

IDENTIFICACIÓN Y DELINEACIÓN DE INTRUSIVOS ÍGNEOS A PARTIR DE IMÁGENES MICRO-RESISTIVAS DE ALTA RESOLUCIÓN DE LA PARED DEL POZO E IMÁGENES PROFUNDAS DE LA ONDA DE CORTE HORIZONTAL OBTENIDA CON LA HERRAMIENTA ACÚSTICA DIPOLAR CONVENCIONAL EN LOS YACIMIENTOS VOLCÁN AUCA MAHUIDA Y LAS MANADAS-RISCO ALTO EN LA CUENCA NEUQUINA, ARGENTINA

**Juan Grisolia¹, Guillermo Crespo¹, Martin Paris¹, Lorena Nicolini¹, Soledad Ribas²,
 Mariana Beatove², Daniel Mallimaci²**

1: Baker Hughes a GE Company, juan.grisolia@bakerhughes.com, guillermo.crespo@bakerhughes.com,
martin.paris@bakerhughes.com, lorena.nicolini@bakerhughes.com

2: YPF S.A., soledad.ribas@ypf.com, mariana.beatove@ypf.com, daniel.mallimaci@ypf.com

Palabras clave: Volcán Auca Mahuida, Intrusivos ígneos, diques, filón capa, Imagen profunda de onda de corte (Deep Shear Wave Imaging –DSWI–), Imagen micro-resistiva, nuevo procesamiento

ABSTRACT

Identification and delineation of intrusive igneous from high-resolution micro-resistive borehole imaging and deep-shear wave imaging obtained with a dipolar-acoustic tool on Auca Mahuida volcano and Las Manadas-Risco Alto fields.

In the Neuquén Province, Argentina, the use of high technologies like borehole wall multi-frequency micro-resistive imaging and cross-dipole acoustics to obtain deep images into the formation. The results have significant benefits to understanding igneous intrusive distribution that have negative effects on all reservoirs associated with the Auca Mahuida Volcano (Fields: Auca Mahuida Volcano, Las Manadas and Risco Alto Norte).

On the surface, a thick basaltic layer limits seismic coverage, complicating the study of the intrusive network. The dykes found on the surface have been extrapolated to the subsoil trying to establish correlation with the subsurface analysis. But based on more detailed analysis, the surface intrusive distribution is different from the subsurface because subsoil dykes may have used pre-existing fractures to intrude the sedimentary rock.

With the micro-resistive images, it is possible to determine accurate strike, dip of fractures, beds, micro-faults, and intrusive, and differentiate the type of intrusive (dyke or sill). Micro-resistive images have limited value for confidently extrapolating the distribution of intrusives beyond the borehole wall. The deep-shear-wave imaging (DSWI), however, becomes relevant because this technology can map the intrusive bodies, and fracture corridors up to 30 meters inside the formation.

Since the intrusive wants to be avoided when drilling future wells, it is concluded that the use of these two technologies in combination improves the understanding and prediction of their behavior.

INTRODUCCIÓN

Los yacimientos Volcán Auca Mahuida, Las Manadas y Risco Alto Norte, cercanos al Volcán

Auca Mahuida en la Provincia del Neuquén, Argentina, representan una importante reserva de hidrocarburos tanto líquidos como gaseosos, este volcán y sus procesos asociados (diques, filones capa, lacolito, etc.) han generado efectos nocivos en estos reservorios como entrapamientos locales con acumulaciones muy limitadas, desvinculación hidráulica entre arenas al mismo nivel estratigráfico, destrucción parcial o total de las mejores arenas productoras y alteración petrofísica de las zonas cercanas a los contactos con los intrusivos, siendo este último punto un importante problema que enmascara y complejiza la diferenciación entre hidrocarburos líquidos y gaseosos, el cual no es contemplado en este trabajo.

El objetivo principal es evitar la compleja red de intrusivos ígneos (diques y filones capa) y para ello es vital comprender el comportamiento espacial (rumbo y buzamiento), frecuencia y espesor tanto aparente como verdadero. La utilización de la imagen micro-resistiva de la pared del pozo, es la tecnología disponible que mejor define y jerarquiza los intrusivos, pudiendo así discriminar entre dique o filón capa.

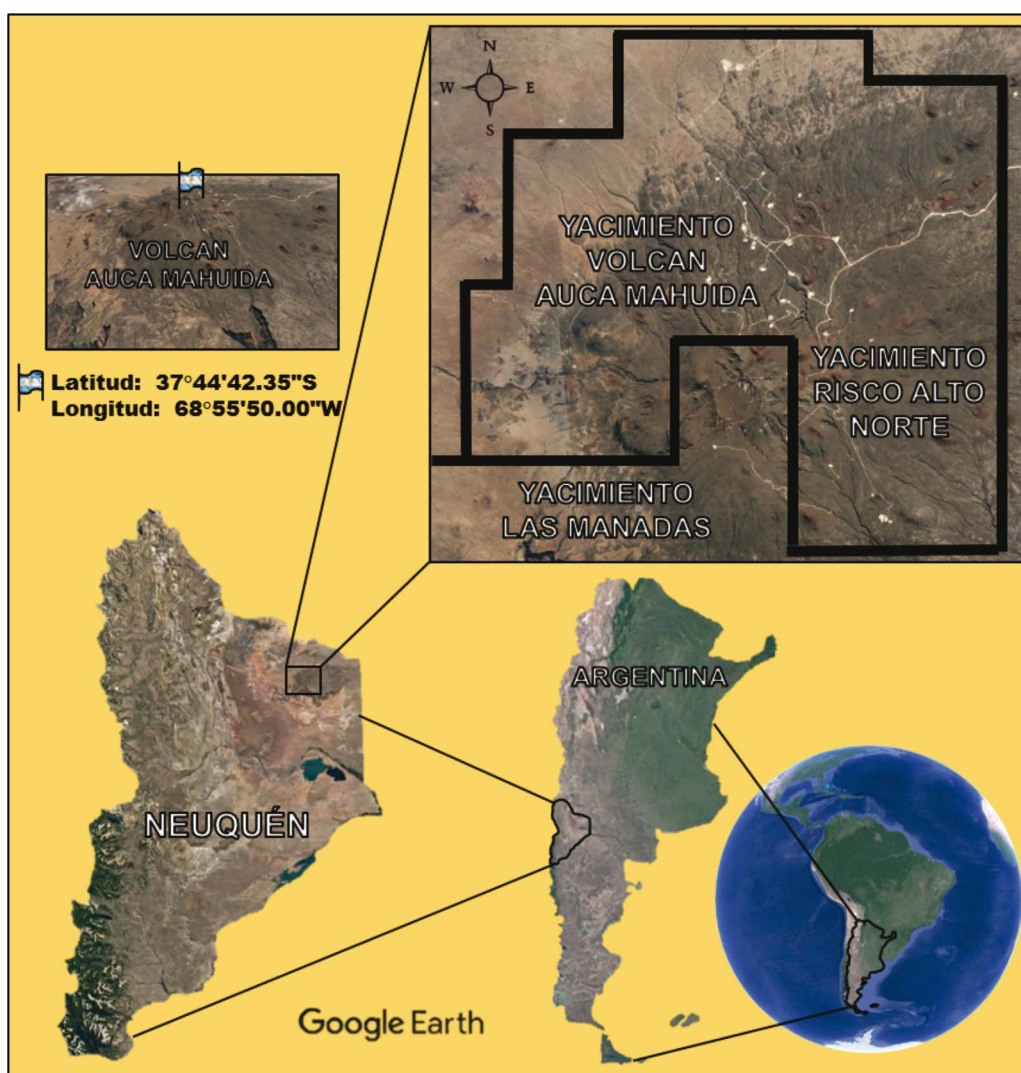


Figura 1. Ubicación del área de estudio. Volcán Auca Mahuida.

Recientemente se incorpora un nuevo procesamiento de los datos provenientes de la herramienta acústica de dipolos cruzados, que aporta en forma sustancial a la comprensión de los intrusivos ígneos más allá de la pared del pozo, generando una imagen en cortes orientados que permiten visualizar hasta un diámetro de 60 metros dentro de la formación.

LOCALIZACIÓN

Los yacimientos Volcán Auca Mahuida, Las Manadas y Risco Alto Norte están localizados al noreste de la Provincia del Neuquén, a unos 150 km. al noroeste de la ciudad del Neuquén (Fig.1).

ESTRUCTURA Y ESTRATIGRAFÍA DEL ÁREA DE ESTUDIO

Los yacimientos Volcán Auca Mahuida, Las Manadas y Risco Alto Norte se encuentran cubiertos por flujos basálticos con espesores que van desde 250 hasta 600 metros, formados por el ahora extinto Volcán Auca Mahuida. Esta cobertura de basaltos genera una respuesta sísmica de baja calidad (Sigismondi, 2012).

El área se caracteriza por el alto estructural de Auca Mahuida que tiene una forma cómica, en contraste con un anticlinal clásico. Interpretaciones recientes han vinculado los eventos a un carácter multi-episódico y de origen mixto, debido a la interferencia entre estructuras antiguas y regímenes de esfuerzos más modernos. El emplazamiento del complejo volcánico Auca Mahuida (2.4-0.8 Ma) produjo un levantamiento térmico y deformación por el emplazamiento de cámaras magmáticas en profundidad, e intrusión de filones y diques en posiciones subsuperficiales (Delpino & Bermúdez, 2001).

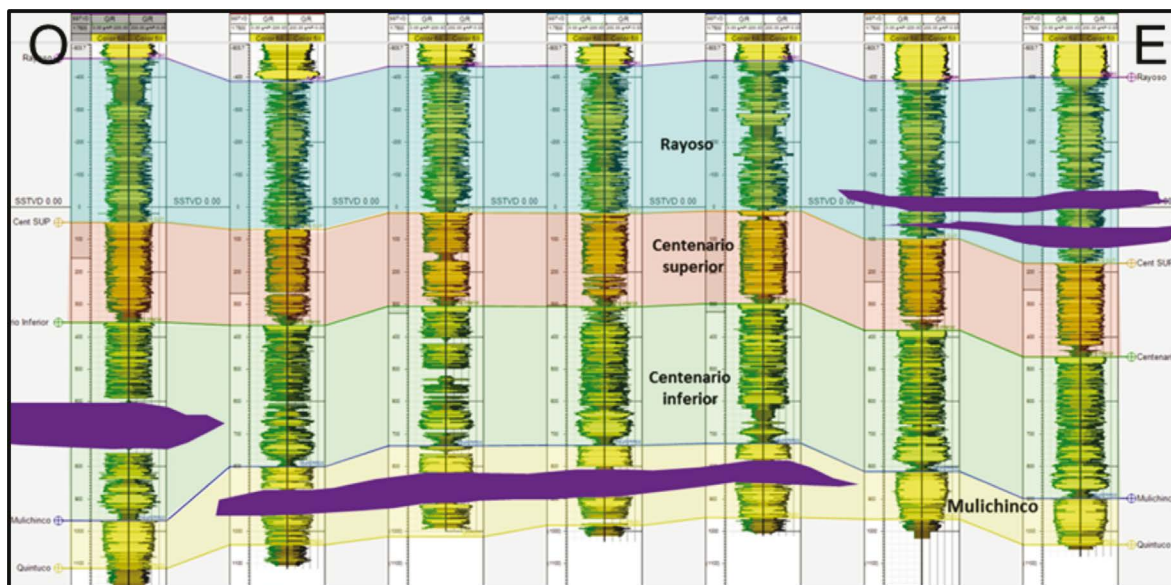


Figura 2. Corte estructural O-E mostrando la continuidad de las formaciones dentro del yacimiento, modificando su espesor sólo por la intrusión de filones capa.

