

# Metodología para la Construcción de Modelos de Velocidades de Conversión de Tiempo a Profundidad por Procesos Geoestadísticos en áreas complejas.

Reinaldo J. Viloria, Oil&Gas Optimization (OGO).

## Resumen

Construir un modelo de velocidades es un requerimiento para transformar la interpretación estructural y los datos sísmicos del dominio de tiempo al dominio de profundidad. La calidad de los resultados obtenidos en los flujos de trabajo para caracterizar los yacimientos dependen en parte de la calidad del modelo de velocidades construido y puede incluso afectar directamente los cálculos del hidrocarburo en sitio. Por lo tanto, el modelo de velocidades debe ser construido de tal manera que represente lo mejor posible las variaciones de velocidad lateral y vertical encontradas en el subsuelo. Obtener las velocidades para llevar a cabo esta transformación requiere de procesos especializados y su elaboración puede resultar muy difícil, sobre todo, en áreas estructuralmente complejas que presenten variaciones importantes de las velocidades, tanto en la dirección vertical como en la dirección horizontal.

El presente trabajo tiene como finalidad mostrar una metodología que integra los diferentes tipos de datos que intervienen en la construcción de modelos de velocidades de intervalo para la conversión de tiempo a profundidad, tales como los datos de pozos (VSP, CheckShot, registros sísmicos integrados), las velocidades sísmicas y la interpretación estructural del área como guía para realizar la calibración de las velocidades sísmicas con los pozos, permitiendo así construir un modelo de velocidad de intervalo consistente con el modelo estructural y obtener una mayor precisión en la conversión a profundidad.

## Introducción

La construcción de modelos de velocidades es parte clave en la mayoría de los proyectos para la captura óptima de imágenes y conversión de tiempo a profundidad. Para poder realizar estos proyectos se necesita un mayor conocimiento de los estimados de velocidades que el requerido para la horizontalización y apilamiento de eventos sísmicos. El campo de velocidades obtenido para esto, debe evolucionar a un modelo de velocidades más preciso.

En el caso de modelos de velocidades para conversión de tiempo a profundidad, deben obtenerse niveles de precisión en las velocidades que logren el mejor posicionamiento en profundidad y evite la generación de estructuras ficticias. Para lograrlo, el modelo a generar tiene que integrar toda la información disponible: Geológica (horizontes y fallas que guían las velocidades, litologías, registros de pozo) y datos de velocidades obtenidas de los perfiles sísmicos (VSP, Checkshot, registros sonicos).

Los métodos de conversión de tiempo a profundidad más comunes, usan funciones derivadas de los datos de pozo y pocas veces toman en cuenta las velocidades sísmicas. Sin embargo, los modelos de velocidades construidos de esta manera pierden

precisión cuando se tienen variaciones laterales de velocidades; y precisamente es en este punto, donde la incorporación de las velocidades sísmicas juega un rol fundamental en la construcción de modelos de velocidades. Por tal motivo, en este trabajo se presenta una metodología que toma las velocidades sísmicas de procesamiento como punto de partida para posteriormente calibrarlas con la información de pozos, y de esta manera obtener un modelo robusto y preciso que permita llevar a cabo una mejor conversión de tiempo a profundidad.

## Información para construir un modelo de velocidades de conversión Tiempo-Profundidad.

La metodología aplicada exige un grupo de datos que en general no difiere de cualquier otro proceso para construir un modelo de velocidades. Los datos que se consideran para generar el modelo de velocidades en un área específica se explican a continuación, y como en todo proceso que involucra datos, debe tomarse en cuenta la importancia que tiene su validación previa, lo cual se hace a través de un control de calidad y un análisis estadístico de datos.

**Datos de pozos:** Esto se refiere fundamentalmente a la ubicación espacial de cada punto de la trayectoria de un pozo. En este grupo de datos se incluye las coordenadas de origen o de superficie, la profundidad final, la elevación del terreno, la elevación del “Kelly Bushing” y giroscopio en caso de pozos direccionales.

**Curvas TZ:** Comúnmente el intérprete genera una curva tiempo profundidad que es extraída luego de la creación de un sismograma sintético (Calibración Sísmica-Pozo). Algunas veces se aplica una curva de un pozo a otro que no la posee, sin embargo en estos casos, hay que asegurarse de tener un buen ajuste con las superficies que marcan los cambios importantes de velocidades, ya que en caso contrario, podría influir negativamente en el resultado final. Con estas curvas TZ se calculan las velocidades interválicas en los pozos, que luego son comparadas con las velocidades interválicas provenientes de la sísmica en la trayectoria del pozo, y es así como se definen las diferencias entre ambas velocidades.

