

ÓXIDO DE GRAFENO COMO ROMPEDOR DE EMULSIONES

Evaluación del Óxido de Grafeno como Rompedor de Emulsiones en Crudo pesado mediante pruebas de botella con análisis del Thief y BS&W

Stephanie Valentina Garcia Soto

Trabajo de Grado para Optar al Título de Ingeniero de Petróleos

Director

Jimena Lizeth Gomez Delgado

Magister en Ingeniería de Petróleos y Gas

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Fisicoquímicas

Escuela de Ingeniería de Petróleos

Bucaramanga

2026

ÓXIDO DE GRAFENO COMO ROMPEDOR DE EMULSIONES

Tabla de Contenido

| | |
|--|----|
| Introducción | 10 |
| 1.Objetivos | 12 |
| 1.1. Objetivo General | 12 |
| 1.2.Objetivos Específicos | 12 |
| 2.Marco teórico | 13 |
| 2.1.Emulsión Crudo-Agua..... | 13 |
| 2.2.Características Técnicas de la Emulsión Crudo-Agua | 13 |
| 2.3.Importancia en la Industria Petrolera | 14 |
| 2.4.Métodos de Desemulsificación | 15 |
| 2.5.Prueba de Botella | 15 |
| 2.6.Surfactante iónico..... | 16 |
| 2.7.Surfactante no iónico..... | 16 |
| 2.8.Óxido de Grafeno | 17 |
| 2.9.Test Thief | 19 |
| 2.10.Prueba SARA | 19 |
| 3.Metodología | 20 |
| 3.1.Tipo de investigación | 21 |
| 3.2.Materiales utilizados | 21 |
| 3.3.Caracterización del crudo | 22 |
| 3.4.Prueba de Botella | 23 |
| 3.5.Prueba Thief y BS&W | 25 |
| 3.6.Evaluación cualitativa y cuantitativa..... | 26 |
| 3.7.Prueba de compatibilidad (API RP 42, secciones 1 a 16) | 28 |
| 4.Resultados y discusión | 29 |
| 4.1.Caracterización de crudo en base a análisis SARA..... | 29 |
| 4.2.Comparación general de rompedores | 32 |
| 4.3.Desempeño por rompedor en la prueba de botella | 34 |
| 4.4.Desempeño por rompedor en el Thief Test | 50 |
| 4.5.Consideraciones técnicas..... | 54 |
| 4.6.Evaluación de compatibilidad del crudo con el mejor rompedor. | 54 |

ÓXIDO DE GRAFENO COMO ROMPEDOR DE EMULSIONES

| | |
|----------------------------------|----|
| 5.Conclusiones | 58 |
| 6.Recomendaciones..... | 59 |
| A. Basadas en resultados..... | 59 |
| B. Trabajo futuro | 60 |
| Referencias bibliográficas | 62 |

ÓXIDO DE GRAFENO COMO ROMPEDOR DE EMULSIONES

Lista de Tablas

| | |
|---|----|
| Tabla 1 <i>Materiales, reactivos y equipos utilizados en la investigación.</i> | 21 |
| Tabla 2 <i>Escala Visual para la descripción del agua recuperada, paredes de la botella y definición de la interfase en la prueba de botella.</i> | 27 |
| Tabla 3 <i>Escala Visual para la descripción del agua recuperada y los sólidos suspendidos en el Thief Test.</i> | 27 |
| Tabla 4 <i>Resumen comparativo del desempeño de los rompedores evaluados.</i> | 33 |
| Tabla 5 <i>Resultados de recuperación de agua en función del tiempo para el óxido de grafeno en la prueba de botella.</i> | 34 |
| Tabla 6 <i>Resultados de recuperación de agua separada para el óxido de grafeno a diferentes concentraciones en la prueba de botella.</i> | 34 |
| Tabla 7 <i>Resultados de recuperación de agua en función del tiempo para el surfactante comercial en la prueba de botella.</i> | 36 |
| Tabla 8 <i>Resultados de recuperación de agua separada para el surfactante comercial a diferentes concentraciones en la prueba de botella.</i> | 36 |
| Tabla 9 <i>Resultados de recuperación de agua en función del tiempo para el rompedor 1 en la prueba de botella.</i> | 38 |
| Tabla 10 <i>Resultados de recuperación de agua en función del tiempo para el rompedor 1 en repetición en la prueba de botella.</i> | 38 |
| Tabla 11 <i>Resultados de recuperación de agua separada para el rompedor 1 a diferentes concentraciones en la prueba de botella.</i> | 39 |
| Tabla 12 <i>Resultados de recuperación de agua separada para el rompedor 1 en repetición a diferentes concentraciones en la prueba de botella.</i> | 39 |
| Tabla 13 <i>Resultados de recuperación de agua en función del tiempo para la mezcla 50/50 en la prueba de botella.</i> | 42 |
| Tabla 14 <i>Resultados de recuperación de agua separada para la mezcla 50/50 a diferentes concentraciones en la prueba de botella.</i> | 42 |
| Tabla 15 <i>Evaluación cualitativa del estado de la emulsión para el óxido de grafeno en la prueba de botella, basada en la escala definida.</i> | 44 |
| Tabla 16 <i>Evaluación cualitativa del estado de la emulsión para el surfactante comercial en la prueba de botella, basada en la escala definida.</i> | 45 |
| Tabla 17 <i>Evaluación cualitativa del estado de la emulsión para el Rompedor 1 en el ensayo inicial de la prueba de botella.</i> | 45 |

ÓXIDO DE GRAFENO COMO ROMPEDOR DE EMULSIONES

| | |
|--|----|
| Tabla 18 <i>Evaluación cualitativa del estado de la emulsión para el Rompedor 1 en la repetición del ensayo</i> | 46 |
| Tabla 19 <i>Evaluación cualitativa del estado de la emulsión para la mezcla 50/50 (OG + EXP UIS) en la prueba de botella</i> | 47 |
| Tabla 20 <i>Comparación de los resultados óptimos de los tratamientos evaluados en la prueba de botella</i> | 48 |
| Tabla 21 <i>Resumen del desempeño de los tratamientos evaluados en el Thief Test</i> | 51 |

ÓXIDO DE GRAFENO COMO ROMPEDOR DE EMULSIONES

Lista de Figuras

| | |
|--|----|
| Figura 1 <i>Emulsiones Crudo-Agua</i> | 13 |
| Figura 2 <i>Tipos comunes de fenómenos de inestabilidad en emulsiones</i> | 14 |
| Figura 3 <i>Diagrama de trabajo para las pruebas de botella con ultrasonido</i> | 15 |
| Figura 4 <i>Clasificación de surfactantes</i> | 17 |
| Figura 5 <i>Óxido de grafeno</i> | 18 |
| Figura 6 <i>Muestra de crudo para prueba SARA</i> | 23 |
| Figura 7 <i>Gráfico de Procedimiento de la Prueba de Botella</i> | 24 |
| Figura 8 <i>Gráfico de Procedimiento de la Prueba Thief y BS&W</i> | 25 |
| Figura 9 <i>Gráfico de Procedimiento de la Prueba de compatibilidad</i> | 29 |
| Figura 10 <i>Gráfico de barras simples que muestra la contribución individual de cada fracción.</i> | 31 |
| Figura 11 <i>Gráfico radar que ilustra el equilibrio entre las fracciones SARA</i> | 31 |
| Figura 12 <i>Gráfica de recuperación de agua vs tiempo en la prueba de botella con el Óxido de Grafeno</i> | 35 |
| Figura 13 <i>Gráfica de barras para comparar el % total de agua separada en la prueba de botella con el Óxido de Grafeno</i> | 35 |
| Figura 14 <i>Gráfica de recuperación de agua vs tiempo en la prueba de botella con el Surfactante comercial</i> | 37 |
| Figura 15 <i>Gráfica de barras para comparar el % total de agua separada en la prueba de botella con el Surfactante comercial</i> | 37 |
| Figura 16 <i>Gráfica de recuperación de agua vs tiempo en la prueba de botella el Rompedor 1 ..</i> | 39 |
| Figura 17 <i>Gráfica de recuperación de agua vs tiempo en la prueba de botella con el Rompedor 1 en repetición</i> | 40 |
| Figura 18 <i>Gráfica de barras para comparar el % total de agua separada en la prueba de botella con el Rompedor 1</i> | 40 |
| Figura 19 <i>Gráfica de barras para comparar el % total de agua separada en la prueba de botella con el Rompedor 1 en repetición</i> | 41 |
| Figura 20 <i>Gráfica de recuperación de agua vs tiempo en la prueba de botella con la Mezcla 50/50</i> | 42 |
| Figura 21 <i>Gráfica de barras para comparar el % total de agua separada en la prueba de botella con la Mezcla 50/50</i> | 43 |

ÓXIDO DE GRAFENO COMO ROMPEDOR DE EMULSIONES

| | |
|--|-----|
| Figura 22 <i>Gráfica de radial para estado cualitativo en la prueba de botella con el Óxido de Grafeno</i> | 44 |
| Figura 23 <i>Gráfica de radial para estado cualitativo en la prueba de botella con el Surfactante Comercial</i> | 45 |
| Figura 24 <i>Gráfica de radial para estado cualitativo en la prueba de botella con el Rompedor 146</i> | 146 |
| Figura 25 <i>Gráfica de radial para estado cualitativo en la prueba de botella con el Rompedor 1 en su repetición</i> | 47 |
| Figura 26 <i>Gráfica de radial para estado cualitativo en la prueba de botella con la Mezcla 50/50</i> 47 | 47 |
| Figura 27 <i>Gráfica de recuperación de agua vs tiempo en la prueba de botella de la comparación de los surfactantes</i> | 49 |
| Figura 28 <i>Gráfica de barras para comparar el % total de agua separada en la prueba de botella de la comparación de los surfactantes</i> | 49 |
| Figura 29 <i>Gráfica de radial para estado cualitativo en la prueba de botella de la comparación de los surfactantes</i> | 49 |
| Figura 30 <i>Gráfica comparativa: Turbiedad vs. Concentración (por surfactante)</i> | 52 |
| Figura 31 <i>Gráfica comparativa: Sólidos Suspendidos vs. Concentración (por surfactante)</i> | 53 |
| Figura 32 <i>Resultado final de la prueba de compatibilidad para la proporción 25-75</i> | 55 |
| Figura 33 <i>Resultado final de la prueba de compatibilidad para la proporción 50-50</i> | 55 |
| Figura 34 <i>Resultado final de la prueba de compatibilidad para la proporción 75-25</i> | 56 |
| Figura 35 <i>Resultado final de la prueba de compatibilidad para todas las proporciones</i> | 56 |

ÓXIDO DE GRAFENO COMO ROMPEDOR DE EMULSIONES

Resumen

Evaluación del Óxido de Grafeno como Rompedor de Emulsiones en Crudo Pesado mediante pruebas de botella con análisis tipo Thief y BS&W.*

Stephanie Valentina Garcia Soto **

Palabras clave: Óxido de grafeno, emulsiones agua-crudo, desemulsificante, prueba de botella, ensayo tipo Thief, crudo pesado, compatibilidad fluido-fluido.

Descripción:

El presente trabajo evaluó el desempeño del óxido de grafeno como rompedor de emulsiones agua-crudo, comparándolo con un rompedor experimental, un rompedor comercial y una mezcla 50/50 de óxido de grafeno con surfactante compatible (EXP UIS). Las pruebas se realizaron mediante prueba de botella a 130 °F, analizando el volumen de agua separada, el comportamiento de la interfase y la calidad del agua obtenida. Adicionalmente, se realizó un ensayo tipo Thief para evaluar turbidez y sólidos suspendidos.

Los resultados mostraron que la mezcla 50/50 presentó el mejor desempeño global, alcanzando hasta 40 mL de agua separada a partir de un volumen inicial de 120 mL en 24 horas. El óxido de grafeno destacó por la limpieza del agua y estabilidad de la interfase, mientras que el rompedor experimental presentó la menor eficiencia.

Se concluyó que la selección de un rompedor debe considerar tanto el volumen de agua recuperada como la calidad de la fase acuosa. Finalmente, se realizó una prueba de compatibilidad basada en API RP 42 para el tratamiento más eficiente.

*Trabajo de grado

**Facultad de Ingenierías Fisicoquímicas – Escuela de Ingeniería de Petróleos – Magíster en Ingeniería de Petróleos y Gas Jimena Gómez.

ÓXIDO DE GRAFENO COMO ROMPEDOR DE EMULSIONES

Abstract

Evaluation of Graphene Oxide as an Emulsion Breaker in Heavy Crude Oil through Bottle Tests with Thief and BS&W Analysis. *

Stephanie Valentina Garcia Soto. **

Keywords: Graphene oxide, water-oil emulsions, emulsion breaker, bottle test, Thief Test, heavy crude oil, fluid-fluid compatibility.

Description:

This study evaluated graphene oxide as a water-oil emulsion breaker compared with an experimental breaker, a commercial breaker, and a 50/50 mixture of graphene oxide and surfactant (EXP UIS). Bottle tests were performed at 130 °F to analyze separated water volume, interphase behavior, and water quality. A Thief-type analysis was also conducted to evaluate turbidity and suspended solids.

The 50/50 mixture showed the best overall performance, reaching up to 40 mL of separated water from an initial 120 mL after 24 hours. Graphene oxide showed better water cleanliness and interphase stability, while the experimental breaker showed the lowest efficiency.

The results indicate that emulsion breaker selection should consider both separated water volume and aqueous phase quality. Finally, a compatibility test based on API RP 42 was performed for the best treatment.

*Degree Project

**Faculty of Physicochemical Engineering – School of Petroleum Engineering – Master's Degree in Oil and Gas Engineering Jimena Gómez.

ÓXIDO DE GRAFENO COMO ROMPEDOR DE EMULSIONES

Introducción

La producción de crudos pesados en Colombia se desarrolla en un contexto operativo complejo, donde la presencia de agua asociada y la formación de emulsiones agua-crudo constituyen uno de los principales retos para la industria petrolera. Estas emulsiones, estabilizadas por compuestos naturales como resinas y asfaltenos, dificultan la separación de fases, incrementan los costos de tratamiento y afectan la calidad del crudo para su transporte y comercialización. En este escenario, la evaluación de nuevas alternativas para el rompimiento de emulsiones, como el uso de nanomateriales tipo óxido de grafeno, resulta relevante como posible complemento a los métodos convencionales de desemulsificación.

En el primer capítulo se presenta el marco teórico que sustenta la investigación, abordando los fundamentos de las emulsiones crudo-agua, sus características de estabilidad, los principales métodos de desemulsificación y el papel de los surfactantes. Asimismo, se describen las propiedades generales del óxido de grafeno y su potencial aplicación en procesos interfaciales, junto con las bases del análisis SARA, la prueba de botella y las técnicas complementarias empleadas para la evaluación de la fase acuosa separada.