Las formaciones geológicas que se encuentran involucradas en el área de estudio son Mulichinco, Centenario (Valanginiano – Berramiano) y Rayoso (Aptiano – Albiano) (Fig. 2).

El espesor de las formaciones se mantiene constante a lo largo de todo el yacimiento, aumentando sólo en las zonas con presencia de filones capa. La figura 2 corresponde a un corte estructural que muestra el aumento de espesor.

La Formación Mulichinco está mayormente compuesta por areniscas que se presentan como cuerpos con una disposición aproximadamente tabular, separados por niveles impermeables de depósitos pelíticos (Fig. 3). La unidad posee un espesor relativamente constante de ~160 a 145 m dentro del yacimiento, disminuyendo levemente de sur a norte, modificándose también por la presencia de intrusivos, principalmente emplazados hacia el sur del área (Mallimaci *et al.* 2017). El modelo paleo-ambiental define un origen principalmente continental con algunas intercalaciones de origen marino en la base (Schwarz, Spalletti & Veiga, 2011). Su porosidad varía entre el 14 y 23%, mientras que la permeabilidad oscila entre 5 y 280 mD., promediando 30 mD. en esta zona.

Suprayacente a la Formación Mulichinco apoya en forma neta un paquete pelítico de 20 a 25 m de espesor y gran extensión regional. Este intervalo, donde comienza el miembro inferior de la Formación Centenario, se relaciona a la inundación producida en la Cuenca Neuquina durante el Valanginiano superior, el mismo se completa con una sucesión de paquetes arenosos con intercalaciones de delgados niveles pelíticos y subordinadamente niveles carbonáticos. El espesor total del miembro inferior de la Formación Centenario en el área del Volcán Auca Mahuida, presenta muy poca variación con valores cercanos a los

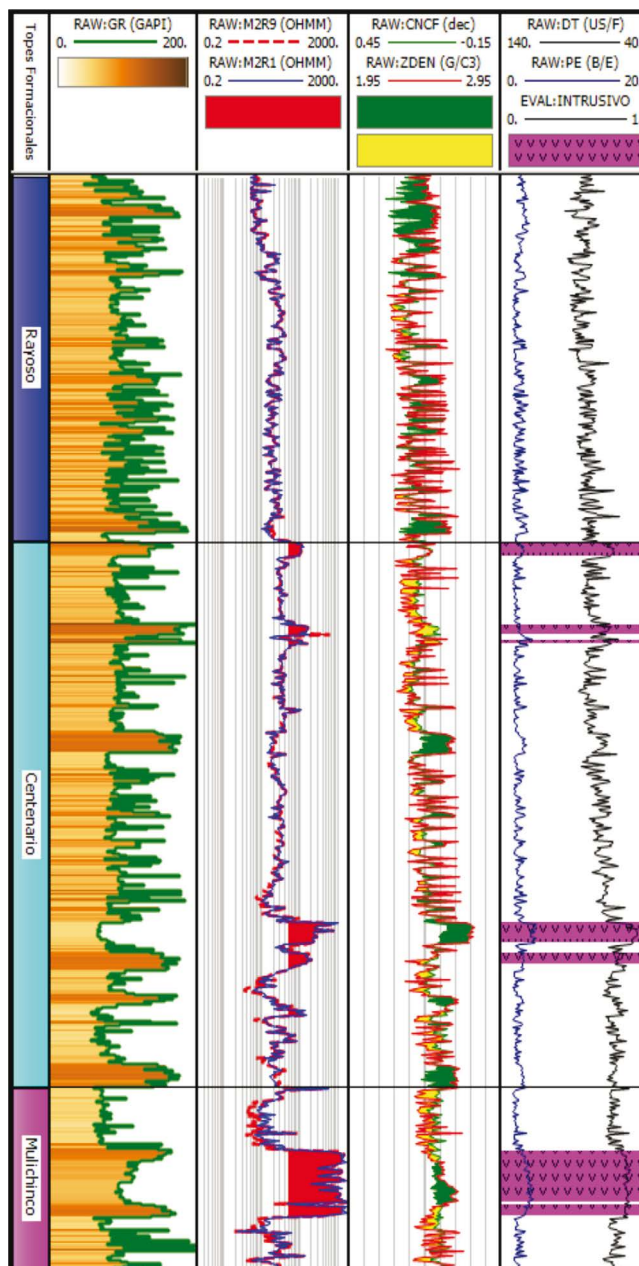


Figura 3. Perfil tipo de la zona Sur del Yacimiento Volcán Auca Mahuida, en el cual se observan los cuerpos ígneos identificados.

450 m. El paleo-ambiente se interpreta como marino somero, posiblemente relacionado a un complejo estuarino con influencia de mareas, conectado a sistemas fluviales (Delpino *et al.* 2012), Las porosidades alcanzan hasta 20% con permeabilidades máximas de 350 mD (Grisolia *et al.* 2018) y promedio de 40 mD.

La formación Rayoso es una unidad clástico-evaporítica acumulada en un medio predominantemente continental (Zavala & Ponce, 2011) compuesta de areniscas y pelitas asociadas a sistemas fluviales efímeros que invaden la llanura de inundación y playas lacustres. Dentro del contexto regional, el yacimiento Volcán Auca Mahuida se ubicaría en una zona de centro de cuenca, lo que explicaría este mayor desarrollo de depósitos de areniscas y la ausencia de niveles evaporíticos (Ribas, S., Villar, M., Beatove M., 2016) (Fig. 3). El espesor promedio es de 450 metros, porosidades de alrededor de 24% y permeabilidades que alcanzan hasta 400 mD.

MODELO GEOLÓGICO

La actividad magmática relacionada al complejo volcánico Auca Mahuida generó diferentes intrusiones de rocas ígneas (diques, filones capa, lacolitos, etc.) que modificó el campo de esfuerzos original. La roca de caja circundante resultó así deformada, generándose nuevas estructuras asociadas como domos, pliegues, flexiones, escalonamientos, etc. (Pioli *et al.* 2016) (Fig. 4).

El alto de la zona central del yacimiento se presenta en forma cómica y a su vez puede subdividirse en sectores con distintos controles estructurales y esquema de mineralización. En la parte correspondiente al yacimiento Volcán Auca Mahuida propiamente dicha el alto está controlado por el emplazamiento de un cuerpo ígneo dentro de la Formación Mulichinco que alcanza hasta 100 metros de espesor.

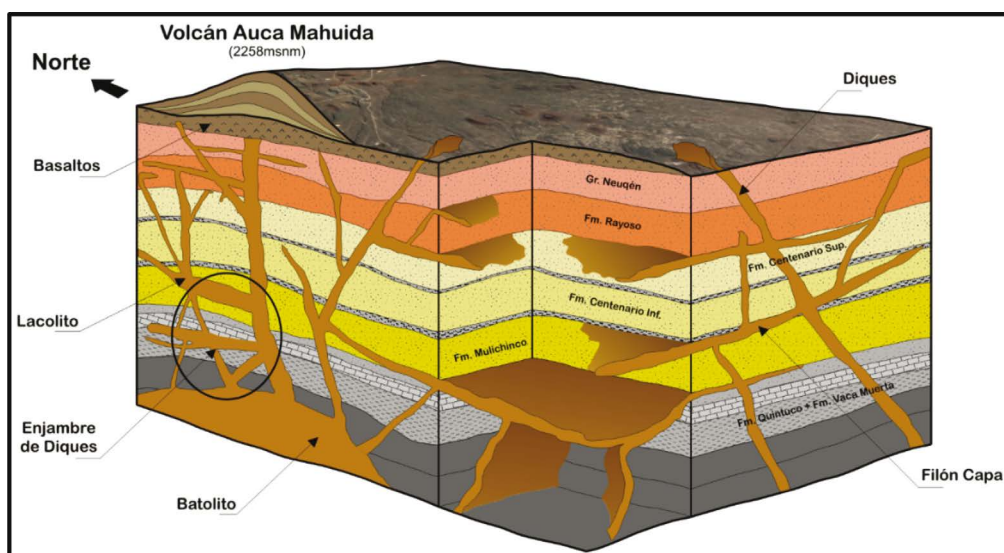


Figura 4. Modelo geológico idealizado mostrando la compartimentalización de la roca por efecto de los intrusivos ígneos. Modificado de González *et al.* 2005. Dibujo: Jorge Cavilla.

Hacia el este y norte este cuerpo que corresponde a un lacolito desaparece rápidamente reduciéndose su espesor, culminando contra fallas o cortando en forma de rampa la secuencia

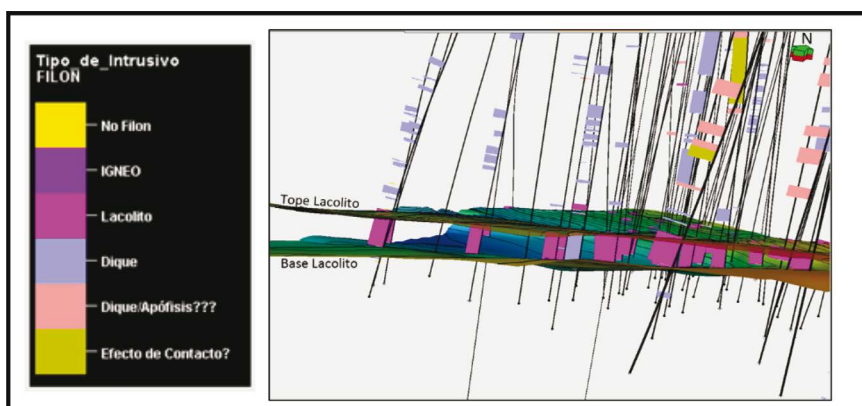


Figura 5. Identificación de los cuerpos intrusivos en los pozos. El lacolito se encuentra identificado dentro de la Formación Mulichinco y llega a tener 100 metros de espesor.

para alojarse en la parte basal de la Formación Centenario inferior. Este lacolito se encuentra bien identificado con los pozos y ubicado en el modelo estático 3D del yacimiento (Fig. 5), así como los otros cuerpos ígneos identificados en los pozos.

