

Estudio de la compatibilidad entre surfactantes y un nanomaterial para la
modificación de emulsiones asfálticas

Andrés Felipe Rangel Jaimes

Trabajo de Grado para optar al Título de Ingeniero Químico

Directora:

Yuly Fernanda López Contreras

Ph.D en Ingeniería Química

Codirector:

Ronald Alfonso Mercado Ojeda

Ph.D en Ingeniería Química

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Fisicoquímicas

Escuela de Ingeniería Química

Bucaramanga

2026

Dedicatoria

A mis padres, Salomón y Sandra, quienes han sido el pilar fundamental durante toda mi formación académica y personal. Su apoyo incondicional, su paciencia y su confianza constante fueron el motor que me impulsó a seguir adelante incluso en los momentos de mayor dificultad.

Gracias por estar siempre presentes, por brindarme ánimo cuando surgían inconvenientes y por creer en mí aun cuando los resultados no eran inmediatos. Este logro no habría sido posible sin su acompañamiento permanente, por lo que este trabajo es, en gran parte, un reconocimiento a su dedicación y amor.

A mi novia Camila, por ser otro pilar fundamental en este proceso. Gracias por ayudarme a mantener el enfoque en mi camino, por tu infinita paciencia en los momentos en que las dificultades fueron mayores y por brindarme apoyo constante cuando más lo necesite. Gracias por encaminarme con tus palabras y acciones y por ser mi compañera de vida apoyando tranquilidad motivación y confianza para seguir adelante.

Agradecimientos

Quiero agradecer a la profesora Yuly López, al profesor Ronald Mercado y al ingeniero Luis González, quienes con su orientación hicieron posible el desarrollo de este trabajo y marcaron una diferencia significativa en mi proceso de formación.

A mi familia por ser mi fuente inagotable de motivación, por cada palabra de aliento, por los sacrificios, que hicieron para que yo pudiera alcanzar esta meta y por su fe inquebrantable en mis capacidades que me permitió llegar al final de este camino con la satisfacción del deber cumplido.

De manera especial, agradezco a mis amigos Johan, Alan, Juliana, Diego, Cesar y Danna, quienes hicieron de este proceso universitario una experiencia inolvidable. Gracias por las largas jornadas de estudio, las risas compartidas en medio del estrés y por estar presentes en cada paso de esta formación. Juntos aprendimos que la amistad es el mejor soporte para superar las dificultades académicas y personales.

Tabla de contenido

Introducción.....	10
1. Objetivos.....	12
1.1. General.....	12
1.2. Específicos.....	12
2. Marco conceptual	13
2.1. Asfalto.....	13
2.2. Mezcla asfáltica	13
2.3. Surfactantes	14
2.4. Nanomaterial	15
2.5. Emulsiones asfálticas.....	16
2.6. Emulsiones catiónicas.....	17
2.7. Emulsiones asfálticas nanomodificadas.	18
3. Estado del arte	18
4. Descripción de la metodología	20
4.1 Revisión bibliográfica.....	21
4.2 Evaluar la interacción entre los surfactantes y el nanosilano.	22
4.2.1 Análisis espectroscopia FTIR	22
4.2.2 Análisis de turbidez	22
4.2.3 Análisis suspensión DLS	24
4.2.4 Análisis potencial Z	24
4.3 Formular emulsiones asfálticas nanomodificadas estables con el surfactante seleccionado.....	24
4.3.1 Formulación de emulsiones	24
4.3.2 Evaluación de estabilidad	26
4.3.3 Recuperación del asfalto residual	26
4.3.4 Ensayo de adherencia en bandeja	27
4.4 Efecto del nanosilano sobre el asfalto residual.....	27
4.4.1 Prueba de viscosidad del asfalto residual	27
5. Resultados y análisis.....	28
5.2.1 Análisis FTIR.....	28

5.2.2 Análisis de turbidez	30
5.2.3 Análisis en suspensión con DLS.....	32
5.2.4 Analisis de potencial Z	35
5.3.1 Formulación de emulsiones	37
5.3.2 Evaluación de estabilidad	38
5.3.3 Recuperación del asfalto residual	40
5.3.4 Ensayo de adherencia en bandeja	40
5.4.1 Prueba de viscosidad del asfalto residual	42
6. Conclusiones.....	44
Referencias Bibliográficas.....	46

Lista de tablas

Tabla 1. Condiciones de operación para la preparación de emulsiones asfálticas nanomodificadas.	25
Tabla 2. Distribución del polidispersidad para el SC-1 y el SC-2.	32
Tabla 3. Datos estabilidad de emulsiones catiónicas.	38
Tabla 4. Porcentaje de recubrimiento para cada lote.	41
Tabla 5. Valores de viscosidad del asfalto original y residual.	42

