. Vaca Muerta a partir de la sísmica en La Calera, optimizando la utilización de la limitada información de pozos disponible. A partir de éste y otros estudios se generó un modelo estático 3D que ayudó a elegir la ubicación del primer pozo horizontal No Convencional del área. A continuación se describirá el trabajo realizado sobre la sísmica y luego se analizarán y compararán los resultados con la información post-drilling del pozo LCa.x-3001.

CONTEXTO GEOLÓGICO

En la figura 2 se observa la columna estratigráfica generalizada de la Cuenca Neuquina que incluye diversos reservorios, rocas madres y sellos (Brisson, 1998). La Fm. Vaca Muerta es una roca madre muy prolífica del Jurásico Tardío, formada por margas y limolitas. Hacia arriba se interdigita con la Fm. Quintuco (carbonatos) y por debajo se encuentra la Fm. Tordillo (arenas eólicas).

La Fm. Vaca Muerta presenta un arreglo progradante en dirección sureste-noroeste, hacia el centro de cuenca, tal como se observa en la sección sísmica arbitraria de la Figura 3 (sector La Calera-Loma Campana). En toda la cuenca esta formación varía su espesor, desde 100 m al este hasta 500m al oeste. Dentro del área de estudio esta unidad tiene un espesor cercano a 400 m, su contenido orgánico total (TOC) varía entre 2 y 8% y la profundidad media de la base de la formación está a alrededor de 3000 mbbp.

Para mayor información y detalle es conveniente consultar la extensa bibliografía que ha sido publicada sobre Fm. Vaca Muerta. Entre otros cabe mencionar el libro sobre la Transecta Regional de Vaca Muerta (González *et al.*, 2016) y los numerosos papers y trabajos presentados en congresos de No Convencionales como URTeC y el Simposio de Recursos No Convencionales en el IX° Congreso de Exploración y Desarrollo de Hidrocarburos (ver REFERENCIAS CITADAS).

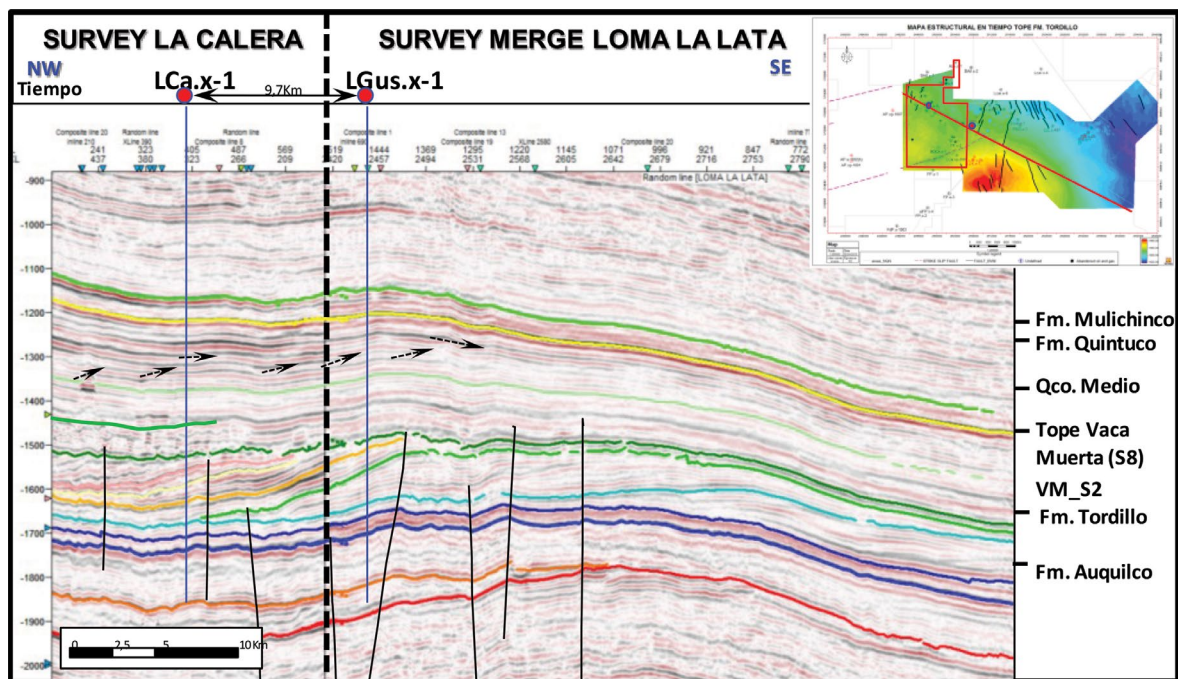


Figura 3. Sección sísmica arbitraria entre La Calera y Loma Campana con la principales formaciones y secuencias.

Primero se realizaron los sismogramas sintéticos, se verificó que los productos estaban en fase cero y se interpretaron los horizontes principales (figura 5) sobre la sísmica PSTM final (pre-stack time migration con postprocesos). Luego se comenzó a trabajar en inversiones post-stack,

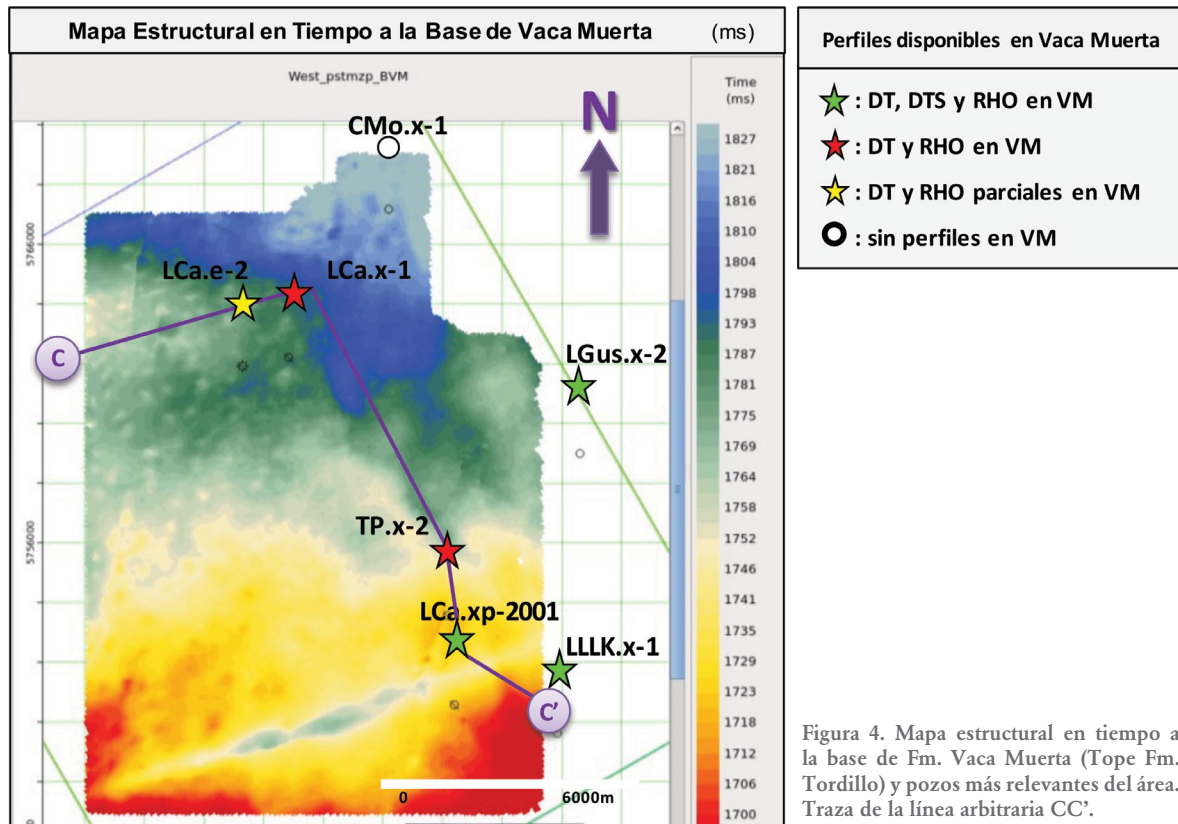


Figura 4. Mapa estructural en tiempo a la base de Fm. Vaca Muerta (Tope Fm. Tordillo) y pozos más relevantes del área. Trazo de la línea arbitraria CC'.