La trampa del yacimiento es estructural, y la estructuración resultante es altamente compleja, especialmente hacia el sur, generando una fuerte compartimentalización asociada a la presencia de diques y fallas. La misma es puesta en evidencia por la presencia de distintos contactos de gas-petróleo-agua en la extensión del yacimiento. (Pioli *et al.* 2016). La figura 6 es un detalle de la grilla 3D de la zona central del yacimiento donde se muestra la distribución de fluidos en el reservorio

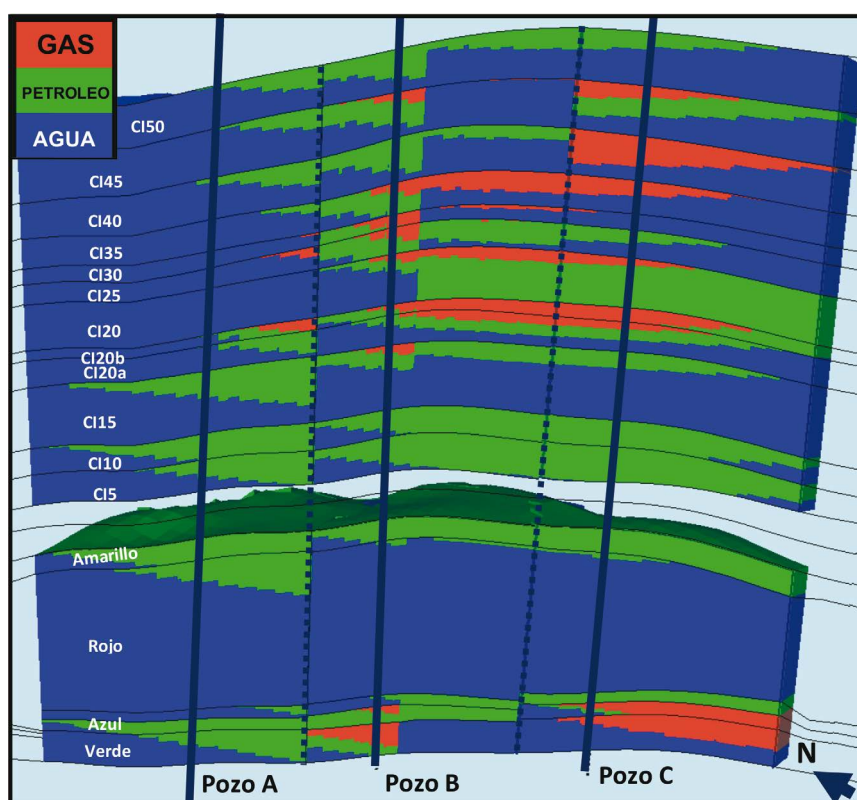


Figura 6. Grilla 3D de la zona central del yacimiento donde se muestra la distribución de fluidos en el reservorio por bloque y por capa. Detalla la compleja distribución de los fluidos en los pozos A, B y C que se encuentran a 400 metros de distancia.

por bloque y por capa. Se puede ver cómo estos 3 pozos (A, B y C), ubicados aproximadamente a 400 m de distanciamiento, presentan distintos contactos de gas-agua, gas-petróleo y petróleo-agua para los mismos niveles dentro de las formaciones Centenario inferior y Mulichinco.

MÉTODOS CONVENCIONALES EN LA IDENTIFICACIÓN DE CUERPOS ÍGNEOS

El control geológico, parámetros de perforación y perfiles convencionales son los métodos que habitualmente se dispone para la identificación de los cuerpos ígneos pero debido a que presentan amplio rango composicional y diferentes grados de alteración lleva a respuestas eléctricas, radioactivas, acústicas, ROP y torque muy variables. Cuerpos intrusivos de delgado espesor son usualmente no identificados con el control geológico debido a la baja frecuencia de muestreo y altas velocidades de perforación.

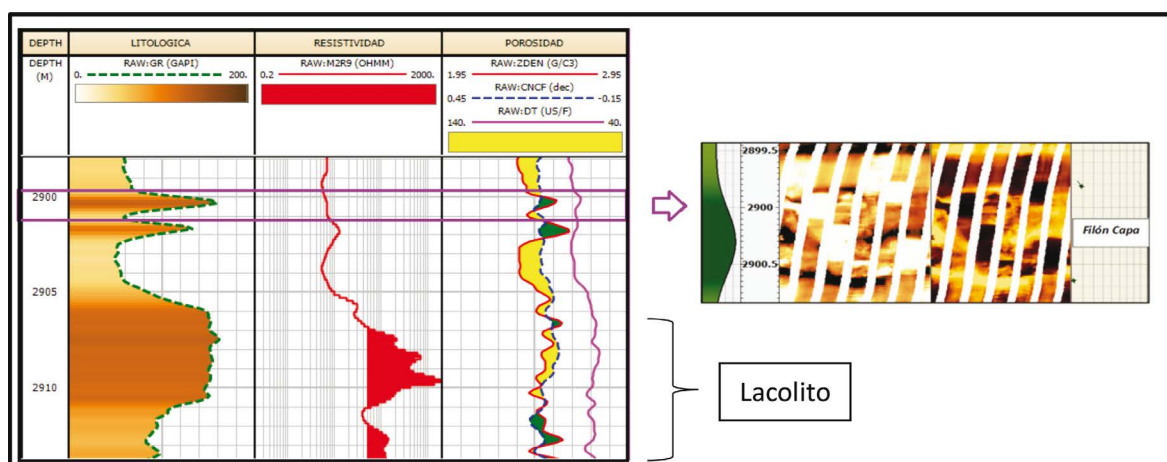


Figura 7. Interpretación de un filón capa en la parte superior del lacolito, Fm Mulichinco.

Los intrusivos ígneos se localizan en estas formaciones de manera aleatoria, por lo tanto, su interpretación con perfiles convencionales es extremadamente compleja debido a la gran variabilidad (altos y bajos valores de GR, picos de resistividad alta con zonas que bajan, cruce de densidad-neutrón positivo y negativo), generando alto grado de incertidumbre (Grisolia *et al.* 2018), pero los registros de imagen de pozo la han disminuido gracias al reconocimiento de cuerpos ígneos menores de 1 metro de espesor lo que en ocasiones se verificó a través de obtención de testigos laterales rotados (Fig. 7).

La presencia de estos cuerpos ígneos (Fig. 8) afectan las operaciones de perforación, ya que su grado de alteración, dureza y fracturamiento condicionan los tiempos operativos, diseño de trayectorias, ensamblaje de fondo (BHA), selección de trépanos y maniobras. En ocasiones estas zonas presentan pérdidas de circulación o de mal calibre poniendo en riesgo la operación.

Lograr identificar los cuerpos ígneos, su tipología y/o modo de emplazamiento, espesor real/aparente y rumbo/buzamiento de manera de disponer un modelo geológico más predictivo resulta beneficioso en todas las etapas del proyecto.

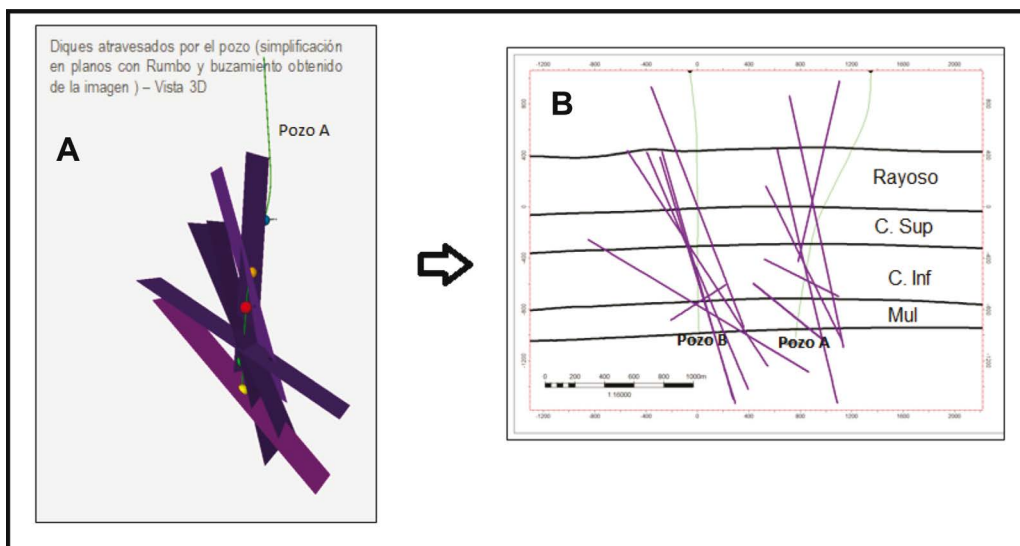


Figura 8. A: Diques atravesados por el pozo A representados en forma de planos. B: Corte esquemático entre 2 pozos, mostrando la orientación de los cuerpos ígneos proyectados a un plano de intersección.

IMAGEN PROFUNDA DE LA ONDA DE CORTE (DEEP SHEAR WAVE IMAGING –DSWI–)

Las técnicas usadas para realizar imágenes acústicas profundas (no ultrasónicas, de la pared del pozo) han ido evolucionando por muchos años, usando diferentes modos de onda (compresional –P–, de corte –S–) y usando diferentes fuentes (monopolar, dipolar), estos estudios se han venido realizando desde Hornby en 1989 hasta Tang y Patterson en 2009 (Cazeneuve *et al.* 2016). Es importante señalar que la herramienta utilizada para este novedoso procesamiento es la acústica convencional de dipolos cruzados y onda completa.

Los primeros intentos en realizar imágenes acústicas que viajaran más allá de la pared del pozo fueron realizados solamente con la onda compresional (P) desde fuentes monopolares, las cuales, tienen una radiación azimutal uniforme, donde los receptores registran la energía de la onda en todas las direcciones (omnidireccional), por consiguiente, las imágenes acústicas basadas en medidas desde herramientas monopolares no pueden determinar el rumbo de los reflectores, en contraste con medidas acústicas direccionales (Fig. 9) que usan fuentes dipolares cruzadas, las cuales pueden medir el rumbo y el ángulo

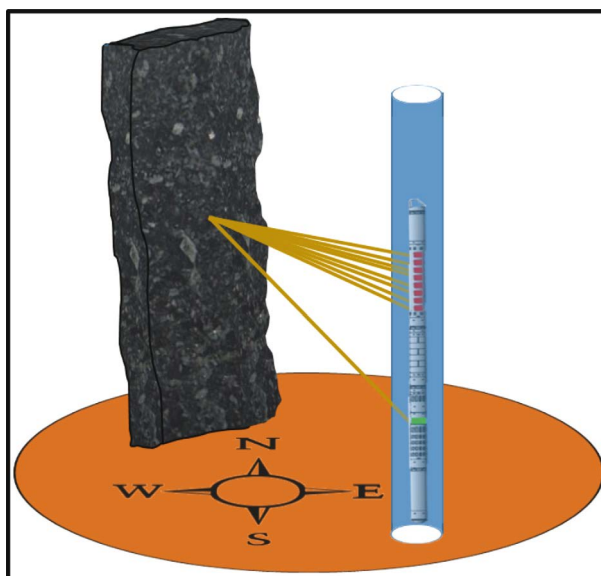


Figura 9. Herramienta acústica dipolar con un reflector alejado de la pared del pozo mostrando rayos de ondas direccionadas y su potencial de determinar el rumbo y el ángulo de inclinación de los reflectores geológicos.

de inclinación del reflector (Tang & Patterson, 2009).

