

OPTIMIZACIÓN OPERATIVA Y REDUCCIÓN DE LA CONTAMINACIÓN DEL FLUIDO DE PERFORACIÓN MEDIANTE LA MITIGACIÓN DEL BALLOONING Y BREATHING A TRAVÉS DE LA TÉCNICA DE MANAGED PRESSURE DRILLING

Arcenio Elias Mario, Halliburton, Eliasmario.arcenio2@halliburton.com. Leopoldo La Motta, Halliburton, leopoldogerman.lamottabani@halliburton.com.

Psinopsis

Los efectos *Ballooning* y *Breathing* son fenómenos comunes en la perforación de pozos, por lo que es esencial diferenciarlos correctamente al tomar decisiones operativas durante la construcción de pozos. Una caracterización errónea podría generar un desbalance de presión o incluso un fracturamiento inducido en la formación. Además, las medidas de mitigación aplicadas podrían resultar ineficaces, lo que conduciría a una prolongación innecesaria de los tiempos de maniobra.

Este trabajo abordará la definición de ambos efectos, así como los principales factores físicos y geomecánicos asociados a los mecanismos que los generan. Se analizará el comportamiento en la Formación Vaca Muerta ante fluctuaciones de presión. Se identificará el *Ballooning* y *Breathing* tanto en condiciones teóricas, con base en la literatura existente, como en escenarios reales obtenidos durante la perforación de pozos horizontales con la técnica de *Managed Pressure Drilling* (MPD). Se demostrará la utilización del equipamiento MPD, como el Coriolis, que permitió identificar de manera temprana y con mayor precisión, un retorno generado por el *Breathing* o *Ballooning* y diferenciarlos de un influjo, basándose en el fondo arriba. Se presentarán resultados que permitirán diferenciar estos efectos a través de escenarios reales, particularmente en un reservorio no convencional de baja permeabilidad, como lo es la Formación Vaca Muerta, con el factor adicional de un yacimiento con amplio desarrollo, donde el *Breathing* se ve favorecido por la presencia de fracturas hidráulicas. Asimismo, se analizará la Formación Quintuco, caracterizada por la presencia de fracturas naturales.

Finalmente, se discutirán algunas de las medidas adecuadas que se aplicaron para mitigar la inducción de *Ballooning* o *Breathing* durante la perforación, como la aplicación de técnicas de desenergización con el objetivo de permitir el retorno controlado de un volumen de fluido de perforación durante conexiones, evitando o reduciendo el impacto del efecto *Ballooning*. Adicionalmente, la aplicación de medidas para establecer una presión de fondo que evite el ciclado de la formación y una continua contaminación del fluido de perforación por el *Breathing*. Estas medidas contribuyeron a la reducción de los tiempos no productivos causados por *Flow Checks* prolongados, ahogues de pozo ineficaces, reducción en el consumo de materiales aditivos y en los controles de pozo innecesarios. El uso de la técnica MPD en perforaciones no convencionales es crucial, ya que permite mantener un perfil de presiones estable en el espacio anular y favorece una caracterización precisa de las formaciones.

Introducción

En las prácticas modernas de perforación, la tecnología de Managed Pressure Drilling (MPD) se ha consolidado como una herramienta clave para optimizar el control de presión en el pozo. Su objetivo principal es mantener la presión en fondo dentro de una ventana operativa, resolviendo condiciones de pozo asociadas a influjos formacionales, inestabilidades geomecánicas, pérdidas severas de lodo producto de controles de pozo ineficientes, y presencia de efectos de *Ballooning* y *Breathing*. Esta técnica resulta especialmente eficaz en áreas con ventanas operativas estrechas o en contextos geológicos complejos, donde los métodos convencionales resultan ineficientes o inseguros.

Las secciones más críticas corresponden a los intervalos de las formaciones Quintuco (Fm. QC) y Vaca Muerta (Fm. VM). En estos tramos, el uso de MPD ha demostrado ser esencial para la identificación temprana de fenómenos de transferencia de fluido entre la formación y el pozo, permitiendo mantener la estabilidad del sistema cerrado y garantizar la seguridad operativa. Esta capacidad de diagnóstico dinámico se ha visto potenciada por herramientas como el manifold Autochoke, medidor de flujo Coriolis y sensores de presión en superficie, que permiten una interpretación más precisa de la relación entre presión, volumen y tiempo durante eventos transitorios.

Entre los diversos fenómenos que pueden comprometer el control de presión durante la perforación, este trabajo se centra particularmente en el *Ballooning* y *Breathing*. Que, aunque ambos comparten una génesis común relacionada con las fluctuaciones de presión, presentan comportamientos distintivos que pueden modificar significativamente las condiciones de presión y volumen en el espacio anular. Su adecuada identificación y manejo resultan fundamentales para preservar la estabilidad del pozo y evitar decisiones incorrectas durante el control de presión.

El *Ballooning* ocurre como consecuencia de una deformación elástica de la formación. Este fenómeno se presenta cuando la presión de fondo o de circulación genera una expansión temporal del pozo, y de la formación adyacente producto de la circulación o contrapresión ejercida con el Autochoke, permitiendo el almacenamiento de fluido en zonas con alta capacidad de deformación. Al detener la circulación, ya sea por conexiones o paradas no programadas, la presión disminuye y las formaciones se contraen, retornando el fluido almacenado al pozo. Este comportamiento puede simular un influjo si no se interpreta correctamente.

Por su parte, el *Breathing* se manifiesta como un ciclo de apertura y cierre de fracturas preexistentes o inducidas hidráulicamente. Durante este proceso, el fluido de perforación fluye hacia las fracturas cuando la presión de fondo es elevada y retorna al pozo cuando esta disminuye. Este fenómeno puede presentar retardos en los retornos, asimetrías de volumen y contaminación del fluido, dificultando su diferenciación respecto de eventos reales de ganancia o pérdida por desbalance.

La correcta identificación del *Ballooning* y *Breathing*, y discriminación de eventos reales de control de pozo, representa un desafío operacional significativo. Un incorrecto diagnóstico puede derivar en maniobras ineficientes, incremento de tiempos no productivos, y riesgos para la integridad del pozo.

Este trabajo analiza el comportamiento de estos fenómenos en el contexto de la cuenca Neuquina, utilizando datos reales de operaciones donde tecnología de MPD ha sido clave para mejorar el

diagnóstico dinámico de la relación entre presión, volumen y tiempo, especialmente en reservorios no convencionales de muy baja permeabilidad, permitiendo la comprensión de estos fenómenos y optimizar la seguridad y eficiencia de las operaciones de perforación.

Área de estudio

El área de estudio se encuentra localizada en la cuenca Neuquina, ubicada en el centro-oeste de la República Argentina (Fig. 1). Esta cuenca abarca una amplia extensión territorial que incluye gran parte de la provincia del Neuquén, el noroeste de Río Negro, el suroeste de La Pampa y el sur de Mendoza. Presenta una morfología de tipo triangular, con una superficie aproximada de 120.000 km² (Yrigoyen, 1991).

Para el presente estudio, los datos fueron obtenidos a partir de pozos perforados en los yacimientos de La Amarga Chica y Loma Campana (Fig. 1).

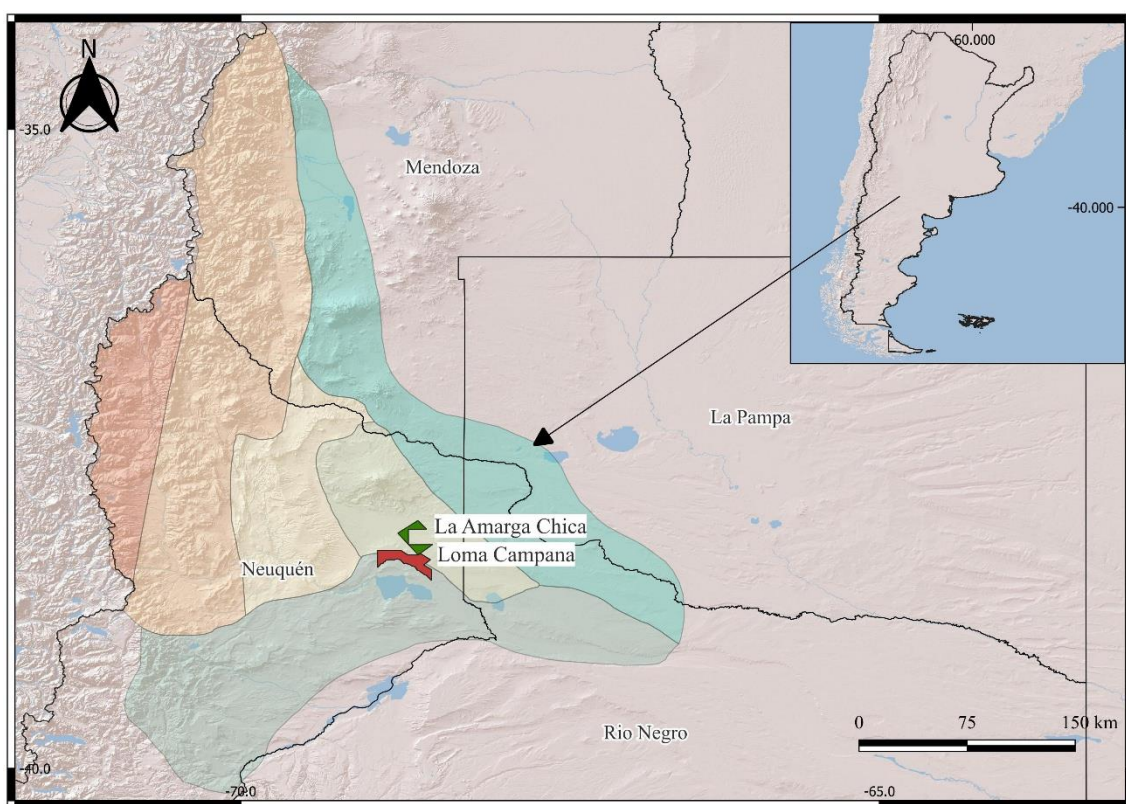


Figura 1. Ubicación de la cuenca Neuquina y áreas de interés.

