

IDENTIFICACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE INTRUSIVOS ÍGNEOS EN LA FORMACIÓN VACA MUERTA Y SU IMPACTO EN EL DISEÑO DE UNA CAMPAÑA DE EXPLORACIÓN. CASO DE ESTUDIO: EL TRAPIAL, CUENCA NEUQUINA. ARGENTINA

María Dolores Vallejo¹, Ezequiel Lombardo¹, Pablo Crespo¹, Sergio Cuervo¹

1: Chevron Argentina, mdvallejo@chevron.com, ezequiel.lombardo@chevron.com,
pablo.crespo@chevron.com, sergio.cuervo@chevron.com

Palabras clave: Vaca Muerta, filones, diques, simulación

ABSTRACT

Identification and Characterization of intrusives in Vaca Muerta and their impact in the delineation of an Exploratory Campaign. Case Study: El Trapial Field, Neuquén Basin. Argentina.

The exploration execution plan of Vaca Muerta Fm. in El Trapial block presents, in addition to the usual challenges in an unconventional play, a complexity given by the volcanic environment of this area.

The exploration plan includes the drilling of horizontal wells that will define productivity and the best landing zones within the 350 m of Vaca Muerta thickness with Total Organic Carbon (TOC) >2%. The stratigraphy and the reservoir quality in this area has been studied based on a robust data acquisition plan executed during the first exploration campaign (2011 - 2014).

The thermal maturity in El Trapial has been delineated all over the area from the volatile oil to gas-condensate windows, where the latter covers most of the area. A detailed structural analysis based on seismic, outcrops and wells, was carried out in this zone, where features, faults and igneous bodies were identified at different levels of Vaca Muerta Fm. Seismic amplitude and acoustic impedance surveys analyzed with the geobody methodology allowed identification and delineation of volcanic sills, even those below seismic resolution or concordant to the stratigraphy. Thicknesses of the bodies range from less than 7 m (detection limit) to 30 m thick and show a planar to saucer shape and lobate geometry. In addition, curvature, chaos and varianza attributes led to the identification of volcanic dykes. These dykes are distributed with a radial pattern across Cerro Bayo de Huantraico Sur laccolith in the south western portion of the area. The study of this igneous bodies was complemented with petrophysical and geomechanical analysis that demonstrates that these andesites rocks have elastic moduli higher than Vaca Muerta host rocks and are therefore they are expected to work as barrier to hydraulic fractures. Surface studies were incorporated to the characterization of igneous bodies, since these volcanic bodies outcrop in the area. In order to compare them in terms of composition and geomechanical properties with subsurface dykes samples from outcropping dykes were taken. Finally, numerical simulations were carried out to understand the interaction between hydraulic fractures and igneous bodies indicate that Sh difference of over 8% would make these bodies act as barriers to frac propagation. The resulting will be used to optimize the selection of landing point and frac-stage design of horizontal wells to be drilled and predict its behavior in subsurface to optimize the landing point of each horizontal well to be drilled.

This paper summarizes the comprehensive studies that allowed to define the location of future wells, the landing points, the real-time monitoring requirements and the data acquisition plan for the next exploration campaign.

INTRODUCCIÓN

El área El Trapial, operada por Chevron ha sido uno de los principales yacimientos de petróleo de reservorios convencionales de la Cuenca Neuquina de las últimas décadas. Desde 2013, el área ha sido explorada con una primera campaña de perforación de 4 pozos verticales con el objetivo de caracterizar a la Fm. Vaca Muerta. Durante esta etapa se definieron los intervalos prospectivos con alto carbono orgánico total (COT) y la distribución del tipo de fluido presente en el reservorio tipo *shale*, comprobando que la Fm. Vaca Muerta en El Trapial se encuentra posicionada entre la ventana de petróleo volátil (al este) y la de gas condensado (al oeste).

