

Evaluación de las propiedades mecánicas de núcleos asfálticos formulados con borras tratadas con surfactante SDBS en la producción de petróleo.

Ana Karina Barrozo Barrios y José Antonio Mejía Cortés

Trabajo de grado para optar el título de Ingeniero de petróleos

Director:

Adan Yovani León Bermúdez

Doctor en ingeniería química

Codirectores:

Julián Ernesto Sanabria Becerra

Ingeniero de Petróleos

Miller Humberto Salas Rondon

Doctor en Gestión del territorio e infraestructuras del transporte

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingeniería Físicoquímicas

Escuela de Ingeniería de Petróleos

Bucaramanga

2026

Agradecimientos

Dedico este proyecto de grado, en primer lugar, a Yahvé, fuente de toda sabiduría y fortaleza, de quien todo procede y a quien debo este logro.

A mis padres, Carmen Alicia y Emiro José, por su amor incondicional, su comprensión y sus constantes oraciones que han sido mi guía y protección en el camino de la vida. Esta tesis es también una ofrenda a su paciencia y apoyo, pilares fundamentales que me han permitido alcanzar esta meta.

Extiendo esta dedicatoria a mis hermanas, Lourdes, Idaimis y Camila, y a mis tíos Ausberto y Luis Rafael, así como a mis tías Nolma y Mari Luz. Cada uno de ustedes ha sido parte esencial de este proceso; este logro también les pertenece. Los llevo en mi corazón con profundo cariño, y elevo un deseo sincero para que el Altísimo los acompañe siempre.

José Antonio Mejía Cortés

Quiero expresar mi más profundo agradecimiento a quienes hicieron posible la realización de este proyecto.

En primer lugar, a mi director Adan León y a mi codirector Julián Sanabria, por su invaluable guía, por la paciencia con la que orientaron cada etapa de este trabajo y por la confianza depositada en mí. Sus enseñanzas, exigencia académica y apoyo constante no solo enriquecieron esta investigación, sino que también dejaron en mí aprendizajes que llevaré para siempre en mi vida profesional y personal.

A mis padres, quienes han sido mi mayor fuente de inspiración y fortaleza. A mi mamá, por su amor incondicional, por enseñarme a nunca rendirme y estar siempre a mi lado en los momentos

más difíciles. A mi papá, por su ejemplo de disciplina y esfuerzo, que me ha motivado a perseguir mis sueños con determinación. Este logro no es solo mío, sino de ustedes, porque cada paso que he dado está cimentado en los valores y el apoyo que me han brindado.

Este proyecto es fruto del acompañamiento, el amor y la dedicación de todos ellos. A cada uno, gracias de corazón.

Ana Karina Barrozo Barrios

Tabla de contenido

<i>Introducción</i>	10
<i>1. Objetivos</i>	12
1.1 Objetivo general	12
1.2 Objetivos específicos	12
<i>2. Marco teórico</i>	12
2.1 Surfactantes.....	12
2.1.1 Tipos de surfactantes	13
2.1.2 Dodecibencenosulfonato de sodio (SDBS).....	14
2.2 Adsorción de surfactantes	14
2.3 Clasificación de residuos peligrosos.....	15
2.3.1 Clasificación según características de peligrosidad	15
2.3.2 Residuos o desechos peligrosos por procesos o actividades	18
2.3.3 Residuos o desechos peligrosos por corrientes de residuos	18
2.4 Aspectos teóricos y composicionales de las borras	19
2.4.1 Clasificación del crudo.....	20
2.5 Tratamiento de borras	20
2.5.1 Métodos de tratamiento	21
2.6 Impactos ambientales derivados de la gestión deficiente de borras	22
2.6.1 Contaminación del suelo y aguas	22
2.6.2 Daños a la biodiversidad.....	23
2.6.3 Emisiones de gases tóxicos y contribución al cambio climático	23
2.6.4 Impactos en la salud humana	23
2.6.5 Concentración micelar crítica (C.M.C)	24
2.7 Pruebas de detergencia	24
2.7.1 Tensión interfacial	24
2.7.2 Tensión superficial.....	24
2.8 Mezclas asfálticas	25
2.8.1 Mezcla asfáltica natural.....	25
2.8.2 Agregantes pétreos	25
2.8.3 Ligante asfáltico.....	25
2.8.4 Tipos de mezclas asfálticas.....	26

2.9	Métodos de adsorción	27
3.	<i>Materiales y métodos</i>	29
3.1	Materiales y equipos	29
3.2	Metodología experimental	29
3.2.1	Caracterización fisicoquímica del asfalto.....	30
3.2.2	Prueba de adsorción.....	31
3.2.3	Prueba de detergencia	33
3.2.4	Preparación de núcleos cilíndricos	34
3.2.5	Pruebas Marshall.....	38
4.	<i>Resultados y discusión</i>	39
4.1	Análisis composicional SARA y viscosidad del asfalto	39
4.2	Caracterización del asfalto usando espectroscopía de Infrarrojo FTIR-ATR.....	40
4.3	Comportamiento de la adsorción de surfactante SDBS	41
4.4	Análisis de la prueba de detergencia de crudo	48
4.5	Análisis de las pruebas Marshall	54
5.	<i>Conclusiones</i>	61
6.	<i>Recomendaciones</i>	62
	<i>Referencias bibliográficas</i>	63

Lista de tablas

<i>Tabla 1. Composición del crudo</i>	<i>19</i>
<i>Tabla 2. Franjas granulométricas para mezclas asfálticas en caliente de gradación continua .</i>	<i>26</i>
<i>Tabla 3. Cuadro Comparativo de las dos metodologías.....</i>	<i>28</i>
<i>Tabla 4. Materiales, reactivos y equipos utilizados en la investigación.....</i>	<i>29</i>
<i>Tabla 5. Diseño factorial 2³ para pruebas de detergencia</i>	<i>34</i>
<i>Tabla 6. Diseño factorial 2³ para preparación de mezclas asfálticas.</i>	<i>36</i>
<i>Tabla 7. Franja granulométrica para mezcla asfáltica MDC-10.....</i>	<i>36</i>
<i>Tabla 8. Porcentajes de agregados para cada núcleo asfáltico.</i>	<i>37</i>
<i>Tabla 9. Propiedades fisicoquímicas del asfalto.....</i>	<i>39</i>
<i>Tabla 10. Distribución de estructuras aromáticas y alifáticas presentes</i>	<i>41</i>
<i>Tabla 11. Variables y valores de la curva de calibración.</i>	<i>44</i>
<i>Tabla 12. Cantidad de Surfactante adsorbido a diferentes concentraciones.</i>	<i>45</i>
<i>Tabla 13. Volúmenes utilizados para los cálculos de la dilución.</i>	<i>46</i>
<i>Tabla 14. Datos de adsorción de la muestra seca.</i>	<i>47</i>
<i>Tabla 15. Datos de adsorción de la muestra impregnada de crudo.</i>	<i>48</i>
<i>Tabla 16. Porcentaje de remoción de crudo en pruebas de detergencia.</i>	<i>49</i>
<i>Tabla 17. Valores óptimos para la remoción de crudo.</i>	<i>53</i>
<i>Tabla 18. Carga máxima de núcleos asfálticos.....</i>	<i>55</i>
<i>Tabla 19. Valores para la optimización para mezclas asfálticas.</i>	<i>60</i>

Lista de figuras

<i>Figura 1. Metodología experimental del proyecto</i>	<i>30</i>
<i>Figura 2. Probador universal automático MULTILOADER y núcleo 1 bajo tensión.</i>	<i>38</i>
<i>Figura 3. Distribución de regiones del espectro de infrarrojo FTIR-ATR para el asfalto.</i>	<i>40</i>
<i>Figura 4. Curvas de adsorción del surfactante SDBS.</i>	<i>42</i>
<i>Figura 5. Curva de calibración</i>	<i>43</i>
<i>Figura 6. Pruebas de detergencia a 70 °C después de dos horas de interacción.</i>	<i>49</i>
<i>Figura 7. Diagrama de Pareto estandarizada para el porcentaje de remoción de crudo.</i>	<i>50</i>
<i>Figura 8. Gráfica de efectos principales para la remoción de crudo.</i>	<i>51</i>
<i>Figura 9. Gráfica de interacción para la remoción de crudo.</i>	<i>52</i>
<i>Figura 10. Resultado de la muestra No. 2.</i>	<i>54</i>
<i>Figura 11. Gráfico de esfuerzos de mezclas asfálticas.</i>	<i>55</i>
<i>Figura 12. Diagrama de Pareto para resultados de carga máxima.</i>	<i>56</i>
<i>Figura 13. Gráfica de efectos principales para la carga máxima.</i>	<i>58</i>
<i>Figura 14. Gráfica de interacción para la carga máxima.</i>	<i>59</i>

Resumen

Título: Evaluación de las propiedades mecánicas de núcleos asfálticos formulados con borras tratadas con surfactante SDBS en la producción de petróleo*

Autor: Ana Karina Barrozo Barrios y José Antonio Mejía Cortés**

Palabras claves: Borras aceitosas, Surfactante SDBS, Mezclas asfálticas

Descripción:

Este proyecto de investigación se centra en el tratamiento y valorización de las borras aceitosas generadas en instalaciones superficiales de la industria petrolera, con el propósito de reducir el impacto ambiental y aprovechar su potencial como recurso.

La primera etapa consistió en la recuperación del petróleo presente en las borras mediante el empleo del surfactante aniónico dodecibenceno sulfonato de sodio SDBS, posteriormente se diseñó y ejecutó un experimento factorial 2^3 , lo que permitió evaluar de manera sistemática el efecto de diferentes variables para la recuperación del crudo.

En una segunda etapa, el residuo tratado se incorporó como componente en mezclas asfálticas. Para ello, se elaboraron núcleos cilíndricos con distintas formulaciones, los cuales fueron sometidos a ensayos mecánicos orientados a determinar su resistencia. Estos análisis proporcionan información clave acerca de la viabilidad técnica del uso del material recuperado como parte de mezclas destinadas al uso en obras civiles.

Los resultados obtenidos demostraron que es posible recuperar una fracción significativa de petróleo presente en las aguas aceitosas mediante la aplicación de surfactante y que el material remanente, tras un adecuado tratamiento, presenta propiedades favorables para su aprovechamiento en mezclas asfálticas. De este modo, la investigación aporta una alternativa sustentable que contribuye tanto a la mitigación de pasivos ambientales de la industria petrolera como a la optimización de recursos en el sector de la construcción.

* Trabajo de grado

** Facultad de ingenierías fisicoquímicas. Escuela de ingeniería de petróleos. Director Adán Yovani León Bermúdez. Codirector(es) Julián Ernesto Sanabria Becerra y Miller Humberto Salas Rondón

Abstract

Title: Evaluation of the Mechanical Properties of Asphalt Cores Formulated with Sludge Treated with SDBS Surfactant in Oil Production*

Authors: Ana Karina Barrozo Barrios and José Antonio Mejía Cortés**

Keywords: Oily sludge; SDBS surfactant; Asphalt mixtures

Description:

This research project focuses on the treatment and recovery of oily sludge generated at surface facilities in the oil industry, with the goal of reducing environmental impact and harnessing its potential as a resource.

The first stage involved recovering the oil present in the sludge using the anionic surfactant sodium dodecylbenzene sulfonate (SDBS). A 2^3 factorial experiment was then designed and executed, allowing for a systematic evaluation of the effect of different variables on oil recovery.

In a second stage, the treated residue was incorporated as a component into asphalt mixtures. To this end, cylindrical cores with different formulations were created and subjected to mechanical testing to determine their strength. These analyses provide key information on the technical feasibility of using the recovered material as part of mixtures intended for use in civil engineering.

The results obtained demonstrated that it is possible to recover a significant fraction of the oil present in oily waters through the application of surfactant, and that the remaining material, after proper treatment, has favorable properties for use in asphalt mixtures. Thus, the research provides a sustainable alternative that contributes both to mitigating the environmental liabilities of the oil industry and to optimizing resources in the construction sector.

* Bachelor Thesis

** Facultad de ingenierías fisicoquímicas. Escuela de ingeniería de petróleos. Director Adán Yovani León Bermúdez. Codirector(es) Julián Ernesto Sanabria Becerra y Miller Humberto Salas Rondón

Introducción

La industria petrolera es una de las principales fuentes de energía a nivel mundial, pero su operación genera una gran cantidad de residuos que representan un desafío ambiental. Entre estos residuos, las borras de petróleo, que se acumulan en los tanques de almacenamiento de crudo son particularmente un problema de gran interés, debido a su composición heterogénea y compleja. Además, la inadecuada disponibilidad de estos residuos puede causar problemas operativos y ambientales. Las borras de petróleo están compuestas por una mezcla de hidrocarburos pesados, agua, sedimentos y otros materiales inorgánicos, lo que las convierte en un residuo difícil de manejar y tratar. Además, su disposición inadecuada puede generar impactos negativos en los ecosistemas, contaminando suelos y cuerpos de agua, y afectando la salud humana.

En Colombia, la producción de borras de petróleo es considerable, en 2024 la generación de residuos fue de 537.060 toneladas, de las cuales 87.693 toneladas corresponden a residuos peligrosos; estos residuos en orden de mayor a menor cantidad son: lodos aceitosos 60.496 toneladas, suelos contaminados con hidrocarburo 12.373 toneladas y cortes base aceite 6.145 toneladas (Ecopetrol, 2025).

Este volumen, sumado a la normativa ambiental cada vez más estricta, como la Resolución 631 de 2015, la cual establece los límites máximos permisibles para los vertimientos de residuos, hace imperativo el desarrollo de tecnologías y procesos que permitan un manejo adecuado y sostenible de estos residuos. En este contexto, la búsqueda de métodos eficientes para el tratamiento y la reutilización de las borras de petróleo se convierte en una prioridad para la industria petrolera.

