

CASO EXITOSO DE GEONAVEGACIÓN DE POZO HORIZONTAL UTILIZANDO TECNOLOGÍA LWD EN YACIMIENTO DE CRUDO PESADO EN LA CUENCA DE LOS LLANOS ORIENTALES

SUCCESSFUL CASE OF HORIZONTAL WELL GEONAVEGATION, USING LWD TECHNOLOGY IN HEAVY OIL IN THE BASIN OF THE EASTERN PLAINS

Medina H., Saucedo A., Delupi R., Ghidina M., Chaves G., Chaffie Rincon C.

*ricardo.delupi@tecpetrol.com, matias.ghidina@tecpetrol.com, german.chaves@tecpetrol.com,
chaffie.rincon@weatherford.com, andres.saucedo@weatherford.com, Heraclio.Medina@weatherford.com
Tecpetrol: Cra. 11a #97a 17, Bogotá, Weatherford: Cr 7 NRO. 71 - 52 Torre B Pl. 18*

Medina H., Saucedo A., Delupi R., Ghidina M., Chaves G., Chaffie Rincon C., (2015): *Caso Exitoso de Geonavegación de Pozo Horizontal Utilizando Tecnología LWD en Yacimiento de Crudo Pesado en la Cuenca de los Llanos Orientales.*- GEOLOGIA COLOMBIANA, Vol. 40. Bogotá, Colombia. pp. 5-16

Manuscrito recibido: 15 de Agosto 2015; aceptado: 26 de Noviembre de 2015

Resumen

En el año 2014 Tecpetrol, decidió perforar el pozo Pendare 3H, un pozo exploratorio y horizontal, con el fin de incrementar el factor de recobro, reducir el agua de formación asociada a la extracción del crudo, investigar el desarrollo areal de las arenas de interés y maximizar el área de drenaje del reservorio, con el gran reto de desarrollar a futuro, el campo con pozos de tipo horizontal dirigido. El campo Pendare fue descubierto a mediados del año 2012 mediante la perforación del pozo exploratorio Pendare 1. Los pozos exploratorios Pendare 2, Pendare 4 y Pendare 6, fueron de suma utilidad para explorar y delimitar su extensión.

Palabras claves: Geonavegación, perforación horizontal, tecnología LWD, Llanos orientales.

Abstract

In 2014, Tecpetrol decided to drill the Pendare 3H well, an exploratory and horizontal well, in order to increase the recovery factor, reduce the formation water associated with the extraction of crude oil, investigate the sand development of the sands of interest and to maximize the drainage area of the reservoir, with the great challenge of developing in the future, the field with directed horizontal type wells. The Pendare field was discovered in mid-2012 by drilling the Pendare 1 exploratory well. The Pendare 2, Pendare 4 and Pendare 6 exploratory wells were very useful to explore and delimit its extension.

Keywords: Geonavegation, Horizontal drilling, LWD Technology, Eastern Plains Colombia.

INTRODUCCIÓN

En un trabajo de detalle realizado entre los equipos de geología e ingeniería de las compañías Tecpetrol y Weatherford, se integró la información de tipo sedimentológico, estructural, petrofísico, datos de

análisis de producción y mecánica de perforación, para planear el primer pozo horizontal de Tecpetrol en Colombia en la cuenca de los Llanos. El pozo se perforó utilizando tecnología LWD de tipo acimutal y el servicio de Geonavegación de Weatherford, para el correcto posicionamiento de la trayectoria en la mejor zona del

reservorio, navegado 1400 pies (500 metros), de sección horizontal en las arenas informalmente llamadas Arenas Basales de la unidad C7 de la Formación Carbonera. Al momento de generación del presente trabajo, el pozo presenta excelentes caudales de producción de hidrocarburo superando en amplio margen la producción de los pozos verticales perforados en el campo.

En la continua búsqueda de mejoramiento del factor de recobro, reducción del volumen de agua de formación y costos asociados al tratamiento, además de los costos asociados a la perforación y terminación de los pozos verticales, en el año 2014 Tecpetrol decidió perforar el pozo exploratorio horizontal Pendare 3H. Nuevas tecnologías LWD y técnicas de geonavegación, fueron aplicadas durante su perforación con el fin de alcanzar el objetivo.

El Campo Pendare, operado por Tecpetrol, en la Cuenca de los Llanos Orientales, produce de arenas oligocenas de la Formación Carbonera, las cuales forman parte de una extensa estructura regional de tipo monoclinial. El Campo Pendare en la actualidad presenta producción del pozo vertical Pendare 2 y del pozo horizontal Pendare 3H.

El campo produce petróleo subsaturado de gravedad promedio de 13° API, de la unidad C7 de la Formación Carbonera. Esta unidad informalmente se conoce como las Arenas Basales. Estas arenas se encuentran

soportadas por un fuerte acuífero regional y están depositadas en una extensa estructura monoclinial de rumbo Noreste Suroeste que buza hacia el Noroeste.

La perforación de un pozo horizontal resulta generalmente un poco más costosa que la perforación de un pozo vertical y técnicamente es más complejo su diseño y perforación. Sin embargo es una práctica que históricamente, ha permitido incrementar eficientemente el área de drenaje y recuperar mayores volúmenes de hidrocarburo del subsuelo, en intervalos menores de tiempo que si se extrajeran con pozos verticales (Griffiths, 2009).

El posicionamiento del pozo horizontal Pendare 3H, se basó en el entendimiento de la geometría del yacimiento fundamentado en el análisis de sísmica 3D y de las facies del reservorio que se pretendía desarrollar, optimizando de esta manera el proceso de toma de decisiones y los resultados obtenidos durante las etapas de perforación y terminación del pozo.

DESCRIPCIÓN DEL YACIMIENTO

El Bloque CPO-13, donde encuentra el campo Pendare, se encuentra ubicado en el municipio de Puerto Gaitán, Departamento del Meta, en la Cuenca de Los Llanos Orientales; aproximadamente, 290 kilómetros al Este de la ciudad de Bogotá, ocupando una superficie de 188.947,0916 Hectáreas, (Figura 1).