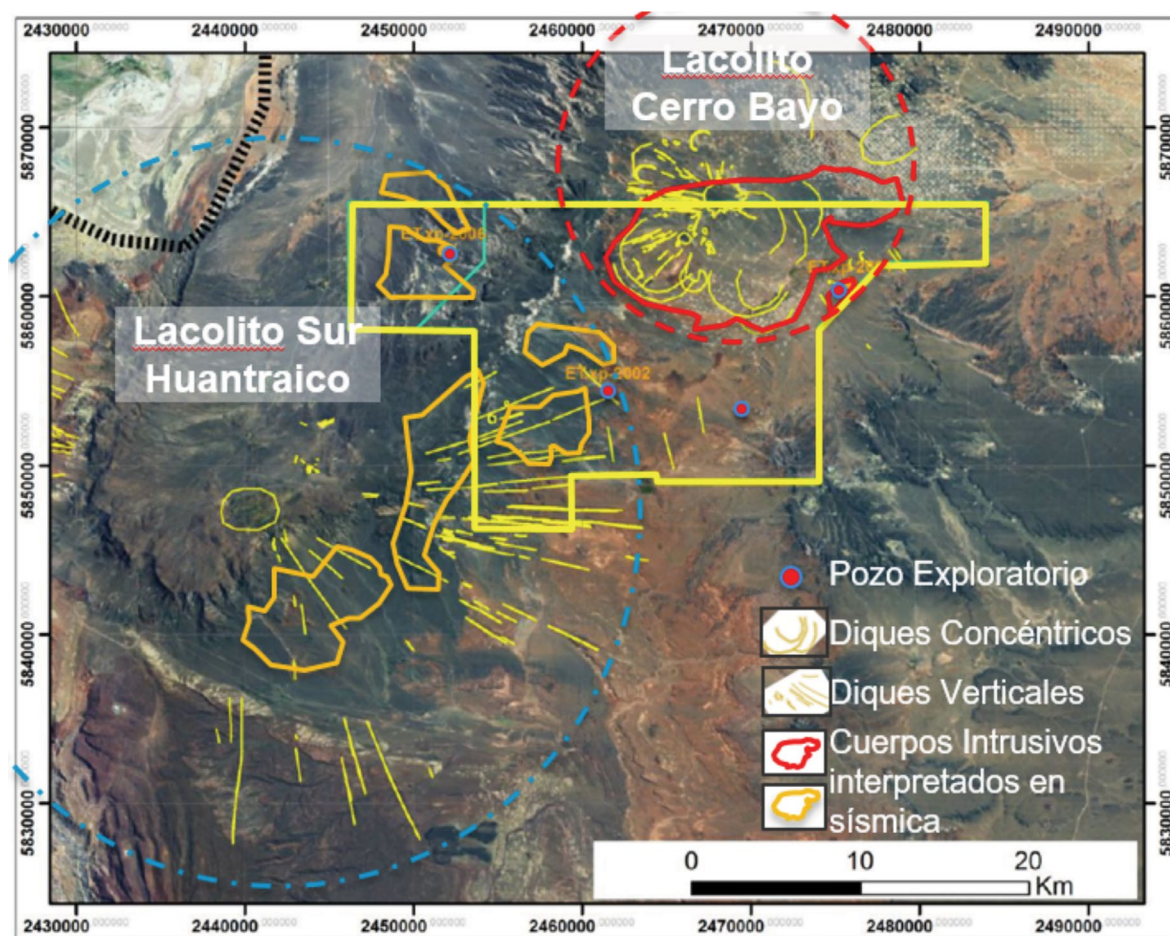


Figura 1. Ubicación del Área de Estudio. Se destacan los principales centros magmáticos: el Lacolito Cerro Bayo de la Sierra Negra y el lacolito Cerro Bayo de Sur Huantraico, se incluye una interpretación en subsuelo de los diques radiales y verticales (modificado de Fantín y Gonzalez 2014)

Durante la etapa exploratoria del área se comprobó la presencia de cuerpos ígneos en 3 de sus 4 pozos verticales. Estos cuerpos intrusivos provienen de los dos centros magmáticos localizados en la región: el lacolito Cerro Bayo de la Sierra Negra y el lacolito del Cerro Bayo de Huantraico.

(Fig. 1). Un rasgo relacionado con la actividad magmática es la presencia de un alto porcentaje de dióxido de carbono (CO_2). Análisis químicos de la composición isotópica del carbono y helio en muestras de ese gas en pozos cercanos al Cerro Bayo de la Sierra Negra, confirmaron el origen inorgánico de CO_2 con aportes de fuente principalmente mantélica (Agusto *et al.* 2014). Si bien los dos centros magmáticos tienen características semejantes, según la descripción de los cortes petrográficos y estudios regionales de Cobbold y Rosello (2003) y Kay y Copeland (2006), los cuerpos ígneos relacionados con el lacolito de Huantraico no han manifestado alta concentración de CO_2 .

Fantin y Gonzalez (2014) delimitan un área con influencia de CO_2 del lacolito Cerro Bayo de la Sa. Negra de otra área vinculada al Lacolito Cerro Bayo Sur Huantraico. Los cuerpos volcánicos son de composición máfica, descriptos y clasificados como basaltos andesíticos conformados por olivina, piroxeno y plagioclasa, masivamente alterados a carbonatos y arcillas y con numerosas venas de carbonato (Llambías *et al.*, LCV SA, 2013, Informe interno). El espesor de los cuerpos ígneos atravesados en la Fm. Vaca Muerta en los pozos es variable, siendo el mayor de 5 metros.

La campaña 2018 de perforación de El Trapial está enfocada en la ventana de gas condensado, delimitada durante la primera etapa de exploración y que se ubica en la región occidental del bloque. Dicha área se destaca por poseer el mayor espesor del intervalo rico en materia orgánica de la región (374 metros con $\text{COT} > 2\%$) coincidiendo con la ubicación de la paleocubeta definida por Cristallini *et al* (2013).

El área seleccionada para la siguiente fase exploratoria está fuertemente influenciada por el lacolito Cerro Bayo de Huantraico Sur. La caracterización estructural, detección y mapeos de los cuerpos ígneos de subsuelo, así como también de superficie fue necesaria para poder definir las locaciones y las trayectorias de los futuros pozos horizontales.

CARACTERIZACION DE LOS CUERPOS IGNEOS

Con el objetivo de identificar en subsuelo la cantidad y distribución de estos cuerpos ígneos, se realizó un análisis detallado de los volúmenes sísmicos de amplitud e impedancia acústica, así como también el picado de horizontes y el uso de atributos sísmicos para resaltar los límites de los cuerpos y los rasgos verticales.

Se denominan diques a aquellas rocas ígneas planares, verticales a sub-verticales que cortan a la estratificación de la roca de caja (usualmente dispuestos de forma radial o anular respecto al centro volcánico). Los filones capa en cambio son aquellas rocas ígneas planares subhorizontales o de bajo buzamiento que se pueden presentar concordantes o levemente discordantes respecto a la estratificación de la roca de caja.

Debido a la composición litológica de estos cuerpos (principalmente basaltos andesíticos), su contraste de densidad y velocidad respecto de la roca de caja (lutitas y carbonatos de la formación

Vaca Muerta) generan un alto contraste de impedancia acústica, haciendo que estos cuerpos sean fácilmente identificados tanto en un cubo de amplitud como de impedancia acústica cuando su espesor se encuentra por encima de la resolución sísmica (Fig. 2).