El uso de surfactantes, como el dodecilmecanosulfonato de sodio (SDBS), se ha explorado como una alternativa prometedora para el tratamiento de borras de petróleo. Los surfactantes son compuestos que reducen la tensión interfacial entre fases inmiscibles, lo que facilita la separación de los componentes de las borras, como el crudo, el agua y los sedimentos. Además, el tratamiento con surfactantes puede mejorar las propiedades físicas y mecánicas de las borras, permitiendo su reutilización en aplicaciones industriales, como materiales de construcción o en procesos de remediación ambiental. El diferencial de este proyecto radica en la necesidad de mitigar los impactos ambientales asociados con las borras de petróleo y promover a su reutilización para el desarrollo de nuevos materiales. Al transformar estos residuos en productos con valor agregado, no solo se reduce su impacto ambiental, sino que también se abre la puerta a nuevas aplicaciones industriales que pueden generar beneficios económicos y sociales.

Esta investigación se plantea con el objetivo de aprovechar de manera integral las borras de crudo generadas en operaciones petroleras, priorizando inicialmente la recuperación de la mayor cantidad posible de hidrocarburos presentes en ellas. Posteriormente, se busca darle un valor agregado al residuo sólido remanente, mediante su incorporación como materia prima en la elaboración de mezclas asfálticas utilizadas en la industria con propiedades mecánicas aceptables. En ese marco, el enfoque de trabajo abarca la caracterización fisicoquímica de las borras, la optimización del proceso de tratamiento con el surfactante aniónico SDBS, la evaluación de la eficiencia en la remoción de hidrocarburos mediante pruebas de detergencia, y la fabricación de núcleos asfálticos cilíndricos (plugs) con las borras tratadas. Estas formulaciones fueron evaluadas en cuanto a sus propiedades mecánicas para determinar su viabilidad como material reutilizable en aplicaciones de pavimentación.

1. Objetivos

1.1 Objetivo general

Evaluar las propiedades mecánicas de núcleos asfálticos formulados con borras tratadas con surfactante SDBS en la producción de petróleo.

1.2 Objetivos específicos

Caracterizar las propiedades fisicoquímicas de las borras extraídas de un campo representativo de Colombia, incluyendo su composición y nivel de impregnación de crudo pesado.

Evaluar el uso del dodecibenceno sulfonato sódico (SDBS) para el tratamiento de borras generadas en la producción de petróleo mediante pruebas estáticas.

Analizar el comportamiento de los núcleos asfálticos fabricados con diferentes formulaciones de borras tratadas, mediante pruebas mecánicas en condiciones controladas.

2. Marco teórico

2.1 Surfactantes

Los tensoactivos o surfactantes son agentes químicos compuestos por una parte hidrofílica y otra lipofílica, característica la cual les permite generar una reducción de la tensión interfacial en la zona de contacto creada entre dos fases, ya sea líquido-líquido, gas-líquido, líquido-sólido.

El surfactante actúa como generador de espuma, ya que sin él las burbujas se romperían rápidamente debido a la separación de sus componentes. Su función es crear tensión interfacial entre la fase líquida y la gaseosa, lo que impide que la espuma colapse y ayuda a estabilizar las burbujas al reducir la energía libre en dicha interfaz. Esto se debe a su estructura molecular, que combina una parte lipofílica, afín a los aceites, y una cabeza hidrofílica, afín al agua. Al orientarse

en la interfase, el surfactante evita la separación de las fases, lo que resulta en una espuma más duradera y estable (DataPhysics Instruments USA Corp., n.d.).

2.1.1 Tipos de surfactantes

2.1.1.1 Surfactantes Aniónicos

Se distingue por contar en su porción hidrofílica con grupos funcionales que se ionizan en soluciones acuosas, generando un anión anfífilo y un catión (usualmente un metal alcalino). Estos representan aproximadamente el 55% de la producción anual mundial de tensioactivos. En la industria petrolera, son los más empleados en técnicas de recuperación mejoradas, ya que la mayoría de los sustratos presentan carga negativa, lo que reduce su adsorción sobre la superficie (Salager, 2002).

2.1.1.2 Surfactantes catiónicos

Estos surfactantes se disocian para formar un catión anfífilo y un anión sustancialmente halogenado. Su uso se limita a aplicaciones especiales donde la carga positiva del anfífilo resulta ventajosa, como en enjuagues o emulsiones asfálticas. Generalmente corresponde a compuestos de amonio cuaternario. En el sector petrolero, se han utilizado principalmente en yacimientos carbonatados, ya que han demostrado modificar la mojabilidad de estas rocas, favoreciendo que se hidraten y, por ende, el proceso de imbibición (Salager, 2002).

2.1.1.3 Surfactantes No Iónicos

Están compuestos por una extensa cadena hidrocarbonada y un grupo polar sin carga, lo que les impide formar iones en solución acuosa. Esta característica los hace compatibles con otros tipos de surfactantes. Se emplea en conjunto con otros tensoactivos para fortalecer sus propiedades

y aumentar su resistencia frente a los diversos esfuerzos en medios porosos, siendo además muy tolerantes a elevadas concentraciones de salinas (Salager, 2002).

2.1.2 Dodecibencenosulfonato de sodio (SDBS)

El dodecibencenosulfonato de sodio (SDBS) es un surfactante aniónico ampliamente utilizado en aplicaciones industriales y domésticas debido a su versatilidad y eficacia (vikem.mx, 2025). Su estructura química, compuesta por una cadena hidrofóbica de dodecilo unida a un grupo bencenosulfonato hidrofílico, le confiere propiedades anfílicas que le permiten reducir significativamente la tensión interfacial entre fases inmiscibles, como el crudo y el agua. (USDA, 2017).

2.2 Adsorción de surfactantes

La adsorción es el proceso por el cual las partículas de una sustancia, conocida como adsorbato, se acumulan en la superficie de otra sustancia, el adsorbente. En el caso de los tensioactivos, este fenómeno implica tanto la transferencia de masa como reacciones químicas. Cuando la superficie sólida se beneficia energéticamente del tensioactivo, este se transfiere desde la solución hacia la superficie, concentrándose en ella.

La adsorción de surfactante representa una pérdida crítica para la eficiencia del proceso de recuperación secundaria EOR, ya que reduce la cantidad disponible de agente activo que puede interactuar con el sistema petróleo-agua. Por ello, entender los mecanismos de adsorción y cuantificar es esencial para optimizar la formación química de los fluidos de inyección y minimizar los costos operativos (Shamsijazeyi et al, 2014), debido a lo mencionado anteriormente las pruebas de adsorción son fundamentales porque permiten establecer la cantidad de adsorbato que fue acumulado en la superficie de la roca.

2.3 Clasificación de residuos peligrosos

Según el Decreto 4741 de 2005 los residuos peligrosos son desechos que por sus características corrosivas, reactivas, explosivas, tóxicas, inflamables, infecciosas o radiactivas puede causar riesgo o daño para la salud humana y el ambiente. Así mismo, se considera residuo o desecho peligroso los envases, empaques y embalajes que hayan estado en contacto con ellos. (Ministerio de Ambiente, 2005)

2.3.1 Clasificación según características de peligrosidad

Según el Anexo III del Decreto 4741 de 2005 existen varias características que pueden catalogar los residuos peligrosos como corrosivos, reactivos, explosivos, inflamables, infecciosos o tóxicos como se muestra a continuación:

Corrosivo: Un residuo es considerado corrosivo si, por acción química, puede causar daños graves a tejidos vivos o materiales en caso de fuga. Se clasifica como corrosivo cuando es acuoso con un $\text{pH} \leq 2$ o ≥ 12.5 , o cuando es líquido y corroe acero a una tasa mayor de 6.35 mm por año a una temperatura de ensayo de 55 °C.

Reactivo: Un residuo se considera reactivo y, por tanto, peligroso, cuando al mezclarse o entrar en contacto con otros elementos presenta alguna de las siguientes propiedades:

- Genera gases, vapores o humos tóxicos (especialmente al mezclarse con agua) en cantidades que pueden dañar la salud o el ambiente.
- Contiene componentes como cianuros, sulfuros o peróxidos orgánicos que, al reaccionar, liberan emisiones tóxicas.
- Es capaz de provocar una reacción explosiva o detonante ante un estímulo fuerte o el calor en ambientes confinados.

- Produce reacciones endotérmicas o exotérmicas al contactarse con el aire, el agua u otros elementos.
- Favorece o desencadena la combustión.

Explosivo: Un residuo se considera explosivo si, en estado sólido o líquido, puede desprender gases de manera espontánea a temperaturas, presiones y velocidades que representan un riesgo para la salud y el ambiente. Además, se clasifica como explosivo si cumple alguna de las siguientes condiciones:

- Forma mezclas potencialmente explosivas con el agua.
- Es capaz de desencadenar fácilmente una reacción detonante o explosiva a 25 °C y 1 atm.
- Es una sustancia diseñada para producir una explosión o efecto pirotécnico.

Inflamable: Un residuo se clasifica como inflamable cuando, al estar en contacto con una fuente de ignición, puede arder bajo condiciones específicas de presión y temperatura o presenta alguna de las siguientes propiedades:

- Si es un gas, arde en una mezcla de aire cuyo volumen sea igual o menor al 13% a 20 °C y 1 atm.
- Si es un líquido, tiene un punto de inflamación inferior a 60 °C (exceptuando soluciones acuosas con menos del 24% de alcohol en volumen).
- Si es un sólido, puede encenderse por fricción, absorción de humedad o reacciones químicas espontáneas, y arde de forma vigorosa y persistente a 25 °C y 1 atm.
- Si es un oxidante, libera oxígeno que estimula la combustión y aumenta la intensidad del fuego en otros materiales.

Infecioso: Un residuo se considera infeccioso cuando contiene agentes patógenos —como bacterias, virus, parásitos, raquetas, hongos y priones— que, en concentración y virulencia suficientes, tienen la capacidad de causar enfermedades en humanos o animales.

Radioactivo: Un residuo se considera peligroso por ser radiactivo cuando contiene compuestos, elementos o isótopos cuya actividad supera los 70 kBq/Kg (o 2 nCi/g). Esto significa que el material emite radiaciones ionizantes —ya sean corpusculares o electromagnéticas— en niveles superiores a las radiaciones naturales de fondo, lo que puede provocar ionización en la materia y representa un riesgo.

Tóxico: Un residuo se clasifica como tóxico cuando, debido a su capacidad para provocar efectos biológicos adversos, puede causar daño a la salud humana y al ambiente. Se consideran tóxicos aquellos residuos que cumplen criterios de toxicidad basados en efectos agudos, retardados o crónicos, además de efectos ecotóxicos. Entre estos criterios se incluyen:

- Una dosis letal media (DL50) oral en ratas ≤ 200 mg/kg para sólidos o ≤ 500 mg/kg para líquidos.
- Una DL50 dérmica en ratas ≤ 1.000 mg/kg.
- Una concentración letal media (CL50) inhalatoria en ratas ≤ 10 mg/l.
- Alto potencial de irritación ocular, respiratoria o cutánea, y capacidad corrosiva sobre tejidos vivos.
- Propensión a bioacumularse y biomagnificarse en organismos y cadenas tróficas.
- Propiedades carcinogénicas, mutagénicas o teratogénicas.
- Efectos neurotóxicos, inmunotóxicos u otros efectos retardados.

- Toxicidad para organismos superiores y microorganismos terrestres o acuáticos.
- Otros criterios que las autoridades competentes consideren riesgos para la salud o el ambiente.

2.3.2 Residuos o desechos peligrosos por procesos o actividades

Según el Anexo I del Decreto 4741 de 2005, se han establecido 45 categorías para la clasificación de residuos peligrosos en función de los procesos o actividades que los generan. Conforme a dicha normativa, las borras de crudo se ubican en la categoría Y9, la cual comprende mezclas y emulsiones de desechos que contienen aceite y agua o, en su defecto, hidrocarburos y agua.

2.3.3 Residuos o desechos peligrosos por corrientes de residuos

De acuerdo con el Anexo II del Decreto 4741 de 2005, se identifican cuatro corrientes de residuos considerados peligrosos:

- A1: Desechos metálicos o que contienen metales, distribuidos en 18 categorías.
- A2: Desechos compuestos principalmente por constituyentes inorgánicos, que pueden incluir metales o materia orgánica, divididos en 6 categorías.
- A3: Desechos formados principalmente por compuestos orgánicos, con posible presencia de metales y materia inorgánica, agrupados en 20 categorías.
- A4: Deseos que pueden contener tanto componentes inorgánicos como orgánicos, integrados en 16, de las cuales se tiene en cuenta:
 - A4060: Desechos resultantes de mezclas y emulsiones de aceite y agua o de hidrocarburos y agua.
 - A4130: Envases y contenedores que albergan desechos con sustancias mencionadas en el Anexo I.

2.4 Aspectos teóricos y composicionales de las borras

Las borras aceitosas son residuos semisólidos que se forman principalmente en las facilidades de superficie de la industria petrolera, tales como tanques de almacenamiento, separadores y líneas de flujo. Su generación ocurre progresivamente con el tiempo, como resultado de procesos de sedimentación y envejecimiento del crudo. Están compuestas por una mezcla compleja de hidrocarburos complejos como asfaltenos y resinas, sólidos inorgánicos (arena, fragmentos de roca y sedimentos), restos de lodos de perforación, materia orgánica, sales, y agua.

Estas mezclas reducen su gravedad API (inferior a 10°API), formando masas viscosas y densas que obstruyen tuberías y disminuyen la capacidad de almacenamiento en tanques (Carraco M, 2000). Su composición varía según el tipo de crudo, pero generalmente incluye parafinas, asfaltenos, agua, azufre, óxidos metálicos, gases y sedimentos. La Tabla 1 resume la composición promedio del crudo asociado a estos materiales:

Tabla 1.