En el segundo capítulo se expone la metodología empleada, desarrollada bajo un enfoque experimental de carácter cuantitativo y cualitativo. Se detalla la preparación de emulsiones a partir de crudo y agua de producción del campo Apiay, la aplicación de diferentes rompedores en concentraciones definidas y la ejecución de pruebas de botella a temperatura controlada. Adicionalmente, se describen los procedimientos utilizados para evaluar la separación de fases, incluyendo el registro del volumen de agua recuperada, el análisis visual de la fase acuosa y la prueba de compatibilidad basada en la norma API RP 42.

ÓXIDO DE GRAFENO COMO ROMPEDOR DE EMULSIONES

En el tercer capítulo se presentan los resultados obtenidos y su análisis, incluyendo la caracterización del crudo mediante análisis SARA y la comparación del desempeño de los distintos rompedores evaluados. Se analizan tanto los resultados cuantitativos, relacionados con el volumen de agua separada en función del tiempo, como los resultados cualitativos asociados a la limpieza del agua, la definición de la interfase y la presencia de sólidos. Finalmente, en el último capítulo se presentan las conclusiones y recomendaciones derivadas del estudio, donde se sintetizan los principales hallazgos en relación con la eficiencia de los rompedores evaluados y se proponen lineamientos para su posible aplicación y para futuras investigaciones.

Los resultados obtenidos permiten concluir que la mezcla 50/50 de óxido de grafeno con el surfactante EXP UIS fue el agente con mayor eficiencia en la separación de agua, alcanzando 40 mL de agua libre a partir de 120 mL de emulsión en 24 horas, mientras que el óxido de grafeno individual destacó por la limpieza de la fase acuosa y la estabilidad de la interfase, aunque con un volumen recuperado de solo 7 mL. El rompedor comercial presentó un comportamiento intermedio y el Rompedor 1 fue el menos eficiente. Se concluye que la selección del rompedor más adecuado debe equilibrar el volumen de agua extraída y la calidad de la fase acuosa según las necesidades operativas. Como recomendación principal, se sugiere utilizar la mezcla 50/50 cuando se priorice la máxima recuperación de agua, y el óxido de grafeno puro cuando se requiera una fase acuosa de alta claridad. Para trabajos futuros, se recomienda ampliar el rango de concentraciones, caracterizar fisicoquímicamente el óxido de grafeno empleado, e incluir un análisis de costo-beneficio.

ÓXIDO DE GRAFENO COMO ROMPEDOR DE EMULSIONES

1. Objetivos

1.1. Objetivo General

Realizar una Evaluación del Óxido de Grafeno como Rompedor de Emulsiones en Crudo pesado mediante pruebas de botella con análisis del Thief y BS&W

1.2. Objetivos Específicos

- Caracterizar las propiedades fisicoquímicas del crudo pesado utilizado como muestra, estableciendo una referencia base para la evaluación de los rompedores de emulsiones.
- Realizar pruebas de rompimiento de emulsiones con los tres tipos de rompedores en distintas concentraciones, utilizando la técnica de prueba de botella.
- Realizar un análisis del Thief (Thin Film Oven Test) y un análisis BS&W (Basic Sediment and Water) para determinar la cantidad de asfaltenos, contenido de sedimentos y agua en las muestras de crudo tratadas.
- Analizar y comparar los resultados obtenidos, determinando cuál de los rompedores de emulsiones muestra la mayor eficacia en términos de separación y calidad del crudo recuperado.

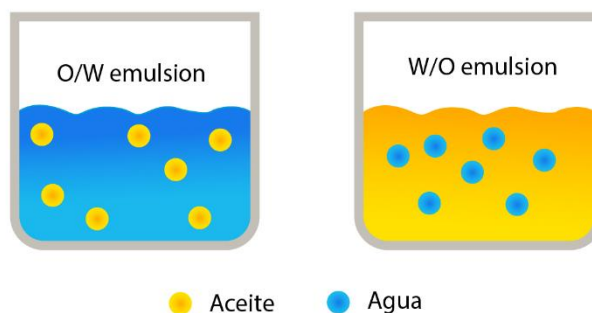
2. Marco teórico

2.1. Emulsión Crudo-Agua

Una emulsión Crudo-Agua o emulsión normal (W/O) es una mezcla compleja en la que el agua se dispersa en el petróleo crudo, en nuestro caso en el crudo pesado, generando grandes inconvenientes a la industria de los hidrocarburos. En esta mezcla el agua actúa como la fase dispersa y el crudo como la fase continua.

Figura 1

Emulsiones Crudo-Agua



Tomado de: Medición de pH en emulsiones asfálticas | HANNA Instruments Colombia. (n.d).
<https://www.hannacolombia.com/blog/post/719/medicion-ph-en-emulsiones-asfalticas>

2.2. Características Técnicas de la Emulsión Crudo-Agua

- 1) Composición: en las emulsiones la cantidad de agua puede variar, generalmente entre un 10% y un 35% en volumen para crudos pesados. (Delint, 2013) (Martínez, s. f.)
- 2) Tamaño de las gotas: en una emulsión Crudo-Agua las gotas de agua suelen tener un diámetro que varía entre 0,1 y 100 micrómetros. (Delint, 2013)
- 3) Estabilidad: dicha característica se ve influenciada por los siguientes factores:
 - Densidad y viscosidad del crudo: Las emulsiones mas densas y viscosas tienden a ser más estables.

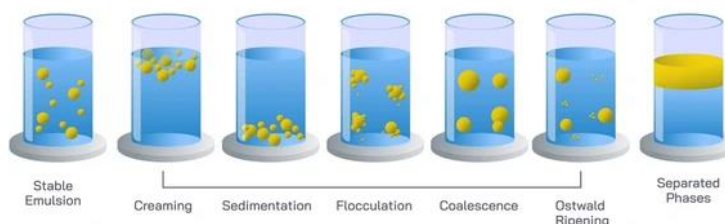
ÓXIDO DE GRAFENO COMO ROMPEDOR DE EMULSIONES

- Tensión Superficial: La interacción entre las fases afecta la formación y estabilidad de una emulsión.
- Concentración de asfaltenos y resinas: Estos compuestos actúan como surfactantes naturales, estabilizando las gotas de agua dentro del crudo. (Pájaro & Álvarez, 2014) (Martínez-Martín et al., n.d.)

4) Comportamiento Reológico: Este tipo de emulsiones pueden presentar propiedades no-newtonianas, donde su viscosidad depende de la tasa de deformación. (Pájaro & Álvarez, 2014) (Martínez-Martín et al., n.d.)

Figura 2

Tipos comunes de fenómenos de inestabilidad en emulsiones



Tomado de: 1.214 vectores de stock y arte vectorial de Componentes de una mezcla | Shutterstock. (n.d.).

Shutterstock. https://www.shutterstock.com/es/search/componentes-de-una-mezcla?image_type=vector

2.3. Importancia en la Industria Petrolera

Las emulsiones Crudo-Agua son problemáticas porque:

- Corrosión: el agua presente en la emulsión puede causar corrosión en las tuberías y equipos.
- Costos adicionales: para poder transportar por oleoducto el crudo y para poder venderlo primero se debe separar el agua emulsificador, lo cual es costoso.

ÓXIDO DE GRAFENO COMO ROMPEDOR DE EMULSIONES

- Eficiencia operativa: Las emulsiones de este tipo aumentan la viscosidad del fluido, dificultando su transporte y procesamiento. (Martínez, s. f.)

2.4. Métodos de Desemulsificación

Para separar el agua del crudo emulsionado, se utilizan diversas técnicas:

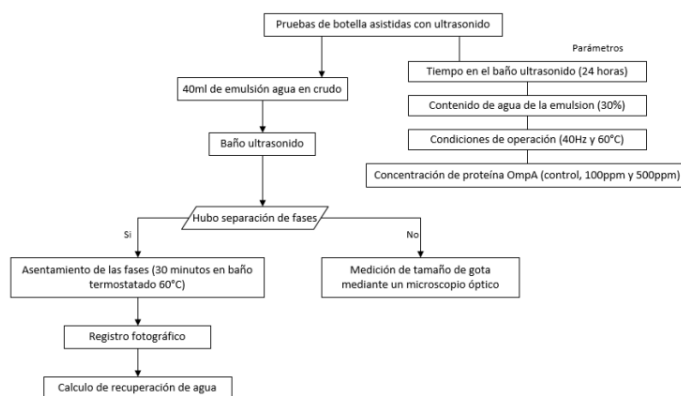
- Calentamiento: Reduce la viscosidad del crudo facilitando la separación.
- Uso de agentes desemulsificantes: Surfactantes que ayudan a romper las interacciones entre las gotas de agua.
- Métodos electrostáticos: Utilizan campos eléctricos para promover la coalescencia de las gotas. (Delint, 2013) (Martínez-Martín et al., n.d.)

2.5. Prueba de Botella

Procedimiento en el cual se agregan diferentes químicos a muestras de botella de una emulsión para determinar qué químico es más eficaz para romper o separar la emulsión en petróleo y agua. Una vez que se ha determinado el químico efectivo, se agregan cantidades variables a muestras de botella de la emulsión para determinar la cantidad mínima requerida para romper la emulsión de manera efectiva. (Smart Fluid, 2022)

Figura 3

Diagrama de trabajo para las pruebas de botella con ultrasonido



ÓXIDO DE GRAFENO COMO ROMPEDOR DE EMULSIONES

Tomado de: Martínez, A. (s. f.). Separación de emulsiones agua en crudo pesado: Estudio de un nuevo método para la recuperación de nanopartículas con OmpA inmovilizada.

2.6. Surfactante iónico

Un surfactante iónico es un tipo de tensioactivo que contiene iones en su estructura. Los surfactantes son compuestos que reducen la tensión superficial entre dos fases, como entre un líquido y un sólido o entre dos líquidos inmiscibles. (Padial, 2017)

Los surfactantes iónicos se dividen en dos categorías principales:

- 1) Surfactantes aniónicos: Tienen una cabeza hidrofílica con carga negativa. Ejemplos comunes incluyen sulfatos y sulfonatos, como el lauril sulfato de sodio. (Padial, 2017)
- 2) Surfactantes catiónicos: Tienen una cabeza hidrofílica con carga positiva. Estos se utilizan a menudo en productos como acondicionadores de cabello y desinfectantes. (Noguera & Noguera, 2020)

Estos surfactantes son ampliamente utilizados en la industria de limpieza, cosmética y farmacéutica debido a su capacidad para disolver grasas y aceites, facilitando la limpieza y emulsificación de sustancias. (Padial, 2017) (Noguera & Noguera, 2020)

2.7. Surfactante no iónico

Un surfactante no iónico es un tipo de agente tensioactivo que no contiene iones cargados en su estructura molecular. Estos surfactantes están compuestos por moléculas con una parte hidrófila (que atrae el agua) y una parte lipófila (que atrae las grasas), lo que les permite reducir la tensión superficial entre dos fases, como el agua y el aceite.

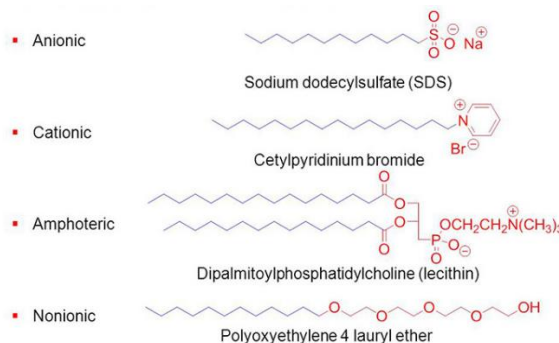
A diferencia de los surfactantes iónicos, los no iónicos no se disocian en iones cuando se disuelven en agua, lo que les confiere ciertas propiedades únicas. Son altamente compatibles con

ÓXIDO DE GRAFENO COMO ROMPEDOR DE EMULSIONES

otros tipos de surfactantes y con aguas duras, y se utilizan ampliamente en productos de limpieza, cosméticos y en la industria alimentaria debido a su capacidad para emulsionar, humectar y detergente. (Padial, 2017) (Noguera & Noguera, 2020)

Figura 4

Clasificación de surfactantes



Tomado de: Noguera, I. B., & Noguera, I. B. (2020, March 9). ¿Qué son los tensoactivos o surfactantes? Ingeniería Química Reviews. <https://www.ingenieriaquimicareviews.com/2020/09/tensoactivos-o-surfactantes.html>

2.8. Óxido de Grafeno

El óxido de grafeno (GO) es un nanomaterial derivado del grafito, formado por capas de carbono en una estructura bidimensional con grupos funcionales oxigenados, como carboxilos e hidroxilos. Estas propiedades le confieren una gran capacidad para interactuar con diferentes tipos de compuestos, lo que lo convierte en un material versátil en múltiples aplicaciones industriales, incluyendo la mejora de procesos de separación en sistemas complejos.

Una de las áreas donde el óxido de grafeno ha demostrado gran potencial es en el tratamiento de emulsiones crudo-agua. Las emulsiones de crudo pesado presentan un reto significativo para la industria debido a la dificultad de separar el agua del crudo, lo que puede afectar la eficiencia de producción. El óxido de grafeno mostró un desempeño intermedio en volumen de agua separada, pero superior en limpieza y estabilidad de la interfase. En este estudio,

ÓXIDO DE GRAFENO COMO ROMPEDOR DE EMULSIONES

la concentración de 700 ppm fue la de mejor rendimiento para este tratamiento. Este comportamiento podría explicarse, con base en la literatura, por su estructura bidimensional y la presencia de grupos funcionales oxigenados que favorecen interacciones interfaciales; sin embargo, dicha explicación debe entenderse como una hipótesis de interpretación y no como una verificación experimental directa.

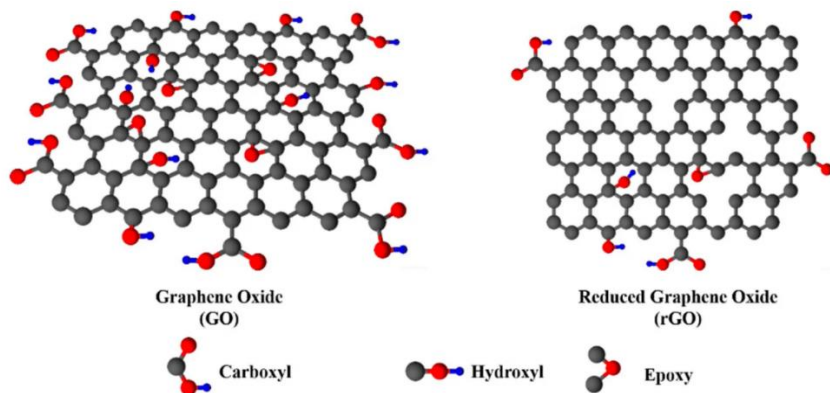
En términos prácticos, el GO evidenció una capacidad favorable para producir una fase acuosa visualmente más limpia, lo que sugiere un posible valor agregado cuando el criterio de selección no es únicamente el volumen recuperado sino la calidad del agua separada. Por tanto, el GO debe interpretarse como una alternativa prometedora, aunque su comportamiento en turbidez y sólidos suspendidos indica que aún requiere optimización antes de su aplicación en condiciones de campo.