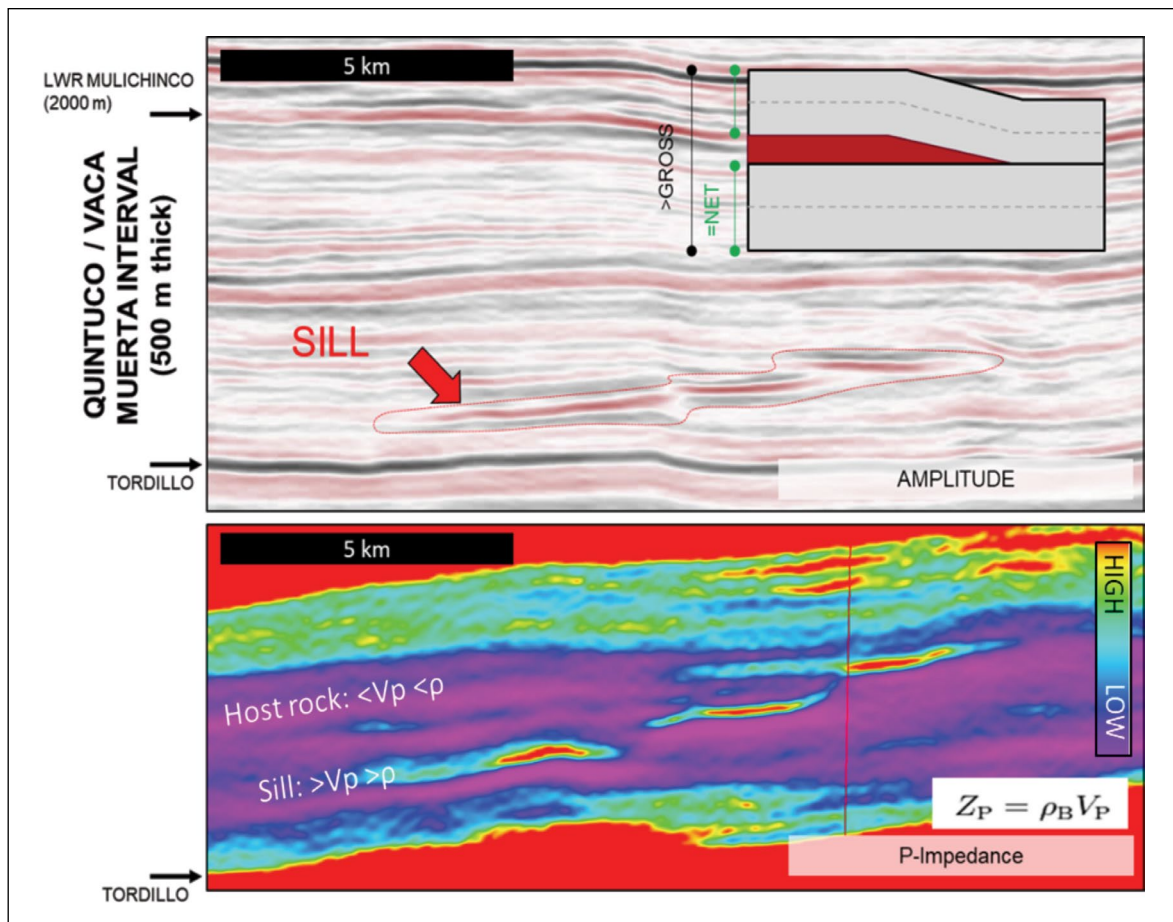


Figura 2. Sección sísmica donde se observa un intrusivo tipo filón capa con reflectores más fuertes y que cortan la estratigrafía de Vaca Muerta. En la imagen inferior la misma sección en impedancia acústica.

La generación de un dique o un filón va a depender de diversos mecanismos de emplazamiento. Jean-Baptiste Gressier (2010) mencionó que, en condiciones de resistencia a la tracción homogénea, y presiones hidrostáticas, la formación de filones es poco probable. Pero, por el contrario, en *shales* donde la anisotropía es alta y registran una importante sobrepresión, la intrusión de estos cuerpos se ve favorecida.

El magma se propaga a través de la roca de caja mediante la fracturación hidráulica del medio. Por lo tanto, la geometría del cuerpo estará relacionada con el campo de esfuerzos al momento de la intrusión. Si el medio es isotrópico (que es el caso más simple, pero no el más realista), la geometría de la intrusión tendrá una respuesta única directamente dependiente del

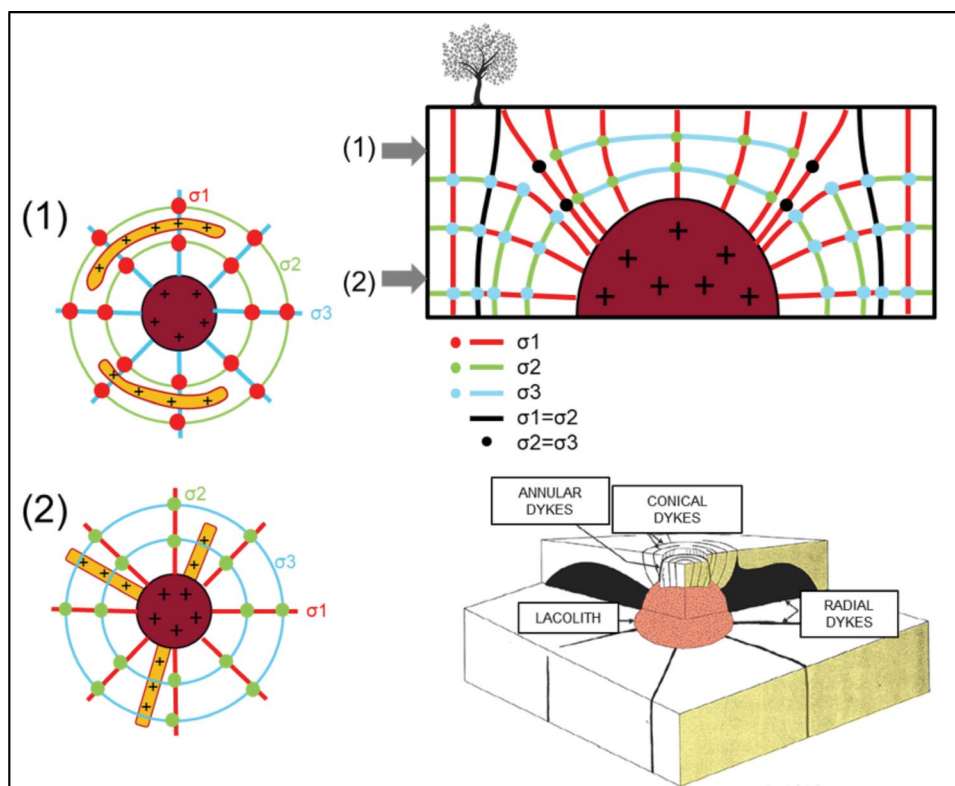


Figura 3. Diagrama sketch de distribución de esfuerzos en el emplazamiento de diques anulares (1) y radiales (2). σ_1 , σ_2 y σ_3 corresponden a los esfuerzos principales máximo, medio y mínimo respectivamente. (modificado de Suppe, 1985)

campo de esfuerzos. Dicha intrusión estará siempre dispuesta perpendicularmente al esfuerzo mínimo.