Composición del crudo

	Elementos (%)
C	83 a 87%
H	11 a 14%
O	0 a 5%
S	0 a 6%
N	0 a 0,5%
Compuestos orgánicos	0 a 0,1%

Nota: composición aproximada del crudo. Adaptado Barrozo, A. (2003) de (SOCIEDAD NACIONAL DE MINERÍA PETRÓLEO Y ENERGÍA, 2007).

Los residuos clasificados como borras aceitosas presentan una composición altamente variable, cuya proporción depende del origen y tiempo de almacenamiento del crudo. En general, su contenido de aceite puede oscilar entre el 10 % y 60 %, mientras que el contenido de agua se encuentra en un rango de 0 % a 20 %. Además, estas borras contienen una fracción significativa de sólidos, que puede variar entre el 25 % y el 80 %, conformados por materiales inorgánicos, orgánicos y sedimentos acumulados con el tiempo (Cardona & Rodríguez, 2011).

2.4.1 Clasificación del crudo

- **Parafínicos:** Alta fluidez (densidad ≈ 0.85 kg/L, API $> 31^\circ$). Ideales para producir lubricantes y gasolinas.
- **Nafténicos:** Viscosos y oscuros (densidad ≈ 0.95 kg/L, API 10-22 $^\circ$). Generan residuos como asfalto.
- **Mixtos:** Combina múltiples hidrocarburos (densidad ≈ 0.9 kg/L, API 22-31 $^\circ$).
- **Dulce:** Bajo azufre ($<0.5\%$), menor costo de refinación.
- **Agrío:** Alto azufre ($>1\%$), requiere procesos complejos para eliminarlo.

2.5 Tratamiento de borras

Las borras están constituidas por tres componentes principales: una fase aceitosa, una acuosa y una sólida. Su tratamiento se estructura en tres niveles secuenciales: primario (separación inicial de fases), secundario (procesamiento químico o biológico) y terciario (refinamiento final), aplicándose metodologías específicas en cada etapa para lograr una gestión integral de estos residuos.

2.5.1 Métodos de tratamiento

El tratamiento de estos residuos puede llevarse a cabo mediante una Unidad de Desorción Térmica (UDT), donde el material es expuesto a temperaturas superiores a 500 °C con el fin de evaporar el agua y los hidrocarburos presentes, los cuales luego se condensan y se separan por diferencia de densidades, resultando en sólidos completamente inertes. Como alternativa, también puede emplearse la centrifugación, que utiliza la fuerza centrífuga generada por la rotación del equipo para separar las partículas sólidas, permitiendo la recuperación del hidrocarburo para su reutilización (Cardona & Rodríguez, 2011).

2.5.1.1 Desorción térmica

La desorción térmica es una técnica de tratamiento que utiliza altas temperaturas para volatilizar las fases presentes en las emulsiones de las borras de producción. El proceso se desarrolla en dos etapas: inicialmente, se aplica calor al residuo aceitoso para vaporizar los fluidos, los cuales son transportados por una corriente de gas. En una segunda etapa, dicha corriente es tratada para recuperar el hidrocarburo. Este procedimiento se lleva a cabo en la Unidad de Desorción Térmica (UDT) y consiste en calentar el material a temperaturas que varían entre 315 °C y 648 °C, dependiendo del punto de ebullición del componente más volátil. Como resultado, se busca la separación de las fases de la emulsión mediante un proceso de condensación que, por diferencia de densidades, permite separar el agua y el aceite. No obstante, el método no es eficaz para separar partículas finas, y puede generar cenizas como producto de la incineración de ciertos sólidos. Su aplicación requiere un conocimiento preciso de las propiedades de las borras, ya que su eficiencia depende directamente de la composición del residuo, alcanzando generalmente un rendimiento del 50% en condiciones reales (Cardona & Rodríguez, 2011).

2.5.1.2 Tratamiento por centrifugación

El tratamiento por centrifugación utiliza la fuerza centrífuga generada durante la rotación para lograr la separación de las fases presentes en la emulsión, así como de los sólidos suspendidos, aplicando el principio de separación por densidad. A diferencia del proceso de desorción térmica, este método permite la recuperación simultánea de agua, aceite y sólidos cuando se emplea una centrífuga trifásica. En cambio, el uso de una centrífuga decantadora produce dos corrientes principales: una de sólidos y otra de fluidos.

Para mejorar la eficiencia del proceso, la centrifugación suele complementarse con otras operaciones, como el precalentamiento de la borra antes del tratamiento o la adición de agentes químicos durante el mismo, los residuos son sometidos inicialmente a un calentamiento entre 70 °C y 80 °C. Esta etapa térmica tiene como objetivo disminuir la viscosidad del material, lo cual facilita tanto el transporte del residuo como la acción de los agentes químicos aplicados posteriormente, tales como surfactantes y rompedores de emulsión. La selección de estas operaciones auxiliares depende directamente de la composición específica de la borra, ya que influyen significativamente en la efectividad de la separación de fases. (Cardona & Rodríguez, 2011; Gómez Ocampo & Gómez Domínguez, 2015).

2.6 Impactos ambientales derivados de la gestión deficiente de borras

2.6.1 Contaminación del suelo y aguas

Las borras aceitosas contienen hidrocarburos pesados, metales y compuestos tóxicos que, al filtrarse en el suelo, alteran su estructura química y reducen su fertilidad. Esta contaminación también afecta cuerpos de agua superficiales y subterráneos, generando toxicidad para la vida acuática y comprometiendo fuentes de agua potable.

En los campos petroleros de Castilla y Chichimene (Colombia), la disposición incorrecta de borras ha provocado la contaminación de suelos y ríos, con altos niveles de hidrocarburos totales (HTP) y metales pesados detectados en análisis ambientales (Torres, 2014).

2.6.2 Daños a la biodiversidad

El contacto prolongado con compuestos derivados del petróleo y agentes químicos en ambientes terrestres y acuáticos desencadena la muerte de organismos, la destrucción de sus entornos naturales y desequilibrios en las redes alimentarias. Un ejemplo claro se observa en áreas donde la biorremediación ha sido implementada de forma inadecuada: humedales han sufrido deterioro irreversible, acompañado de un declive significativo en las comunidades de aves y especies piscícolas.

2.6.3 Emisiones de gases tóxicos y contribución al cambio climático

Como resultado de las altas temperaturas que prevalecen en las áreas de extracción, la descomposición de borras libera metano (CH_4) y compuestos orgánicos volátiles (COV), que contribuyen al calentamiento global y afectan la calidad del aire. Además, la incineración incontrolada de borras aumenta la liberación de gases como dióxido de azufre (SO_2) y partículas finas, asociadas a enfermedades respiratorias en poblaciones cercanas.

2.6.4 Impactos en la salud humana

Varios análisis llevados a cabo en piscinas de biorremediación han revelado la presencia de ciertos contaminantes en las borras, como el cobre. Este metal, en dosis elevadas, puede ocasionar anemia, irritación del estómago e intestinos, así como daños renales y hepáticos. Por otro lado, el cromo también se ha detectado. La exposición a niveles bajos puede provocar irritación en la piel

y la aparición de úlceras, mientras que una exposición prolongada podría afectar el hígado, los riñones, el tejido nervioso y el sistema circulatorio (Baudran, Y, 2005).

2.6.5 Concentración micelar crítica (C.M.C)

La concentración micelar crítica (CMC) es la cantidad mínima de tensoactivo necesaria para que, de manera espontánea, se formen micelas. Desde una perspectiva fisicoquímica, la CMC representa el umbral por debajo del cual las moléculas de tensoactivo se encuentran disueltas como monómeros y se organizan en la interfase. Una vez que se supera este límite, las moléculas comienzan a autoensamblarse en forma de micelas.

2.7 Pruebas de detergencia

2.7.1 Tensión interfacial

La tensión interfacial se origina cuando dos líquidos inmiscibles se ponen en contacto formando una interfase, como consecuencia de un desequilibrio de fuerzas de atracción de tipo Van der Waals, pero de magnitudes diferentes, y cuyo valor se encuentra dentro de las tensiones superficiales individuales de cada líquido (García, Z, 2018).

2.7.2 Tensión superficial

La tensión superficial es una característica de los líquidos que les permite resistir la acción de fuerzas externas. Este fenómeno puede apreciarse en situaciones como la de ciertos insectos que caminan sobre el agua o en objetos livianos, como una hoja de afeitar, que pueden mantenerse sobre la superficie del líquido a pesar de ser más densos que él. Esta propiedad se debe a la fuerza de atracción entre moléculas similares, conocida como cohesión, y se expresa como fuerza por unidad de longitud o energía por unidad de área (Tamir & Ruiz, 2012).

2.8 Mezclas asfálticas

2.8.1 *Mezcla asfáltica natural*

La mezcla asfáltica natural es un material compuesto de agregados minerales y un ligante bituminoso que se encuentra en estado natural o ha sido extraído con mínimas modificaciones. Se caracteriza por tener propiedades adecuadas para su uso en pavimentación sin necesidad de una formulación compleja, ya que su composición equilibrada puede cumplir con requerimientos de estabilidad, durabilidad y resistencia. Este tipo de mezcla es especialmente valorada por su comportamiento mecánico y su facilidad de aplicación en zonas con requerimientos técnicos moderados (Instituto Nacional de Vías [INVIAS], 2022).

2.8.2 *Agregantes pétreos*

Los agregados pétreos son materiales granulares como grava, arena o piedra triturada, que constituyen el esqueleto mineral de la mezcla asfáltica. Estos deben tener propiedades físicas y químicas que aseguren su resistencia a la meteorización, durabilidad, y buena adherencia con el ligante asfáltico. No deben reaccionar negativamente con el agua ni con otros componentes del pavimento. La proporción, granulometría y calidad de estos materiales son fundamentales para lograr una mezcla densa y estable, evitando fenómenos como la segregación o el desprendimiento del ligante (INVIAS, 2022).

2.8.3 *Ligante asfáltico*

El ligante asfáltico, también conocido como cemento asfáltico, es el componente que recubre los agregados y proporciona cohesión en la mezcla asfáltica. Puede ser de tipo convencional o modificado con polímeros, y su selección depende del tránsito proyectado y las condiciones climáticas del lugar. El ligante debe aplicarse a temperaturas que aseguren su fluidez

sin llegar a deteriorarlo, permitiendo una envoltura homogénea de los agregados. La calidad del asfalto influye directamente en la durabilidad y desempeño del pavimento (INVIAS, 2022).

2.8.4 Tipos de mezclas asfálticas

Las mezclas asfálticas en caliente se clasifican principalmente en densas (MDC), semidensas (MSC), gruesas (MGC) y de alto módulo (MAM) y sus representaciones se muestran en la tabla 2. Esta clasificación se basa en la granulometría y el uso estructural dentro del pavimento (capa de rodadura, intermedia o base). Las mezclas de alto módulo, por ejemplo, son utilizadas en vías con tránsito pesado debido a su alta rigidez. La selección del tipo de mezcla también está condicionada por el espesor requerido y el nivel de tránsito proyectado, tal como se especifica en las tablas técnicas del artículo (INVIAS, 2022).

Tabla 2.

Franjas granulométricas para mezclas asfálticas en caliente de gradación continua

Tipo de Mezcla	37.5 mm (1½")	25.0 mm (1")	19.0 mm (¾")	12.5 mm (½")	9.5 mm (⅜")	4.75 mm (No. 4)	2.00 mm (No. 10)	0.425 mm (No. 40)	0.180 mm (No. 80)	0.075 mm (No. 200)
Densa										
MDC-25	100	80–95	67–85	60–77	43–59	29–45	14–25	8–17	4–8	
MDC-19		100	80–95	70–88	49–65	29–45	14–25	8–17	4–8	
MDC-10				100	65–87	43–61	16–29	9–19	5–10	
Semidensa										
MSC-25		100	80–95	65–80	55–70	40–55	24–38	9–20	6–12	3–7
MSC-19			100	80–95	65–80	40–55	24–38	9–20	6–12	3–7
Gruesa										
MGC-38	100	75–95	65–85	47–67	40–60	28–46	17–32	7–17	4–11	2–6
MGC-25		100	75–95	55–75	40–60	28–46	17–32	7–17	4–11	2–6

Alto módulo									
MAM- 25	100	80-95	65-80	55-70	40-55	24-38	10- 20	8-14	6-9

Nota: Adaptado del Instituto Nacional de Vías (INVIAS, 2022).

2.9 Métodos de adsorción

Pruebas Estáticas: se realiza una mezcla de roca pulverizada con una solución de surfactante bajo condiciones controladas de agitación, temperatura y tiempo. Luego, se mide la concentración del surfactante remanente por técnicas como UV-VIS, conductividad, o cromatografía líquida, y se calcula la cantidad absorbida por diferencia de masas. (Fletcher et al, 2012).

La adsorción estática de un surfactante en sistemas dispersos se evalúa a partir de la introducción de una concentración conocida del compuesto en el medio, permitiendo que el sistema evolucione hasta alcanzar el equilibrio. Una vez estabilizado, se procede a la separación de los sólidos presentes, y se determina la cantidad de surfactante remanente en la fase líquida. A partir de esta diferencia de concentraciones, es posible calcular la cantidad de surfactante adsorbido mediante una expresión matemática que relaciona ambos valores.

$$\Gamma = \frac{(C_0 - C)V}{ma_{sp}} \quad (1)$$

Donde Γ es la cantidad de surfactante adsorbida (mg/m^2), C es la concentración de surfactante al alcanzar el equilibrio (mg/ml), C_0 es la concentración inicial de surfactante (mg/ml), V es el volumen de la solución (ml), m es la masa de las partículas y a_{sp} es el área específica de las partículas. (Behrens, 2013).

