

POZO HORIZONTAL CON GEONAVEGACIÓN BI-NIVEL YACIMIENTO LOMA CAMPANA YPF REGIONAL NO CONVENCIONAL

Rondón, Samuel - YPF S.A. (samuel.i.rondon@set.ypf.com)

Sinopsis

El desarrollo de yacimientos No Convencionales, ha enfrentado diversos desafíos desde sus inicios, entre ellos la perforación de ramas horizontales con un espaciamiento óptimo entre pozos. Mitigar la interferencia entre pozos padre/hijo (parent-child) es clave para optimizar la recuperación de hidrocarburos. A lo largo de los años la longitud de los pozos ha incrementado y en campos maduros los espacios para locaciones en superficie son cada vez menor, por lo que hoy en día puede generar escenarios de locaciones con pozos contiguos con longitudes muy diferentes. Esta condición dificulta poder lograr una distribución óptima entre pozos para drenar el reservorio. En respuesta a la problemática descrita, el equipo multidisciplinario de YPF diseñó y ejecutó con éxito el primer pozo con geonavegación en dos niveles de producción de Vaca Muerta, mejorando la rentabilidad económica del proyecto, y logrando un desarrollo más uniforme del campo.

El pozo perforado en el yacimiento de Loma Campana, combinó dos niveles diferentes de producción en una sola rama lateral de 4,000 metros. Se geonavegaron 1,821 metros en el primer nivel antes de elevar la trayectoria 47 metros y desplazarla 100 metros al oeste para geonavegar otros 1,689 metros en un segundo nivel. Con este diseño se obtuvo el espaciamiento óptimo con pozos vecinos, maximizando la producción en un campo que lleva más de 10 años de actividad No Convencional.

El trabajo realizado analiza los principales desafíos y estrategias implementadas durante la perforación, las cuales incluyen:

- Evaluación geomecánica, geofísica y antecedentes en Loma Campana
- Diseño de trayectoria, BHA y sarta de perforación
- Estrategias para optimizar limpieza y minimizar fricción
- Protocolos de mitigación de temperatura para preservar integridad de la herramienta direccional

Este pozo, pionero en Vaca Muerta, establece un precedente para futuros pozos con problemáticas similares. Dado el éxito del proyecto ya se tiene un segundo pozo programado con esta técnica planificado para el 2026, con el fin de maximizar la recuperación en áreas de difícil acceso, que de otro modo no se estimularían.

El proyecto tuvo un impacto importante para YPF y el yacimiento de Loma Campana, generando un incremento en el volumen drenado del yacimiento, una reducción de costos frente a la perforación de dos pozos con rama estimulable equivalente, y menor impacto ambiental al reducir el *footprint* en superficie (1 pozo vs. 2 pozos).

1. Introducción

El desarrollo del yacimiento no convencional de Vaca Muerta ha ido enfrentando diferentes desafíos y también logrando significativos avances desde sus inicios. La innovación tecnológica combinada con el avance en el conocimiento del reservorio dio origen a innumerables cambios en la forma de desarrollar el yacimiento, entre ellos la priorización de niveles a desarrollar y el largo lateral perforable. Pero este progreso y curva de aprendizaje trajo la desventaja de tener que perforar pozos nuevos en zonas con alta densidad de pozos existentes, en distintos niveles, con longitudes de ramas horizontales muy variadas.

Actualmente, pozos con largos laterales menores a 2500 m pierden atractivo frente a la posibilidad de realizar pozos de más de 4000 m de rama efectiva, pero diseñar y perforar estos pozos extensos con espaciamiento óptimo en estas zonas complejas puede resultar desafiante. Como solución a esta problemática, se diseñó un pozo con geonavegación en dos niveles, para lograr un espaciamiento óptimo entre los pozos existentes y los pozos a perforar en el mismo pad.

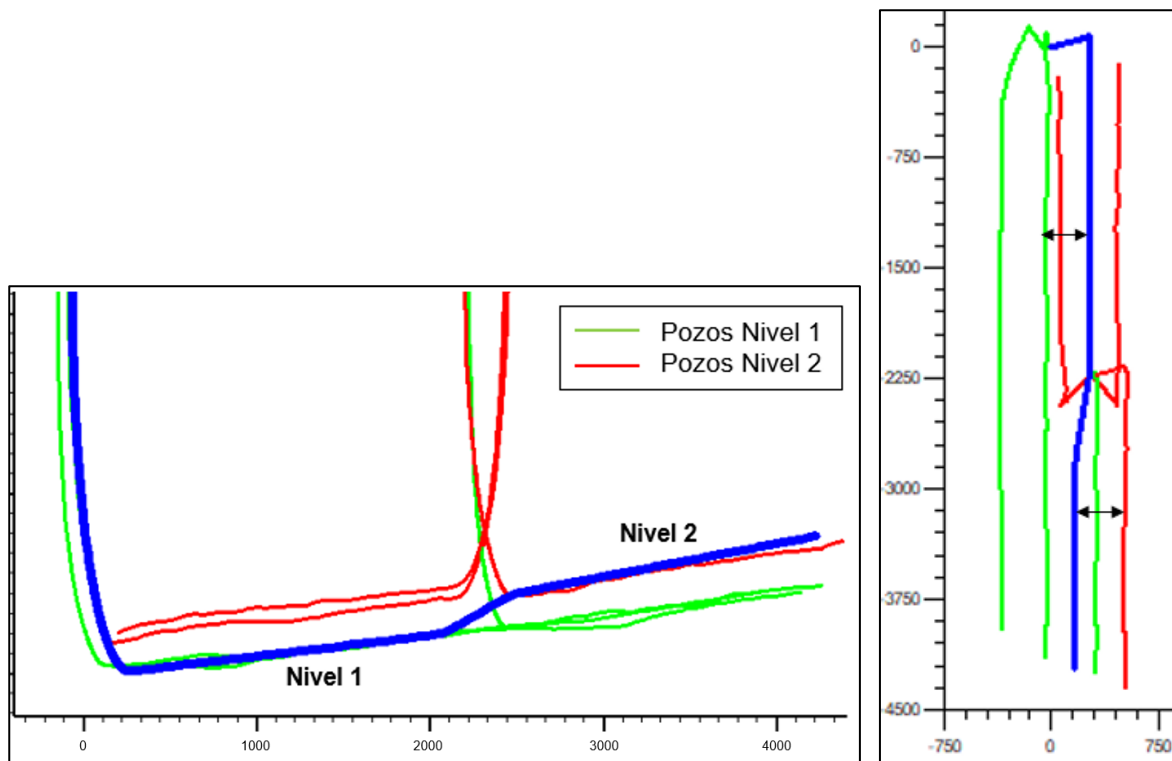


Imagen 1: Posición de pozo bi-nivel con pozos offset, en corte y plano

Este documento se concentra en la planificación de este pozo bi-nivel y los desafíos superados durante la perforación. El objetivo es sentar las bases para la perforación de futuros pozos similares en la cuenca.

2. Desarrollo

2.1 Contexto del Proyecto

El pozo que describiremos adapta su trayectoria para lograr un drenaje homogéneo de los reservorios, cambiando de nivel de navegación en la parte media de su rama lateral, sumando desplazamiento lateral, y logrando de esta manera adaptarse a una geometría irregular dejada por una locación de avanzada, perforada en el año 2017. En ese momento, la longitud promedio para las ramas laterales era inferior a la mitad de lo que se puede lograr actualmente.

Las limitaciones de superficie, además, determinaban que el segundo tramo de la rama, si no se construía de esta manera, hubiera sido imposible alcanzarla con otro diseño.

- Ubicación: Loma Campana, Cuenca Neuquina
- Objetivo: Perforar un pozo que logre optimizar área de drenaje, ajustándose a las irregularidades en distribución de *pads* anteriores.
- Estrategia: Perforar un solo pozo con dos ramas horizontales ubicadas en niveles verticalmente separados

- Longitud horizontal perforada: ~4,000 metros
- Geonavegación:
 - Primer nivel: 1,821 metros
 - Segundo nivel: 1,689 metros
 - Separación vertical: 47 metros
 - Desplazamiento lateral: 100 metros