En la figura 3 es posible ver la trayectoria de los tres esfuerzos principales asociados con la intrusión magmática (Suppe, 1985). Observando este diagrama de esfuerzos de la Fig. 3, se explican tanto los diques anulares como los diques radiales, según la posición de la intrusión respecto al campo de esfuerzos. (1) Arriba del cuerpo intrusivo principal donde el esfuerzo mínimo es perpendicular al cuerpo principal, la intrusión secundaria se canalizará a través de diques anulares. (2) Hacia los lados del cuerpo intrusivo principal: donde el esfuerzo mínimo se dispone con una geometría anular respecto al cuerpo principal, la intrusión planar dará lugar a diques radiales.

Price y Cosgrove, (1990), incorporan el concepto de anisotropía en la resistencia tensil (producto de la foliación y/o laminación de la roca de caja) para explicar la formación de diques y filones capa.

Por último, modelos matemáticos más complejos consideran la alteración local que estos cuerpos planares generan sobre campo de esfuerzos regional al emplazarse. Lo que permitiría explicar no solo el emplazamiento de diques verticales, sino también los filones capa.

Filones capa

Tal como fue mencionado con anterioridad, los filones pueden ser fácilmente reconocidos en sísmica debido a su alta velocidad y densidad respecto de la roca de caja. No obstante, el espesor de estos cuerpos, en ocasiones, no es suficiente como para diferenciar el tope y la base de los mismos como reflectores independientes, pero si es suficiente como para observar su efecto sobre las amplitudes, lo que se conoce como el efecto de tuning sobre la ondícula, que se resuelve en espesores con el modelo de cuña (Widess, 1973). De esta manera pudo estimarse que, el espesor de estos filones oscila en un rango que va desde los 30 m hasta el límite inferior de detección sísmica, que para el volumen sísmico en cuestión es aproximadamente 7 m.

Para la correcta identificación de los cuerpos filones fue de gran utilidad, la técnica de *geobodies*. Esta técnica consistió en limitar el volumen sísmico a la zona de estudio, y mediante la utilización límites en la opacidad sobre la propiedad en estudio, se aislaron visualmente los cuerpos de interés. Una vez identificados estos cuerpos se los convirtió a propiedades en el modelo estático y esto se utilizó tanto en su mapeo como en la definición de los *landing points*.

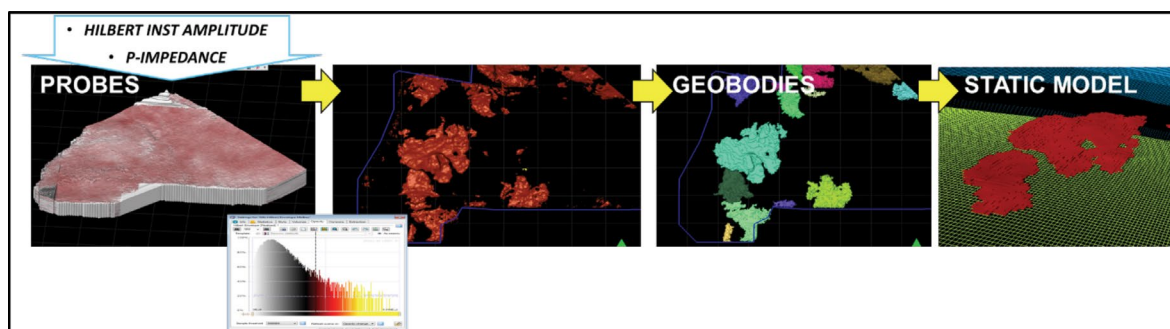


Figura 4. Flujo de trabajo utilizado para identificar y aislar los intrusivos generando *geobodies* como propiedades en el modelo estático.

Los filones identificados en el área de estudio fueron asignados a los respectivos niveles en los que se alojaron. Dichos filones tienen por definición una geometría planar y para-concordante a la estratificación, además se presentan en geometría circular a ovalada (en planta) y en ocasiones lobulados (Fig. 5). En algunos casos presentan una geometría escalonada (vista en corte vertical), referida en la bibliografía como “steeped” o “saucer-shaped” si presentan los bordes levantados (ejemplos de esta geometría son mencionados en Chevallier y Woodford, 1999; y en Svensen y Planke, 2003).

Es importante destacar también que en todos los casos dichos filones se encontraron asociados a diques verticales que habrían oficiado como canal alimentador de estos cuerpos.

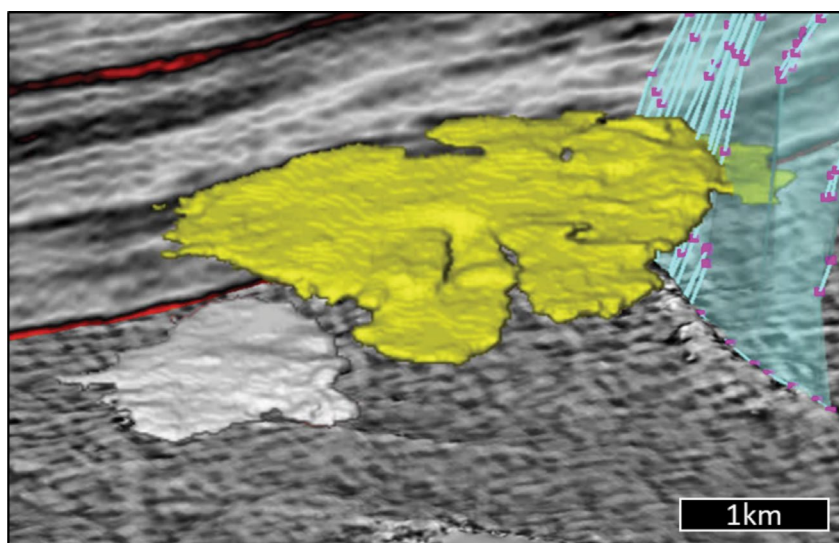


Figura 5. Ejemplo de filón con geometría característica: planar, lobulada y escalonada.