Al dispersarse en soluciones, el óxido de grafeno interactúa con las emulsiones, rompiendo los enlaces superficiales que estabilizan las gotas de agua dentro del crudo. Su naturaleza nanométrica le permite penetrar eficazmente en las interfaces agua-crudo, promoviendo la desestabilización de la emulsión. Esto abre la posibilidad de usar GO como una solución más eficiente en el manejo de emulsiones difíciles, en comparación con los métodos químicos tradicionales. Además, su carácter químicamente adaptable permite ajustar sus propiedades para adaptarse a diferentes condiciones de operación, como variaciones en el pH o la salinidad de los sistemas petroleros. (Gómez et al., 2023)

Figura 5

Óxido de grafeno

ÓXIDO DE GRAFENO COMO ROMPEDOR DE EMULSIONES



Tomado de: Stroski, P. N. (2020, September 10). Graphene oxide and the reduced form. Electrical e-Library.com. <https://www.electricalibrary.com/en/2020/09/10/oxide-graphene-and-the-reduced-form/>

2.9. Test Thief

El Test Thief es una técnica utilizada en la industria petrolera para evaluar la eficiencia de la extracción de crudo en reservorios. Este método implica la recolección de muestras de petróleo a diferentes profundidades en un pozo, lo que permite analizar la composición y calidad del crudo extraído. La técnica es fundamental para determinar el contenido de agua y sedimentos (BS&W) en el crudo, así como para evaluar la efectividad de los tratamientos aplicados durante el proceso de producción. El análisis del Test Thief proporciona información crítica sobre el comportamiento del crudo en el reservorio y su respuesta a las técnicas de recuperación implementadas. Este método no solo ayuda a optimizar las operaciones de extracción, sino que también permite a los ingenieros tomar decisiones informadas sobre el uso de aditivos y tratamientos químicos para mejorar la calidad del crudo. La importancia del Test Thief radica en su capacidad para ofrecer datos precisos que pueden influir en las estrategias de producción y maximizar la recuperación de recursos. (Pájaro & Álvarez, 2014)

2.10. Prueba SARA

ÓXIDO DE GRAFENO COMO ROMPEDOR DE EMULSIONES

La Prueba SARA (Saturados, Aromáticos, Resinas y Asfaltenos) es un método analítico utilizado para caracterizar la composición química del petróleo. Esta prueba clasifica los componentes del crudo en cuatro fracciones principales: saturados, que son hidrocarburos alifáticos; aromáticos, que incluyen compuestos cíclicos; resinas, que son compuestos polares; y asfaltenos, que son moléculas más grandes y complejas. La caracterización mediante la prueba SARA es crucial para entender cómo cada componente afecta las propiedades físicas y químicas del crudo. La información obtenida a través de la prueba SARA permite a los ingenieros evaluar la estabilidad del crudo y su comportamiento durante los procesos de producción y refinación. Además, esta prueba ayuda a identificar problemas potenciales relacionados con la corrosión, la formación de emulsiones y la eficiencia en el transporte del crudo. La capacidad de discriminar entre las diferentes fracciones también es esencial para optimizar los métodos de procesamiento y mejorar la calidad del producto final. (Pájaro & Álvarez, 2014).

3. Metodología

En el presente estudio se evaluaron diferentes agentes rompedores de emulsión con el objetivo de analizar su desempeño en la separación de emulsiones crudo-agua. Los agentes denominados en este trabajo como “Rompedor 1” y “EXP UIS” fueron suministrados por la empresa Halliburton y se identificaron mediante estas denominaciones con fines de diferenciación durante el desarrollo experimental. Adicionalmente, se evaluó el óxido de grafeno (GO) como agente individual, así como una mezcla de GO con el agente “EXP UIS” en proporción 50/50.

Debido a acuerdos de confidencialidad y a la naturaleza del suministro de los productos, no se dispone de información detallada sobre la composición química, formulación específica o familia química de los agentes “Rompedor 1” y “EXP UIS”. Por esta razón, ambos se presentan bajo denominaciones genéricas a lo largo del documento. Esta limitación restringe parcialmente la

ÓXIDO DE GRAFENO COMO ROMPEDOR DE EMULSIONES

reproducibilidad química exacta del estudio; sin embargo, no impide la comparación experimental de su desempeño bajo condiciones controladas de laboratorio, ni invalida las tendencias observadas en el proceso de rompimiento de emulsiones crudo-agua.

Es importante señalar que esta limitación restringe parcialmente la reproducibilidad del estudio en términos de formulación química; sin embargo, los resultados obtenidos conservan validez para el análisis comparativo entre los agentes evaluados y permiten identificar tendencias relevantes en el proceso de rompimiento de emulsiones crudo-agua.

3.1. Tipo de investigación

Este trabajo corresponde a una investigación mixta de tipo cuantitativa y cualitativa, con enfoque experimental. Se busca evaluar la efectividad de distintos rompedores de emulsiones agua-crudo pesado, considerando tanto la cantidad de agua recuperada (cuantitativa), como la apariencia de las fases separadas (cualitativa), bajo condiciones controladas de laboratorio.

3.2. Materiales utilizados

En esta investigación se emplearon diferentes reactivos, materiales y equipos, los cuales se detallan en la siguiente tabla.

Tabla 1.

Materiales, reactivos y equipos utilizados en la investigación.

| Reactivos y muestras: | |
|------------------------------|--------------------------------|
| Crudo pesado | Proveniente del campo Apiay. |
| Agua de producción | Agua real del campo Apiay. |
| Rompedor experimental | Identificado como Rompedor 1. |
| Sodium Lauryl Sulphate (99%) | Rompedor comercial. |
| Óxido de grafeno (GO) | Material nanométrico evaluado. |

ÓXIDO DE GRAFENO COMO ROMPEDOR DE EMULSIONES

| | |
|--------------|---|
| Mezcla 50/50 | Óxido de grafeno y surfactante EXP UIS en proporciones iguales. |
|--------------|---|

| | |
|---------------|---|
| Rompedor BS&W | Reactivo para determinación de agua y sedimentos. |
|---------------|---|

Materiales de laboratorio:

| | |
|--------------------|-------------------------------------|
| Botellas de prueba | Utilizadas para pruebas de botella. |
|--------------------|-------------------------------------|

| | |
|--------------|-----------------------|
| Papel filtro | Grado de laboratorio. |
|--------------|-----------------------|

| | |
|--------------|---------|
| Botella Shot | Vidrio. |
|--------------|---------|

| | |
|------------------|------------------|
| Embudo de vidrio | Para filtración. |
|------------------|------------------|

| | |
|---------------------------|------------------------|
| Filtro con bomba de vacío | Sistema de separación. |
|---------------------------|------------------------|

| | |
|--------------------|-----------------------------|
| Matraz volumétrico | Vidrio, varias capacidades. |
|--------------------|-----------------------------|

| | |
|-------------------|---------------------|
| Vasos de aluminio | Para calentamiento. |
|-------------------|---------------------|

| | |
|-------------------|-----------------------------|
| Cilindro graduado | Vidrio, varias capacidades. |
|-------------------|-----------------------------|

Equipos:

| | |
|------------|---|
| Centrífuga | Equipo de laboratorio para separación de fases. |
|------------|---|

| | |
|--------------|-------------------------|
| Baño térmico | Control de temperatura. |
|--------------|-------------------------|

| | |
|-------|---|
| Horno | De laboratorio, control de temperatura. |
|-------|---|

| | |
|-------------|--|
| Micropipeta | Equipo de medición volumétrica de precisión. |
|-------------|--|

| | |
|----------|--|
| Agitador | Mecánico/eléctrico para homogenización de mezclas. |
|----------|--|

| | |
|-------------|---|
| Velocímetro | Equipo de medición de velocidad de agitación. |
|-------------|---|

Fuente: Elaboración propia.

3.3. Caracterización del crudo

Con el fin de conocer la composición química del crudo utilizado en este estudio, se solicitó la realización de la prueba SARA (Saturados, Aromáticos, Resinas y Asfaltenos) en el laboratorio de Cromatografía y Espectrometría de Masas del Parque Tecnológico Guatiguará. Este análisis permitió identificar las principales familias de hidrocarburos presentes en la muestra de crudo proveniente del pozo APIAY 14, evidenciando la proporción relativa de cada fracción.

ÓXIDO DE GRAFENO COMO ROMPEDOR DE EMULSIONES

Aunque los resultados del análisis SARA no se emplearon de manera directa en la etapa comparativa de desempeño de los surfactantes, sí resultaron fundamentales para comprender el comportamiento del sistema emulsionado. La información obtenida permitió anticipar la posible estabilidad de las emulsiones en función del contenido de resinas y asfaltenos, así como interpretar la respuesta del crudo frente a los diferentes rompedores evaluados. De este modo, el análisis SARA se constituye en una herramienta complementaria que enriquece la caracterización inicial del fluido, proporcionando una base sólida para explicar, desde un punto de vista composicional, los resultados obtenidos en las pruebas de separación de fases.

Figura 6

Muestra de crudo para prueba SARA



Fuente: Elaboración propia.

3.4. Prueba de Botella

La prueba de botella constituye uno de los métodos más utilizados en la industria petrolera para evaluar la eficiencia de rompedores de emulsión bajo condiciones controladas de laboratorio. Este procedimiento busca simular de manera simplificada las condiciones presentes en los campos productores, permitiendo medir la capacidad de separación de agua en emulsiones formadas con

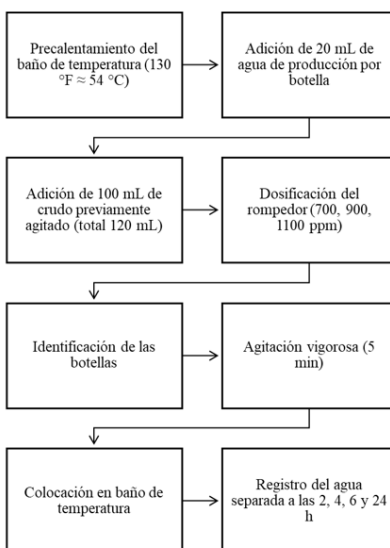
ÓXIDO DE GRAFENO COMO ROMPEDOR DE EMULSIONES

crudos pesados y agua de producción. En este caso, se trabajó con crudo y agua del campo Apiay, preparando mezclas en proporciones definidas y adicionando diferentes rompedores en concentraciones variables. El ensayo permitió cuantificar el volumen de agua liberada a lo largo del tiempo, proporcionando información comparativa y objetiva sobre la efectividad de cada aditivo.

El procedimiento consistió en la preparación de botellas de prueba con 20 mL de agua de producción y 100 mL de crudo previamente agitado, a las cuales se les adicionaron los rompedores en concentraciones de 700, 900 y 1100 ppm. Luego de un proceso de agitación vigorosa para garantizar homogeneidad, las botellas se colocaron en un baño térmico a 54 °C, donde permanecieron durante el tiempo de evaluación. Posteriormente, se registró la cantidad de agua separada a intervalos de 2, 4, 6 y 24 horas, lo que permitió determinar la eficiencia relativa de los rompedores. Esta prueba constituyó la base para la selección preliminar del rompedor más efectivo. La secuencia metodológica de este procedimiento se resume esquemáticamente en la Figura 7.

Figura 7

Gráfico de Procedimiento de la Prueba de Botella



ÓXIDO DE GRAFENO COMO ROMPEDOR DE EMULSIONES

Fuente: Elaboración propia.

3.5. Prueba Thief y BS&W

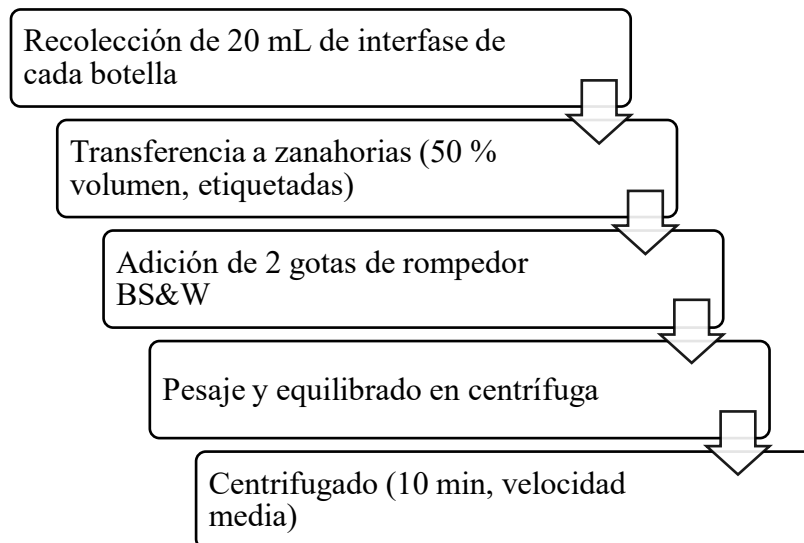
Con el fin de complementar la información obtenida en las pruebas de botella y evaluar la calidad de la fase acuosa separada, se realizaron pruebas Thief y BS&W. En este trabajo, el ensayo tipo Thief se empleó como una adaptación de laboratorio para analizar el comportamiento del agua separada después del tratamiento, a diferencia de su uso convencional en campo para la toma de muestras a diferentes profundidades en un pozo. Esta adaptación permitió valorar de manera comparativa la turbidez y la presencia de sólidos suspendidos en la fase acuosa obtenida tras la acción de cada rompedor.

El procedimiento consistió en la recolección de 20 mL de la interfase obtenida en cada botella, los cuales se transfirieron a tubos tipo zanahoria previamente etiquetados. El volumen de muestra se ajustó al 50% de la capacidad de cada tubo, dejando el volumen restante vacío. A cada muestra se le adicionaron dos gotas de rompedor BS&W y, posteriormente, se sometieron a centrifugación durante 10 minutos a velocidad media, asegurando el balance de masas en el equipo. Una vez finalizado este proceso, se extrajeron las muestras y se registraron los datos obtenidos, incluyendo la separación de fases y la proporción de agua remanente. De esta manera, las pruebas Thief y BS&W proporcionaron una verificación complementaria del desempeño de los rompedores previamente evaluados en la prueba de botella.

Figura 8

Gráfico de Procedimiento de la Prueba Thief y BS&W

ÓXIDO DE GRAFENO COMO ROMPEDOR DE EMULSIONES



Fuente: Elaboración propia.

