

EVOLUCIÓN ESTRUCTURAL Y ANÁLISIS DE SELLO DE FALLAS DE UN PROSPECTO EXPLORATORIO COSTA AFUERA, CUENCA COLORADO MARINA

Ofelia Silio¹, Ramiro López², Sebastián Arismendi³, Néstor Bolatti⁴

1: YPF S.A., ofelia.silio@ypf.com

2: YPF S.A., ramiro.lopez@ypf.com

3: YPF S.A., sebastian.arismendi@ypf.com

4: YPF S.A., nestor.bolatti@ypf.com

Palabras clave: Sello de fallas, yuxtaposición, shale gouge ratio, Cuenca Colorado Marina

ABSTRACT

The aim of this work is to carry out a fault seal analysis for an exploratory frontier prospect located in the external area of the Colorado Marine Basin, offshore Argentina. The area is covered by 3D seismic, to date without any wildcats for calibration. The prospect involves shallow marine sandstone reservoirs in a combined structural/stratigraphic closure. In this context, the sealing capacity of the fault would control this plane acting as a hydrocarbon leaking or sealing plane. Juxtaposition maps showed that reservoirs do not overlap in the fault closure, preventing leakage of hydrocarbons across the plane. Secondly, the last reactivation of the fault would have occurred during the Eocene and could have contributed to the remigration of trapped fluids. However, from the Eocene to the present, the risk of remigration is low since no other recent reactivation pulses have been observed. Thirdly, fluid leakage would have been diminished by the high clay content in the fault planes (SGR), which would give them low permeability. Finally, by varying the parameters in the maximum and minimum scenarios, it was observed that the fault would represent a sealing plane at both ends, so this study allows us to estimate that the main fault could act as an effective trap closure element.

INTRODUCCIÓN

El Prospecto en estudio investigará barras arenosas litorales de edad Cretácica superior (Turoniano y Albiano), en la Cuenca Colorado Marina (Fig. 1a). La zona de estudio se encuentra a unos 300 km de la localidad de Mar del Plata, en el cubo sísmico del Bloque CAN_100 (Fig. 1b), en el cual no existe ningún pozo perforado hasta el momento. Este Bloque se encuentra operado por la empresa noruega Equinor, en sociedad con YPF S.A. y Shell. La trampa del prospecto está conformada por un cierre estructural/estratigráfico en tres dimensiones, sumado a un cuarto cierre contra falla (Fig. 1c). Por este motivo, las propiedades sellantes o permeables de dichos planos determinarán la efectividad de la trampa, causando la acumulación o fuga de los hidrocarburos.

Una misma falla posee diferentes capacidades sellantes a lo largo y a lo alto del plano, dependiendo de las litologías que afecta, la magnitud del desplazamiento y los pulsos de actividad de la estructura. Por este motivo los análisis de sello de falla son relevantes para la definición de zonas eficientes de entrapamiento o vías de migración, en especial cuando se realizan en tres dimensiones. Los Diagramas de Allan (Allan, 1989) fueron la primera técnica para explorar la yuxtaposición de unidades (rocas de caja) permeables a ambos lados de las fallas e identificar zonas de migración. Posteriormente se incorporó el análisis de las propiedades de las rocas de fallas como controladores de la permeabilidad de los planos, a través del cálculo de *Shale Gouge Ratio* (SGR, Yielding *et al.* 1997), *Shale Smear Factor* (SSF; Lindsay *et al.* 1993) y/o *Effective Shale Gouge Ratio* (ESGR, Jolley *et al.* 2007), entre otros. Estos son factores que predicen el contenido de arcillas en los planos de fallas, por mezcla y deformación dúctil de fangolitas durante el fallamiento (Knai y Knipe 1998; Manzocchi *et al.* 1999, 2000; Yielding 2002; Jolley *et al.* 2007), incluso cuando las unidades de caja yuxtapuestas sean arenosas. Más adelante ambos factores fueron combinados desde un punto de vista evolutivo, por lo que la historia de soterramiento, desarrollo y reactivación de las fallas, momentos de generación y expulsión del hidrocarburo fueron incorporados a los modelos (Fisher *et al.* 2002; Sperrevik *et al.* 2000; Freeman *et al.* 2008). Diferentes regímenes tectónicos y campos de stress regionales y locales pueden afectar al comportamiento de los planos de fallas (Karslen y Skeie, 2006) y cada una de las reactivaciones de las estructuras puede dar lugar a la remigración de los hidrocarburos acumulados (Xu *et al.* 2016).

En el presente caso de estudio un análisis de sello realizado en Petrel® permitió modelar el comportamiento de las fallas en tres dimensiones, considerando las diferentes yuxtaposiciones de unidades, así como también la litología de las rocas circundantes y las propiedades de los planos de fractura. En segundo lugar, la evolución geológica de la región fue tomada en cuenta, a fin de identificar los pulsos de reactivación de las fallas principales. En conclusión, el impacto de este proyecto consistió en reducir una de las principales incertidumbres asociadas al rol de las fallas cercanas al pozo propuesto, factor crítico para el éxito del proyecto.

CONTEXTO GEOLÓGICO Y ESTRUCTURAL

El área de estudio (Fig. 1a) se ubica sobre el Alto Externo de Colorado, una estructura positiva sobre corteza continental que constituye el límite entre la cuenca E-O del Colorado (*rift* y *Sag*) de la cuenca Argentina desarrollada sobre corteza oceánica (Gerster *et al.*, 2011).

La columna estratigráfica de la Figura 2 representa el registro geológico preservado en el área de estudio. La evolución geológica de la zona (Lovecchio *et al.*, 2018, 2020) comienza con el desarrollo de cuencas intracratónicas durante el Triásico y Jurásico, enmarcadas en un basamento de edad paleozoica tardía (Pángaro & Ramos, 2012; Pángaro *et al.*, 2016). Este evento