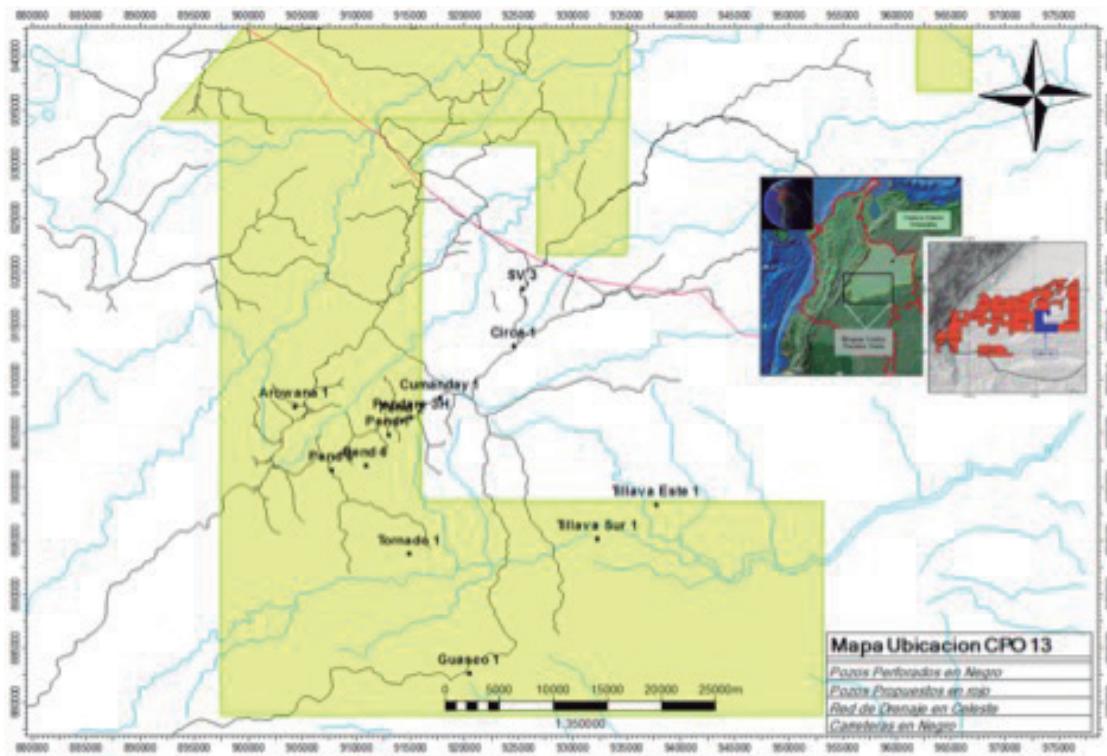


Figura 1. Mapa de Ubicación Bloque CPO 13_Pozos Pendare.

La interpretación estructural del campo, basada en sísmica 3D, indica la presencia de un extenso y amplio monoclin, de rumbo noreste-suroeste, con buzamiento variable entre 5 a 10° hacia el noroeste, con muy poca

complejidad estructural, salvo la presencia de una serie de ondulaciones internas, no observadas en toda la estructura mapeada, sin la presencia de un fallamiento mayor.

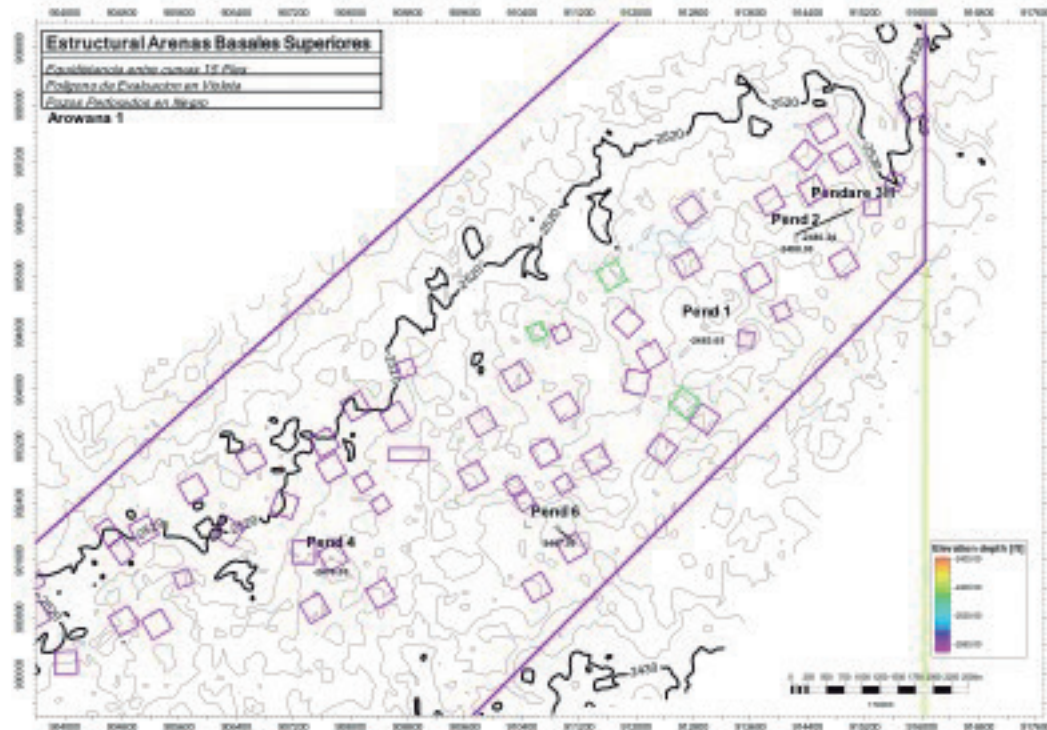


Figura 2. Mapa Estructural Arenas Basales_ Polígono de Evaluación Pendare.

La principal acumulación de hidrocarburos ocurre en la unidad Carbonera Basal o “C7”, llamada informalmente Arenas Basales de edad Oligocena, la cual presenta gran variedad de facies fluviales genéticamente relacionadas.

Por medio del análisis de registros de pozo abierto, estudios de corazones obtenidos y sondeos vecinos dentro del área de estudio, se describe la Arena Basal, como un cuerpo masivo con delgadas intercalaciones internas de lentes de arcillas y limos, siendo su electro secuencia generalmente de tipo cilíndrica, de base erosiva, con aproximadamente 50 pies de espesor, tendencia general de grano decreciente, identificándose como un depósito perteneciente a facies de tipo canal fluvial depositado en un extenso sistema regional. (Dasilva y Otros, 2013).

La hipótesis elegida para justificar el entrapamiento del crudo pesado en la estructura monoclin, fue la de entrapamiento hidrodinámico, efecto identificado y documentado en los pozos verticales próximos al pozo Pendare 3H, que fueron perforados en el área de estudio (Florez, 2012).

CONSIDERACIONES PREVIAS PARA EL POSICIONAMIENTO DEL POZO

Con el objetivo de drenar de manera más eficiente las reservas del campo, se propuso la perforación del pozo exploratorio horizontal Pendare 3H con 1400 pies de rama horizontal. Con el fin de posicionarlo adecuadamente, el trabajo inicial se enfocó en identificar el pozo vertical óptimo desde donde se iniciaría la perforación. De los 4 pozos exploratorios perforados en el área, solamente los pozos Pendare 1 y 2 son productores de hidrocarburos. Teniendo en cuenta lo anterior, y considerando los registros eléctricos y los volúmenes de hidrocarburos obtenidos durante el periodo de pruebas de producción, se identificó que la totalidad del espesor de las Arenas Basales (50 pies aproximadamente), se encontraban impregnados de petróleo solamente en estos pozos, razón por la cual se decidió realizar la perforación del pozo Pendare-3H, partiendo desde la plataforma del pozo Pendare 2.

Mediante correlación y análisis petrofísicos pozo a pozo, se identificó el intervalo de sección vertical que sería el objetivo principal a navegar en el pozo

Pendare 3H. Se trata de un cuerpo de arena situado en la base de las Arenas Basales, el cual presenta relación arena-arcilla cercana a 1, excelentes características

petrofísicas y elevadas resistividades. La figura 3, muestra las características petrofísicas mencionadas para el intervalo.