Diques

Por tratarse de rasgos verticales, es muy difícil su identificación en sismica de reflexión, no obstante, mediante la utilización de atributos estructurales (entre los que curvatura y coherencia resultaron ser los de mayor utilidad) algunos de estos cuerpos también pudieron ser identificados.

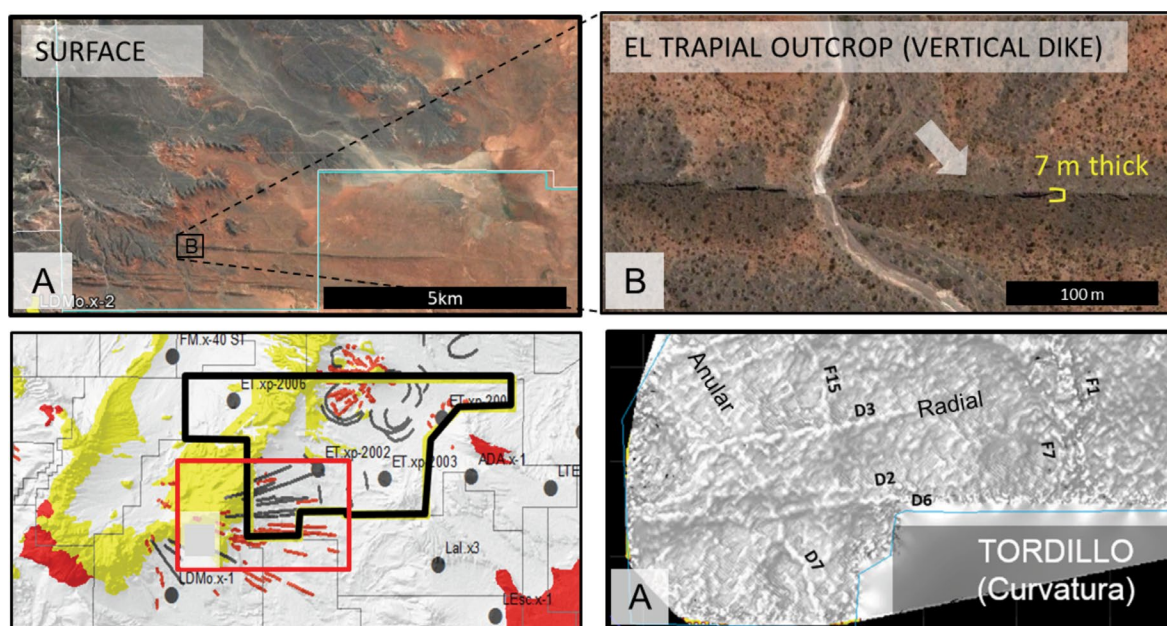


Figura 6. Arriba izquierda y derecha: Imagen satelital Google Earth donde se destacan los diques verticales aflorantes. Abajo izquierda: mapa subregional destacando la ubicación del bloque El Trapial y los principales elementos volcánicos de la región (los polígonos amarillos y rojos representan coladas volcánicas en superficie; las líneas negras y rojas representan los diques en subsuelo y aflorantes respectivamente). Abajo derecha: atributo de curvatura sobre el horizonte Tordillo (con la letra D se indica la posición de los diques tanto anulares como radiales al centro volcánico, y con la letra F se indica la traza de fallas que afectan a dicho reflector sísmico).

En la Fig. 6 puede verse el atributo de curvatura realizado sobre el reflector correspondiente al tope de Tordillo (base de Vaca Muerta). En esta imagen pueden reconocerse fácilmente varios rasgos lineales de gran continuidad lateral (nombrados con la letra D) y con una disposición radial y uno anular respecto al centro magmático de Cerro Bayo Sur Huantraico. Dichos rasgos fueron interpretados como diques radiales, por poseer la misma disposición que los diques reconocidos en superficie, y por observarse los mismos rasgos en sucesivos niveles estratigráficos relativamente en la misma posición.

El espesor de estos cuerpos es aún una incertidumbre que se mitigará durante la campaña de perforación, así como también el impacto que estos cuerpos pueden tener en la eficiencia de la terminación de los pozos. No obstante, considerando que en el área de interés estos cuerpos están dispuestos de forma paralela a subparalela a la actual dirección de esfuerzo máximo, no se espera una importante interacción entre la fractura hidráulica (cuya dirección principal de crecimiento se espera que también coincida con la dirección de esfuerzo horizontal máximo) y estos intrusivos. Adicionalmente y para mitigar los riesgos de que la fractura se encauce en la interface Vaca Muerta-dique, se dispondrán las etapas de estimulación alejadas de los cuerpos debidamente identificado mediante LWD y descripción de recortes.



Figura 7. Fotos de diques aflorantes en el área de estudio. En la imagen de la izquierda se observa la continuidad vertical del mismo. En la foto de la derecha se aprecian las fracturas naturales superficiales y un desplazamiento lateral del dique de unos 4 metros presumiblemente por una falla.

En cuanto a los estudios en superficie se identificaron en el área diques aflorantes relacionados a los 2 lacolitos. En el sur del bloque El Trapial dichos diques tienen una gran continuidad lateral, y en afloramiento pueden identificarse cuerpos de 2 a 10 km de longitud, con algunas interrupciones

por pequeñas fallas que generan un desplazamiento lateral de 2 a 3 metros, y un espesor que va de los 3 a 7 metros (Fig 7). En superficie se los observa naturalmente fracturados, aunque esto no se ha validado aún en subsuelo. Se presentan diques individuales, así como también enjambres de diques.

Su continuidad vertical pudo ser observada en un afloramiento donde el dique corta un desnivel de 300 metros de altura (Fig 7).

CAMPAÑA DE PERFORACIÓN

Para la planificación de la campaña de perforación appraisal en la zona de gas-condensado se fijaron como objetivos clave:

- Definir la productividad por niveles y área
- Definir donde navegar y fracturar los pozos
- Entender los factores que afectan la productividad en Vaca Muerta

Teniendo en cuenta estos objetivos se diseñó una campaña de perforación de 2 pads exploratorios. Cada pad está conformado por un pozo piloto que atravesará toda la sección vertical de Vaca Muerta y 4 pozos horizontales: 2 a ser navegados hacia el norte y 2 hacia el sur. La dirección de navegación de los pozos es perpendicular al esfuerzo horizontal máximo ($\sim 80^\circ$).