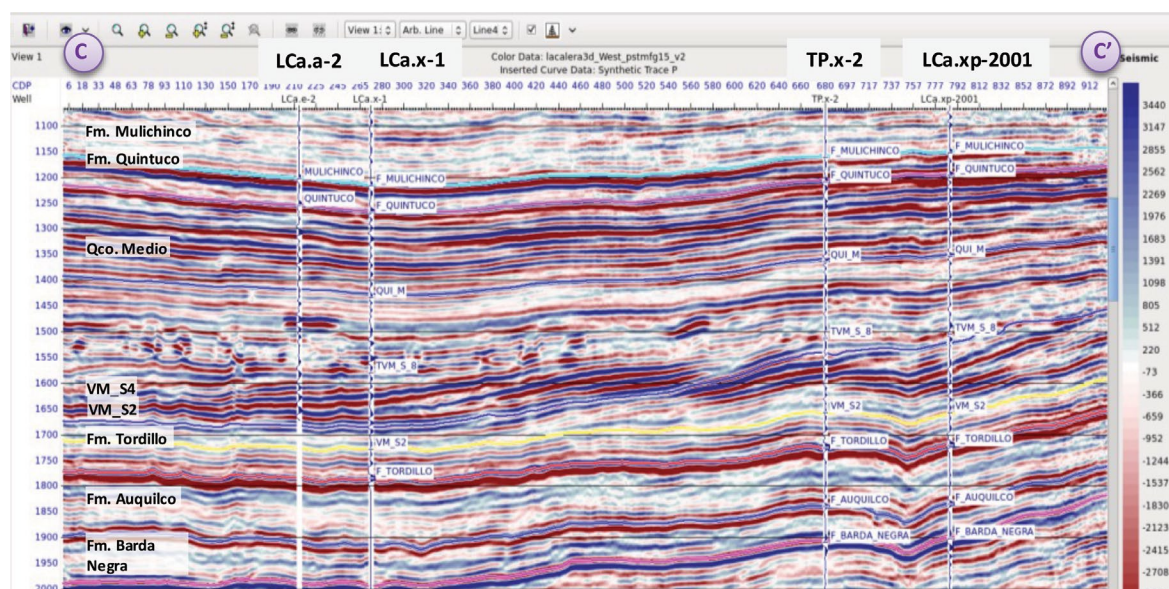


Figura 5. Línea arbitraria CC' (cubo PSTM final) con horizontes y pozos del proyecto.

las cuales utilizan como dato de entrada las trazas PSTM ya sumadas y dan como resultado cubos de impedancia-P. Si se lograba un buen resultado la intención era continuar con inversiones más complejas pre-stack, que utilizan gathers o stacks parciales para derivar impedancia-P, impedancia-S y densidad en forma simultánea.

En general, es recomendable antes de realizar inversiones pre-stack, generar inversiones post-stack porque son más robustas y sirven como control de calidad. Además, en casos donde no se logra una buena correlación entre pozos e impedancia con inversión post-stack es muy difícil intentar invertir los gathers, que están más afectados por ruido, stretch, NMO residual, etc.

Debido a que el rango de frecuencias presente en la sísmica comienza en 10-12 Hz, para poder obtener productos de rango completo es necesario incluir un modelo de baja frecuencias durante los procesos de inversión de trazas. Este modelo se suele construir a partir de perfiles de pozos filtrados, que son interpolados y extrapolados en toda el área siguiendo los principales horizontes. Para inversiones post-stack se utilizan perfiles densidad y sónico compresional, ya que el producto final es impedancia-P. En cambio, para las inversiones pre-stack se requieren perfiles de densidad y sónicos dipolares (onda P y S) en los pozos del modelo.

En La Calera se hicieron diversas pruebas de modelo para la inversión post-stack, considerando la distribución espacial de los pozos, las diferencias entre los perfiles y los horizontes guías. Se compararon los resultados utilizando 1, 2 ó 3 pozos en el modelo y se optó por mantener dos alternativas: el modelo A utilizando sólo el pozo LCA.xp-2001 y el modelo B con información de los 3 pozos disponibles del área (LCA.x-1, TP.x-2 y LCA.xp-2001).

Para el control de calidad también se tomaron como referencia los pozos aledaños LLLK.x-1 y LGus.x-2, desplazando su ubicación al borde del cubo sísmico, y el pozo LCA.e-2 que perforó sólo un

tramo de Fm. Vaca Muerta. En la Figura 6 se observa la comparación de los perfiles de pozo (filtrados hasta 60Hz para no sobrepasar las máximas frecuencias de la sísmica) y la impedancia-P resultante utilizando los modelos A y B. Con ambos modelos la inversión sísmica post-stack reproduce bien los perfiles en el tramo Quintuco-Vaca Muerta, agregando detalles que no están en el modelo inicial, lo que implica que el método agrega valor y es útil. Se concluyó que lo óptimo era emplear el modelo B con 3 pozos, pero que también se lograba un muy buen producto utilizando el A.

En la Figura 7 se graficó la impedancia de la sísmica versus la de perfiles en el intervalo entre Quintuco Medio y Base de Vaca Muerta. Así se verificó cuantitativamente que existe una alta correlación entre ambas (0.8 para la inversión con modelo A y 0.9 con modelo B). Estos resultados alentadores, motivaron a continuar con inversiones pre-stack para poder predecir más propiedades petrofísicas y geomecánicas a partir de la sísmica.

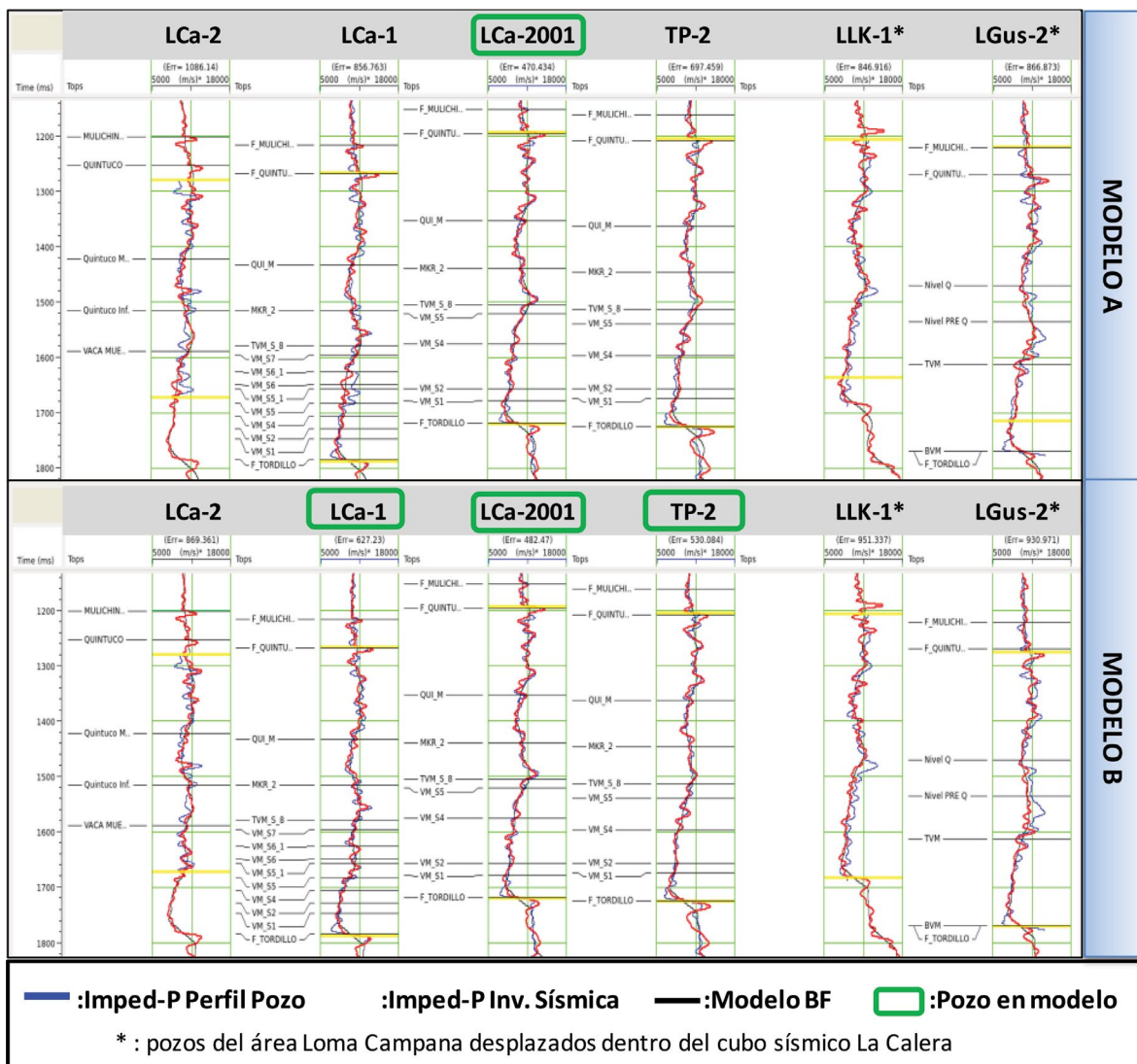


Figura 6. Comparación de los perfiles de pozo (filtrados hasta 60 Hz) y la impedancia P resultante de las inversiones post-stack con los modelos A y B.

INVERSIONES PRE-STACK

Las inversiones pre-stack se realizaron mediante las siguientes etapas:

Acondicionamiento del dato pre-stack

En el reprocesamiento sísmico se generaron gathers migrados pre-stack en tiempo, en dominio offset vector tile (figura 8.a), a los cuales se les aplicaron postprocesos para corregir el moveout residual asociado al azimuth y estáticas consistentes en CMP (TRIM máximo: 8 ms).