Marco Geológico

La secuencia estratigráfica de interés se comprende por las Formaciones Quintuco y Vaca Muerta (Weaver, 1931). En orden cronoestratigráfico, la Fm. VM de edad en Jurásico Tardío–Cretácico Temprano (Ramos et al., 2020). Esta unidad constituye una de las formaciones litoestratigráficas de mayor extensión en la cuenca Neuquina, extendiéndose desde el sur de la provincia del Neuquén hasta el norte de Mendoza, y hacia el este en la provincia de Río Negro.

La Fm. VM es reconocida como la principal roca generadora de hidrocarburos de Argentina, y se considera la mayor fuente de recursos no convencionales tipo *shale* de Sudamérica (Otharán,

2020). Sus propiedades petrofísicas la caracterizan como un reservorio no convencional de muy baja permeabilidad, siendo su litología predominante sucesiones heterogéneas de fangolitas arcillosas bituminosas, intercaladas con fangolitas calcáreas y silíceas, dentro de las cuales son frecuentes los niveles de caliza (Kietzmann et al., 2014a, b, 2016).

Suprayacente se posiciona la Fm. QC correspondiente a la mesosecuencia inferior del Grupo Mendoza, de edad Tithoniano–Valanginiano. Su límite con la Formación Vaca Muerta es transicional y asincrónico. La litología predominante de la Fm QC está compuesta por una sucesión mixta carbonática–siliciclástica (Legarreta y Gulisano, 1989; Leanza et al., 2011). Se caracteriza por la presencia de fracturas naturales frecuentes en sus intervalos carbonáticos, mientras que en los niveles más arcillosos la presencia de fracturas disminuye.

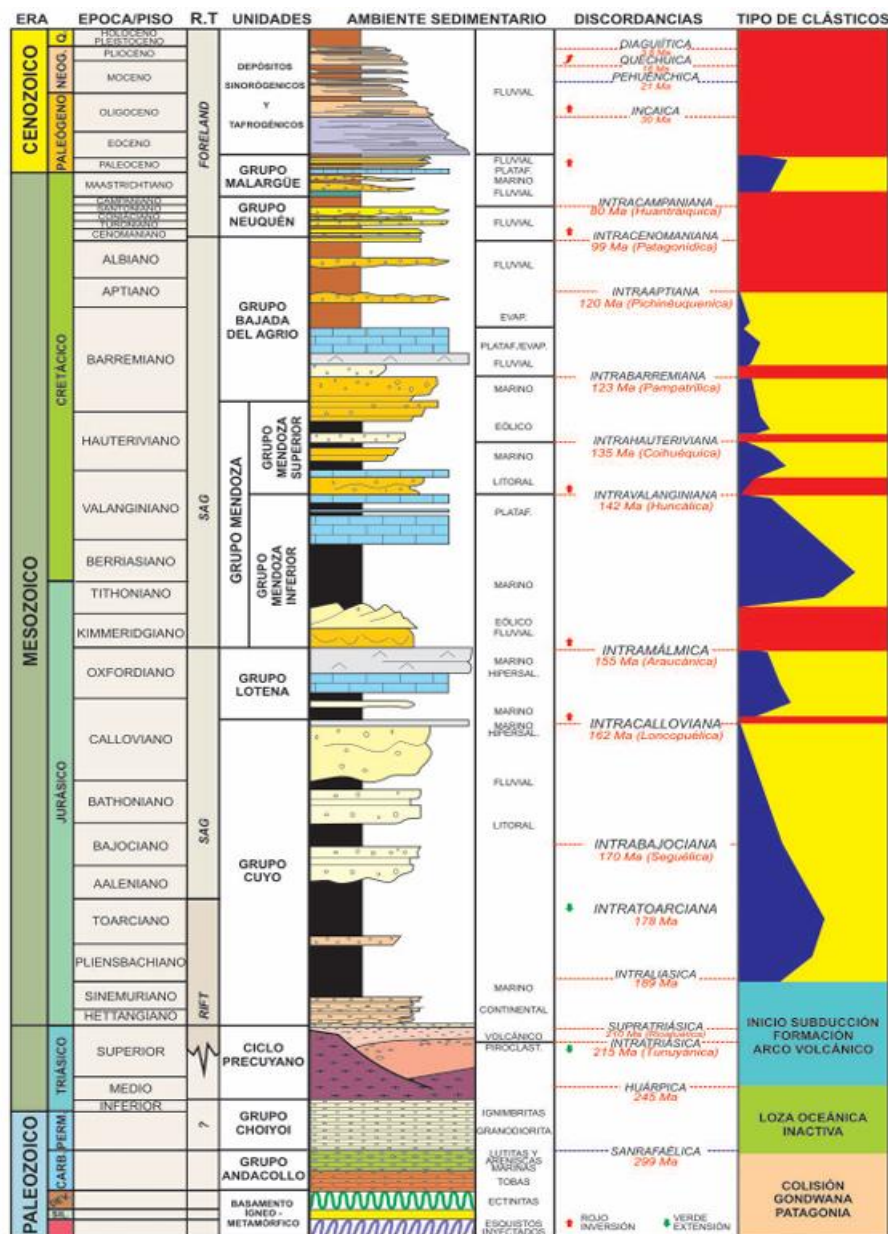


Figura 2. Cuadro cronoestratigráfico representando la estratigrafía general de la cuenca Neuquina. Tomado de Arregui et al. (2011).

Desarrollo

3.1 Factores físicos y geomecánicos

La comprensión y caracterización de los factores físicos y geomecánicos que intensifican o favorecen los efectos de *Ballooning* y *Breathing* es crucial para una visión integral de la condición del pozo.

Uno de los mecanismos involucrados en las variaciones de presión, y volumen retornado tras la detención de las bombas o reducción de caudales es el efecto térmico. El diferencial de temperatura entre el fluido de perforación y las formaciones circundantes genera variaciones en las propiedades de los materiales debido a la transferencia de calor. Considerando un gradiente geotérmico normal, la temperatura se incrementa aproximadamente 30 °C cada 1000 metros de profundidad. Los niveles productivos de la Formación Vaca Muerta se ubican entre 2500 y 3000 metros de profundidad vertical verdadera, alcanzando temperaturas aproximadas de 80 a 90 °C. Este intercambio térmico genera efectos simultáneos tanto en el fluido de perforación como en la formación en contacto. Al calentarse, el fluido experimenta una expansión volumétrica (Gill, 1989; Helstrup et al., 2001, Yang et al., 2022), lo que puede conducir a un aumento de la presión radial ejercida sobre las paredes del pozo. Por otro lado, la pérdida de calor desde la formación hacia el fluido puede generar contracción térmica, asociada a esfuerzos de tracción. Esta redistribución térmica de esfuerzos afecta tanto la matriz de la roca como las fracturas naturales o inducidas.

Según lo discutido por Zoback (2007) la contracción térmica puede inducir esfuerzos de tracción adicionales, que favorecen la propagación o reactivación de fracturas preexistentes. A su vez, la expansión térmica inicial puede causar una apertura temporal de fracturas. Por lo tanto, el efecto térmico no solo modifica el volumen del fluido de perforación, sino que también puede alterar dinámicamente la apertura y cierre de fracturas, contribuyendo a la ocurrencia del fenómeno de *Breathing*.

3.2 Umbrales de esfuerzo y comportamiento mecánico de las formaciones

La presión de fondo es un factor clave en el desarrollo de estos fenómenos, ya que sus variaciones inducen deformaciones reversibles e irreversibles en las formaciones, y favorecen la apertura y cierre de fracturas naturales o inducidas. Para comprender este comportamiento, es necesario considerar los umbrales de esfuerzo que gobiernan la respuesta mecánica de las rocas, en función de sus propiedades intrínsecas y del estado de esfuerzos *in situ*.