En el pozo piloto se correrán perfiles de última generación y con la interpretación petrofísica, geomecánica y de perfiles especiales se definirán los 4 niveles de navegación de los pozos horizontales, utilizando el flujo de trabajo desarrollado in house por el equipo de subsuelo denominado “BLEND” (*Best landing election for navigation determination*).

Con el fin de investigar cómo afecta a la productividad de Vaca Muerta, la presencia de los cuerpos ígneos se decidió ubicar 2 pozos de uno de los pads de modo tal que atravesen un dique vertical en los últimos 400 metros de su rama horizontal. Para definir si los diques se encuentran naturalmente fracturados se van a correr imágenes de pozo. Este dato es clave para poder predecir el comportamiento mecánico de los mismos durante la terminación de los pozos ya que su resistencia mecánica se vería afectada notablemente en caso de presentarse naturalmente fracturados. Adicionalmente, se utilizará microsísmica de superficie con geófonos enterrados a 30 metros de profundidad que cubrirán el área de ambos Pads, y ayudará al entendimiento de la interacción fractura hidráulica – cuerpos ígneos.

Los pozos horizontales se geonavegarán utilizando *Logging While Drilling* (LWD) con rayos gama azimutal y resistividad para poder mantenerse en el punto de aterrizaje seleccionado e identificar los cuerpos ígneos (Fig 8).

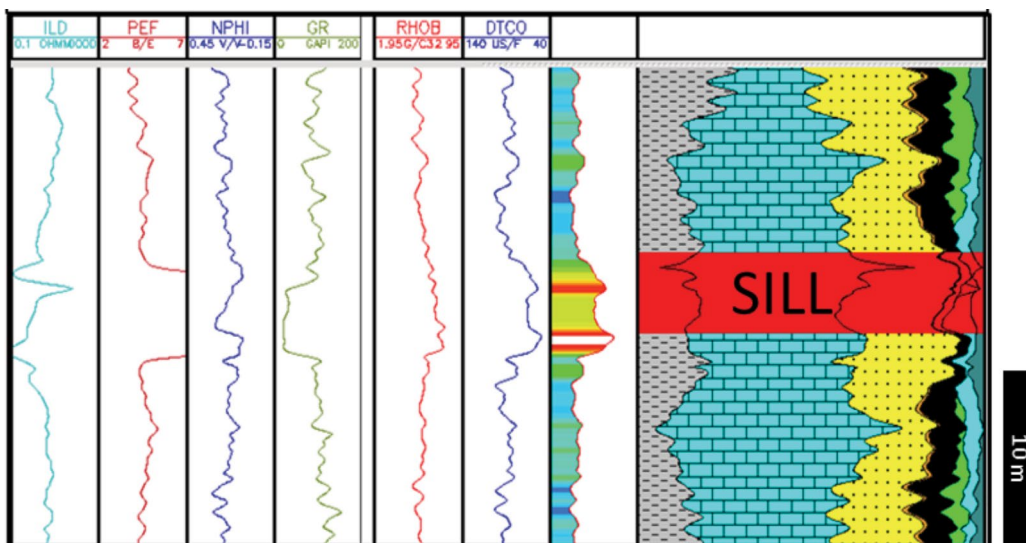


Figura 8. Ejemplo de un pozo de la campaña de exploración donde se atravesó un cuerpo intrusivo y las diferentes respuestas de los perfiles de pozo.

SIMULACIÓN NUMÉRICA. INTERACCIÓN FRACTURA HIDRÁULICA - CUERPOS ÍGNEOS

Con el objetivo de entender la interacción entre la fractura hidráulica y un cuerpo intrusivo ígneo, se realizaron simulaciones numéricas utilizando una aplicación que se alimenta de los datos del modelo estático para la generación de una red de fracturas hidráulicas en base a un diseño de terminación. En nuestro caso se utilizó el diseño programado de terminación proporcionado por el equipo de ingeniería de estimulación.

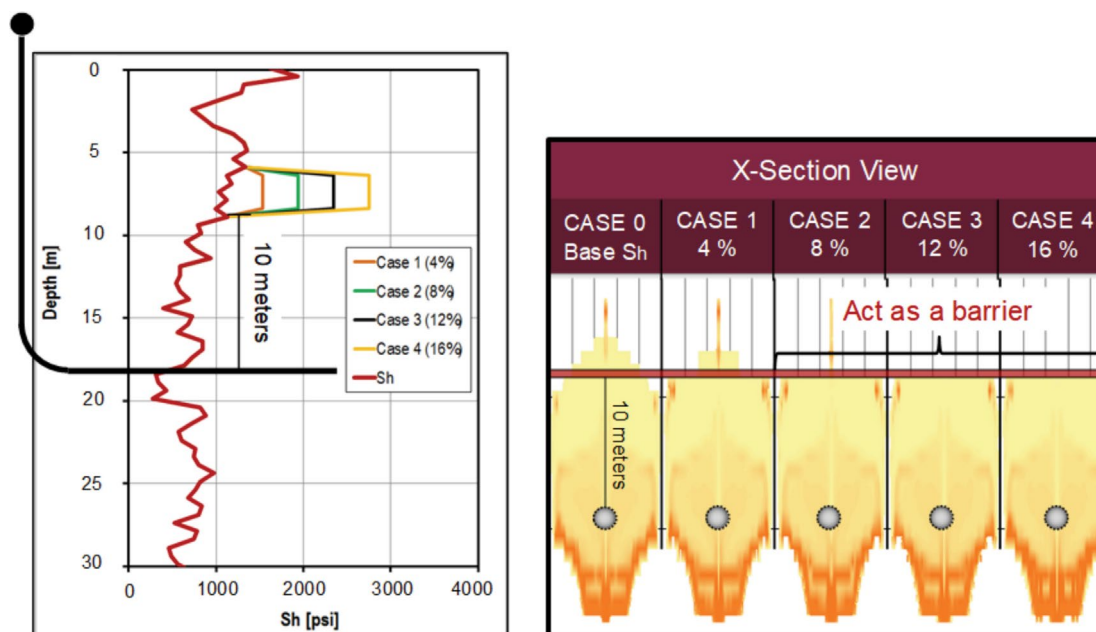


Figura 9a y b. Escenarios de Sh y resultados de la simulación

Identificación de barreras - Mínimo contraste de Sh:

Se utilizó un perfil de Sh, y se generó sintéticamente una zona de 2 metros de espesor con distintos casos de contraste de Sh (4%, 8%, 12% y 16%). Esta zona fue ubicada 10 metros por encima de la posición de aterrizaje del pozo (Fig 9a).