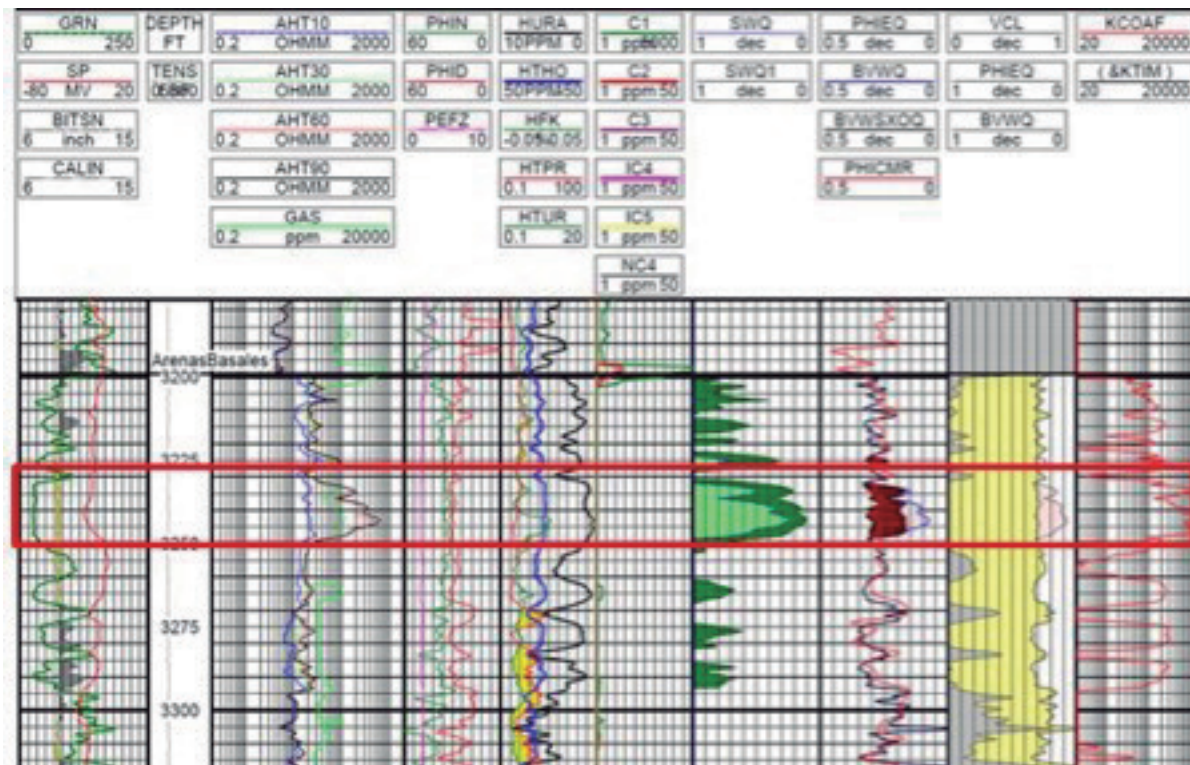


Figura 3. Análisis Petrofísico Pendare 2 y sección a navegar en Pendare 3H .

ANÁLISIS SÍSMICO

Haciendo uso de los 106 Km cuadrados de Sísmica 3D, adquiridos recientemente en el campo Pendare, se realizó un mapeo a detalle del tope y base de las Arenas Basales, el cual demostró que la estructura es un homoclinal que presenta una serie de ondulaciones y pliegues menores que conforman altos y bajos estructurales con reducidas dimensiones areales y suaves relieves estructurales. Con base en lo anterior, se decidió que el pozo horizontal Pendare 3H, investigaría uno de los altos estructurales mapeados el cual se ubica hacia el Noreste del pozo Pendare 2.

Como análisis adicional, se generaron atributos sísmicos para comprobar la continuidad areal de la sección de arena identificada en el pozo Pendare 2; para ello, inicialmente se realizaron sismogramas sintéticos en los pozos Pendare 1 y Pendare 2. La interpretación de éstos, sugirió que las arenas de buenas características petrofísicas corresponden a valores negativos de *Impedancias Acústicas*, mientras que las arenas con un porcentaje mayor de material fino en la matriz se corresponden a valores positivos de *Impedancias Acústicas*.

Una vez ajustada la sísmica 3D y la información disponible de los pozos, y con el cubo sísmico de *Impedancias P*, generado previamente, se procedió a extraer atributos sísmicos. Como se mencionó previamente, las arenas de buenas características petrofísicas están asociadas a valores negativos de *Impedancias P*, así que uno de los atributos generados fue el atributo *Vatmin*, el cual consiste en resaltar los valores mínimos dentro de un intervalo de tiempo. Inicialmente, se tomó una ventana de tiempo entre 8 y 12 mseg, por debajo del tope de las Arenas Basales, ya que representa (en tiempo) el intervalo de arenas de buenas características petrofísicas en el pozo Pendare 2 y la sección a navegar en el Pendare 3H (Figura 5).

Posteriormente, utilizando como input el cubo de *impedancias P*, se extrajo el atributo *Vatmin* dentro de la ventana de tiempo mencionada, resaltando las *impedancias P* negativas en dicha ventana de tiempo y en toda la extensión del cubo 3D. Este atributo arrojó la conclusión de que las arenas identificadas en la sección vertical del pozo Pendare 2, presentan una continuidad areal hacia el NE, siendo las arenas óptimas para ser

navegadas por el pozo Pendare 3H, y a la vez presentan una cierta desconexión con respecto a sus atributos

petrofísicos al pozo Pendare 1, razón por la cual se decidió navegar a partir del pozo Pendare-2 en dirección NE.