**Volumen Sísmico:** El volumen de amplitudes se usa con el propósito de realizar un control de calidad a los horizontes y fallas interpretados. Este control detecta las posibles inconsistencias en la interpretación que pueden impactar negativamente en la construcción del modelo. Adicionalmente, sirve de guía para honrar la interpretación original cuando se realiza el modelo estructural; de esta manera, se evita la edición incorrecta de las superficies y contactos entre ellas ya sean fallas u horizontes.

**Cimas estratigráficas en cada pozo:** Esta metodología se fundamenta en la creación de regiones que se generan en forma continua a lo largo de cada pozo, usando como límites las cimas

que definen zonas con cambios importantes de velocidades. Aun cuando estos marcadores no estén asociados a eventos geológicos específicos, deben ser incluidos. También se incluyen para la construcción del modelo, las cimas geológicas dentro de la secuencia estratigráfica formal del área de estudio u horizontes de interés comercial.

**Horizontes y fallas interpretados:** La utilidad que tienen las cimas geológicas para crear las regiones en los pozos es la misma que tienen los horizontes para crear las regiones en el volumen de interés donde se construirá el modelo de velocidades. Es importante resaltar que cada superficie utilizada para crear las regiones en el volumen de interés, debe tener su equivalente cima asociada. Esto significa que el valor del tiempo doble en las superficies debe aproximarse lo más posible al valor de tiempo doble del marcador asociado en el pozo. Si lo anterior no se cumple, los datos en profundidad que se obtengan luego de la conversión una vez construido el modelo, no honrarán los datos en profundidad de las cimas geológicas de los pozos, dándole poca confiabilidad al modelo. Por su parte las fallas junto a los horizontes interpretados permiten generar el modelo estructural del área de estudio y por ende la geometría que guiarán a las velocidades a calibrar.

**Funciones de Velocidades:** Las funciones de velocidades requeridas para construir el modelo, pueden ser suministradas en RMS, su equivalente interválicas o promedios. Es importante disponer de todas las versiones que hayan sido procesadas en el mismo volumen interpretado. Sin embargo, la primera que se debe analizar es la que corresponde a la versión del volumen sísmico usado para la interpretación. Con esta metodología todas las versiones son consideradas y estadísticamente analizadas. Al final se selecciona la que mejor reproduzca la información de los pozos.

**Información geológica del área:** Como en todo estudio, los antecedentes geológicos deben ser indiscutiblemente incluidos. Conocer los estilos estructurales, la secuencia estratigráfica y los ambientes sedimentarios identificados, permite entender los eventos anómalos de velocidades presentes en la secuencia estratigráfica del área de estudio y considerarlos en la construcción del modelo de velocidades.

## Metodología.

La metodología propuesta para construir un modelo de velocidades para conversión tiempo profundidad se presenta a continuación:

**Modelado Estructural:** Partiendo de la información de las fallas y los horizontes interpretados, se construye el modelo estructural del área. Para esto, se generan los planos de las fallas, se identifican las fallas principales y se proponen los contactos falla-falla, *Fig. 1*. Posteriormente se procede a modelar los horizontes, se cortan con las fallas previamente modeladas y se procede al modelado del desplazamiento de las fallas, *Fig. 2*.

**Construcción de la geometría:** La metodología para la calibración de las velocidades sísmicas se basa en velocidades interválicas por regiones, de allí la importancia dentro del flujo de trabajo de la definición y elaboración de estas regiones

dentro del volumen donde se calibrarán las velocidades sísmicas. Esta etapa de la metodología es conocida con el nombre de construcción de la geometría y tiene como objetivo identificar, para cada superficie interpretada, características como: Continuidad, erosiones, acuíñamientos, cabalgamientos, fallas, entre otros, que deben ser consideradas para generar superficies totalmente cerradas, las cuales servirán de entrada para la creación de las regiones en el volumen de interés. *Fig. 3*.