Dicha respuesta puede agruparse en tres campos mecánicos convencionales: elástico, plástico y frágil. El límite entre el campo elástico y el plástico corresponde al punto a partir del cual la deformación deja de ser completamente reversible. Por otro lado, el paso del estado plástico al frágil está marcado por una pérdida progresiva de resistencia con el incremento de deformación, culminando en la iniciación de fracturas. Finalmente, dentro del campo frágil se reconocen dos umbrales clave: La presión de re-apertura, que corresponde al esfuerzo mínimo efectivo (S_3) necesario para reabrir una fractura existente, y la presión de propagación de fractura, que representa el umbral requerido para extender la fractura hacia zonas no dañadas, superando el valor de S_3 junto con la resistencia a tracción y las pérdidas de carga hidráulica (Fig.3)

El trabajo de Yang et al. (2022) concluye que la presión de fondo puede ser suficiente para reabrir fracturas sin necesariamente alcanzar la presión de propagación. Esto explica por qué el volumen

de la fractura puede variar por apertura y cierre sin que se modifique su longitud. La amplitud de apertura alcanzada dependerá de la proximidad entre la presión aplicada y el umbral de propagación. Es debido a estas variaciones en el volumen alojado dentro de las fracturas que el efecto *Breathing* puede presentarse en diferentes magnitudes.

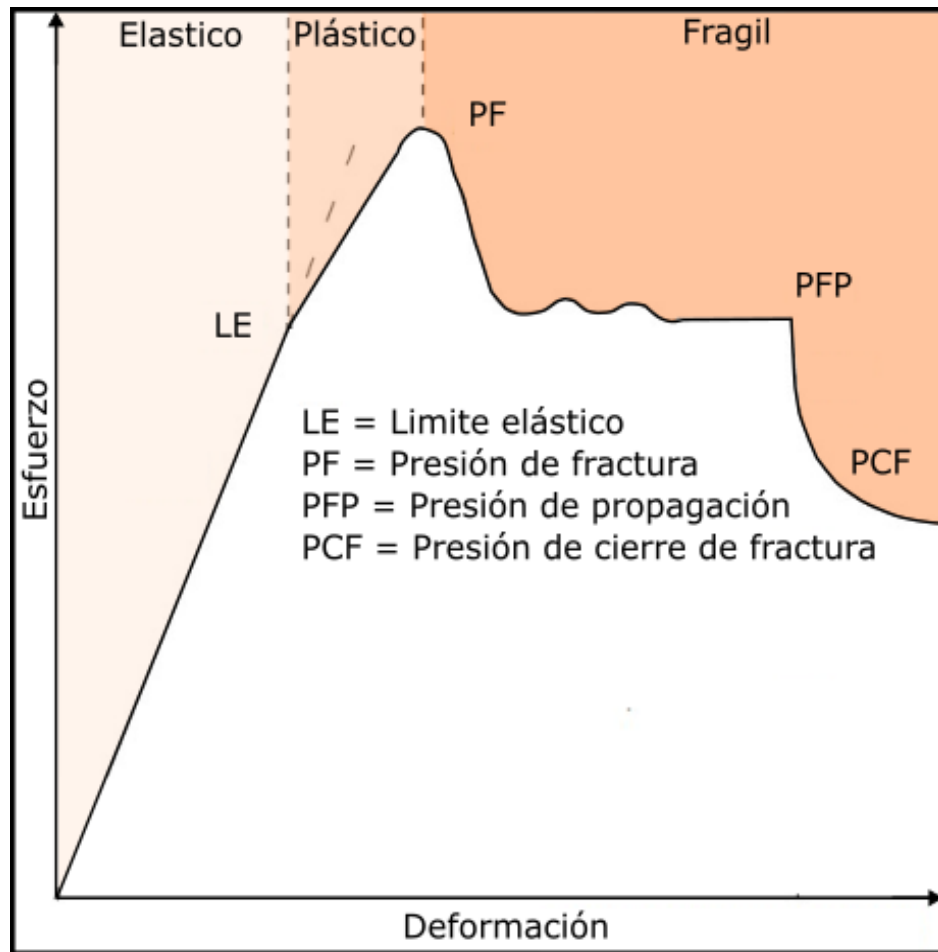


Figura 3. Esquema de esfuerzo y deformación. Tomado y modificado de Zoback (2007)

3.3 Efecto de ciclado de presión y daño por fatiga

Cuando una formación es sometida a fluctuaciones de presión, su respuesta dependerá tanto de los esfuerzos actuantes como de las propiedades mecánicas de la roca. Este comportamiento se vincula directamente con el desarrollo de *Breathing* durante ciclos operativos normales. La respuesta de la roca no depende exclusivamente de la magnitud de la presión instantánea, sino también de la frecuencia de los ciclos de presión aplicados.

Según el estudio realizado por Li *et al.* (2020), incluso cuando se aplican ciclos de presión dentro de un rango constante y por debajo de la resistencia estática de la roca, pueden generarse fallas por fatiga, propagación y ramificación de microfracturas. Este ciclado formacional conduce a una degradación progresiva de las propiedades mecánicas, que se manifiesta como disminución del módulo de Young efectivo, incremento de la anisotropía elástica y fragilidad localizada, especialmente en formaciones con planos de debilidad naturales o inducidos, como ocurre en las Fm. VM y Fm. QC.

3.4 Comportamientos geomecánicos asociados a *Breathing* y *Ballooning*

La elasticidad de una formación constituye un factor clave en el comportamiento de las rocas. Aquellas formaciones que presentan una mayor rigidez tienden a ser menos deformables ante variaciones de presión, lo que incrementa la probabilidad de desarrollar fracturas naturales o inducidas (Zoback, 2007; Tettamanti et al., 2024). Estas fracturas, en reservorios de muy baja permeabilidad y con zonas de alta porosidad efectiva, permiten el flujo y contraflujo de fluidos, lo que incrementa la ocurrencia del fenómeno de *Breathing*. Estas condiciones involucran mayores volúmenes de fluido, ya que las zonas fracturadas actúan como espacios de almacenamiento adicionales, donde inicialmente se aloja fluido formacional que puede ser desplazado por gravedad (Li et al., 2020) e incorporarse al sistema activo de lodo sin que exista necesariamente un desbalance de presión entre la presión de poro y la columna hidrostática.

En contraste, formaciones que exhiben una mayor elasticidad (es decir, mayor capacidad de deformarse de manera reversible bajo esfuerzos aplicados) presentan una mayor propensión a desarrollar *Ballooning*. En estos casos, la formación aloja y libera el volumen de fluido a través de deformaciones anulares reversibles, sin necesidad de que se generen o activen fracturas (Zoback, 2007). Esta diferencia en el comportamiento mecánico representa un criterio fundamental para interpretar correctamente la condición de pozo en función de los retornos anormales durante la perforación (Baldino et al., 2018) y definir estrategias de mitigación o control de pozo adecuadas. En la caracterización geomecánica realizada por múltiples autores indica que la Fm. VM presenta un comportamiento mayormente frágil en los niveles enriquecidos en carbonatos, mientras que, en los niveles basales, donde aumenta el contenido arcilloso, se observa una disminución de la rigidez y un incremento en la plasticidad (Sosa Massaro et al., 2022). Por otro lado, la Fm. QC presenta un comportamiento heterogéneo, con niveles de alta rigidez en sectores con alto contenido de carbonatos, y módulos de deformación elástica más bajos en zonas mixtas o arcillosas, donde domina un comportamiento más plástico (Tettamanti et al., 2024).

3.4.1 Representación integrada de los efectos *Ballooning* y *Breathing*

Las Figuras 4 y 5 representan de forma esquemática los efectos *Breathing* y *Ballooning*, resumiendo sus dinámicas características de presión-volumen-tiempo y los mecanismos formacionales involucrados.

El esquema del efecto *Breathing* (Fig. 4) ilustra cómo el fluido de perforación ingresa en fracturas naturales o inducidas cuando la presión supera el umbral de re-apertura. Posteriormente, al cesar la circulación, la presión en el pozo disminuye y se produce un retorno asimétrico del fluido desde la fractura hacia el espacio anular. Este proceso desplaza hidrocarburos almacenados en la porosidad secundaria y genera retornos contaminados visualizados en los fondos arriba. Además, la repetición de estos ciclos puede inducir fatiga mecánica y apertura de nuevas fracturas, lo cual incrementa el volumen de fluido formacional retornado.

En contraste, el *Ballooning* (Fig. 5) está asociado a una deformación elástica reversible de las formaciones. Durante la circulación, la formación se dilata por efecto de la presión, almacenando fluido temporalmente. Al detenerse el bombeo y disminuir la presión, la formación se contrae, liberando dicho volumen sin transferencia de fluido formacional, ni creación de nuevas fracturas.