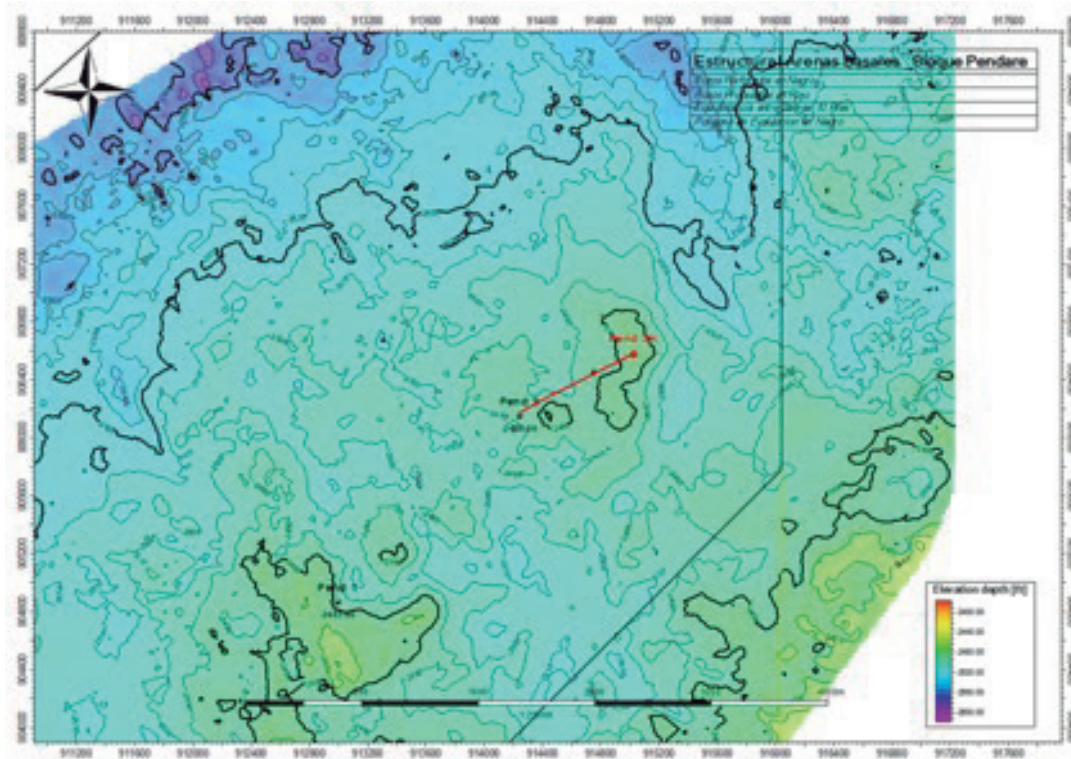


Figura 4. Mapa Estructural de las Arenas Basales.- (la leyenda superior izquierda no se observa claramente por efecto de los contornos del mapa).

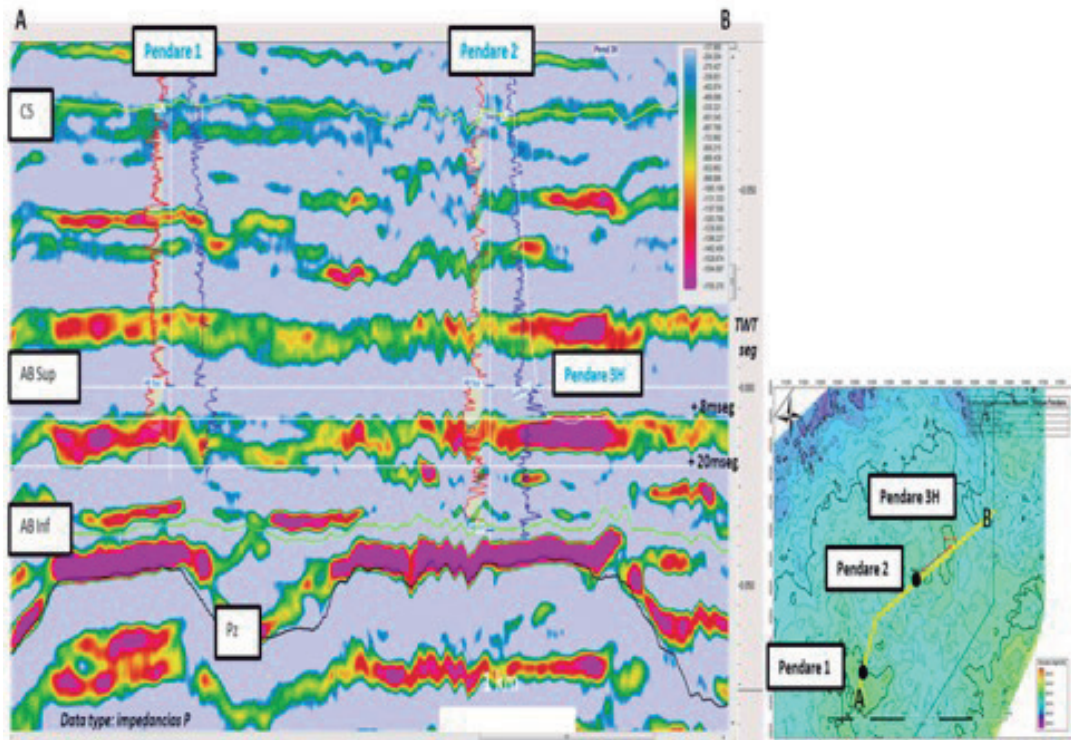


Figura 5. Línea sísmica (atributo Impedancias P) horizontalizada al tope de las Arenas Basales entre los pozos verticales Pendare 1 y Pendare 2.

PERFORACIÓN

El pozo Pendare 3H. fue perforado en tres secciones. La primera sección, de 12 ¼”, se perforó hasta 343 ft, y un revestimiento de 9 5/8” sentado a 337 ft. La segunda sección se perforó con broca de 8 ¾” manteniendo verticalidad hasta 1251 ft, para luego dar

inicio gradualmente al trabajo de horizontalización del pozo, en donde se registraron, a medida que avanzaba la perforación, direcciones de 15°, 29° y 66°, con inclinaciones de 4.4°, 58.2° y 58.7°, a profundidades de 1627 ft, 1872 ft y 3341 ft respectivamente, aterrizando el pozo a una profundidad de 3227 ft TVD (4066 ft MD) con una inclinación de 89.95°.

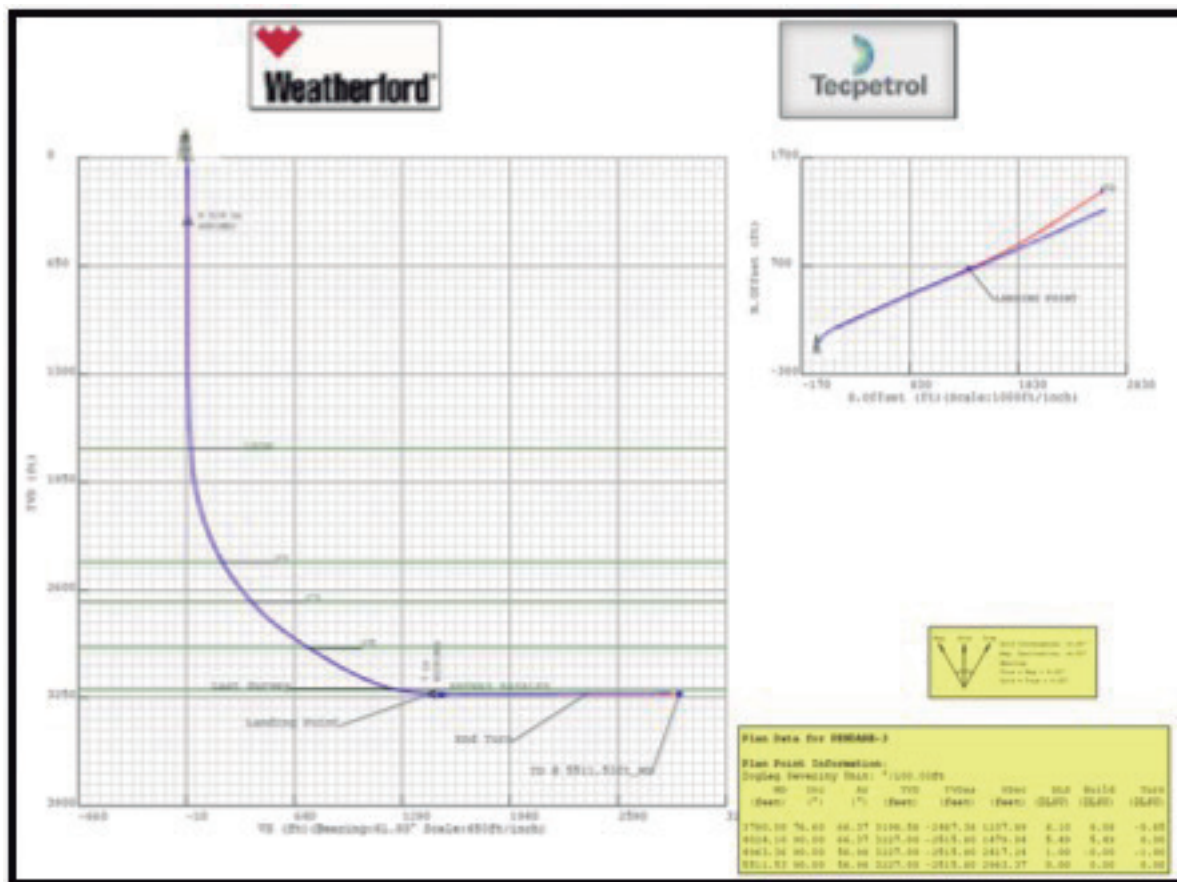


Figura 6. Perfil Direccional Pendare 3H.