**Construcción de Regiones:** Esto significa que el volumen es dividido en subvolúmenes llamados "REGIONES" limitadas por las superficies. De igual manera las cimas asociadas a los horizontes limitan las regiones que se crean en los pozos. La construcción de estas regiones tanto en los pozos como en el volumen, permite realizar un análisis estadístico exhaustivo de las velocidades interválicas en cada región. Este análisis muestra con exactitud según su nivel estratigráfico, los valores de las velocidades interválicas presentes tanto en el volumen como en los pozos. *Figuras 4 y 5*. Se debe tomar en cuenta que algunas superficies que son requeridas para la construcción de un modelo, no necesariamente están asociadas a la cima o base de un evento estratigráfico o geológico en general. El criterio aplicado está fundamentado en incluir principalmente, las superficies que demarcan un cambio importante de velocidad. La *Fig. 6*, muestra diferentes "crossline" donde se puede apreciar la complejidad estructural que se puede manejar en esta metodología. Otro enfoque que puede darse a la metodología propuesta en este nivel, es la construcción de mallas 3D, independientes asociadas a cada nivel estratigráfico interpretado. Estas mallas 3D, actúan similar a las regiones, con la diferencia que en las regiones la interpolación tiende a ser horizontal, mientras que en las mallas la interpolación sigue la forma de la estratigrafía, mejorando considerablemente los resultados en zonas complejas.

Adicionalmente, la construcción de modelos de velocidades por regiones permite insertar volúmenes individuales de cuerpos con velocidades anómalas como pueden ser depósitos de arcilla y/o diapiros; y en general, cualquier forma volumétrica que pueda ser claramente interpretada. *Fig 6.1*.

**Intercepción de los pozos con los cubos de velocidades:** Las funciones de velocidades que originalmente son suministradas en RMS, son transformadas a velocidades interválicas aplicando las ecuaciones de "DIX", *Fig. 7*. Usando las dimensiones del volumen sísmico, se crea un "Voxel" a la resolución requerida para el modelo de velocidades y luego se "Pinta" o rellena con las funciones de velocidades previamente transformadas. Por último, se interpolan las velocidades y se aplica un filtro de suavizado dentro de este "Voxel", generando tantos volúmenes como versiones de velocidades se disponga. Una vez que cada volumen de velocidades se ha interpolado y suavizado, se interceptan las trayectorias de los pozos con cada volumen de velocidades interválicas disponible. Los datos obtenidos de estas intercepciones se comparan con las velocidades calculadas en los pozos a partir de las curvas tiempo profundidad generadas de los sismogramas sintéticos durante la calibración sísmica-pozo. Esta comparación se hace en el dominio tiempo, *Fig 8*, por lo que es necesario pasar los

datos de pozos de profundidad a tiempo antes de la comparación.

**Cálculo del factor de corrección:** Utilizando las TZ's se calculan las velocidades interválicas en cada pozo y se calcula el cociente entre las velocidades interválicas de los pozos y las velocidades interválicas sísmicas interceptadas por los pozos en el volumen previamente seleccionado, a este cociente es llamado, factor de corrección.. Haciendo un análisis estadístico detallado de este factor de corrección, se determina dentro de cada región el porcentaje de corrección que debe aplicarse para calibrar las velocidades interválicas sísmicas con los pozos. De este análisis se deduce si el proceso de calibración se hará en una o dos etapas. La calibración en dos etapas, se hace sí la diferencia entre las velocidades sísmicas y la de los pozos es significativa y su calibración en una etapa genera artefactos cerca de los pozos. Si este fuera el escenario, la metodología propone realizar un análisis estadístico global por región y estimar un factor de corrección global por cada nivel estratigráfico que permita acercar las velocidades sísmicas a la de los pozos, **Fig. 9**; generando de esta manera un volumen de velocidades sísmicas intermedio, semicalibrado, **Fig. 10**. Una vez completada esta etapa el nuevo volumen de velocidades sísmicas corregido globalmente por regiones, es interceptado con los pozos, **Fig. 11**. Se calcula nuevamente el factor de corrección tomando las velocidades con la corrección global y los pozos. Este nuevo factor de corrección será la información condicionante para generar un factor de corrección 3D, que permitirá calibrar finalmente las velocidades sísmicas con los pozos.

**Análisis de continuidad espacial:** Para cada región definida en los pozos, se realiza un análisis de continuidad espacial (variogramas) del factor de corrección y se ajusta cada variograma experimental con un modelo teórico.