Estas representaciones integradas permiten visualizar claramente la diferencia fundamental entre ambos efectos, siendo clave para su diagnóstico preciso en condiciones de perforación dinámica.

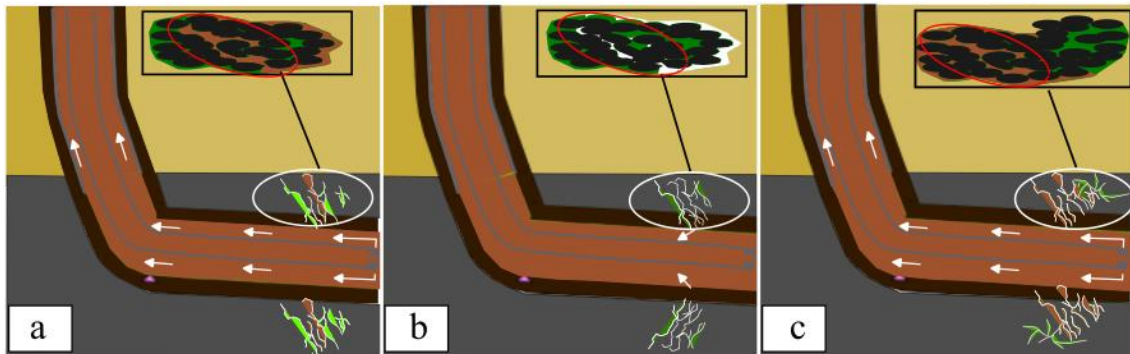


Figura 4. a) Incremento de presión por circulación, consecuente apertura de fracturas y reemplazo de fluido formacional por perforación. b) Detención de circulación y posterior retorno de fluido de perforación generando una zona de fractura depletada. c) Apertura de fracturas preexistentes y nuevas por incremento cíclico de presión, en conjunto se genera reemplazo por gravedad.

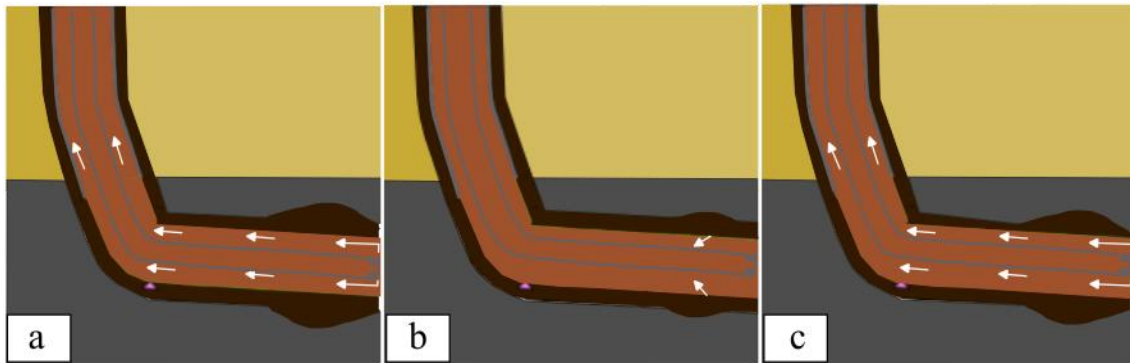


Figura 5. a) Deformación elástica que produce pérdida temporal de fluido por incremento de presión al mantener circulación en pozo. b) Detención de circulación y consecuente retorno del fluido de perforación “perdido” durante la circulación. c) Nuevo ciclo de pérdida de fluido por incremento de presión al mantener circulación en pozo.

3.5 Diagnóstico y diferenciación de efectos mediante MPD

La diferenciación entre los efectos requiere un nivel de análisis crítico, por lo cual, la implementación de tecnología con la cual se desarrolla la técnica de perforación de MPD es de gran relevancia, debido a que permite en conjunto con la caracterización, mantener un perfil de presiones estables en el espacio anular mediante el uso de equipamiento especializado en superficie, garantizando la integridad del personal y de los equipos involucrados en la operación.

Los equipos principales del sistema MPD incluyen: el Dispositivo Rotatorio de Control (RCD), el Autochoke, medidor Coriolis, separador, y el sistema de adquisición de datos (DAS). En conjunto, estos elementos permiten una caracterización más precisa de los efectos en cuestión.

La RCD permite la desviación del fluido de perforación retornado del espacio anular hacia superficie mediante un sistema de sellos pasivos que se aprisionan a la sarta de perforación, sin inhibir la posibilidad del movimiento de la tubería durante la perforación o viajes de herramienta.

Su diseño compacto y capacidad para operar bajo altas presiones lo convierten en un elemento esencial para mantener el control del pozo en condiciones operativas exigentes.

El Autochoke es un dispositivo que permite ajustar una contrapresión dentro de un rango operativo en un sistema cerrado con fluido prácticamente incompresible, mediante la reducción controlada del área de flujo. Este equipo cuenta con un conjunto de transductores de presión que permiten la lectura directa de las presiones desde el equipamiento. Además, está integrado con un controlador lógico programable (PLC) que permite operar el sistema de forma remota a través de la cabina DAS, lo cual incrementa la sensibilidad del control de presión.

El Coriolis es un dispositivo utilizado para medir el flujo másico, la densidad y la temperatura del fluido, y de manera indirecta, obtener el flujo volumétrico. Su funcionamiento se basa en el principio de Coriolis, que describe el comportamiento de un cuerpo en movimiento dentro de un sistema de referencia también en movimiento. El equipo se compone de dos tubos que oscilan en fase. Cuando el fluido fluye a través de estos tubos, se produce una torsión que genera un desfase en la oscilación. Este desfase permite identificar variaciones en el caudal, las cuales se miden en escala de galones. Adicionalmente, es posible determinar las variaciones de densidad y el flujo másico con un margen de ± 10 kg/m³.

Una de las principales ventajas del Coriolis es su capacidad para ofrecer una medición precisa y rápida de los parámetros clave en la perforación. Los medidores de flujo del Coriolis permiten detectar cambios en el flujo de lodo y, al compararlos con el flujo de inyección, proporcionan información crucial sobre el comportamiento del pozo de manera mucho más rápida que los métodos convencionales. Esto permite una reacción más inmediata ante cualquier cambio, como un influjo o una variación en las pérdidas de circulación.

En este contexto, el Coriolis es especialmente útil para detectar fenómenos como el *Ballooning* o *Breathing*. Estos fenómenos pueden presentar inconvenientes al momento de identificarlos utilizando métodos convencionales.

Teniendo en consideración que el volumen de fluido total en los tanques se monitorea constantemente, lo que proporciona un indicador útil de lo que está ocurriendo en el pozo. Los cambios en el volumen pueden no ser evidentes hasta alcanzar una envergadura mayor, significando retardos en las respuestas ante influjos, pérdidas, *Ballooning* o *Breathing*. No obstante, el medidor Coriolis con su capacidad para medir el flujo en tiempo real y con alta precisión, mejora significativamente la detección temprana de estos eventos, permitiendo una intervención más rápida y eficaz en comparación con otros métodos tradicionales.

El Separador permite separar las fases gaseosas que se incorporan o viajan con el fluido de perforación a través del espacio anular. Si bien no realiza medición del volumen de gas que se expulsa del sistema, permite derivarlo hacia un sistema de ignición que dará una expresión indirecta del volumen de gas retornado.

El Sistema DAS es una herramienta clave en las operaciones de MPD, diseñado para monitorear y gestionar las condiciones del pozo en tiempo real. A través de *softwares* de modelado hidráulico, visualizadores de parámetros y ejecución automatizada del control de pozo en tiempo real, y simulaciones futuras de condiciones operativas, el DAS permite supervisar parámetros operativos críticos, como la presión, el caudal y la temperatura, proporcionando una visión integral de la operación.

El DAS facilita la detección temprana de condiciones operativas como el *Ballooning* y el *Breathing*, eventos que pueden comprometer la estabilidad del pozo. La capacidad de monitoreo continuo e integración de datos en tiempo real, permite identificar rápidamente variaciones en el caudal o la densidad del fluido.

3.6 Eventos operacionales con MPD

El monitoreo de eventos de presión-volumen-tiempo en pozos perforados con tecnología MPD ha permitido detectar comportamientos anómalos relacionados con la interacción entre el pozo y la formación, especialmente en formaciones con baja permeabilidad y presencia de fracturas naturales o inducidas. Esta sección presenta el análisis de casos reales en los que se identificaron los efectos *Breathing* y *Ballooning*, detallando sus manifestaciones operativas, diagnóstico y consecuencias en la estabilidad del pozo.