El uso de fuentes dipolares cruzadas, no solamente permiten determinar el rumbo y el ángulo de inclinación de los reflectores, sino que también visualiza más profundo dentro de la formación por atenuarse en menor grado debido a las bajas frecuencias ~ 2 a 3 kHz (Fig. 10) comparados con ~ 8 a 15 kHz (Fig. 11) para las fuentes monopoles (Bolshakov, Patterson & Lan, 2011).



Figura 10. Dipolo mostrando el movimiento de la fuente y la direccionalidad preferencial de la onda generada dentro del pozo. Frecuencia $\sim 2 - 3$ kHz.

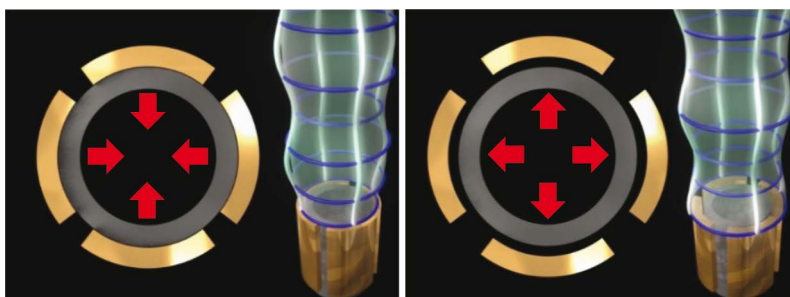


Figura 11. Monopolo mostrando el movimiento de la fuente y la omnidireccionalidad de la onda generada dentro del pozo. Frecuencia $\sim 8 - 15$ KHz.

Comparando los recientes desarrollos de las imágenes profundas de la onda de corte (Deep Shear Wave Imagen –DSWI–) con las imágenes de onda compresional convencional, se tiene que las principales ventajas de la DSWI son: mayor profundidad de investigación, excelente respuesta a los reflectores y por último, el dipolo se rige mayoritariamente por un solo modo, en contraste con el monopolo que tiene los modos compresional, corte refractada y stoneley (Sadigova, Page, Tyurin & Ionnikoff, 2016).

En el ambiente del pozo, una fuente acústica dipolar genera tres tipos de ondas, una es compresional (P) (Fig. 12 A) y las otras dos son de corte (S) (Fig. 12 B). Las ondas de corte se descomponen en: onda de corte horizontal (SH –Shear Horizontal–) que se polariza en el plano horizontal, y la onda de corte vertical (SV –Shear Vertical–) que se polariza en el plano vertical (Sadigova *et al.* 2016).

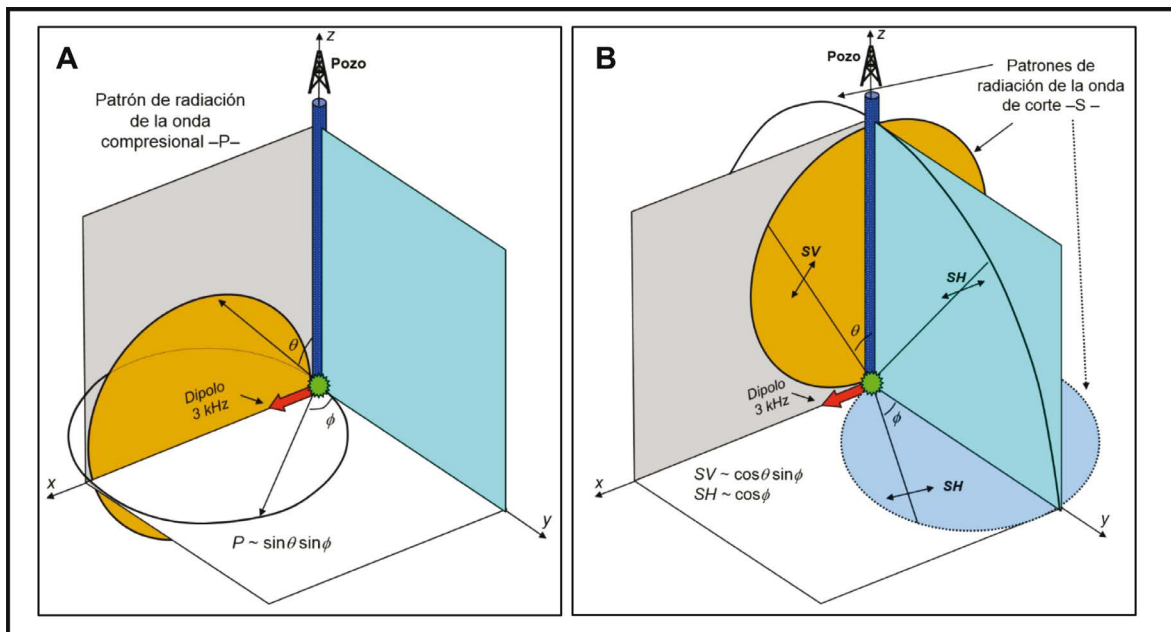


Figura 12. Patrones de radiación desde una fuente dipolar de baja frecuencia (direccionada en el eje x).

Estudios teóricos han mostrado que la onda de corte horizontal –SH– es mucho más fuerte y da mayor cobertura que la onda de corte vertical –SV– (Tang & Patterson, 2009) (Fig. 13).

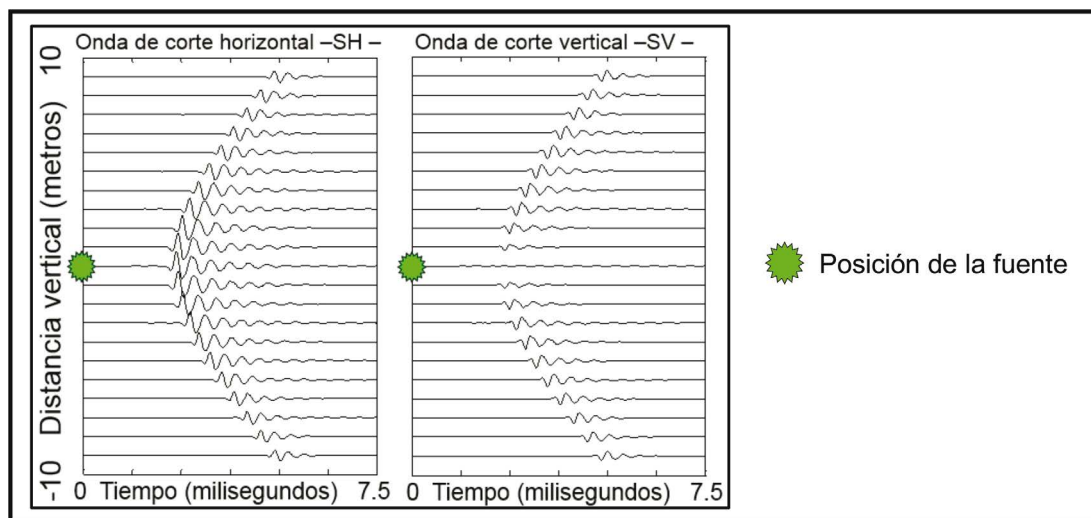


Figura 13. Variación de la amplitud de la onda de corte respecto a la ubicación de la fuente. Note como la onda de corte vertical (SV) tiene nula amplitud frente a la fuente y en general es mucho menor. Esto muestra que la onda de corte horizontal (SH) tiene mejor cobertura que la vertical (SV).

Las técnicas de procesamiento consisten de 3 grandes pasos:

1) **Separación de las reflexiones de los arribos directos:** como las ondas directas tienen una naturaleza determinística, sus lentitudes (Fig. 14 A) a lo largo del arreglo de receptores pueden ser

estimadas, y de esta manera sustraída del total de los datos, tomando las ondas reflejadas para el proceso.

2) **Separación de la señal reflejada en reflexiones ascendentes y descendentes:** para obtener las reflexiones cuando la herramienta se encuentra por arriba del reflector, es necesario que un receptor común almacene las ondas en una posición fija y los transmisores vayan cambiando de posición (arreglo de transmisores), asimismo, para obtener reflexiones cuando la herramienta se encuentra por debajo del reflector se trabaja con un transmisor común y varios receptores en diferentes posiciones (Fig. 14 B) (arreglo de transmisores, diseño físico de la herramienta, esto es, 1 transmisor –8 receptores–). Este paso también ayuda a eliminar ruidos en la imagen final cuando los datos son migrados de tiempo a distancia.

3) **Apilado de las reflexiones:** en este paso se realiza una mejora de la relación señal / ruido mediante diferentes metodologías que pueden ser usadas basados en el conocimiento previo del ángulo de los reflectores respecto al pozo, pero también se puede partir desde el desconocimiento total de las relaciones de ángulos e ir refinando el resultado de la imagen final. El método de apilamiento de punto medio común (*common-middle-point* –CMP–) puede ser usado para estructuras que son paralelas o sub-paralelas al pozo, o el de planos inclinados variables (*dip move out* –DMO–) puede ser usado si el ángulo de las estructuras varía a lo largo del intervalo procesado (Bolshakov *et al.* 2011).

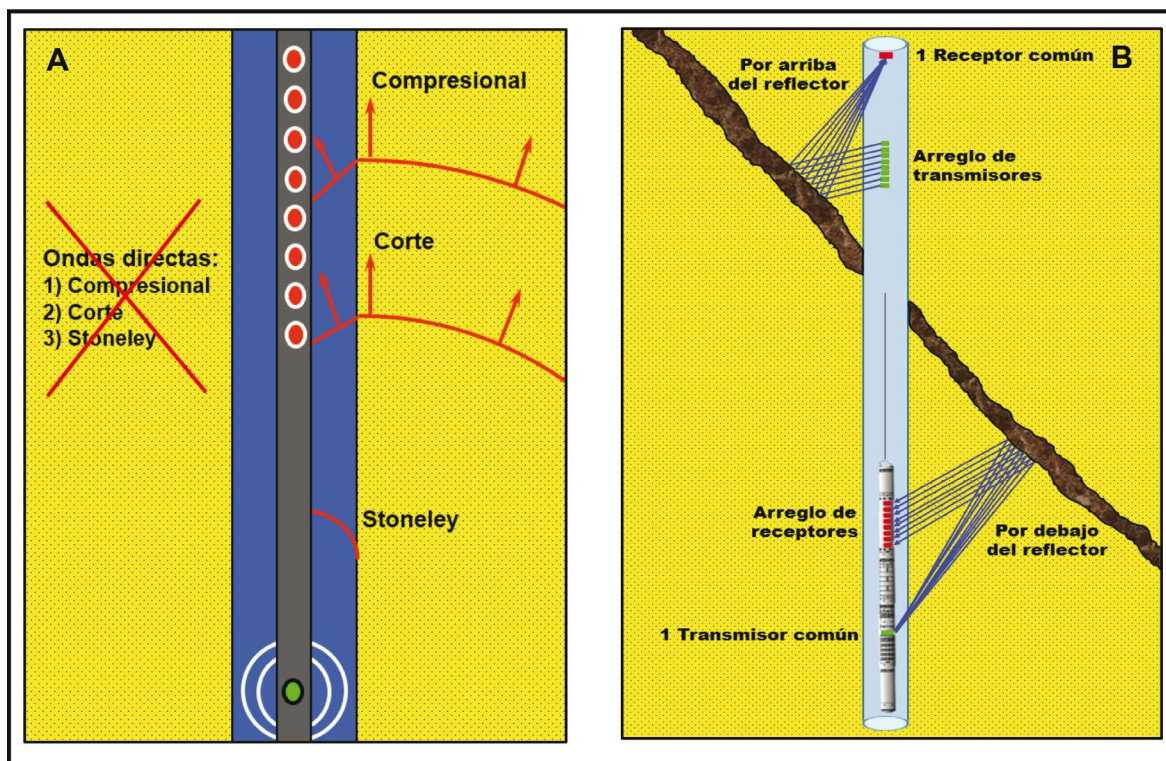


Figura 14. A: Las ondas directas que llegan en los primeros tiempos deben ser eliminadas, dejando solamente las ondas reflejadas. B: Herramienta acústica mostrando arreglo de receptores (debajo del reflector) y arreglo transmisores (arriba del receptor) para construir las ondas descendentes y ascendentes respectivamente.