Pruebas Dinámicas: también llamadas core flooding tests, implican la inyección de surfactante a través de núcleos cilíndricos de roca simulando condiciones del yacimiento a escala laboratorio, de esta manera analizar el comportamiento del surfactante en flujo continuo a través del medio poroso, incluyendo su adsorción y el efecto sobre la recuperación del crudo (Shamsijazeyi et al, 2014), en la tabla 3 se comparan ambas pruebas.

Tabla 3.

Cuadro Comparativo de las dos metodologías

Criterio	Prueba Estática	Prueba Dinámica
Objetivo	Cuantificación sistema sin flujo.	Condiciones flujo real.
Tipo de muestra	Roca triturada.	Núcleo cilíndrico.
Condición de flujo	Sin flujo.	Flujo continuo.
Duración	12–24 h.	Minutos a horas.
Equipos requeridos	Básicos de laboratorio.	Core flooding avanzado.
Precisión	Alta en laboratorio.	Alta en campo.
Costos	Bajo a medio.	Medio a alto.
Facilidad	Alta.	Media-baja.

La prueba de Adsorción dinámica ofrece una mayor representatividad de las condiciones reales en el yacimiento lo cual es fundamental para realizar un estudio avanzado o un diseño del campo representativo las desventajas que puede presentar es sus altos costos y la preparación de la prueba es de mayor complejidad.

La prueba de adsorción estática funciona muy bien para las etapas exploratorias, para implementarla en el laboratorio o cuando se quieren realizar varias evaluaciones con rapidez y bajo costos.

3. Materiales y métodos

3.1 Materiales y equipos

La configuración experimental se efectuó en el laboratorio del Grupo de Investigaciones en Corrosión (GIC) de la Universidad Industrial de Santander, ubicado en el Parque Tecnológico Guatiguará. En la tabla 4 se detallan los insumos y los instrumentos empleados.

Tabla 4.

Materiales, reactivos y equipos utilizados en la investigación.

Equipos de laboratorio	
Crudo pesado	
Dodecibencensulfonato de sodio	Pureza 99% (SDBS, Sigma-Aldrich©, EE.UU.)
Arena	
Asfalto	
Grava	
Cloruro de sodio	Pureza 99% (NaCl, Merck KGaA, Alemania)
Viscosímetro	B-One Plus @Lamy Rheology
Espectrofotómetro UV-Vis	Multiskan™ GO Microplate, Thermo Fischer
Baño de temperatura	Memmert WNB 7-230V 7L
Tamizador	MTS-810
Centrifuga	EBA 21 (Andreas Hettich GmbH y Co.KG©, Alemania)
Picnómetro	
Balanza	
Conductímetro	
Agitador magnético o rotatorio	

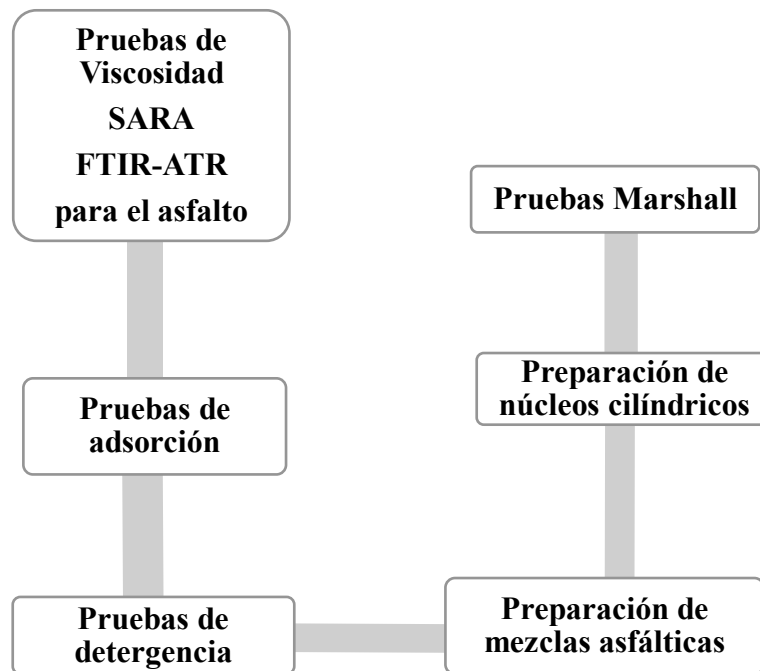
3.2 Metodología experimental

En esta metodología se aborda cada etapa del proceso teniendo en cuenta los objetivos principales del proyecto. Esta investigación inicia desde el tratamiento de borras de crudo hasta la

fabricación de plugs o cilindros de mezclas asfálticas, asegurando que cada variable experimental sea controlada y evaluada en función de su impacto en la calidad del producto final. En la Figura 1 se evidencia el procedimiento que se realizó en el curso de esta investigación.

Figura 1.

Metodología experimental del proyecto



3.2.1 Caracterización fisicoquímica del asfalto

3.2.1.1 Viscosidad

La viscosidad del crudo y del asfalto se evaluó utilizando un viscosímetro rotacional B-One Plus de la marca Lamy Rheology, el cual permite operar en un rango de torque de 0,05 a 13 mNm y admite velocidades variables desde 0,3 hasta 300 rpm, sin restricciones en el número de valores intermedios. Para garantizar condiciones térmicas controladas durante las mediciones, se empleó un baño de circulación refrigerado marca VWR, que mantiene la temperatura constante

mediante la recirculación de un fluido alrededor del recipiente de ensayo. Este sistema permitió realizar mediciones de viscosidad a distintas temperaturas. En el caso del asfalto, las pruebas se realizaron a 50, 60 y 70 °C.

3.2.1.2 Análisis SARA

La separación de los asfaltenos se llevó a cabo conforme a la metodología establecida en la norma ASTM D6560, utilizando n-heptano en una proporción volumétrica de 40:1. Posteriormente, se recupera el solvente mediante rotoevaporación y la fracción residual de maltenos se fraccionará en saturados, aromáticos y resinas (SAR) mediante elución con solventes de distinta polaridad en cromatografía de columna abierta, siguiendo la norma ASTM D2007.

3.2.1.3 Espectroscopía de Infrarrojo FTIR-ATR

El crudo y el asfalto se examinará mediante espectroscopía FTIR utilizando un espectrómetro marca Nicolet™ Summit™ X FTIR de ThermoFisher, equipado con una celda ATR y un cristal de reflexión de diamante de un solo paso, a incluir un rango de longitudes de onda de 400 a 4000 cm^{-1} . Se colocó una pequeña muestra de asfalto y se utiliza la prensa del equipo para adquirir correctamente los espectros.

3.2.2 Prueba de adsorción

3.2.2.1 Procedimiento de la prueba de adsorción estática

El procedimiento que se llevó a cabo para realizar la prueba de adsorción estática fue de la siguiente manera, primero se tomó una muestra de sólidos representativos, posteriormente se trituró la muestra hasta pulverizarla, y luego se implementó un mecanismo de separación física llamado tamizaje. Mediante un sistema de mallas los sólidos fueron separados en tamaños de muestras mayores de 100 micras y seguidamente se lavaron y fueron sometidas al proceso de

secado en un horno a una temperatura de 105 °C. Seguidamente, en una balanza analítica se pesaron 80 gramos de la muestra previamente tratada y se le agregaron 20.48 gramos de crudo en un recipiente adecuado. Las muestras se mezclaron hasta formar una mezcla homogénea, y esta se dejó en el horno a una temperatura de 65 °C, durante una hora. Posteriormente, se pesaron 80 gramos de la muestra seca para preparar dos formulaciones, las cuales se toman como bases para las pruebas de detergencia.

En la primera formulación se pesó en la balanza analítica 0.2 gramos de la muestra impregnada de crudo y se dispuso en un tubo falcon. Este proceso se repitió cuatro veces y a cada una de las muestras se les adicionaron 12 mililitros de soluciones con concentraciones de 1000, 2500, 5000 y 10000 ppm, respectivamente.

Para la segunda formulación se pesó en la balanza analítica 0.2 gramos de la muestra seca y se realizó el mismo tratamiento previamente mencionado en la primera muestra.

Posteriormente, las dos formulaciones se colocaron en un agitador durante 24 horas. Finalizado este proceso, las muestras fueron centrifugadas a 3500 rpm durante 6 minutos. Luego, se dejaron reposar por 15 minutos para permitir la decantación física, tras lo cual se realizaron las pruebas de adsorción en el equipo UV-VIS. Para determinar la cantidad de surfactante adsorbido sobre el sólido, se calculó la capacidad de adsorción a partir de la diferencia entre la concentración inicial y final de la solución. Esta relación se expresa mediante la ecuación 2.

Cálculo de Adsorción:

$$q = \frac{(C_o - C_f) \cdot V}{m} \quad (2)$$

Q = Cantidad adsorbida (mg/g)

Co = Concentración inicial de surfactante (mg/mL)

Cf = Concentración final del surfactante (mg/mL)

V = Volumen de la solución (mL)

M = Masa de la muestra de roca (g)

3.2.3 Prueba de detergencia

Para la realización de las pruebas de detergencia se aplicó un modelo factorial 2³, considerando dos niveles (mínimo y máximo) para cada una de las tres variables de estudio: temperatura, concentración de surfactante y relación de arena/crudo. En el caso de la temperatura, se establecen valores de 40 °C y 70 °C, respectivamente. Según la revisión bibliográfica realizada, diversos autores han reportado que temperaturas entre 60 °C y 80 °C resultan efectivas para mejorar los procesos de separación de fases durante el tratamiento térmico de borras aceitosas. En función de estos antecedentes, se establecieron los valores de 40 °C y 70 °C como niveles a evaluar experimentalmente, con el fin de explorar el efecto de la temperatura en la eficiencia del rompimiento de la emulsión crudo-agua-sólidos, sin alcanzar condiciones térmicas que comprometan la integridad química de los componentes.

Para la concentración del surfactante se definieron niveles de 650 ppm y 1300 ppm, mientras que la relación de arena y crudo se determina una proporción mínima de 40 % arena y 60 % crudo, y una proporción máxima de 20 % arena y 80 % crudo, también se tuvo en cuenta una cantidad de sal constante de 1000 ppm. En la tabla 5 se presenta el diseño experimental de las pruebas de detergencia realizadas.

Tabla 5.

Diseño factorial 2³ para pruebas de detergencia

No. De ensayos	Factores		
	Temperatura °C	Concentración SDBS	Relación de crudo: arena
1	70	1300	80:20
2	70	1300	60:40
3	70	650	60:40
4	40	650	60:40
5	70	650	80:20
6	40	650	80:20
7	40	1300	80:20
8	40	1300	60:40

3.2.4 Preparación de núcleos cilíndricos

Para la elaboración de los núcleos cilíndricos se consideraron no solo las borras, sino mezclas asfálticas basadas en el artículo de INVIAS 450. Se elaboraron un total de nueve núcleos, ocho de estos utilizando borra como materia prima en su elaboración y un núcleo asfáltico base

elaborado de manera convencional con asfalto y agregados pétreos descritos en el artículo 450 de INVIAS, esto con el objetivo de evaluar su resistencia mecánica y determinar las condiciones óptimas para satisfacer los requisitos del proyecto. Este proceso incluyó la integración precisa de todos los componentes en proporciones específicas, seguido de rigurosos ensayos mecánicos para comparar el desempeño de cada formulación. La selección final se basó en identificar el núcleo que ofrece un equilibrio ideal entre resistencia estructural y estabilidad, asegurando así su viabilidad para la aplicación prevista.

Se diseñó un modelo factorial 2^3 para evaluar la influencia de tres variables: el contenido de asfalto, el contenido total de borra y crudo, y el porcentaje de crudo relativo a la borra. Los niveles establecidos para cada factor fueron: 5.0 % y 5.5 % para el asfalto, 3.5 % y 7.0 % para el contenido conjunto de borra y crudo, y 17.7 % y 34.72 % para el contenido de crudo con respecto a la masa de borra, definidos con base en los resultados de la revisión bibliográfica y las pruebas previas de detergencia.

La implementación de este modelo factorial permitió investigar de manera sistemática tanto el efecto individual de cada variable como sus posibles interacciones, facilitando la identificación de la formulación óptima para cumplir con los requisitos del proyecto.

Tabla 6.*Diseño factorial 2³ para preparación de mezclas asfálticas.*

No. De ensayos	Factores		
	Ligante	%Crudo respecto a borra	Borra y crudo
1	+	+	+
2	+	+	-
3	+	-	-
4	-	-	-
5	+	-	+
6	-	-	+
7	-	+	+
8	-	+	-

Para los porcentajes de agregados pétreos se tuvo en cuenta el artículo No. 450 de INVIAS, donde se observa la tabla 450-6, la cual muestra las franjas granulométricas para mezclas asfálticas en caliente. El tipo de mezcla asfáltica que se eligió fue una mezcla densa llamada MDC-10 y los porcentajes de agregados pétreos se muestran en la tabla 7.

Tabla 7.*Franja granulométrica para mezcla asfáltica MDC-10*

TAMIZ (mm/U.S. Standard)	% PASA
No 3/8	13
No 4	26
No 10	32
No 40	10
No 80	9
No 200	10

Nota: Adaptado Barrozo, A. (2003) de Instituto Nacional de Vías (INVIAS, 2022).

Teniendo en cuenta todo lo anterior dicho, se realizó una tabla con los porcentajes de cada agregado para cada núcleo asfáltico como se muestra en la tabla 8.

Tabla 8.

Porcentajes de agregados para cada núcleo asfáltico.