3.6.1 Evento de *Breathing* en yacimiento Loma Campana

El evento operativo se registró durante la perforación de un pozo horizontal ubicado en el yacimiento Loma Campana, correspondiente al desarrollo de la Cocina de la Fm. VM. La sección perforada fue de 6.75 pulgadas de diámetro, utilizando un fluido base aceite con densidad de 1750 kg/m³ hasta alcanzar el Landing Point (LP), ubicado a 3160 m MD / 3004 m TVD. A partir de ese punto, la perforación de la rama horizontal continuó con un fluido de 1720 kg/m³, mientras que el target geomecánico estimado se mantenía en 1850 kg/m³.

A los 3714 m MD / 3026 m TVD se atravesó una zona fracturada hidráulicamente vinculada a PADs alledaños evidenciada por una pérdida total de circulación, caída en la presión anular y posteriormente en la presión de directa. Con parámetros normalizados, la perforación continuó hasta la profundidad total (TD) de 6691 m MD / 3054 m TVD. Finalizada la perforación de la rama horizontal, se realizó una prueba de presión poral, que permitió estimar una densidad equivalente de ahogo (EMW) de 1870 kg/m³.

Se efectuó el procedimiento de identificación de *Ballooning/Breathing*, realizando aperturas y cierres de pozo mediante Autochoke MPD en intervalos de tiempo similares y manteniendo una contrapresión inicial similar, con el objetivo de evaluar la tendencia en la restitución de presión y volumen purgado. Se observó que, con cada secuencia de cierre y apertura, la presión anular y el volumen purgado disminuían de forma concordante, lo cual indica la presencia de dilatación formacional. Durante la circulación del fondo arriba asociado a esta evaluación, se identificó la presencia de hidrocarburo gaseoso en superficie, proveniente de la zona de fractura (3714 m MD / 3026 m TVD), evidenciada por un quiebre en la lectura de densidad de salida y una lectura errática del caudal de salida, asociada al paso de fluido heterogéneo a través del medidor Coriolis (Fig. 6).

Las variaciones observadas en los parámetros en superficie, en conjunto con el análisis de la zona de pérdida, permitieron vincular la presencia del efecto *Breathing* en el pozo.

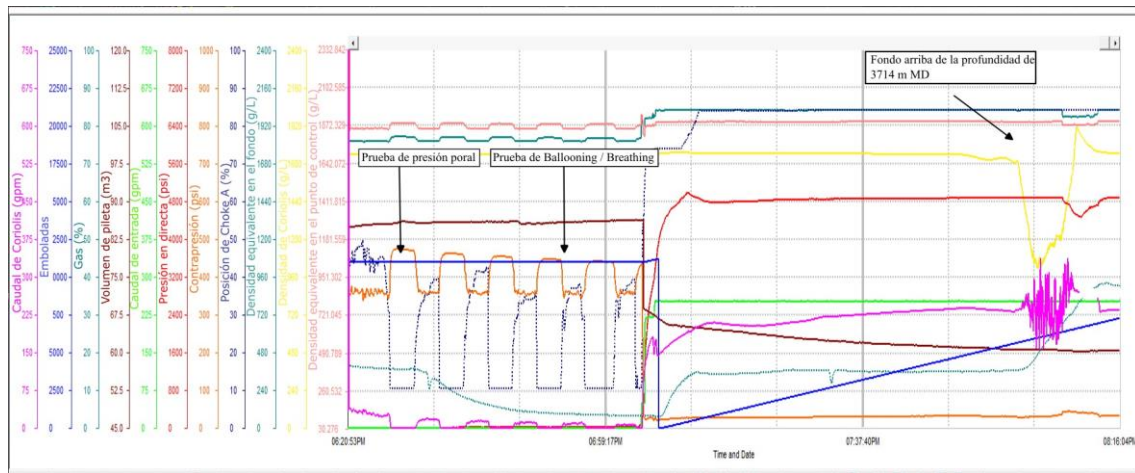


Figura 6. Prueba de presión poral.

Se caracterizó el efecto en el pozo, y se procedió a realizar ahogue desde TD, operación que conlleva a circular lodo de ahogue el cual consecuentemente genera elevadas densidades equivalentes de circulación (ECD) en las zonas de fractura (Fig.7). Una vez finalizado el ahogue, se procedió a realizar aperturas y cierres evaluando nuevamente la condición del pozo (Fig. 8). Posteriormente, se retiraron 3 tiros aplicando técnica de backreaming debido a restricción al iniciar viaje de herramienta hacia superficie (procedimiento utilizado para retirar tubería con circulación y rotación).

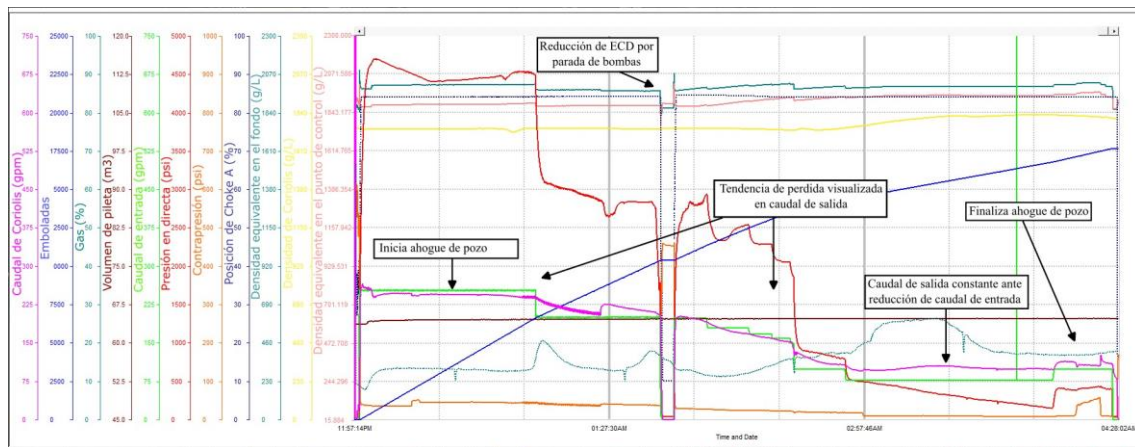


Figura 7. Ahogue desde TD.

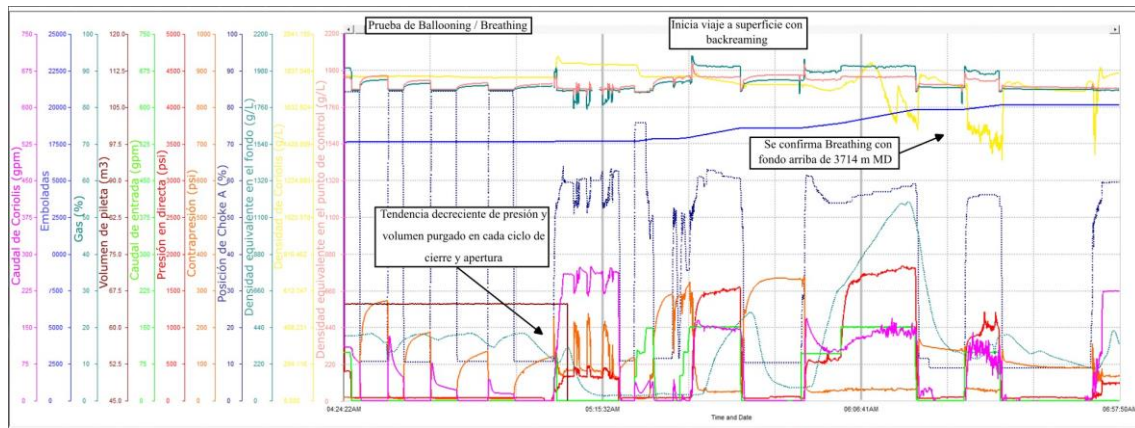


Figura 8. Viaje a superficie con backreaming.

Posteriormente, se realizó una nueva detención de bomba, para el bombeo de la píldora de maniobra utilizada para retirar tubería seca (sin fluidos en su interior dado el efecto de tubo en “u”). Durante el bombeo se identificó nuevamente presencia de hidrocarburos gaseosos en superficie por variaciones en los parámetros de salida de Coriolis (Fig.9). Posteriormente, se procedió a sacar herramienta compensando efecto *Swab* a través de equipamiento MPD. Debido a la condición de desbalance, se identificó que el pozo no estaba ahogado. Por lo cual, se procede a realizar ahogue de pozo desde 3411 m MD con un lodo de ahogue de similar densidad. Al finalizar el ahogue se inició viaje de herramienta a superficie, y se visualizó que el pozo estuvo completamente estático al retirar la totalidad de la herramienta.