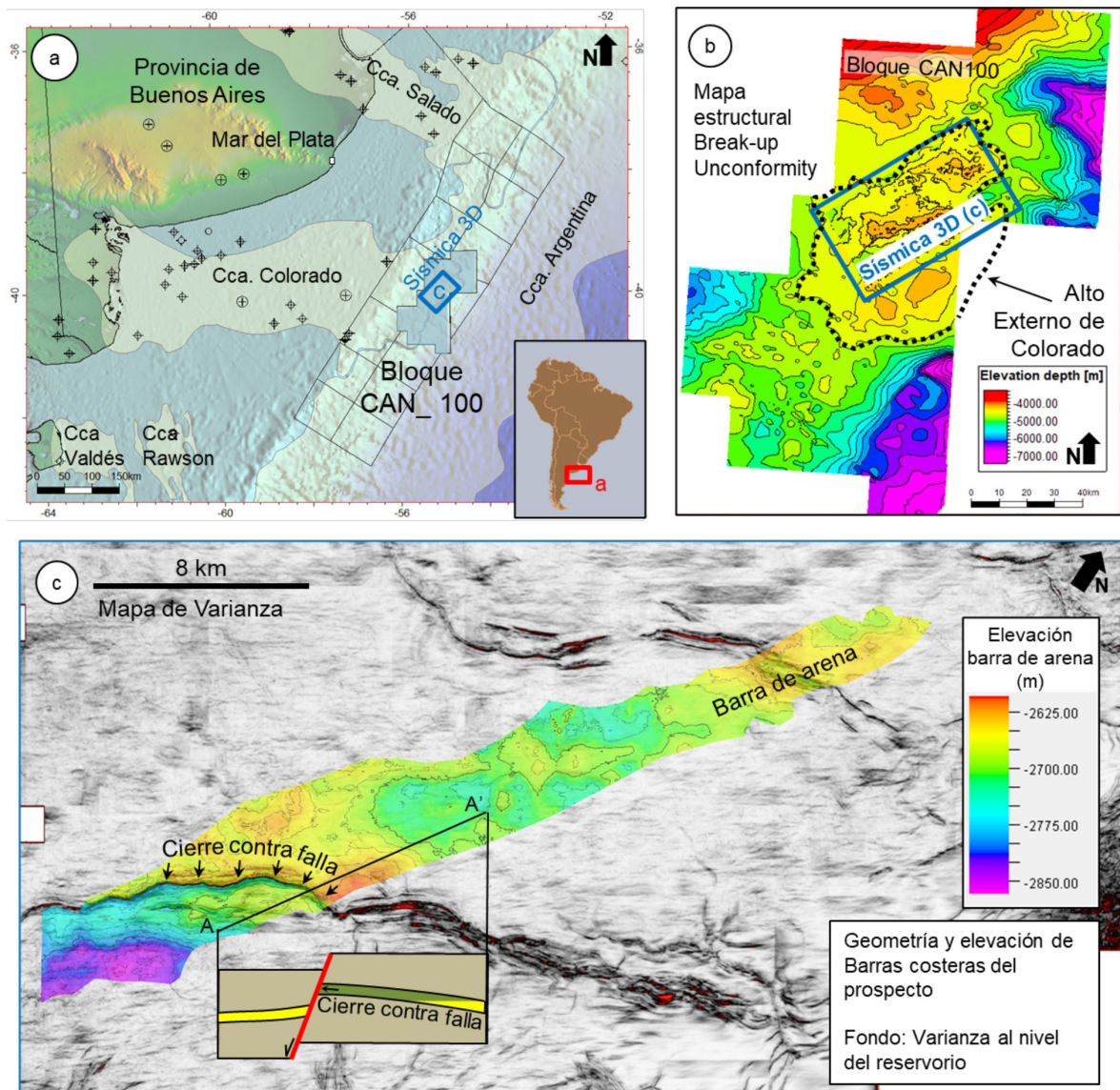


Figura 1. a. Ubicación de la zona de estudio, en el Bloque CAN_100. Los puntos representan las perforaciones, aunque no existen pozos cercanos al área de estudio. b. Mapa estructural de la breakup unconformity del Bloque CAN_100 en profundidad, donde se observa el alto externo de la Cuenca de Colorado, iluminado por sísmica 3D. c. Depth slice con atributo de Varianza al nivel del reservorio. En colores se observa el mapa estructural de la barra de arena (objetivo reservorio primario). Nótese el cierre estructural en 3 direcciones y el cuarto cierre contra la falla, representado por el esquema A-A'.

extensivo en dirección N-S generó grandes fallamientos en sentido E-O y posterior NO-SE y cuencas de syn-rift de ambiente continental (Lovecchio *et al.*, 2018, 2020).

Durante el Hauteriviano-Barremiano ocurrió la ruptura continental de Gondwana con un régimen extensional E-O, lo que generó un fallamiento normal N-S y extensas zonas de fracturas E-O entre América y África con desplazamientos laterales (Hälbich, 1983; Hansma *et al.*, 2016). El atenuamiento cortical que precedió la apertura continental produjo eventos efusivos de grandes magnitudes, durante los cuales se formaron los depósitos volcánicos conocidos como

Seaward Deeping Reflectos (SDRs, por su clara expresión en el registro sísmico, Gladczenko *et al.*, 1997; Hinz, 1981; Hinz *et al.*, 1999; Paton *et al.*, 2017; and Stica *et al.*, 2014), que constituyen la zona transicional entre la corteza continental y la nueva corteza oceánica. En esta etapa se originó el Océano Atlántico con una restringida distribución y profundidad (Nürnberg & Müller, 1991) y se depositó la principal roca generadora marina de la zona que, en base a las correlaciones con el margen conjugado africano tendría una edad Barremiano-Aptiana. A partir de este momento y durante el Cretácico superior, la zona de estudio quedó dominada por un régimen de margen pasivo con sucesivos eventos transgresivos-regresivos sobre los que no se posee precisión cronológica por la ausencia de perforaciones (Kress *et al.*, 2021). Sin embargo, el registro sísmico muestra una compleja interacción de discordancias y clinoformas progradantes que contrastan con las transgresiones regionales. Uno de estos eventos regresivos ocurrió durante tiempos cercanos al Turoniano, por lo que en la ubicación del alto externo de Colorado se depositaron barras de arena litorales asociadas a sistemas fluviales costeros. Dicho sistema se corresponde con uno de los principales reservorios que el prospecto en estudio evaluará.

Posteriormente, en el Maastrichtiano-Daniano, durante lo que se denomina informalmente como NTK (*Near Top Cretaceous*) se produjo una discordancia regional seguida de una gran transgresión marina que alcanzó gran parte del actual territorio emergido de Argentina. En el área de estudio, este evento cubrió con sedimentos finos de mar profundo la zona del alto externo de Colorado, depósitos que constituyen el principal sello regional del área.

Desde el punto de vista estructural regional, las fallas normales constituyen las estructuras principales y se encuentran agrupadas en cuatro conjuntos. El primer grupo posee una orientación E-O y data del Triásico *pre-rifting* (*set 1*). El segundo posee una orientación NO-SE (*set 2*) y se asocia al máximo desarrollo de la Cuenca de Colorado durante el Jurásico. El tercero y cuarto consisten en un grupo de fallas normales de orientación NE-SO (*set 3*) y zonas de fractura de orientación E-O respectivamente (*set 4*), relacionadas a la ruptura continental de Gondwana y apertura del Océano Atlántico (Lovecchio *et al.*, 2018, 2020). Desde el punto de vista local, en el área de estudio del presente trabajo tiene mayor expresión el *set 3* de fallas (NE-SO) y es una de éstas la que proporciona el cuarto cierre contra falla del prospecto. Por este motivo, se ampliará el detalle de la evolución de las mismas.

DATOS Y METODOLOGÍA

El proyecto se llevó a cabo construyendo un modelo estructural con el cubo sísmico 3D migrado en tiempo (*pre-stack*) del Bloque CAN_100 (Fig. 1). El mismo posee un área de 2000 km² (IL: 66 km de longitud y XL: 36 km de longitud) y fue adquirido en el año 2006. La polaridad para la visualización de los datos sísmicos es la adoptada por la SEG (en fase cero,