Prueba	Grava+Arena%	Borra y crudo%	Ligante%	%crudo respecto a borra
Blanco	94.5	0	5.5	0
1	87.5	7	5.5	34.72
2	88	7	5	34.72
3	88	7	5	17.7
4	91.5	3.5	5	17.7
5	91	3.5	5.5	17.7
6	91	3.5	5.5	34.72
7	91.5	3.5	5	34.72
8	87.5	7	5.5	17.7

Una vez establecida la composición de cada formulación, se procedió a calentar la mezcla a una temperatura de 140 °C, mezclando esta cada 20 minutos con el fin de asegurar que los agregados pétreos y la borra quedaran completamente recubiertos por el ligante asfáltico. Cuando se evidenció una cobertura homogénea, la mezcla fue vertida en moldes cilíndricos de PVC previamente cortados, lo cual facilitó el posterior desmoldeo de los núcleos. La compactación se realizó aplicando 75 golpes con una maza estandarizada, según lo establecido en la norma IRAM 6845, garantizando así una consolidación adecuada del material.

Cabe destacar que cada núcleo tenía una altura de 11 cm, y se procedió a cortar 2 cm en cada extremo para facilitar el análisis interno. Esta preparación permitió evaluar la distribución y

el orden de los agregados pétreos, el asfalto y las borras en cada formulación. Además, cada uno de estos núcleos alcanzó un peso total promedio de 650 gramos.

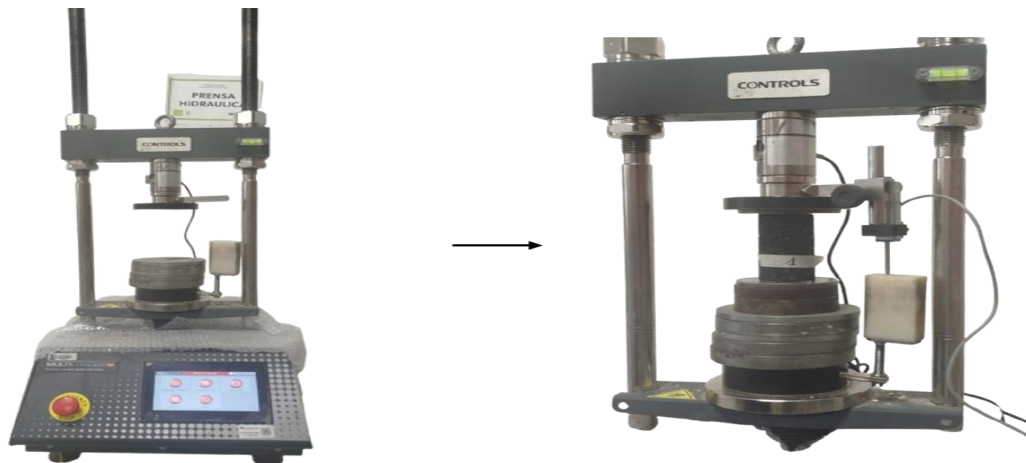
3.2.5 Pruebas Marshall

Se realizaron pruebas Marshall para determinar cuál mezcla asfáltica resulta más factible para el proyecto. Estas pruebas se llevaron a cabo siguiendo el procedimiento estandarizado establecido en la norma ASTM D1559-89 (ASTM International, 1989), lo que permitió evaluar con precisión las propiedades mecánicas de las mezclas asfálticas en términos de estabilidad y flujo.

Para realizar la prueba Marshall, se prepararon especímenes cilíndricos a partir de la mezcla asfáltica, la cual integró las borras tratadas, el asfalto y los agregados pétreos. Cada mezcla asfáltica fue compactada en un molde mediante un número predefinido de golpes. Posteriormente, los núcleos se sometieron a una carga compresiva en el probador universal automático MULTILOADER como lo ilustra la figura 2. Durante el ensayo, se registró la estabilidad, definida como la carga máxima que soporta el núcleo antes de fallar, y el flujo, que refleja la deformación vertical que experimenta la muestra bajo dicha carga.

Figura 2.

Probador universal automático MULTILOADER y núcleo 1 bajo tensión.



4. Resultados y discusión

4.1 Análisis composicional SARA y viscosidad del asfalto

La Tabla 9 presenta los resultados del análisis composicional SARA y los valores de viscosidad correspondientes al asfalto utilizado. Al contrastar estos datos con los rangos típicos reportados en la literatura para asfaltos empleados como ligantes saturados (14–28 %), aromáticos (32–50 %), resinas (10–20 %) y asfaltenos (12–30 %) se puede concluir que el asfalto analizado en este estudio presenta una distribución composicional adecuada para su uso como agente ligante en mezclas asfálticas (Wang et al., 2021; Li et al., 2022).

Tabla 9.

Propiedades fisicoquímicas del asfalto

Propiedades	Valor
Saturados, % peso	26.55
Aromáticos, % peso	34.07
Resinas, % peso	25.09
Asfaltenos, % peso	14.29
Viscosidad, cp (@ 50 °C)	104670
Viscosidad, cp (@ 60 °C)	43762
Viscosidad, cp (@ 70 °C)	19245

Los valores de viscosidad obtenidos en el rango de 50 a 70 °C son consistentes con los típicamente reportados para asfaltos empleados como ligantes. Estos elevados niveles de viscosidad se atribuyen al alto contenido de resinas y asfaltenos, los cuales representan aproximadamente el 39,5 % en peso de la composición del asfalto.

4.2 Caracterización del asfalto usando espectroscopía de Infrarrojo FTIR-ATR

El espectro obtenido mediante FTIR-ATR muestra una banda de baja intensidad alrededor de los 1700 cm^{-1} , atribuible a la presencia del grupo carbonilo ($\text{C}=\text{O}$), comúnmente asociado a compuestos con funciones ácidas, aldehídicas o cetónicas. Asimismo, se identifican señales correspondientes a estructuras aromáticas (alrededor de 1605 cm^{-1}) y alifáticas, en el rango de 2850 a 2951 cm^{-1} . Además, los resultados confirman la presencia de grupos funcionales vinculados a sulfoxidos y enlaces $\text{C}-\text{S}$ tanto de tipo aromático como alifático. Esta composición funcional del asfalto favorece la formación de interacciones químicas fuertes con los agregados minerales, contribuyendo a la estabilidad de las mezclas asfálticas. Lo anteriormente mencionado se muestra en la figura 3 y la tabla 10.

Figura 3.

Distribución de regiones del espectro de infrarrojo FTIR-ATR para el asfalto.

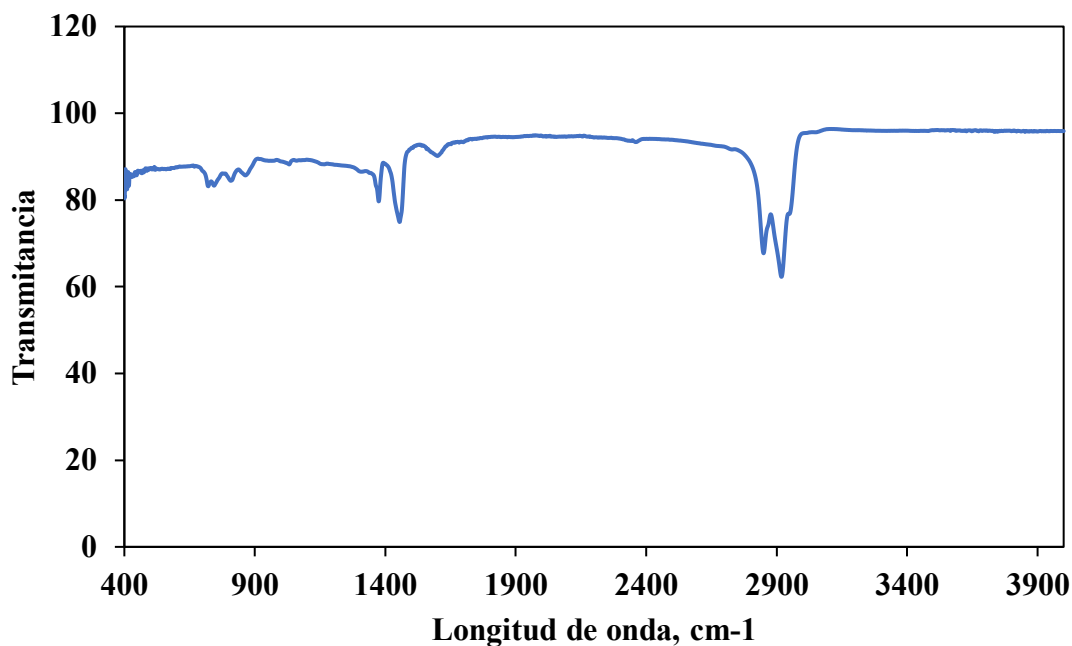


Tabla 10.*Distribución de estructuras aromáticas y alifáticas presentes*

Longitud de onda	Asignación
721	Cadenas alifáticas, $n \geq 4$
743	Vibración débil por presencia C-S (S - aromático)
810	2 H adyacentes
866	Flexión fuera plano Car-H
1030	Movimiento C-H en el plano del anillo fenilo, vibración S=O
1099	Estiramiento sulfóxido S=O
1260	CH aromática
1375	Flexión simétrica de RCH ₃ -
1456	Flexión simétrica de R ₂ CH ₂ - o RCH ₃ -
1605	Estiramiento de C=C aromático
1697	Estiramiento C=O
2850	Estiramiento simétrico R ₂ CH ₂
2921	Estiramiento asimétrico R ₂ CH ₂
2951	Estiramiento asimétrico R-CH ₃

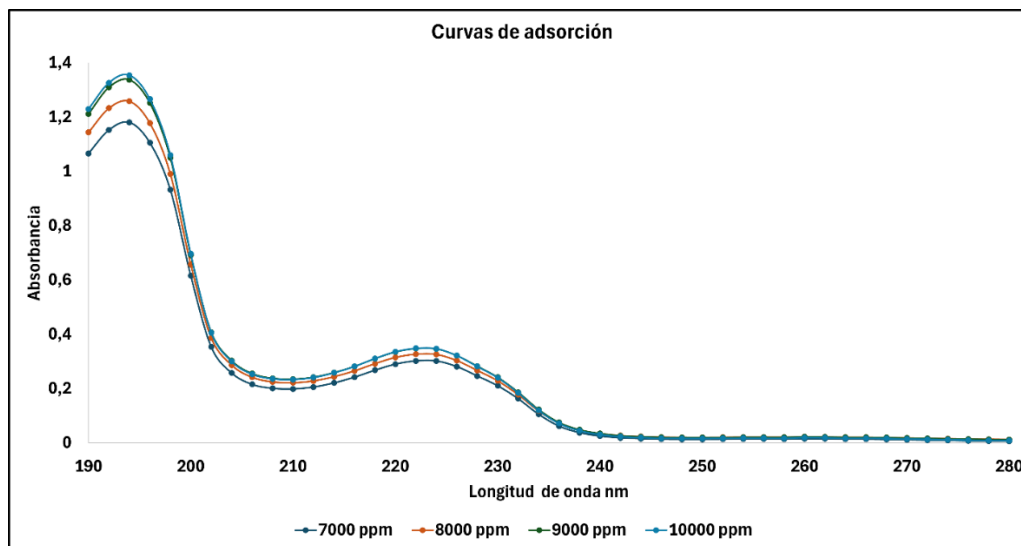
4.3 Comportamiento de la adsorción de surfactante SDBS

La concentración de surfactante adsorbida se determinó de forma indirecta con la información reportada en el equipo de espectroscopía UV-VIS. Para los análisis se tomó una muestra de agua desionizada y se colocó en la celda de cuarzo del equipo para la medición del blanco de la muestra, este proceso se lleva a cabo pasando un haz de luz por la celda y se mide la

longitud de onda en nanómetro vs la adsorción lo cual quedara grabado en la memoria del equipo para realizar la comparación en las futuras mediciones de las soluciones preestablecidas.

Los resultados obtenidos para las soluciones preparadas se encuentran en la figura 4.

Figura 4.
Curvas de adsorción del surfactante SDBS



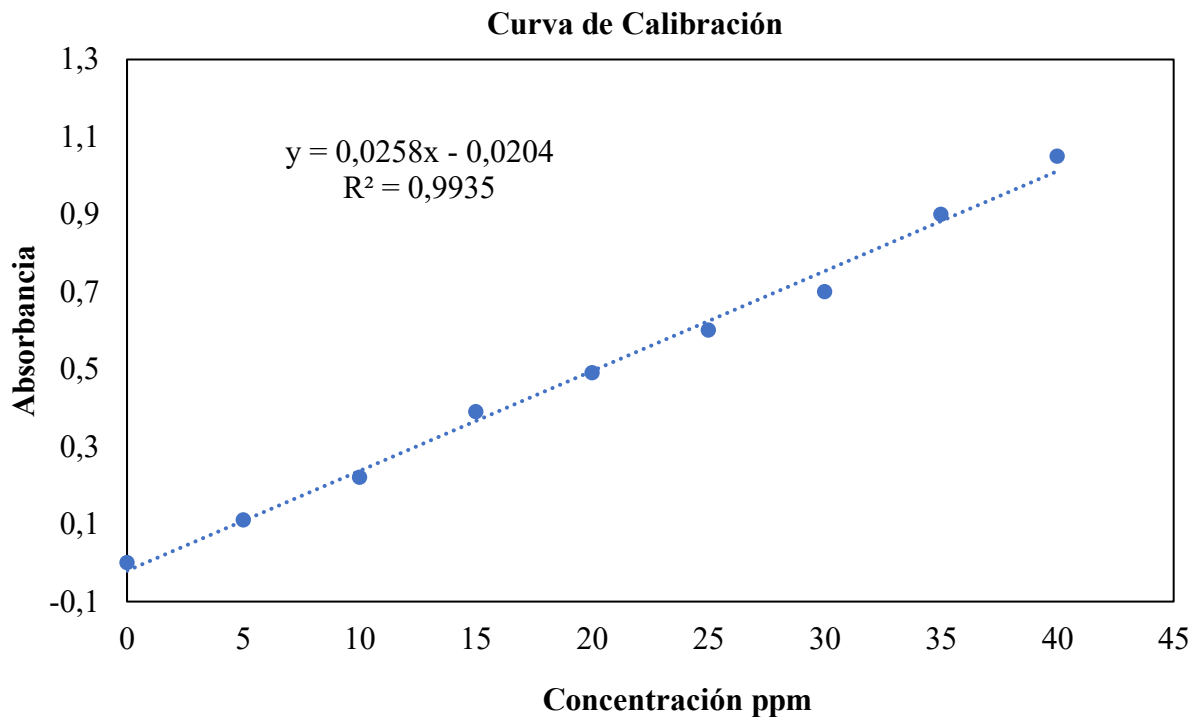
Los datos obtenidos por el equipo de espectroscopía UV-VIS mide la relación entre la adsorción y la longitud de onda por eso es fundamental establecer una curva de calibración que permita relacionar la concentración con la adsorción conocida.