Posteriormente se usó un filtro radón sobre los gathers originales para acondicionar aún más los datos de entrada a la inversión mejorando su relación señal/ruido (Figura 8.b). Luego estos gathers se sumaron por ángulo, obteniendo así un volumen de Angle Gathers con 12 ángulos en total, de 2° a 35° (figura 8.c).

Amarre pozos-sísmica y extracción de ondículas

Para las inversiones post-stack previas se habían amarrado los pozos del proyecto en tiempo, realizando sismogramas sintéticos con una ondícula de fase cero extraída estadísticamente de la sísmica PSTM en el intervalo de interés (800-2300 ms). En todos los pozos se obtuvieron buenas correlaciones de los sismogramas, lo cual indicaba que la ondícula estadística era representativa de toda el área y adecuada para invertir el dato. Siguiendo el mismo criterio se extrajeron tres ondículas en el mismo intervalo de los Angle Gathers: una ondícula para los ángulos 2° a 13°, otra para 13° a 24° y la última para el rango 24° a 35°. En la Figura 9 se puede observar la correlación entre sismograma sintético de offset cero y traza sísmica PSTM en el pozo LCa.xp-2001 (coeficiente de correlación de 0.69), como así también la comparación entre un angle gather sintético y uno real en dicho pozo.

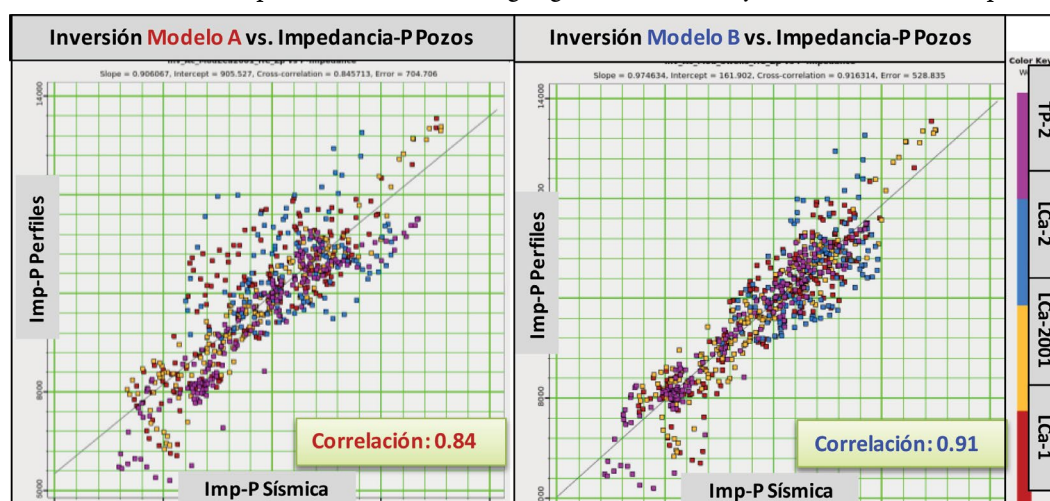


Figura 7. Inversiones sísmicas con modelo A y B versus impedancia-P de perfiles de pozo. Intervalo entre Quintuco Medio y Base de Vaca Muerta.

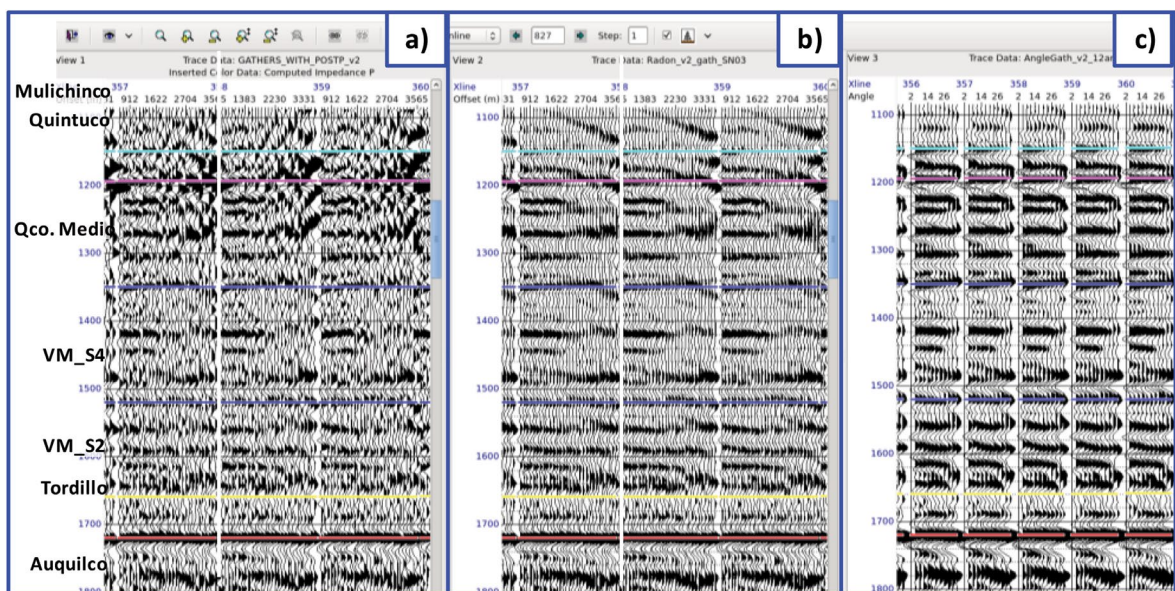


Figura 8. A) Gathers originales PSTM con postprocesos, b) Gathers con filtro radón adicional, c) Angle Gathers (12 ángulos, de 2° a 35°).

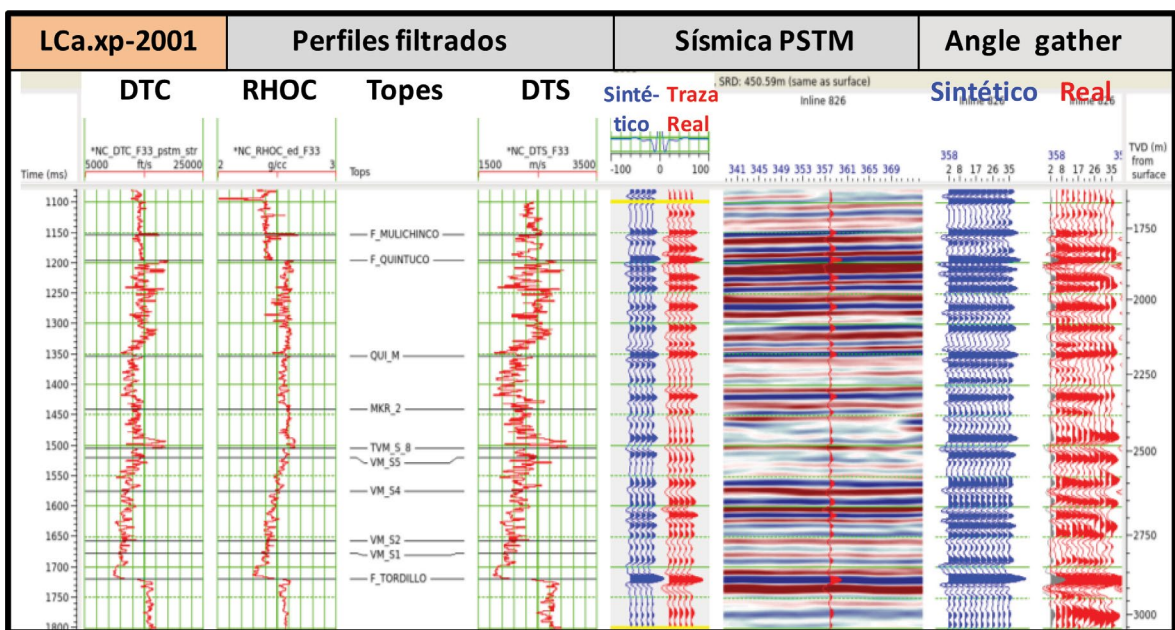


Figura 9. LCa.xp-2001. Sismograma y angle gather sintéticos versus reales.

Generación del modelo de bajas frecuencias

Debido a que existe poca información de pozos en el bloque y en cambio, los reflectores sísmicos son bien claros, se utilizaron nueve horizontes para guiar los modelos de bajas frecuencias: desde el tope de Fm. Mulichinco hasta el de Fm. Barda Negra, incluyendo algunas secuencias intermedias de Vaca Muerta (VM_S2 y VM_S4) y su base.

Los perfiles de pozo fueron analizados, editados y normalizados en una etapa previa. En los pozos con sónico dipolar (LCa.xp-2001, LLK.x-1 y LGus.x-2) se pudo establecer una regresión lineal robusta para aproximar DTS con DTC en Quintuco-Vaca Muerta. Con esta relación se generó una curva sintética de velocidad de onda-S en los pozos que sólo tenían sónico compresional. Si bien esto no soluciona por completo la falta de información real, permite utilizar todos los pozos para controles de calidad, y aprovechar también, de forma indirecta, la información de pozos que están fuera de la sísmica 3D.