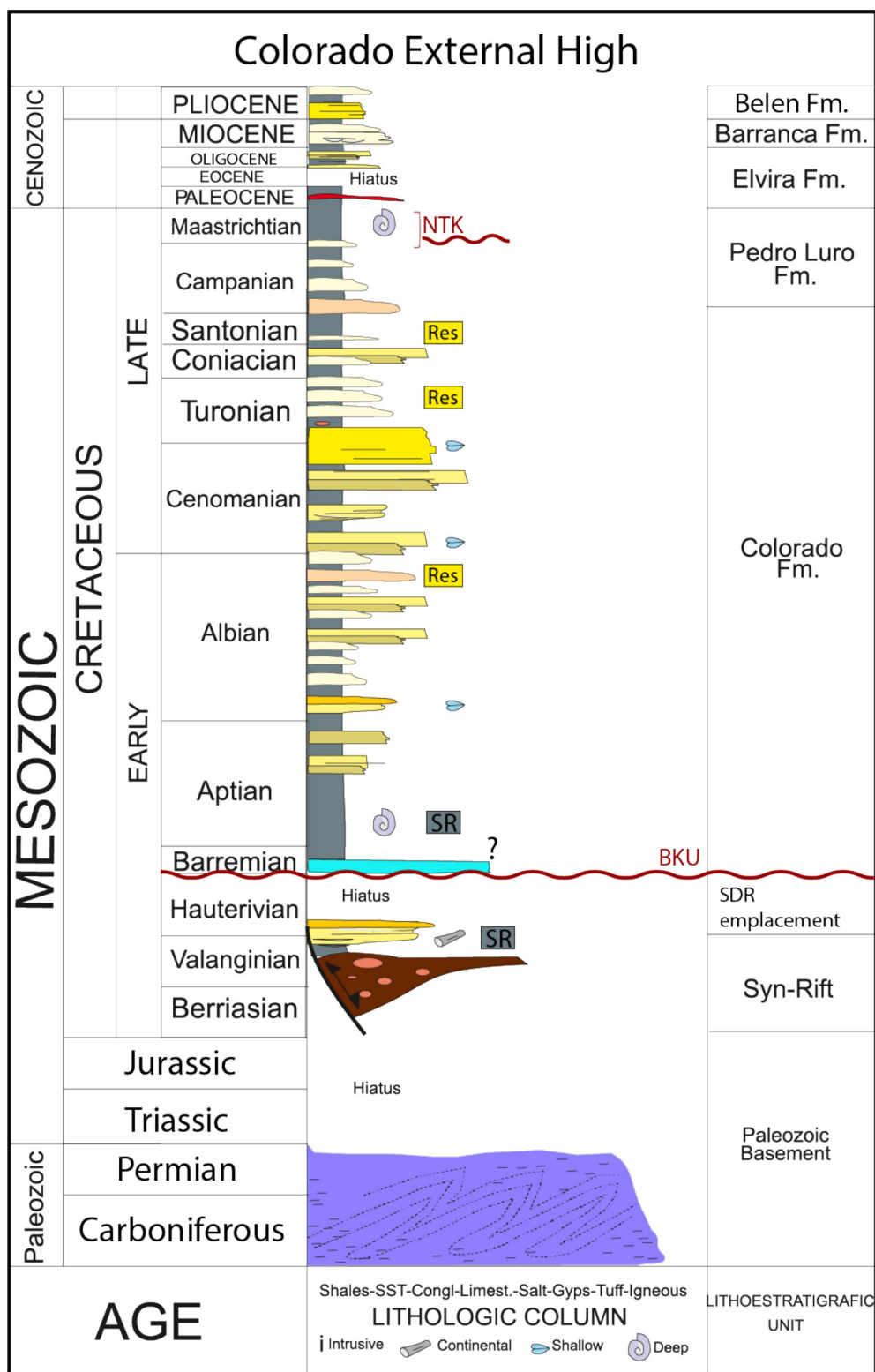


Figura 2. Columna estratigráfica esquemática que muestra las unidades preservadas en la zona de estudio. La columna es representativa para el sector del alto externo de Colorado, límite este de la Cuenca de Colorado Marina. El prospecto en estudio cuenta con una roca madre generadora (SR) de la primera transgresión del Océano Atlántico y un reservorio (Res) convencional depositado durante la regresión Turoniana. Adaptado de la columna representativa del depocentro principal de Colorado en Rojas Vera *et al.* (2022).

un incremento en impedancia acústica tiene polaridad positiva y se muestra como un pico de color azul). La conversión a profundidad se realizó con un modelo de velocidades 3D de procesamiento y se obtuvo una resolución vertical de unos 25-30 m para los niveles de interés.

Para construir el modelo tridimensional en profundidad que cubre todo el cubo, se utilizó el Módulo de Structural Modeling del Software Petrel® v.2017 (Schlumberger), con el método de Pillar Gridding. El tamaño de celda elegido fue de 300x300 m ya que permitió captar las geometrías principales sin complejizar la aplicación de los algoritmos. Se modelaron las fallas principales (se eliminaron fallas pequeñas y aisladas) y los nueve horizontes principales (Seabed, Mioceno, NTK, Campaniano, Santoniano, Turoniano, Albiano, Aptiano, BKU, Fig. 3). Por último, se realizó un layering contemplando las características geológicas de cada intervalo, en especial los contactos conformantes y discordantes.

Para obtener los datos litológicos, se utilizó el trabajo previo del Equipo de Exploración Offshore de YPF que constituye la evaluación estratigráfica y sedimentológica de los reservorios (Arismendi *et al.* 2019). Si bien dichos resultados no son el objetivo de este trabajo, el estudio incluye la extrapolación de las edades estimadas desde los pozos perforados en plataforma somera en el oeste, hacia la zona de estudio en el este, utilizando sísmica 2D. De esta manera se obtuvieron edades estimadas en el cubo 3D del Alto externo de Colorado, que posteriormente fueron asignadas a los eventos geológicos principales, determinados mediante sismoestratigrafía, identificación de secuencias y megasecuencias. Esto permitió restringir el ambiente de depositación para cada edad y se procedió a la detección de geoformas utilizando atributos sísmicos, siendo el blending de composición espectral y amplitudes RMS (*root mean square*) los que mejor definición arrojaron. Asociando la edad, el ambiente de depositación, la respuesta a atributos, la orientación y geometría, se identificaron estos cuerpos interpretados como barras arenosas litorales de ambiente marino somero.

Para poblar el modelo con datos litológicos y propiedades petrofísicas, se clasificó el volumen sísmico en sismofacies, calculadas a partir de rangos de amplitudes (Fig. 3). Se utilizó la amplitud ya que mostró buena correlación con la ubicación de las barras arenosas, su orientación y espesor, ya conocidos con estudios previos. Para ello se asignaron los *cutt-offs* que mejor representaran los niveles reservorios, asumiendo que los niveles más transparentes (amplitudes entre 0 - $\pm 0,8$) corresponderían a litologías más pelíticas con un Vsh aproximado de 60%, mientras que las amplitudes mayores (entre $\pm 0,8$ y $\pm 3,5$) podrían ser litologías más arenosas con un Vsh de alrededor del 15%. Finalmente, las amplitudes mayores a ± 4 no fueron incluidas, ya que posiblemente se trate de contrastes contra el basamento, litologías más duras (ígneas o carbonáticas), efectos de fluidos o artefactos de la sísmica. El resultado es el modelo tridimensional poblado con las dos litologías predominantes, sus propiedades petrofísicas y las fallas principales (Fig. 3). Se observó que esta clasificación captura la morfología de las barras arenosas de sentido NNE-SSO, que constituyen el reservorio primario del prospecto.

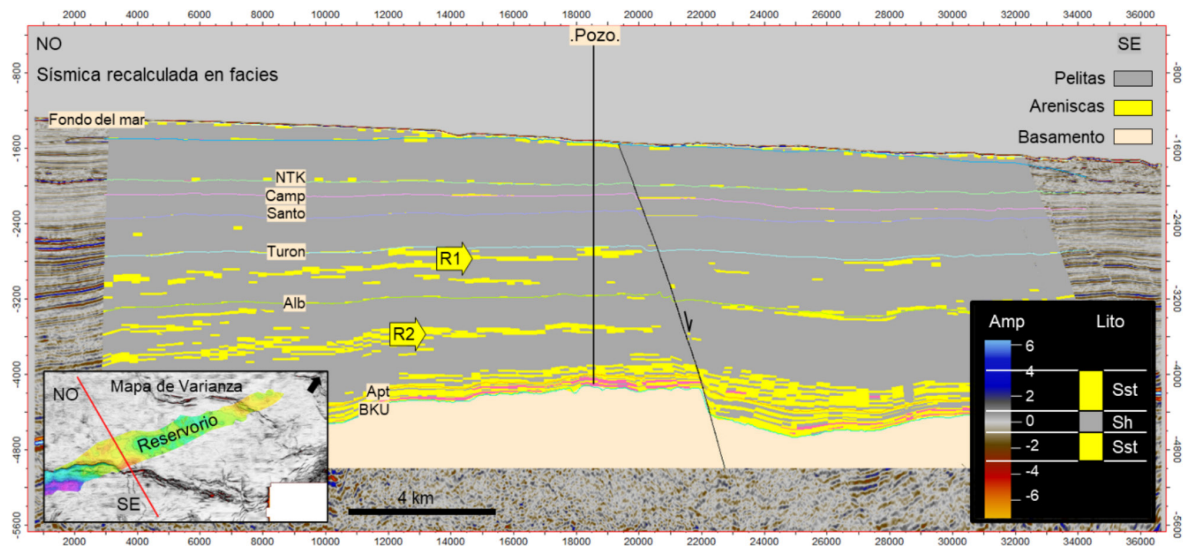


Figura 3. Corte sísmico NO-SE en profundidad en la ubicación del pozo, mostrando las principales unidades interpretadas y la clasificación de rangos de amplitudes en sismofacies. Con esta categorización los niveles arenosos reservorios y pelíticos pudieron ser diferenciados sísmicamente para poblar el modelo. R1 representa la barra arenosa litoral de edad Turoniana y R2 es el objetivo secundario del prospecto.

Una vez construido y poblado el modelo, se procedió al análisis de sello de falla, FSA por sus siglas en inglés (*Fault Seal Analysis*). El mismo se realizó contemplando tres aspectos: Yuxtaposición, reactivaciones de los planos de fallas y SGR (*Shale Gouge Ratio*) o arcillas contenidas en el plano de falla.