La sección de 8 ¾” se perforó con BHA tipo “fullcrum” con un motor Hyperline QLE7817 y con BH de 1.53”, con factor de 0.10 revoluciones por galón y camisa estabilizada de 8¼”, manejando galonaje entre 360 - 500 gpm, diferenciales de hasta 300 psi, obteniendo ROP’s rotando de 147.40 ft/hr, deslizando de 80.95 ft/hr y general de 96.35 ft/hr. Durante toda la perforación de la fase 8 ¾” se mantuvo el pozo ajustado al plan Direccional (máxima separación: 9.68 ft centro-centro), logrando la entrada a la arena de interés dentro del cuerpo de las Arenas Basales de acuerdo con los requerimientos del grupo de yacimientos y de geonavegación.

En la sección de 8 ¾” en el intervalo de la sección vertical se deslizo un total de 1.87 % de los 908 ft perforados, para mantener una inclinación no mayor a

0.6° con una ROP promedio de 150.83 ft/hr. Durante la construcción de la curva se deslizó un total de 33.07 % de los 2815 ft perforados, para alcanzar una inclinación de 89.85° con una ROP promedio de 47.47 ft/hr.

El DLS1 promedio fue de 3.49°/100 ft respecto al DLS planeado, de 4.05°/100 ft, para la construcción antes de la tangente y de 4.37°/100 ft con respecto al 4.62°/100 ft planeado para la construcción posterior a la tangente (hasta la entrada a las Arenas Basales). El DDI (Directional Difficulty Index) obtenido durante la perforación fue de 5.76 respecto a 5.79 como DDI planeado.

La sección de 8 ¾” fue perforada hasta 4066 ft MD en 1.61 días (total) con respecto a los 2.58 días planeados,

evidenciando ROP por encima del promedio manejado en el campo. Adicionalmente, un revestimiento de 7" fue bajado en esta sección de acuerdo al programa sin ningún tipo de restricción.

Finalmente, la tercera sección de 6-1/8" se perforó hasta una profundidad final de 5454 ft, y se realizó en 0.61 días, alcanzando una ROP promedio de 81.02 ft/hr, y deslizando un total 302 ft (25.44 %) del intervalo perforado.

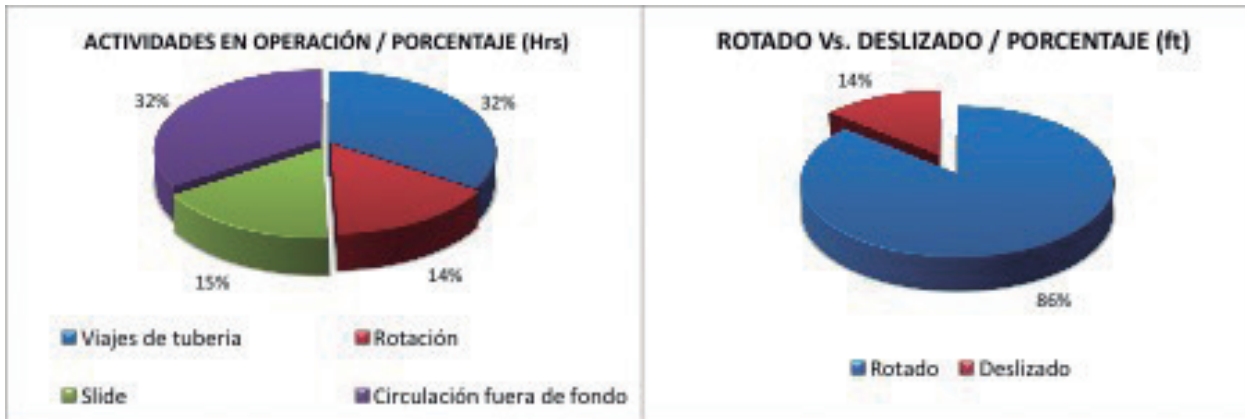
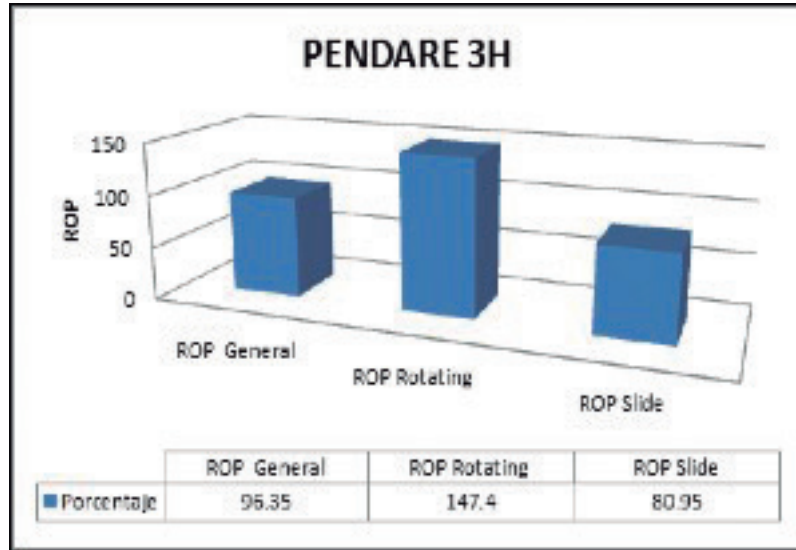


Figura 7. Desempeño operacional pozo Pendare 3H.