**Interpolación del factor de corrección:** Con el fin de realizar una interpolación exacta se aplica un Kriging simple dentro de cada región con el fin de obtener un volumen 3D del factor de corrección, **Fig. 12**.

**Calibración final con los pozos por TZ's:** Para la calibración final de las velocidades interválicas sísmicas con la de los pozos, se multiplica el volumen de velocidades interválicas o el corregido globalmente, si el volumen de velocidades sísmicas original fue corregido globalmente, por el volumen con el factor de corrección 3D estimado con la técnica de Kriging, **Fig 13**.

La **Fig. 14** muestra como el modelo de velocidades final calibra con los pozos y honra la interpretación estructural.

**Conversión de tiempo a profundidad:** Las velocidades interválicas calibradas finales son convertidas a velocidades promedios, permitiendo llevar a cabo la conversión a profundidad de los horizontes, fallas y el volumen sísmico, **Fig 15**.

## Conclusiones

La metodología presentada en este trabajo muestra una manera novedosa de construir modelos de velocidades para la conversión de tiempo a profundidad integrando de manera eficiente la información geológica y de velocidades existentes.

Los modelos de velocidades construidos con esta metodología son de mayor precisión y permite estimar con mayor certidumbre la ubicación en profundidad de los yacimientos.

Esta metodología puede aplicarse sin limitaciones en cualquier tipo de regimen estructural, y/o zonas con tectónica salina o con diapiros de arcilla.

Esta metodología permite construir un modelo de velocidades unificado, donde los datos sísmicos, planos de fallas y superficies estructurales interpretadas son convertidos a profundidad en conjunto.

## Agradecimiento

El autor le da las gracias a la empresa Oil&Gas Optimization (OGO), por permitir la publicación del presente trabajo.

## Referencias

1. Etienne Robein.: "Velocities, Time-Imaging and Depth-Imaging in Reflection Seismics. Principles and Methods", EAGE Publications, The Netherlands (2003) 464.
2. Phil Schultz.: "The Seismic Velocity Model as an Interpretation Asset", EAGE Publications (2000).
3. Journel, A.G., and Huijbregts, Ch. J.: *Mining Geostatistics*, Academic Press, New York (1978) 600.
4. Clayton Deutsch.: "Geostatistical Reservoir Modeling", Oxford University Press (2002), 376.
5. Armstrong, M.: "Improving the Estimation and Modeling of the Variogram," *Geostatistics for Natural Resources Characterization*, G. Verly et al. (eds.), Reidel, Dordrecht (1984) 1, 585.
6. Olea, R. A.: "Fundamentals of Semivariogram Estimation, Modeling, and Usage," *Stochastic Modeling and Geostatistics: Principles, Methods, and Case Studies*, J. M. Yarus and R. L. Chambers (eds.), AAPG Computer Applications in Geology, Tulsa (1995) No. 3, 369.
7. Goovaerts, P.: *Geostatistics for Natural Resources Evaluation*, Oxford University Press, New York (1998) 483.