Se entiende por análisis de yuxtaposición a la confección de mapas tridimensionales sobre los planos de fallas (Fig. 4a) que, según la roca de caja que se encuentre superpuesta en ambas caras de la fractura, distinguen entre zonas de yuxtaposición permeable versus sellante (Allan, 1989). La primera (Fig. 4b) ocurre cuando de un lado y del otro del plano se encuentran en

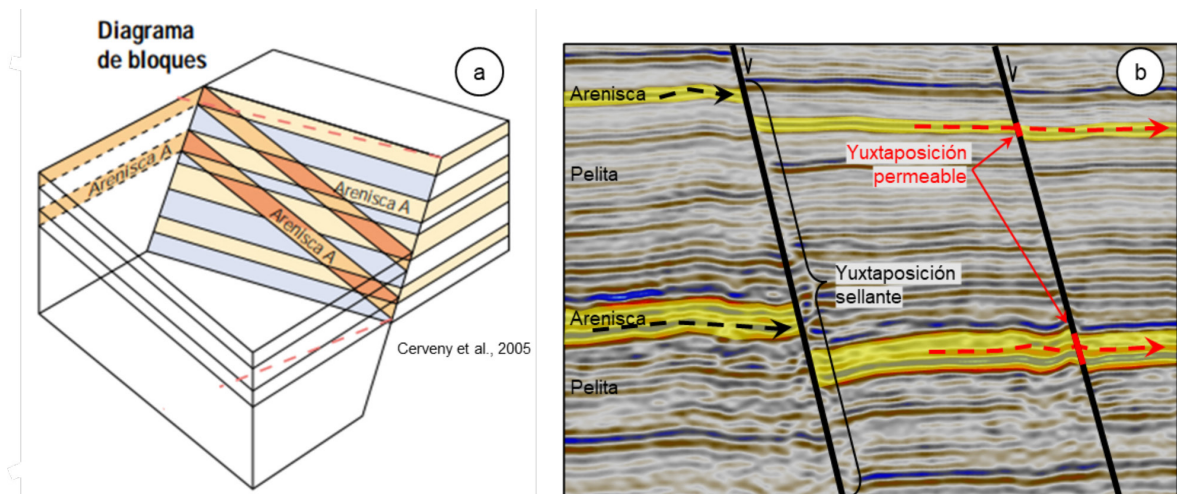


Figura 4. a. Mapeo esquemático de yuxtaposición en tres dimensiones sobre un plano de falla normal. Modificado de Cerveny *et al.* (2005). b. Ejemplo sobre sección sísmica aleatoria. Nótese que el espesor de las capas y el rechazo de las fracturas controlaría la disposición de yuxtaposiciones sellantes y permeables a lo largo de un mismo plano de falla.

contacto dos litologías permeables, lo que permitiría a los fluidos circular a través de la falla. Por otro lado, la yuxtaposición sellante (Fig. 4b) ocurre cuando una o las dos litologías en contacto tienen baja permeabilidad, por lo que los fluidos no pueden atravesar el plano de falla por la presencia de dicho sello (Cerveny *et al.*, 2005). Utilizando la configuración geométrica de las unidades y las estructuras, se elaboraron mapas de yuxtaposición en tres dimensiones para todos los planos de fallas. Finalmente, estos mapas fueron utilizados para verificar si el cierre de la trampa contra la falla se comporta de manera sellante.

El segundo factor considerado fue la evolución y pulsos de reactivación de las estructuras principales. Durante períodos de actividad existe mayor posibilidad de que los fluidos circulen a lo largo del plano, incluso cuando los mapas de yuxtaposición indiquen presencia de zonas sellantes (Fig. 5a). Por este motivo, los pulsos de reactivación de las fallas podrían producir remigración (Fig. 5b) o fuga de los hidrocarburos acumulados en las trampas (Xu *et al.*, 2016). Analizando variaciones de espesor en las unidades a un lado y otro de las fracturas se identificaron los períodos de actividad de los planos de falla. Esto se llevó a cabo realizando horizontalizaciones sucesivas para todos los toques de las unidades, en diferentes secciones de la zona del cierre estructural contra falla. Una vez identificados los pulsos de activación, los mismos fueron comparados con los períodos de expulsión de hidrocarburos.

El tercer y último factor analizado durante este análisis fue el comportamiento de las rocas involucradas en la zona de falla. El desplazamiento de las fallas ocasiona que las arcillas se deformen dúctilmente y se alojen en los planos de fallas, obliterando su permeabilidad. Dependiendo del espesor de las unidades arcillosas, de la proporción de arcillas (Vsh) en las unidades y del desplazamiento de las fallas, existirán diferentes contenidos de material fino en los planos. Cuando la roca de caja contenga niveles delgados de arcilla o el Vsh sea bajo (Fig. 5c), el fenómeno de deslizamiento de pelitas en el plano tendrá baja magnitud. En caso contrario, cuando la roca de caja contenga espesas secuencias con alto Vsh (Fig. 5d), estas pelitas se deformarán dúctilmente y se deslizarán hacia el plano. Existen numerosos indicadores que buscan representar cuantitativamente este proceso, entre ellos el *Shale Gouge Ratio* (SGR, Yielding *et al.* 1997). El mismo representa la cantidad de arcillas que pueden contener los planos por lo que, a mayor SGR, menor permeabilidad y mayor capacidad sellante de las fallas (Fig. 5e). En el presente caso de estudio, utilizando el espesor de las unidades arcillosas, el rechazo de las fallas y estimando el contenido arcilloso (Vsh), se calculó el SGR en tres dimensiones para todos los planos de falla en el modelo. Posteriormente el valor de SGR fue convertido a valores de permeabilidad utilizando el algoritmo de Sperrevick (2000), que toma como input la profundidad a la que las fallas se desarrollaron.

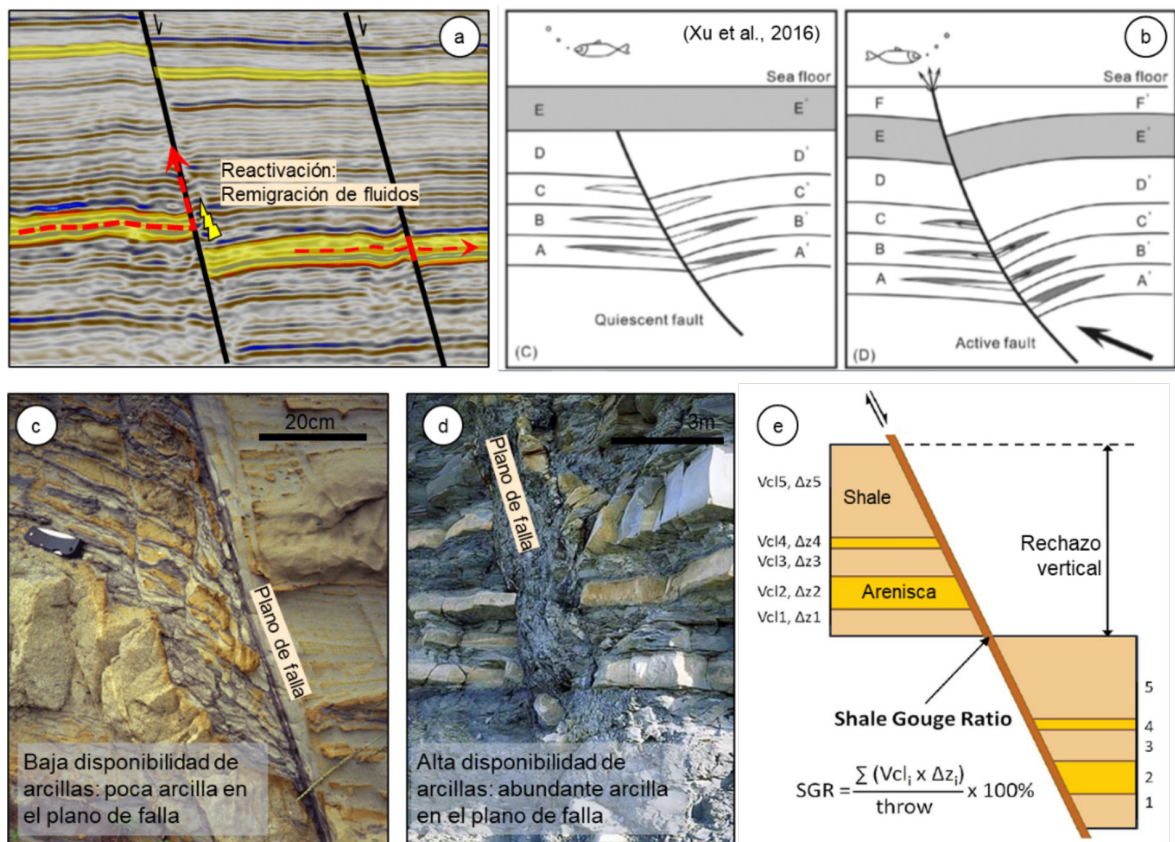


Figura 5. a. Ejemplo sobre sísmica aleatoria de figura 3b, que mostraba una yuxtaposición sellante. Incluso en estos casos una reactivación de la falla podría provocar circulación de fluidos a lo largo del plano. b. Esquema representando como las reactivaciones de las estructuras podría ocasionar remigración de fluidos entrampados. Tomado de Xu *et al.* (2016). c. Plano de falla en una roca de caja con poca disponibilidad de arcillas. Nótese que una baja proporción de material fino rellena el plano. d. Plano de falla alojado en una roca de caja con alta disponibilidad de pelitas. Nótese que se desarrolla una espesa zona de falla rellena de material fino de baja permeabilidad. e. Esquema del concepto y ecuación de SGR, compuesta por la sumatoria y relación entre el espesor de las unidades (ΔZ), contenido arcilloso (Vcl) y rechazo vertical de la falla (throw). Modificado de Fristad *et al.* (1997).