3.6. Evaluación cualitativa y cuantitativa

Luego de las pruebas anteriores, se realizó un análisis con base en el porcentaje de ruptura, entendido como el volumen de agua libre recuperada en la prueba de botella y como la calidad de la fase acuosa en el ensayo tipo Thief. Asimismo, se evaluó el estado visual del fluido considerando turbidez, limpieza de paredes del frasco y apariencia de la interfase en la prueba de botella, así como turbiedad y sólidos suspendidos en el ensayo tipo Thief.

La clasificación visual utilizada fue construida a partir de criterios internos de observación del equipo de laboratorio y se aplicó como herramienta de apoyo para la comparación entre tratamientos. Es importante señalar que las escalas empleadas en la prueba de botella y en el ensayo tipo Thief responden a criterios diferentes y, por tanto, no son directamente comparables. En la prueba de botella, la valoración cualitativa se enfoca en aspectos visuales globales de la emulsión, como la limpieza del agua, la definición de la interfase y la apariencia general del sistema, empleando una escala simplificada de 1 a 3. Por su parte, el ensayo tipo Thief evalúa específicamente la calidad de la fase acuosa separada mediante parámetros más definidos, como

ÓXIDO DE GRAFENO COMO ROMPEDOR DE EMULSIONES

la turbidez y el contenido de sólidos suspendidos, utilizando una escala de 1 a 5 para permitir mayor discriminación entre resultados.

Tabla 2

Escala Visual para la descripción del agua recuperada, paredes de la botella y definición de la interfase en la prueba de botella.

| | Limpieza | Interfase |
|--------------|--------------------|------------------|
| Nivel | Descripción | |
| 1 | Sucia | Mala |
| 2 | Regular | Regular |
| 3 | Limpia | Definida |

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3

Escala Visual para la descripción del agua recuperada y los sólidos suspendidos en el Thief Test.

| | Turbiedad | Sólidos Suspendidos |
|--------------|--------------------|----------------------------|
| Nivel | Descripción | |
| 1 | Cristalina | Ninguno |
| 2 | Ligeramente turbia | Trazas |
| 3 | Turbia | Trazas y dispersas |
| 4 | Bastante turbia | Significativos |
| 5 | Muy turbia | Muchos y compactos |

Fuente: Elaboración propia.

Nota: La asignación de valores en la escala cualitativa se realizó con base en la observación visual del sistema, siguiendo criterios comparativos internos del estudio.

ÓXIDO DE GRAFENO COMO ROMPEDOR DE EMULSIONES

Es importante señalar que las escalas utilizadas en la prueba de botella y en el ensayo tipo Thief responden a criterios de evaluación diferentes, por lo que no son directamente comparables. En la prueba de botella, la valoración cualitativa se enfoca en aspectos visuales globales de la emulsión, como la limpieza del agua, la definición de la interfase y la apariencia general del sistema, empleando una escala simplificada de 1 a 3. Por su parte, el ensayo tipo Thief evalúa específicamente la calidad de la fase acuosa separada mediante parámetros más definidos, como la turbiedad y el contenido de sólidos suspendidos, utilizando una escala de 1 a 5 para permitir una mayor discriminación entre resultados. En este sentido, ambas escalas se consideran complementarias dentro del análisis integral del desempeño de los rompedores.

3.7. Prueba de compatibilidad (API RP 42, secciones 1 a 16)

Una vez identificado el rompedor más eficiente en las pruebas anteriores, se procedió a realizar la prueba de compatibilidad siguiendo la metodología descrita en la norma API RP 42. Este procedimiento tuvo como finalidad determinar la estabilidad de los sistemas agua-crudo en presencia del rompedor seleccionado, en distintas proporciones de mezcla y bajo condiciones controladas de laboratorio. La prueba permitió establecer si el rompedor, además de ser eficiente en la ruptura de emulsiones, mantenía un comportamiento estable al interactuar con diferentes proporciones de crudo y agua, evitando fenómenos de inestabilidad o incompatibilidad que pudieran comprometer su aplicación en campo.

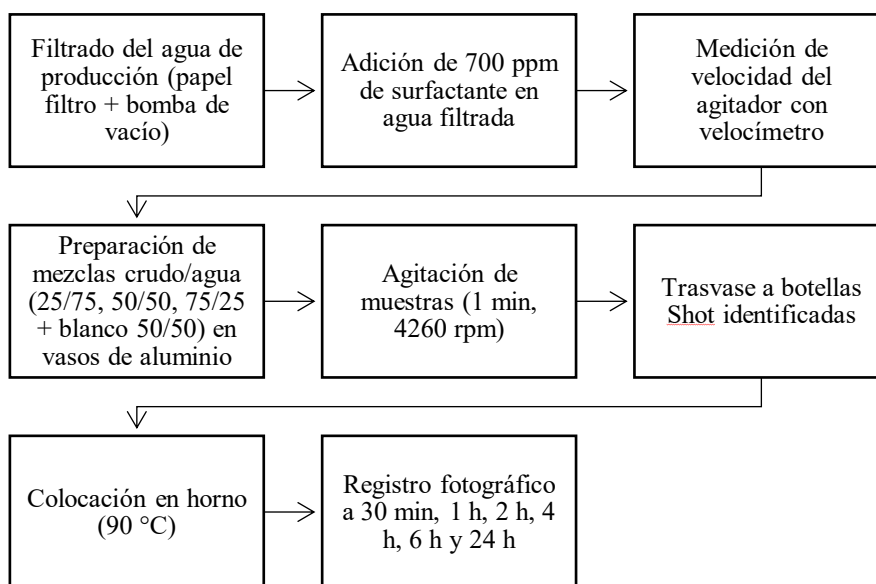
El procedimiento incluyó el filtrado previo del agua de producción mediante papel filtro y bomba de vacío, seguido de la adición de 700 ppm del rompedor seleccionado (mezcla 50/50) en el agua tratada. Posteriormente, se prepararon mezclas en vasos de aluminio con proporciones de 25/75, 50/50 y 75/25 de crudo-agua, además de una muestra en blanco en proporción 50/50 sin aditivo. Estas mezclas se agitaron durante un minuto a una velocidad aproximada de 4260 rpm y

ÓXIDO DE GRAFENO COMO ROMPEDOR DE EMULSIONES

luego se transfirieron a botellas tipo Shot debidamente identificadas. Finalmente, las muestras fueron almacenadas en un horno a 90 °C y se retiraron en intervalos de 30 minutos, 1, 2, 4, 6 y 24 horas para su análisis visual y registro fotográfico. De este modo, fue posible evaluar la compatibilidad del rompedor bajo condiciones variables y simular escenarios representativos del comportamiento en campo. La metodología seguida se esquematiza en la Figura 9.

Figura 9

Gráfico de Procedimiento de la Prueba de compatibilidad



Fuente: Elaboración propia.

4. Resultados y discusión

4.1. Caracterización de crudo en base a análisis SARA.

El análisis SARA permitió identificar la composición química del crudo pesado utilizado en este estudio, proporcionando información clave para interpretar su comportamiento durante las pruebas de desemulsificación.

El crudo del pozo APIAY 14 presentó la siguiente distribución de fracciones:

ÓXIDO DE GRAFENO COMO ROMPEDOR DE EMULSIONES

- Saturados: 36.7%
- Aromáticos: 10.9%
- Resinas: 14.4%
- Asfaltenos: 6.0%
- Volátiles: 32.0%

Estos resultados indican que el crudo posee un contenido considerable de saturados y volátiles, lo cual puede favorecer la movilidad del fluido y facilitar la separación de fases. El contenido de asfaltenos (6.0%) es moderado, lo que sugiere que la emulsión generada no es extremadamente estable, permitiendo que los rompedores de emulsiones puedan actuar con mayor eficiencia. Por otro lado, la presencia de resinas (14.4%) contribuye a la estabilidad interfacial, pero sin llegar a niveles que dificulten significativamente el rompimiento de la emulsión.

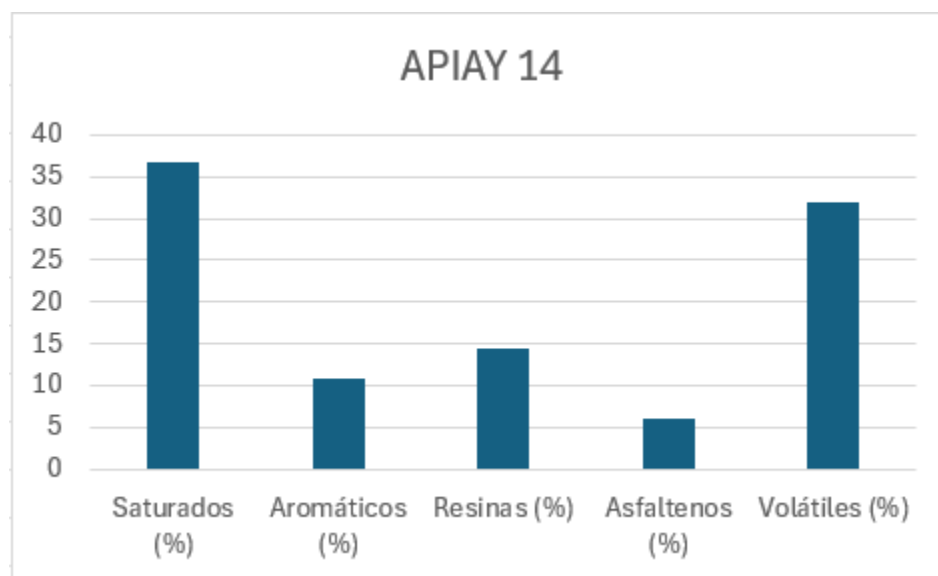
Este perfil composicional justifica los resultados obtenidos en las pruebas de botella y en el análisis Thief, donde se observó que la mezcla 50/50 y el óxido de grafeno lograron un desempeño sobresaliente. La moderada cantidad de asfaltenos y resinas presentes en el crudo favoreció la acción de los rompedores, permitiendo la recuperación eficiente de agua en un tiempo relativamente corto.

La Figura 10 presenta la composición porcentual de las fracciones SARA mediante un gráfico de barras simples, lo cual permite comparar de manera directa la proporción de cada componente presente en el crudo del pozo APIAY 14. Asimismo, la Figura 11 muestra el perfil composicional en un gráfico radar, facilitando la interpretación visual del equilibrio entre las diferentes fracciones.

ÓXIDO DE GRAFENO COMO ROMPEDOR DE EMULSIONES

Figura 10

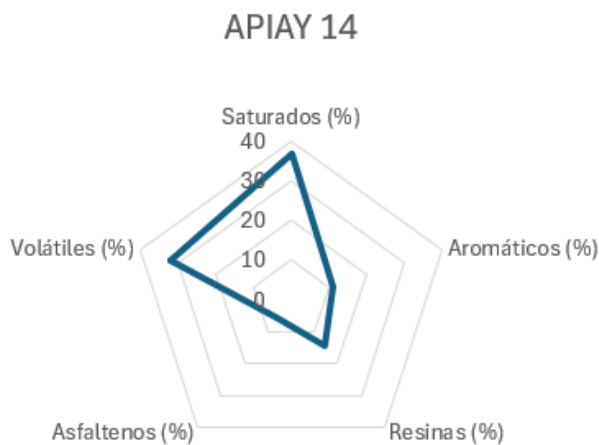
Gráfico de barras simples que muestra la contribución individual de cada fracción, permitiendo identificar cuáles son más abundantes y cuáles se encuentran en menor proporción.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 11

Gráfico radar que ilustra el equilibrio entre las fracciones SARA, resaltando la predominancia de saturados y volátiles frente al contenido moderado de aromáticos, resinas y asfaltenos.



Fuente: Elaboración propia.

ÓXIDO DE GRAFENO COMO ROMPEDOR DE EMULSIONES

El análisis composicional SARA del crudo muestra que las fracciones saturados, aromáticos, resinas y asfaltenos desempeñan un papel clave en la estabilidad de las emulsiones de crudo. En particular, la presencia moderada de asfaltenos (6.0%) y resinas (14.4%) contribuye a la persistencia de emulsiones estables debido a que estas fracciones polares se adsorben en la interfase agua-crudo, formando películas viscoelásticas que estabilizan la emulsión al reducir la coalescencia de gotas (Kilpatrick, 2012; Peña Alarcón et al., 2021).

Estas películas interfaciales, compuestas principalmente por asfaltenos y resinas, son conocidas por ser viscoelásticas y capaces de generar una barrera mecánica que estabiliza la emulsión bajo condiciones comunes, pero no tan rígidas como para evitar completamente la acción de rompedores si no se supera un umbral crítico de asfaltenos, generalmente superior al 10% (Kilpatrick, 2012; Peña Alarcón et al., 2021).

El óxido de grafeno (GO) actúa como un rompedor efectivo en este contexto debido a su estructura bidimensional con múltiples grupos oxigenados funcionales ($-OH$, $-COOH$, epóxidos) que permiten interacciones específicas de enlace de hidrógeno y atracciones electrostáticas con resinas y asfaltenos adsorbidos en la interfase, debilitando dicha capa interfacial y facilitando el rompimiento de la emulsión (Pájaro & Álvarez, 2014; Peña Alarcón et al., 2021). Esto explica por qué el GO produjo fases acuosas más limpias y estables, aunque no liberara el mayor volumen de agua.

La caracterización SARA ayuda no solo a describir la naturaleza química del crudo, sino que fundamenta la selección de rompedores más adecuados, en este caso favoreciendo aquellos capaces de interactuar con compuestos polares, como es el caso de nanomateriales tipo GO.

4.2. Comparación general de rompedores

ÓXIDO DE GRAFENO COMO ROMPEDOR DE EMULSIONES

Se evaluaron cinco tratamientos: Rompedor 1, su repetición, un rompedor comercial, óxido de grafeno (GO) y una mezcla 50/50 entre GO y EXP UIS. Los parámetros evaluados incluyeron la cantidad de agua recuperada, la calidad visual del agua separada y el comportamiento de la interfase, tanto en la prueba de botella como en la prueba Thief. Para facilitar la comparación, la Tabla 4 resume los principales resultados obtenidos, incluyendo el volumen de agua recuperada a 24 horas, la concentración óptima, la evaluación cualitativa en la prueba de botella, los resultados del ensayo tipo Thief y la compatibilidad.

A partir de esta comparación, se observa que la mezcla 50/50 presenta el mejor desempeño en términos de volumen de agua separada, mientras que el óxido de grafeno destaca en la calidad del agua obtenida. En consecuencia, la selección del rompedor más adecuado depende del criterio operativo priorizado, ya sea maximizar el volumen de agua libre o mejorar la calidad visual y física de la fase acuosa separada.

