

## Mejores prácticas en la aplicación de productos oxidantes de polímero

*Ángel Salazar Munive  
Everardo Hernández del Ángel  
Omar Villaseñor Chávez  
Gustavo Ulises Cruz Paz  
Pemex Exploración y Producción*

Artículo recibido en noviembre de 2021-revisado, evaluado y aceptado en julio de 2022

### Resumen

En campos costa afuera de la Sonda de Campeche, la perforación de la etapa de yacimiento se realiza empleando lodos base agua de mar, ocasionando un daño severo a la formación debido a la alta carga de polímeros que se utiliza para dar viscosidad al lodo y reducir, en la medida de lo posible, los grandes volúmenes perdidos; afectando principalmente la permeabilidad en la ventana de aceite, debido a dos mecanismos: precipitación de polímeros por incompatibilidad con los crudos pesados de la formación Cretácico, generación de un enjarre en la vecindad del pozo en conjunto con los recortes de perforación en la zona de pérdida total. El presente trabajo muestra la evolución en el desarrollo de productos oxidantes de alto desempeño para degradar y dispersar el enjarre y polímeros precipitados; así como las mejores prácticas para su aplicación en campo como parte de los tratamientos químicos en la industria petrolera acelerando el tiempo de inducción y limpieza de los pozos.

**Palabras clave:** Daño, lodo, enjarre, polímeros, oxidantes, incompatibilidad, agua de mar.

## Best practices in the application of polymer oxidizing products

### Summary

In offshore fields located in the Campeche Sound, the drilling of the reservoir stage is performed using seawater-based muds, causing severe damage to the formation due to the high polymer load used to provide viscosity to the mud and reduce, as much as possible, the large volumes lost; mainly affecting the permeability in the pay zone, due to two mechanisms: polymer precipitation due to incompatibility with the heavy crudes of the Cretaceous formation, generation of filter cake in the vicinity of the well in combination with drill cuttings in the zone of total loss. The present work shows the evolution in the development of high performance oxidant products to degrade and disperse the precipitated polymer and filter cake, as well as the best practices for its application in the field as part of the chemical treatments in the oil industry, accelerating the flowback and cleaning time of the wells.

**Keywords:** Skin, drilling mud, filter cake, polymer, oxidant, incompatibility, seawater.

## Introducción

Como parte de la estrategia de reducción de costos y tiempos de perforación en los pozos costa afuera de la Sonda de Campeche, se hace uso del mayor recurso disponible: el agua de mar; mediante la incorporación de aditivos sólidos o líquidos incluyendo biopolímeros, gomas, almidones y celulosa, se logra dar viscosidad al lodo de perforación buscando minimizar el volumen de lodo perdido en la ventana de aceite (se tienen pozos donde el volumen perdido supera los 40,000 m<sup>3</sup>); durante la limpieza de los pozos se tenía producción con alto corte de agua de baja salinidad hasta por tres meses; adicionalmente la alta caída

de presión en fondo por la precipitación de polímeros en la formación productora ocasiona conificación del acuífero, produciendo con ello agua de alta salinidad afectando la cuota de aceite comprometida para el pozo.

## Problemática: Daño severo a la formación

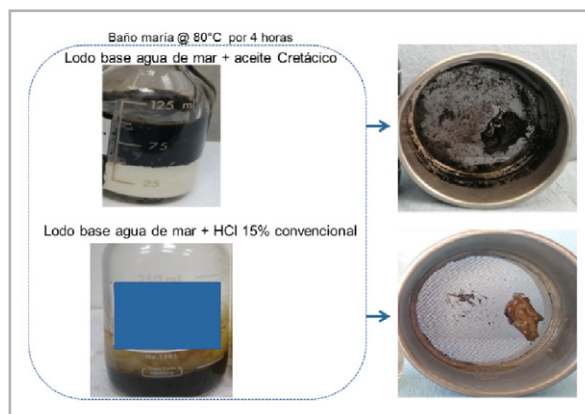
En 2016 durante la limpieza de un pozo (K-52) se obtuvo evidencia del daño severo a la formación productora que ocasionan los lodos base agua de mar, **Figura 1**, mediante la recuperación de fluido altamente emulsionado: lodo + polímeros + aceite.



**Figura 1.** Emulsión entre lodo base agua de mar y aceite Cretácico, recuperado en la limpieza del pozo marino K-52.

Se logró reproducir en laboratorio la incompatibilidad de este tipo de lodos con aceite de diferentes campos productores de la formación Cretácico; se demostró que

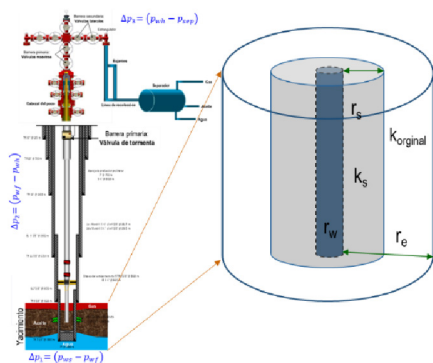
la precipitación de polímeros se intensifica si este tipo de lodos entra en contacto con HCl convencional o con solventes aromáticos, **Figura 2**.



**Figura 2.** Incompatibilidad de los lodos base agua de mar con aceite de la formación Cretácico y HCl convencional.

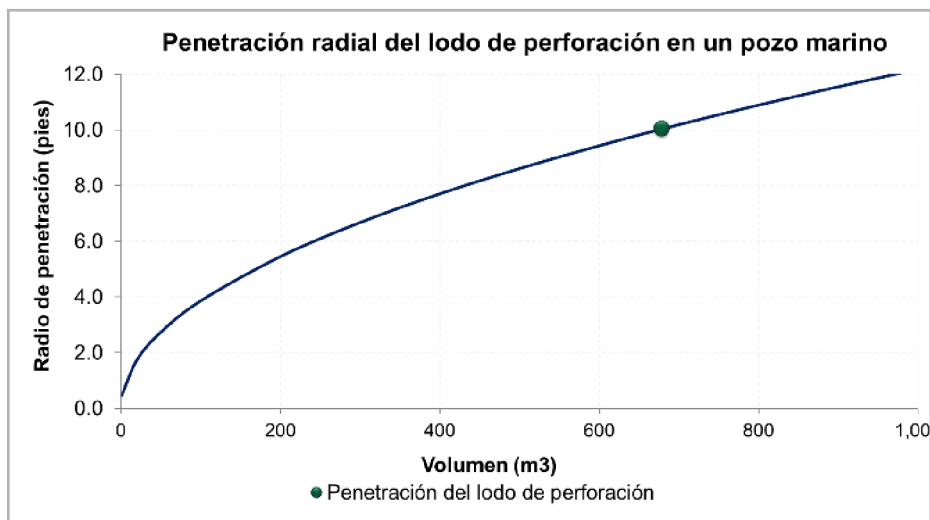
### Cálculo del radio de daño a la permeabilidad absoluta por invasión de los lodos base agua de mar con alta carga de polímeros

El uso de lodos base agua de mar para perforar la etapa de yacimiento ocasiona un daño severo a la formación productora por la formación del enjarre y precipitación de polímeros, por la incompatibilidad con los aceites del Cretácico reduciendo o eliminando la permeabilidad absoluta en el radio de invasión, **Figura 3**.