El procesamiento DSWI no solamente es capaz de visualizar eventos que intersecten el pozo o que tenga ángulo de inclinación diferente (Fig. 15, evento 1), sino que tiene el potencial de poder resaltar eventos que no cortan el pozo o que son paralelos/sub-paralelos a este (Fig. 15, evento 2).

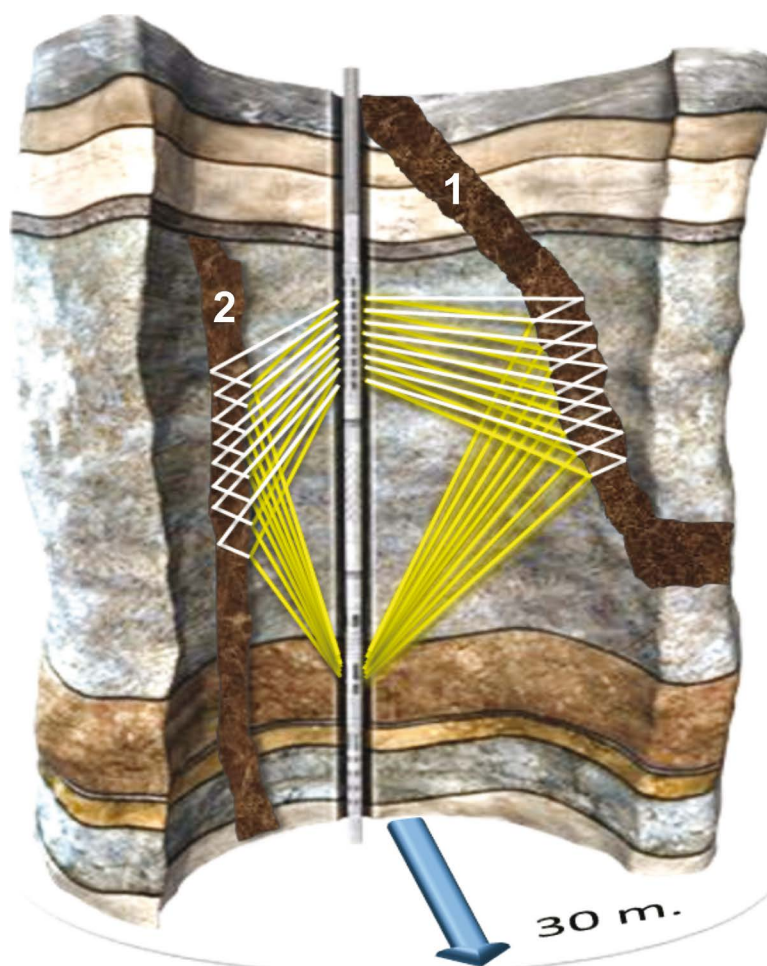


Figura 15. Diagrama esquemático que muestra las ondas reflejadas desde rasgos geológicos que cortan (1) o no (2) al pozo. La línea de trazo amarillo que vuelve a los 8 receptores corresponde al primer choque con un cambio de impedancia acústica y las líneas de color blanco corresponden a un segundo cambio de impedancia acústica. Incluso si otros eventos se encuentran más lejos de los reflectores 1 y 2, también se pudieran visualizar si la energía de la onda es suficiente y si el contraste de impedancia acústica es lo suficientemente diferente para generar la reflexión.

IMÁGENES MICRO-RESISTIVAS MULTI-FRECUENCIA

Una nueva herramienta de imágenes micro-resistivas de la pared del pozo con 2 electrodos para lodos no conductivos (OBM) está actualmente disponible en el mercado, esta consta de 6 patines montados en 6 brazos independientemente articulados, con cobertura azimutal de 80% en pozos de 8 pulgadas de diámetro, resolución vertical de ~2 centímetros y azimutal de 0,76 centímetros (Itskovich, Corley, Forgang & Le, 2014).

Esta herramienta está especialmente diseñada para formaciones con resistividades bajas (< 250 ohm.m.) y bajos contrastes, hasta resistividades de formación tan bajas como 1 ohm.m. Las características mejoradas en la herramienta para obtener buena respuesta de la formación bajo estos escenarios son:

- 1) El uso de altas frecuencias para reducir la impedancia capacitiva del lodo no conductivo.
- 2) Mediciones multi-frecuencia para corregir por efecto dieléctrico.
- 3) Cada frecuencia genera a su vez dos imágenes para realizar un análisis de sensibilidad de la fase, una imagen es la parte real de la impedancia, la cual esta calibrada con la resistividad de la formación y la otra imagen de la parte imaginaria de la impedancia que da información acerca de la calidad de la imagen.
- 4) El espaciamiento receptor-transmisor es reducido para mejorar la resolución y reducir la influencia del lodo no conductivo en las mediciones (Le *et al.* 2014).

Durante el perfilaje del pozo, se seleccionan 2 frecuencias para así adquirir 2 imágenes reales (Fig. 16) y 2 imaginarias en una misma pasada (Mallimaci *et al.* 2017).

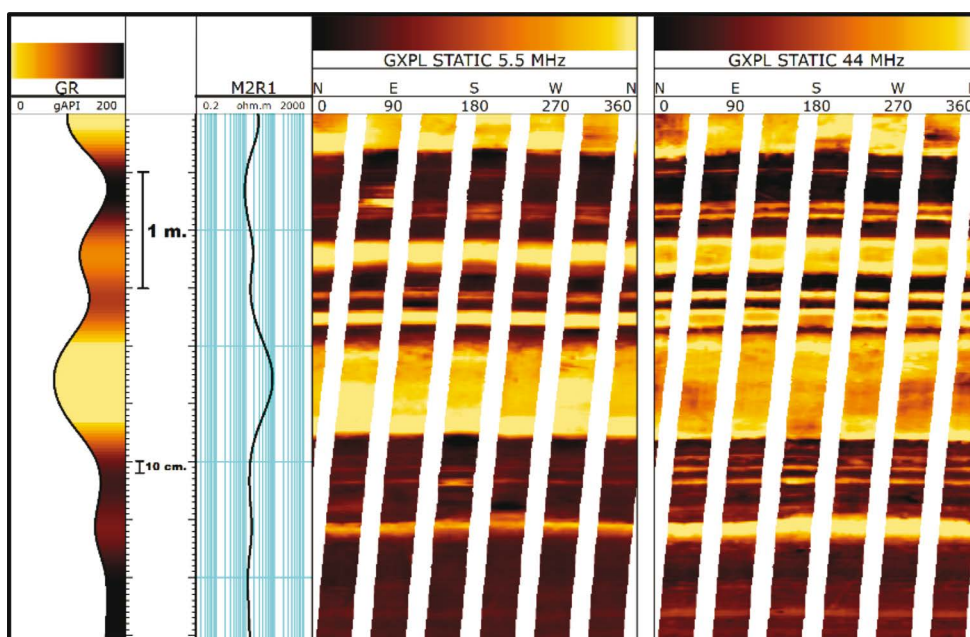


Figura 16. Comparación de 2 imágenes con 2 frecuencias distintas adquiridas en una misma pasada.

Cada frecuencia está diseñada para trabajar de forma óptima en un rango de resistividades de formación.

La figura 17 muestra las diferentes frecuencias para cada rango de resistividades (Grisolia & Ribas, 2016).

	Rango Resistividades GXPL 0.2 OHMM 2000
Frecuencia baja: 5.5 MHz Resistividad de la formación: 10 a 250 ohm.m.	
Frecuencia media-baja: 11 MHz Resistividad de la formación: 6 a 100 ohm.m.	
Frecuencia media-alta: 22 MHz Resistividad de la formación: 3 a 50 ohm.m.	
Frecuencia alta: 44 MHz Resistividad de la formación: 1.5 a 25 ohm.m.	

Figura 17. Frecuencias y rangos de resistividades para funcionamiento óptimo. Note la superposición de los rangos resistivos para tener cobertura completa desde 1.5 ohm.m hasta 250 ohm.m.