RESULTADOS

En cuanto al modelo estructural, el resultado fue la obtención de un cubo con una fuerte predominancia de fallas normales de dirección NE-SO. El rechazo vertical máximo medido fue de 300 m y el desplazamiento máximo medido sobre el plano de falla (rechazo real) supera los 400 m. Los ángulos de buzamiento de las fallas oscilan entre 40° y 90°, aunque la mayor frecuencia ronda los 55° con predominancia hacia el sudeste. El sistema se compone de tres fallas principales cuya extensión excede los límites del cubo sísmico y sobre las cuales se dispone de manera sintética y antitética el fallamiento de menor escala. Una de estas fallas es la que actúa como sello lateral de la trampa principal, por lo que se hizo foco en su comportamiento en la zona del cierre a través del análisis de sello de falla (Fig. 6a).

Los mapas 3D de yuxtaposición para este caso de estudio se confeccionaron considerando como zonas críticas las yuxtaposiciones de arenas contra arenas (color rojo en figura 6), por

representar un riesgo de sello inefficiente de la falla y fuga de hidrocarburos. A su vez, se consideró que las yuxtaposiciones arena-pelita y pelita-pelita (ambas en color gris en la figura 6) constituyen zonas impermeables a lo largo del plano y actuarían como un sello efectivo. El resultado de esta clasificación y mapeo tridimensional muestra que no hay zonas permeables (arena contra arena) en el plano de falla para los niveles reservorio. En otras palabras, el análisis de yuxtaposición sugiere que la falla se estaría comportando como cierre efectivo para el nivel de interés (Fig. 6b).

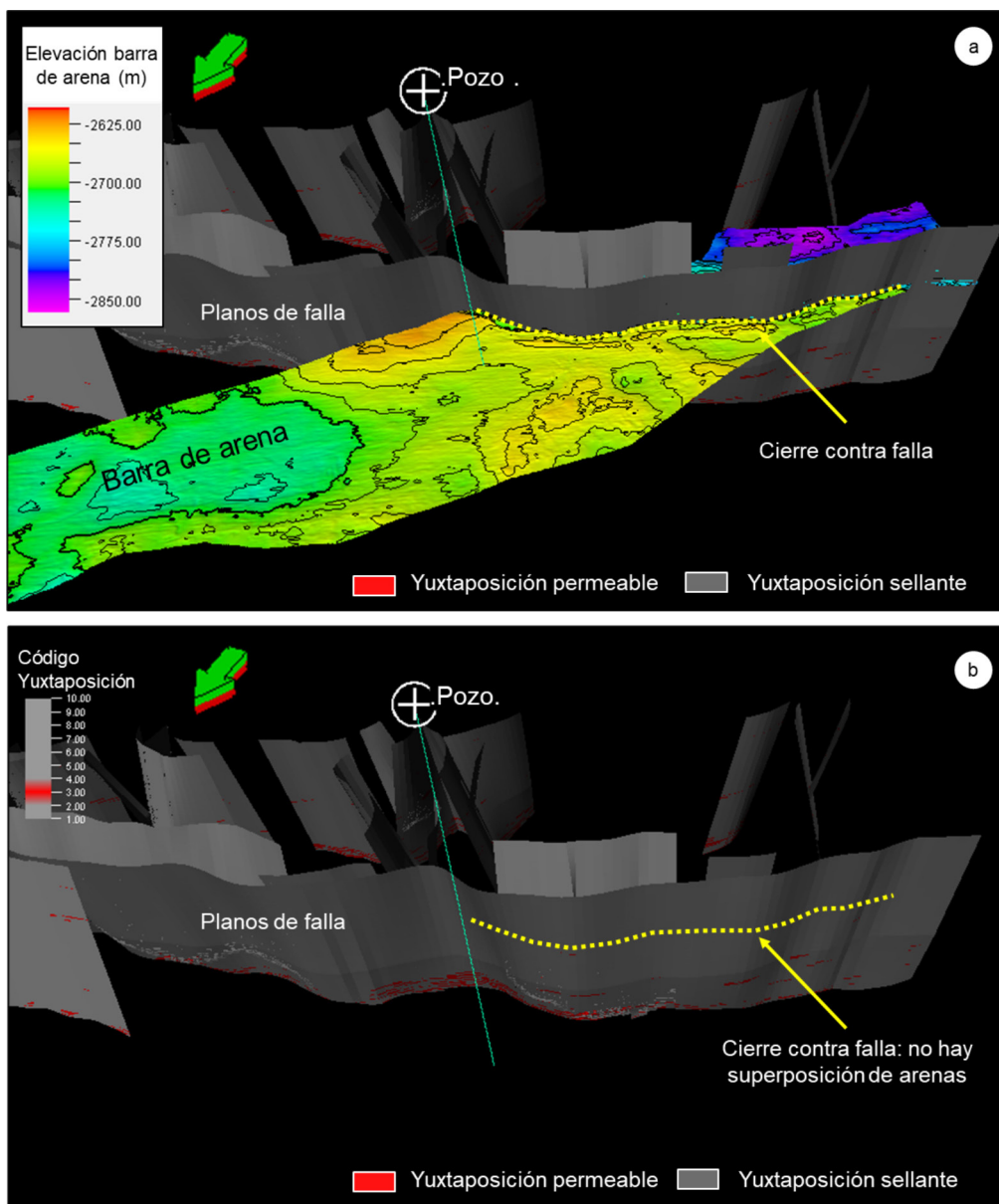
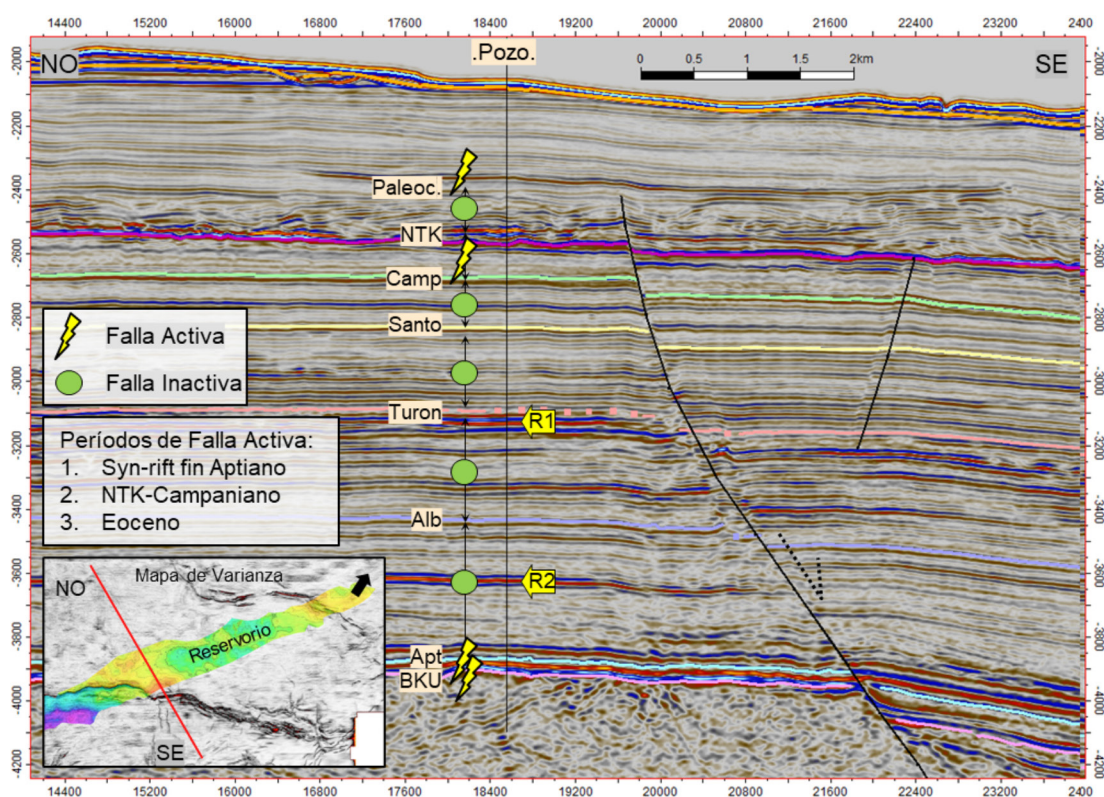