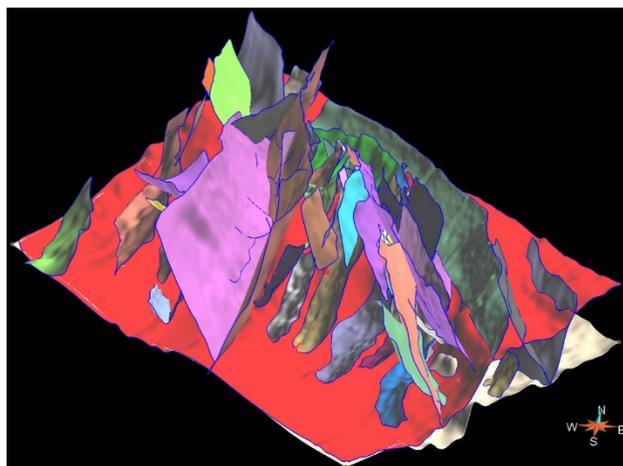


Fig. 1: Modelaje de Fallas

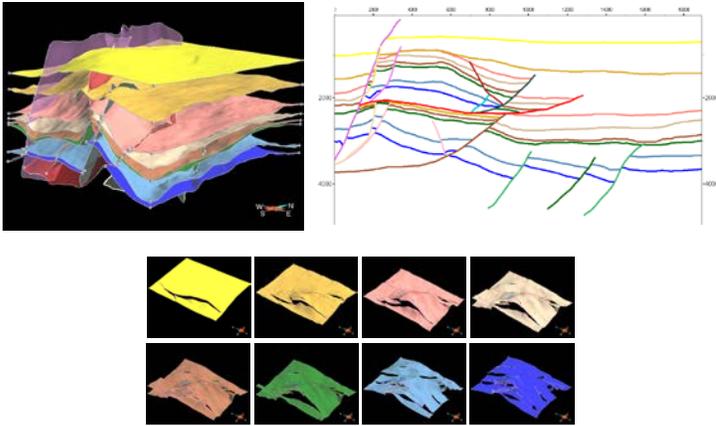


Fig. 2: Modelado Estructural, con horizontes interpretados que marcan los mayores cambios de velocidades. A la derecha una sección Oeste-Este donde se aprecia la complejidad estructural modelada.

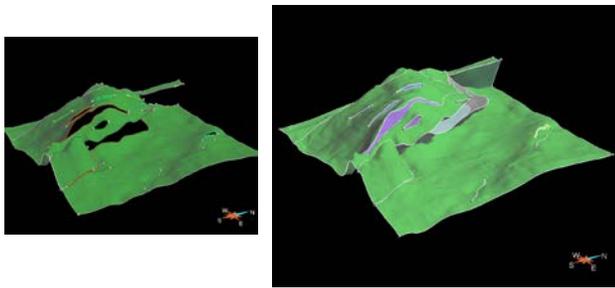


Fig. 3: A la izquierda la superficie resultante del modelado estructural de un nivel estratigráfico y a la derecha la superficie que define la geometría completamente cerrada. Este proceso es repetido para cada horizonte interpretado.

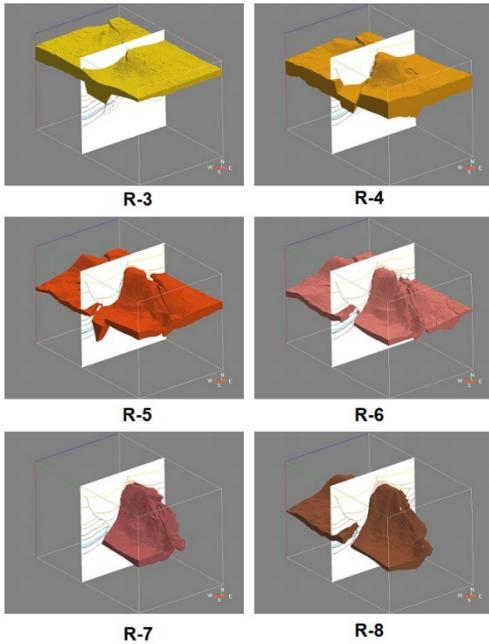


Fig. 4: A partir de las superficies de las geometrías generadas se procede a crear las regiones en el volumen de interés.

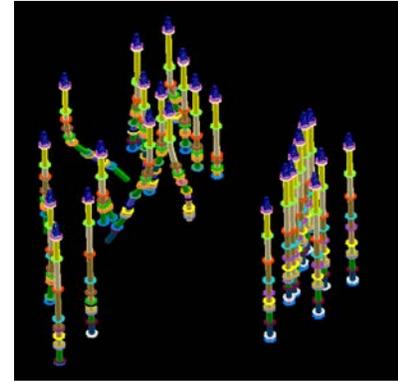


Fig. 5: Regiones en pozos construidas con las cimas geológicas.

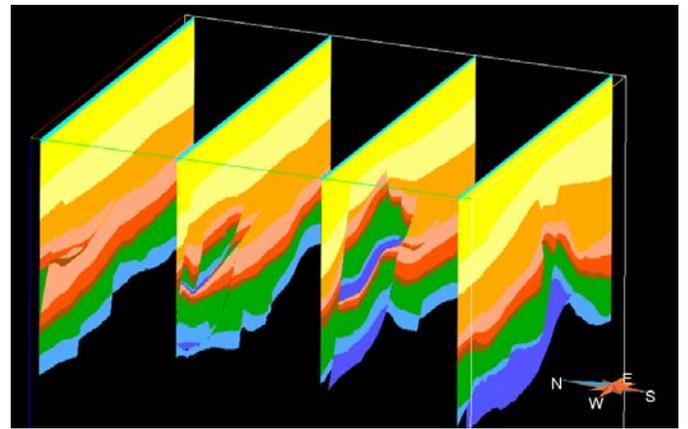


Fig. 6: Secciones Oeste-Este Mostrando las subdivisiones estratigráficas del volumen donde se calibrarán las velocidades sísmicas.