**Figura 3.** Daño a la permeabilidad absoluta por los lodos base agua de mar.

El radio de invasión del lodo se calcula empleando un modelo de penetración radial, tomando el volumen de lodo perdido, espesor del yacimiento (desde la cima del yacimiento a la PT del pozo), radio del pozo y porosidad promedio, **Gráfica 1**.

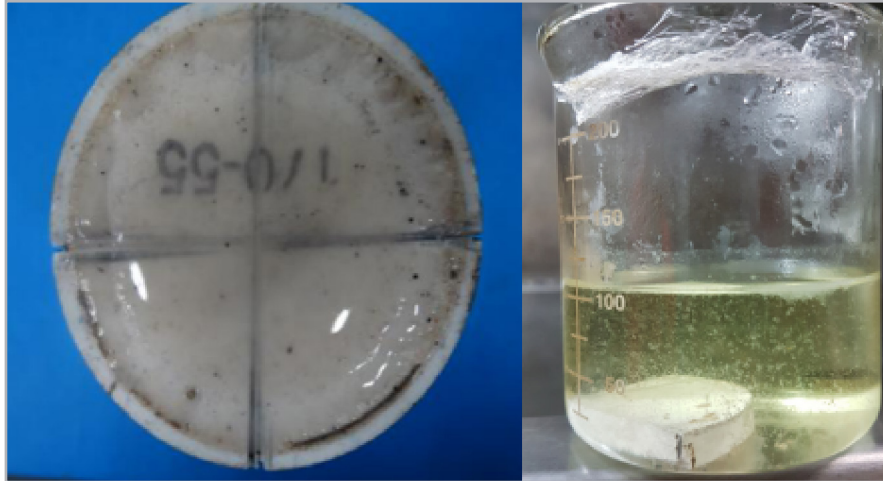


**Gráfica 1.** Cálculo del radio de daño ocasionado por el lodo base agua de mar.

## Implementación del uso de sistemas oxidantes y su proceso de mejora continua

Para remover el daño a la permeabilidad absoluta ocasionada por los lodos de perforación base agua de mar, en 2017 se evaluaron diferentes productos de la compañía "S" encontrando que los oxidantes como el

hipoclorito de sodio ( $\text{NaClO}$ ) permiten remover el enjarre y polímeros; el mecanismo de acción de estos oxidantes consiste en generar una fragmentación acelerada de los polímeros mediante hidrólisis con el objetivo de reducir la longitud de la cadena principal del polímero y disminuir su peso molecular dispersándolos y manteniéndolos en suspensión, **Figura 4**.



**Figura 4.** Mecanismo de acción de un agente oxidante de polímeros.

### Pruebas de compatibilidad para la selección de los sistemas oxidantes:

En un baño María a  $90\text{ }^{\circ}\text{C}$  y presión ambiente se deben realizar pruebas de compatibilidad entre aceite del yacimiento y fluidos bombeados en relación 50%:50% o 1:1; así mismo se recomienda realizar pruebas de compatibilidad con mezclas críticas incluyendo 33.3% aceite : 33.3% lodo : 33.3% producto químico; en estas pruebas se busca que la mezcla de productos no genere emulsiones; para ello debe ocurrir una separación de fases en los primeros 30 minutos en baño; posteriormente, después de 4 horas se debe realizar el filtrado en una malla 100 (orificio de 150 micrones), en caso de observar presencia de lodillo asfáltico, polímeros o sólidos insolubles se considera que los sistemas son incompatibles y podrían generar un daño adicional a la formación productora.

### Magnitud del daño de los lodos de perforación base agua de mar con alta carga de polímeros:

En abril de 2019 en la etapa de terminación de un pozo marino de la Sonda de Campeche, durante la introducción del liner ranurado, se presentaron resistencias intentando vencer la misma en varias ocasiones sin éxito; se decidió recuperar el liner ranurado superficie; al recuperar el liner se encontraron todas las ranuras tapadas con un polímero tipo silicón, **Figura 5**, confirmando el daño severo que ocasiona este tipo de lodo, al grado de taponar el agujero perforado e impedir la introducción del liner de producción.



Figura 5. Polímero tipo silicón recuperado en las ranuras de un liner de producción.

Se realizaron pruebas de solubilidad a las muestras de polímero recuperadas; con los sistemas oxidantes de la compañía “H”, alcanzando una solubilidad de 49% en 1 hora, Figura 6. Para incrementar el porcentaje de solubilidad de

los polímeros, se realizaron reformulaciones para potenciar el poder de los agentes oxidantes logrando una solubilidad superior al 97%, en tiempo de contacto de una hora con el oxidante de la compañía “C”, Figura 7.

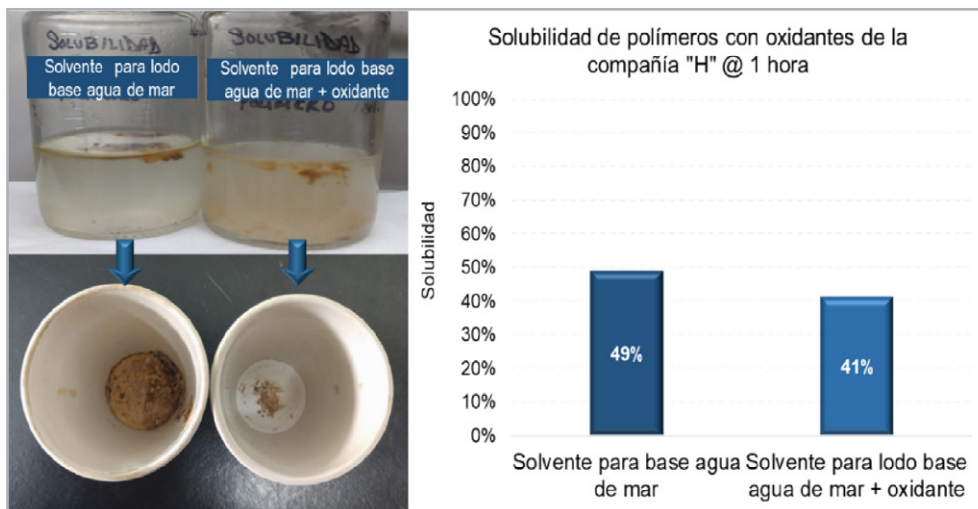


Figura 6. Solubilidad de polímeros recuperados, oxidante de la compañía “H”.