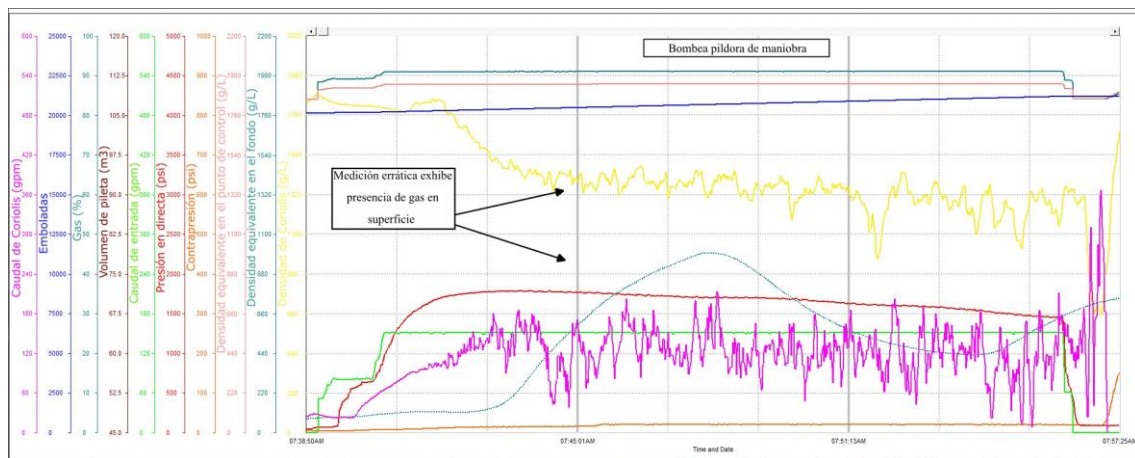


Figura 9. Bombeo de bache de maniobra previo a iniciar viaje a superficie desde TD.

3.6.2 Evento de *Ballooning* en yacimiento La Amarga Chica.

Durante la operación de perforación de un pozo ubicado en el yacimiento La Amarga Chica, se registraron indicios de comportamiento asociado al efecto *Ballooning*, especialmente evidenciado en la etapa de perforación de la rama horizontal y maniobras de viaje a superficie. Este fenómeno se manifestó principalmente a través de restituciones de presión durante los cierres, ausencia de quema de gas en superficie y variaciones en el volumen de retorno.

La perforación se desarrolló con un ECDtarget de 1770 g/L, manteniendo condiciones de control hidrostático. Sin embargo, desde los 3240 m MD, se identificó una restitución de presión luego

de los cierres durante las conexiones y variaciones de caudal de retorno sin correlación con influjo. Este comportamiento se consolidó al alcanzar los 4830 m MD / 3165 m TVD, donde una conexión fue seguida por una caída abrupta en el caudal de retorno, generando una diferencia de 50 gpm respecto al caudal de entrada.

Como se observa en la Figura 10, al perforar el caudal de salida se tiende a ser menor que el caudal de entrada. Esta diferencia alcanzó su valor máximo al inicio de cada tiro y disminuyó progresivamente hasta que ambos caudales tendieron a igualarse. Este patrón se repitió de manera constante durante toda la fase de perforación. Cabe destacar que la magnitud de esta diferencia entre los caudales tiende a disminuir cuanto mayor es el intervalo de tiempo entre conexiones. En la Figura 11 se muestra que durante una conexión se registró un retorno significativo de fluido de perforación hacia el pozo. Mediante el sistema de adquisición de datos se determinó que el volumen purgado alcanzó los 4 m³ antes de cesar completamente el flujo. Este valor coincide con el volumen previamente perdido durante la perforación del tiro anterior a dicha conexión.

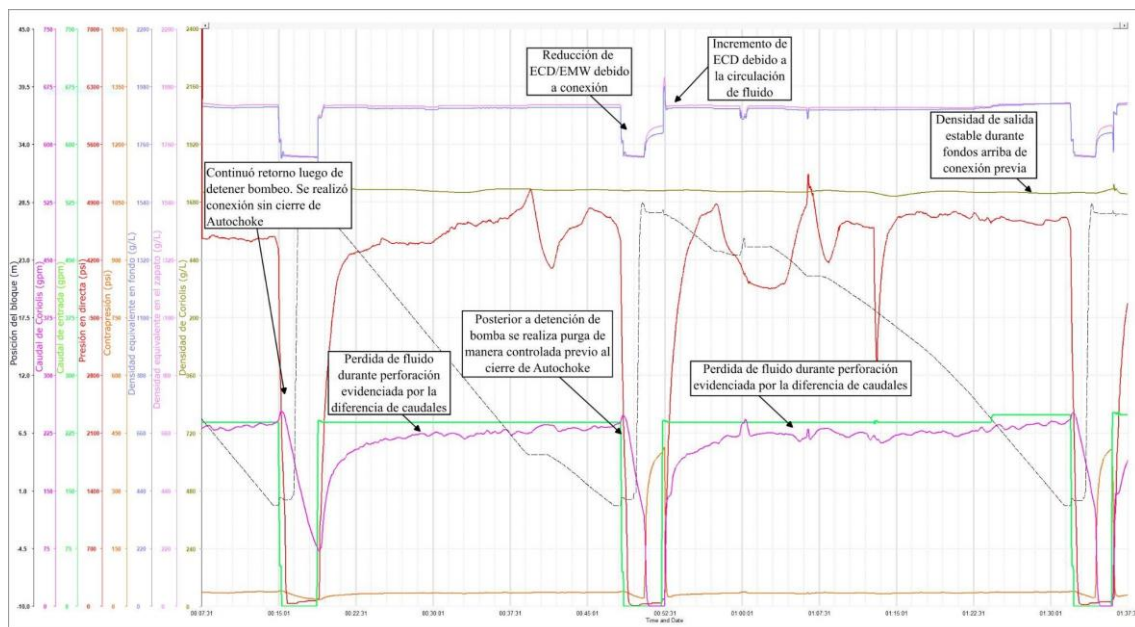


Figura 10. Identificación de efecto *Ballooning* durante la perforación

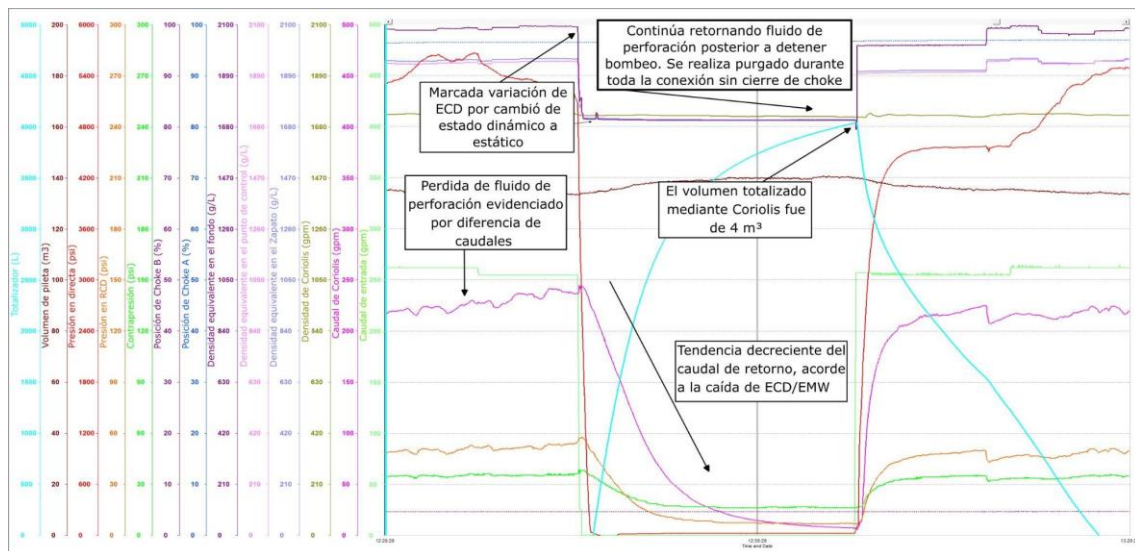


Figura 11. Purgado durante conexión producto de *Ballooning* severo.

Durante el posterior viaje de herramienta, se observó reducción en el volumen de llenado, y durante el *Flow Check* dinámico realizado en el punto de control no se alcanzó completamente la igualdad entre caudales de entrada y salida, aunque la tendencia fue convergente, lo cual sugiere restituciones progresivas típicas de desenergización formacional por variaciones en las ECD.

Posteriormente, durante el *Roll Over* con lodo de ahogue de 1930 kg/m³, mientras el fluido incrementaba su altura en el espacio anular, se produjo una admisión parcial de pozo, reflejada en una caída del caudal de retorno y una pérdida total de 16 m³. Estas manifestaciones respaldan la hipótesis de *Ballooning*, en donde el sistema se comporta como reservorio de fluido durante periodos de presión elevada, liberándolo gradualmente durante los cierres, sin indicios de influjos activos.

El fenómeno observado no representó una amenaza de control de pozo inmediata, pero sí alteró las estrategias convencionales de monitoreo de estabilidad. Se adoptaron medidas operativas como control de presión mediante MPD, verificación de *Flow Check* dinámicos y ajuste de densidad de ahogo a partir de la prueba *Build Up Test*, definiéndose una presión poral efectiva en el punto de control de EMW = 1750 kg/m³ y utilizando lodo de ahogue de 1780 g/L.