ANÁLISIS DE LOS DATOS

La figura 18 A corresponde a uno de los resultados obtenidos con la DSWI, el plot representa un corte de orientación noreste-suroeste (N45°E), los eventos que presenten su máxima reflexión

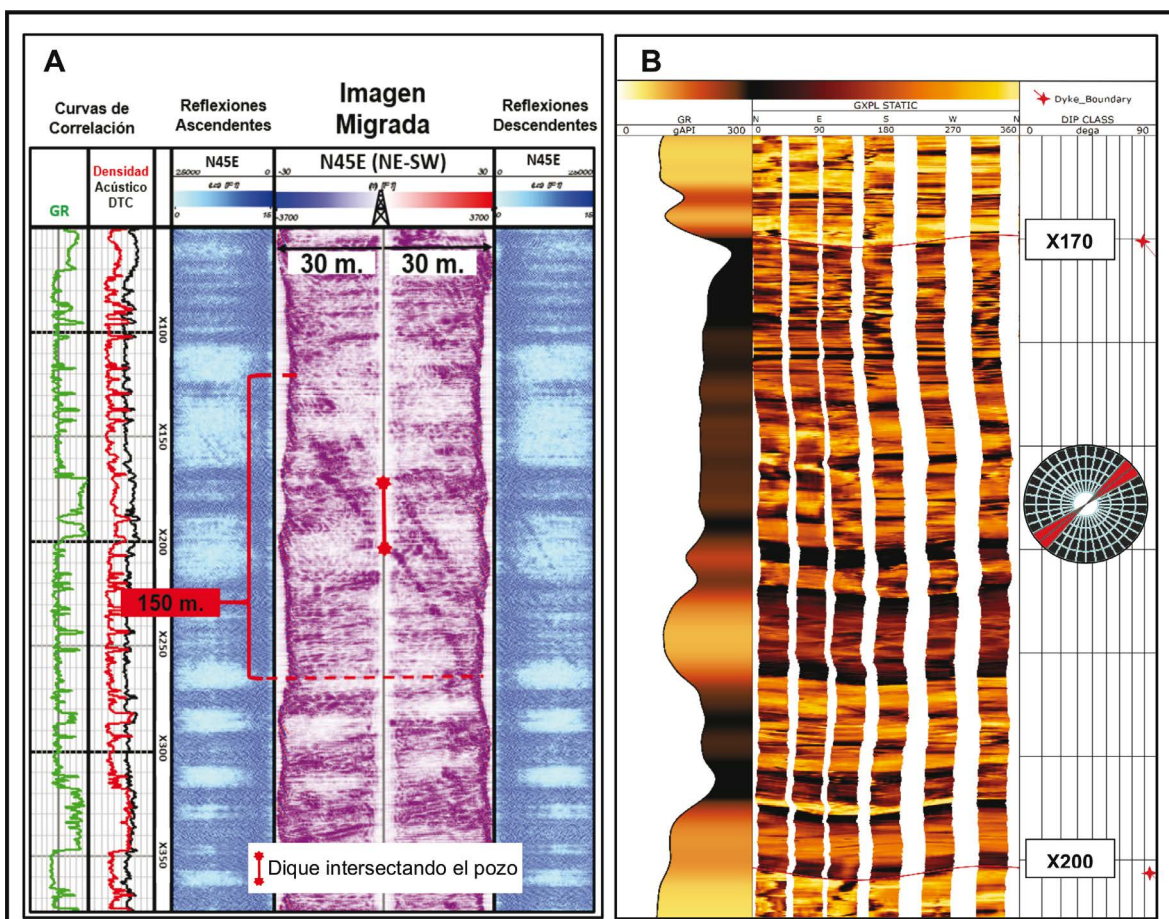


Figura 18. A: Procesamiento de Deep Shear Wave Imaging mostrando la reflexión máxima de un dique ígneo que intersecta el pozo en X170–X200, con rumbo N50°E y buzamiento de 82° al SE. La visualización de la inclinación del dique es aparente ya que el pozo tiene una desviación mayor a 25°. B: Registro de imagen micro-resistiva mostrando el diagrama de rosa con rumbo N45°E. Pista 3: vectores/dips y diagrama de rosa mostrando el rumbo del dique.

en este corte indicaría el rumbo del evento reflejado. El track de la imagen migrada muestra la respuesta de un dique ígneo que corta el pozo entre X170–X200 (30 metros de espesor aparente). Se puede seguir a lo largo de unos 150 metros de forma axial y hasta unos 50 metros de diámetro dentro de la formación, dando un área de visualización total de 7500 m². El comportamiento del dique es constante y continuo en toda el área visualizada, permitiendo extender este comportamiento más allá de los 50 metros visualizados y así alimentar el modelo geológico con menor incertidumbre.

Integrando los resultados de la DSWI con la imagen micro-resistiva (Fig. 18 B) se tiene que efectivamente intersecta el pozo en X170–X200, el rumbo es exactamente N50°E (NE-SW), buzando con 82° al SE, espesor aparente de 30 metros y 13,3 metros de espesor verdadero, confirmando que la respuesta obtenida con la DSWI corresponde a un dique y que el rumbo es perfectamente coincidente.

La figura 19 corresponde a un corte de orientación noroeste-sureste (N45°W), por lo tanto los reflectores identificados tendrán esa orientación. Uno de los puntos más importantes para resaltar de los resultados obtenido con el procesamiento de la DSWI es la detección de un reflector lejano (~10 metros) de la pared, se interpreta como un dique que no intersecta el pozo (Fig. 19, recuadro rojo). La interpretación se basa en que este presenta la misma respuesta de doble marca en los contactos que el dique visto en X170–X200. La inclinación aparente es mayor que el dique visto en la figura 16 y su espesor verdadero menor. El comportamiento del dique no es constante en todo el área visualizada ya que por debajo de X325 su señal desaparece,

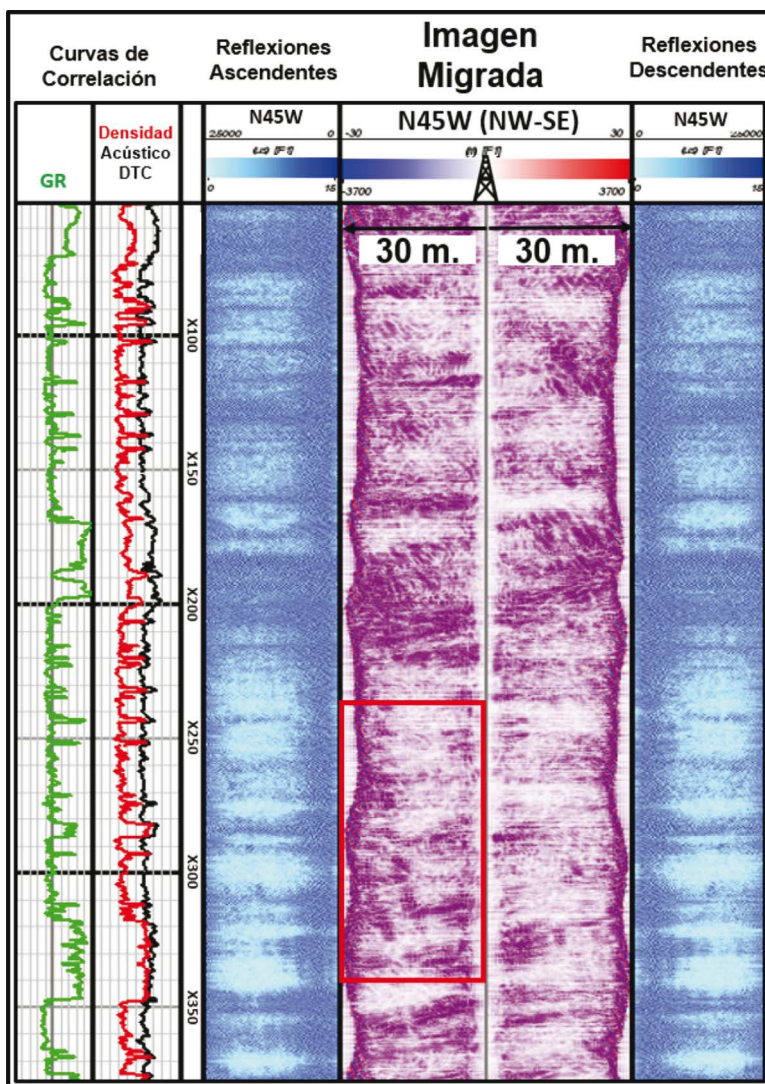


Figura 19. Procesamiento Deep Shear Wave Imaging mostrando la máxima amplitud de reflexión de un dique que no corta el pozo. El corte tiene orientación NW-SE (N45°W).

interpretando que pudiera corresponder a una combinación de dique por arriba y filón capa por debajo de esa profundidad.

Estos diques que no cortan los pozos podrían ser los responsables de compartimentalizar el reservorio, generando trampas locales con producciones limitadas de hidrocarburo. Estas zonas, evaluadas a partir de los perfiles convencionales podrían ser objetivo para punzar, pero de acuerdo con los datos arrojados con la DSWI serían evitadas. Note que las figuras 18 y 19 corresponden a cortes perpendiculares entre sí, el dique visto en la dirección de su máxima reflexión, esta es nula

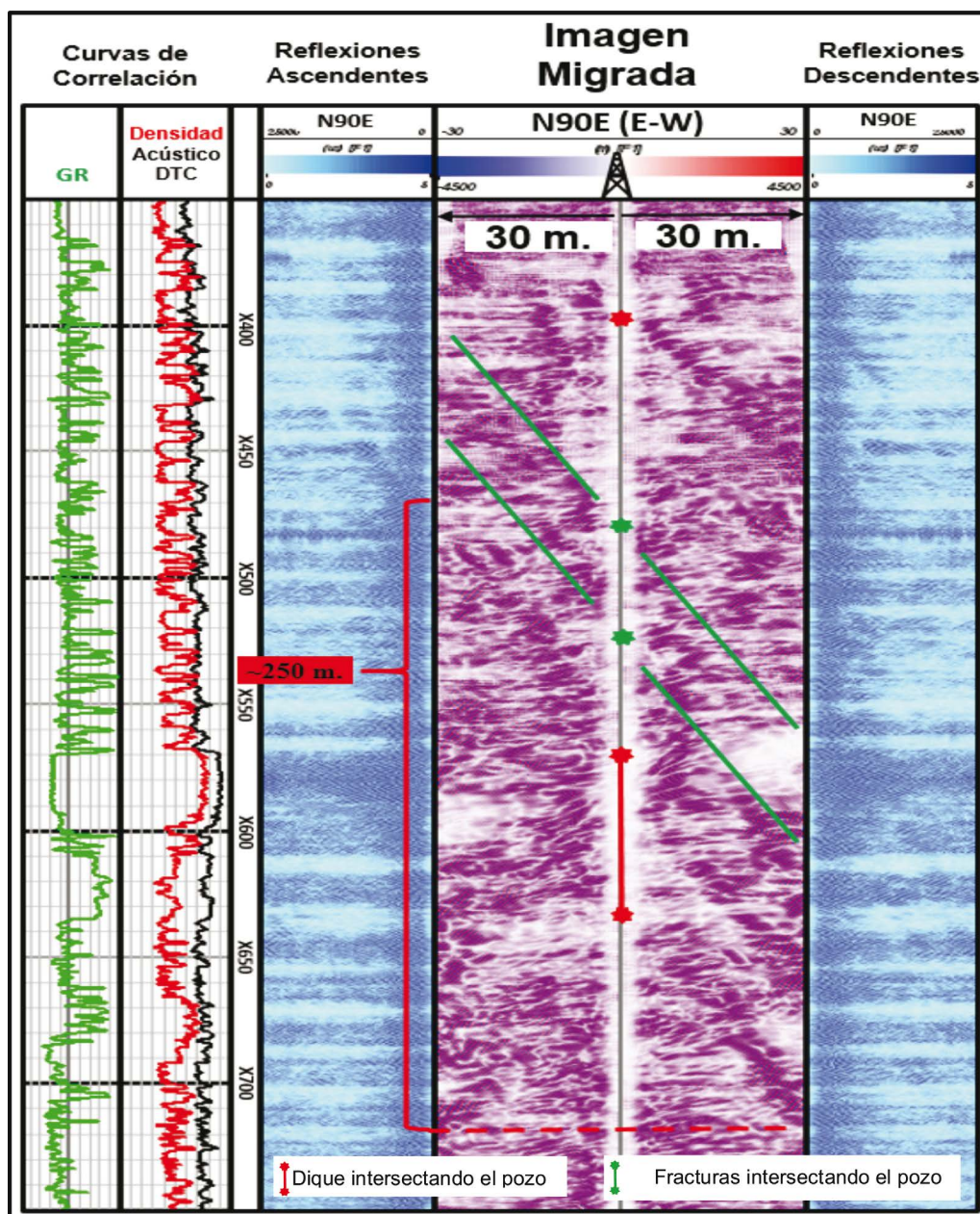


Figura 20. Procesamiento de Deep Shear Wave Imaging mostrando la máxima amplitud de reflexión de 2 diques ígneos (línea y estrellas rojas) y un set de fracturas (líneas y estrellas verdes) con rumbo N90°E. La visualización de la inclinación del dique es aparente ya que el pozo tiene una desviación mayor a 25°.

en la orientación perpendicular al rumbo de los reflectores.