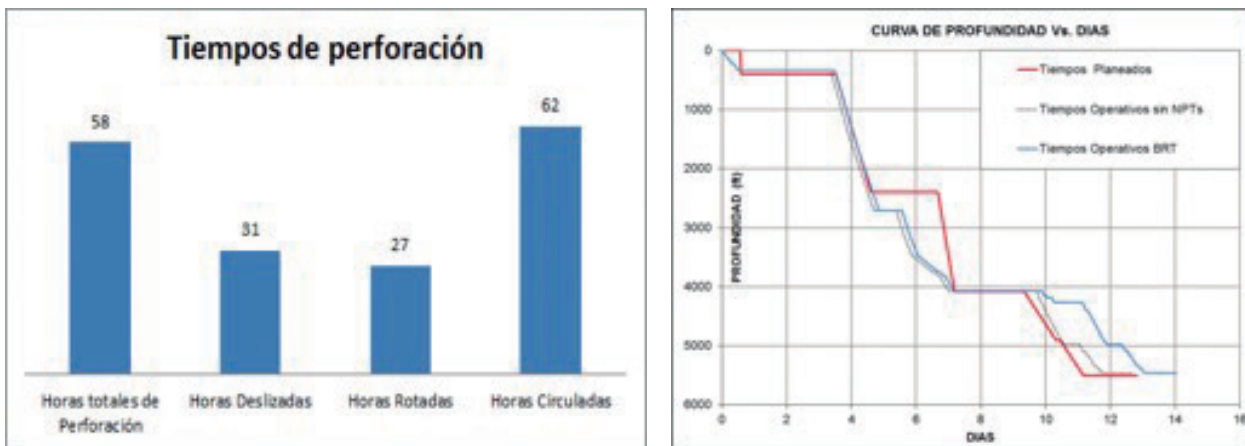


Figura 8. Resumen Perforación Pozo Pendare 3H.

TECNOLOGÍAS LWD EMPLEADAS

En el pozo Pendare 3H se utilizaron las siguientes herramientas LWD de última generación durante el aterrizaje y la geonavegación de las fases de 8 3/4" y 6 1/8".

HAGR: "High temperature azimuthal gamma ray". Herramienta de adquisición de mediciones gamma ray de tipo azimutal con capacidad de transmitir información e imágenes en tiempo real. Utiliza tubos tipo Geiger Muller para obtener la información que es utilizada para la Geonavegación. La información se adquiere en 8 cuadrantes y permite hacer cálculos de buzamiento aparente mediante la técnica "Dip Picking".

Guide Wave: "Guide Wave Azimuthal Resistivity Tool". Herramienta de adquisición de mediciones resistivas de tipo azimutal con capacidad de transmitir información e imágenes en tiempo real. Utiliza el principio de propagación electromagnética para transmitir ondas que permiten medir la resistividad de la formación. Permite realizar geonavegación proactiva, identificar el buzamiento de las capas, diferenciar la presencia de fluidos, calcular la distancia a límites estratigráficos e identificar características geológicas como fallas, acunamientos de capas y reducciones de espesor.

MWD HEL-BAP: "Hostile environment logging MWD system with Bore/Annular Pressure". Herramienta para la medición de "surveys" con la capacidad de monitorear presiones dentro y fuera de la tubería y para registrar la temperatura durante la perforación y los viajes.

IDS on Bottom: "Inclination and Deviation Sonde Close-to-Bit". Configuración de sensor direccional cercano a la broca, para el control oportuno de la trayectoria del pozo y geonavegación.

GEONAVEGACIÓN

El trabajo de Geonavegación para el pozo Pendare 3H, comenzó con el ajuste del plan direccional, trabajo realizado en conjunto con los geólogos y geofísicos del grupo de yacimientos de Tecpetrol y Weatherford. Para esto fueron cargados en un software de visualización 3D las trayectorias, topes y registros eléctricos de los pozos existentes en el área. Posteriormente se generaron superficies formacionales a partir de los topes registrados en esos pozos "offset" y se ajustó la trayectoria planeada de tal forma que se alcanzara el "Landing point" deseado con la menor incertidumbre posible.

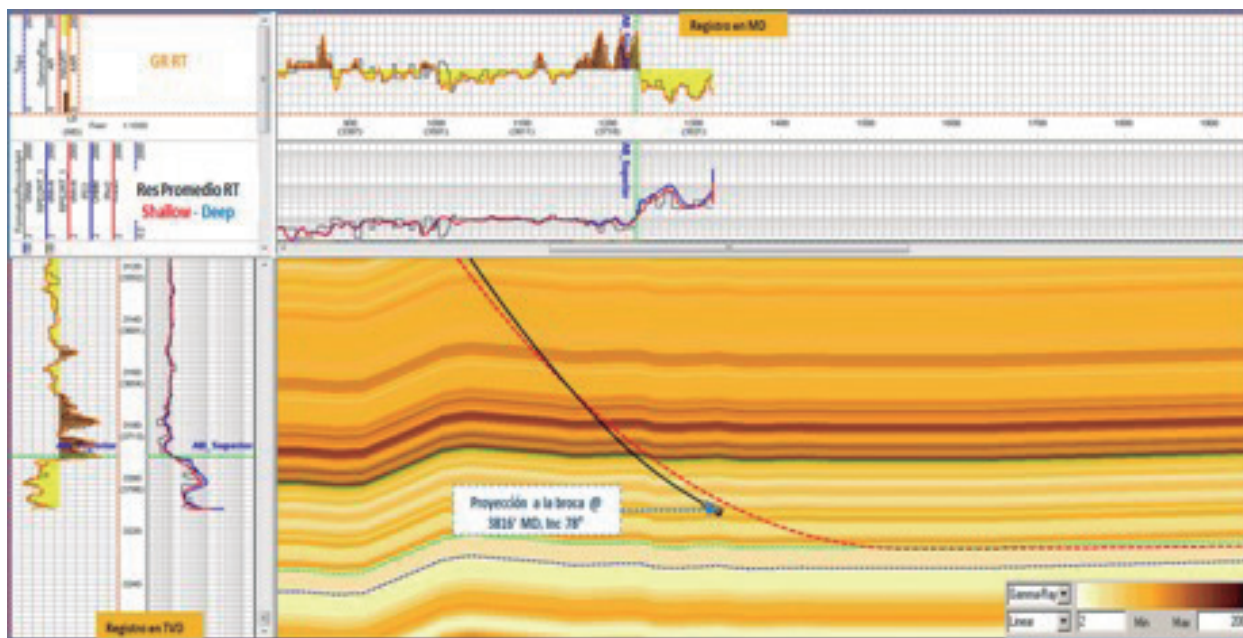


Figura 9. Diseño preliminar de Geonavegación del pozo.

Durante el proceso de aterrizaje el equipo de geonavegación, integrado por geólogos e ingenieros de petróleos de ambas compañías, se realizaron múltiples correlaciones en tiempo real a partir de los registros transmitidos por el equipo LWD en pozo.

Estas correlaciones permitieron identificar cambios de espesores a partir de los registros del pozo piloto Pendare 2, logrando de esta manera ajustar la trayectoria del pozo Pendare 3H, para conseguir aterrizarla a la profundidad TVD deseada.