El primer modelo (A) se construyó propagando sólo los perfiles del pozo LCa.xp-2001 siguiendo los horizontes. Luego se realizaron diversas pruebas para otro modelo (B) empleando 3 pozos. La intención era utilizar toda la información de onda P y densidad disponible pero evitando que las curvas de onda-S sintéticas condicionaran mucho los resultados. Finalmente se optó por usar la curva DTS sintética en el pozo LCa.x-1 pero en TP.x-2 se extrajo la velocidad-S del modelo A y se la usó como curva allí para el modelo B. Esta opción daba un resultado de

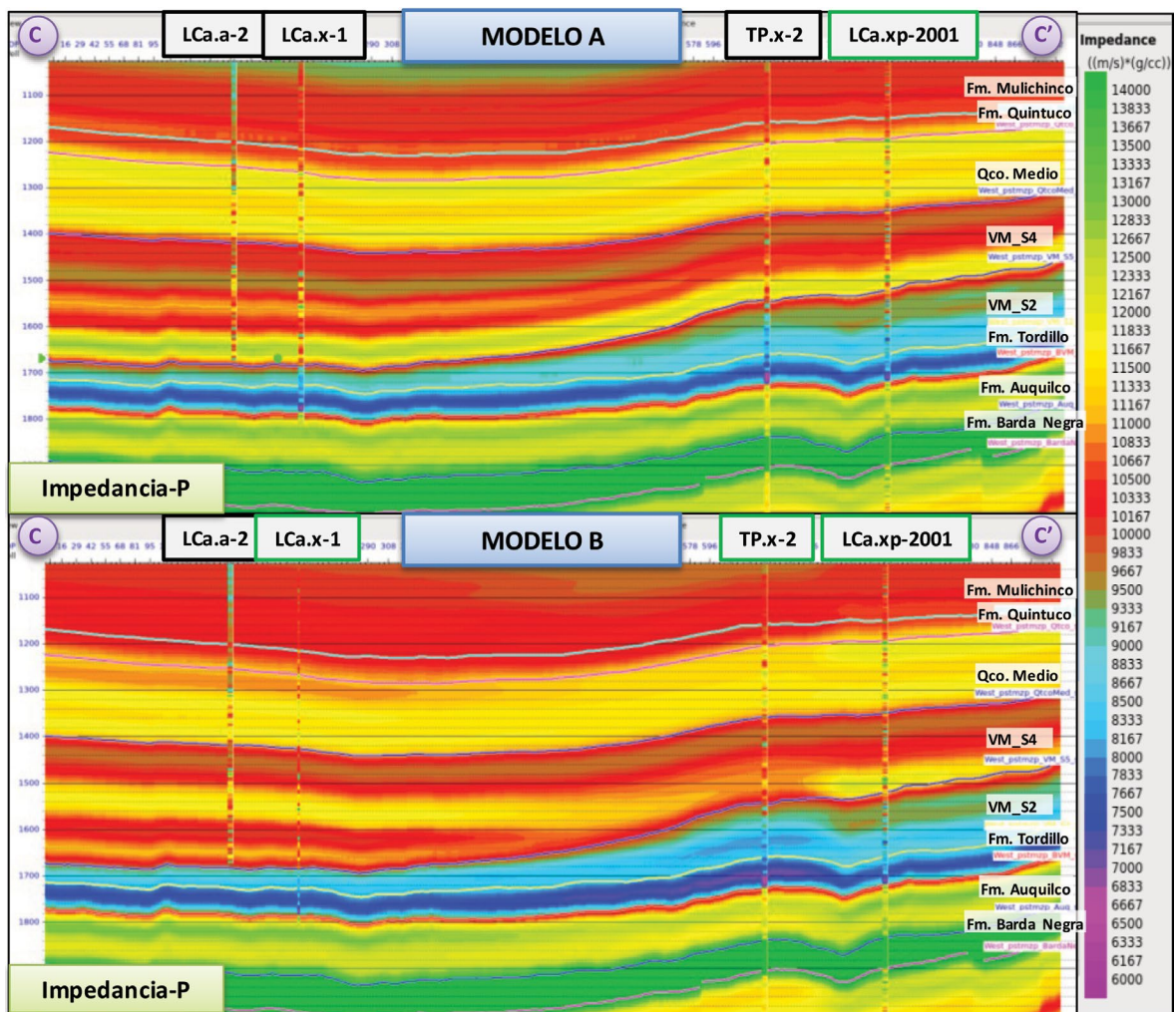


Figura 10. Línea arbitraria CC' sobre modelos de baja frecuencia A y B: Impedancia-P.

velocidad S más suave y coherente entre pozos, que usando todas las curvas sintéticas y a su vez, permitía usar las curvas verdaderas en los 3 pozos del modelo. En las Figuras 10, 11 y 12 se comparan las impedancias P y S y la densidad de los modelos pre-stack A y B sobre la línea arbitraria CC', en los pozos se grafican con la misma escala de color los perfiles correspondientes filtrados a 60Hz.

Cabe mencionar que también se realizaron pruebas incluyendo sólo dos pozos en el modelo, pero en la etapa de control de calidad ninguna resultó conveniente. En todos los casos las pruebas de inversión con modelo A o B eran mejores que utilizando modelos de dos pozos.

Selección de algoritmo y parámetros de inversión

A partir de un análisis en los pozos con diversos algoritmos y parámetros se buscó el proceso que mejor reproducía con la sísmica los valores medidos por perfiles. La inversión simultánea de tipo "Model Based" se parametrizó con coeficientes de regresión entre las propiedades que fueron

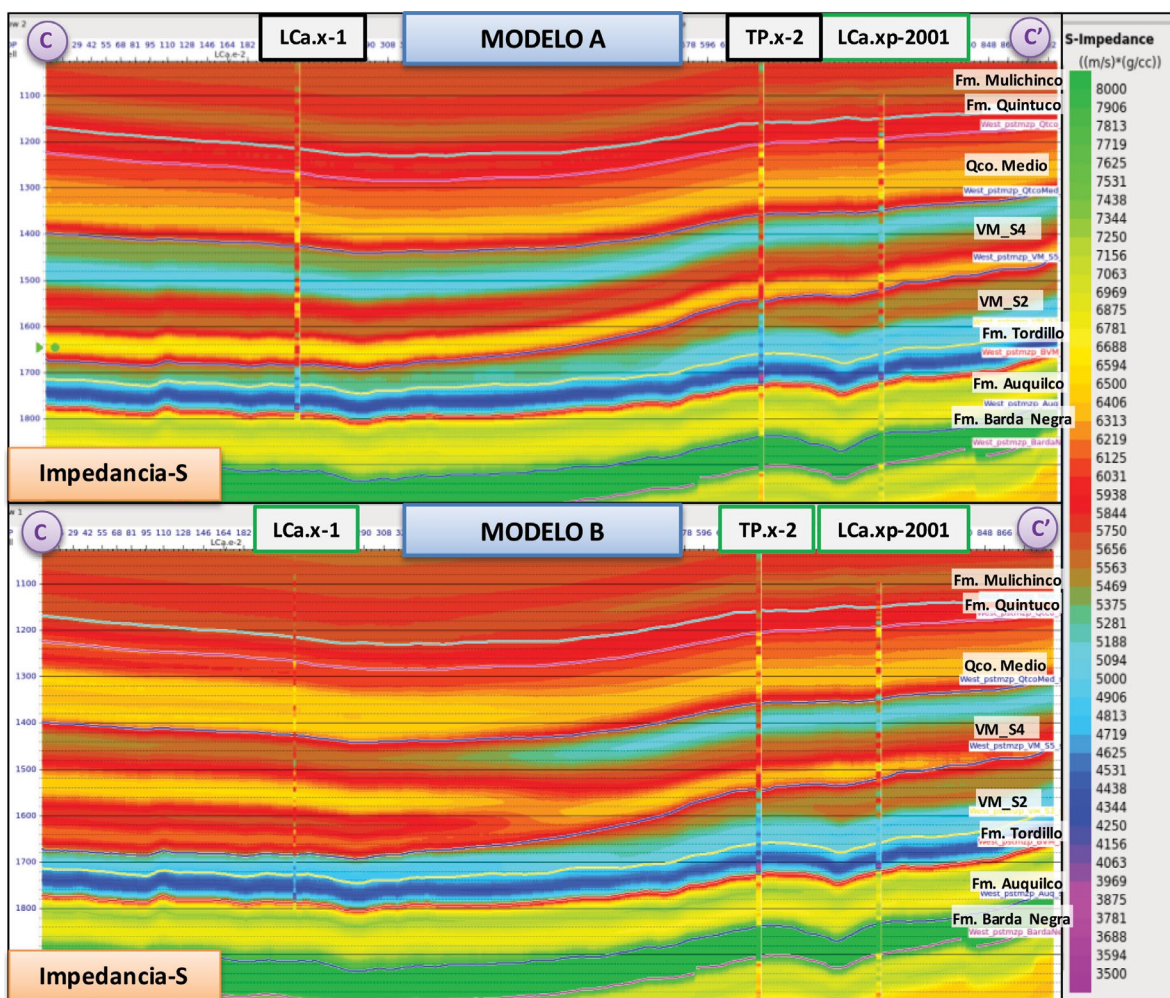


Figura 11. Línea arbitraria CC' sobre modelos de baja frecuencia A y B: Impedancia-S.

estimados a partir de los perfiles de LCa.xp-2001 y verificados con los pozos LLLK.x-1 y LGus.x-2. En la Figura 13 se compara la inversión de trazas utilizando el modelo A (inversión A) con los perfiles en cada pozo y el modelo de baja frecuencia. Se observa que las impedancias y densidad obtenidas reproducen bien los perfiles en el tramo Quintuco-Vaca Muerta, agregando detalles que no están en el modelo.