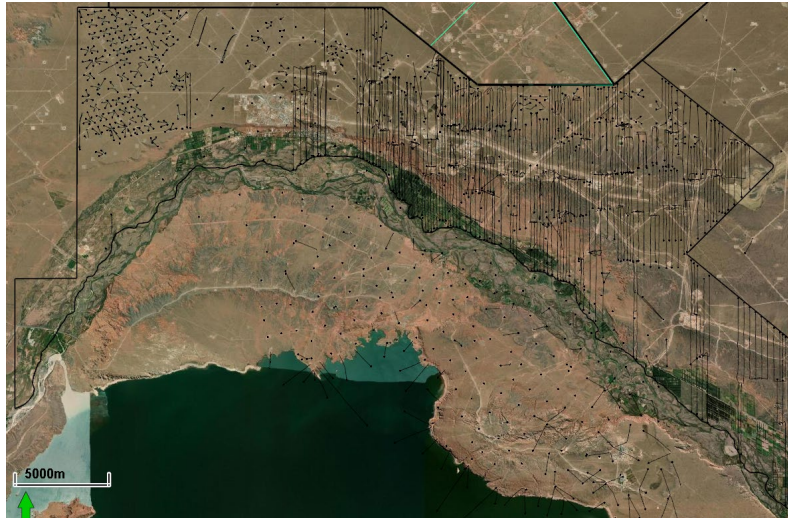


Imagen 2: Yacimiento Loma Campana, desarrollo a marzo de 2025

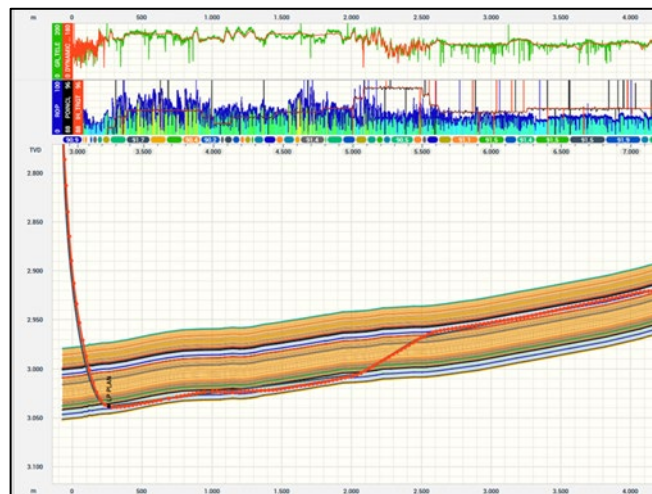


Imagen 3: Geonavegación de rama lateral en dos niveles

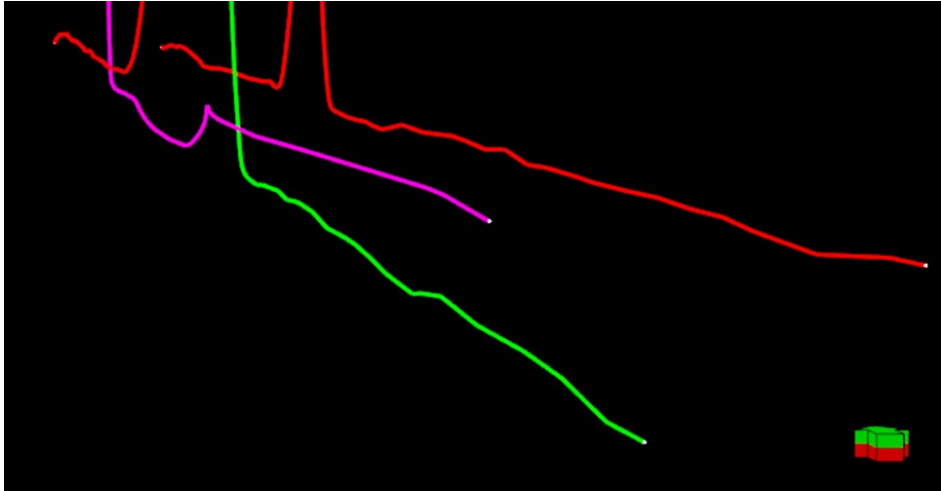


Imagen 4: Esquema tridimensional del pozo bi-nivel (magenta) que navega en el nivel verde y luego asciende estratigráficamente al nivel rojo. Exageración vertical 5x.

2.2 Evaluación Geomecánica y Planificación Inicial

El diseño requería subir estratigráficamente, atravesando un nivel más competente, considerado como barrera entre los dos niveles durante la fractura y producción del pozo.

Para eso era necesario realizar una evaluación geomecánica de la formación de transición para determinar el riesgo de inestabilidad de pozo durante la perforación.

Se consideraron múltiples variables técnicas:

- Presiones de poro y gradiente de fractura
- Estabilidad del pozo en función de profundidad
- Compresibilidad de la roca en cada nivel

El campo maduro, contaba con una cantidad importante de perfiles y estudios geomecánicos de pozos verticales y horizontales cercanos. Los modelos geo mecánicos, con curvas de colapso, presión de poro, perdidas y rotura de formación fueron clave para determinar la densidad de equivalente necesaria para perforar en los distintos niveles, y mas importante para atravesar la zona de transición, sin correr riesgo de derrumbe o generar inestabilidad del pozo. Los modelos fueron calibrados con los eventos de perdidas e inlfujos observados en los pozos vecinos. La formación de transición, medida en compresibilidad (psi), mostraba ser de mayor dureza que ambos niveles, pero con niveles de colapso similares a los dos niveles a geonavegar. Para la perforación podría resultar en mayor dificultad de perforar con menor tasa de perforación y con mayores niveles de vibración, pero se podía perforar amos niveles y la zona de transición con la misma densidad sin presentar riesgo mayor de inestabilidad de pozo.

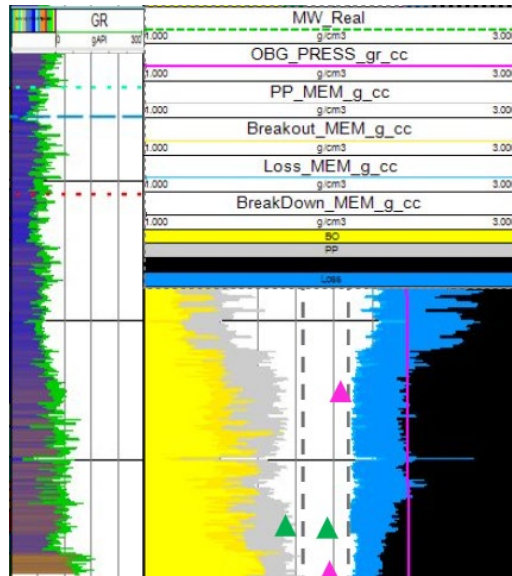


Imagen 5: Modelos geo mecánicos

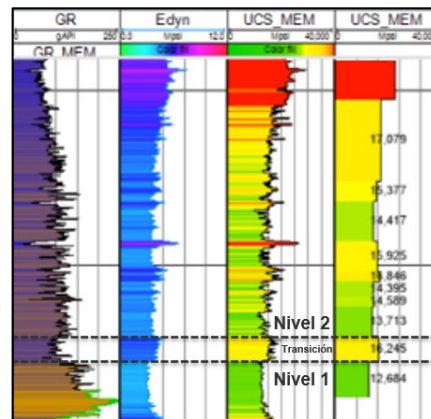


Imagen 6: Perfil de pozo vecino, modelo de compresibilidad

Zone log	Edyn	UCS_MEM(psi)
Quintuco	7	27785
Tope de VM	5,6	17079
Nivel 2	3,5	13713
Transición	4,1	16245
Nivel 1	3,1	12684

Imagen 7: Compresibilidad de niveles en la zona a perforar

Se revisaron experiencias previas de pozos que atravesaron la zona de transición en la rama horizontal para evaluar posibles problemas operativos. El primer pozo de referencia se perforó en el año 2013. El pozo se perforó manteniendo una inclinación constante entre 91 - 92,5° sin control de geonavegación. El pozo se aterrizó en Nivel 1 y se perforó una rama lateral de +/- 1200 metros, cruzando la zona de transición hasta alcanzar TD en el Nivel 2. La vertical y curva fue perforada con motor de fondo (MDF) y trepante 8-1/2" aterrizando dentro de Nivel 1 sin inconvenientes. Se realizó una maniobra para cambiar el motor de fondo por una herramienta Rotary Steerable System (RSS) que sufrió una falla después de perforar 1050 metros. El tercer BHA logró alcanzar la profundidad final del pozo. En ambas maniobras

se logró sacar con tracciones puntuales que requirieron sacar con backreaming, pero sin observar inestabilidad de formación o indicaciones de derrumbe.

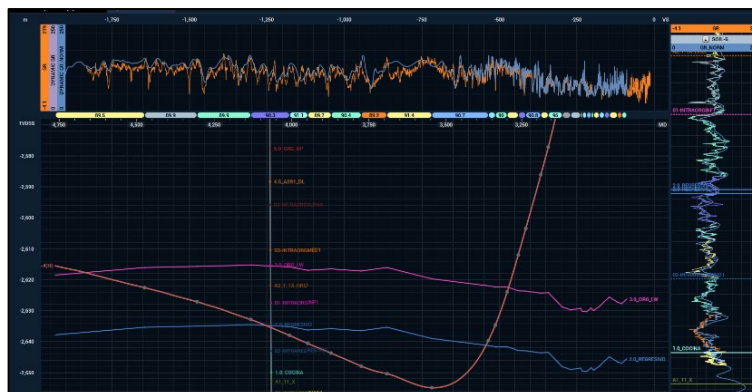


Imagen 8: Pozo referencia #1

El segundo pozo de referencia se perforó en el año 2015. Se perforó manteniendo una inclinación constante entre 91-93° sin control de geonavegación. Este pozo también aterrizó en Nivel 1 y se perforó una rama lateral de +/-1500 metros, cruzando la zona de transición y terminando en el Nivel 2. La vertical y curva se perforaron con MDF y trepano de 6-1/8". La rama lateral se perforó en una carrera con RSS y trepano 6-1/8" sin observar inconvenientes durante la perforación. La maniobra vio tracciones de hasta 40 toneladas y se detuvo la perforación para circular baches de limpieza a superficie sin observar indicaciones de derrumbe.

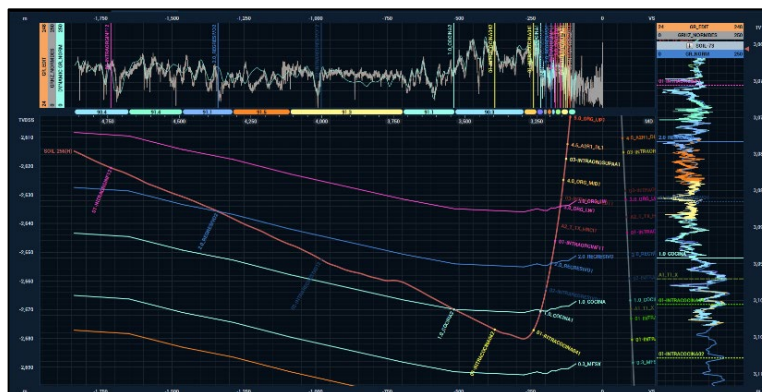


Imagen 9: Pozo referencia #2

Los dos pozos de referencia, perforados con herramienta RSS, pudieron atravesar la zona de transición manteniendo inclinaciones entre 91-93° sin observar problemas significantes durante la perforación o durante maniobra, dando señales positivas para la perforación del pozo en cuestión.

2.3 Diseño de Trayectoria y Herramientas de Perforación (BHA)

El objetivo era alcanzar dos niveles distintos manteniendo integridad estructural, control direccional y eficiencia operativa. Los dos niveles tenían una separación vertical de +/-45 metros y se requería un desplazamiento lateral de 100 metros para alejarse del pozo más cercano en el Nivel 2.

La trayectoria se planificó dando prioridad a minimizar la tortuosidad del pozo entero. Se diseñó una trayectoria tipo J, con un desplazamiento lateral de 268 metros y una sección negativa de 72 metros. Adicionalmente se diseñó una curva con dog-leg-severity (DLS) bajos de 5,2°/30m.