Figura 6. Mapas de Yuxtaposición en profundidad. a. planos de falla y barra de arena objetivo, mostrando el cierre contra falla. b. Mapa de yuxtaposición sin la barra de arena para analizar la zona del cierre, representada por la línea punteada amarilla. Puede observarse que el color de la yuxtaposición en el cierre es gris, es decir, sellante.

En cuanto a la evolución estructural de la zona, se analizaron los cambios de espesor en las unidades atravesadas por la falla principal realizando horizontalizaciones, para definir intervalos de tiempo durante los cuales la falla estuvo activa. El resultado observado (Fig. 7) muestra que la falla principal del prospecto estuvo activa durante al menos tres periodos. El primero corresponde a la etapa de *syn-rift* desarrollado previo a la ruptura continental (*breakup unconformity*) y hasta el inicio del Aptiano. Esta fase se evidencia por la diferencia de espesores y el desarrollo de un hemigraben con forma de cuña hacia el sudeste. Hacia el techo en el registro sísmico no se observan cambios de espesores para el Albiano, Turoniano, Santoniano ni Campaniano en ambos lados de la fractura, por lo que se interpreta que estas unidades se depositaron sin fallamiento. El plano de falla habría quedado soterrado y restringido a profundidades del hemigraben durante este período. Posteriormente, aunque posee poca magnitud, se observó nuevamente un cambio de espesores en el intervalo Campaniano-NTK. Esto se interpretó como un estadio de actividad de la estructura, durante la cual la falla se extendió desde la profundidad de hemigraben hasta el NTK, afectando a todas las unidades intermedias. Finalmente, es posible observar que la falla supera el NTK y su tip superior se sitúa en niveles cercanos al Eoceno, por lo que se interpretó que en este momento ocurrió el tercer y último pulso principal de reactivación de la falla.



Una vez que se identificaron los períodos de reactivación de la falla, se estudió el impacto que estos podrían tener en la acumulación de hidrocarburos. Según los estudios internos previos de modelado de roca madre, se estima que la generación de hidrocarburos líquidos habría comenzado alrededor del Santoniano (hace 86 Ma.) y continuaría hasta la actualidad, por estar la roca madre en su máximo soterramiento. De esta manera, es la última reactivación de la falla, ocurrida en el Eoceno, la que representa una alarma para este caso de estudio, ya que podría generar la remigración de los hidrocarburos acumulados en la trampa hasta dicho momento. Sin embargo, este riesgo es parcial, ya que la sísmica muestra que la falla habría permanecido inactiva desde entonces, permitiendo que los hidrocarburos se entrapen sin perturbaciones el desde el Eoceno (hace 50 Ma) hasta la actualidad (Fig. 8).

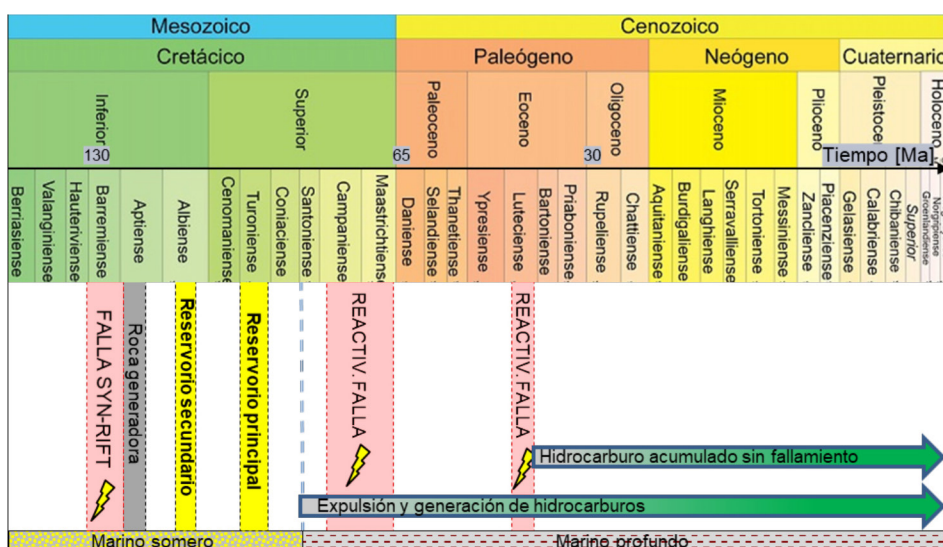


Figura 8. Cuadro de eventos vs. generación de hidrocarburos. Se observa que luego del último pulso de falla (Eoceno), la generación de hidrocarburos continúa sin perturbaciones hasta la actualidad. Basado en Reporte interno Equinor-YPF (Arismendi *et al.* 2019).

Finalmente, si bien las fallas activas tienen mayor chance de filtrar fluidos (Xu et al, 2016), este proceso se ve reducido cuando los planos de fallas se encuentran rellenos por arcillas deformadas plásticamente. Utilizando los valores de V_{sh} estimados para cada una de las sismofacies, se calculó el SGR en los planos de fallas y se elaboraron mapas de permeabilidad utilizando el algoritmo de Sperrevik (2000). El resultado final (Fig. 9a) muestra que la permeabilidad es baja en el plano de falla para los niveles de reservorio en el cierre de la trampa (Fig 9b), es decir que la falla estaría actuando como un sello debido a su alta proporción de arcillas. Esto significa que, si bien la falla tuvo su ultimo pulso de actividad en el Eoceno, es posible que el plano posea baja permeabilidad por la abundante arcilla presente en el sistema.