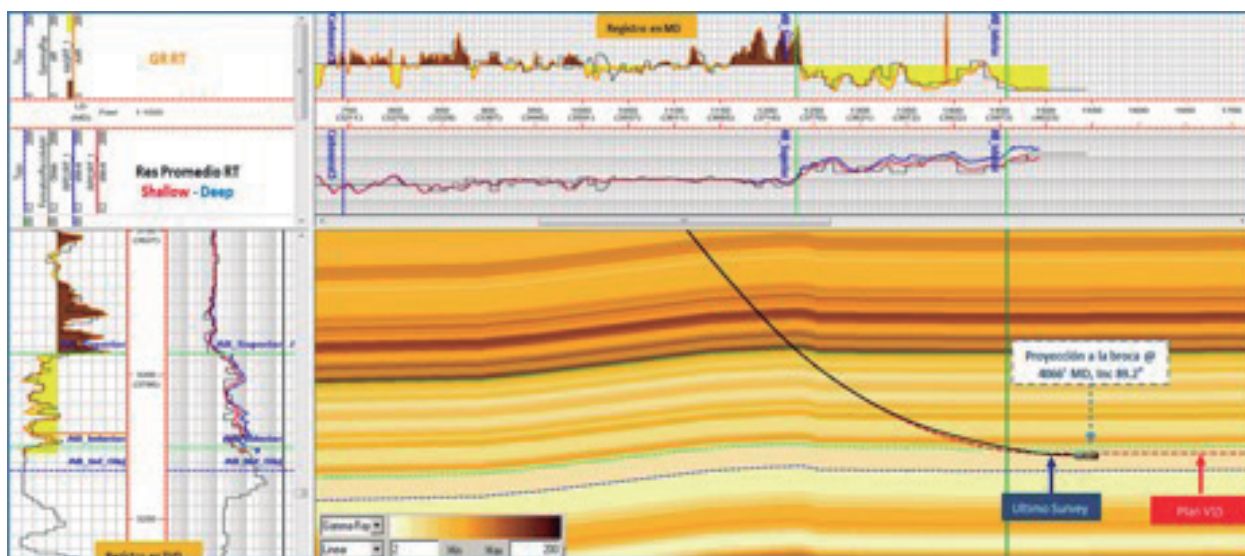
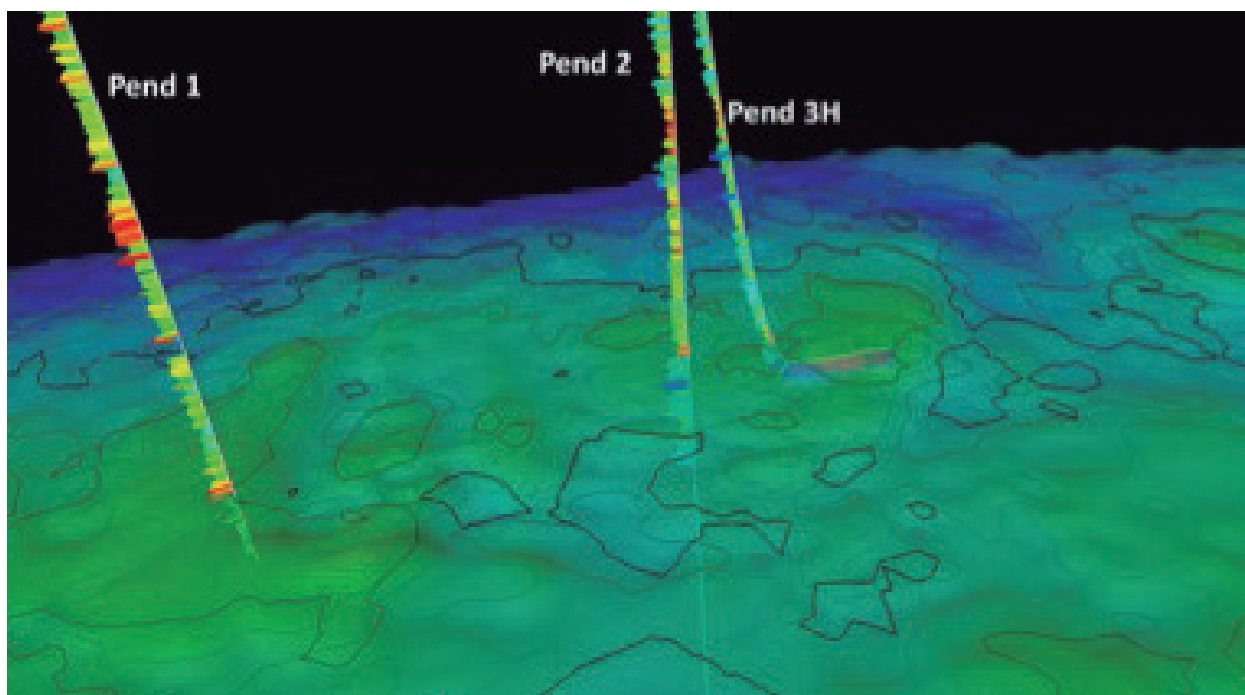


Figura 10. Resultados Aterrizaje del pozo Pendare 3H.

Una vez aterrizada la trayectoria y sentado el revestimiento de 7", se realizó la Geonavegación del pozo introduciendo herramientas azimutales de resistividad y gamma ray. Estas herramientas permitieron calcular las resistividades por encima y por debajo de la trayectoria del pozo, mapeando los límites de capa de la formación de interés, con lo cual se tomaron las decisiones necesarias para el correcto direccionamiento del pozo. Con los datos obtenidos durante la perforación del pozo, se realizó un análisis detallado de la sísmica y de la estratigrafía del área

en función de prever cualquier cambio estructural que pudiese generar riesgo de salida de la trayectoria de la zona de navegación deseada.

Como resultado se consiguió navegar un total de 1393 ft de los 1430 ft planeados originalmente, (97.5%) a través del cuerpo de interés dentro las arenas basales, el cual mostró buenas propiedades petrofísicas (GR promedio de 30 unidades API y resistividades hasta de 800 ohm-m) a una distancia de 5 ft en promedio, con respecto al techo de la formación.



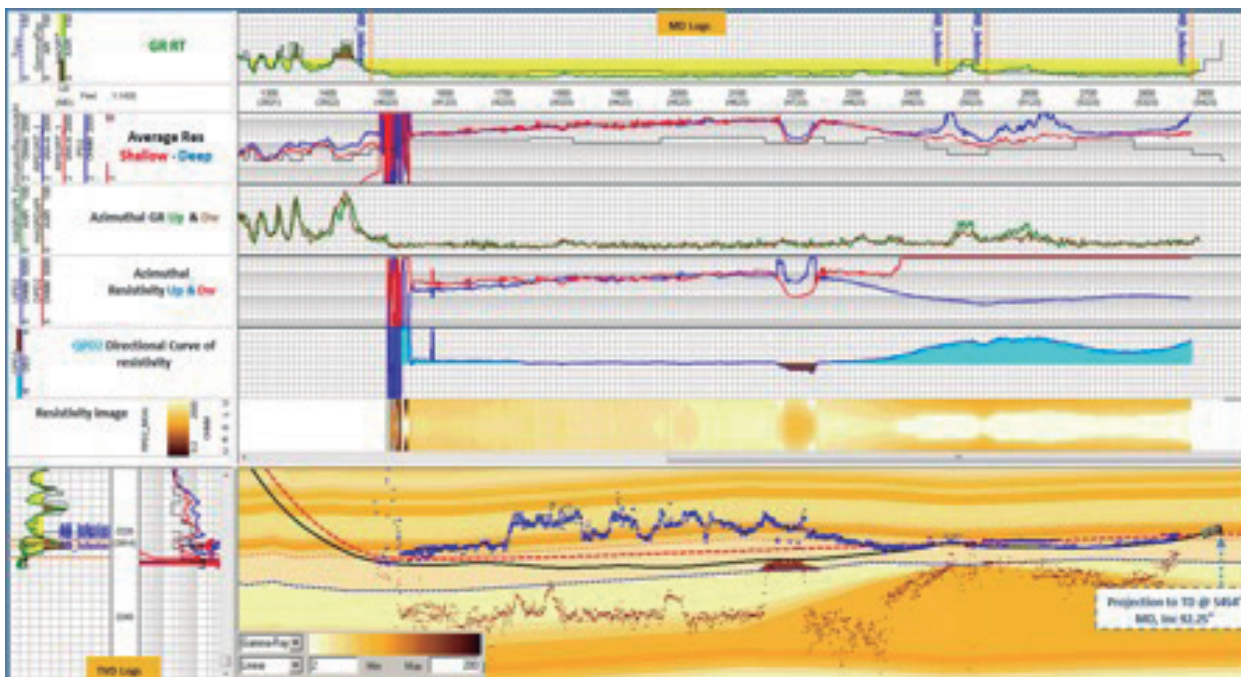


Figura 11. Resultados Geonavegación LWD del pozo Pendare-3H.