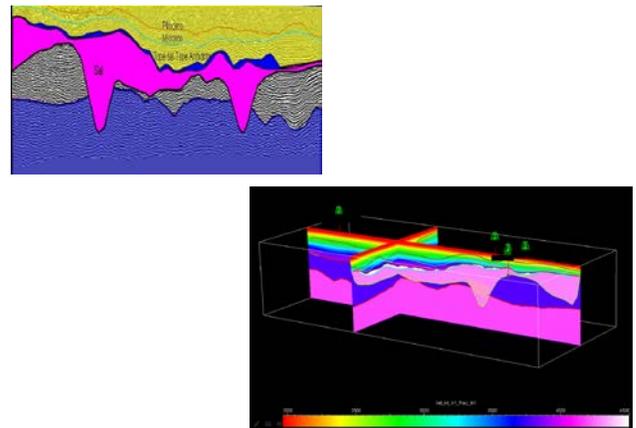


Fig. 6.1: Inserción de la sal respetando su geometría

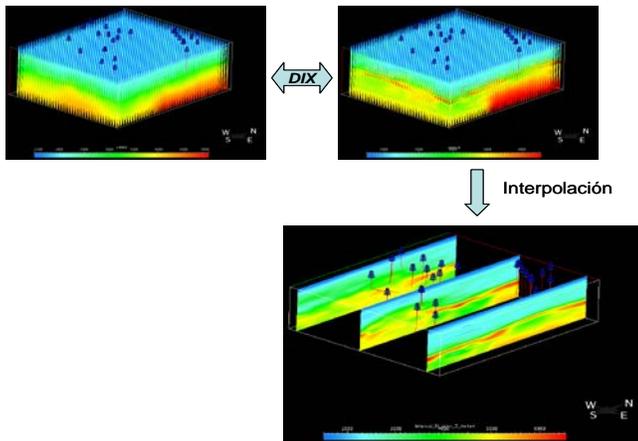


Fig. 7: Funciones de Velocidades VRMS (a la izquierda), funciones de velocidades interválticas transformadas por DIX (a la derecha) y volumen pintado con las velocidades sísmicas interválticas.

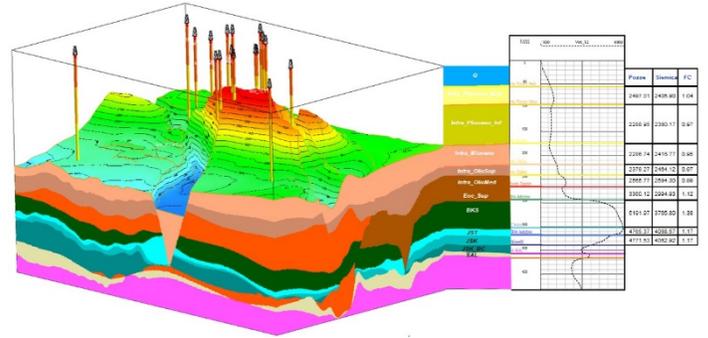


Fig. 5: Cálculo de la velocidad interváltica global por región y del factor de corrección global, para acercar las velocidades sísmicas a la de los pozos.

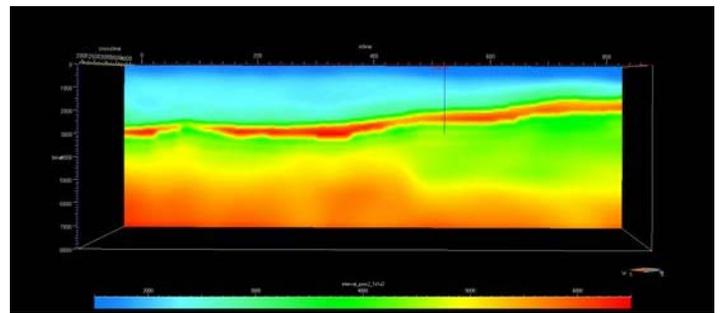


Fig. 6: Velocidades Interválticas, se observa mejor continuidad lateral de las velocidades sísmicas en el nivel de toda la secuencia cretácica (Banda de color rojo), después de aplicar el factor de corrección global por región.