Inversión de trazas pre-stack. Control de calidad

Se invirtieron los Angle Gathers con las ondículas, algoritmo y parámetros mencionados para ambos modelos (inversiones A y B). Las Figuras 14, 15 y 16 muestran la línea arbitraria CC' sobre los cubos de impedancia-P, impedancia-S y densidad resultantes de la inversión A. Sobre la trayectoria de los pozos se grafican en color los valores por perfiles, filtrados con un pasa-bajo de 60Hz de frecuencia de corte. Puede observarse que la predicción de propiedades es satisfactoria,

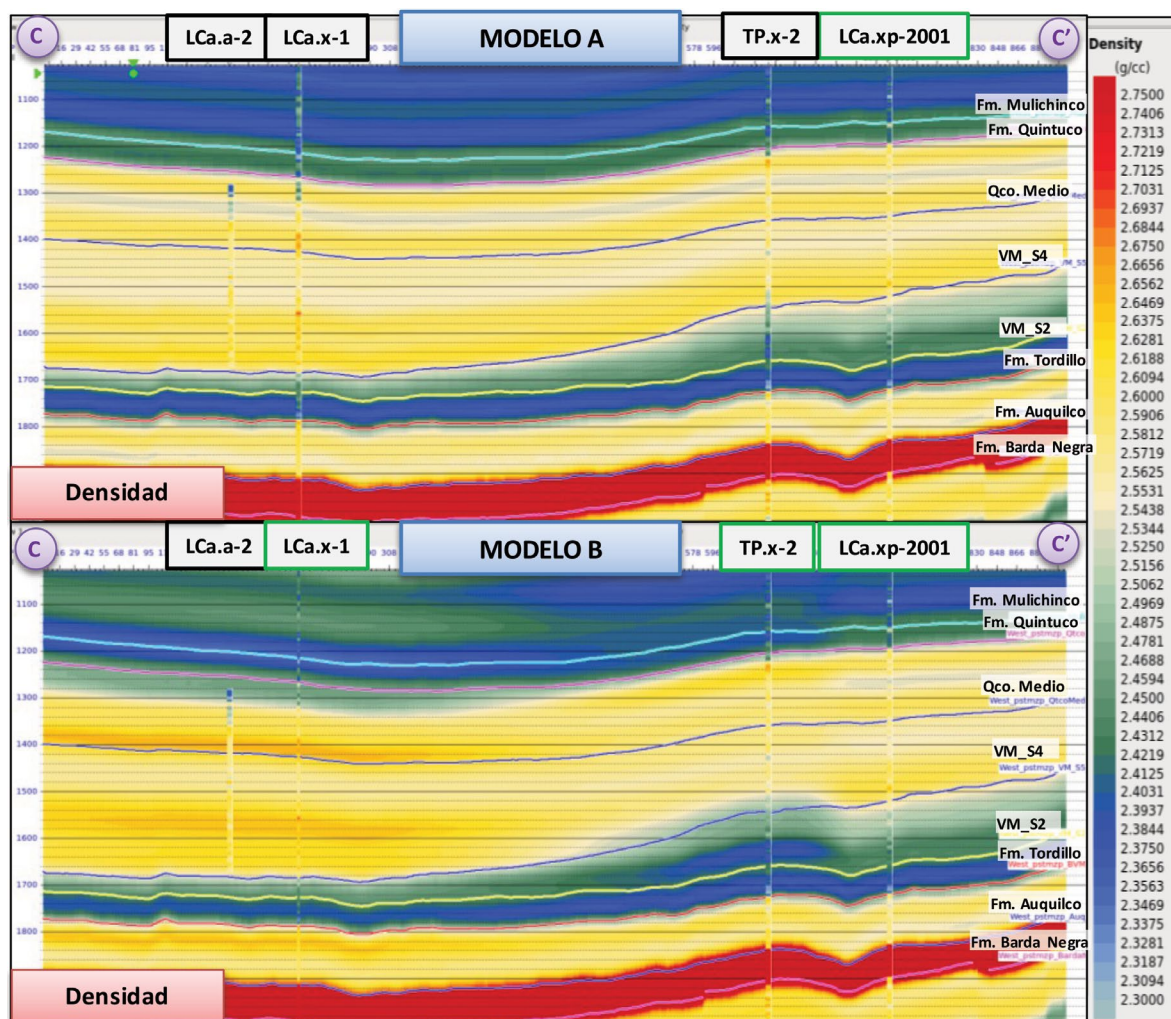


Figura 12. Línea arbitraria CC' sobre modelos de baja frecuencia A y B: Densidad.

agregando detalles que no estaban presentes en el modelo original (comparar con Figuras 10, 11 y 12).

En la Figura 17 se observan las extracciones de los valores de impedancia-P sobre modelos A y B y sus respectivas inversiones, todas entre las superficies de VM_S2 y Fm. Tordillo. Es notable como la anomalía de mayor impedancia-P entorno al pozo TP.x-2 presente en el modelo B se traslada a la inversión con dicho modelo y le deja una fuerte impronta en ese sector.

APLICACIÓN EN EL MODELO ESTÁTICO 3D PRE-DRILL

A partir de la interpretación sísmica detallada, datos de pozos y volúmenes de propiedades se generó un modelo estático 3D del complejo Quintuco-Vaca Muerta.

Para poblar de propiedades dicho modelo, hubo que optar por qué inversión pre-stack utilizar. Aunque se observaba que la predicción en los pozos de control era un poco mejor con la B, al no existir otros pozos para control de calidad que los mismos empleados en el modelo, esta percepción era relativa. Además, utilizando el modelo B, se corría el riesgo de introducir problemas laterales en los mapas por el efecto de interpolación entre pozos (Figura 13), algo que con un modelo mono-pozo como A no sucedía.

Se decidió entonces que era más conservadora y “robusta” la inversión pre-stack A, utilizando sólo el pozo LCa.xp-2001. El modelo estático 3D se pobló con propiedades petrofísicas y geomecánicas provenientes de los cubos de impedancia P, S y densidad de esta inversión. Con los pozos

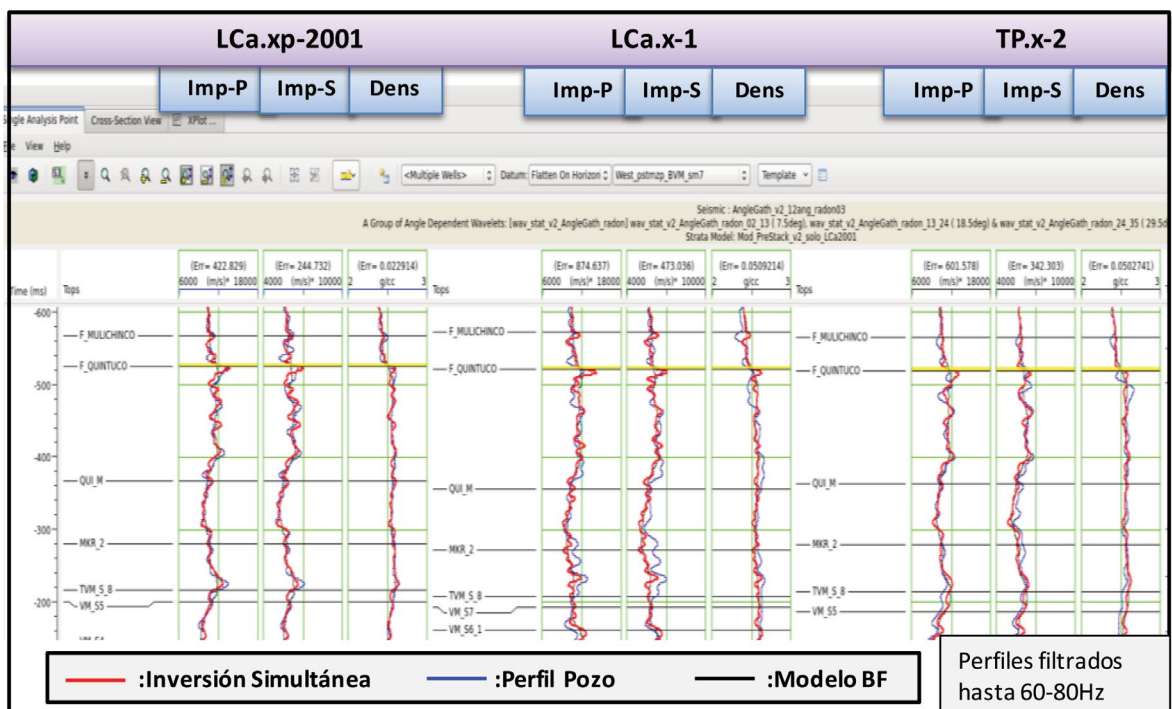


Figura 13. Control en los pozos de la inversión pre-stack A (sólo LCa.xp-2001 está en el modelo).

se estableció una regresión lineal para predecir el Carbón Orgánico Total a partir de la velocidad de onda P. Además se utilizaron ecuaciones, previamente calibradas a los datos geomecánicos de pozos, para generar otros cubos de propiedades tales como coeficiente de Poisson, módulo de Young, brittleness, etc.