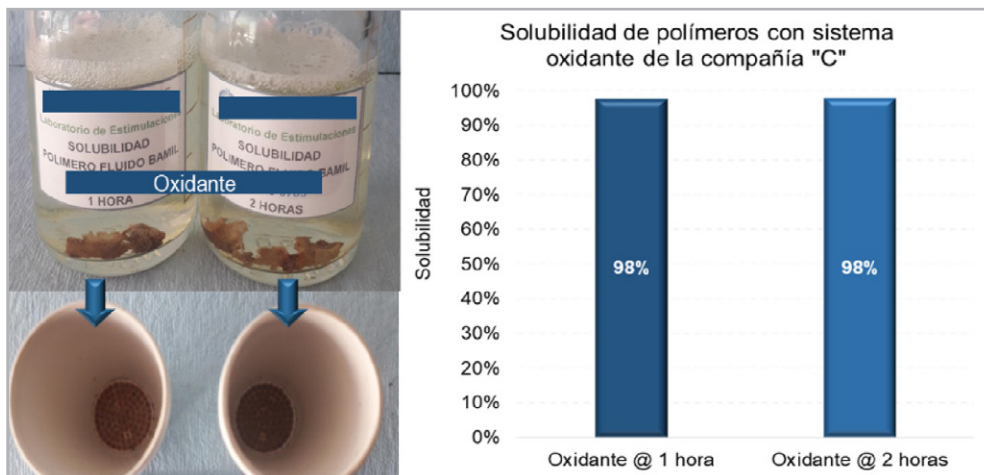


Figura 7. Solubilidad de polímeros recuperados, oxidante de la compañía "C".

Posteriormente se implementó una campaña para demostrar la precipitación de polímeros de todos los lodos base agua de mar ofertados por las diferentes compañías de

servicios debido a la incompatibilidad con los aceites de la formación Cretácico, **Figura 8 y 8A**.

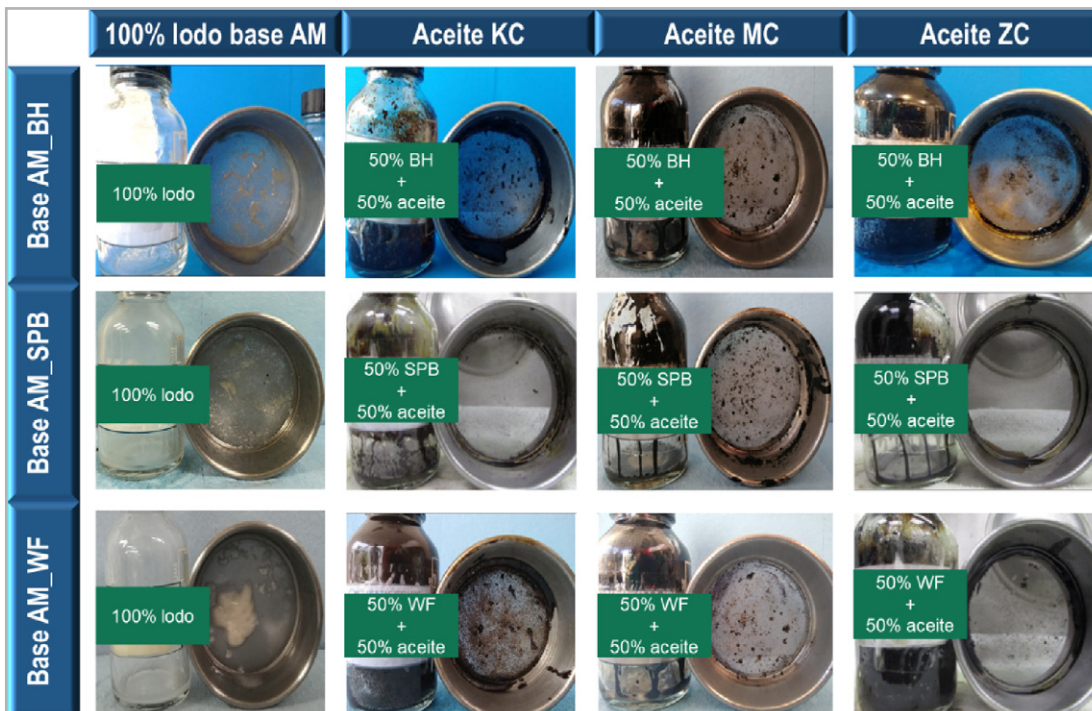


Figura 8. Incompatibilidad de 3 lodos base agua de mar (AM) con aceites Cretácicos.



Figura 8A. Incompatibilidad de 3 lodos base agua de mar (AM), con aceites Cretácicos.

### Eficiencia de los sistemas oxidantes

Los sistemas oxidantes además de ser compatibles, deben tener la capacidad de romper los lodos base agua de mar, eliminando la viscosidad del fluido haciendo “agua” el lodo de perforación, inicialmente en las pruebas de compatibilidad se obtuvieron resultados satisfactorios en una relación 1:1; esto implica que por cada metro cúbico de lodo perdido se requiere el mismo volumen de oxidante para romper remover el daño, sin embargo hasta marzo 2019 algunos pozos requerían más de un bombeo de bache oxidante para lograr eliminar el daño ocasionado por el uso de lodos de perforación base agua de mar con alta carga de polímeros.

Como parte del proceso de mejora continua, se observó que los oxidantes dejaban de ser efectivos cuando se modificaba la relación 1:1 o 50% lodo: 50% oxidante; se reformularon los oxidantes y evaluaron a diferentes relaciones hasta alcanzar resultados satisfactorios en una relación 10% oxidante: 90%, superando las expectativas actuales, logrando eliminar la viscosidad de los lodos mediante la adición de surfactantes y oxidantes de alto desempeño para romper las cadenas de polímeros, **Figura 9**.

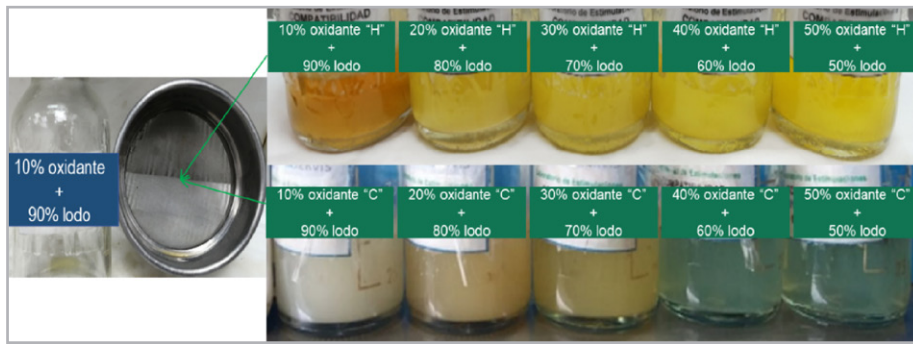


Figura 9. Rompimiento de lodos base agua de mar con oxidantes de alto desempeño.

Para demostrar la eficiencia de las nuevas formulaciones se realizó la deshidratación de diferentes lodos base agua de mar para obtener la máxima carga de polímeros; estos

polímeros deshidratados se contaminaron con muestras de aceite, buscando reproducir la condición en yacimiento, Figura 10.