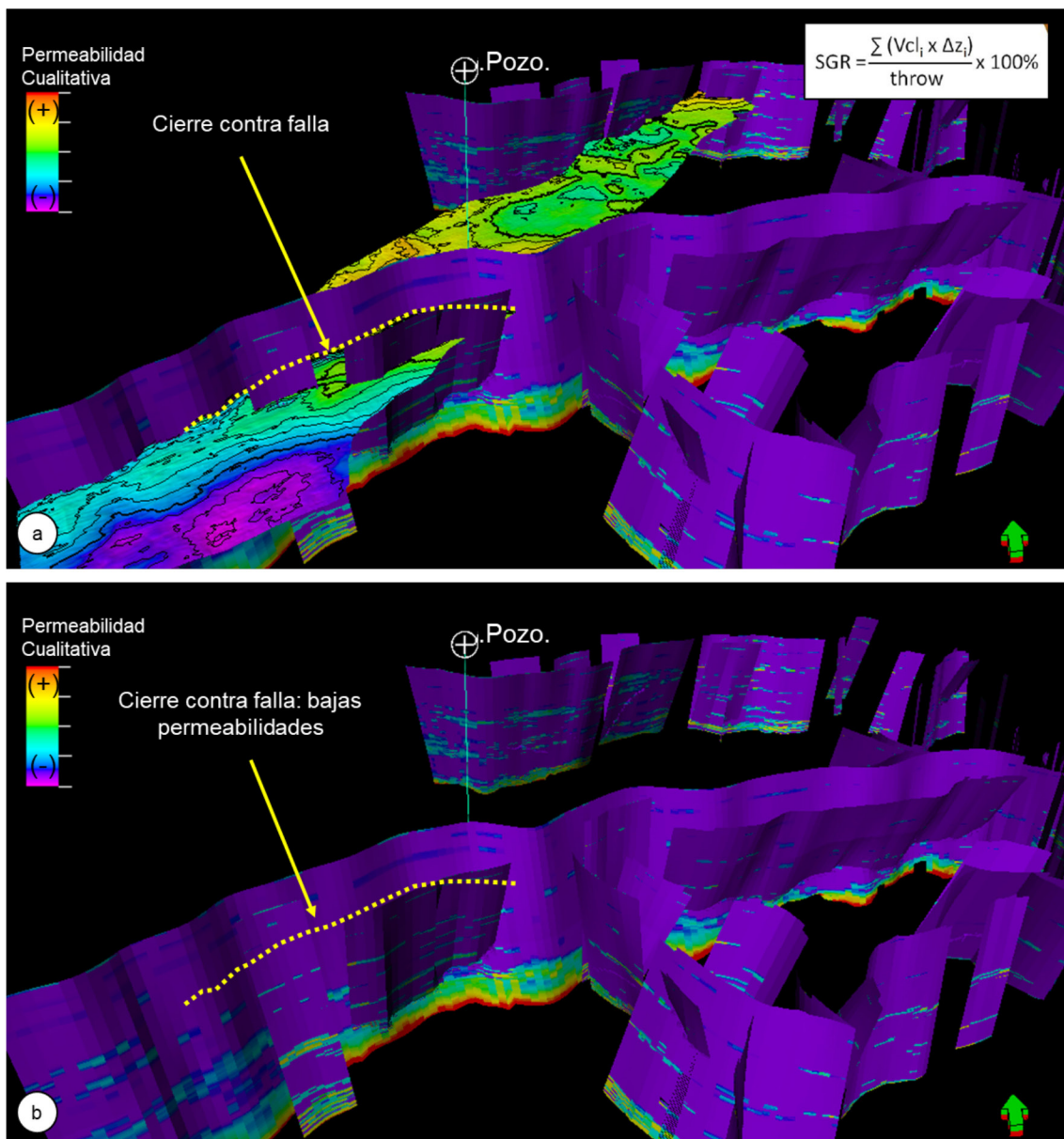


Figura 9. a. Ecuación de SGR y mapa tridimensional en profundidad de permeabilidades cualitativas en los planos de falla. Se observa la barra arenosa reservorio y la trampa formada por un cierre contra falla. b. Mapa de Permeabilidades sin la barra arenosa. Nótese que en la zona del cierre contra falla, este plano posee baja permeabilidad, lo que le otorga propiedades sellantes.

DISCUSIÓN

Considerando los tres aspectos que componen el “*Fault Seal Analysis*” en este caso de estudio, la determinación del riesgo de pérdida de fluidos surge de integrar los resultados parciales, resaltando los puntos de alarma. En primer lugar, las arenas no se encuentran yuxtapuestas en el cierre contra falla (Fig. 6), lo que generaría un cierre efectivo de la trampa. En segundo lugar, si bien existe dicha trampa, se debe tener en cuenta que la última activación de la falla durante

el Eoceno (Fig. 7) podría haber contribuido a la remigración del fluido entrampado hasta ese momento. De todas maneras, desde el Eoceno hasta la actualidad el riesgo de remigración es bajo, por no observarse pulsos de reactivación en la estructura (Fig 8). Por último, el escape de fluidos también se ve disminuido ya que los planos de fallas poseen bajas permeabilidades, por encontrarse rellenos de arcillas (Fig. 9). En resumen, este estudio asigna un riesgo bajo al sello de fallas y estima que la fractura principal constituye un elemento efectivo de cierre de la trampa.

De todas maneras, existen incertidumbres en este análisis que podrán ser reducidas durante la perforación del prospecto. Debido a la falta de pozos en el área hasta el momento, no se cuenta con información directa para calibrar litologías, propiedades petrofísicas, conversiones a profundidad, condiciones geomecánicas de la zona, propiedades de los fluidos o la historia diagenética vinculada a las fallas. Por este motivo, dos escenarios fueron modelados por separado considerando una situación de mayor riesgo y otra de menor riesgo, para contemplar el rango de posibles resultados. Los factores que se hicieron variar fueron las proporciones arena/arcilla en el modelo y el Vsh de cada una de las litologías (Fig. 10). En este informe se presentó el caso más conservador, es decir el que poseía una mayor chance de fuga de hidrocarburos.

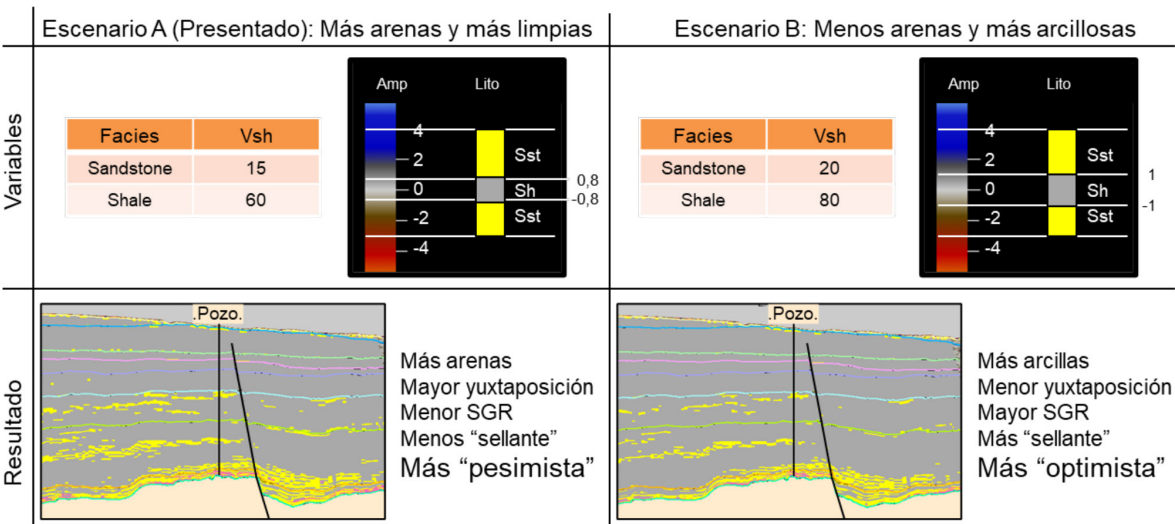


Figura 10. Parámetros utilizados en los dos escenarios para contemplar un mayor rango de resultados posibles.

CONCLUSIONES

A partir del presente estudio se estableció que, considerando las limitaciones propias de la falta de calibración con datos de pozo, existe un riesgo bajo asociado al sello del cierre contra falla para el prospecto. Esto se debe en primer lugar a que las arenas no se encuentran yuxtapuestas en el cierre contra falla según lo observado en los mapas tridimensionales de yuxtaposición, lo que genera un cierre sellante. En segundo lugar, el análisis de pulsos de actividad de la estructura

principal mostró que la reactivación de la falla durante el Eoceno podría haber contribuido a la remigración del fluido entrampado hasta ese momento. De todas maneras, desde el Eoceno hasta la actualidad el riesgo de remigración es bajo, por no observarse pulsos en la estructura. Finalmente, el escape de fluidos también se ve disminuido ya que los planos de fallas poseen bajas permeabilidades, por contener un alto SGR y encontrarse rellenos de arcillas. Por estas razones, la falla se comportaría como un plano efectivo de cierre para la trampa.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a YPF S.A. por disponibilizar el *set* de datos, las capacidades tecnológicas para la realización de los modelados y en especial a por las contribuciones y soporte técnico brindado por el equipo de geocientistas. También por permitirme compartir los resultados obtenidos durante este trabajo y al equipo de Exploración de Equinor y a Shell quienes han brindado soporte y devoluciones. A Juan Pablo Lovecchio, Pedro Kress, Pablo Giampaoli y René Manceda por sus revisiones y contribuciones.