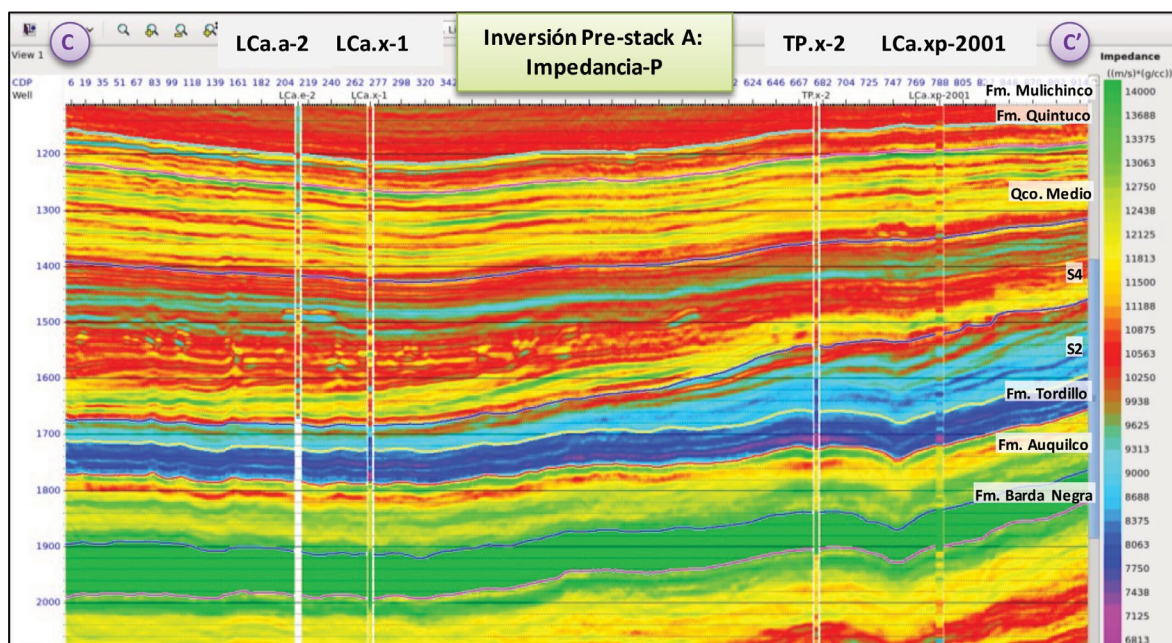


Figura 14. Línea arbitraria CC' sobre inversión pre-stack A: Impedancia-P.

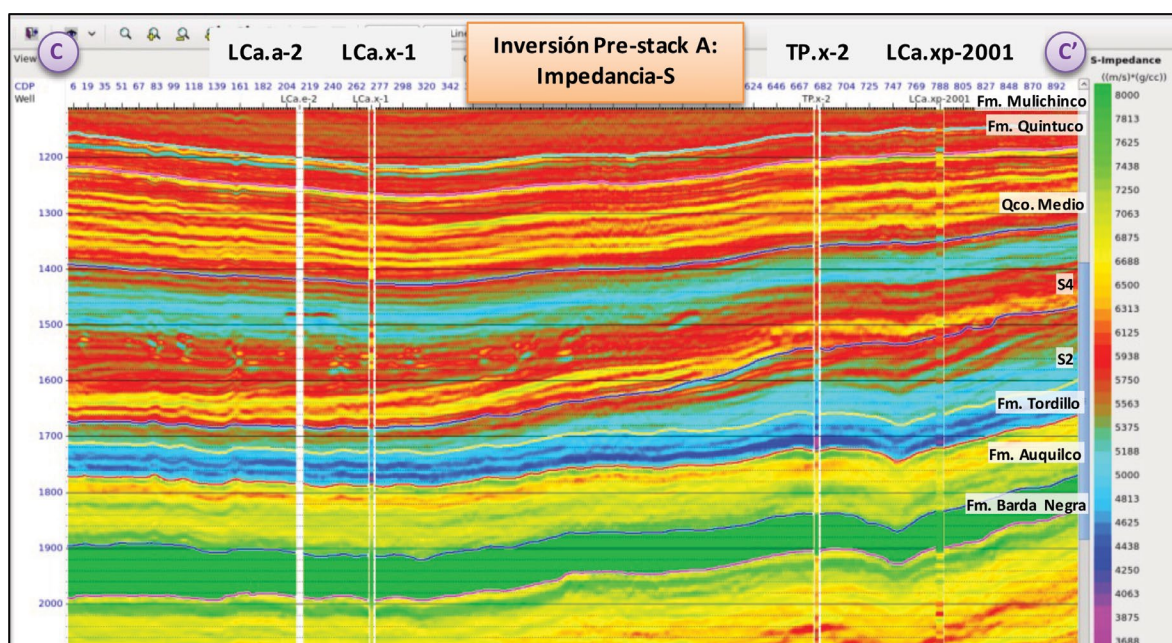


Figura 15. Línea arbitraria CC' sobre inversión pre-stack A: Impedancia-S.

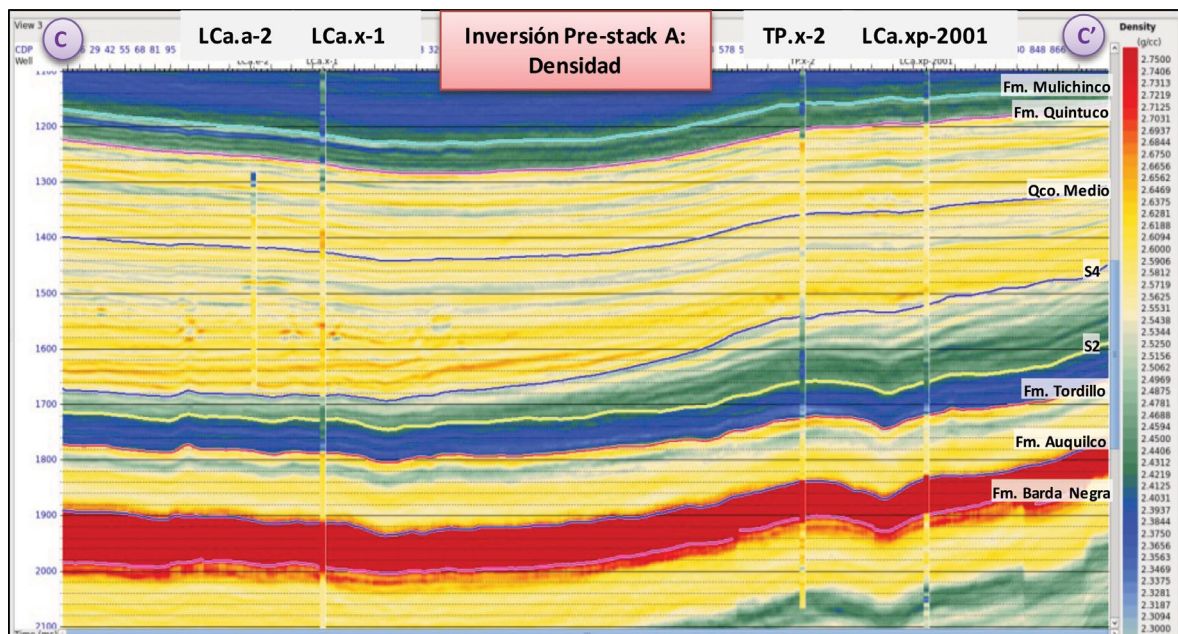


Figura 16. Línea arbitraria CC' sobre inversión pre-stack A: Densidad.

Este modelo 3D se utilizó para proponer y navegar el primer pozo horizontal en el bloque (LCa.x-3001). Si bien el modelo estático base se pobló con los productos de la inversión pre-stack A, también se utilizaron los cubos de la inversión B para contrastar y verificar las propiedades en las zonas de interés. Contar con los diferentes productos permitió manejar mejor las incertidumbres debidas a los escasos datos de pozo disponibles.

ANÁLISIS POST-DRILLING

A mediados de 2017, en la zona central de La Calera, se perforó el pozo LCa.x-3001. Se ejecutó un piloto vertical con perfiles completos y extracción de corona, seguido de una rama horizontal que navegó 1500 m en la Fm. Vaca Muerta.

Los datos de los perfiles obtenidos permitieron verificar las propiedades predichas con las inversiones sísmicas. En la Figura 18 se comparan impedancia-P, impedancia-S y densidad de las inversiones A y B con los perfiles del piloto vertical de LCa.x-3001 en la misma escala de colores.