Tabla 4

Resumen comparativo del desempeño de los rompedores evaluados

| Tratamiento | Concentración óptima (ppm) | Agua separada (mL, 24h) | Calidad visual (botella) | Turbiedad (Thief) | Sólidos (Thief) | Compatibilidad |
|-------------------------|----------------------------|-------------------------|--------------------------|-------------------|-----------------|----------------|
| Óxido de grafeno (OG) | 700 | 7 | Alta | 5.0 | 1.5 | No evaluado |
| Surfactante comercial | 900 | 7 | Media | 4.75 | 1.5 | No evaluado |
| Rompedor 1 | 700 | 6 | Media | 5.0 | 3 | No evaluado |
| Rompedor 1 (repetición) | 700 | 5 | Media | 4.33 | 2 | No evaluado |
| Mezcla 50/50 | 700 | 40 | Baja | 2.0 | 1.0 | Compatible |

Fuente: Elaboración propia.

Para facilitar la comparación entre los tratamientos evaluados, en la Tabla 4 se resumen los principales resultados obtenidos, incluyendo el volumen de agua recuperada a 24 horas, la

ÓXIDO DE GRAFENO COMO ROMPEDOR DE EMULSIONES

concentración óptima, la evaluación cualitativa en la prueba de botella, los resultados del ensayo tipo Thief y la compatibilidad. Esta tabla permite visualizar de manera conjunta el desempeño de cada rompedor.

4.3. Desempeño por rompedor en la prueba de botella

Con el fin de garantizar la trazabilidad de los resultados obtenidos en la prueba de botella, a continuación, se presentan las tablas de datos crudos correspondientes a cada uno de los agentes evaluados. Estos datos constituyen la base para la elaboración de las figuras y el análisis desarrollado en esta sección.

- Óxido de grafeno (OG): Buen comportamiento general. Logró extracción de agua aceptable y destacó en la estabilidad de la interfase y limpieza del agua separada. No fue el que más volumen recuperó, pero sí tuvo alta calidad visual. Siendo 700 ppm la concentración con mayor rendimiento, como se presenta en las figuras 12 y 13.

Tabla 5

Resultados de recuperación de agua en función del tiempo para el óxido de grafeno en la prueba de botella

| Tiempo (h) | Frasco 1 - 700 ppm (mL) | Frasco 2 - 900 ppm (mL) | Frasco 3 - 1100 ppm (mL) |
|------------|-------------------------------|-------------------------------|--------------------------------|
| 2 | 5 | 2 | 2 |
| 4 | 5 | 2 | 2 |
| 6 | 6 | 3 | 2 |
| 24 | 7 | 3 | 2 |

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 6

Resultados de recuperación de agua separada para el óxido de grafeno a diferentes concentraciones en la prueba de botella

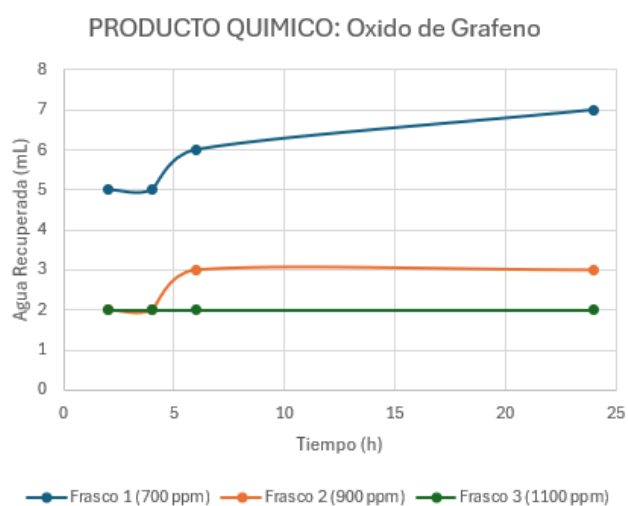
ÓXIDO DE GRAFENO COMO ROMPEDOR DE EMULSIONES

| Frasco | Agua Recuperada (mL) |
|--------------|----------------------|
| 1 (700 ppm) | 7 |
| 2 (900 ppm) | 3 |
| 3 (1100 ppm) | 2 |

Fuente: Elaboración propia.

Figura 12

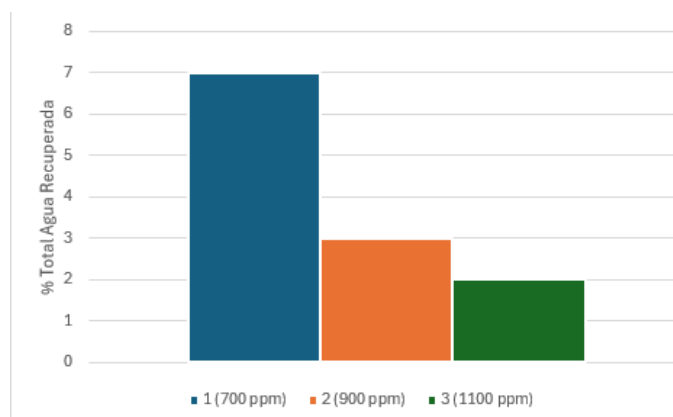
Gráfica de recuperación de agua vs tiempo en la prueba de botella con el Óxido de Grafeno



Fuente: Elaboración propia a partir de resultados de laboratorio

Figura 13

Gráfica de barras para comparar el % total de agua separada en la prueba de botella con el Óxido de Grafeno



Fuente: Elaboración propia a partir de resultados de laboratorio

ÓXIDO DE GRAFENO COMO ROMPEDOR DE EMULSIONES

El GO mostró un desempeño intermedio en volumen de agua separada, pero superior en limpieza. Este comportamiento podría explicarse por sus propiedades como nanomaterial bidimensional, ya que sus láminas presentan una elevada área superficial y grupos funcionales que podrían adsorberse en la interfase. De acuerdo con la literatura, este tipo de interacción favorece la reducción de la tensión interfacial y la coalescencia de gotas finas de agua en gotas de mayor tamaño, facilitando su separación por gravedad (Pájaro & Álvarez, 2014). En este sentido, se sugiere que el GO podría actuar de manera localizada sobre zonas inestables de la interfase, desplazando parcialmente a los compuestos naturales que estabilizan la emulsión (Kilpatrick, 2012).

- **Surfactante comercial:** este surfactante no tuvo la mejor eficiencia en comparación con los demás, extrajo hasta 7 mL a 24 h con 900 ppm, pero tuvo paredes limpias y buena apariencia visual del agua después de la prueba de botella, como se puede evidenciar en las figuras 14 y 15.

Tabla 7

Resultados de recuperación de agua en función del tiempo para el surfactante comercial en la prueba de botella

| Tiempo (h) | Frasco 1 - 700 ppm (mL) | Frasco 2 - 900 ppm (mL) | Frasco 3 - 1100 ppm (mL) |
|-------------------|--|--|---|
| 2 | 1 | 4 | 2 |
| 4 | 2 | 5 | 2 |
| 6 | 3 | 6 | 3 |
| 24 | 3 | 7 | 3 |

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 8

Resultados de recuperación de agua separada para el surfactante comercial a diferentes concentraciones en la prueba de botella

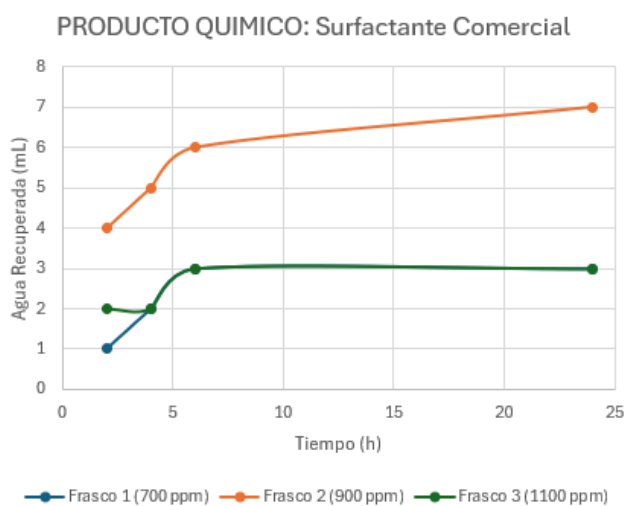
ÓXIDO DE GRAFENO COMO ROMPEDOR DE EMULSIONES

| Frasco | Agua Recuperada (mL) |
|--------------|----------------------|
| 1 (700 ppm) | 3 |
| 2 (900 ppm) | 7 |
| 3 (1100 ppm) | 3 |

Fuente: Elaboración propia.

Figura 14

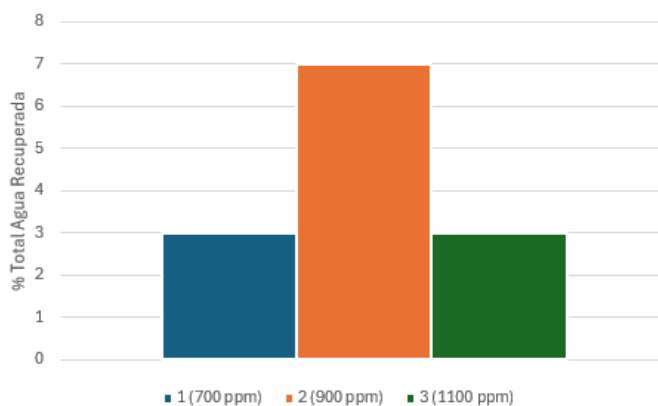
Gráfica de recuperación de agua vs tiempo en la prueba de botella con el Surfactante comercial



Fuente: Elaboración propia a partir de resultados de laboratorio

Figura 15

Gráfica de barras para comparar el % total de agua separada en la prueba de botella con el Surfactante comercial



ÓXIDO DE GRAFENO COMO ROMPEDOR DE EMULSIONES

Fuente: Elaboración propia a partir de resultados de laboratorio

El surfactante sintético mostró la capacidad de separar un volumen moderado de agua, posiblemente debido a su acción en la reducción de la tensión interfacial global, lo cual facilita la ruptura inicial de la emulsión (Schramm, 1992). Sin embargo, al no evidenciarse una afinidad específica por resinas y asfaltenos, podría no lograr un desplazamiento completo de la capa interfacial. Esto podría explicar por qué el volumen recuperado fue menor en comparación con la mezcla 50/50, aunque la fase acuosa presentó una apariencia relativamente clara. Esta condición podría estar asociada a la formación de micelas por parte del surfactante, las cuales pueden retener parte de los sólidos dispersos y contribuir a una menor turbidez observable (Tadros, 2013).

- Rompedor 1: Mostró la menor eficiencia con respecto a todos los demás rompedores de emulsiones, incluso al momento de la repetición de la prueba, que se realizó con la intención de comprobar este resultado, con máximo de 6 mL (700 ppm) en la prueba inicial y 5 mL en la repetición. Aunque cabe destacar que la calidad visual del agua fue aceptable, como puede evidenciarse en las figuras 16, 17, 18 y 19.

Tabla 9

Resultados de recuperación de agua en función del tiempo para el rompedor 1 en la prueba de botella

| Tiempo (h) | Frasco 1 - 700 ppm (mL) | Frasco 2 - 900 ppm (mL) | Frasco 3 - 1100 ppm (mL) | Frasco 4 - 0 ppm (mL) |
|------------|-------------------------------|-------------------------------|--------------------------------|--------------------------|
| 2 | 5 | 2 | 1,5 | 2 |
| 4 | 5 | 2,5 | 2 | 2,5 |
| 6 | 5 | 3 | 2 | 2,5 |
| 24 | 6 | 3 | 3 | 3 |

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 10

ÓXIDO DE GRAFENO COMO ROMPEDOR DE EMULSIONES

Resultados de recuperación de agua en función del tiempo para el rompedor 1 en repetición en la prueba de botella

| Tiempo (h) | Frasco 1 - 700 ppm (mL) | Frasco 2 - 900 ppm (mL) | Frasco 3 - 1100 ppm (mL) |
|------------|-------------------------------|-------------------------------|--------------------------------|
| 2 | 2,5 | 2 | 2,5 |
| 4 | 2,5 | 2,5 | 2,5 |
| 6 | 2,5 | 2,5 | 2,5 |
| 24 | 5 | 2,5 | 2,5 |

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 11

Resultados de recuperación de agua separada para el rompedor 1 a diferentes concentraciones en la prueba de botella

| Frasco | Agua Recuperada (mL) |
|--------------|----------------------------|
| 1 (700 ppm) | 6 |
| 2 (900 ppm) | 3 |
| 3 (1100 ppm) | 3 |
| 4 (0 ppm) | 3 |

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 12

Resultados de recuperación de agua separada para el rompedor 1 en repetición a diferentes concentraciones en la prueba de botella

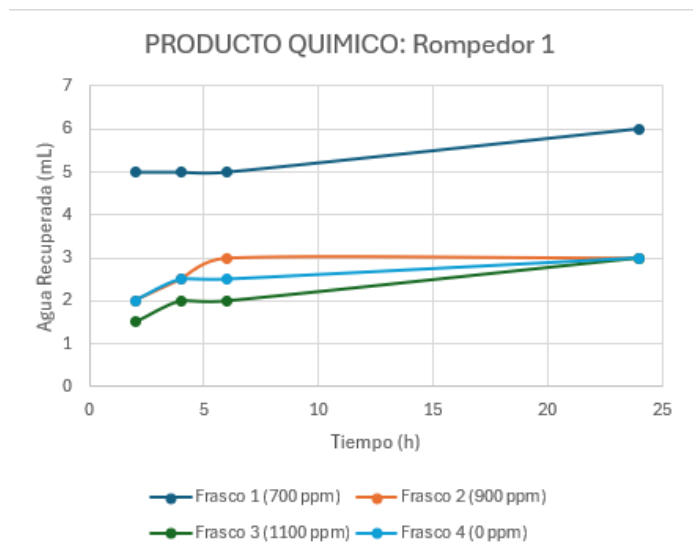
| Frasco | Agua Recuperada (mL) |
|--------------|----------------------------|
| 1 (700 ppm) | 5 |
| 2 (900 ppm) | 2,5 |
| 3 (1100 ppm) | 2,5 |

Fuente: Elaboración propia.

Figura 16

Gráfica de recuperación de agua vs tiempo en la prueba de botella con el Rompedor 1

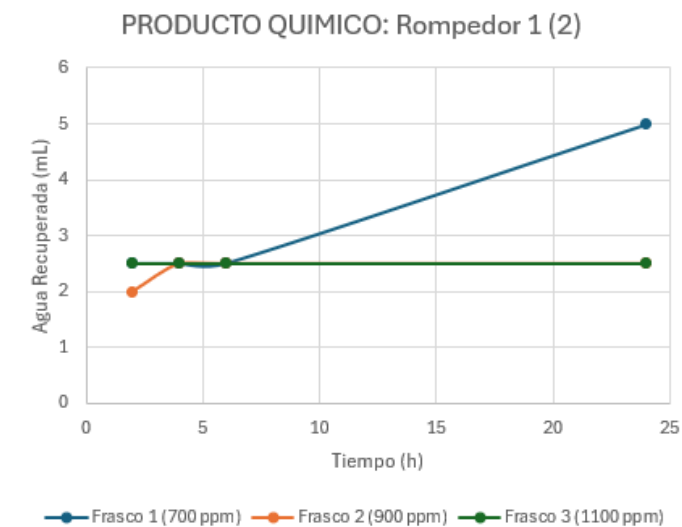
ÓXIDO DE GRAFENO COMO ROMPEDOR DE EMULSIONES



Fuente: Elaboración propia a partir de resultados de laboratorio.