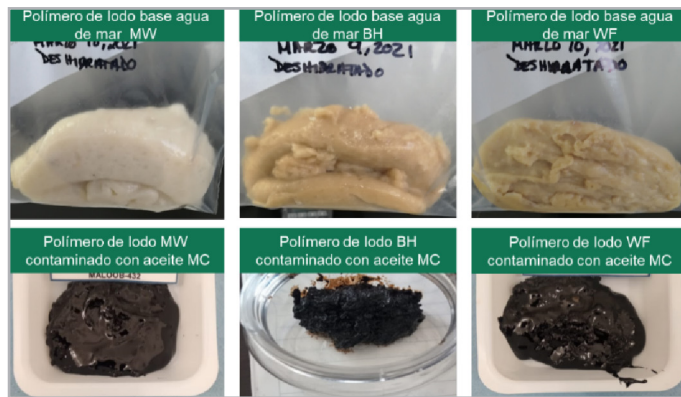
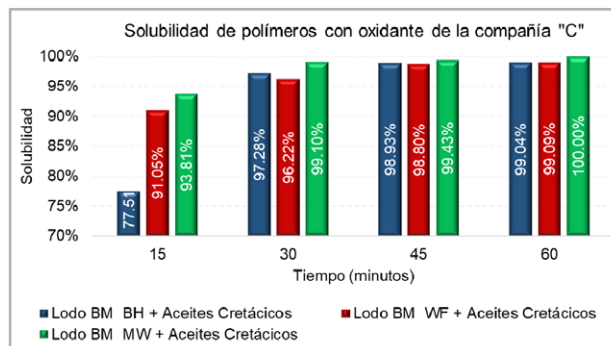


Figura 10. Polímero de lodo base agua de mar deshidratado y contaminado con aceite.

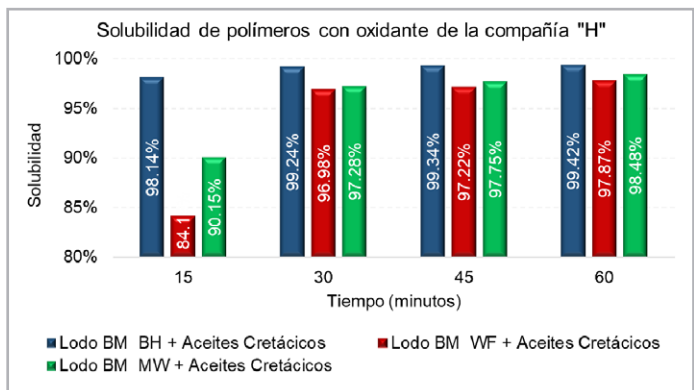
Para el oxidante de la compañía "C", se realizaron 36 pruebas de solubilidad alcanzando porcentajes superiores al 99% en 1 hora para los tres tipos de polímeros deshidratados

contaminados con aceite, Gráfica 2. Para el oxidante de la compañía "H", se realizaron 36 pruebas de solubilidad alcanzando porcentajes superiores al 97%, Gráfica 3.



Gráfica 2. Solubilidad de polímeros deshidratados con oxidante de la compañía "C".



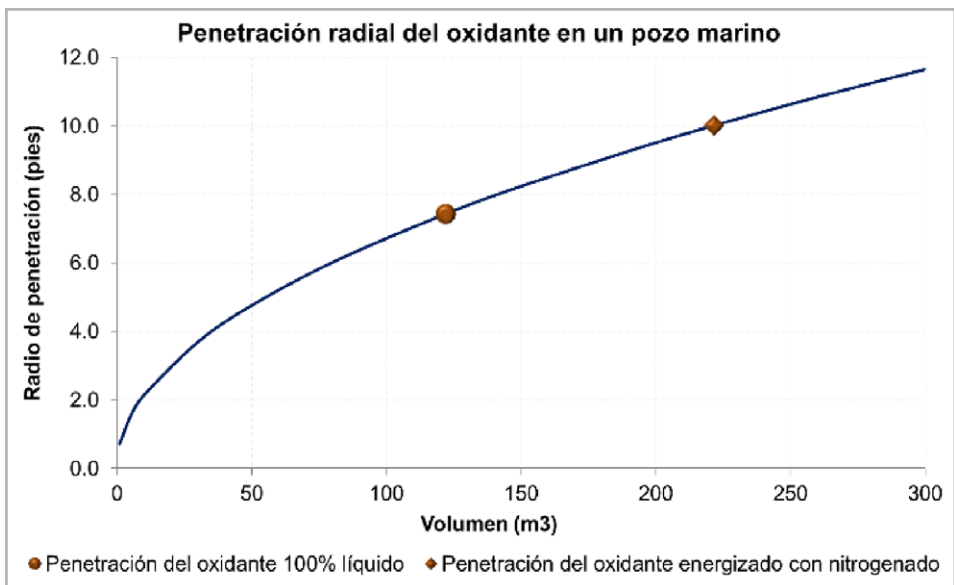


Gráfica 3. Solubilidad de polímeros deshidratados con oxidante de la compañía “H”.

### Mejores prácticas operativas para la colocación de oxidantes de alto desempeño

El Activo de Producción fue pionero en la implementación del bombeo de baches oxidantes para remover el daño

generado por el uso de lodos base agua de mar con lata carga de polímeros; el volumen de oxidante debe alcanzar el radio de penetración de la zona dañada para comunicar la zona virgen del yacimiento con la vecindad del pozo, **Gráfica 4.**



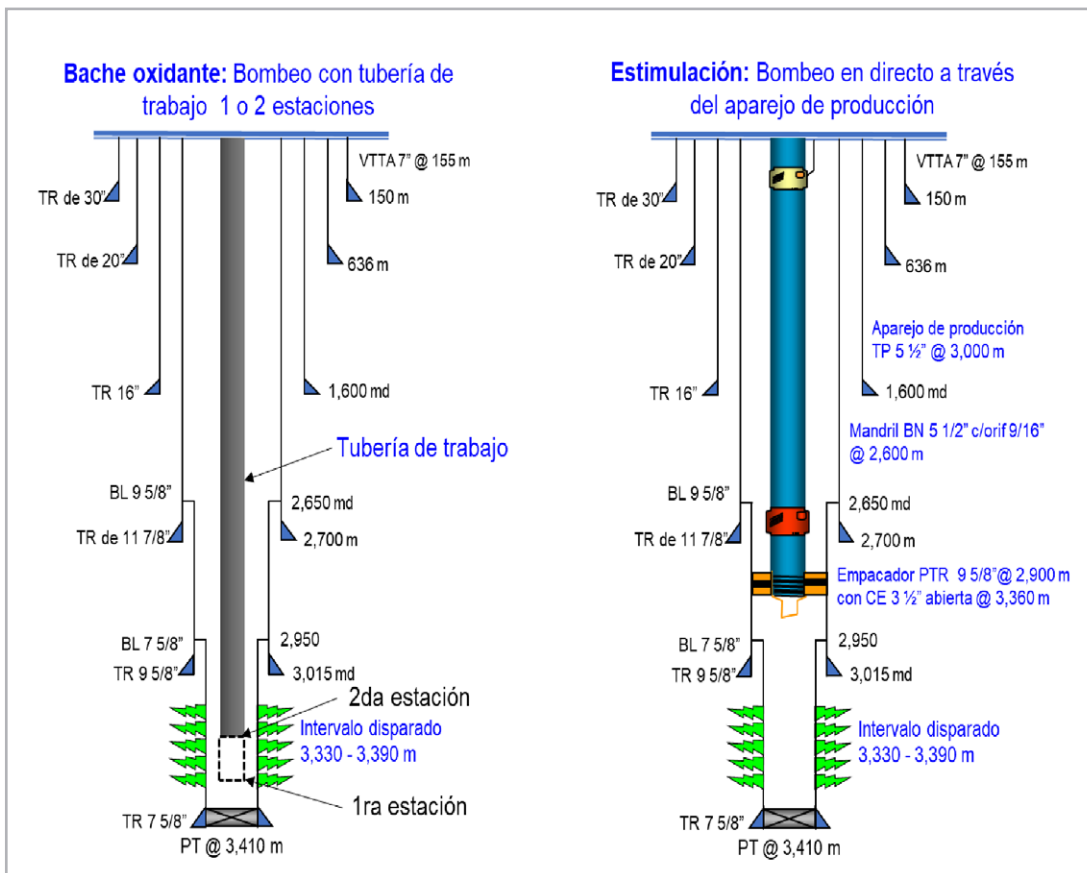
Gráfica 4. Penetración del sistema oxidante en el intervalo de interés.