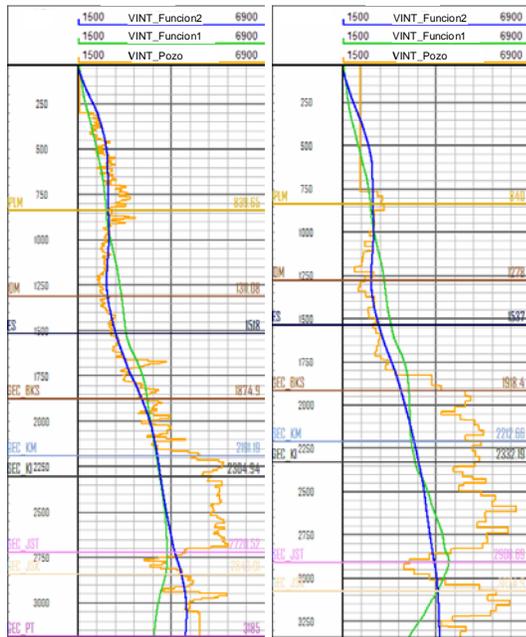


Fig. 8: Velocidades Sísmicas Interválticas y de los Pozos 1 y 2 (SISMICA-1 Línea Verde, SISMICA-2 Línea Azul y POZO Línea Naranja).

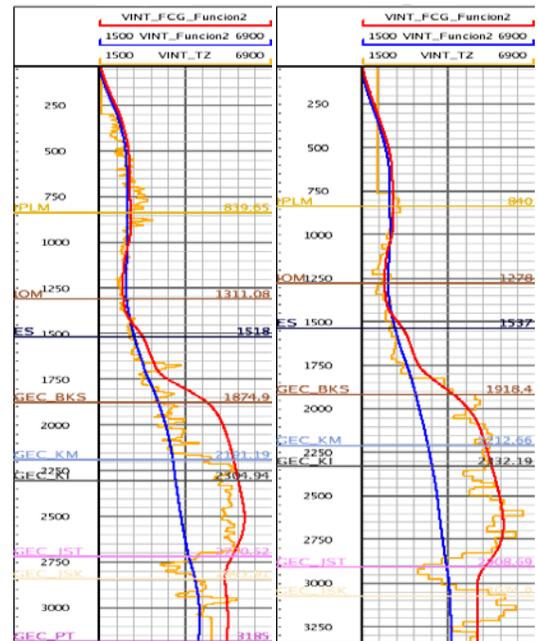


Fig. 11: Velocidades Sísmicas Interválticas y de los Pozos 1 y Pozos 2 (SISMICA-2 Línea Azul, SISMICA-2 corregida globalmente Línea Roja y POZO Línea Naranja).

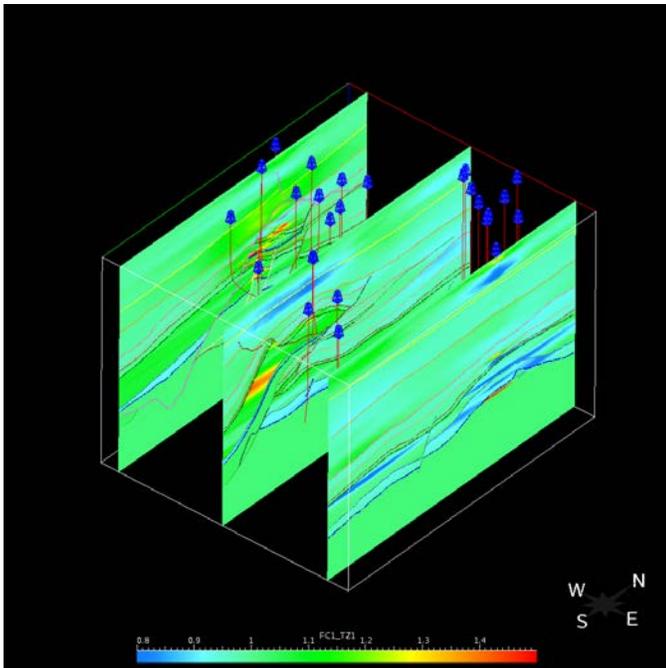


Fig. 7: Factor de corrección 3D calculado por regiones.