Comments	MD (m)	Incl (°)	Azim Grid (°)	TVD (m)	TVDSS (m)	VSEC (m)	NS (m)	EW (m)	DLS (°/30m)
	0	0,0	0,0	0	-480	0	0	0	N/A
13.375 in Casing	625	0,0	75,0	625	145	0	0	0	0,0
Start of Build	655	0,0	75,0	655	175	0	0	0	0,0
Tangent	823	14,0	75,0	821	341	-5	5	20	2,5
Start of Drop	1803	14,0	75,0	1772	1292	-67	67	249	0,0
	1971	0,0	75,0	1938	1458	-72	72	268	2,5
9.625 in Casing	2216	0,0	75,0	2184	1704	-72	72	268	0,0
Kick Off Point	2742	0,0	75,0	2710	2230	-72	72	268	0,0
Landing Point	3264	91,0	180,0	3038	2558	262	-262	268	5,2
Cambio de Nivel	5009	91,1	180,0	3006	2526	2007	-2007	268	0,0
	5127	95,0	180,0	3000	2519	2125	-2125	268	1,0
Cambio de Azimuth	5157	95,0	180,0	2997	2517	2155	-2155	268	0,0
	5307	95,0	190,0	2984	2504	2303	-2303	255	2,0
Cambio de Inclination	5427	95,0	190,0	2974	2493	2421	-2421	235	0,0
	5527	91,7	190,0	2968	2487	2520	-2520	217	1,0
Cambio de Azimuth	5727	91,7	190,0	2962	2482	2717	-2717	183	0,0
	5877	91,7	180,0	2958	2477	2866	-2866	169	2,0
Ending Point	7234	91,7	180,0	2918	2438	4222	-4222	170	0,0

Imagen 10: Trayectoria Planificada

El cambio de nivel también llevó una planificación cautelosa pensando en minimizar la tortuosidad del pozo, minimizar arrastre durante la sacada del BHA, facilitar la entubación de cañería 5,5", y maximizar la probabilidad de éxito del conjunto direccional. En base a la experiencia de los pozos de referencia se sabía que se podía atravesar la zona de transición con inclinaciones entre 91-93° sin inconvenientes, pero utilizar estas inclinaciones significaba mayor tiempo en la zona de transición y menor rama estimulable dentro de los niveles deseados. Se determinó realizar el cambio de nivel manteniendo una inclinación de 95°. Los cambios de inclinación y azimuth se realizaron en secuencia y no en simultáneo. Se incrementó la inclinación de 91° a 95° con build-up rate (BUR) de 1°/30m. Después de alcanzar 95° se inició el giro en azimuth de 180° a 190° con turn rate (TR) de 2°/30m. Se inició el *drop* de 95° a 92° de inclinación con DLS de 1°/30m, manteniendo el azimuth de 190°. Al alcanzar el true-vertical depth (TVD) e inclinación deseada, se inicia el giro de 190° a 180° en azimuth ya dentro del segundo nivel. En Loma Campana ya se contaba con experiencia amplia trabajando con BUR de 1°/30m y TR de 2°/30m en las ramas laterales para alejarse de pozos offset por riesgo de colisión, por lo que se tenía alta confianza en la capacidad de lograr estos DLS durante el cambio de nivel.

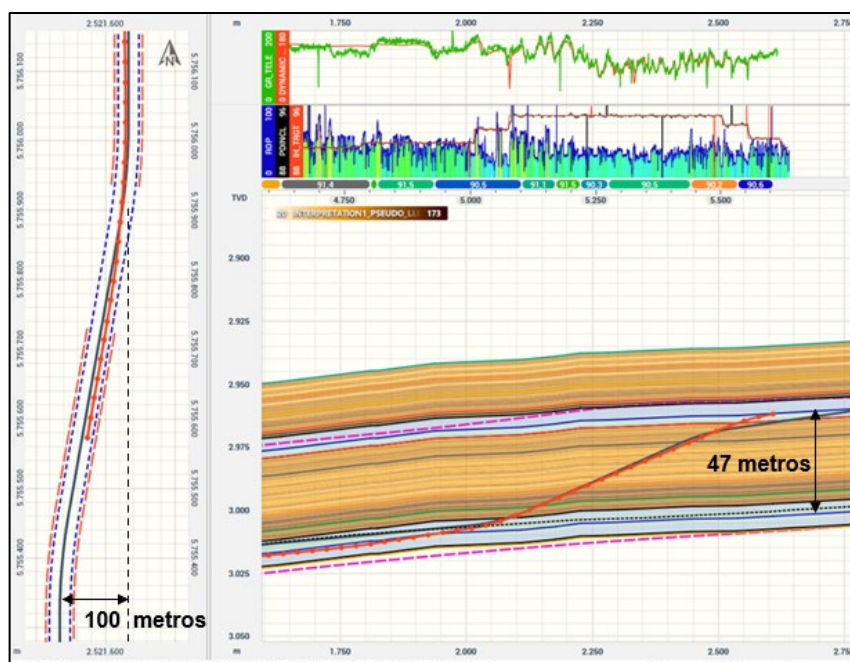
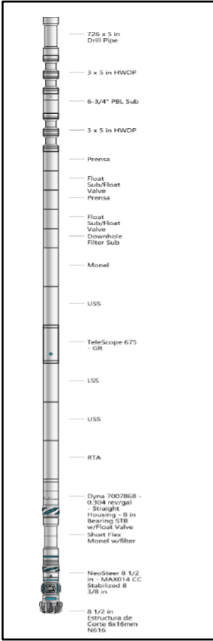


Imagen 11: Cambio de Nivel: Desplazamiento Vertical y Lateral

Para minimizar tortuosidad y realizar los ajustes necesarios, se utilizaron herramientas de perforación de última generación como es el RSS asistido por motor de fondo y herramientas de lectura en tiempo-real (RTA).

El RSS con lectura de inclinación cerca del trepapo fue seleccionado por su capacidad de realizar correcciones rápidamente sin tener que detener a tomar registros direccionales. Se decidió perforar la fase de aislación entera con un BHA RSS motorizado. Antes de iniciar el cambio de nivel se confirmaría el funcionamiento 100% correcto de la herramienta mediante el RTA. En caso de alguna alerta con la herramienta se realizaría una maniobra por un BHA nuevo ya que no se quería arriesgar alguna falla durante el cambio de nivel. El RTA sería crítico para verificar en tiempo real que el conjunto direccional esté respondiendo correctamente y generando los DLS necesarios. Falta de capacidad de dar los DLS necesarios tanto en el cambio de inclinación o cambio de azimuth, resultaría en un cambio de BHA, requiriendo mayores DLS para corregir o mayor cantidad de metros entre niveles, en una zona con menor productividad.



#	Description	Vendor	OD (in)	ID (in)	Max OD (in)	Top Type Top Gen.	Bot Type Bot Gen.	Len. (m)	Cum Len. (m)	Cum Wt. (t)
1	8 1/2 in Estructura de Corte 5x15mm N516	slb	6	2.25	8.5	4-1/2 REG Pin		0.18	0.18	0.04
2	NeoSteer 8 1/2 in - MAX014 CC Stabilized 8 3/8 in	slb	6.75	4.2	8.375	5-1/2 FH Box	4-1/2 REG Box	3.93	4.11	0.62
3	Short Flex Monel w/Filter	slb	6.781	3.25	6.781	NC50 Box	5-1/2 FH Pin	2.85	6.96	0.83
4	Dyna 7007868 - 0.304 revigal - Straight Housing - 8 in Bearing STB w/Float Valve	slb	7	5.5	8	NC50 Box	NC50 Pin	10.92	17.88	2.53
5	RTA	slb	6.875	3.875	6.89	5-1/2 FH Box	NC50 Pin	1.8	19.68	2.76
6	USS	slb	6.875	3.875	6.89	5-1/2 FH Box	5-1/2 FH Pin	0.47	20.15	2.82
7	LSS	slb	6.875	3.875	6.89	5-1/2 FH Pin	5-1/2 FH Pin	0.46	20.61	2.88
8	TeleScope 675 - GR/APWD	slb	6.813	5.109	6.813	5-1/2 FH Box	5-1/2 FH Box	7.66	28.27	3.84
9	USS	slb	7	3.875	7	NC50 Box	5-1/2 FH Pin	0.46	28.73	3.90
10	Monel	slb	6.75	2.813	6.75	NC50 Box	NC50 Pin	9.14	37.87	5.27
11	Downhole Filter Sub	slb	6.688	2.375	6.688	NC50 Box	NC50 Pin	1.97	39.84	5.57
12	Float Sub/Float Valve	Rig	6.69	2.99	6.69	NC50 Box	NC50 Pin	0.77	40.61	5.68
13	Prensa	Rig	6.69	2.75	6.69	NC50 Box	NC50 Pin	0.51	41.12	5.76
14	Float Sub/Float Valve	Rig	6.69	2.99	6.99	NC50 Box	NC50 Pin	0.76	41.88	5.86
15	Prensa	Rig	6.692	2.71	6.692	NC50 Box	NC50 Pin	0.59	42.47	5.95
16	3 x 5 in HWDP (3 joints)	Rig	5	3	6.625	GPDS50 Box	GPDS50 Pin	28.95	71.42	8.13
17	6-3/4" PBL Sub	DSI	6.75	1.27	6.75	NC50 Box	NC50 Pin	2.76	74.18	8.61
18	3 x 5 in HWDP (3 joints)	Rig	5	3	6.625	GPDS50 Box	GPDS50 Pin	28.95	103.13	10.79
19	726 x 5 in Drill Pipe (726 joints) to surface	Rig	4.855	4.276	6.625	GPDS50 Box	GPDS50 Pin	7013.16	7116.29	281.00

Imagen 12: Diseño de BHA

Las barras de perforación utilizadas fueron barras de sondeo 5” 19,5 ppf S-135 con conexiones premium de alto torque (torque de apriete máximo de 43 kft-lbs).

El BHA seleccionado tenía una configuración de trepapo 8-1/2”, RSS, MDF y MWD. Esta configuración con el MWD por encima del MDF resulta en menores vibraciones para el MWD y menor probabilidad de daños al mismo. La limitante para esta configuración es la distancia entre el trepapo y el sensor de Gamma Ray (GR) (23,74 metros) y los sensores direccionales (inclinación y azimuth) (24,39 metros). Esto se identificó como un riesgo importante para realizar el cambio de nivel ya que se podría potencialmente salir del tope de la ventana de geonavegación del Nivel 2 antes de poder confirmar estar dentro del Nivel mediante lecturas de GR. Para mitigar este riesgo se buscó el pozo con perfil más cercano para estimar el espesor del nivel de transición, y verificarlo con el espesor observado durante la perforación de la curva.