Los resultados de las simulaciones de este ejercicio muestran que un contraste de Sh de 8% hace que la fractura hidráulica necesite una energía para continuar su crecimiento en altura tal, que este intervalo se comporte como una barrera bajo las condiciones actuales de diseño de estimulación (Fig 9b). A fines prácticos, 6% de contraste de Sh es considerado para identificar potenciales barreras.

De acuerdo con la caracterización geomecánica de intrusivos ígneos realizada en muestras de coronas de pozos verticales, el contraste de Sh excedería ampliamente el mínimo necesario para que estos cuerpos se comporten como barreras ante la interacción con una fractura hidráulica (Fig 10).

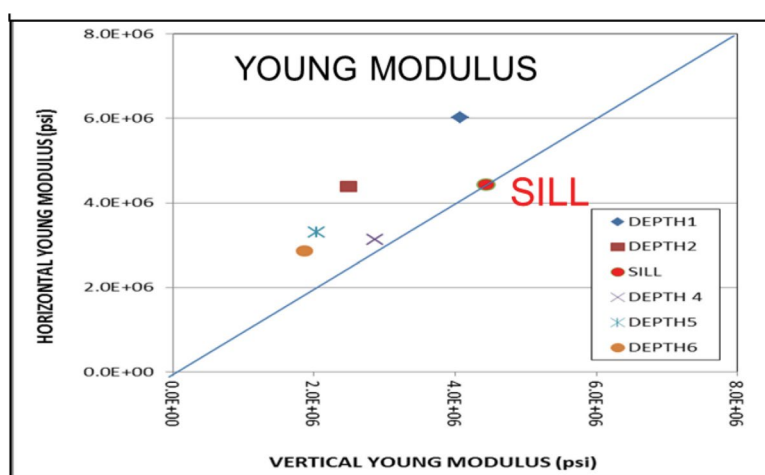


Figura 10. Resultados de ensayos triaxiales en laboratorio muestran que los filones son isótropos elásticamente.

Adicionalmente se debe tener en cuenta que, si estos cuerpos estuvieran naturalmente fracturados, las condiciones mecánicas se modificarían, y las conclusiones de este análisis podrían ser desestimadas. Perfiles de imagen de pozo y la adquisición de microsísmica, serán de gran utilidad para la calibración de estos modelos.

Distancia a la barrera

Una vez identificada una barrera, el siguiente ejercicio de interés, fue entender si la misma podría ser penetrada por la fractura hidráulica, posicionando el pozo a una distancia superior o

inferior a la del caso base de 10 metros. Para esto, dos ejercicios adicionales fueron simulados (5 y 20 metros) en los casos donde claramente la barrera había sido identificada (8% y 12% de contraste en S_h).

Los resultados de las simulaciones han mostrado que una barrera identificada no puede ser penetrada simplemente modificando la distancia a la misma (Fig. 11). Por el contrario, simulaciones adicionales realizadas demuestran que un pozo posicionado a una distancia escasa por debajo de una barrera genera un efecto “rebote” de la fractura hidráulica en la barrera, favoreciendo su crecimiento en profundidad de la fractura, situación indeseada desde el punto de vista de conectividad *near wellbore*.

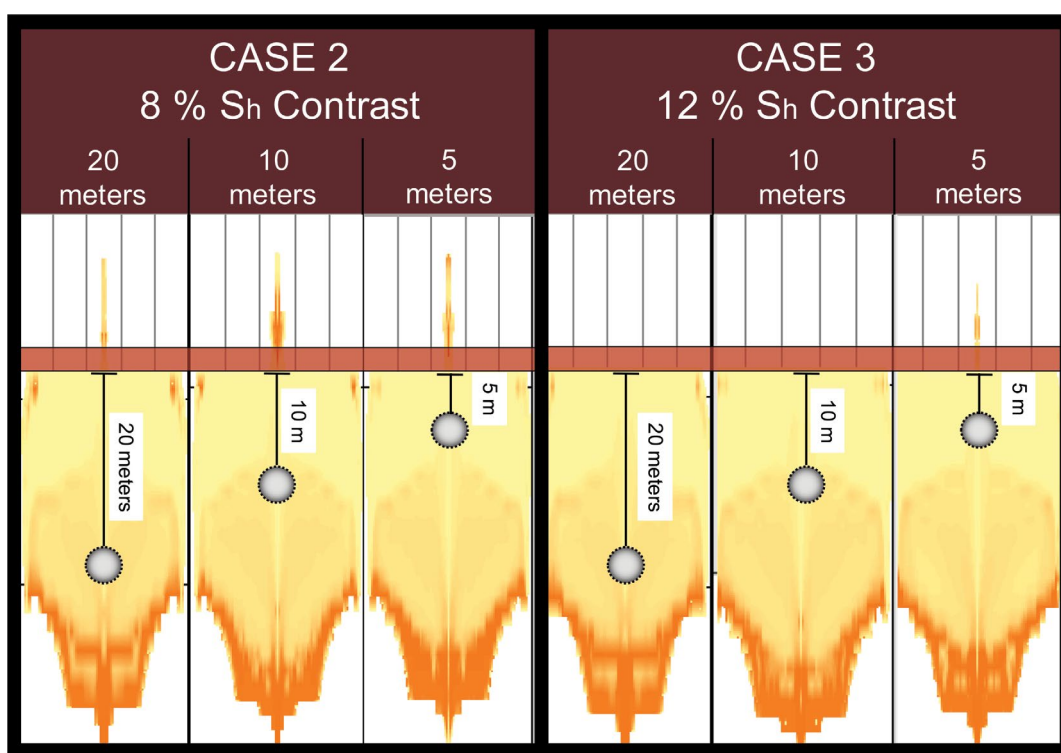


Figura 11. Sensibilidad a la distancia Barrera – *Landing Point*

CONCLUSIONES

En el área del El Trapial las intrusiones magmáticas jugaron un rol importante en la generación de trampas y sellos para el yacimiento convencional. No obstante, para el *play* No Convencional de Vaca Muerta, el rol de estos cuerpos es diferente y es necesario caracterizarlos para planificar la campaña de perforación. Identificar en el espacio los filones capa es fundamental para planificar la ubicación de los pozos y el mejor Punto de Aterrizaje (*Landing point*) de modo tal de evitar contactarlos durante la perforación horizontal de las ramas laterales. La técnica de