La figura 20, corresponde a un corte de orientación este-oeste (N90°E), por lo tanto todos los eventos vistos en esta figura tendrán esta orientación. Se destaca al tope, la marcada respuesta de un evento que corta el pozo en ~X395 (marcado con una estrella roja) el cual, es interpretado como un dique, basados en su detección en la imagen micro-resistiva. En la DSWI no presenta la característica doble marca vista en los contactos del dique encontrado a X170-X200 (ver Fig. 18 A) y tampoco hay respuesta en los perfiles convencionales pero el contraste de impedancia acústica debe ser muy alto para generar una respuesta tan fuerte. El dique se puede seguir axialmente desde X390–X450 (60 metros), pero como se puede observar la señal cae por arriba de X390, pudiéndose interpretar: 1) el dique se acuña al tope, 2) cambia de dique a filón capa, 3) dato ruidoso. El lado derecho de la imagen migrada se puede seguir hasta 30 metros dentro de la formación, con comportamiento constante y continuo.

En la figura 21 la imagen micro-resistiva muestra un dique que corta el pozo en X393,75 metros, con un espesor aparente de 0,64 metros y verdadero de 0,55 metros, siendo el menor espesor identificado. Los perfiles convencionales no lo identifican ya que el espesor está cercano a la resolución vertical de las herramientas, sumado a esto el alto ángulo relativo al pozo, donde la parte más baja del dique se encuentra en X394,5 y la parte más alta en X392,8, teniendo más de un metro y medio de amplitud. El rumbo es N78°E buzando 76° al sur-sureste (168° de azimuth). La alta resolución de la imagen muestra contactos netos e irregulares y variación en el espesor constante.

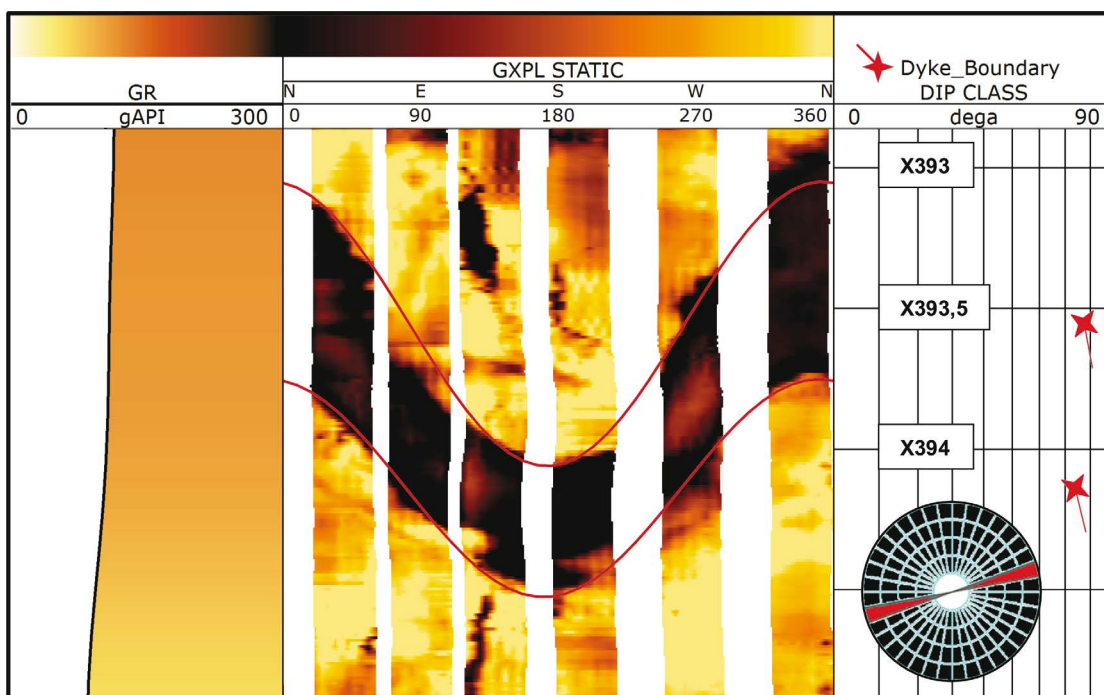


Figura 21. Imagen micro-resistiva mostrando un dique de 0,64 metros de espesor aparente. La orientación del dique es mostrada en el diagrama de rosa con rumbo N78°E. Pista 1: rayos gamma, pista 2: imagen micro-resistiva orientada al norte, pista 3: vectores/dips y diagrama de rosa mostrando el rumbo del dique.

La figura 20 de la DSWI, muestra reflexiones menos acentuadas pero cubriendo los 60 metros de diámetro investigado (señalado con estrellas y líneas verdes), no presenta respuesta en los perfiles convencionales. En principio, contando únicamente con la DSWI no se podría definir el evento o podrían ser malinterpretados como diques pero la combinación con el perfil de imagen micro-resistiva (Fig. 22) permite interpretar que entre X490 y X530 se tienen un juego de fracturas más una falla de arrastre a X511,8 con rumbo promedio de N79°E buzando al sur-sureste con 75°.

La orientación de los diques en el intervalo X393–X650 (Fig. 20 DSWI, Fig. 21 y Fig. 23) sigue la misma tendencia de las fracturas (Fig. 22), confirmando lo expuesto en el trabajo de Mallimaci *et al.* 2017.

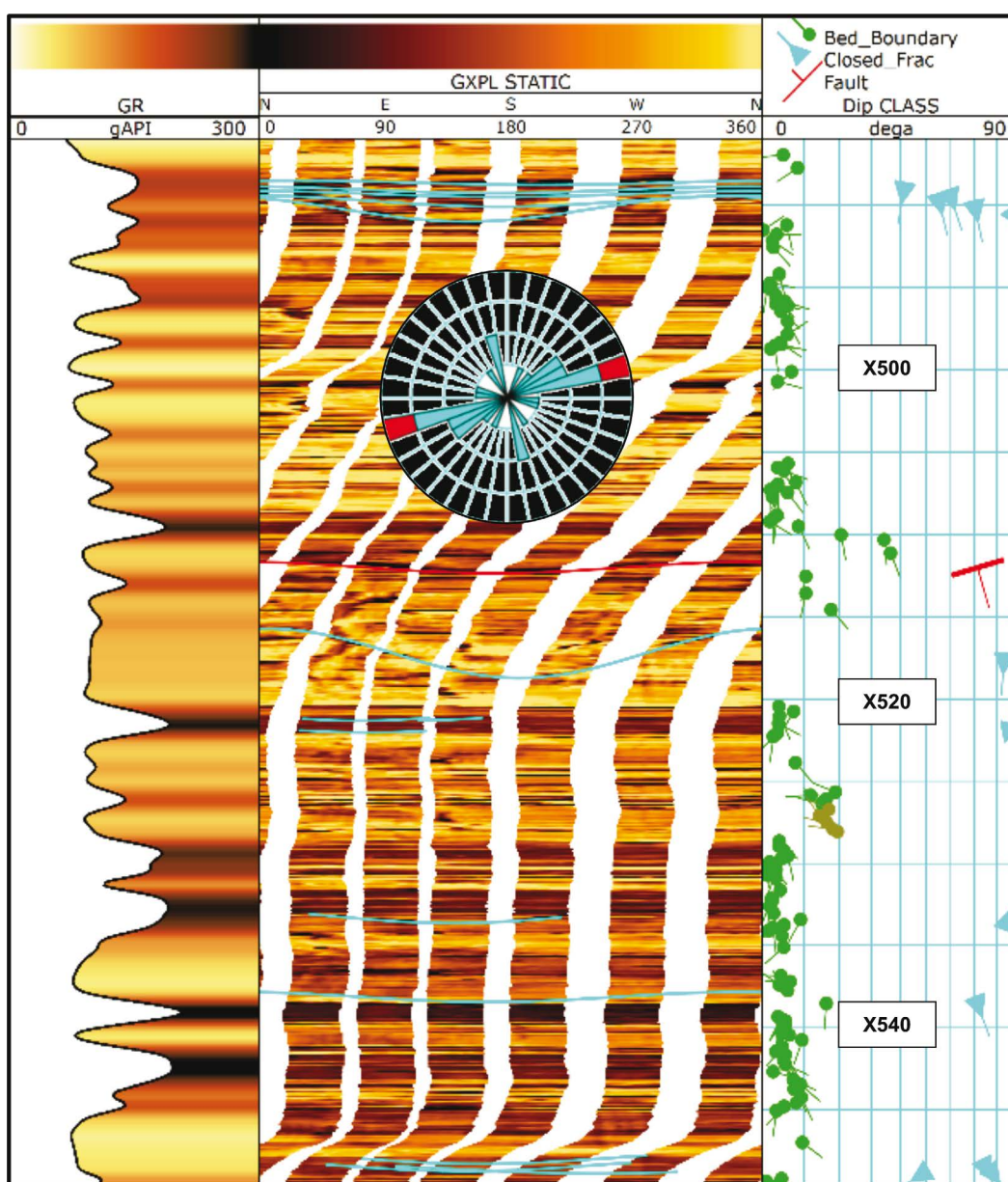


Figura 22. Juego de fracturas y falla de arrastre con rumbo promedio N79°E buzando al sur-sureste. Diagrama de rosa en rumbo.