2.5 Ejecución de Perforación

La perforación de la fase de aislación se realizó con estrategia shoe-to-shoe, realizando el *drill-out* del zapato intermedia y perforando hasta la profundidad final (TD) con un solo BHA. La fase inició con una densidad de lodo de 1750 g/l (14,6 ppg). El pozo en cuestión fue el último pozo del pad, y fue el único que no presentó influjo durante la perforación por lo que se pudo reducir la densidad de lodo durante la lateral a 1720 g/l (14,4 ppg) y mantener esa densidad hasta TD. Durante la perforación se utilizó el sistema de MPD, manteniendo contrapresión en superficie siempre manteniendo una mínima densidad equivalente de 1850 g/l (15,4 ppg) en condiciones dinámicas y estáticas con el propósito de mantener estabilidad de las paredes del pozo. Pozo offset #2, el segundo pozo del mismo pad perforando en el mismo nivel presentó derrumbes por lo que decidió no permitir la densidad equivalente caer por debajo de 1850 g/l. Con esta densidad equivalente el pozo no presentó ningún indicio de derrumbe en ningún momento.

La tasa de penetración (ROP), en los primeros 1800 metros en el primer nivel obtuvo un promedio de 34,8 metros/hora. En el cambio de nivel, se obtuvo una ROP promedio de 26,7 metros/hora. En el segundo nivel se obtuvo una ROP de 23,8 metros/hora, porque se sufrió de altas temperaturas, donde se tuvieron que implementar estrategias de mitigación de temperatura.

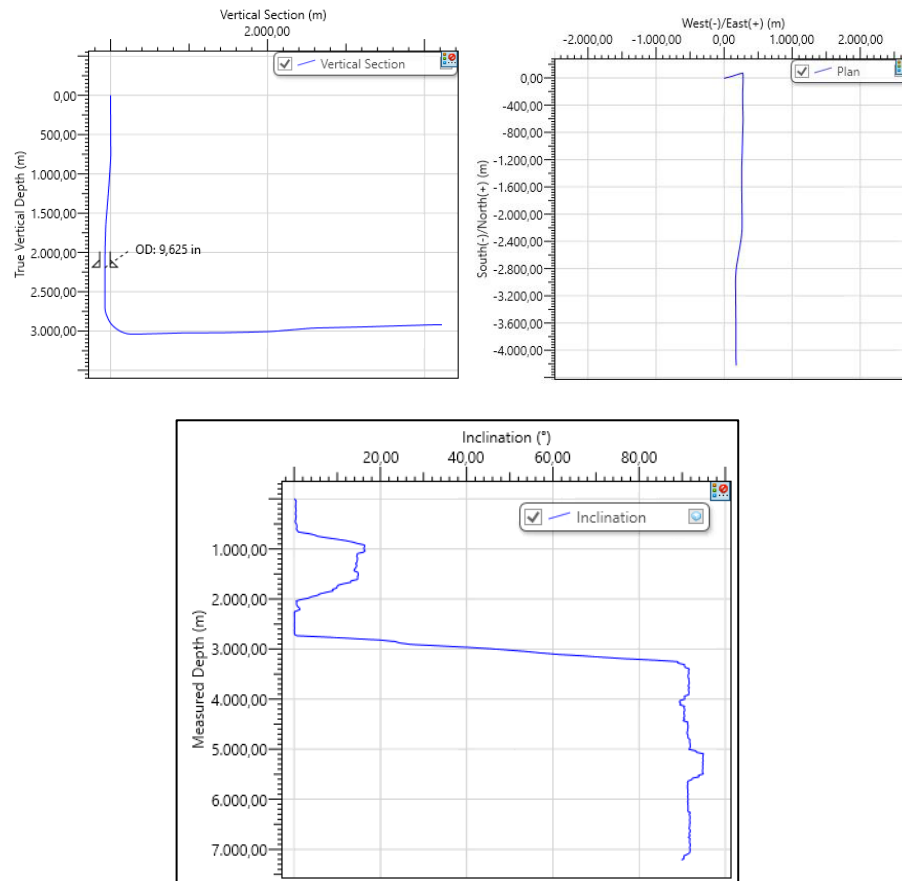


Imagen 13: Resultado de trayectoria con registros oficiales

En el pozo, se probó por primera vez en Argentina, una versión mejorada del RSS, con modificaciones en el control-unit apuntadas a minimizar la susceptibilidad de la herramienta a atascarse con sólidos (viruta, recortes, o baritina). La versión mejorada del control-unit, mostró ser muy superior, observando indicios mínimos de atascamientos durante la perforación que se pudieron resolver rápidamente mediante baches anti-jamming o con variación de caudal. Estas mejoras fueron un factor importante para que la herramienta haya llegado a TD en una sola carrera.

Las modificaciones no tuvieron impacto negativo en el control direccional, y se logró mantener DLS y niveles de tortuosidad bajos. El máximo DLS real observado en la curva fue de $7,5^{\circ}/30\text{m}$, con un promedio de $5,4^{\circ}/30\text{m}$. El máximo DLS observado durante la lateral fue de $2,47^{\circ}/30\text{m}$, con un promedio de $0,65^{\circ}/30\text{m}$, incluyendo el cambio de nivel. Este promedio bajo permitió que la tortuosidad acumulada llegue a $0,95^{\circ}/30\text{m}$ en TD, y un máximo de $1,31^{\circ}/30\text{m}$ en el punto de aterrizaje de la curva, valores similares a los pozos offset.

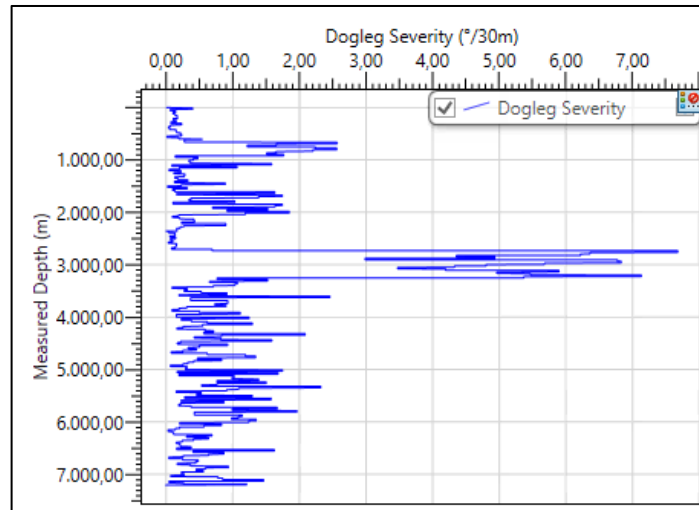


Imagen 14: Dog-Leg-Severity reales del pozo

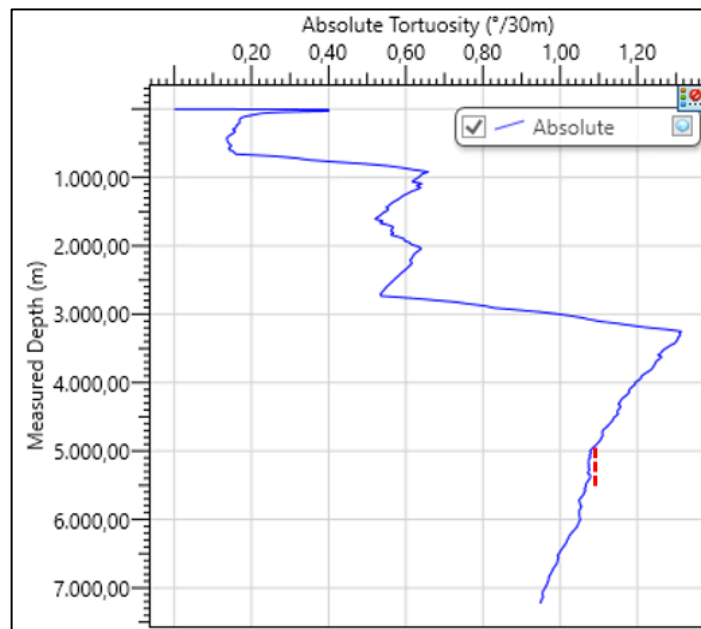


Imagen 15: Tortuosidad del pozo

Los parámetros usados durante la perforación del pozo bi-nivel fueron muy similar a los pozos offset. La diferencia en parámetros usados (GPM, RPM, y WOB) variaron solamente en la profundidad que se tuvieron que reducir por los efectos de temperatura y presiones en cada uno de los pozos. La principal diferencia en comparación a los pozos offset fue la ROP. Los dos pozos offset del mismo nivel tuvieron los ROP promedio más alto del pad, ya que el nivel perforado tiene las condiciones más favorables de Vaca Muerta, menor dureza y mayor homogeneidad. Al contrario de los dos pozos offset, en el pozo bi-nivel se le dio prioridad a minimizar tortuosidad, realizar una limpieza efectiva y

mantener control direccional. Tener un menor ROP, especialmente en el segundo nivel, tuvo un impacto positivo en el torque y presión de bomba observado.