EVALUACIÓN POST-PERFORACIÓN Y RESULTADOS DE PRODUCCIÓN

Posterior a la geonavegación del pozo Pendare 3H, se procedió a realizar el completamiento del pozo. Debido a la poca consolidación que presentan las Arenas Basales, y con el fin de controlar la producción de arena que se ha observado en los pozos verticales cercanos a este pozo, un “liner” ranurado de 4 ½” fue instalado a lo largo de toda la trayectoria horizontal perforada en la sección de 6-1/8” (4066-5393 ft). Un sistema de levantamiento artificial tipo bomba electrosumergible (ESP) con capacidad de producir un máximo de 3600 bfpd, fue instalado en este pozo. Bombas electrosumergibles han sido instaladas en pozos vecinos con Run Lifes, superiores a 1000 días, lo cual muestra el buen desempeño de este tipo de sistema de levantamiento en el campo Pendare.

Posterior al completamiento del pozo, se dio inicio a las Pruebas Extensas de Producción, obteniendo muy buenos resultados de producción de petróleo. Una producción inicial de 1100 bfpd, 924 bopd con 16% de BSW fue obtenida durante las pruebas iniciales, obteniendo así un índice de productividad de 33 bfpd/psi y un Draw Down de 3.1% con la bomba ESP, operando a una frecuencia de 35 Hz. Una producción máxima de 3619 bfpd, 1836 bopd con 49.3% de BSW, fue obtenida seis meses después de dar inicio a las prueba de producción.

Después de un año de producción, un acumulado de 400.000 barriles de petróleo, han sido producidos a partir de este pozo. No se ha observado presencia de arena o finos en superficie, lo cual confirma que el Liner ranurado instalado hasta el momento, opera con total efectividad.

CONCLUSIONES

El pozo Pendare 3H, es un ejemplo de trabajo en equipo entre compañías donde la estrategia de geonavegación en objetivos geológicos selectivos, conduce a obtener una reducción notable de costos, incrementar producciones de crudo, reducir la producción de agua de formación, y optimizar los planes de desarrollo.

Se destacan como punto sobresaliente de la perforación del pozo, que el 100% de la sección horizontal fue exitosamente geonavegada en la Unidad Arenas Basales, con el empleo de las herramientas LWD y el servicio de geonavegación de Weatherford, obteniéndose resistividades superiores a 800 ohmm. y gamma ray, promedio de 30 unidades API a lo largo de esta sección.

El éxito en la perforación fue comprobado con una producción inicial de 1100 bfpd, 924 bopd con 16% de BSW durante las pruebas iniciales del pozo, obteniendo así un índice de productividad inicial de 33 bfpd/psi y un acumulado de 400,000 barriles de petróleo en el primer año de producción.

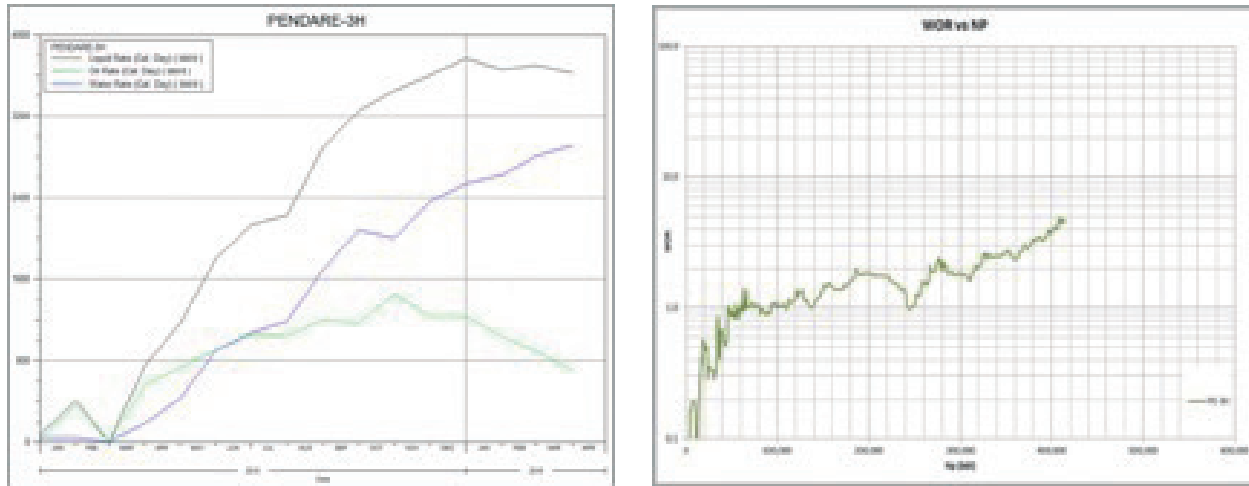


Figura 12. Producción del pozo Pendare 3H y tendencia WOR vs Np.

BIBLIOGRAFÍA

Application of Horizontal Well Technology in Colombia N.F. Saavedra, Ecopetrol and S.D. Joshi, Joshi Technologies International SPE/Petroleum Society of CIM International Conference on Horizontal Well Technology held in Calgary, Alberta, Canada, 6-8 November 2000.

DASILVA ANGEL, GOMEZ YOHANEY, VILLA MARIA, YORIS FRANKLIN, MORALES DIEGO. Oil distribution in the Carbonera Formation, arenas Basales Unit. A case study in the Quifa and Rubiales Fields, Eastern Llanos Basin, Colombia. AAPG paper. Cartagena Colombia, September 8-11, 2013.

FLOREZ ALFREDO. Improved Heavy Oil Recovery by Drilling Horizontal Wells in Rubiales Field, Colombia. Pacific Rubiales Energy, SPE 2012.

R.GRIFFITHS. Well Placement Fundamentals Book, 2009.

SADA D JOSHI. Horizontal Well Technology Book, 1991.

Using New Advances in LWD technology for Geosteering and Geologic Modeling M.S. Efnik, M. Hamawi, and A. Al Shamri, Abu Dhabi Company for Onshore Oil Operations, A. Madjidi, SPE, C. Shade, SPE, Schlumberger SPE/IADC Middle East Drilling Technology Conference held in Abu Dhabi, UAE, 8-10 November 1999.