3.6.3 Segundo evento de *Ballooning* en La Amarga Chica

El siguiente evento operativo relacionado con el fenómeno de *Ballooning* se presentó durante la perforación de uno de los pozos horizontales en el yacimiento La Amarga Chica, específicamente en la Fm. VM. En esta fase de perforación, la sección de 6.75 pulgadas fue perforada utilizando un fluido de perforación con densidad de 1750 kg/m³

En el tramo correspondiente a profundidades superiores a los 4237 m MD, se identificaron fluctuaciones de presión en el pozo, lo que llevó a la realización de una prueba de *Ballooning* que confirmó la presencia de *Ballooning*. Este fenómeno se manifestó a través de una fluctuación cíclica de la presión anular y variaciones del caudal de retorno, sin que se produjeran influjos activos de gas, pero sí un cambio en la dinámica del pozo debido a la liberación de fluidos hacia la formación.

Para caracterizar y comprender mejor el fenómeno de *Ballooning*, luego de una prueba de BUPT, se realizaron aperturas y cierres como se observa en la figura 12 controlados de pozo utilizando Autochoke MPD en intervalos similares, manteniendo una contrapresión inicial constante. Durante este proceso, se observó que, con cada ciclo de apertura y cierre, la presión anular y el volumen purgado disminuían de forma concordante. Esto es indicativo de la dilatación formacional, un comportamiento típicamente asociado al *Ballooning*, que se caracteriza por fluctuaciones de presión debido a formacionales que se expanden y se contraen.

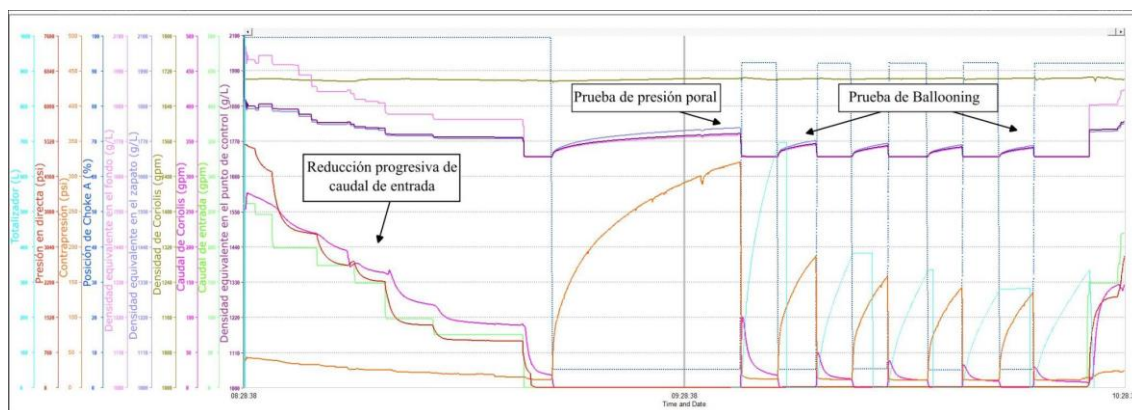


Figura 12. Efecto *Ballooning* evidenciado posterior a prueba de presión poral.

3.7 Análisis de evento de *Breathing*

El evento observado en el pozo de Loma Campana permitió evidenciar un comportamiento asociado al efecto *Breathing*, cuya manifestación se vinculó directamente con la dinámica de presión-volumen registrada durante las maniobras operativas. Si bien se utilizó una densidad de ahogo adecuada respaldada por la condición estática del pozo en el momento en que se realizó ahogue desde profundidades menores a la zona de fractura (evitando la estimulación de *Breathing*), el sistema no logró mantener un balance hidrostático efectivo durante el primer ahogue de pozo.

La respuesta indicó que, pese a contar con una ECD/EMW igual o superior al valor objetivo durante toda la maniobra, se produjo una pérdida de presión hidrostática efectiva. Este desbalance no respondió a un diferencial de presión de poro, sino que fue producto del ingreso de fluido formacional al espacio anular, inducido por el ciclo de presión vinculado al efecto *Breathing*. La acumulación de ciclos de apertura y cierre durante las detenciones de bomba, o como en las maniobras de *backreaming*, favoreció el ingreso progresivo de hidrocarburos hacia el pozo por desplazamiento gravitacional desde las fracturas abiertas asociado a periodos de altas y bajas ECD.

Los registros anómalos en densidad y caudal detectados por el medidor Coriolis en conjunto con la presencia de gas en superficie durante el bombeo del bache de maniobra, respaldan la hipótesis de un reemplazo por gravedad y reactivación de fracturas bajo condiciones de presión fluctuante. En este contexto, la restitución de presión observada durante las secuencias de cierre y apertura fue decreciente, lo cual es consistente con un sistema de fracturas parcialmente abiertas, que presenta pérdida de capacidad de restitución volumétrica a medida que la presión interna se aproxima a la densidad equivalente del fluido de perforación.

Este comportamiento característico del *Breathing*, impidió llevar a cabo un ahogo de pozo efectivo, al no tratarse de una ganancia súbita asociada a un influjo, sino de un fenómeno dinámico de transferencia de fluidos. Como resultado, el sistema requirió estrategias operativas adaptadas que permitieran recuperar el equilibrio del pozo, como la compensación de presión a través de MPD para alcanzar profundidades menores a la de la zona de fractura sin inducir previamente a un desbalance por efecto *Swab* durante el viaje de herramienta, de modo que, se permitiese realizar un segundo ahogo desde una menor profundidad.

3.7.1 Análisis de evento de *Ballooning*

El comportamiento observado en los pozos de La Amarga Chica permitió evidenciar el efecto *Ballooning*, cuya manifestación se vinculó directamente con la dinámica de presión-volumen registrada durante las maniobras operativas, sin evidencia de influjos asociados a diferencial de presión de poro respecto de la hidrostática. Este caso resalta la importancia de ajustar los protocolos de monitoreo y control frente a fenómenos de restitución de presión que pueden simular pérdidas o influjos bajo condiciones de presión transitoria.

El fenómeno de *Ballooning* observado durante el primer evento en el yacimiento La Amarga Chica presentó fluctuaciones de presión y variaciones en los caudales de retorno, que fueron manejadas de manera efectiva mediante el uso de técnicas avanzadas de MPD. La identificación temprana del *Ballooning*, en conjunto junto con el monitoreo continuo de los parámetros de presión y flujo, permitieron un manejo seguro del pozo evitando incurrir en incorrectos controles de pozo.

3.8 Medidas de mitigación teóricas no comprobadas

En base al análisis teórico y los eventos prácticos registrados se estima la reducción de la intensidad del efecto *Breathing* a partir de disminuir la amplitud del ciclado formacional, lo cual refiere a aumentar el valor mínimo de presión que alcanzarán las fracturas durante estadios de detención de bombas no deseadas o por conexiones, de modo que se mantenga un porcentaje considerable de fluido de perforación alojado dentro de las fracturas. Esto generaría una reducción en los volúmenes de fluido formacional retornado, en conjunto, reduciría el impacto por efecto térmico, donde nuevamente fluido de perforación con menor temperatura se aloja dentro de las fracturas. Adicionalmente, se podría reducir el daño por fatiga que se ejerce hacia la formación debido a los continuos esfuerzos aplicados considerando la amplitud entre la ECD y EMW favoreciendo a reducir el desarrollo de nuevas fracturas.

El margen teórico propuesto para los cierres en dicho caso de que se requieran de aplicar purgados parciales sería manteniendo una contrapresión en superficie para generar que al menos el 50% del fluido de perforación alojado en las fracturas, permanezca dentro las mismas. Basándonos en los modelos teóricos, el volumen máximo que una fractura puede alojar será igual al límite de apertura de la fractura previo a la propagación de la misma.

Por lo cual, se podría considerar que la contrapresión que se requiere para mantener este volumen parcial sería:

$$((PPF+PCF)/2) - \rho \cdot TVD (\text{pérdida}) \cdot 1.422 = SBP_{\text{target}}$$

PPF: Presión de propagación de fractura, PCF: Presión de cierre de fractura o S3, ρ : Densidad de lodo, TVD(pérdida): Profundidad vertical verdadera de la zona de pérdida.

Por otra parte, se propone como medida de reducción de la amplitud del ciclado en condiciones en las que no se conozcan con precisión las presiones requeridas para obtener la SBP_{target} que permita mantener el 50% del volumen que ingresó en las fracturas. Una reducción de la amplitud del ciclado formacional mediante la aplicación de una contrapresión que genere un rango menor

entre la presión máxima que se le ejerce a la formación, correspondiente con la ECD, y una mínima como la EMW en el punto de pérdida.

$$((ECD + EMW)/2) - TVD(\text{pérdida}) * \rho * 1.422 = SBP_{\text{target}}$$

SBP_{target}: Contrapresión requerida para mitigar el ciclado formacional, ECD: Densidad equivalente de circulación en la zona de fractura, EMW: Densidad equivalente de lodo cuando no se tiene circulación, TVD pérdida: Profundidad vertical verdadera de la zona de pérdida, ρ : Densidad de lodo utilizada para perforar.