Se observa que la correlación con la inversión A es aceptable, pero la que utiliza el modelo B predice mejor el nuevo pozo vertical, logrando altas correlaciones del orden de 90% en el intervalo Quintuco Medio-Base de Vaca Muerta (figura 19). La lección aprendida fue entonces que el uso de varios pozos en el modelo, aún en condiciones adversas sin set de curvas completo en todos, resultaba beneficioso para la inversión, contrario al criterio más conservador que se tenía previo a perforar.

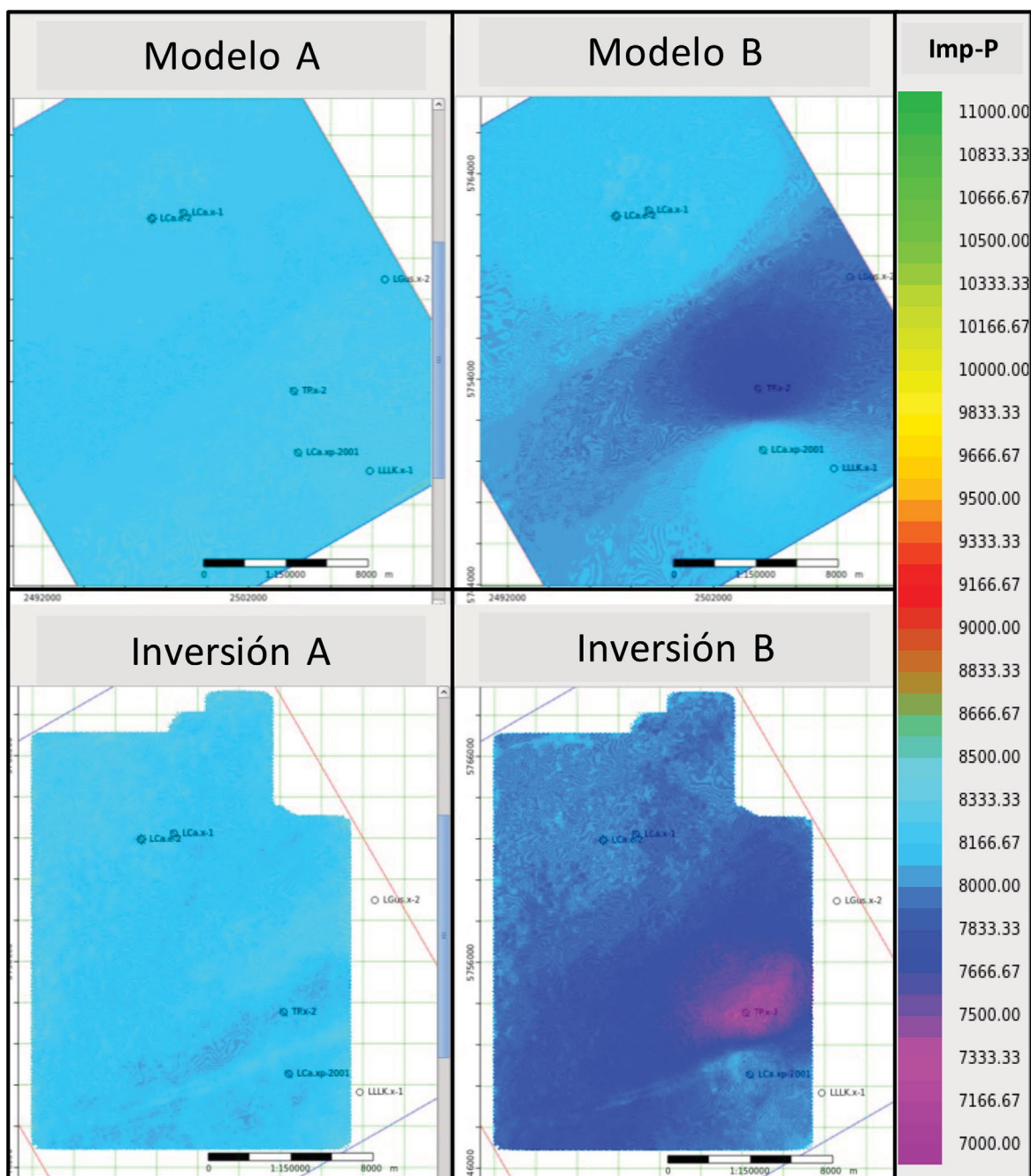


Figura 17. Extracciones de Impedancia P sobre modelos e inversiones prestack (Intervalo entre las superficies VM_S2 y Tordillo).

Como control adicional, en la Figura 20, se compararon los resultados en banda limitada de la inversión B y los perfiles de LCa.x-3001 (filtrados entre 12 y 60 Hz). Esta correlación en banda limitada también fue buena, mayor al 65% en el caso de las impedancias P y S, y algo inferior al 60% para la densidad (algo esperable al haber usado ángulos de incidencia menores a 35°).

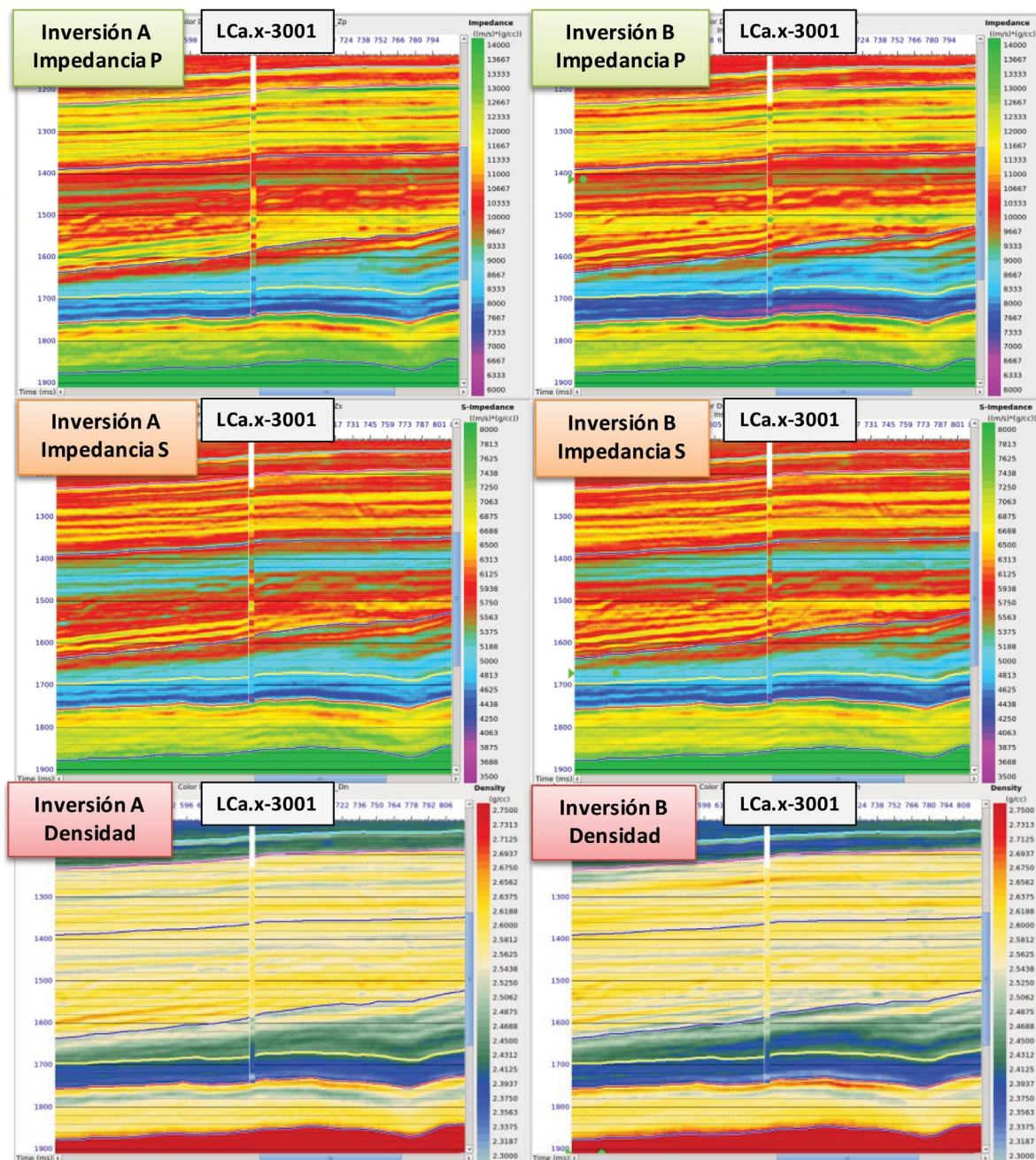


Figura 18. Comparación de inversiones pre-stack A y B en el pozo LCa.x-3001.