Lista de figuras

Figura 1. Diagrama de flujo de las etapas metodológicas de la investigación.	21
Figura 2. Espectroscopia infrarroja SC-1.	28
Figura 3. Espectroscopia infrarroja SC-2.	28
Figura 4. Comportamiento de la turbidez para el SC-1 (izq) y SC-2 (der) aumentando concentración de surfactante.	30
Figura 5. Comportamiento de la turbidez para el SC-1 (izq) y SC-2 (der) aumentando el pH.	31
Figura 6. Distribución del diámetro hidrodinámico para el SC-1.	34
Figura 7. Distribución del diámetro hidrodinámico para el SC-2.	35
Figura 8. Variación del potencial Z en función de la concentración de nanosilano.	36
Figura 9. Evaluación visual de emulsiones de SC-1 sin nanosilano.	37
Figura 10. Estabilidad a las 2 horas de preparada la emulsión con 1% de nanosilano.	39
Figura 11. Ensayo de adherencia en bandeja emulsión original (izq) y emulsión modificada (der).	41
Figura 12. Viscosidad para asfalto original y residual respecto a la temperatura.	42

Resumen

Título: Estudio de la compatibilidad entre surfactantes y un nanomaterial para la modificación de emulsiones asfálticas*

Autor: Andrés Felipe Rangel Jaimes**

Palabras clave: Emulsión asfáltica, nanomodificador, estabilidad coloidal, organosilanos.

Descripción: Las emulsiones asfálticas, como componentes clave en la construcción de pavimentos, han sido objeto de numerosas investigaciones orientadas a mejorar sus propiedades. La adición de nanomateriales a estos sistemas mejora significativamente las propiedades superficiales y las características reológicas del asfalto residual, mejora la adhesión entre el asfalto-agregados y aumenta la resistencia a mecanismos de degradación como el daño por humedad y la deformación residual. En este trabajo de grado, se analizó la compatibilidad de dos surfactantes catiónicos (SC-1 y SC-2) en emulsiones asfálticas nanomodificadas, evaluando su interacción en la fase acuosa mediante pruebas de tamaño de partícula, turbidez, espectroscopía FTIR y potencial zeta. Los resultados mostraron que el surfactante SC-1 presentó una mayor afinidad con el nanomaterial y una interacción más adecuada con la fase acuosa, lo que se reflejó en una mejor compatibilidad del sistema emulsionado. La incorporación del nanomodificador no mostró mejoras significativas en la estabilidad de almacenamiento; sin embargo, generó efectos positivos en el comportamiento reológico y en el ensayo de adherencia, cumpliendo con los requisitos establecidos por la normativa INVIAS para emulsiones catiónicas y sugiriendo una adecuada compatibilidad entre los componentes del sistema.

*Trabajo de Grado

**Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería Química. Director: Yuly Fernanda López Contreras, Doctora en Ingeniería Química. Codirector: Ronald Alfonso Mercado Ojeda, Doctor en Ingeniería Química.

Abstract

Title: Study of the compatibility between surfactants and a nanomaterial for the modification of asphalt emulsions*

Author: Andrés Felipe Rangel Jaimes**

Keywords: Asphalt emulsión, Nanomodifier, Colloidal stability, Organosilanes.

Descripción: Asphalt emulsions are a crucial component of road construction, and improving their performance has been a subject of much research. The addition of nanomaterials to these systems significantly improves the surface and rheological properties of residual asphalt, enhances the bond between asphalt and aggregates, and improves the mechanical properties of residual asphalt. This paper evaluates the compatibility of two cationic surfactants in nano-modified asphalt emulsions and investigates the atomic size of the cationic surfactants and their impact on emulsion properties. The results show that surfactant SC-1 has a higher affinity for nanomaterials and stronger interaction with the aqueous phase, thus improving the compatibility of the emulsion system. The addition of the nanomodifier did not significantly improve the storage stability of the emulsion, but it had a positive impact on the rheological behavior and viscosity test results, making it compliant with INVIAS regulations for cationic emulsions and suitable for cationic emulsion applications.

*Degree Work

**Faculty of Physicochemical Engineering. Chemical Engineering School. Director: Yuly Fernanda López Contreras, Doctor in Chemical Engineering. Co-director: Ronald Alfonso Mercado Ojeda, Doctor in Chemical Engineering.