Igual de importante que la selección adecuada del producto oxidante es la técnica de colocación del tratamiento; en el Activo se implementaron las siguientes premisas:

1. Durante la perforación del yacimiento, **en caso de un atrapamiento**, deberá bombearse un preflujo de oxidante para degradar el lodo en la vecindad del pozo; posteriormente bombear un tren de solvente-ácido-solvente con propiedades de oxidantes. En caso

de utilizar ácidos convencionales, la incompatibilidad entre el lodo base agua de mar con el HCl, producirá una precipitación severa de polímeros complicando aún más la liberación de la sarta de perforación.

2. Para **pozos con terminación convencional**, el bache oxidante se deberá bombear 100% líquido en 1 ó 2 estaciones antes de bajar el empacador con aparejo de producción, **Figura 11**.



**Figura 11.** Esquema de colocación de bache oxidante rompedor de enjarre y polímeros para pozo BNC con terminación convencional.

3. Para pozos en agujero descubierto sin cola extendida, el bombeo del bache oxidante se debe realizar con cédula 100% líquida y tubería de trabajo estacionada a profundidad de la última zapata; no se recomienda estacionar la tubería de trabajo dentro del agujero

descubierto, al romper el lodo de perforación y el enjarre en la vecindad del pozo, puede ocurrir un desprendimiento de recortes y atrapar la sarta de perforación, **Figura 12**.

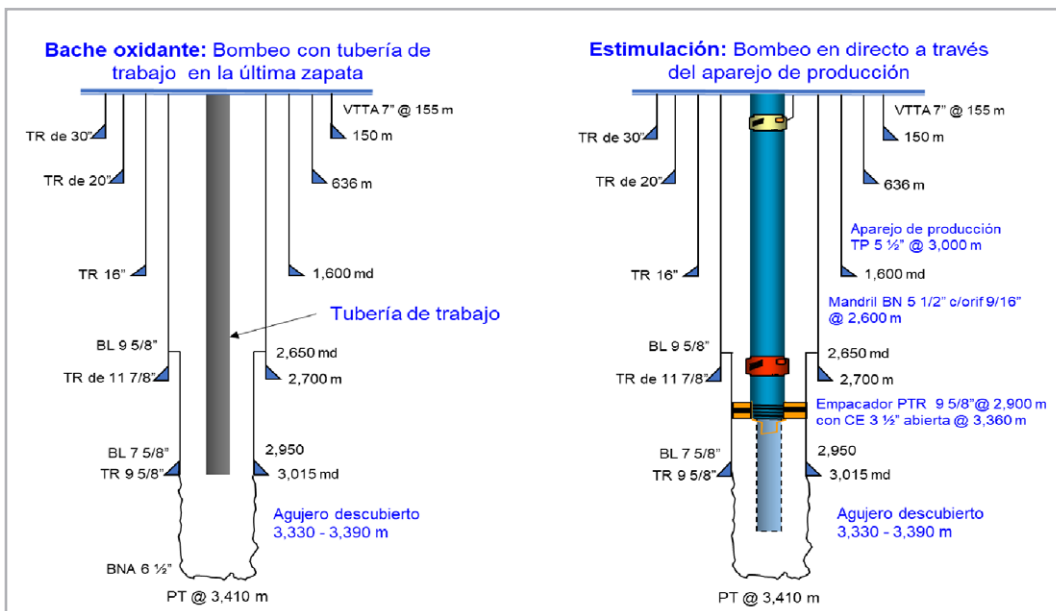


Figura 12. Colocación de bache oxidante para pozo terminado en agujero descubierto.

- Para pozos de BNC terminados con cola extendida, el bache oxidante debe bombearse con tubería de trabajo conectada al empacador de producción con cola extendida y cédula parcialmente energizada

con nitrógeno para manejar altos gastos y generar divergencia, desplazando con diésel 100% líquido para dejar controlado el pozo y poder continuar con introducción del aparejo de producción, **Figura 13**.