CONCLUSIONES

Las inversiones post-stack iniciales en La Calera mostraron buena correlación con la impedancia de los pozos y esto condujo a realizar inversiones pre-stack. Dada la escasa información de velocidad de onda S en los pozos se decidió generar más de una inversión pre-stack, con distinta cantidad de pozos en los modelos de bajas frecuencias de cada una. Los cubos resultantes mostraron buena

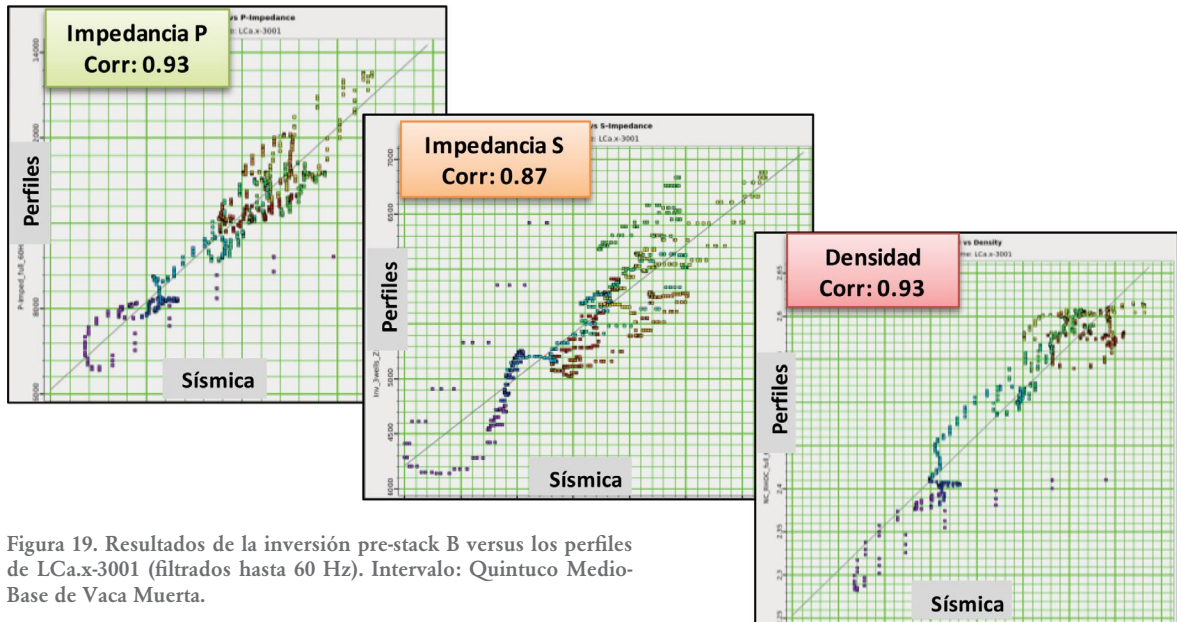


Figura 19. Resultados de la inversión pre-stack B versus los perfiles de LCa.x-3001 (filtrados hasta 60 Hz). Intervalo: Quintuco Medio-Base de Vaca Muerta.

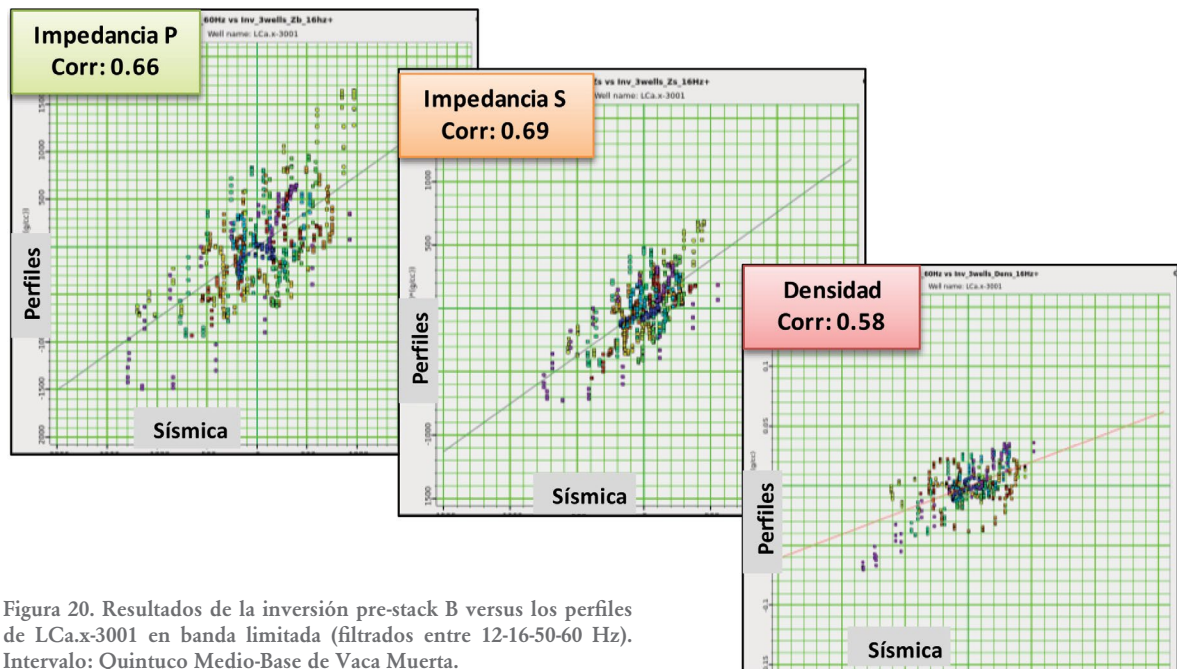


Figura 20. Resultados de la inversión pre-stack B versus los perfiles de LCa.x-3001 en banda limitada (filtrados entre 12-16-50-60 Hz). Intervalo: Quintuco Medio-Base de Vaca Muerta.

correlación con los perfiles existentes y resultaron útiles para predecir propiedades y poblar el modelo 3D de La Calera.

La posterior perforación de un nuevo pozo vertical, con perfiles completos, permitió cotejar los resultados y validó que el mejor producto era el que utilizaba en el modelo la información

de los tres pozos disponibles. De todas formas la elección del número de pozos a utilizar en un modelo de baja frecuencia varía en cada proyecto. En general, al construir el modelo no se recomienda usar todos los pozos disponibles, para poder hacer un control de calidad con pozos ciegos. Este fue un caso particular, donde sólo existían perfiles completos en un pozo y había que optar entre dos soluciones de compromiso. Por ese motivo, la decisión de generar inversiones alternativas y utilizar ambas para manejar las incertidumbres fue lo más conveniente.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a Pluspetrol e YPF la posibilidad de publicar el trabajo y también a Ielca Martinic y Gustavo Vergani su lectura crítica y valiosos aportes.

REFERENCIAS CITADAS

- Brisson, I. y Veiga, 1999, Guía de campo de Cuenca Neuquina, reporte interno de YPF inédito.
- Dominguez, R.F., S. Paulin, M.J. Continanzia, A.D. Askenazi y F.N. Seoane, 2014, "Estratigrafía del intervalo Vaca Muerta-Quintuco en el sector central de la Cuenca Neuquina", Simposio de Recursos No Convencionales, IX° Congreso de Exploración y Desarrollo de Hidrocarburos, IAPG.
- Elias, R., F. Gelin y S. Galeazzi, 2014, "Vertical variabilities in kerogen and fluid composition in the Vaca Muerta Formation unconventional play, Neuquén Basin, Argentina", Simposio de Recursos No Convencionales, IX° Congreso de Exploración y Desarrollo de Hidrocarburos.
- Fantín, M.A. y R.I. González, 2014, "Primeros pasos en la evaluación de la Formación Vaca Muerta como reservorio no convencional en el Bloque El Trapial", Simposio de Recursos No Convencionales. IX° Congreso de Exploración y Desarrollo de Hidrocarburos, IAPG.
- Gading M., L. Wensaas y P. Collins, 2013, "Methods for seismic Sweet Spot Identification, Characterization and Prediction in Shale Plays", URTEC 1581559.
- González G., D. Kietzmann, M. D. Vallejo y R. F. Domínguez, 2016, "Transecta Regional de la Formación Vaca Muerta", libro editado por el Instituto Argentino del Petróleo y Gas (IAPG).
- Legarreta L. y H.J. Villar, 2015, "The Vaca Muerta Formation (Late Jurassic-Early Cretaceous) Neuquén Basin, Argentina: Sequences, Facies and Source Rock Characteristics", URTEC 2170906.
- Legarreta, L. y H.J. Villar, 2012, "Las facies generadoras de hidrocarburos de la Cuenca Neuquina", Petrotecnia, agosto 2012, p. 14-39.
- Legarreta, L. y C.A. Gulisano, 1989, "Análisis estratigráfico de la Cuenca Neuquina. (Triásico superior-Terciario Inferior). Argentina", X° Congreso Geológico Argentino, Simposio Cuencas Sedimentarias Argentinas.
- Reijenstein H. *et al.*, 2017, "Transecta sísmica regional del sistema Vaca Muerta-Quintuco: Interpretación de facies sísmicas basada en impedancia acústica y litofacies dominantes" XX° Congreso Geológico Argentino, Tucumán, Argentina.
- Stinco, L. y S. Barredo, 2014, "Vaca Muerta Formation: an Example of Shale Heterogeneities Controlling Hydrocarbon's Accumulations", URTEC 1922563.