Figura 17

Gráfica de recuperación de agua vs tiempo en la prueba de botella con el Rompedor 1 en repetición

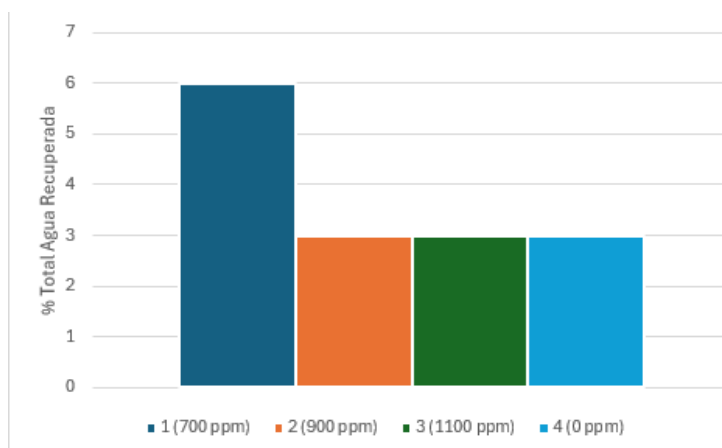


Fuente: Elaboración propia a partir de resultados de laboratorio

Figura 18

Gráfica de barras para comparar el % total de agua separada en la prueba de botella con el Rompedor 1

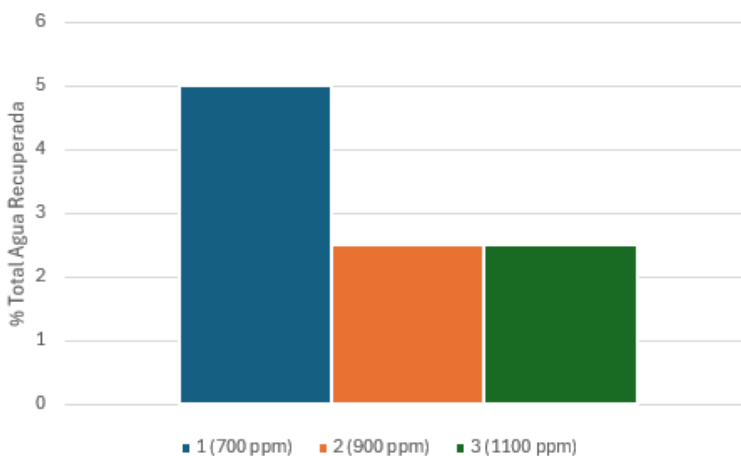
ÓXIDO DE GRAFENO COMO ROMPEDOR DE EMULSIONES



Fuente: Elaboración propia a partir de resultados de laboratorio

Figura 19

Gráfica de barras para comparar el % total de agua separada en la prueba de botella con el Rompedor 1 en repetición



Fuente: Elaboración propia a partir de resultados de laboratorio

El bajo desempeño de este rompedor sugiere que su mecanismo de acción podría no ser adecuado para el crudo Apiay. Es probable que su formulación esté orientada a sistemas con menor contenido de compuestos polares, ya que no evidenció una capacidad efectiva para desplazar las moléculas de resinas y asfaltenos presentes en la interfase. De acuerdo con la literatura, desemulsificantes con baja afinidad química frente a los estabilizantes naturales pueden presentar

ÓXIDO DE GRAFENO COMO ROMPEDOR DE EMULSIONES

eficiencias limitadas, incluso a concentraciones elevadas (Kokal, 2005). Esto podría explicar por qué las repeticiones confirmaron volúmenes de separación bajos (5–6 mL), lo que sugiere un posible desajuste químico más que un error experimental.

- Mezcla 50/50 (OG + EXP UIS): Presentó la mayor eficiencia en la separación de agua, con valores de hasta 40 mL a partir de un volumen inicial de 120 mL en 24 horas, mostrando un desempeño destacado desde las 2 horas; sin embargo, el agua separada evidenció menor calidad visual, como se observa en las Figuras 20 y 21.

Tabla 13

Resultados de recuperación de agua en función del tiempo para la mezcla 50/50 en la prueba de botella

| Tiempo (h) | Frasco 1 - 700 ppm (mL) | Frasco 2 - 900 ppm (mL) | Frasco 3 - 1100 ppm (mL) |
|------------|-------------------------------|-------------------------------|--------------------------------|
| 2 | 20 | 30 | 30 |
| 4 | 25 | 32,5 | 30 |
| 6 | 39 | 39 | 37 |
| 24 | 40 | 39 | 37 |

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 14

Resultados de recuperación de agua separada para la mezcla 50/50 a diferentes concentraciones en la prueba de botella

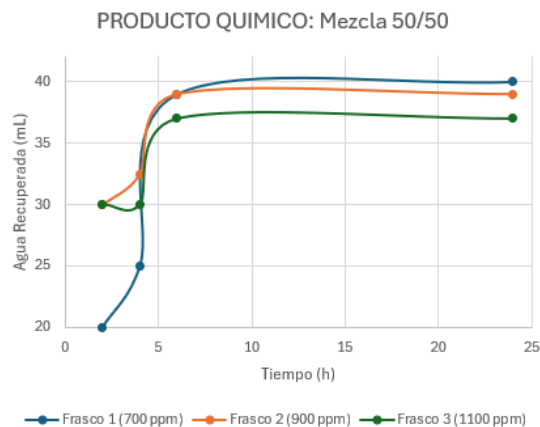
| Frasco | Agua Recuperada (mL) |
|--------------|----------------------------|
| 1 (700 ppm) | 40 |
| 2 (900 ppm) | 39 |
| 3 (1100 ppm) | 37 |

Fuente: Elaboración propia.

Figura 20

Gráfica de recuperación de agua vs tiempo en la prueba de botella con la Mezcla 50/50

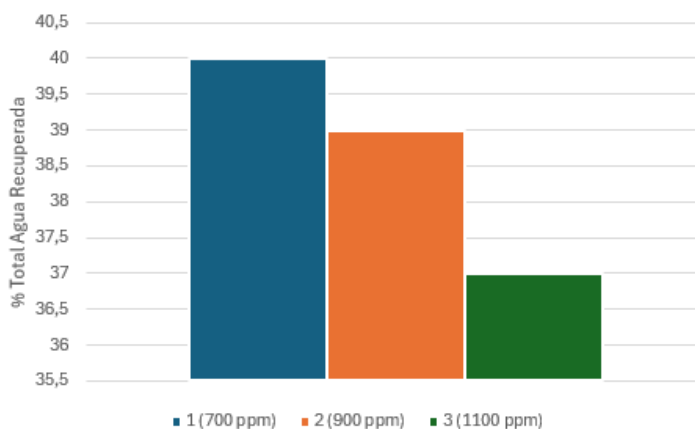
ÓXIDO DE GRAFENO COMO ROMPEDOR DE EMULSIONES



Fuente: Elaboración propia a partir de resultados de laboratorio

Figura 21

Gráfica de barras para comparar el % total de agua separada en la prueba de botella con la Mezcla 50/50



Fuente: Elaboración propia a partir de resultados de laboratorio

La mezcla 50/50 (GO + EXP UIS) presentó la mayor eficiencia en la separación de agua, con valores de hasta 40 mL a partir de un volumen inicial de 120 mL en 24 horas, mostrando un desempeño destacado desde las 2 horas. Sin embargo, el agua separada evidenció menor calidad visual en comparación con el GO individual.

El desempeño sobresaliente de la mezcla podría atribuirse a un posible efecto sinérgico entre sus componentes. No obstante, esta interpretación debe considerarse una inferencia

ÓXIDO DE GRAFENO COMO ROMPEDOR DE EMULSIONES

sustentada en la literatura y no una confirmación experimental directa, ya que no se realizaron análisis complementarios de interfase, espectroscopía ni microscopía para verificar el mecanismo de acción. En condiciones de campo, este tipo de sistema podría ser útil para maximizar la producción de agua libre, aunque podría requerir un tratamiento adicional para mejorar la calidad final del agua producida.

Con el fin de complementar el análisis cuantitativo, se empleó una escala cualitativa para evaluar aspectos visuales de la prueba de botella, como la limpieza del agua, la definición de la interfase y la apariencia del sistema. Esta escala, presentada en la Tabla 4, permite representar gráficamente el comportamiento de los rompedores, cuyos resultados se muestran en las Figuras 22, 23, 24, 25 y 26. Dado su carácter visual, esta evaluación tiene un componente subjetivo, por lo que sus resultados se interpretan de manera comparativa y como complemento de los datos cuantitativos obtenidos.

Tabla 15

Evaluación cualitativa del estado de la emulsión para el óxido de grafeno en la prueba de botella, basada en la escala definida

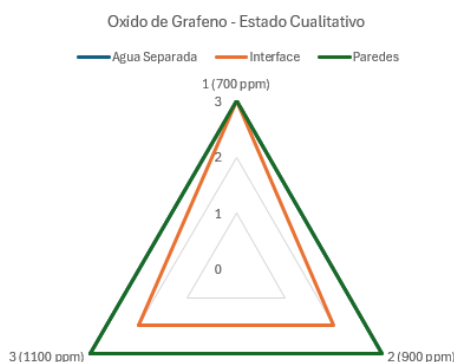
| Frasco | Agua Separada | Interface | Paredes |
|---------------|----------------------|------------------|----------------|
| 1 (700 ppm) | 3 | 3 | 3 |
| 2 (900 ppm) | 3 | 2 | 3 |
| 3 (1100 ppm) | 3 | 2 | 3 |

Fuente: Elaboración propia.

Figura 22

ÓXIDO DE GRAFENO COMO ROMPEDOR DE EMULSIONES

Gráfica de radial para estado cualitativo en la prueba de botella con el Óxido de Grafeno



Fuente: Elaboración propia a partir de resultados de laboratorio

Tabla 16

Evaluación cualitativa del estado de la emulsión para el surfactante comercial en la prueba de botella, basada en la escala definida

| Frasco | Agua Separada | Interface | Paredes |
|--------------|---------------|-----------|---------|
| 1 (700 ppm) | 3 | 2 | 3 |
| 2 (900 ppm) | 3 | 3 | 3 |
| 3 (1100 ppm) | 3 | 3 | 3 |

Fuente: Elaboración propia.

Figura 23

Gráfica de radial para estado cualitativo en la prueba de botella con el Surfactante Comercial



Fuente: Elaboración propia a partir de resultados de laboratorio

Tabla 17

ÓXIDO DE GRAFENO COMO ROMPEDOR DE EMULSIONES

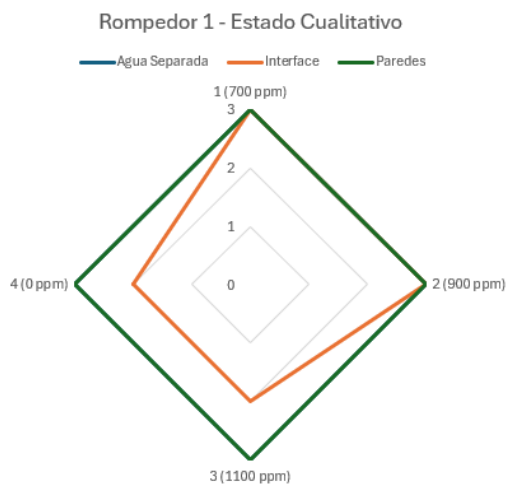
Evaluación cualitativa del estado de la emulsión para el Rompedor 1 en el ensayo inicial de la prueba de botella

| Frasco | Agua Separada | Interface | Paredes |
|--------------|---------------|-----------|---------|
| 1 (700 ppm) | 3 | 3 | 3 |
| 2 (900 ppm) | 3 | 3 | 3 |
| 3 (1100 ppm) | 3 | 2 | 3 |
| 4 (0 ppm) | 3 | 2 | 3 |

Fuente: Elaboración propia.

Figura 24

Gráfica de radial para estado cualitativo en la prueba de botella con el Rompedor 1



Fuente: Elaboración propia a partir de resultados de laboratorio

Tabla 18

Evaluación cualitativa del estado de la emulsión para el Rompedor 1 en la repetición del ensayo

| Frasco | Agua Separada | Interface | Paredes |
|--------------|---------------|-----------|---------|
| 1 (700 ppm) | 3 | 3 | 3 |
| 2 (900 ppm) | 3 | 2 | 3 |
| 3 (1100 ppm) | 3 | 3 | 3 |

Fuente: Elaboración propia.

ÓXIDO DE GRAFENO COMO ROMPEDOR DE EMULSIONES

Figura 25

Gráfica de radial para estado cualitativo en la prueba de botella con el Rompedor 1 en su repetición



Fuente: Elaboración propia a partir de resultados de laboratorio

Tabla 19

Evaluación cualitativa del estado de la emulsión para la mezcla 50/50 (OG + EXP UIS) en la prueba de botella

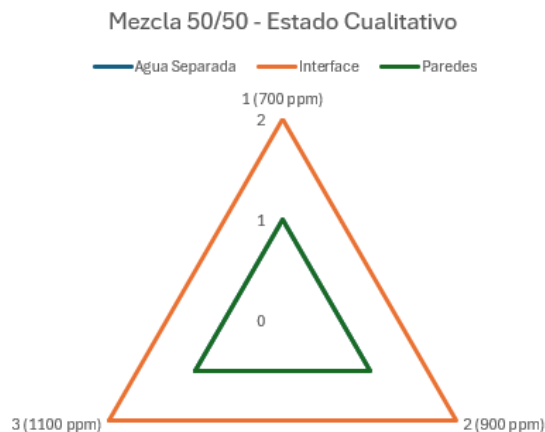
| Frasco | Agua Separada | Interface | Paredes |
|--------------|---------------|-----------|---------|
| 1 (700 ppm) | 1 | 2 | 1 |
| 2 (900 ppm) | 1 | 2 | 1 |
| 3 (1100 ppm) | 1 | 2 | 1 |

Fuente: Elaboración propia.

Figura 26

Gráfica de radial para estado cualitativo en la prueba de botella con la Mezcla 50/50

ÓXIDO DE GRAFENO COMO ROMPEDOR DE EMULSIONES



Fuente: Elaboración propia a partir de resultados de laboratorio

- Con el fin de establecer una comparación directa entre los tratamientos evaluados, se seleccionaron las condiciones de mejor desempeño para cada rompedor en la prueba de botella. A partir de estos resultados óptimos, se realizó un análisis comparativo que permite identificar diferencias en la recuperación de agua, el porcentaje total separado y la calidad de la fase acuosa. Estos resultados se presentan en las Figuras 27, 28 y 29.