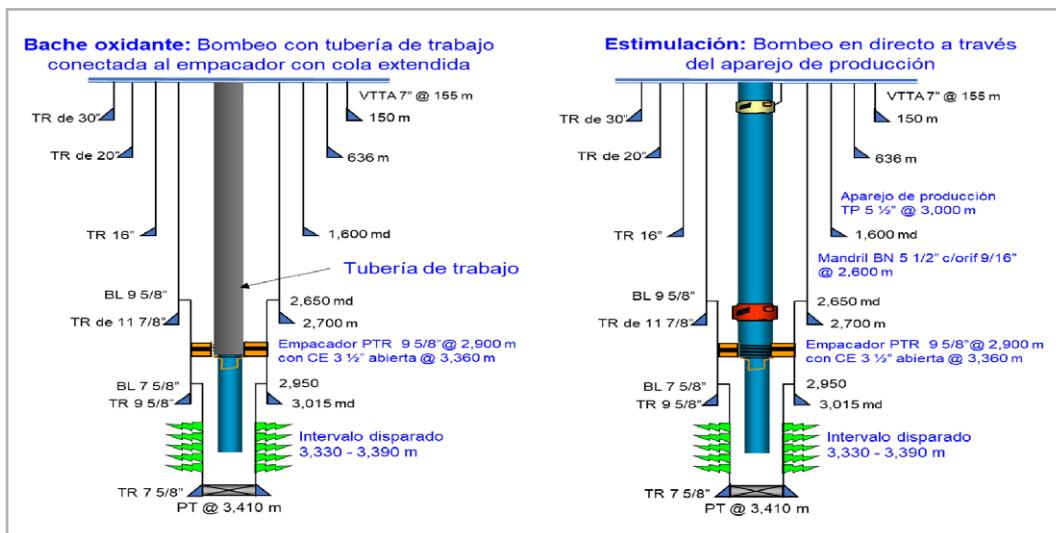


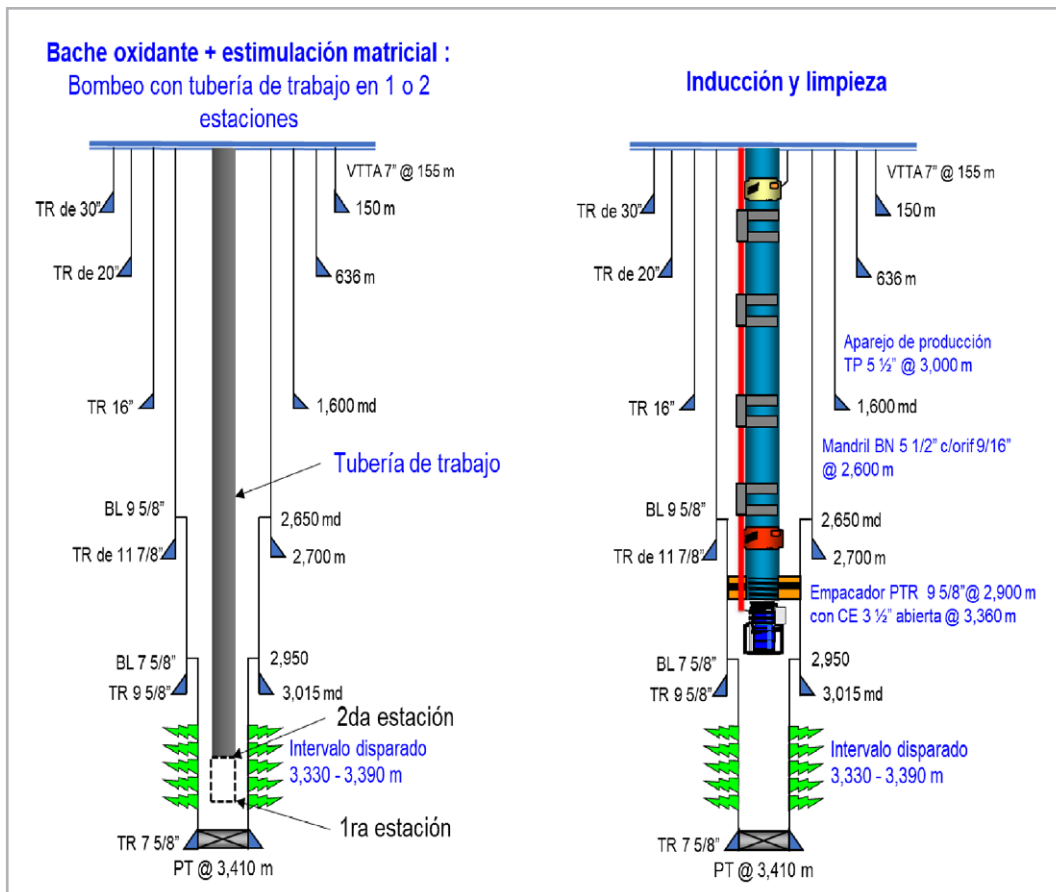
Figura 13. Colocación de bache oxidante para pozo terminado con cola extendida dentro de liner disparado o ranurado.

5. Para pozos BEC:

- a. En caso de terminaciones convencionales; se deberá bombear de forma simultánea el bache oxidante y la estimulación por intervención; se debe espaciar el oxidante con un bache de diésel o solvente y

posteriormente bombear la cédula de estimulación con sistemas ácidos y solventes con propiedades oxidantes, **Figura 14**.

- b. Para terminación con cola extendida en liner ranurado o disparado, aplicar el punto "2"; para agujero descubierto aplicar el punto "3", **Figura 15**.



**Figura 14.** Esquema de colocación de bache oxidante rompedor de enjarre y polímeros + estimulación matricial para pozo BEC con terminación convencional.

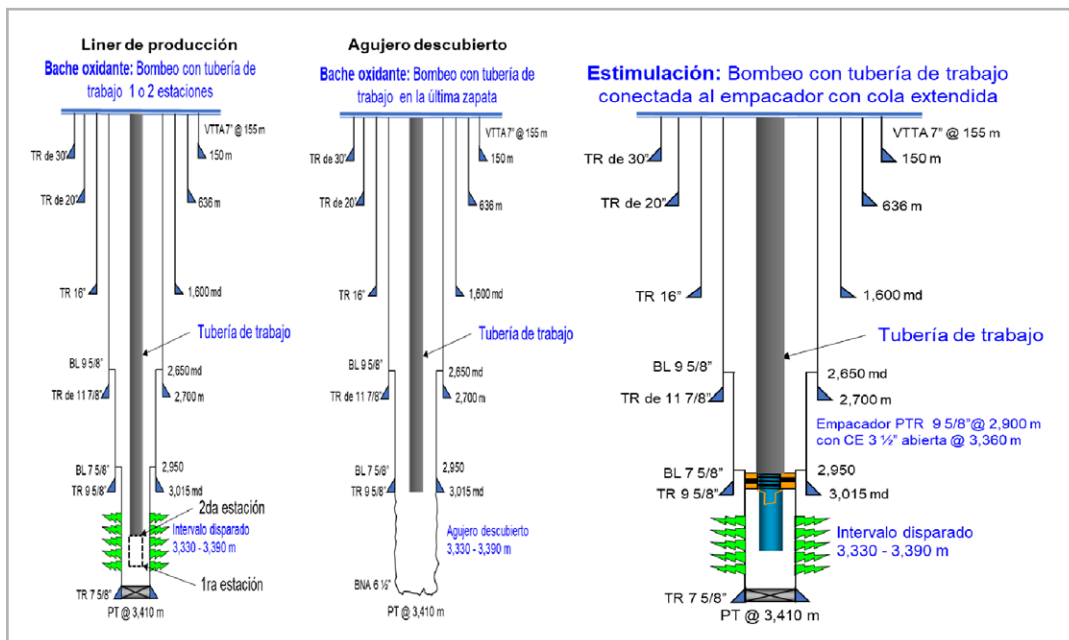


Figura 15. Colocación de bache oxidante para pozo BEC terminado con cola extendida.

6. Para **pozo monitor-productor** bajado con aparejo de producción integral (pozos equipados con sensores de presión y temperatura en fondo); aplicar el punto

“2” para liner de producción ranurado o disparado; o el punto “3” para agujero descubierto, **Figura 16**.