La curva de calibración se obtiene midiendo la absorbancia en el equipo de espectroscopía UV-VIS a unas concentraciones conocidas y posteriormente se realiza una gráfica que relacione la absorbancia vs concentración, si el diseño está bien realizado se obtiene un modelo de línea recta de la siguiente manera:

$A = mC + b$ con una alta correlación lineal $R^2 \geq 0.99$ para que el modelo presente validez.

En el modelo presentado se realizó la curva de calibración con las siguientes concentraciones presentadas en la Figura 5.

Figura 5.
Curva de calibración



El modelo para la curva de calibración fue la siguiente ecuación:

$$Y = 0.0258X - 0.0204 \quad (3)$$

En la tabla 11. definiremos las variables correspondientes:

Tabla 11.*Variables y valores de la curva de calibración.*

Variable	Valor
Y	Adsorción
X	Concentración
M=Es la pendiente	0.0258
B= Corte con el eje Y	-0.0204

Luego de tener la curva de calibración se tomaron los valores representativos de concentraciones que permitieran calcular la adsorción de surfactante de la muestra en dos etapas:

Primera etapa: Se tomó una muestra de la borra previamente limpiada, seca y pulverizada con un tamaño de partícula de 100 micras la cual se les calculó la adsorción a las concentraciones representativas con el objetivo de determinar qué cantidad del surfactante acumulada en la superficie de la muestra seca y los resultados fueron los siguientes.

Se utilizó la siguiente nomenclatura para reportar los resultados obtenidos.

- ❖ C_o = Concentración inicial en (%ppm)
- ❖ C_e = Concentración de equilibrio (%ppm)
- ❖ C_{ed} = Concentración en equilibrio ajustada por dilución (%ppm)
- ❖ C_{ads} = Concentración adsorbida (%ppm)
- ❖ C_s = Cantidad de surfactante adsorbido (mg)

La Tabla 12 contiene el resumen de los datos obtenidos en las pruebas de adsorción estática, en este modelo se calculó la adsorción a diferentes concentraciones las cuales fueron establecidas en el momento del diseño, con los resultados obtenidos se selecciona la longitud de onda en la que el surfactante tiene su máxima adsorción. Esa será la longitud de onda seleccionada para realizar los cálculos de concentración.

Tabla 12.

Cantidad de Surfactante adsorbido a diferentes concentraciones.

Adsorción	Co (%ppm)	Ce (%ppm)	Ced (%ppm)	Cads (%ppm)	Cs (mg)
0.00	0	0.00	0.00	0.00	0.00
0.22	50	9.46	9.46	40.54	0.49
0.60	100	24.14	24.14	75.86	0.91
0.93	250	36.79	36.79	213.21	2.56
0.78	500	30.88	61.77	438.23	5.26
0.43	750	17.45	52.34	697.66	8.37
0.47	1000	19.01	57.03	942.97	11.32
0.61	1250	24.34	73.01	1176.99	14.12
0.61	1500	24.54	73.63	1426.37	17.12
0.80	1750	31.98	95.93	1654.07	19.85
0.24	2000	10.08	60.49	1939.51	23.27
0.30	2250	12.36	74.16	2175.84	26.11
0.32	2500	13.27	79.63	2420.37	29.04
0.41	2750	16.64	99.81	2650.19	31.80
0.45	3000	18.19	109.14	2890.86	34.69
0.19	4000	8.19	49.16	3950.84	47.41
0.29	5000	12.21	366.40	4633.60	55.60
0.28	6000	11.74	352.09	5647.91	67.77
0.30	7000	12.50	375.12	6624.88	79.50
0.33	8000	13.47	403.95	7596.05	91.15
0.35	9000	14.27	428.14	8571.86	102.86
0.35	10000	14.30	428.95	9571.05	114.85

Luego se construye una curva de calibración, se determina la concentración de equilibrio para cada solución con la ayuda de la curva de calibración. Posteriormente, fue necesario calcular la concentración de equilibrio ajustada debido a la realización de diluciones teniendo en cuenta que la adsorción superaba el rango de tolerancia permisible por el equipo [0 – 1] y finalmente se calculó la cantidad de surfactante adsorbido por la muestra. La tabla 13 presenta los volúmenes utilizados para los cálculos de la dilución.

Tabla 13.

Volúmenes utilizados para los cálculos de la dilución.

Concentración (%ppm)	Volumen de Solución en microlitro (μL)	Volumen del diluyente en microlitro (μL)
500	1500	1500
750	1000	2000
1000	1000	2000
1250	1000	2000
1500	1000	2000
1750	1000	2000
2000	500	2500
2250	500	2500
2500	500	2500
2250	500	2500
2500	500	2500
2750	500	2500
3000	500	2500
4000	500	2500
5000	100	2900
6000	100	2900
7000	100	2900
8000	100	2900
9000	100	2900
10000	100	2900

Concentración de Equilibrio C_e (%ppm): Se calcula a través de la curva de calibración estableciendo como variable independiente la adsorción y como variable dependiente la concentración.

$$C_e = \frac{\text{Adsorción} + 0.0204}{0.0258} \quad (4)$$

Concentración de Equilibrio Ajustada por Dilución $C_{diluída}$ (%ppm):

$$C_{diluída} = \frac{C_e \cdot \text{Volumen total}}{\text{Volumen de la solución}} \quad (5)$$

Volumen Total

$$\text{Volumen total} = \text{Volumen del diluyente} + \text{Volumen de la solución} \quad (6)$$

Concentración Adsorbida:

$$\text{Concentración Adsorbida} = C_{diluída} - C_o \quad (7)$$

Segunda Etapa: La segunda etapa se selección las cuatro concentraciones representativas del modelo la cuales se encuentra expuestas en la *Tabla 15* y la *Tabla 16* esta etapa tiene como finalidad calcular la cantidad de surfactante adsorbido por la muestra en condiciones secas y cuando se encuentra saturada de crudo.

Tabla 14.

Datos de adsorción de la muestra seca.

Adsorción	C_o (%ppm)	C_e (%ppm)	C_{ed} (%ppm)	C_{ads} (%ppm)	C_s (mg)
0.470	1000	19.011	57.034	942.965	11.315

0.322	2500	13.271	79.627	2420.372	29.044
0.294	5000	12.213	366.395	4633.604	55.603
0.348	10000	14.298	428.953	9571.046	114.852

Para el diseño de la tabla 16 se impregno la muestra seca con crudo hasta saturarla y posteriormente se pasó a determinar su adsorción cuyos resultados se encuentran a continuación

Tabla 15.

Datos de adsorción de la muestra impregnada de crudo.

Adsorción	Co (%ppm)	Ce (%ppm)	Ced (%ppm)	Cads (%ppm)	Cs (mg)
0.42	1000	16.89	185.76	814.24	9.77
0.61	2500	24.43	268.69	2231.31	26.78
0.82	5000	32.43	356.78	4643.22	55.72
0.33	10000	13.71	1631.41	8368.59	100.42

La disminución en la adsorción observada en las muestras impregnadas con crudo se debe principalmente al bloqueo físico y químico de los sitios activos de la roca por parte del petróleo, lo que reduce la interacción entre el surfactante y la superficie sólida de la roca.

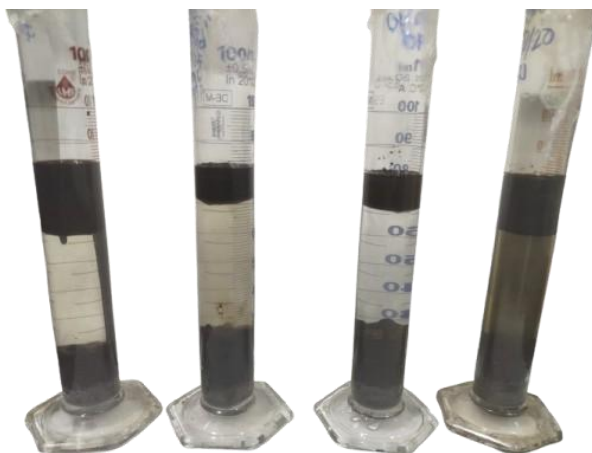
En la roca seca se encuentra una gran cantidad de sitios activos expuestos capaces de interactuar física y químicamente con las moléculas del surfactante, por tanto, esta interacción va a dejar de ser efectiva en el punto donde se empiezan a formar las micelas hasta alcanzar la concentración micelar crítica donde ya no ocurrirán estas interacciones.

4.4 Análisis de la prueba de detergencia de crudo

La figura 6 muestra la remoción de crudo en las pruebas de detergencia a 70 °C después de 2 horas de interacción con el surfactante.

Figura 6.

Pruebas de detergencia a 70 °C después de dos horas de interacción.



En las pruebas de detergencia se obtuvieron volúmenes de remoción de crudo que luego se mostraron en porcentajes como se muestra en la tabla 16.

Tabla 16.

Porcentaje de remoción de crudo en pruebas de detergencia.

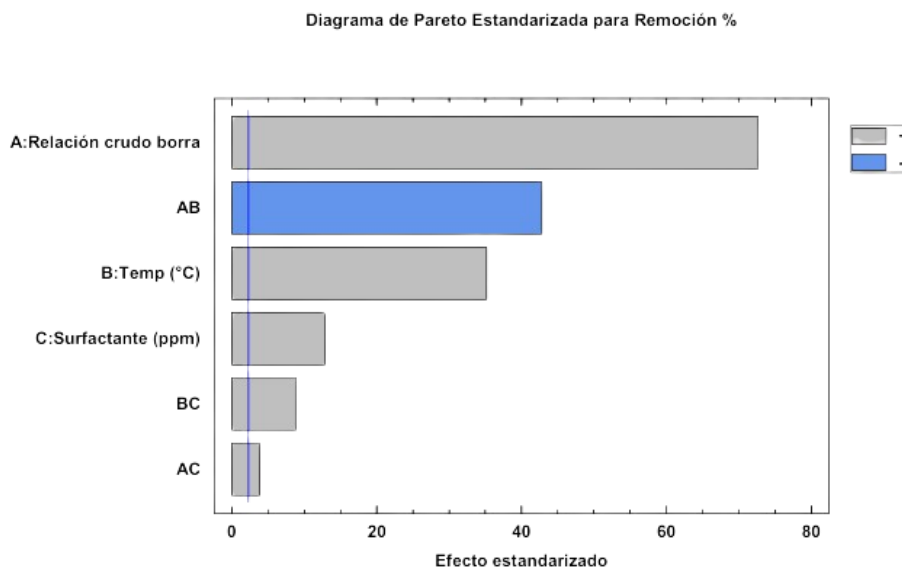
	Relación de crudo: borra	Temp. (°C)	Concentración de surfactante (ppm)	Remoción %
Pruebas	60:40	70.0	1300.0	61.1
	80:20	40.0	650.0	79.16
	80:20	40.0	1300.0	83.33
	60:40	40.0	650.0	0.15
	80:20	70.0	650.0	66.66
	60:40	70.0	650.0	50
	80:20	70.0	1300.0	83.3
	60:40	40.0	1300.0	2.7
Duplicados	60:40	70.0	1300.0	61.1
	80:20	70.0	1300.0	87.5
	80:20	70.0	650.0	66.6
	60:40	70.0	650.0	50
	80:20	40.0	650.0	79.16

60:40	40.0	1300.0	2.7
60:40	40.0	650.0	2.7
80:20	40.0	1300.0	83.3

A partir de los resultados de la remoción de crudo se procedió a utilizar el programa Statgraphics 19 para observar que variables tenían mayor influencia en los resultados a través del diagrama de Pareto, la gráfica de efectos principales y la gráfica de interacción de factores para la remoción de crudo.

Figura 7.

Diagrama de Pareto estandarizada para el porcentaje de remoción de crudo.