3.9 Medidas de mitigación comprobadas para efecto *Ballooning*

Se propone reducir la severidad del efecto *Ballooning* a partir de disminuir el volumen alojado por deformación elástica dentro de las formaciones. Esto implica reducir la ECD/EMW durante conexiones, o paradas de bomba inoportunas evaluando los retornos controladamente a través del Coriolis y ajustando el cierre con Autochoke MPD permitiendo la desenergización de las formaciones.

Las medidas aplicadas y corroboradas consisten en que una vez se detenga el bombeo (identificado y caracterizado *Ballooning* en pozo) se dejará inicialmente se purgar 1 m³ (totalizado por Coriolis) o 1 minuto lo que ocurra primero. Posteriormente, una vez evaluado el fondo arriba e identificado parámetros estables (no hay quiebre en la densidad exhibida en coriolis) se procederá a incrementar el volumen de purga hasta 2 m³ o 1.5 minutos lo que ocurriese primero. Seguido, se evaluará fondo arriba y una vez confirmados parámetros estables, mantendrá estrategia de purgado de 2 m³ o 2 minutos lo que ocurriese primero.

Se considerará que esta medida podrá ser aplicada en condiciones en las que la tendencia del caudal de salida sea a caer. En caso contrario, se deberá de realizar el cierre de pozo y evaluar correspondiente fondo arriba de modo de asegurar la condición de balance del pozo.

4. Conclusiones

Se corroboró que, si bien los efectos *Ballooning* y *Breathing* se encuentran vinculados a una génesis similar que es la fluctuación de presión, su identificación, el comportamiento esperado de cada uno, en conjunto con las medidas de mitigación que se podrían aplicar son ampliamente diferentes.

Tal es el caso de las medidas presentadas en el trabajo, en donde en uno de los escenarios se planteó en base a condiciones totalmente teóricas haciendo uso del equipamiento de MPD una estrategia que podría de aportar mejoras en estos casos en los que se perforan en yacimientos ampliamente desarrollados como Loma Campana formaciones de muy baja permeabilidad con presencia de fracturas hidráulicas (aplicable en fracturas naturales) en como lo es la Fm. VM.

En conjunto, las medidas de mitigación de *Ballooning* permiten la desenergización de las formaciones cuando presentan efecto *Ballooning* severo. En estas condiciones, el control de caudal de retorno detallado permite efectuarlo de manera segura, teniendo la capacidad de ajustar una contrapresión en caso de que las condiciones de pozo cambiasen, incurriendo en eventos de control de pozo por desbalance respecto de la presión poral.

Adicionalmente, se demuestra que el avance en las tecnologías de perforación permite caracterizar y mitigar condiciones de pozo de manera temprana, debido a la precisión de los equipamientos utilizados.

Las medidas teóricas aplicadas requieren de evaluación en condiciones reales, de modo que, se pueda evaluar el comportamiento de las formaciones con alto grado de heterogeneidad y anisotropía geomecánica como la Formación Vaca Muerta, de manera que se ajuste a un modelo que conduzca a resultados factibles comprobados.

5. Bibliografía

- Arregui, C., Carbone, O. y Leanza, H.A. 2011c. Contexto Tectosedimentario. En: Leanza, H.A., Arregui, C. y Carbone, O. (eds.), *Geología y Recursos Naturales de la Provincia del Neuquén*. 18° Congreso Geológico Argentino, Neuquén, Relatorio, 29-36.
- Baldino, C., Smith, J., y Lee, R. 2018. Borehole-Breathing/kick discriminator: Diagnostic tool and potential resource for in-situ formation characterization. *Drilling Contractor*, 34(3), 248–256.
- Gill, J.A. 1989. How borehole Ballooning alters drilling responses. *Oil Gas J. (United States)* 87 (11).
- Helstrup, A., Rahman, K., Hossain, M., y Rahman, S. 2001. A practical method for evaluating effects of fracture charging and/or Ballooning when drilling high pressure, high temperature (HPHT) wells. In: SPE/IADC Drilling Conference. Society of Petroleum Engineers.
- Kietzmann, D., Ambrosio, A., Suriano, J., Alonso, S., Vennari, V., Aguirre-Urreta, B., Dépine, G., y Repol, D. 2014a. Análisis sedimentológico y estratigráfico secuencial de las Formaciones Vaca Muerta y Quintuco en el área de Chos Malal, Cuenca Neuquina. In Congreso de Exploración y Desarrollo de Hidrocarburos, No. 9, Trabajos Técnicos: 269-288. Mendoza.
- Kietzmann, D.A.; Ambrosio, A.L.; Suriano, J.; Alonso, S.; Vennari, V.; Aguirre-Urreta, B.; Depine, G. y Repol, D. 2014b. Variaciones de facies de las secuencias basales de la Formación Vaca Muerta en su localidad tipo (Sierra de la Vaca Muerta), Cuenca Neuquina. In Congreso de Exploración y Desarrollo de Hidrocarburos, No. 9, Trabajos Técnicos: 299-318. Mendoza.
- Leanza, H. A., Hugo, A., y Repol, D. 2011. La Formación Vaca Muerta y equivalentes (Jurásico Tardío–Cretácico Temprano) en la Cuenca Neuquina. *Relatorio del 18° Congreso Geológico Argentino*.
- Legarreta, L., y Gulisano, A. 1989. Análisis estratigráfico secuencial de la Cuenca Neuquina (Triásico superior–Terciario inferior). In G. Chebli & L. Spalletti (Eds.), *Cuencas Sedimentarias Argentinas* (pp. 221–243). Instituto Superior de Correlación Geológica.
- Li, Y., Wang, Z., y Zhang, Y. 2020. Thermal-shock-induced surface softening and conductivity evolution of granite fracture surfaces. *Geothermics*, 86, 101819.
- Otharán, A. 2020. The Vaca Muerta Formation of the Neuquén Basin: An exceptional setting along the Andean continental margin. *Journal of South American Earth Sciences*, 104, 102837.
- Ramos, V., y Folguera, A. 2020. The Vaca Muerta–Quintuco system (Tithonian–Valanginian) in the Neuquén Basin, Argentina: A view from the outcrops in the Chos Malal fold and thrust belt. *Journal of South American Earth Sciences*, 104, 102837.
- Sosa Massaro, A., y Tettamanti, M. 2020. Geomechanical properties of the Vaca Muerta Formation. *E3S Web of Conferences*, 205, 03013.
- Tettamanti, M., Sosa Massaro, A., y González, M. 2024. Anisotropic and nonlinear properties of rock samples in the Vaca Muerta Formation: Experimental measurements and implications on reservoir geomechanics. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 226, 108820.
- Weaver, C. 1931. *Paleontology of the Jurassic and Cretaceous of West Central Argentina*. University of Washington Press.
- Yang, Y., Wang, X., Zhang, L., y Liu, H. 2022. Dynamic response mechanism of borehole Breathing in fractured formations. *Energy Reports*, 8, 3360–3370.
- Yrigoyen, M. 1991. The Neuquén Basin: An overview. In G. D. Williams & A. D. G. Naylor (Eds.), *The Oil and Gas Habitats of the South Atlantic* (pp. 211–227). Geological Society Special Publication No. 153.

Zoback, M. D. 2007. *Reservoir Geomechanics*. Cambridge University Press.

6. Curriculum Vitae

Arcenio Elias Mario: Licenciado en Geología, egresado de la Universidad Nacional de Río Negro, actualmente Ingeniero de *Managed Pressure Drilling* en Halliburton. Desarrollando operaciones en campo de perforación bajo presión controlada (*Managed Pressure Drilling*) en yacimientos no convencionales, realizando monitoreo en tiempo real con softwares de simulaciones de hidráulicas de pozo, análisis de datos y control de condiciones de pozo. Conocimientos sólidos del comportamiento formacional, dinámica de fluidos y tecnologías aplicadas a la perforación segura y eficiente.

Leopoldo German La Motta Bani: Licenciado en Geología, egresado de la Universidad Nacional de La Plata, en la actualidad especializado en el trabajo de campo en la perforación no convencional, desarrollando experiencia Managed Pressure Drilling (MPD) en Halliburton. Se especializa en modelamiento y simulaciones para operación MPD utilizando simuladores como well flow, DFG y software dinámico GBsetpoint, determinación parámetros de perforación, control y monitoreo de parámetros de perforación. Implementación y ejecución de procedimientos de control de pozos para operación de perforación MPD.