Identificación y delineación de intrusivos ígneos a partir de imágenes micro-resistivas de alta resolución de la pared del pozo e imágenes profundas de la onda de corte horizontal obtenida con la herramienta acústica dipolar convencional en los yacimientos Volcán Auca Mahuida y Las Manadas-Risco Alto en la Cuenca Neuquina, Argentina

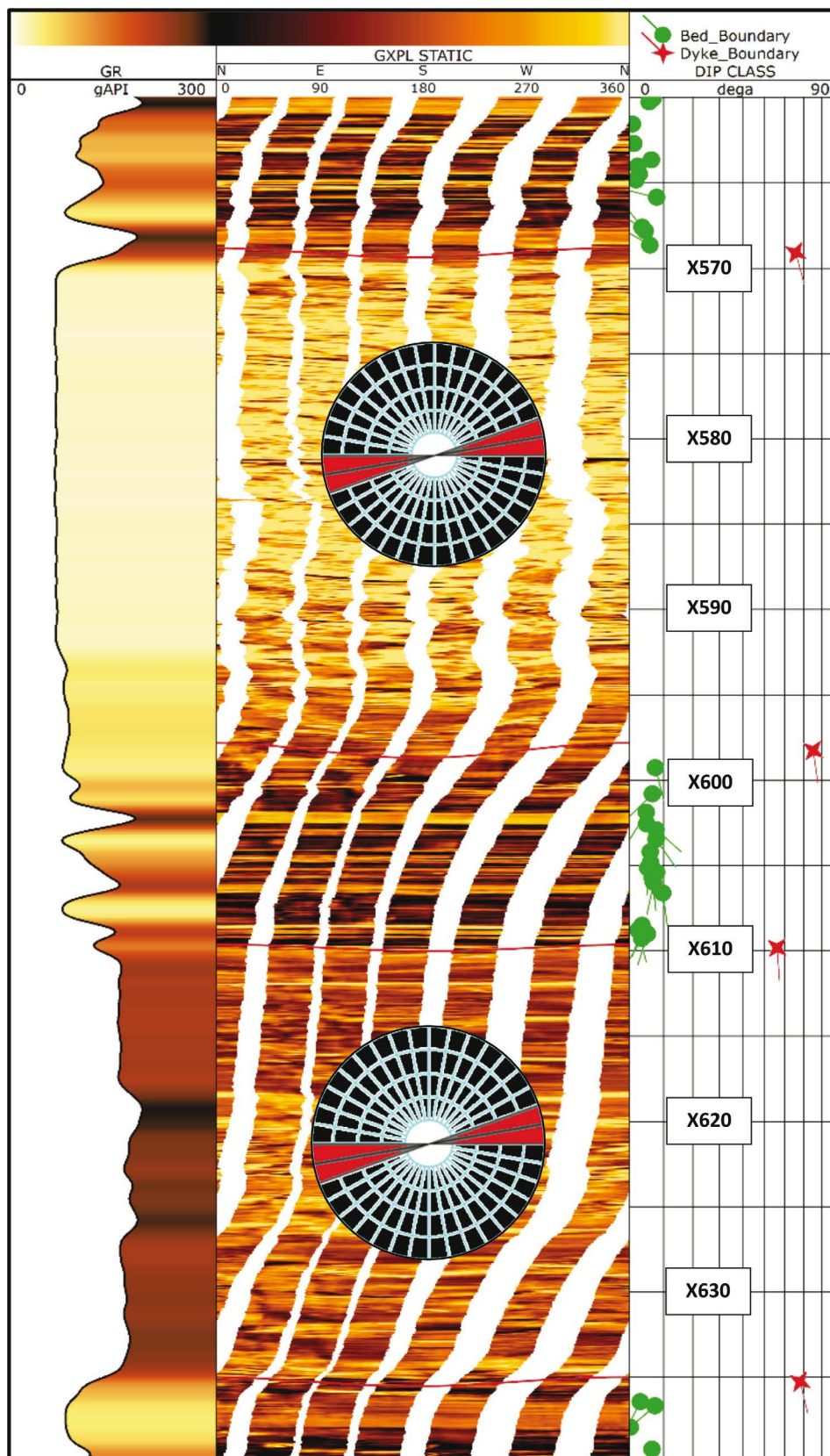


Figura 23. Diques separados por 12 metros de roca sedimentaria. Dique superior 30 metros. Dique inferior 25 metros.

Finalmente, la figura 20 de la DSWI identifica un dique entre X569 – X635 (señalado con una línea y estrellas rojas), se puede seguir axialmente por 250 metros y visualizar dentro de la formación hasta 30 metros con un comportamiento continuo y constante pero lo que en principio se aprecia como un solo dique de 66 metros de espesor aparente; el detalle en la imagen micro-resistiva, redefine la interpretación como 2 diques separados por un intervalo sedimentario de 12 metros (Fig. 23). El dique superior tiene un rumbo N79°E, buzando con 71° al sur-sureste (169° de azimuth) y el inferior un rumbo N82°E, buzando 62° al sur-sureste (172° de azimuth) computado a partir de la imagen. Esta diferencia en el ángulo de inclinación indica que hacia arriba los diques se separarían, engrosando la porción de roca sedimentaria entre ellos y hacia abajo, estos se unirían, formando un solo dique de gran espesor.

AGRADECIMIENTOS

A YPF S.A y BHGE por permitir la publicación de este artículo, a Jorge Cavilla por su gran predisposición y compromiso en la confección de los dibujos, a Marcela Villar por sus sugerencias para enriquecer este trabajo y a todo el Grupo de Desarrollo y Operativa del yacimiento VAM.

CONCLUSIONES

El procesamiento de la DSWI es la única tecnología actual que genera imágenes profundas de hasta 60 metros de diámetro dentro de la formación y permite determinar el rumbo e inclinación de los eventos geológicos que intersecan o no al pozo, comprendiendo más minuciosamente el comportamiento de los cuerpos ígneos lejos de la pared del pozo y su relación con la producción.

La DSWI identificó todos los eventos vistos en la imagen micro-resistiva, pero por sí sola, no siempre logra diferenciar los tipos de eventos geológicos, por lo que es indispensable el uso de imágenes micro-resistivas para discriminarlos, así como lo referente a la jerarquización de los cuerpos ígneos.

No todos los diques identificados en las imágenes micro-resistivas presentan un comportamiento continuo y constante lejos de la pared del pozo, lo cual, puede ser visualizado con la DSWI, pudiendo extrapolar y alimentar el modelo estático con menor incertidumbre.

Las imágenes de pozo han sido de gran utilidad para determinar con precisión el buzamiento estructural de la zona sin respuesta sísmica de calidad, el análisis de sus datos confirman que la orientación de los diques está estrechamente relacionada a la de red de fracturas del reservorio infiriendo que estos diques utilizan planos de fractura pre-existentes para intrusionar la roca.

La identificación de diques que no intersectan el pozo es de gran importancia ya que ayudan a entender la esporádica y algunas veces inexplicable producción limitada debido a la compartimentalización del reservorio.

Dado que el objetivo es evitar los intrusivos en futuras perforaciones se concluye que el uso de estas dos tecnologías combinadas mejoran la comprensión y predicción del comportamiento de los mismos.

REFERENCIAS CITADAS

- Bolshakov A., Patterson D., Lan C. (2011). Deep fracture imaging around the wellbore using dipole acoustic logging. Denver, Colorado, USA. p. 1. Society of Petroleum Engineers (SPE) (SPE: 146769).
- Cazeneuve E., Sabaa K., Rever A., Flatt D., Gadzhimirzaev D., Shah S., Von Plonsky K., Semmelbeck M., Purcell D. (2016). Hazard avoidance and completion optimization by integration of reservoir navigation services and deep shear wave imaging. Reykjavik, Iceland. p. 2. Society of Petrophysicist and Well Log Analyst (SPWLA) 57th Annual Logging Symposium.
- Delpino, D., Bermúdez, A., (2001). YPF, documento interno.
- Delpino, D., Santiago, E., Carrizo, N., Mendez, M., Zurita, D. (2012). Formación Centenario Inferior: Un nuevo reservorio en el Yacimiento Volcán Auca Mahuida. Cuenca Neuquina. YPF, documento interno.
- González R., Achilli F., Chiappero A., (2005). Entrampamiento en rocas ígneas en el centro de la Cuenca Neuquina. Las trampas de hidrocarburos en las cuencas productivas de Argentina. Congreso de exploración y desarrollo de hidrocarburos. Mar del Plata. pp. 369-381. Instituto Argentino del Petróleo y el Gas. IAPG.
- Grisolia J., Ribas S., (2016). Nueva imagen resistiva para OBM, aplicación en delineación de geometría de cuerpos volcánicos e integridad de sellos. Buenos Aires, Argentina. p. 8. Society of Petrophysicist and Well Log Analyst (SPWLA). XIX Taller de evaluación de formaciones.
- Grisolia, J., Cazeneuve, E., Paris, M., Mallimaci, D., Ribas, S., Beatove, M. (2018). The detection and Imaging of Igneous Intrusive Bodies at and away From the Wellbore in Complex Structures Associated with a Volcano in Neuquina Basin, Argentina. Londres, Reino Unido. p. 5. Society of Petrophysicist and Well Log Analyst (SPWLA) 59th Annual Logging Symposium.
- Hornby, B., (1989), Imaging near-borehole of formation structure using full-waveform sonic data: Geophysics.
- Itskovich, G., Corley, B., Forgang, S., Fei, L., (2014). An improved imager for oil-based mud: basic physics and applications. SPWLA 55th Annual Logging Symposium. pp. 1 – 2.
- Le F., Bal A., Bessalov A., Corley, B., Forgang S., Gold R., Itskovich G., Gaafar G. (2014). High-Definition Resistivity Imaging of Low-Resistivity Formations Drilled with Nonconductive Mud Systems for Near-Wellbore Geological and Petrophysical Reservoir Evaluation. Kuala Lumpur, Malaysia. p. 2. Offshore Technology Conference Asia (OTC).
- Mallimaci, D., Ribas S., Paris M., Grisolia J., Crespo G., (2017). New Borehole Imaging for OBM Systems. Auca Mahuida Volcano and Las Manadas Fields, Neuquén, Argentina. pp. 5, 11. Buenos Aires: Society of Petroleum Engineers SPE.
- Pioli, O.; Ribas, S.; Villar, M., (2016). YPF, documento interno.

- Ribas, S., Villar, M., Beatove M. (2016). Análisis de afloramientos, coronas y registros de imágenes de pozo de la Formación Rayoso en los yacimientos Volcán Auca Mahuida, Señal Cerro Bayo y Cerro Hamaca Oeste. YPF, documento interno.
- Sadigova A., Page G., Tyurin E., Ionnikoff Y. (2016). Where's my fracture gone? – imaging a hydraulic fracture away from a cased borehole before and after stimulation. Reykjavik, Iceland. pp. 3. Society of Petrophysicist and Well Log Analyst (SPWLA) 57th Annual Logging Symposium.
- Schwarz, E., Spalletti, L., Veiga, G. (2011). Geología y Recursos Naturales de la Provincia del Neuquén. Relatorio del XVIII Congreso Geológico Argentino. p. 140. Buenos Aires: Asociación Geológica Argentina AGA.
- Sigismondi, M. (2012). VAM: Estudio de deformación litosférica de la Cuenca Neuquina: estructura termal, dato de gravedad y sísmica de reflexión. PhD Tesis, Universidad de Buenos Aires UBA.
- Tang X., Patterson, D. (2009). Single-well S-wave imaging using multicomponent dipole acoustic-log data. *Geophysics* 74: WCA211 – WCA223. pp. 1-3, 7.
- Zavala, C., Ponce, J. (2011). Geología y Recursos Naturales de la Provincia del Neuquén. Relatorio del XVIII Congreso Geológico Argentino. p. 205. Buenos Aires: Asociación Geológica Argentina AGA.