identificación de Geobodies demostró ser aplicable a esta problemática, pudiendo extraer los filones capa desde el cubo de amplitud y del de impedancia acústica y así utilizar la riqueza del modelo estático en la planificación de la perforación y eventualmente poder sacar ventaja de la presencia a una distancia “conocida” de los mismos. Con el análisis de atributos sísmicos en secciones tiempo se identificaron y mapearon los rasgos verticales: diques radiales y anulares. El plan de adquisición de datos permitirá caracterizar la presencia de fracturas naturales en los diques mediante imágenes de pozo; la microsísmica dará información del comportamiento de estos cuerpos frente al fracturamiento hidráulico. Con el estudio de los cuerpos aflorantes se validó la interpretación de subsuelo y se vinculó estos cuerpos ígneos con el Lacolito de Huantraico. No se ha detectado presencia de CO₂ anómalo vinculado a este centro magmático en la anterior campaña de exploratoria de perforación así como tampoco en los pozos perforados por otras compañías en las áreas alrededor del mismo.

La simulación de fracturas hidráulicas ha demostrado que, utilizando la actual caracterización mecánica de cuerpos ígneos obtenida durante la campaña exploratoria, estos cuerpos podrían comportarse como barreras mecánicas al momento de la terminación de los pozos. Esta condición mecánica podría ser diferente si los cuerpos están naturalmente fracturados. La microsísmica ayudará a tener un mejor entendimiento entre la interacción fractura hidráulica–cuerpos ígneos.

La planificación en etapas de las campañas de perforación está enfocada en la toma de datos y caracterización del *play* para minimizar los riesgos inherentes a la presencia de los cuerpos ígneos pero a su vez aprender y definir el mejor nivel de geonavegación.

NOMENCLATURA

Sh: Mínimo Stress

VM: Vaca Muerta

LWD: *Logging While Drilling*

GR: *Gamma ray*

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a Chevron Argentina y al IFC por autorizar compartir los flujos de trabajo y resultados aquí exhibidos. A Juan Pablo Romanato y a todo el equipo de subsuelo de Chevron Argentina quienes con sus observaciones contribuyeron a mejorar el presente trabajo. A los revisores Ivan Lanusse Noguera y Sebastián Galeazzi por sus correcciones, comentarios y sugerencias.

REFERENCIAS

- Agusto M., D. Yagupsky, D. Winocur, J. Tobal, F. Calatayud Basualdo, M. Fantín, F. González Tomasini, 2014, "Estudio sobre el origen de las concentraciones anómalas de CO₂ en el área del Cerro Bayo de la Sierra Negra (Cuenca Neuquina)". IX Congreso de Exploración y Desarrollo de Hidrocarburos. IAPG. Mendoza, Argentina.
- Chevallier, Woodford, 1999, "Morpho-tectonics and mechanism of emplacement of the dolerite rings and sills of the western Karoo, South Africa. *South African Journal of Geology*"; 102, 1; 43-54
- Cobbold, P. R. y E. Rossello, 2003, "Aptian to recent compressional deformation, foothills of the Neuquén Basin, Argentina. *Marine and Petroleum Geology* 20 (5): 429-443
- Cristallini, E., J. Likerman, L. Gallo, R. Tomezzoli, M. Fantín, y D. Sotelo, 2013, "Caracterización estructural y evolución tectónica del bloque El Trapial (Provincia del Neuquén)". Informe inédito, p. 38, Chevron Argentina.
- Fantín, M.A. y R. Gonzalez, 2014, "Primeros Pasos en la Evaluación de Vaca Muerta como Reservorio No-Convencional en el Bloque El Trapial. IX Congreso de Exploración y Desarrollo de Hidrocarburos", IAPG, Mendoza, Argentina.
- Galerne C. 2009, "Emplacement mechanisms and magmatic differentiation induced by magma flow in sill intrusions in sedimentary basins" PhD thesis, University of Oslo. Faculty of Mathematics and Natural Sciences.
- Gressier, J.B., R.Mourgues, L.Bodet, J.Matthieus, O.Galland y P.Cobbold. 2010, "Control of pore fluid pressure on depth of emplacement of magmatic sills: An experimental approach" *Tectonophysics* 489 (2010) 1-13
- Kay, S.M., y P. Copeland, 2006, "Early to middle Miocene backarc magmas of the Neuquén Basin: Geochemical consequences of slab shallowing and the westward drift of South America", *Geological Society of America Special Paper* 407: 185-213, doi: 10.1130/2006.2407(09).
- Kattenhorn, Simon Allen, 1994, "Mechanisms of Sill and Dyke Intrusion", *Masters of Science in the Department of Geology and Applied Geology University of Natal (Durban)*.
- Price, N.J. y J.W. Cosgrove, 1990, "Analysis of Geological Structures", Cambridge University Press, p. 520.
- Llambías, E., L. Soave, y P. Ferraresi, 2013, "Lithologic and petrographic study of sills". Informe inédito, LCV. S.R.L.
- Suppe, J., 1985, "Principles of structural geology". Prentice-Hall, Inc. Englewood Cliffs. pp.537. New Jersey.
- Svensen, H., S. Planke, B. Jamtveit, y T. Pedersen, 2003, "Seep carbonate formation controlled by hydrothermal vent complexes: a case study from the Vøring volcanic basin", the Norwegian Sea. *Geo-Marine Letters* 23, 351-358).
- Widess, M.B., 1973, "How thin is a thin bed", *Geophysics*, 38, 1176-1180.