Tabla 20

Comparación de los resultados óptimos de los tratamientos evaluados en la prueba de botella

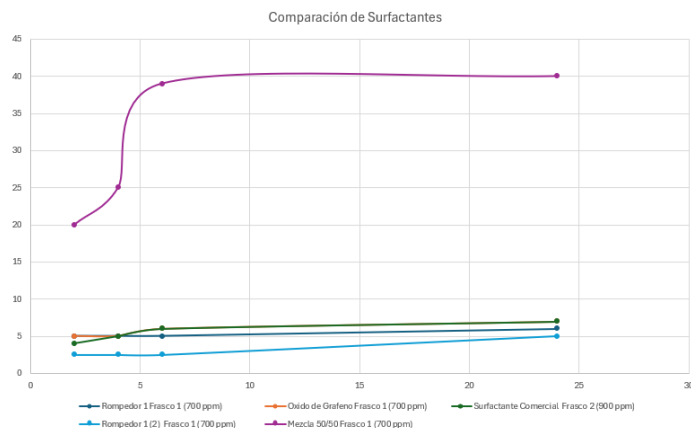
| Tratamiento | Concentración óptima (ppm) | Agua recuperada a 24 h (mL) | % agua separada | Limpieza | Interfase | Sólidos |
|-----------------------------|----------------------------|-----------------------------|-----------------|----------|-----------|---------|
| Rompedor 1 (ensayo inicial) | 700 | 6 | 6 | 3 | 3 | 3 |
| Óxido de grafeno | 700 | 7 | 7 | 3 | 3 | 3 |
| Surfactante comercial | 900 | 7 | 7 | 3 | 3 | 3 |
| Rompedor 1 (repetición) | 700 | 5 | 5 | 3 | 3 | 3 |
| Mezcla 50/50 (OG + EXP UIS) | 700 | 40 | 40 | 1 | 2 | 1 |

Fuente: Elaboración propia.

ÓXIDO DE GRAFENO COMO ROMPEDOR DE EMULSIONES

Figura 27

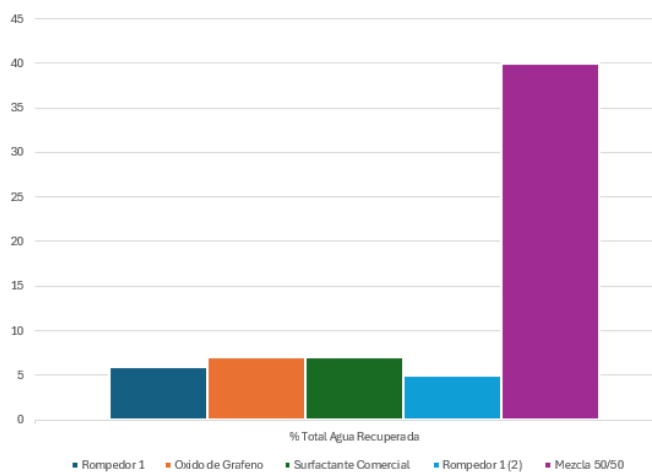
Gráfica de recuperación de agua vs tiempo en la prueba de botella de la comparación de los surfactantes



Fuente: Elaboración propia a partir de resultados de laboratorio

Figura 28

Gráfica de barras para comparar el % total de agua separada en la prueba de botella de la comparación de los surfactantes

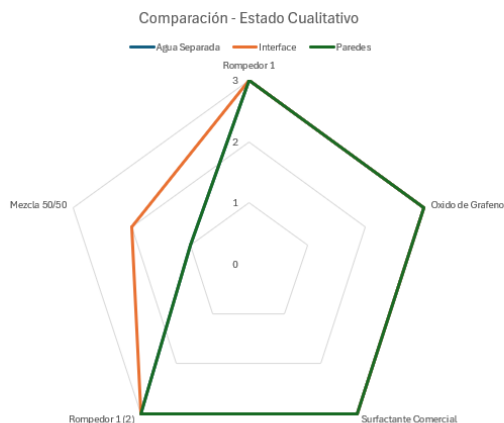


Fuente: Elaboración propia a partir de resultados de laboratorio

Figura 29

Gráfica de radial para estado cualitativo en la prueba de botella de la comparación de los surfactantes

ÓXIDO DE GRAFENO COMO ROMPEDOR DE EMULSIONES



Fuente: Elaboración propia a partir de resultados de laboratorio

La comparación global sugiere que la eficiencia de un rompedor no debe evaluarse únicamente en función del volumen de agua recuperada. En este estudio, el GO mostró un mejor desempeño en términos de limpieza y estabilidad de la interfase, mientras que la mezcla 50/50 presentó mayores volúmenes de agua separada. El surfactante comercial evidenció un comportamiento intermedio, y el Rompedor 1 mostró baja eficiencia bajo las condiciones evaluadas. Estos resultados sugieren que la efectividad de un desémulsificante está relacionada con su capacidad de interactuar con los compuestos polares responsables de la estabilidad de la emulsión (Kilpatrick, 2012; Schramm, 1992). En este sentido, materiales como el GO podrían representar una alternativa interesante frente a aditivos convencionales.

4.4. Desempeño por rompedor en el Thief Test

En este trabajo, el ensayo tipo Thief se emplea como una adaptación de laboratorio para evaluar la calidad de la fase acuosa obtenida en las pruebas de botella. A diferencia de su uso convencional en campo, donde se utiliza para la toma de muestras a diferentes profundidades, en este estudio se enfoca en el análisis del agua separada mediante centrifugación, permitiendo determinar parámetros como turbiedad y contenido de sólidos suspendidos.

ÓXIDO DE GRAFENO COMO ROMPEDOR DE EMULSIONES

Para interpretar correctamente los resultados del ensayo tipo Thief, es fundamental comprender las dos escalas utilizadas en la valoración del desempeño de los rompedores. Estas corresponden a la turbiedad del agua separada y al contenido de sólidos suspendidos, las cuales permiten establecer criterios comparativos sobre la eficiencia de cada tratamiento en términos de claridad y limpieza del agua.

Los resultados obtenidos en el ensayo se resumen en la Tabla 20, donde se presentan los valores promedio de turbiedad y sólidos suspendidos para cada tratamiento evaluado.

Tabla 21

Resumen del desempeño de los tratamientos evaluados en el Thief Test

| Tratamiento | Turbiedad (promedio) | Sólidos suspendidos (promedio) |
|-----------------------------|----------------------|--------------------------------|
| Rompedor 1 (ensayo inicial) | 5.00 | 3.00 |
| Óxido de grafeno | 5.00 | 1.50 |
| Surfactante comercial | 4.75 | 1.50 |
| Rompedor 1 (repetición) | 4.33 | 2.00 |
| Mezcla 50/50 (OG + EXP UIS) | 2.00 | 1.00 |

Fuente: Elaboración propia.

- Turbiedad del agua (agua separada):

Esta escala califica la claridad del agua obtenida tras la acción del rompedor, en un rango de 1 a 5, como se presenta en la tabla 3, un menor valor indica mayor claridad y, por tanto, mejor desempeño del rompedor en la separación de fases.

ÓXIDO DE GRAFENO COMO ROMPEDOR DE EMULSIONES

- Sólidos suspendidos:

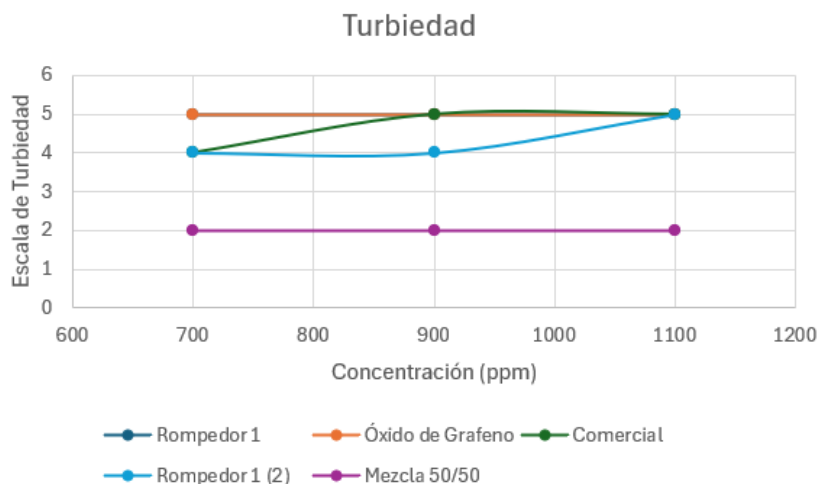
Esta escala mide la cantidad de sólidos presentes en el agua separada, también de 1 a 5, presentada en la tabla 3, al igual que en la turbiedad, valores más bajos reflejan mejor eficiencia del rompedor, ya que indican menor presencia de sólidos en el agua separada

- La mezcla 50/50 presentó el mejor desempeño, con el promedio más bajo tanto en turbiedad (2.0) como en sólidos suspendidos (1.0). Esto indica que este tratamiento logra separar el agua con mayor claridad y menor cantidad de sólidos, superando ampliamente a los demás evaluados, como se evidencia en las Figuras 30 y 31.
- Surfactante Comercial y Óxido de Grafeno mostraron un desempeño intermedio. El surfactante comercial obtuvo un promedio de turbiedad de 4.75 y de sólidos suspendidos de 1.5, mientras que el óxido de grafeno registró una turbiedad de 5.0 y sólidos suspendidos de 1.75. Aunque ambos lograron reducir la cantidad de sólidos, la turbiedad del agua permaneció alta, como se evidencia en las figuras 30 y 31.
- Rompedor 1 y Rompedor 1 (2) presentaron los valores más altos de turbiedad (5.0 y 4.33, respectivamente) y mayores concentraciones de sólidos suspendidos, lo que sugiere una menor eficiencia en la clarificación del agua y la remoción de sólidos en comparación con los otros rompederos, como se evidencia en las figuras 30 y 31.

Figura 30

Gráfica comparativa: Turbiedad vs. Concentración (por surfactante)

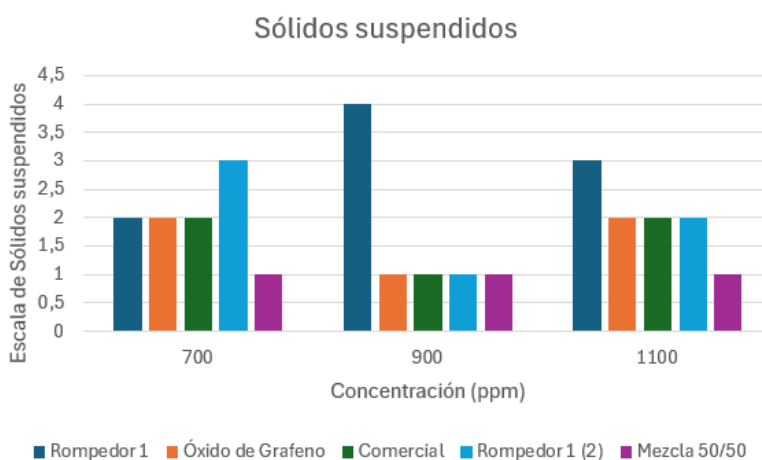
ÓXIDO DE GRAFENO COMO ROMPEDOR DE EMULSIONES



Fuente: Elaboración propia a partir de resultados de laboratorio

Figura 31

Gráfica comparativa: Sólidos Suspendedos vs. Concentración (por surfactante)



Fuente: Elaboración propia a partir de resultados de laboratorio

Los resultados obtenidos en la prueba tipo Thief son consistentes con los comportamientos observados en la prueba de botella, lo que sugiere la importancia de la interacción entre los rompedores y las fracciones polares del crudo. En el caso de la mezcla 50/50, su mejor desempeño en términos de turbidez y sólidos suspendidos podría estar asociado a un efecto combinado entre el GO y el surfactante, como se ha reportado en la

ÓXIDO DE GRAFENO COMO ROMPEDOR DE EMULSIONES

literatura (Kokal, 2005; Sjöblom, 2006). Por otro lado, el incremento de sólidos observado en el GO podría explicarse por la dispersión de sus láminas en la fase acuosa, fenómeno documentado en estudios de nanofluidos (Peña Alarcón et al., 2021; Pájaro y Álvarez, 2014). En contraste, el surfactante comercial mostró una reducción parcial de sólidos, aunque sin mejorar significativamente la claridad del agua. Finalmente, el rompedor 1 evidenció bajos niveles de eficiencia, lo que sugiere una limitada capacidad para desestabilizar emulsiones con alto contenido de compuestos polares. Estas interpretaciones se plantean con base en la literatura, ya que no fueron verificadas experimentalmente en este estudio.

4.5. Consideraciones técnicas

- La decisión sobre el mejor rompedor dependerá de si se prioriza volumen de agua recuperada o calidad de la separación.
- El comportamiento en Thief es crucial para evaluar la fase que permanece tras la separación inicial.

4.6. Evaluación de compatibilidad del crudo con el mejor rompedor.

La compatibilidad entre el crudo y el rompedor se evaluó en tres proporciones (25/75, 50/50 y 75/25). El análisis se centró en la estabilidad de la emulsión, la separación de fases, la presencia de precipitados y la apariencia visual de las mezclas.

En la proporción 25/75, la mezcla presentó una separación de fases relativamente clara, con una capa acuosa de aspecto translúcido y bajo porcentaje de emulsión. Sin embargo, se observaron depósitos sólidos en el fondo y paredes del recipiente, con apariencia granular, lo que evidencia procesos de precipitación. Aunque la separación fue favorable, la formación de sólidos

ÓXIDO DE GRAFENO COMO ROMPEDOR DE EMULSIONES

indica una compatibilidad parcial y limita el uso de esta proporción sin un control adicional de precipitados.

Figura 32

Resultado final de la prueba de compatibilidad para la proporción 25-75



Fuente: Elaboración propia

En la proporción 50/50, la mezcla resultó ser la menos estable. El sistema mostró una apariencia oscura y altamente turbia, con tendencia marcada a la formación de emulsiones persistentes y una interfase poco definida. Además, se evidenció la presencia de gotas adheridas a las paredes del recipiente, lo que confirma que a esta proporción el rompedor no logra estabilizar la mezcla. En consecuencia, se clasifica como la condición de mayor incompatibilidad.

Figura 33

Resultado final de la prueba de compatibilidad para la proporción 50-50



Fuente: Elaboración propia

ÓXIDO DE GRAFENO COMO ROMPEDOR DE EMULSIONES

Por el contrario, en la proporción 75/25 se observó la mejor compatibilidad. La interfase entre fases fue bien definida, la fase acuosa presentó un aspecto claro y el porcentaje de emulsión fue mínimo. No se identificaron sólidos relevantes, únicamente microgotas dispersas, lo que indica que esta relación favorece la separación y evita la formación de agregados. Este comportamiento señala que un mayor contenido de rompedor no siempre implica problemas de estabilidad, sino que, en este caso, promueve condiciones más limpias y claras de separación.