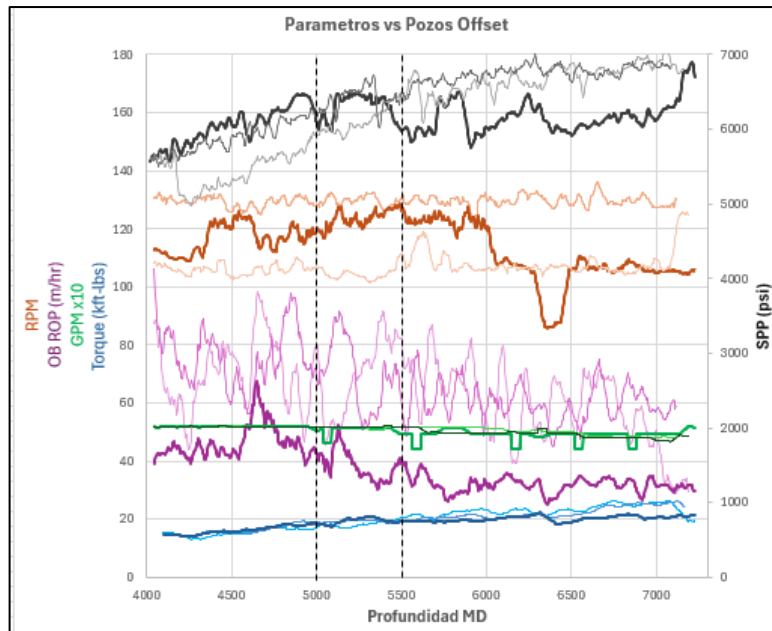


Imagen 16: Comparación de Parámetros de Perforación vs pozos offset

Se puede observar que el torque perforando al inicio de la lateral se mantuvo entre factores de fricción de 0,18 y 0,25, donde los valores de ROP fueron más altos. Mientras se empezó a ganar profundidad, el ROP fue reduciendo, la frecuencia de baches se incrementó, y de esa manera mejorándola limpieza y evacuación de recortes. A partir de que se llegó al segundo nivel en 5500 m MD, el torque en superficie se mantuvo entre factores de fricción de 0,18 y 0,12.

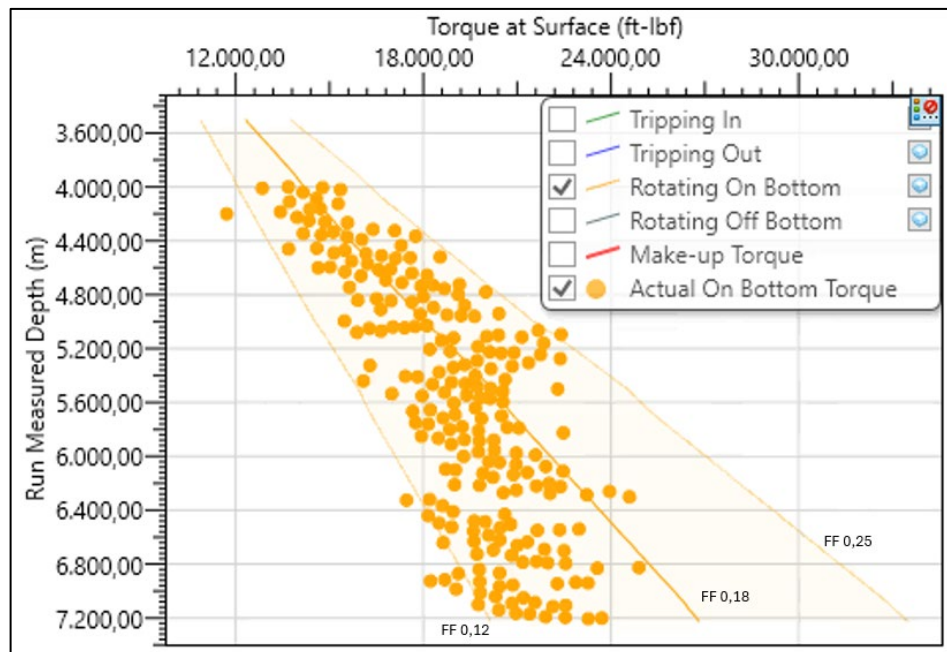


Imagen 17: Valores de torque en superficie perforando

Durante el cambio de nivel se mantuvieron los parámetros relativamente estables. Se utilizó el software de la compañía de equipo de torre para variar las RPM y minimizar los efectos de stick-slip. Las vibraciones (axiales, radiales y stick-slip) observadas mientras se realiza el cambio de nivel fueron mínimas, observando algunos eventos puntuales de picos de choques y vibraciones, pero de poca duración. Se observaron mayores niveles de vibraciones perforando el segundo nivel, a pesar de tener menor dureza que el nivel de transición, por ser una formación mas heterogénea.

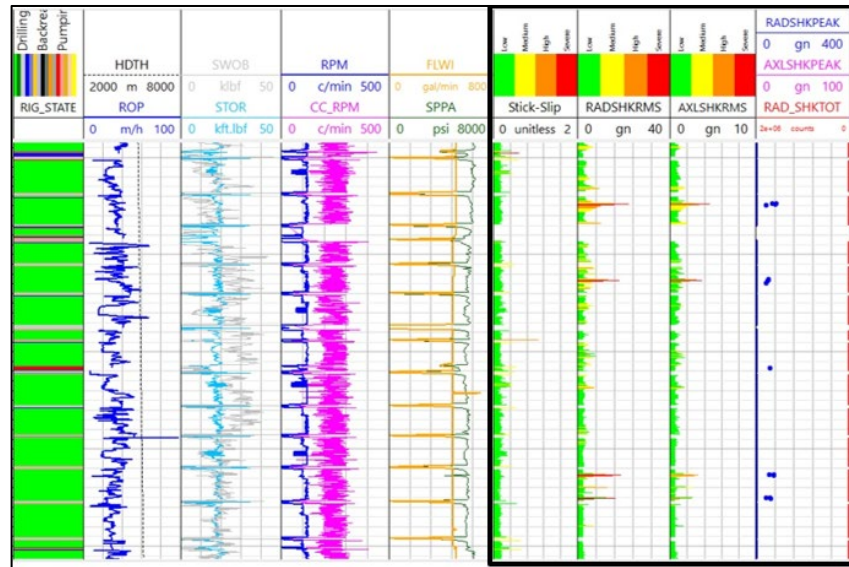


Imagen 18: Vibraciones perforando nivel de transición (cambio de nivel)

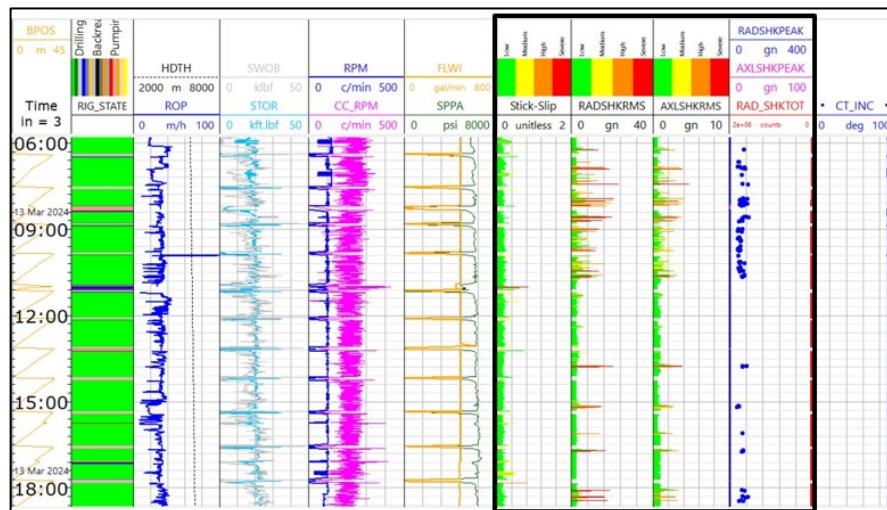


Imagen 19: Vibraciones perforando Nivel #2

Después llegar a TD, se realizó ciclo de limpieza detallado en la siguiente sección. Se sacó el BHA hasta 5000 m MD, donde se realizó el ahogo del pozo. Desde ahí se continuó a sacar BHA hasta superficie. Durante la maniobra, se pudo retirar el BHA sin necesidad de realizar backreaming. Se observa durante la maniobra completa, un factor de fricción entre 0,3 y 0,35. Tampoco se observó inconvenientes sacando BHA a través del cambio de nivel.

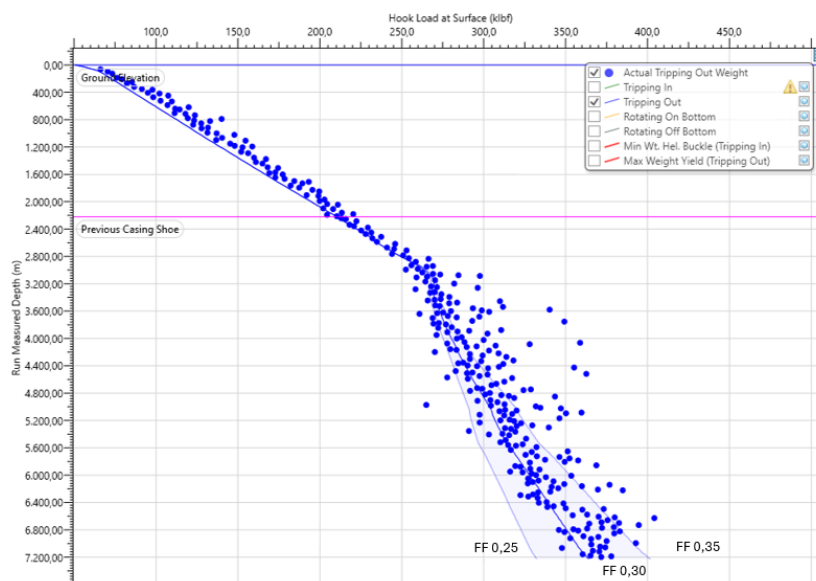


Imagen 20: Arrastre durante sacada de BHA

La entubación se realizó con cañería 5,5" 23 lb-ft P-110, estándar para pozo no convencionales, con roscas premium de alto torque tipo *wedge*. La cañería tiene un torque de apriete de 9200 ft-lbs y un torque operacional hasta 26000 ft-lbs. Se bajó cañería con CRT sin rotación o bomba hasta los 4330 m MD. Desde esa profundidad observa asentamiento debido al *buckling* de cañería, por lo que necesitó aplicar rotación con 30 rpm, sin bomba, hasta la profundidad final del pozo sin observar torque mayor de 16 kft-lbs. Se logró colgar y empaquetar el pozo sin inconvenientes, y sin observar arrastre anormal en comparación con los pozos offset.