Introducción

La industria de la construcción busca constantemente nuevos materiales y tecnologías que permitan optimizar los procesos constructivos y mejorar la calidad de las obras. Las emulsiones asfálticas, como componentes clave en la construcción de pavimentos, han sido objeto de numerosas investigaciones orientadas a mejorar sus propiedades. La nanotecnología, con su capacidad para modificar las propiedades de los materiales a escala atómica y molecular, ofrece un gran potencial para revolucionar la industria de la construcción. Sin embargo, la incorporación de nanomateriales en las emulsiones asfálticas requiere un profundo conocimiento de los mecanismos de interacción entre los componentes del sistema y de las variables que influyen en la estabilidad y el desempeño de las emulsiones modificadas.(Calonge Vargas, 2023).

Según (Rondón Quintana, Fernández, & Castro, 2010), con la adición de polímeros al asfalto se modifican sus propiedades mecánicas, químicas y reológicas, para intentar mejorar el comportamiento que experimentan las mezclas asfálticas tradicionales. Esto se traduce en una mayor resistencia a la fatiga, al agrietamiento por fatiga y una mejor capacidad de recuperación ante deformaciones permanentes.

Los nanomateriales están revolucionando la construcción de carreteras al mejorar significativamente las propiedades del asfalto. Al agregar nanopartículas como el nanosilano, se obtiene un material más resistente, duradero y resistente al agua. Esto se traduce en carreteras que duran más, requieren menos mantenimiento y son más seguras. Además, los procesos de construcción se vuelven más eficientes, ya que la emulsión permite que el asfalto se pueda aplicar en frío y se reducen los tiempos de secado. Es importante señalar que la elección del nanomaterial adecuado es esencial y debe ser cuidadosamente analizada, ya que

no todos ofrecen los mismos beneficios y es necesario evaluar su impacto ambiental, Con base a lo anterior, el presente trabajo de grado plantea analizar la interacción entre el surfactante y el nanomaterial a través de su caracterización fisicoquímica que permita estudiar el efecto de incorporar nanosilano a las emulsiones asfálticas.

1. Objetivos

1.1. General

Estudiar la compatibilidad entre un nanosilano y diferentes surfactantes en sistemas acuosos para la modificación de emulsiones asfálticas.

1.2. Específicos

Evaluar la compatibilidad entre surfactantes empleados en la fabricación de emulsiones asfálticas convencionales y el nanosilano.

Formular emulsiones asfálticas nanomodificadas estables con el surfactante seleccionado.

Identificar los efectos del nanosilano sobre el asfalto residual modificado.

2. Marco conceptual

2.1. Asfalto

El asfalto es un material viscoelástico, lo que significa que tiene propiedades tanto de un sólido elástico como de un líquido viscoso. Esto quiere decir, que cuando le aplicamos una fuerza, el ligante se estira o comprime adoptando diferentes formas y cuando se retira la carga, retorna a su forma original. Sin embargo, también puede fluir lentamente con el tiempo. Se comporta como un aglomerante resistente, muy adhesivo, altamente impermeable y duradero. Su uso principal, es en la construcción de pavimentos, donde se aplica en capas sucesivas para darles resistencia y durabilidad a las vías, también se usa para impermeabilizar techos y en la fabricación de materiales de construcción como baldosas y tejas. Puede encontrarse de forma natural en depósitos como lagos o emanaciones, producto de la migración de hidrocarburos a la superficie. Sin embargo, la gran mayoría del asfalto que utilizamos hoy en día es sintético. Se obtiene como residuo de la refinación del petróleo, específicamente de los hidrocarburos pesados que quedan después de extraer los combustibles más ligeros como la gasolina. En cuanto a su aplicación en pavimentos, el proceso consiste en extender una mezcla asfáltica sobre la superficie de la vía y compactarla para lograr una capa uniforme y resistente. La clave aquí está en la correcta dosificación de los agregados y el asfalto, así como en la compactación adecuada, para garantizar la durabilidad del pavimento (García, 2017; Velázquez, 1969).

2.2. Mezcla asfáltica

Una mezcla asfáltica corresponde a la combinación de agregados pétreos y un ligante asfáltico, dosificados en proporciones específicas, con el fin de obtener una película continua y homogénea que garantice la cohesión del material. Este tipo de material, también conocido

como aglomerado asfáltico, es ampliamente utilizado en la construcción de carreteras, pistas aeroportuarias y pavimentos industriales, entre otras aplicaciones. En términos generales, las mezclas asfálticas están compuestas mayoritariamente por agregados pétreos gruesos y finos (alrededor del 90 %), acompañados por un pequeño porcentaje de polvo mineral y ligante asfáltico, aproximadamente un 5 % cada uno. Dependiendo de las condiciones de aplicación y del entorno de uso, estas mezclas pueden emplearse en procesos en caliente o en frío, buscando asegurar propiedades adecuadas de resistencia y durabilidad, así como la capacidad de soportar las cargas del tránsito y los efectos de factores climáticos como la humedad y el desgaste por fricción (Rada, 2025; Vizcarra Condori, 2016).