Figura 34

Resultado final de la prueba de compatibilidad para la proporción 75-25



Fuente: Elaboración propia

En conjunto, los resultados permiten establecer un orden de compatibilidad: 75/25 > 25/75 > 50/50. La mezcla 75/25 se considera la más estable y recomendable, mientras que la 50/50 debe descartarse por su marcada emulsificación. La proporción 25/75 podría emplearse bajo condiciones controladas, siempre que se mitiguen los precipitados observados.

Figura 35

ÓXIDO DE GRAFENO COMO ROMPEDOR DE EMULSIONES

Resultado final de la prueba de compatibilidad para todas las proporciones



Fuente: Elaboración propia

Los resultados de la prueba de compatibilidad confirman que la eficiencia de los rompedores está condicionada no solo por su acción individual, sino también por el equilibrio entre la proporción de las fases y la capacidad del rompedor para cubrir la interfaz. En la relación 25/75 (rompedor/agua), se presentaron precipitados característicos de un exceso de aditivo en la fase acuosa, situación que provoca un desbalance en las cargas superficiales y la aglomeración de partículas. Este fenómeno, ampliamente documentado en la literatura sobre emulsiones, afecta la estabilidad y puede generar problemas de incrustación en equipos de proceso (Tadros, 2013).

Por otro lado, la proporción 50/50 fue la más desfavorable, ya que la cantidad máxima de superficie interfacial que se debe cubrir supera la capacidad del rompedor, resultando en la formación de emulsiones secundarias y un aumento significativo en la turbidez (Sjöblom, 2006). En este punto crítico, el rompedor no logra actuar de manera efectiva, lo que se traduce en una separación deficiente. Por el contrario, la proporción 75/25 mostró mejor desempeño con una interfase claramente definida, menor turbidez y prácticamente sin formación de sólidos. Esto indica que un mayor contenido de rompedor, aunque pueda parecer excesivo, puede favorecer la cobertura homogénea de la interfaz y, por ende, una mejor eficiencia separadora. Por lo tanto, la dosis óptima no siempre corresponde a la máxima concentración, sino a un equilibrio entre

ÓXIDO DE GRAFENO COMO ROMPEDOR DE EMULSIONES

cobertura interfacial y proporción de fases, lo que es fundamental para optimizar la aplicación industrial (Tadros, 2013; Sjöblom, 2006).

5. Conclusiones

A partir de los objetivos específicos planteados, los resultados obtenidos permiten afirmar que la investigación cumplió con el propósito de caracterizar el crudo, evaluar el desempeño comparativo de los rompedores, analizar la calidad de la fase separada y establecer una base de compatibilidad para el mejor tratamiento identificado. En consecuencia, las conclusiones se presentan organizadas de acuerdo con el cumplimiento de dichos objetivos.

La caracterización fisicoquímica del crudo pesado permitió establecer una referencia base para la evaluación de los rompedores de emulsiones. Los resultados obtenidos evidenciaron la presencia de compuestos polares como resinas y asfaltenos, los cuales contribuyen a la estabilidad de la emulsión agua-crudo, justificando la necesidad del uso de agentes desémulsificantes para su tratamiento.

Las pruebas de rompimiento de emulsiones realizadas mediante la técnica de prueba de botella permitieron comparar el desempeño de los diferentes tratamientos evaluados. La mezcla 50/50 (OG + surfactante comercial) presentó la mayor eficiencia en términos de volumen de agua recuperada, alcanzando valores de hasta 40 mL a partir de un volumen inicial de 120 mL a las 24 horas. Por su parte, el óxido de grafeno (OG) mostró un desempeño intermedio en volumen, pero superior en la calidad visual del agua separada, mientras que el surfactante comercial presentó un comportamiento moderado y el Rompedor 1 evidenció la menor eficiencia.

En el ensayo tipo Thief, la mezcla 50/50 presentó el mejor desempeño, con el promedio más bajo tanto en turbiedad como en sólidos suspendidos, lo que indica una mejor calidad de la

ÓXIDO DE GRAFENO COMO ROMPEDOR DE EMULSIONES

fase acuosa separada. En contraste, el óxido de grafeno mostró alta turbidez, lo cual sugiere la presencia de material disperso en la fase acuosa.

Los resultados obtenidos en esta prueba fueron consistentes con los observados en la prueba de botella, aunque no necesariamente implican el mismo criterio de optimización. En este estudio, la interpretación de los resultados del ensayo tipo Thief debe entenderse como complementaria y comparativa, ya que este ensayo se adaptó para evaluar la fase separada y no para cumplir su uso convencional en campo.

El análisis comparativo de los tratamientos evaluados permitió determinar que la eficiencia de un rompedor de emulsiones debe evaluarse de manera integral, considerando tanto el volumen de agua recuperada como la calidad de la fase acuosa. En este estudio, la mezcla 50/50 resultó ser la alternativa más eficiente en términos globales, debido a un posible efecto sinérgico entre sus componentes, mientras que el óxido de grafeno destacó en la limpieza del agua y el Rompedor 1 no mostró un desempeño adecuado para el crudo evaluado.

6. Recomendaciones

Las recomendaciones se presentan en dos categorías: las derivadas directamente de los resultados obtenidos en este estudio y aquellas orientadas a la continuidad de la investigación. Esta organización permite diferenciar entre acciones aplicables al sistema evaluado y líneas de trabajo futuro que podrían fortalecer la comprensión del fenómeno y ampliar la aplicabilidad de los resultados.

A. Basadas en resultados

ÓXIDO DE GRAFENO COMO ROMPEDOR DE EMULSIONES

- Se recomienda el uso de la mezcla 50/50 (óxido de grafeno + surfactante comercial) en sistemas similares al evaluado, debido a su mayor eficiencia en la separación de agua, alcanzando los mayores volúmenes recuperados en el menor tiempo.

- Se sugiere considerar no solo el volumen de agua separada, sino también la calidad de la fase acuosa (turbiedad y sólidos suspendidos) al momento de seleccionar un rompedor de emulsiones para aplicación en campo.

- Se recomienda evaluar la necesidad de tratamientos adicionales cuando se empleen sistemas que generen alta turbidez en el agua separada, como el óxido de grafeno, con el fin de mejorar la calidad final del agua producida.

B. Trabajo futuro

- Se recomienda ampliar el rango de concentraciones evaluadas, incluyendo valores por debajo de 700 ppm y superiores a 1100 ppm, con el fin de determinar la concentración mínima efectiva (CME) y optimizar el uso de los rompedores desde el punto de vista económico.

- Se sugiere incorporar análisis estadístico en futuros estudios, mediante la realización de ensayos por triplicado y el uso de herramientas como desviación estándar o análisis de varianza, con el fin de validar la significancia de los resultados obtenidos.

- Se recomienda realizar la caracterización fisicoquímica del óxido de grafeno empleado, incluyendo técnicas como FTIR, XRD o microscopía, con el fin de garantizar la reproducibilidad del estudio.

- Se propone evaluar estrategias para reducir la turbidez generada por el óxido de grafeno en la fase acuosa, como la modificación de su concentración, con el fin de mejorar su aplicabilidad en campo.

ÓXIDO DE GRAFENO COMO ROMPEDOR DE EMULSIONES

- Se recomienda aplicar pruebas de compatibilidad (API RP 42) a todos los tratamientos evaluados, con el fin de realizar una selección más integral del rompedor.
- Se sugiere incluir variables de campo como temperatura, salinidad y características del agua de producción en futuros estudios, para mejorar la extrapolación de los resultados a condiciones reales de operación.
- Se recomienda caracterizar el surfactante utilizado en la mezcla 50/50, con el fin de comprender mejor el efecto sinérgico observado.
- Se propone desarrollar un análisis de costo-beneficio que permita comparar la viabilidad económica del uso de óxido de grafeno frente a surfactantes convencionales.

ÓXIDO DE GRAFENO COMO ROMPEDOR DE EMULSIONES

Referencias bibliográficas

Abdulredha, M. M., Aslina, H. S., & Luqman, C. A. (2020). Overview on petroleum emulsions, formation, influence and demulsification treatment techniques. *Arabian Journal of Chemistry*, 13(1), 3403–3428. <https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2018.11.014>

Álvarez, C., & Soledad, M. (2013). *Estabilidad de emulsiones y encapsulación de aceites con propiedades nutraceuticas* [Tesis doctoral]. Universidad de Buenos Aires.

Beta Group. (2022). *Informe contextual 2022*. EITI Colombia.

Delint, J. (2013). *Coalescencia de gotas de agua en una emulsión de crudo: Una solución numérica* [Tesis de pregrado]. Universidad Nacional Autónoma de México.

Gómez-Delgado, J. L., Rodríguez-Molina, J. J., Pérez-Angulo, J. C., Santos-Santos, N., & Mejía-Ospino, E. (2023). Evaluation of the wettability alteration on sandstone rock by graphene oxide adsorption. *Emergent Materials*, 6, 755–767. <https://doi.org/10.1007/s42247-023-00596-8>

Graphenemex. (2023, octubre 26). *El grafeno como una alternativa sostenible para la purificación del agua*. <https://www.graphenemex.com/soluciones-con-grafeno/grafeno-exfoliado/grafeno/sostenibilidad/el-grafeno-como-una-alternativa-sostenible-para-la-purificacion-del-agua/>

Graphenemex. (2024, octubre 3). *Grafeno exfoliado*. <https://www.graphenemex.com/materiales-grafenicos/grafeno-exfoliado/>

Induchoodan, G., Jansson, H., & Swenson, J. (2021). Influence of graphene oxide on asphaltene nanoaggregates. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 630, 127614. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2021.127614>

ÓXIDO DE GRAFENO COMO ROMPEDOR DE EMULSIONES

Kilpatrick, P. K. (2012). Water-in-crude oil emulsion stabilization: Review and unanswered questions. *Energy & Fuels*, 26(7), 4017–4026. <https://doi.org/10.1021/ef300649x>

Kokal, S. (2005). Crude oil emulsions: A state-of-the-art review. *SPE Production & Facilities*, 20(1), 5–13. <https://doi.org/10.2118/77497-PA>

Kuwabara, H., Tsuchiya, K., Arakawa, K., Yamagata, Y., Sakai, K., & Sakai, H. (2025). Effect of oil species on the viscoelastic behavior of a surfactant film formed at the oil/water interface. *Langmuir*. <https://doi.org/10.1021/acs.langmuir.5c00229>

Martínez, A. (s. f.). *Separación de emulsiones agua en crudo pesado: Estudio de un nuevo método para la recuperación de nanopartículas con OmpA inmovilizada* [Proyecto de grado]. Universidad de los Andes.

Martínez-Martín, E., Acosta-Martínez, L., & Ramírez-Apodaca, F. D. (2016). Emulsificación de petróleo crudo para su transporte por oleoductos. *Ingeniería, Investigación y Tecnología*, 17(3), 395–404. https://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S1405-77432016000300395&script=sci_arttext

Mohammadpour, M., Malayeri, M. R., Kazemzadeh, Y., & Riazi, M. (2023). On the impact of oil compounds on emulsion behavior under different thermodynamic conditions. *Scientific Reports*, 13(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-023-42886-5>

Noguera, I. B. (2020, septiembre 9). *¿Qué son los tensoactivos o surfactantes?* Ingeniería Química Reviews. <https://www.ingenieriaquimicareviews.com/2020/09/tensoactivos-o-surfactantes.html>

ÓXIDO DE GRAFENO COMO ROMPEDOR DE EMULSIONES

Ortega, A., Marín, D., Ochoa, E., & Grupo de Investigación Medio Ambiente y Hábitat. (2019). Manejo de aguas en la industria del petróleo. *Revista Fuentes: El Reventón Energético*, 17(1), 63–74.

Ortiz, S. N. C., Cabanzo, R., & Mejía-Ospino, E. (2019). Crude oil/water emulsion separation using graphene oxide and amine-modified graphene oxide particles. *Fuel*, 240, 162–168. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2018.11.151>

Padial, J. (2017, junio 27). *¿Qué es un surfactante o tensioactivo aniónico?* Curiosoando. <https://curiosoando.com/surfactante-o-tensioactivo-anionico>

Pájaro, L., & Álvarez, R. (2014). Application of graphene oxide to break crude oil emulsions. *Journal of Dispersion Science and Technology*, 35(7), 1035–1041. <https://doi.org/10.1080/01932691.2013.786064>

Pájaro, M., & Álvarez, O. (2014). *Análisis y evaluación de la deshidratación de emulsiones concentradas de agua en crudo pesado mediante tratamiento químico* [Proyecto de grado]. Universidad de los Andes.

Peña Alarcón, J. T., Ariza Ariza, C. C., & Mejía Ospino, E. (2021). *Estudio de los efectos de nanofluidos de óxido de grafeno modificados estructuralmente con surfactantes iónicos en la formación de emulsiones crudo-agua y su composición mediante análisis termogravimétrico TGA* [Trabajo de grado]. Universidad Industrial de Santander. <https://noesis.uis.edu.co/items/0d9e8f81-1516-404c-ae6-47738eb97aa3>

Polo, D. (2014). *Análisis del proceso de demulsificación de crudo pesado: Fenómenos y mecanismos* [Trabajo de grado]. Universidad de los Andes.

ÓXIDO DE GRAFENO COMO ROMPEDOR DE EMULSIONES

Schramm, L. L. (1992). *Emulsions: Fundamentals and applications in the petroleum industry*. American Chemical Society.

Sjöblom, J. (2006). *Emulsions and emulsion stability* (2nd ed.). CRC Press.

Smart Fluid. (2022, enero 27). *Prueba de botella - Agentes rompedores de emulsión* [Video]. YouTube. <https://www.youtube.com/watch?v=mg8OCQ9Se0I>

Tadros, T. (2013). *Emulsion science and technology: A general introduction*. Wiley-VCH.

Tarazona, D. (2022, octubre 3). *En Colombia se han presentado 2133 incidentes y derrames de hidrocarburos entre 2015 y junio de 2022*. Mongabay Latam. <https://es.mongabay.com/2022/09/cuantos-incidentes-y-derrames-de-petroleo-se-han-presentado-en-colombia/>

Xia, L., Lu, S., & Cao, G. (2004). Stability and demulsification of emulsions stabilized by asphaltenes or resins. *Journal of Colloid and Interface Science*, 271(2), 504–506. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2003.11.027>

Xu, Y., Wang, Y., Wang, T., Zhang, L., Xu, M., & Jia, H. (2022). Demulsification of heavy oil-in-water emulsion by a novel Janus graphene oxide nanosheet: Experiments and molecular dynamic simulations. *Molecules*, 27(7), 2191. <https://doi.org/10.3390/molecules27072191>