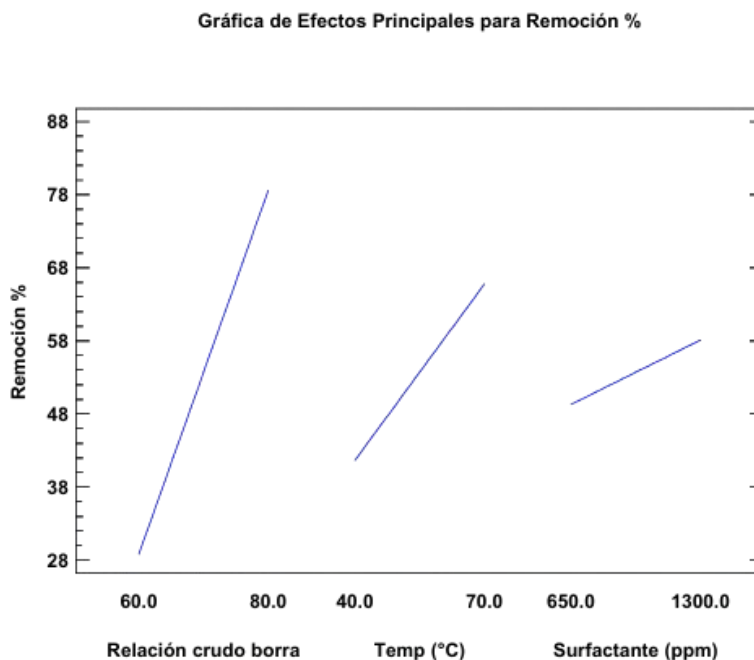


En la Figura 7 se observa que las variables con mayor influencia sobre la remoción de crudo son la relación crudo:borra y la temperatura. Esto indica que, al aumentar tanto la proporción de crudo en la mezcla como la temperatura del sistema, se favorece un mayor porcentaje y volumen de recuperación de hidrocarburos. En cuanto a la concentración del surfactante, si bien este es el agente químico encargado de desestabilizar la emulsión, los resultados sugieren que su efectividad está más condicionada por las variables físicas del sistema principalmente la relación crudo:borra y la temperatura que por su concentración en el rango evaluado (650–1300 ppm).

Adicionalmente, la interacción negativa entre la relación crudo:borra y la temperatura (interacción AB) indica que, aunque ambos factores son positivos de forma individual, su combinación en ciertos niveles puede reducir la eficiencia del tratamiento. Esto sugiere la necesidad de un equilibrio entre ambos parámetros, ya que un exceso simultáneo de crudo y temperatura podría generar condiciones inestables que dificulten la acción del surfactante y el rompimiento eficaz de la emulsión.

Figura 8.

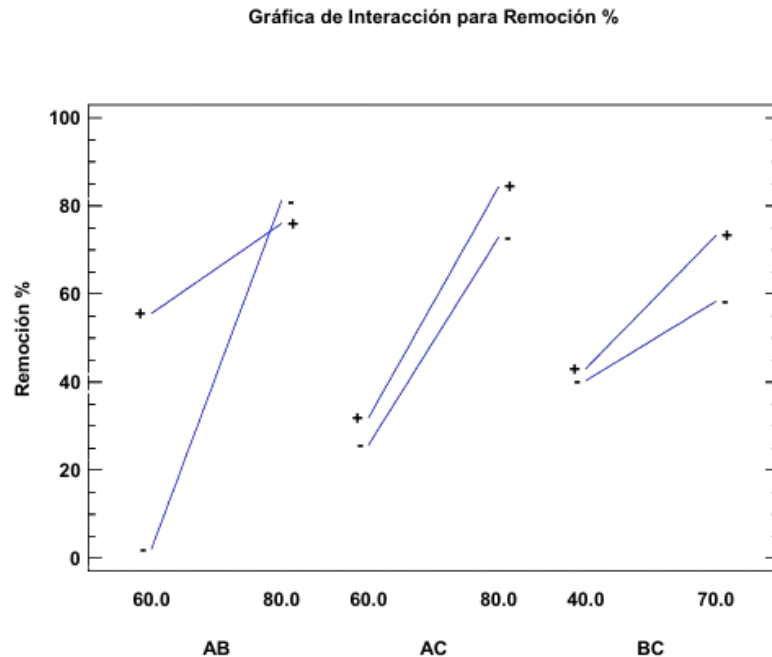
Gráfica de efectos principales para la remoción de crudo.



Así mismo, en la figura 8 se observa que, para la remoción de crudo, cuando se tiene mayor relación de crudo: borra hay un aumento significativo en la remoción de crudo. Los resultados muestran que el aumento de la temperatura y la concentración de surfactante se produce un ligero aumento en la remoción de crudo.

Figura 9.

Gráfica de interacción para la remoción de crudo.



En la figura 9 se observa la gráfica de interacción para la variable remoción de crudo (%) que evidencia relaciones significativas entre los factores evaluados. La interacción más destacada es la correspondiente a la relación crudo:borra y la temperatura (AB), donde se observa que el efecto positivo del aumento en la relación es mucho más notorio a altas temperaturas (70 °C) que a temperaturas bajas (40 °C). Esto indica que el beneficio de una mayor proporción de crudo solo se materializa cuando el sistema térmico permite una adecuada reducción de viscosidad y una mayor movilidad de los componentes, lo cual favorece la acción del surfactante. Esta interacción explica el comportamiento negativo observado en el diagrama de Pareto, donde se evidencia que una combinación inadecuada entre temperatura y relación puede incluso disminuir la eficiencia del proceso.

Por otro lado, la interacción entre la relación crudo:borra y la concentración del surfactante (AC) también muestra un comportamiento importante. Al trabajar con concentraciones elevadas del surfactante (1300 ppm), el incremento en la relación crudo:borra se traduce en una mayor remoción de crudo. En cambio, con bajas concentraciones (650 ppm), el efecto del aumento en la relación es más limitado. Esto sugiere que el surfactante necesita una superficie oleosa suficiente para ejercer su acción de ruptura de emulsiones de manera eficiente, y que dicha eficiencia se ve favorecida por una proporción más alta de crudo en el sistema.

Finalmente, la interacción entre la temperatura y la concentración del surfactante (BC) muestra líneas casi paralelas, lo que indica una interacción débil o no significativa. En este caso, ambos factores parecen actuar de forma independiente, y sus efectos sobre la remoción no se ven afectados por la variación del otro. Esta independencia permite cierta flexibilidad en el diseño del proceso, ya que ajustes en temperatura o concentración pueden realizarse sin generar efectos adversos en la eficiencia del tratamiento.

Según los resultados anteriormente representados, se procedió a realizar un análisis de optimización teniendo como objetivo maximizar la remoción de crudo, este proceso ha sido ejecutado en el programa Statgraphics 19. En la tabla 17 se puede observar los valores óptimos para cada factor que nos proporciona Statgraphics.

Tabla 17.

Valores óptimos para la remoción de crudo.

Factor	Bajo	Alto	Óptimo
Relación crudo:borra (%)	60.0	80.0	80.0
Temperatura (°C)	40.0	70.0	70
Surfactante (ppm)	650.0	1300	1300

4.5 Análisis de las pruebas Marshall

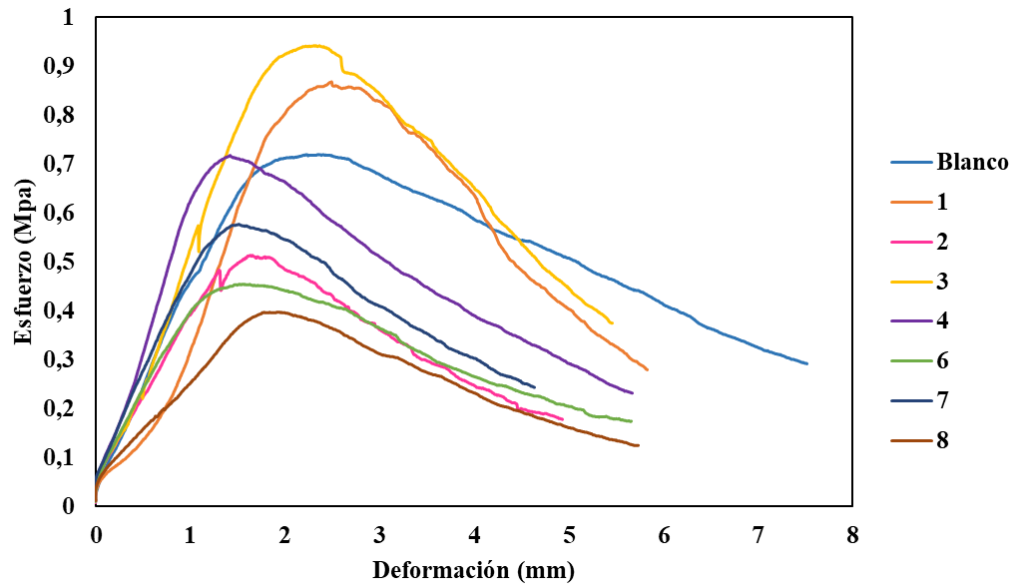
En las pruebas Marshall se obtuvieron gráficos de dispersión de esfuerzo vs deformación, donde se observó la carga máxima de cada núcleo de asfalto, teniendo como resultado que el núcleo número 3 presentó una mayor resistencia a la deformación, presentando una carga máxima de 0.943 MPa/mm. La figura 10 muestra el efecto de la compresión sobre las propiedades mecánicas de la muestra 2.

Figura 10.

Resultado de la muestra No. 2.



A continuación, se presentan los gráficos de dispersión de los núcleos asfálticos en la figura 11. Se observa que las muestras 1 y 3 tienen una resistencia mayor a la prueba en blanco y la muestra 4 alcanza un valor cercano a esta, lo cual quiere decir que hay formulaciones de núcleos asfálticos con borra viables para usarlos en construcción de vías y carreteras.

Figura 11.*Gráfico de esfuerzos de mezclas asfálticas.*

En el diseño factorial de mezclas asfálticas, la corrida con combinación 5.5 % de ligante, 17.5 % de crudo respecto a borra y 3.5 % de borra más crudo no pudo registrarse por un problema experimental. Por este motivo se realizó un modelo multivariable donde se obtuvo un valor de carga máxima de aproximadamente 0.528 MPa/mm para la muestra 5. En la tabla 18 se observan los resultados de carga máxima de cada núcleo de mezclas asfálticas formuladas en la tabla 8.

Tabla 18.*Carga máxima de núcleos asfálticos.*

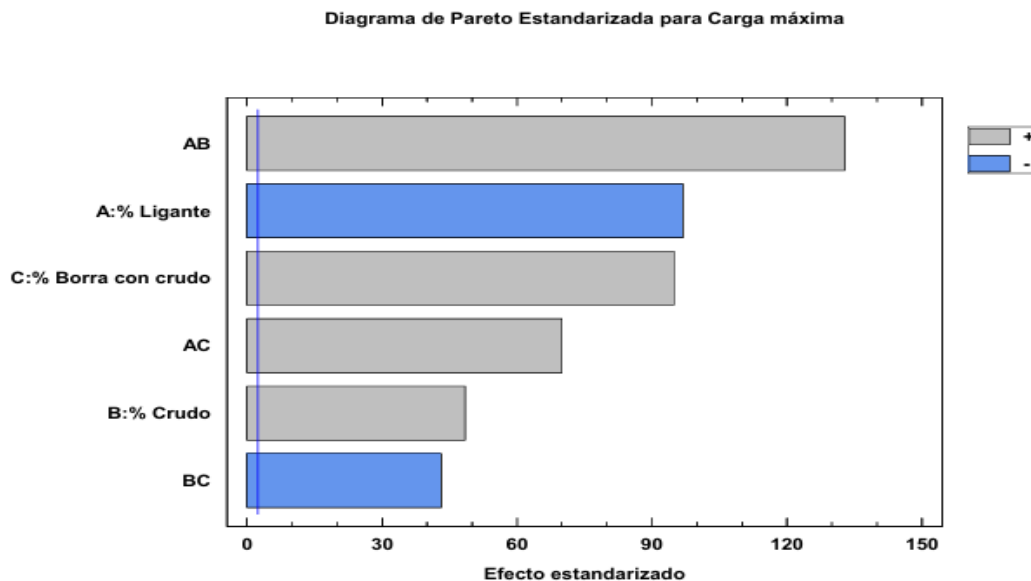
Núcleos	Carga máxima (MPa/mm)
Blanco	0.719
1	0.869
2	0.513

3	0.943
4	0.718
5	0.528
6	0.454
7	0.576
8	0.398

Teniendo en cuenta esos resultados se procede a realizar un diagrama de Pareto, observado en la figura 12, para analizar como influyen los factores del diseño de experimentos 2^3 de los núcleos asfálticos.

Figura 12.

Diagrama de Pareto para resultados de carga máxima.



Según el diagrama de Pareto, se evidencia que un aumento en el porcentaje de ligante (asfalto), de 5.0 % a 5.5 %, genera una disminución en la carga máxima soportada por los núcleos. Este comportamiento sugiere que exceder ciertos niveles de ligante puede debilitar la mezcla, posiblemente debido a sobresaturación o pérdida de cohesión entre los componentes. No obstante,

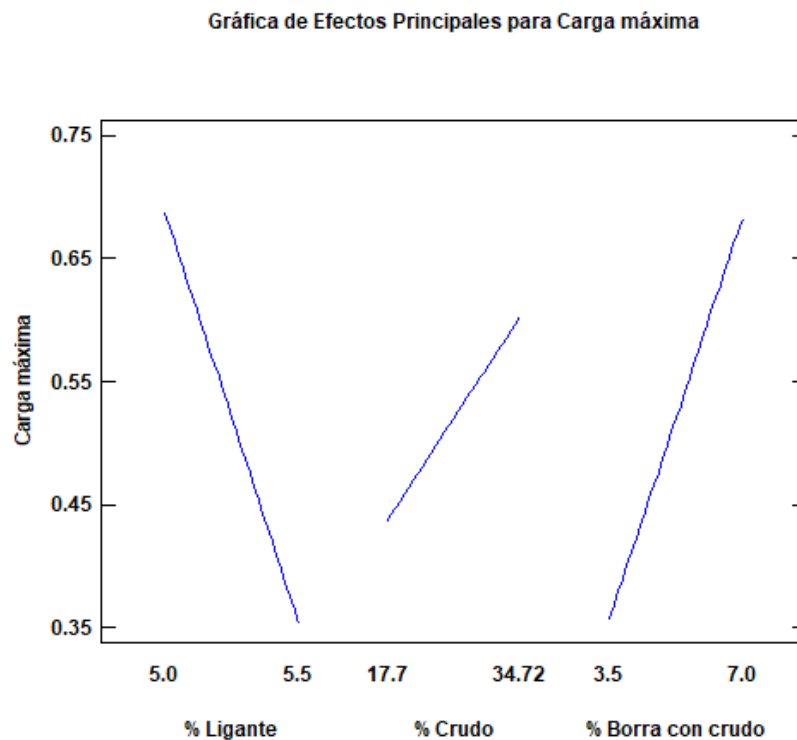
la interacción positiva entre el contenido de ligante y el porcentaje de borra (interacción AB) indica que este efecto negativo puede ser contrarrestado cuando ambos factores se incrementan simultáneamente, lo cual sugiere la existencia de un equilibrio óptimo entre matriz sólida y fase ligante.