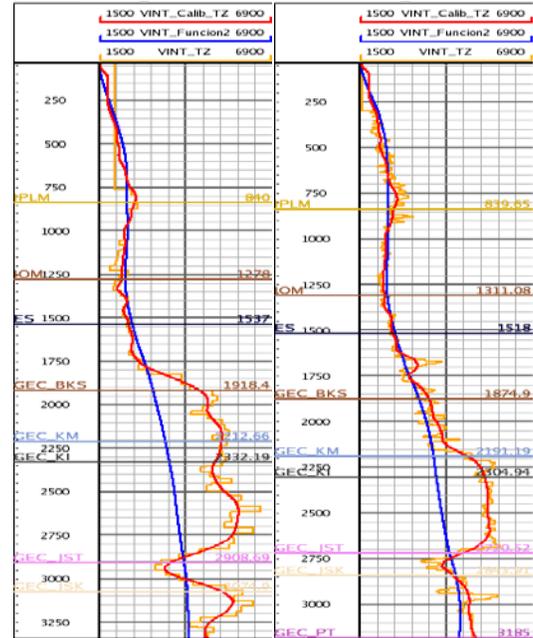


Fig. 14: Velocidades Sísmicas Interválicas Calibradas y de los Pozos 1 y Pozos 2 (SISMICA-2 Línea Azul, SISMICA-2 calibrada Línea Roja y POZO Línea Naranja).

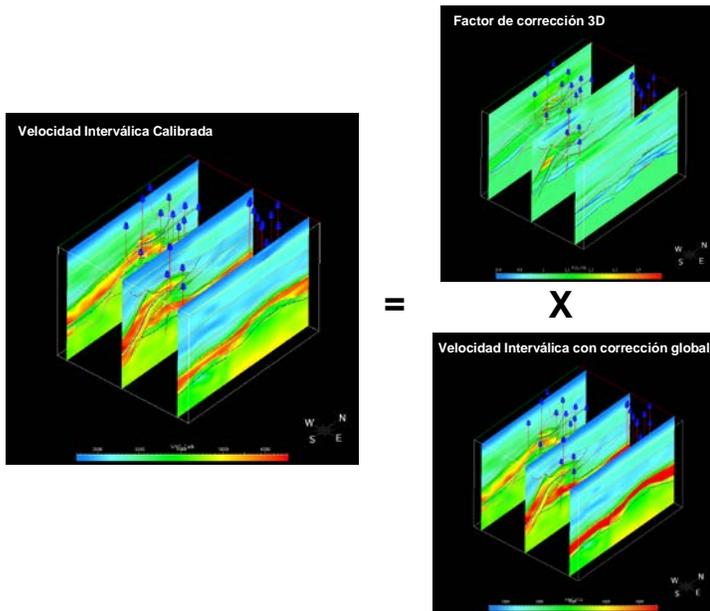


Fig. 13: Calibración Final de las velocidades Interválicas sísmicas con las velocidades interválicas de los pozos.

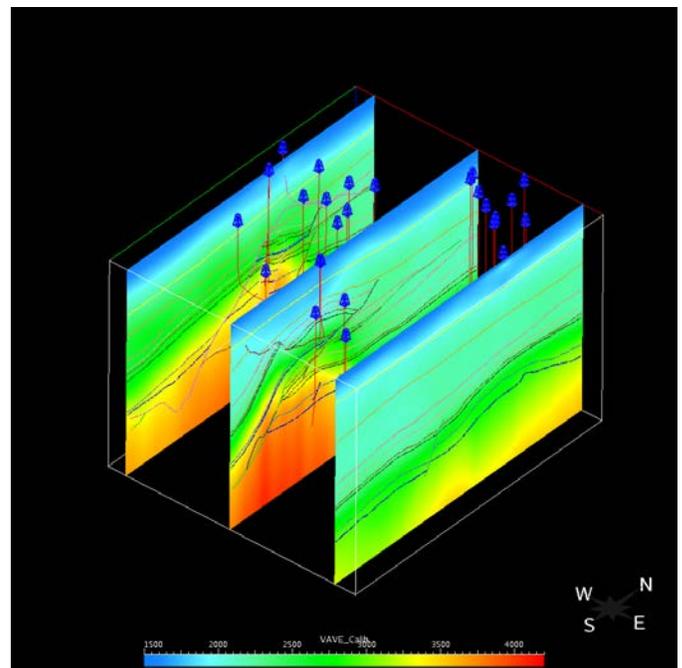


Fig. 15: Modelo de velocidad promedio calibrado con los pozos.