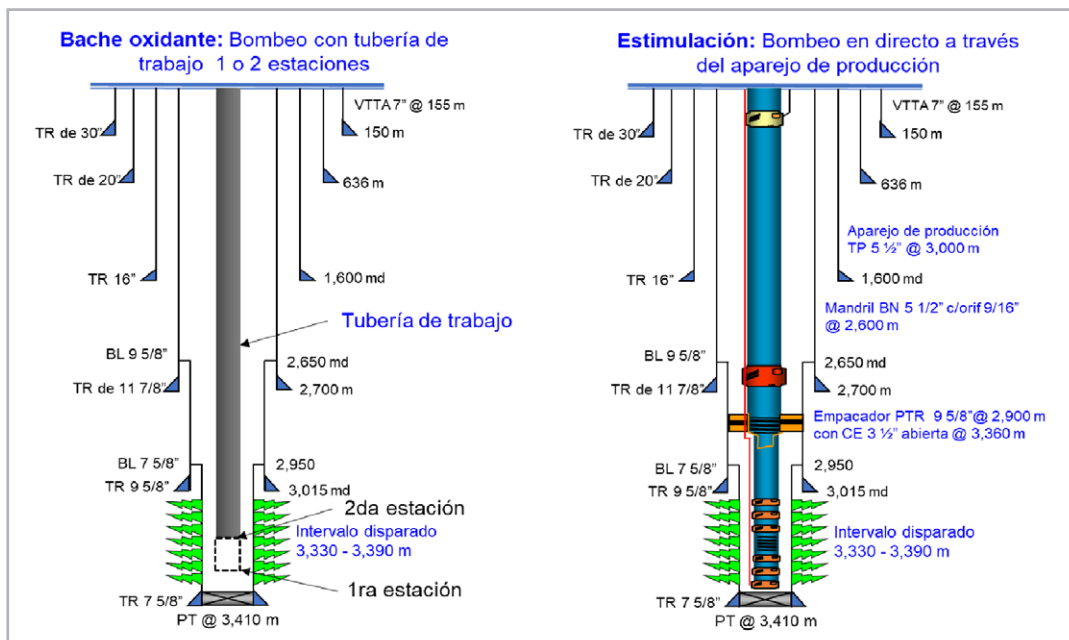


Figura 16. Colocación de bache oxidante para pozo monitor-productor, bajado con aparejo de producción integral, (una sola corrida).



## Innovaciones en sistemas ácidos y solventes con propiedades oxidantes para lodos base agua de mar con alta carga de polímeros

A partir de noviembre 2020, en conjunto con las compañías de servicio, se evaluaron y desarrollaron sistemas solventes y ácidos con propiedades oxidantes; además de remover material orgánico y disolver empaque de recortes respectivamente, también tienen la capacidad de romper los remanentes del lodo de perforación enjarre y polímeros. Actualmente la compañía "C" cuenta con 3 sistemas ácidos y 1 solvente para lodos base agua de mar; y la compañía "H" cuenta con 4 ácidos y 2 solventes para estimular pozos perforados con este tipo de lodos.

## Caso de aplicación: Pozo marino "Z" en la Sonda de Campeche, perforado en la formación Cretácico con lodo base agua de mar

Para la cédula del bache oxidante rompedor de enjarre y polímeros bombeados al pozo "Z"; se calculó un volumen de 122 m<sup>3</sup> de oxidante; 9,058 m<sup>3</sup> estándar de nitrógeno para energizar parcialmente el tratamiento y 35 m<sup>3</sup> de diésel para desplazar y colocar los productos en formación; el tratamiento se bombeó con tubería de trabajo conectada al empacador de producción para TR 7 5/8" a 3,490 MD, el cual se encuentra equipado con cola extendida de 3 1/2" abierta en fondo a 3,852 MD, **Tabla 1.**

Etapa	Fluidos	Vol. Liq. (m <sup>3</sup> )	QN <sub>2</sub> (m <sup>3</sup> /min)	Qliq (bpm)	Qfondo (bpm)	Calidad	Vol. N <sub>2</sub> (m <sup>3</sup> std)	Tiempo (min)
1	Oxidante de alto desempeño	50	-	5	5	-	-	62.9
2	Oxidante de alto desempeño	36	40	5	8	37%	1,812	45.3
3	Oxidante de alto desempeño	36	160	5	17	70%	7,246	45.3
4	Diésel	35	-	11	11	0%	-	20
Total de fluidos Líquido:		157		Total de Nitrógeno			9,058	173.49 min.
								2.89 hrs

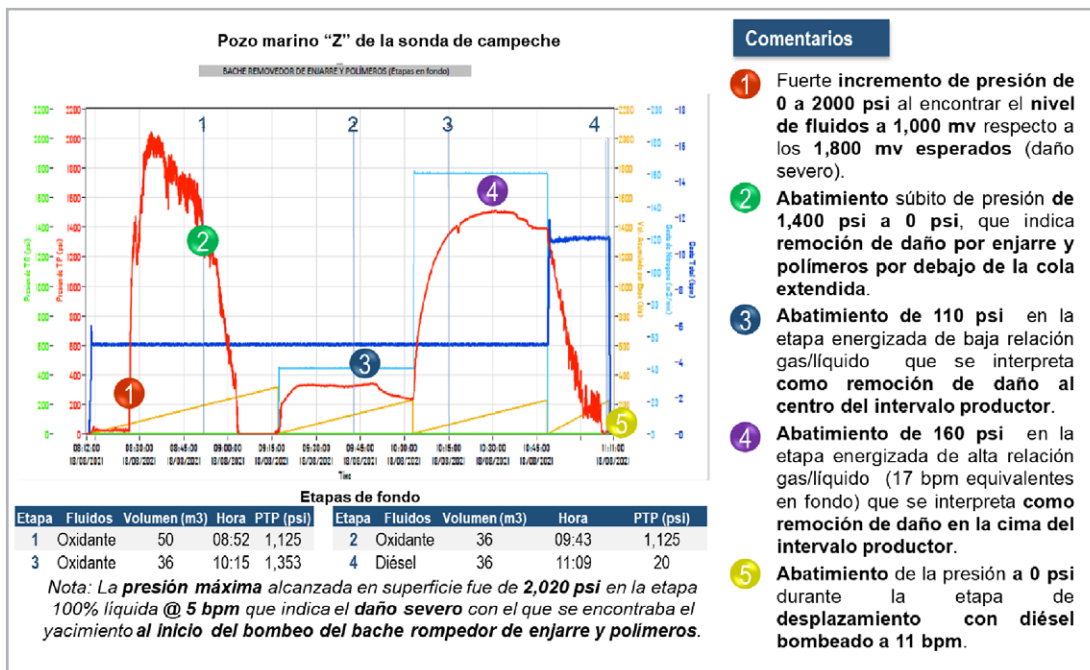
**Tabla 1.** Cédula de bombeo de bache oxidante.

### Descripción de la cédula de bombeo

- El objetivo del tratamiento es remover daño a la formación productora, generado por el enjarre en la vecindad del pozo, (producto del lodo base agua de mar de alta carga polimérica), permitiendo su degradación y precipitación al acuífero o su rápida expulsión durante el periodo de inducción y limpieza.
- Etapa 1 bombeada 100% líquida para limpiar el intervalo productor por debajo de la CE. Etapa 2 energizada con nitrógeno al 37% para romper y degradar lodo y polímeros en la zona media del

intervalo productor. Etapa 3 energizada al 70% y mayor gasto equivalente en fondo para remover el daño en la zona superior del intervalo productor. Etapa 4 con diésel para colocar el tratamiento en el yacimiento y dejar el pozo controlado para continuar con la introducción del aparejo.

La interpretación de la gráfica de bombeo del bache oxidante se realizó analizando el comportamiento de las siguientes variables: gasto de líquido, gasto de nitrógeno, bombeo de etapas en superficie y presión de cabeza del pozo, **Figura 17.**



**Comentarios**

- 1 Fuerte incremento de presión de 0 a 2000 psi al encontrar el nivel de fluidos a 1,000 mv respecto a los 1,800 mv esperados (daño severo).
- 2 Abatimiento súbito de presión de 1,400 psi a 0 psi, que indica remoción de daño por enjarre y polímeros por debajo de la cola extendida.
- 3 Abatimiento de 110 psi en la etapa energizada de baja relación gas/líquido que se interpreta como remoción de daño al centro del intervalo productor.
- 4 Abatimiento de 160 psi en la etapa energizada de alta relación gas/líquido (17 bpm equivalentes en fondo) que se interpreta como remoción de daño en la cima del intervalo productor.
- 5 Abatimiento de la presión a 0 psi durante la etapa de desplazamiento con diésel bombeado a 11 bpm.