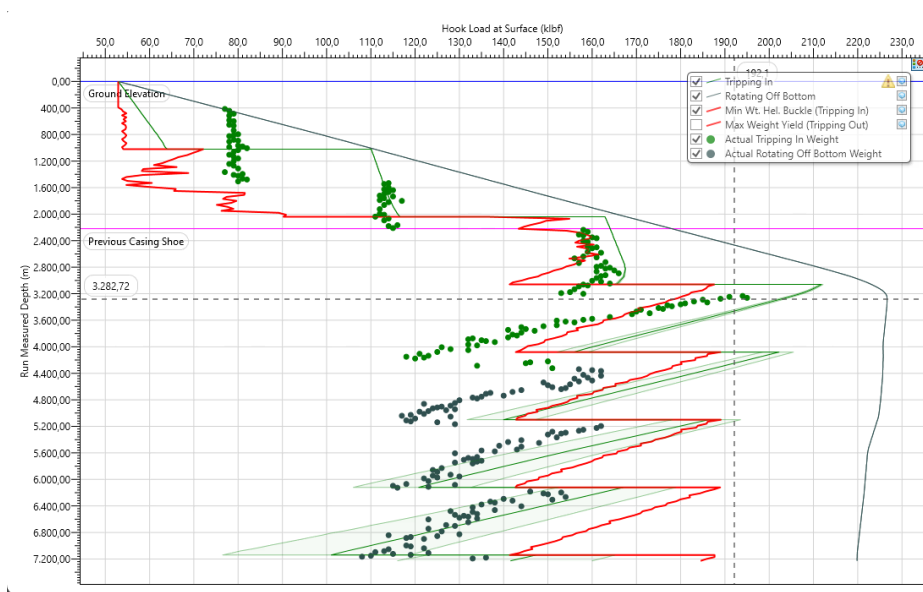


Imagen 21: valores de arrastre durante entubación

2.4 Estrategias para Minimizar Fricción y Mejorar Limpieza

Uno de los factores críticos durante la perforación fue el manejo de la fricción acumulada. Si bien en la planificación se implementaron las mejores prácticas, durante la ejecución también se tomaron medidas importantes para mitigar los efectos de tortuosidad y fricción, mediante las siguientes estrategias:

- Monitoreo en tiempo real de torque, peso y presión de bomba en campo y remotamente
- Monitoreo de volumen de recortes recuperado con sistema de balanza en zarandas
- Protocolo de baches de limpieza durante perforación de la horizontal
- Ciclo de limpieza en TD, basado en lecciones aprendidas de YPF para pozos extendidos

El inicio de la perforación de la rama horizontal se realizó con caudales óptimos para el conjunto direccional para obtener una caída de presión ideal en los pads del RSS y de esa manera maximizar ROP y control direccional. El caudal de 520 GPM lograba mantener una buena limpieza incluso con una tasa de penetración elevada que comúnmente se observa al inicio de la rama horizontal. Pero se esperaba que se iba a tener que reducir el caudal durante la perforación por las limitaciones de temperatura y presión de bomba, por lo que la implementación de estrategias de optimización de limpieza era crítica.

El monitoreo de limpieza fue un trabajo en conjunto del equipo en campo y de la sala remota de YPF monitoreando los parámetros de perforación y las desviaciones con respecto a las simulaciones y la data real de los pozos offset. En el campo se contaba con la simulación de la compañía de lodo para evaluar la limpieza de pozo considerando los valores de ROP, reología del lodo y los parámetros de perforación. Desde la sala remota de YPF se monitoreaba la condición de torque, presión de bomba y arrastre comparando con los pozos offset y evaluando la tendencia para identificar un posible deterioro en la limpieza del pozo. Se verificaba la condición de pozo con toma de pesos cada 500 metros durante la rama horizontal midiendo el arrastre hacia arriba (*P/U weight*), arrastre hacia abajo (*S/O weight*), peso neutro y el torque en el aire para actualizar los factores de fricción en las simulaciones y evaluar las tendencias.

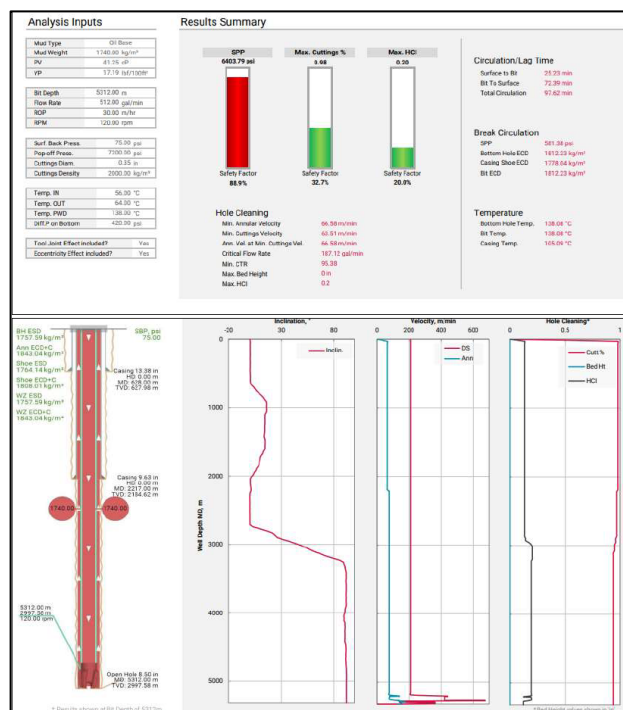


Imagen 22: Analisis de limpieza de pozo

Adicionalmente, se añadió un sistema de balanzas en las zarandas primarias del equipo de perforación para medir el volumen de los recortes recuperado del pozo. Fue importante las mediciones de porcentaje de cutting recuperado en zaranda versus el volumen teórico para evaluar la limpieza y tomar decisiones en la frecuencia de baches. Cuando se observaba disminución en el porcentaje recuperado, como fue durante el cambio de nivel, se pudo implementar medidas como el cambio en la frecuencia de bombeo

de los baches de limpieza, o el control de ROP. manteniendo en 93% el promedio durante la fase horizontal. El sistema de balanzas también se implementó con el propósito de monitorear por indicaciones de derrumbe en la zona de transición y ayudó a confirmar que las densidades equivalentes de circulación (ECD) y las densidades equivalentes estáticas (ESD) en conexiones de 1850 g/l (15,4 ppg), controladas con el sistema de Managed Pressure Drilling (MPD), eran las adecuadas para mantener estabilidad del pozo.

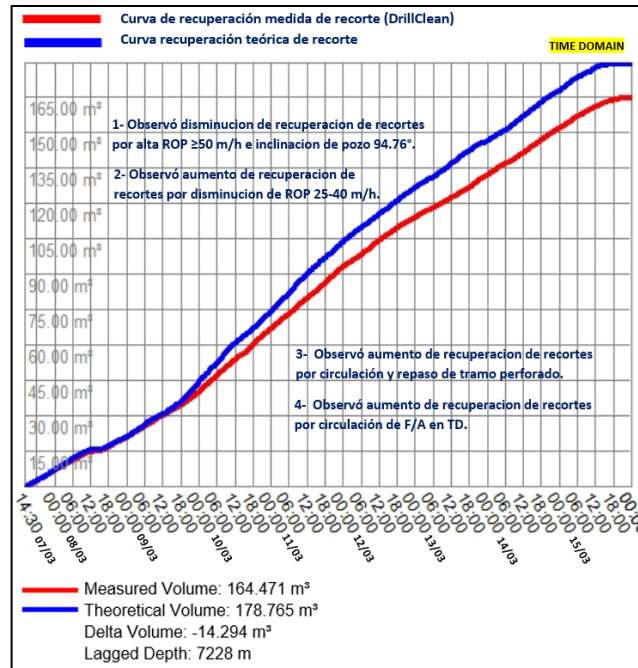


Imagen 23: Volumen de recorte recuperado

Previo a la ejecución, se había diseñado un protocolo de limpieza con unas concentraciones de productos para los baches y una frecuencia de baches preestablecida, pero la frecuencia de bombeo se fue adaptando durante la perforación en base a las condiciones observadas del pozo. Se tenían dos tipos de baches definidos, un bache mecánico con material obturante diseñado para acarrear los recortes y un tándem compuesto por un bache de lodo con baja densidad y baja reología (1450 g/l) seguido por un bache de lodo de alta densidad y alta viscosidad (1900 g/l). El tándem estaba diseñado para generar turbulencia en el lodo para luego ser removido por el bache de alta densidad y alta reología. El bache mecánico de la misma densidad del lodo de perforación (1750 g/l) contenía una concentración de 60 kg/m³ de una mezcla de material obturante semi-fino. El bache mecánico servía doble propósito de minimizar las admisiones a la formación de manera preventiva, y también se observaba buena recuperación de recortes con estos baches medido por las balanzas.

El plan de bombeo se inició desde el punto de aterrizaje (landing point) con un bache de limpieza cada tres tiros perforados. Se seguía una secuencia de dos baches mecánicos por cada tándem turbulento/denso. Es decir, se enviaba un bache mecánico en el tercer y sexto tiro, y un tándem de limpieza en el 9 tiro perforado y se reiniciaba la secuencia.