Asimismo, el porcentaje de borra con crudo presenta un efecto positivo moderado, lo cual resulta coherente, ya que este material aporta estructura y rigidez a la mezcla. Por otro lado, la interacción BC, aunque de menor magnitud, muestra un efecto negativo, lo que indica que un alto contenido simultáneo de crudo y borra podría generar una mezcla inestable. Este resultado es consistente con la posibilidad de sobresaturación asfáltica, que puede provocar pérdida de resistencia y desintegración del material ante condiciones térmicas no tan elevadas.

Para tener un análisis más detallado se realizó un gráfico de efectos principales para la carga máxima, como se muestra en la figura 13.

Figura 13.

Gráfica de efectos principales para la carga máxima.

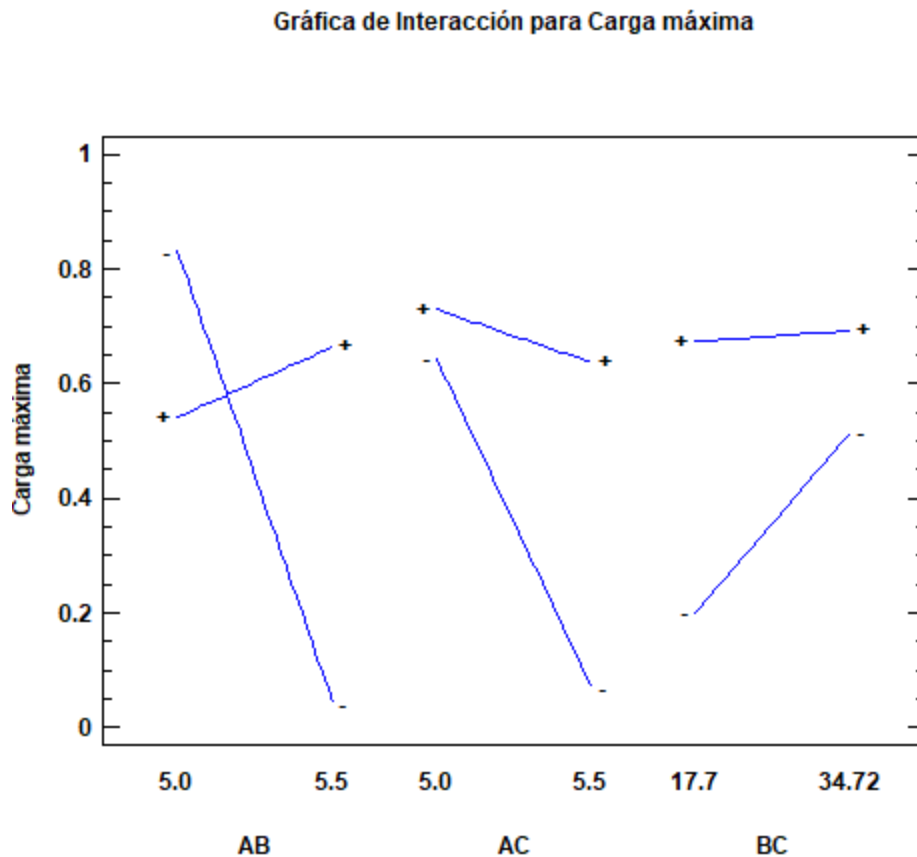


A partir de la gráfica de efectos principales para la carga máxima, se observa que una disminución en el porcentaje de ligante se asocia con un incremento en la resistencia mecánica de la mezcla. Esto sugiere que un contenido de 5.0 % de asfalto resulta más favorable para una formulación óptima, ya que porcentajes mayores podrían sobresaturar la mezcla y afectar negativamente su cohesión. Por otro lado, el incremento en el porcentaje de crudo respecto a la cantidad de borra muestra un leve aumento en la carga máxima, aunque no de manera significativa, y como se discutió en el análisis del diagrama de Pareto, podría incluso volverse contraproducente si se excede cierto umbral. En cuanto al contenido de borra, se evidencia una relación directamente proporcional con la carga máxima: a mayor cantidad de borra tratada en la mezcla, mayor es su capacidad de resistencia. Esto indica que el aprovechamiento de estos residuos no solo es viable, sino también beneficioso para la formulación de mezclas asfálticas con buen desempeño mecánico.

En la figura 14 se puede observar la interacción entre los factores del diseño de experimentos y como afectan en la carga máxima de las muestras.

Figura 14.

Gráfica de interacción para la carga máxima.



Según la gráfica de interacción para la carga máxima, se evidencia una interacción significativa entre el contenido de ligante y la cantidad de borra (interacción AB). En condiciones de bajo contenido de borra, un aumento en el porcentaje de ligante no mejora, e incluso puede reducir, la resistencia mecánica de la mezcla. Sin embargo, cuando el contenido de borra es alto, el incremento en el ligante contribuye positivamente al aumento de la carga máxima, lo que sugiere una dependencia entre ambos factores para lograr un equilibrio estructural adecuado.

La interacción AC (borra y porcentaje de crudo respecto a la borra) también presenta un efecto, aunque de menor magnitud, con un patrón de líneas cruzadas que indica una respuesta no lineal del sistema ante la combinación de estos dos factores.

Por su parte, la interacción BC muestra líneas casi paralelas, lo que indica que los efectos del contenido de crudo y del porcentaje de crudo respecto a la borra actúan de forma prácticamente independiente entre sí, sin generar una interacción significativa en la respuesta de carga máxima.

A partir de los resultados de carga máxima se realizó una optimización en el programa Statgraphics 19 que se muestra en la tabla 19.

Tabla 19.
Valores para la optimización para mezclas asfálticas.

Factor	Bajo	Alto	Óptimo
Ligante (%)	5.0	5.5	5.0
Crudo (%)	17.0	34.72	17.0
Borra (%)	3.5	7.0	7.0

Los resultados de esta investigación demuestran que el asfalto empleado cumple con las características composicionales y reológicas necesarias para su uso como ligante, y que el surfactante SDBS favorece la remoción de hidrocarburos en borras, aunque su eficacia depende en mayor medida de la temperatura y de la relación crudo:borra que de su concentración. Asimismo, las pruebas Marshall confirmaron que la incorporación de borras tratadas en mezclas asfálticas es viable, ya que contenidos moderados de ligante (5.0 %) y altos de borra (7.0 %) mejoran la resistencia mecánica, mientras que excesos de ligante pueden reducir la cohesión del material. En conjunto, estos resultados respaldan el potencial de valorización de las borras

aceitosas como insumo en la construcción vial, contribuyendo a la sostenibilidad y a la gestión eficiente de residuos de la industria petrolera.

5. Conclusiones

El tratamiento de borras con surfactante aniónico SDBS permite recuperar una fracción significativa de hidrocarburos, especialmente cuando se emplean temperaturas elevadas (70 °C) y proporciones altas de crudo respecto a la borra. La concentración del surfactante, dentro del rango evaluado (650–1300 ppm), tuvo un efecto menos determinante.

La relación crudo:borra fue la variable con mayor impacto en la remoción de crudo, seguida por la temperatura. La interacción entre estas variables mostró que no deben optimizarse por separado, ya que su combinación inadecuada puede disminuir la eficiencia del tratamiento.

Las borras tratadas demostraron ser viables como componente en mezclas asfálticas debido a que los núcleos 1, 3 y 4, aportando rigidez y resistencia estructural, especialmente cuando se incorporan en mayores proporciones.

El contenido de ligante debe mantenerse en niveles controlados, ya que su exceso puede generar sobresaturación, reducir la cohesión interna de la mezcla y, por tanto, disminuir su resistencia mecánica.

Los núcleos elaborados con formulaciones optimizadas alcanzaron valores adecuados de carga máxima en ensayos Marshall, lo que respalda el potencial de estas mezclas como alternativa técnica y ambientalmente viable en aplicaciones de pavimentación.

6. Recomendaciones

Para fortalecer la validez estadística de los resultados, se recomienda realizar futuros experimentos con un número mayor de réplicas por condición. Esto permitirá disminuir la incertidumbre en los análisis de efectos principales e interacciones, especialmente en los diagramas de Pareto.

Se sugiere ampliar la caracterización fisicoquímica (análisis SARA, FTIR, contenido de metales y sales) para comprender mejor las interacciones entre los componentes de la borra, el crudo y el ligante asfáltico en los procesos de reutilización.

Se recomienda explorar formulaciones de mezclas con diferentes contenidos de ligante y residuos, incorporando también otras adiciones minerales o modificadores que puedan mejorar la cohesión, resistencia mecánica y durabilidad de los núcleos fabricados.

Los resultados obtenidos en laboratorio constituyen una base sólida, sin embargo, se recomienda realizar pruebas a escala piloto para validar el comportamiento de las mezclas en condiciones más cercanas a las reales de la industria civil y vial.

Se aconseja evaluar no solo la eficiencia técnica, sino también el impacto económico y ambiental del aprovechamiento de borras en mezclas asfálticas, considerando indicadores de sostenibilidad y análisis de ciclo de vida.

Referencias bibliográficas

- Alma. (2024, octubre 18). Impacto ambiental de una mala gestión de residuos. Acteco.
<https://www.acteco.es/impacto-ambiental-de-una-mala-gestion-de-residuos/>
- Behrens, E. J. (2013). Investigation of loss of surfactants during enhanced oil recovery applications – adsorption of surfactants onto clay materials [Tesis de maestría]. Norwegian University of Science and Technology.
- Cardona, V., & Rodríguez, N. (2011). Propuesta para el diseño e implementación de un esquema de manejo, tratamiento integral y recuperación de crudo, aguas para reinyección y salmueras para reutilización, de los residuos aceitosos (contaminados con hidrocarburo), generados por la operación del campo petrolero ubicado en el corregimiento El Centro, municipio de Barrancabermeja, Santander [Tesis de pregrado]. Universidad Industrial de Santander.
- Convenio de Basilea. (1989). Sobre el control de los movimientos transfronterizos de los desechos peligrosos y su eliminación. Suiza.
- Ecopetrol. (2025). Resultados.
<https://www.ecopetrol.com.co/wps/portal/Home/sostecnibilidad/ambiental/gestion-de-residuos/resultados>.
- García Rojas, Z. (2018). Evaluación de emulsiones de crudo con surfactantes no-iónicos y co-surfactantes de uso potencial en la industria petrolera [Tesis de maestría]. Tecnológico Nacional de México. <https://rinacional.tecnm.mx/jspui/handle/TecNM/5793>

- Instituto Nacional de Vías. (2022). Artículo 450-07: Mezclas asfálticas en caliente (concreto asfáltico y mezcla de alto módulo). <https://www.invias.gov.co/>
- MAVDT/OCADE. (2007). Gestión integral de residuos o desechos peligrosos: Bases conceptuales. Colombia.
- Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. (2005). Decreto 4741 de 2005. Colombia.
- Noesis UIS. (s.f.-a). Diseño de un sistema para el tratamiento de borras aceitosas. <https://noesis.uis.edu.co/bitstreams/f4144379-300e-4fd1-8cc4-87aea6ef2498/download>
- Noesis UIS. (s.f.-b). Evaluación de detergencia en residuos oleosos. <https://noesis.uis.edu.co/bitstreams/2f4fe672-3412-45c1-8086-a3041d709c15/download>
- Repositorio UNAL. (2017). Estudio sobre aplicación de surfactantes en emulsiones de crudo. <https://repositorio.unal.edu.co/bitstream/handle/unal/76913/1110518214.2017.pdf?isAllowed=y&sequence=1>
- Salager, J. L. (2002). FIRP S300A: Surfactants – Types and Uses (3rd ed.). Universidad de Los Andes, Laboratorio FIRP. <http://www.firp-ula.org>
- Shimadzu Corporation. (2023). UV-2600 Spectrometer Standard Operation Procedure. <https://www.shimadzu.com/an/products/spectrophotometers/uv-2600-2700/index.html>
- Tamir, A., & Ruiz Beviá, F. (s.f.). Tensión superficial: Arte y ciencia. Departamento de Ingeniería Química, Universidad de Alicante; Chemical Engineering Department, Ben-Gurion University of the Negev.

Torres Cervera, K. (2014). Análisis de los impactos ambientales generados por el tratamiento y disposición final de los residuos aceitosos (borras) generados en los distritos de producción de hidrocarburos [Tesis de pregrado]. Universidad Nacional de Colombia.

U.S. Department of Agriculture. (2017). Technical evaluation report: Sodium dodecylbenzene sulfonate (SDBS) handling. Agricultural Marketing Service, Agricultural Analytics Division. <https://www.ams.usda.gov/sites/default/files/media/SDBS%20Petition.pdf>

vikem.mx. (2025, enero 22). Dodecil Bencen Sulfonato de Sodio - VIKEM. https://vikem.mx/productos/dodecil-bencen-sulfonato-de-sodio/?srsltid=AfmBOoodDVfzEMnTsCU7lusDYZ07ZRYg-6a1x7oFO_o6VIL4k8NEKe36