Figura 19. Interpretación de la gráfica de bombeo del bache oxidante.

El pozo marino "Z" se estimuló antes de alinear el pozo a batería para su inducción y limpieza, presentando inicialmente un corte de agua de 50% con salinidad de 80,000 PPM, reduciéndose rápidamente hasta 2.4%; hoy en día el pozo presenta una producción de aceite medida por aforo de 5,000 bd respecto a su cuota comprometida de 3,000 bd.

**Conclusiones**

1. De la evaluación realizada a 6 tipos de lodo base agua de mar con alta carga de polímeros, se demostró que todos generan daño severo a la permeabilidad absoluta por incompatibilidad con aceites de la formación Cretácico.
2. El presente trabajo mostró la evaluación y evolución de los sistemas oxidantes, así como su aplicación en campo como uno de los tratamientos químicos de rigor para remover el daño a la formación generado por lodos de perforación base agua de mar.
3. Para la selección de un oxidante de alto desempeño se deben cumplir de manera satisfactoria las pruebas

de compatibilidad entre el lodo, el aceite y los sistemas; se debe observar pérdida de viscosidad del lodo y durante el filtrado la malla debe quedar totalmente limpia; así mismo se deben realizar pruebas de solubilidad con polímero deshidratado impregnado con aceite buscando una solubilidad superior al 90% en una hora; adicionalmente deben realizarse pruebas de corrosión considerando la metalurgia presente en el pozo.

4. Para el éxito de los baches oxidantes rompedores de enjarre y polímeros, es de vital importancia la técnica de colocación de acuerdo con el tipo de terminación del pozo; así como el bombeo del oxidante al final de la etapa de perforación, buscando mayor tiempo de contacto con el yacimiento.
5. Todos los pozos perforados con lodos base agua de mar con alta carga de polímeros deben tener como primer tratamiento químico el bombeo de baches oxidantes de alto desempeño; tomando como guía la metodología de evaluación y técnicas de colocación descritos en este artículo.

## Nomenclatura

- BEC: Bombeo Electrocentrífugo
- BNC: Bombeo neumático continuo
- Bpm: Barril por minuto
- CE: Cola extendida
- HCl: Ácido Clorhídrico
- NaClO: Hipoclorito de sodio
- TR: Tubería de revestimiento

## Agradecimientos

A los líderes de ingeniería y laboratoristas de las compañías de servicio que proveen productos y servicios para los tratamientos químicos, en pozos marinos de la Sonda de Campeche: Sarai Santos, José del Carmen Jiménez, Marisol Méndez, Aridane Ríos, Joksán Guzmán, Héctor Méndez.

## Referencias

- Cruz Paz, G. 2019. Seguimiento del Pozo Productor-Monitor Zaap-45. Informe Técnico de Productividad de Pozos KMZ.
- García Olvera, G. et al., 2017. Evaluación y Aplicación de Sistemas Químicos para Resolver Problemas

Específicos en Pozos del AIPBAS01-02. Jornadas Técnicas de la Asociación de Ingenieros Petroleros de México, Delegación Ciudad del Carmen.

- Hernández del Ángel, E. et al., 2021. Mecanismos de daño en pozos de los campos Ku Maloob Zaap. Jornadas Técnicas del Colegio de Ingenieros Petroleros de México, Sección Ciudad del Carmen.
- Hernández del Ángel, E. y Villaseñor Chávez, O. 2021. Tratamientos Químicos a Pozos con Lodo Bamil. Informe Técnico de Productividad de Pozos KMZ.
- Jiménez, J. y Cruz Paz, G. 2019. Prueba de Solubilidad de Polímero Recuperado en el Pozo Zaap-45. Informe de Laboratorio Sección Estimulaciones.
- Jiménez, J. y Hernández del Ángel, E. 2021. Pruebas de Solubilidad de Lodos BAMIL Deshidratados y Contaminados con Aceite. Informe de Laboratorio Sección Estimulaciones.
- Santos, S. y Villaseñor Chávez, O. 2019. Prueba de Solubilidad de Polímero Recuperado en el Pozo Zaap-45. Informe Soporte Técnico Laboratorio.
- Santos, S. y Hernández del Ángel, E. 2021. Pruebas de Solubilidad de Lodos BAMIL Deshidratados y Contaminados con Aceite. Informe Soporte Técnico Laboratorio.

## Semblanza de los autores

### Ángel Salazar Munive

Ingeniero Petrolero egresado del IPN, Especialidad en Sistemas Artificiales de Producción y Maestría en Ingeniería Petrolera, ambas por la UNAM. 26 años de experiencia como Ingeniero de Diseño y Productividad de pozos, Análisis Nodal y Flujo multifásico. Proyectos en los que ha participado: Proyecto BEC Activo Integral Ek-Balam; Pruebas de Presión-Producción con BEC en pozos Exploratorios de Campeche Oriente; Diseño de aparejos de producción con BNC; Documentación, licitación e implantación del Proyecto regional de BEC de la RMNE y Optimización de la Productividad de pozos en el APKMZ mediante colas extendidas.

### Everardo Hernández del Ángel

Ingeniero Petrolero egresado de la UNAM. De 2011 a 2012 laboró en la SENER; en 2013 en la SGRT mediante la generación de mapas tecnológicos; en octubre del mismo año ingresó al APKMZ mediante el programa Talento PEP, participando en el diseño de pozos con BNC; evaluación y aplicación de divergentes selectivos, quelantes y ácidos para tratamientos a pozos BEC, modificadores de permeabilidad relativa, evaluación y aplicación de oxidantes, así como implementación de desemulsificantes y mejoradores de flujo como parte de los tratamientos químicos.

### **Omar Villaseñor Chávez**

Realizó sus estudios en Ingeniería Petrolera de 2008 a 2012 en el Instituto Politécnico Nacional. De 2013-2014 se desempeñó como Ing. de Yacimientos en el APKMZ. En octubre de 2014 ingresó a PEMEX en el área de Productividad de Pozos, diseñando y documentando intervenciones de las plataformas Ku-A y Ku-B, colaboró en el desarrollo del primer pozo con auto-BN del Activo. En 2016 inició su participación en el Grupo de Estimulaciones, siendo parte del equipo de desarrollo de los tratamientos a pozos con sistema BEC.

### **Gustavo Ulises Cruz Paz**

Ingeniero Petrolero egresado de la Universidad Veracruzana Campus Coatzacoalcos. En septiembre de 2014 ingresó al programa talento PEP. De enero de 2015 a la fecha labora en el APKMZ como analista de disciplina de productividad de pozos; ha participado en el diseño de intervenciones de pozos con BNC, diseño de tratamientos de químicos para pozos con BNC y BEC, análisis y evaluación del comportamiento de pozos, modelado de pozos mediante software especializado y propuestas de optimización de gas de BN..