BIBLIOGRAFÍA

- Allan, U. S., 1989. Model for Hydrocarbon Migration and Entrapment within Faulted Structures. AAPG Bulletin, 73.
- Arismendi, S., Kress, P., Gerster, R., Bolatti, N., Flores, G. Tine, L., Sánchez, L. A., Bernaus, S. J. M., Imsland, E. W., 2019. Management Presentation for Data Room. Reporte Interno de YPF y Equinor.
- Cervený, K., Davies, R., Dudley, G., Fox, R., Kaufman, P., Knipe, R.J. and Krantz, B., 2005. Reducing Uncertainty with Fault-Seal Analysis. Oilfield Review, 16(4): 38-51.
- Fisher, Q., Casey, M., Harris, S. and Knipe, R., 2002. Fluid-flow properties of faults in sandstone: The importance of temperature history. Geology, 31(11), p.965.
- Freeman, S. R., Harris, S. D. & Knipe, R. J., 2008. Fault seal mapping – incorporating geometric and property uncertainty. In: Robinson, A., Griffiths, P., Price, S., Hegre, J. & Muggeridge, A. (eds) The Future of Geological Modelling in Hydrocarbon Development. Geological Society, London, Special Publications, 309, 5–38.
- Fristad, T., Groth, A., Yielding, G., & Freeman, B., 1997. Quantitative fault seal prediction: a case study from Oseberg Syd. Norwegian Petroleum Society Special Publications, 7, 107-124.
- Gerster, R., Welsink, H., Ansa, A., & Raggio, F., 2011. Cuenca de Colorado. VIII Congreso de Exploración y Desarrollo de Hidrocarburos Simposio Cuencas Argentinas: Visión Actual 65–80.
- Gladczenko, T. P., Hinz, K., Eldholm, O., Meyer, H., Neben, S., & Skogseid, J., 1997. South Atlantic volcanic margins. Journal of the Geological Society, 154, 465–470. <https://doi.org/10.1144/gsjgs.154.3.0465>.
- Hälbich, I., 1983. A tectogenesis of the Cape Fold Belt. In A. P. G. Sönnge & I. W. Hälbich (Eds.), Geodynamics of the Cape Fold Belt. The Geological Society of South Africa, Special Publication, 12, 165–175.

- Hansma, J., Tohver, E., Schrank, C., Jourdan, F., & Adams, D., 2016. The timing of the Cape Orogeny: New 40 Ar/39 Ar age constraints on deformation and cooling of the Cape Fold Belt, South Africa. *Gondwana Research*, 32, 122–137. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2015.02.005>.
- Hinz, K., 1981. A hypothesis on terrestrial catastrophes_wedges of very thick oceanward dipping layers beneath Passive continental margins. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, E22, 3–28.
- Hinz, K., Neben, S., Schreckenberger, B., Roeser, H. A., Block, M., & Meyer, H., 1999. The Argentine continental margin north of 48°S: Sedimentary successions, volcanic activity during break-up. *Marine and Petroleum Geology*, 16, 1–25. [https://doi.org/10.1016/S0264-8172\(98\)00060-9](https://doi.org/10.1016/S0264-8172(98)00060-9).
- Jolley, S. J., Dijk, H., Lamens, J. H., Fisher, Q. J., Manzocchi, T. & Eikmans, H., 2007. Faulting and fault sealing in production simulation models: Brent Province, northern North Sea. *Petroleum Geoscience*, 13, 321–340.
- Karlsen, D. and Skeie, J., 2006. Petroleum migration, faults and overpressure, part i: calibrating basin modelling using petroleum in traps - a review. *Journal of Petroleum Geology*, 29(3), pp.227-256.
- Knai, T. A. & Knipe, R. J., 1998. The impact of faults on fluid flow in the Heidrun Field. In: Jones, G., Knipe, R. J. & Fisher, Q. J. (eds) *Faulting, Fault Sealing and Fluid Flow in Hydrocarbon Reservoirs*. Geological Society, London, Special Publications, 147, 269–282.
- Kress, P., Catuneanu, O., Gerster, R., and Bolatti, N., 2021. Tectonic and Stratigraphic evolution of Cretaceous Western South Atlantic, *Journal of Marine and Petroleum Geology*, <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2021.105197>
- Lindsay, N. G., Murphy, F. C., Walsh, J. J. & Watterson, J., 1993. Outcrop studies of shale smears on fault surfaces. In: Flint, S. T. & Bryant, A. D. (eds) *The Geological Modelling of Hydrocarbon Reservoirs and Outcrop*. International Association of Sedimentologists, Oxford, Special Publication, 15, 113–123.
- Lovecchio, J.P., Rohais, S., Joseph, P., Bolatti, N.D., Kress, P.R., Gerster, R., Ramos, V.A., 2018. Multistage rifting evolution of the Colorado basin (offshore Argentina): Evidence for extensional settings prior to the South Atlantic opening, *Terra Nova*, *Terra Nova*, 30:5, 954-4879, <https://doi.org/10.1111/ter.12351>.
- Lovecchio, J.P., Rohais, S., Joseph, P., Bolatti, N.D., Ramos, V.A., 2020. Mesozoic rifting evolution of SW Gondwa: a poliphased subduction-related history responsible for basin formation along the Argentinean Atlantic margin, *Earth Science reviews*, 203, 103138 <https://doi.org/10.1016/j.earthscirev.2020.103138>.
- Manzocchi, T., Walsh, J. J., Nell, P. & Yielding, G., 1999. Fault transmissibility multipliers for flow simulation models. *Petroleum Geoscience*, 5, 53–63.
- Manzocchi, T., Heath, A. E., Walsh, J. J. & Childs, C., 2000. Fault-rock capillary pressure: extending fault seal concepts to production simulation. Norwegian Petroleum Society conference on hydrocarbon seal quantification, Stavanger, Norway. Extended abstracts. Norwegian Petroleum Society (NPF), 101–106.
- Nürnberg, D., & Müller, R. D., 1991. The tectonic evolution of the South Atlantic from Late Jurassic to present. *Tectonophysics*, 191, 27–53. [https://doi.org/10.1016/0040-1951\(91\)90231-G](https://doi.org/10.1016/0040-1951(91)90231-G).

- Pángaro, F., & Ramos, V. A., 2012. Paleozoic crustal blocks of onshore and offshore central Argentina: New pieces of the southwestern Gondwana collage and their role in the accretion of Patagonia and the evolution of Mesozoic south Atlantic sedimentary basins. *Marine and Petroleum Geology*, 37, 162–183. <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2012.05.010>.
- Pángaro, F., Ramos, V. A., & Pazos, P. J., 2016. The Hesperides basin: A continental-scale upper Palaeozoic to Triassic basin in southern Gondwana. *Basin Research*, 28, 685–711. <https://doi.org/10.1111/bre.12126>.
- Paton, D. A., Pindell, J., McDermott, K., Bellingham, P., Horn, B., 2017. Evolution of seaward-dipping reflectors at the onset of oceanic crust formation at volcanic passive margins: Insights from the South Atlantic. *Geology*, 45(5), 439–442. <https://doi.org/10.1130/G38706.1>
- Rojas Vera, E. A., Spath, F. G. E., Lovecchio, J. P., Silio, O., Kress, P., 2022. Desarrollo de depocentros jurásicos entre las cuencas de Colorado, subcuenca Chelforó y cuenca Neuquina. VIII Congreso de Exploración Y Desarrollo de Hidrocarburos Simposio Exploración y Sistemas Petroleros.
- Sperrevik, S., Færseth, R. and Gabrielsen, R., 2000. Experiments on clay smear formation along faults. *Petroleum Geoscience*, 6(2), pp.113-123.
- Stica, J. M., Zalán, P. V., & Ferrari, A. L., 2014. The evolution of rifting on the volcanic margin of the Pelotas Basin and the contextualization of the Paraná-Etendeka LIP in the separation of Gondwana in the South Atlantic. *Marine and Petroleum Geology*, 50, 1–21. <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2013.10.015>.
- Yielding, G., Freeman, B. & Needham, D. T., 1997. Quantitative fault seal prediction. *American Association of Petroleum Geology Bulletin*, 81, 897–917.
- Yielding, G., 2002. Shale gouge ratio-calibration by geohistory. In: Koestler, A. G. & Hunsdale, R.(eds) *Hydrocarbon Seals Quantification*. Norwegian Petroleum Society (NPF), Special Publication 11, Elsevier, Amsterdam, 1–15.
- Xu S., Fang H., Changgui X., Huayao Z., Yongbin Q., 2016. Oil migration through preferential petroleum migration pathway (PPMP) and polycyclic faults: A case study from the Shijiutuo Uplift, Bohai Bay basin, China. *Marine and Petroleum Geology*, Volume 73, Pages 539-553.