Por medio del sistema de balanzas se determinó la efectividad de cada bache bombeado a su retorno, iniciando la fase con un promedio de 89% de recuperación. A partir de 4775 metros MD, previo al cambio de nivel, se modificó la secuencia de bombeo de baches debido a una reducción observada de recuperación de recortes por debajo del 80 %. Desde esa profundidad se modificó la frecuencia a un bache cada dos tiros perforados, frecuencia que estaba inicialmente planificada a partir de los 5600 m. Continuó perforando y bombeando baches de limpieza cada 2 tiros perforados hasta llegar

a los últimos 4 tiros antes de llegar a TD. En los últimos cuatro tiros previa a TD, en los cuales al inicio de cada tiro se bombeó un bache mecánico con 60 kg/m³ de material obturante, 20 kg/m³ de control de filtrado y 30 kg/m³ estabilizador/sellante

Prof. (m)		Datos del Pozo		Turbulencia		Datos del Tandem		Balance		Fm		Weatherford		
Prof. (m)	Vel. (m/s)	Dens. (g/l)	Vel. (m/s)	Vel. (m/s)	Dens. (g/l)	Vel. (m/s)	Dens. (g/l)	Vel. (m/s)	Dens. (g/l)	Vel. (m/s)	Dens. (g/l)	Vel. (m/s)	Dens. (g/l)	
08/03	3295	1750	38	10	Mecánico 3 m3								Moderado cutting en taracea. Porcentaje de limpieza balancea 88%.	
08/03	3305	1750	39	10	Mecánico 3 m3								Buen acaro de cutting. Porcentaje de limpieza balancea 85%.	
08/03	3403	1750	39	10	2	1450	3	1910	127	170	Buen acaro de cutting. Porcentaje de limpieza balancea 85%.			
08/03	3549	1750	37	9	Mecánico 3 m3								Buen acaro de cutting. Porcentaje de limpieza balancea 85%.	
10/03	3604	1750	37	9	Mecánico 3 m3								Buen acaro de cutting. Porcentaje de limpieza 85%.	
10/03	3714	1750	37	9	2	1450	3	1910	120	150	Buen acaro de cutting. Porcentaje de limpieza balancea 85%.			
10/03	3820	1750	38	9	Mecánico 3 m3								Abundante acaro de cutting. RCP 50 A 60 m/h.	
10/03	3942	1750	38	9	Mecánico 3 m3								Abundante acaro de cutting. RCP 50 A 60 m/h.	
10/03	4004	1750	38	9	2	1450	3	1910	170	150	Abundante acaro de cutting. RCP 50 A 60 m/h.			
10/03	4093	1750	39	12	Mecánico 3 m3								Abundante acaro de cutting. RCP 50 A 60 m/h.	
10/03	4200	1750	39	12	Mecánico 3 m3								Abundante acaro de cutting. RCP 42 A 50 m/h.	
10/03	4202	1750	39	12	2	1450	3	1910	120	36	Poco acaro de cutting. RCP 42 A 50 m/h.			
11/03	4300	1750	39	12	Mecánico 3 m3								Abundante acaro de cutting. RCP 42 A 50 m/h.	
11/03	4457	1750	39	12	Mecánico 3 m3								Abundante acaro de cutting. RCP 42 A 50 m/h.	
11/03	4540	1750	39	12	2	1450	3	1910	120	50	Moderado acaro de cutting.			
11/03	4644	1750	40	13	Mecánico 3 m3								Moderado acaro de cutting.	
11/03	4725	1750	40	13	Mecánico 3 m3								Moderado acaro de cutting. Se decide bombear baches cada 2 tiros.	
11/03	4789	1750	40	13	2	1450	3	1910	170	55	Buen acaro de cutting. Porcentaje por balancea 88%.			
11/03	4835	1750	40	13	Mecánico 3 m3								Buen acaro de cutting. Porcentaje por balancea 88%.	
11/03	4918	1750	41	15	Mecánico 3 m3								Buen acaro de cutting. Porcentaje por balancea 88%.	
11/03	4962	1750	41	15	2	1450	3	1910	170	44	Buen acaro de cutting. Porcentaje por balancea 88%.			
11/03	5035	1750	41	15	Mecánico 3 m3								Buen acaro de cutting. Porcentaje por balancea 88%.	
11/03	5089	1750	40	14	Mecánico 3 m3								Buen acaro de cutting. Porcentaje por balancea 88%.	
11/03	5145	1750	40	14	2	1450	3	1910	170	58	Bajo acaro de cutting. consultando información con Control Geológico.			
12/03	5240	1750	40	14	Mecánico 3 m3								Detonó debido a chozo de comienzo HLA. Buen acaro de cutting.	
12/03	5338	1750	42	16	2	1450	3	1910	170	80	Moderado acaro de cutting.			
12/03	5389	1750	42	16	Mecánico 3 m3								Buen acaro de cutting. Porcentaje por balancea 90%.	
12/03	5447	1750	42	16	Mecánico 3 m3								Buen acaro de cutting. Porcentaje por balancea 90%.	
12/03	5505	1750	42	16	2	1450	3	1910	170	58	Bajo acaro de cutting.			
12/03	5562	1750	41	14	Mecánico 3 m3								Buen acaro de cutting. Porcentaje por balancea 90%.	
12/03	5607	1750	41	14	Mecánico 3 m3								Se 5000 m bombear bache mecánico al siguiente tiro. % de limpieza de 88 %.	
12/03	5637	1750	41	14	Mecánico 3 m3								Respa bombear conseruado con YPF. % de limpieza de 85 %.	
12/03	5704	1750	41	14	Mecánico 3 m3								Buen acaro de cutting. Porcentaje de limpieza de 90 %.	
12/03	5758	1750	41	14	2	1450	3	1910	170	57	Bajo acaro de cutting. consultando información con Control Geológico.			
12/03	5800	1750	41	14	Mecánico 3 m3								142	Buen acaro de cutting. Porcentaje por balancea 90%.
12/03	5898	1750	42	17	Mecánico 3 m3								60	Buen acaro de cutting. Porcentaje por balancea 90%.
13/03	6009	1750	42	17	2	1450	3	1910	170	61	Bajo acaro de cutting.			
13/03	6076	1750	42	17	Mecánico 3 m3								17	Poco acaro de cutting. RCP promedio de 33 m/h y 480 gpm.
13/03	6133	1750	42	17	Mecánico 3 m3								57	Moderado acaro de cutting. RCP promedio de 33 m/h y 480 gpm.
13/03	6180	1750	42	17	2	1450	3	1910	170	47	Poco acaro de cutting.			
13/03	6243	1750	42	17	Mecánico 3 m3								63	Moderado acaro de cutting.
13/03	6299	1750	42	19	Mecánico 3 m3								56	Moderado acaro de cutting.
13/03	6309	1750	42	19	2	1450	3	1910	170	60	Poco acaro de cutting.			
14/03	6438	1750	40	19	Mecánico 3 m3								79	Buen acaro de cutting. Porcentaje de limpieza de 90%.
14/03	6489	1750	40	19	Mecánico 3 m3								51	Moderado acaro de cutting.
14/03	6588	1750	40	19	2	1450	3	1910	170	71	Poco acaro de cutting.			
14/03	6690	1750	40	19	Mecánico 3 m3								58	Buen acaro de cutting. Porcentaje de limpieza de 93%.
14/03	6717	1750	42	19	2	1450	3	1910	170	62	Moderado acaro de cutting.			
14/03	6762	1750	40	18	Mecánico 3 m3								75	Buen acaro de cutting. Porcentaje de limpieza de 93%.
15/03	6890	1750	40	18	Mecánico 3 m3								56	Buen acaro de cutting. Porcentaje de limpieza de 93%.
15/03	6900	1750	40	18	2	1450	3	1910	170	50	Buen acaro de cutting. Porcentaje de limpieza de 93%.			
15/03	6958	1750	40	18	Mecánico 3 m3								58	Buen acaro de cutting. Porcentaje de limpieza de 93%.
15/03	7017	1750	40	18	Mecánico 3 m3								52	Poco acaro de cutting.
15/03	7077	1750	40	19	2	1450	3	1910	170	60	Poco acaro de cutting.			
15/03	7128	1750	40	19	4 m3 turbuente 1720 g/l + 4 m3 de bache mecánico 1720 g/l								51	Moderado acaro de cutting. Porcentaje de limpieza de 94 %.
15/03	7133	1750	40	19	Anillo de 1440 g/l + 4 m3								4	Solididad por CTR YPF. Sección a incrementar en soldes de herramienta.
15/03	7198	1750	40	19	4 m3 turbuente 1720 g/l + 4 m3 de bache mecánico 1720 g/l								23	Moderado acaro de cutting. Porcentaje de limpieza de 94 %.
15/03	7194	1750	40	19	4 m3 turbuente 1720 g/l + 4 m3 de bache mecánico 1720 g/l								25	Moderado acaro de cutting. Porcentaje de limpieza de 94 %.
15/03	7212	1750	40	19	4 m3 turbuente 1720 g/l + 4 m3 de bache mecánico 1720 g/l								25	Moderado acaro de cutting. Porcentaje de limpieza de 94 %.

Imagen 24: Seguimiento de baches de limpieza

En TD se realizó un ciclo de limpieza circulando cuatro fondos arriba según estandarización para pozos de diámetro 8,5” y con ramas laterales mayores a 3200 metros. La circulación se realizó con un caudal de 450 GPM, y reciprocando la sarta con 120 RPM hacia arriba y 40 RPM hacia abajo. Después de realizar el ciclo de limpieza, se sacó el BHA hasta los 5000 m MD, al inicio del cambio de nivel, y se realizó 1 fondo arriba adicional (5 F/A en total) y se desplazó el pozo a esa profundidad a un lodo de ahogo con densidad de 1900 g/l.

Por la baja tortuosidad que se pudo mantener durante la perforación del pozo, el factor de fricción (FF) después del ciclo de limpieza se encontraba en 0,25. Para los pozos de diámetro 8,5” con ramas extensas comúnmente se cuenta con una FF de 0,3 o superior después del ciclo de limpieza, lo cual destacaba el excelente trabajo que se hizo en el diseño de la trayectoria, el buen control direccional de la herramienta para mantener baja tortuosidad y la eficiencia de la limpieza de pozo que se realizó. Durante la perforación, también se tuvieron que implementar medidas para mitigar la temperatura, que se detallan en la siguiente sección, que también tuvieron un impacto positivo en la limpieza del pozo.

2.5 Control de Temperatura y Estabilidad del Pozo

Otro desafío importante fue el control térmico en las herramientas direccionales. La temperatura incrementa con profundidad y horas de perforación en algunos casos pudiendo superar el rating de las herramientas direccionales, causando un deterioro y posible falla de herramienta. En la fase de planificación de este pozo se esperaba un impacto importante por temperaturas elevadas por lo que se implementó un protocolo preventivo de gestión térmica que incluía las siguientes medidas:

- Monitoreo en tiempo real de temperatura en el RSS, mediante el RTA
- *Refresh* de lodo programados
- Protocolo de temperatura de compañía direccional

- Implementación de Control de ROP y control de parámetros de perforación

Las herramientas direccionales y específicamente los componentes electrónicos del MWD y el RSS, tenían un rating de 150°C máximo. Exceder este límite podría generar una falla prematura de las herramientas causando una maniobra no planificada, pero durante la perforación de pozos extensos comúnmente se exceden estos límites sin impacto negativo. Para este pozo, se decidió no arriesgar superar el rating de las herramientas para maximizar el chance de llegar a TD en una sola carrera, des priorizando la ROP.

El componente más susceptible a falla en el BHA era el RSS, y se contaba con el RTA para medir la temperatura en tiempo real con un sensor ubicado en el RSS. Adicionalmente se contaba con un sensor de temperatura ubicado en el MWD para medir temperatura en tiempo real. En este conjunto en particular, el MWD se encontraba encima del MDF, por lo que las RPM del RSS eran aproximadamente 150 RPM más de las RPM de superficie y del MWD. Por esta razón era critico poder medir la temperatura real en el RSS, que siempre se mantuvo 1 a 1,5 grados Celsius mayor a la del MWD.

Durante la perforación del primer nivel de geo navegación con 520 GPM hasta los 5000 m MD no sufrió ningún tipo de inconveniente o limitación por la temperatura en el BHA. Durante el cambio de nivel, con inclinación de 94°, se observó la temperatura incrementar rápidamente a 147°C. En este punto se realizó el primer control en parámetros de perforación, reduciendo el caudal de 520 a 490 GPM, manteniendo los 120 RPM con que se venía trabajando según el mapa de parámetros establecido. Se logró reducir la temperatura momentáneamente, pero continuó incrementado con profundidad. A partir de los 6000 m MD hasta TD, ya navegando en el segundo nivel, se redujo a 100 RPM, manteniendo 490 GPM. Desde de aproximadamente 6400 m MD se decidió controlar ROP entre 25-35 m/h buscando mantener temperatura por debajo de 149°C en el RSS, logrando mantener estable la temperatura, siendo este la medida que resultó ser más efectiva para mitigar el incremento de temperatura.

Adicional al control de parámetros y ROP, se implementó una práctica de *refresh* o renovación de lodo. Aproximadamente cada 1500 metros o 16 horas de perforación se realizaba una renovación de lodo, incorporando 40 m3 de lodo fresco al sistema activo y retirando lodo a las piletas auxiliares para bajar la temperatura del lodo en el sistema activo, y en simultaneo reducir el porcentaje de solidos de baja densidad (LGS). A partir de 6300 MD se empezó a realizar renovaciones de lodo cada 12 horas, realizando durante toda la rama horizontal un total de 8 renovaciones de 40 m3 cada una.

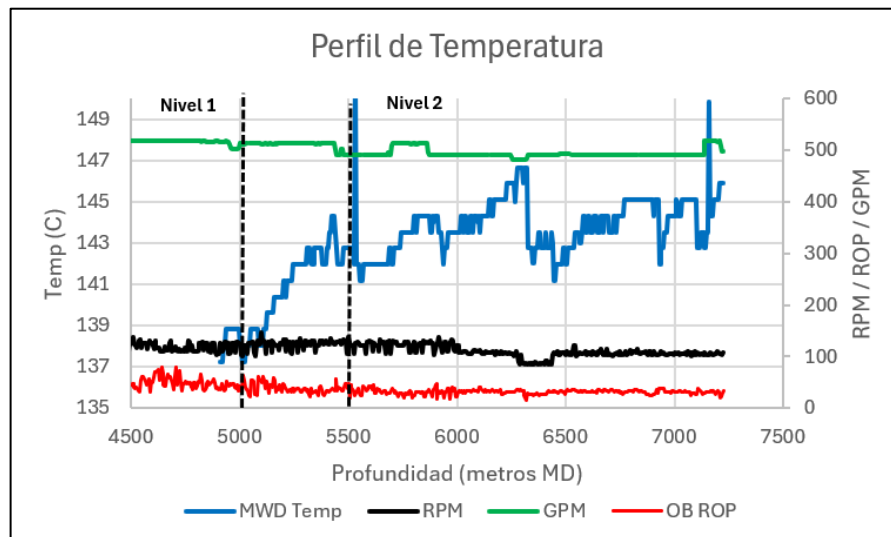


Imagen 25: Parámetros de pozo bi-nivel

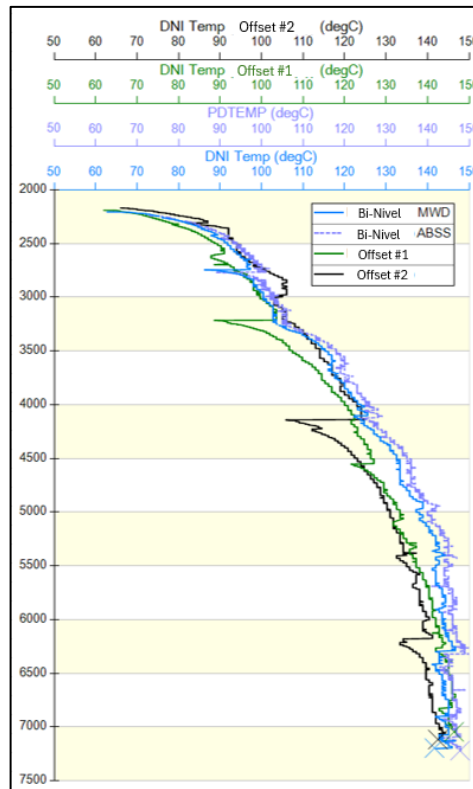


Imagen 26: Temperatura vs Pozos Offset

A pesar de las medidas preventivas, en distintas ocasiones se tuvo que tomar medidas adicionales que impactaron negativamente en el ROP del pozo. En tres ocasiones (6090 m, 6920 m y 7095m MD) por alcanzar los 149°C en el RSS, al finalizar el tiro se implementó la práctica de repasar el tiro completo. Esta práctica de repasar el tiro con 480 GPM y 40 RPM, lograba reducir la temperatura 1-2°C, pero este efecto se mantenía por poco tiempo, a veces recuperando 1°C durante el siguiente tiro. En 6319 m se detuvo la perforación por alcanzar 150°C y se circuló una hora, logrando bajar la temperatura a 144°C.

Gracias a estas medidas, se mantuvo la integridad operativa de las herramientas direccionales por debajo del límite de 150 grados Celsius. El impacto en la tasa de penetración por estas medidas fue significativo, pero el control de temperatura contribuyó a la durabilidad de la herramienta, que logró perforar toda la fase de aislación en una carrera (shoe-to-shoe) y ayudó a que este pozo sea hasta el momento el pozo más rápido de YPF para los pozos con estructura FAT (diámetro de aislación de 8,5”), con una velocidad de perforación equivalente de 400 metros/día.

2.6 Análisis Económico

La propuesta original para el pozo contemplaba una rama corta de 1800 metros en nivel #1, con un pozo adicional en nivel #2 con limitaciones por efecto parent-child a ambos lados. Al final se decidió por el pozo bi-nivel con rama aproximada de 1800 metros en nivel #1 y 1700 metros en nivel #2, con 500 metros entre niveles. De esta manera se pudo eliminar un pozo del pad, obteniendo producción similar y resultando en mejores indicadores económicos del pad completo.

Perforar un pozo con rama horizontal de 4000 metros resultó ser 31% más económico que perforar dos pozos con ramas aproximadas de 2000 metros en distintos niveles. Esto es una reducción importante para el costo en la perforación del pad, pero adicionalmente se logró un ahorro importante en las otras etapas al tener un pozo menos incluyendo:

- construcción de una bodega menos
- ahorros en tiempo y costo de fracturar un pozo largo versus dos pozos cortos
- menor costo de instalaciones en superficie
- reduce costos de mantenimiento y workover a un solo pozo
- elimina costo de abandono de un pozo.

Considerando todas las etapas, la inversión total de un pozo bi-nivel se estima un 26% más económico que dos pozos de 2000 metros. Adicionalmente se estima tener un aumento de Valor Actual Neto (VAN) con el pozo bi-nivel de 16% comparando con dos pozos de 2000 metros en cada uno de los niveles perforados. Esto representa un retorno económico importante y una mejora considerable para el proyecto de Loma Campana y para YPF.

3. Conclusiones

El desarrollo exitoso de este pozo representa un hito para los yacimientos no convencionales de Argentina. La ejecución de un pozo con dos ramas horizontales en distintos niveles valida la factibilidad técnica de esta aplicación para yacimientos no convencionales maduros con alta densidad de pozos horizontales existentes.

Los principales logros incluyen:

- Validación técnica de la geonavegación en múltiples niveles dentro de un mismo pozo
- Reducción de costos estimada en 31% frente a dos pozos de ramas cortas en distintos niveles
- Menor huella ambiental y operativa (reducción de locaciones, tiempos y recursos)
- Mayor retorno económico del proyecto gracias a una mejora en los indicadores de eficiencia (16% aumento de VAN para el proyecto)

A pesar de no ser el foco de este documento, la terminación y fractura del pozo bi-nivel también se realizaron sin inconvenientes en la operación. Esto se atribuye al foco que se hizo en diseñar una trayectoria adecuada, selección de herramientas con excelente control direccional, priorización de baja tortuosidad y limpieza eficiente sobre ROP, y un foco en mantener la estabilidad de la formación.

Estos resultados no solo refuerzan el liderazgo de YPF en la aplicación de soluciones innovadoras en Vaca Muerta, sino que también abren la puerta a nuevas estrategias de desarrollo para zonas con alta densidad de pozos o con restricciones de superficie. En futuras etapas, será clave continuar evaluando la productividad a largo plazo de este tipo de pozos y ajustar los modelos económicos en función de los datos reales de productividad.

Este caso establece un precedente técnico y económico para futuras perforaciones en áreas de alta complejidad, y marca una línea de base sobre la cual continuar desarrollando tecnologías y estrategias que maximicen el aprovechamiento de Vaca Muerta.

Autor:

Samuel Rondon: Es Ingeniero Mecánico graduado de la Universidad Central de la Florida (UCF). Actualmente es ingeniero de ejecución de perforación para el proyecto Loma Campana en YPF. Anteriormente se desempeñó en proyectos de perforación de pozos de desarrollo y exploración en aguas profundas en el Golfo de México, y también en proyectos No Convencionales en la cuenca de Permian y cuenca de Denver-Julesburg (EEUU).

Coautor:

Daniel Sotelo: Es Geólogo graduado en la Universidad de Buenos Aires (UBA). Actualmente es geólogo de desarrollo en el equipo de Estudios de Loma Campana en YPF. Desde 2015 se desempeña en yacimientos no Convencionales, siendo su experiencia anterior en yacimientos convencionales de las cuencas Austral, Neuquina y Golfo San Jorge de Argentina.