2.3. Surfactantes

Los surfactantes, también conocidos como tensioactivos, son compuestos químicos que desempeñan un papel fundamental en la modificación de las propiedades interfaciales de los fluidos. Estos agentes actúan reduciendo la tensión superficial, lo que les permite funcionar como detergentes, emulsionantes o humectantes. Su importancia radica en su capacidad para influir en la zona de contacto entre dos fases, una fase sólida y otra fase fluida ya sea líquida o gaseosa. La estructura molecular de los surfactantes se caracteriza por la presencia de regiones hidrófobas, que repelen el agua, y regiones hidrófilas, que son solubles en agua. Esta dualidad estructural les permite orientarse en las interfaces, con las regiones hidrófobas alejándose del agua y las regiones hidrófilas interactuando con ella. Como resultado, los surfactantes se acumulan en la superficie de los líquidos, reduciendo la energía requerida para aumentar el área superficial y facilitando la formación de emulsiones y espumas. Los químicos clasifican los surfactantes según sean aniónicos (carga negativa), catiónicos (carga positiva), o no iónicos (neutros). Principalmente los surfactantes se

incorporan en la fase acuosa antes del proceso de emulsificación, como presenta una estructura anfifílica se orienta en la interfaz entre el asfalto y el agua reduciendo la tensión interfacial y facilitando la ruptura del asfalto en gotas finas durante el proceso de mezclado permitiendo que dichas gotas permanezcan dispersas en el medio continuo.

En el caso de emulsiones asfálticas para mezclas, tanto el contenido de emulsificante como el pH de la solución acuosa, tienen gran influencia en la propiedad de adherencia de las gotas de asfalto en los áridos. Las emulsiones preparadas con surfactantes catiónicos presentan varias características importantes: son estables, rompen al contacto con la superficie, fijándose allí la fase orgánica dispersada, y la película formada se adhiere fuertemente a la superficie y es relativamente insensible al agua. Por estas razones, este tipo de surfactante es el más utilizado para carreteras, por sus propiedades que mejoran la adhesión del asfalto sobre las rocas, y de adaptarse a cualquier material rocoso (Mercado et al, 2008).

2.4. Nanomaterial

Los nanomateriales al adicionarse en las emulsiones asfálticas pueden mejorar significativamente el rendimiento y las propiedades del asfalto como la durabilidad, la adherencia, la resistencia mecánica y la resistencia al envejecimiento. Como los más utilizados en las emulsiones mencionadas tenemos nanosilano, nanotubos de carbono, nano partículas de óxido de titanio o nanoarcillas. Específicamente, los nanosilanos que actúan como puentes de unión molecular, transformando la superficie química de los agregados para que el asfalto se adhiera de forma casi permanente. Al añadirse en una emulsión asfáltica reacciona con el agua para formar grupos silanol (-SiOH), los cuales pueden reaccionar entre si formando enlaces covalentes Si-O-Si o interactuar con los grupos hidroxilo presentes en

la superficie de los agregados pétreos. Este comportamiento permite que los nanosilanos actúen como agentes de acoplamiento en la emulsión, mejorando la interacción en la interfaz asfalto-agua y promoviendo una mayor adhesión entre el ligante residual y el agregado (Camacho & Zapata, 2017; Jordaan & Steyn, 2021).

2.5. Emulsiones asfálticas.

Las emulsiones asfálticas son básicamente una mezcla de tres cosas: asfalto, agua y un agente emulsificante. Para hacer esta mezcla, se usa un molino coloidal que rompe el asfalto en pequeñas gotitas. El emulsificante, que es como un pegamento molecular, ayuda a que el asfalto y el agua se mezclen, sustancias que por su naturaleza química son inmiscibles. Este agente tiene una parte que se pega al asfalto y otra que se pega al agua, así los mantiene unidos. Además, el emulsificante define la carga eléctrica y el tiempo en que la mezcla se separa. El resultado final es un líquido marrón, con una consistencia que puede variar desde líquida hasta cremosa. Como sistemas dispersos de asfalto en agua, representan una tecnología fundamental en la construcción, conservación y rehabilitación de pavimentos. Su versatilidad permite su aplicación en una amplia gama de técnicas, incluyendo riegos de liga e imprimación, tratamientos superficiales, lechadas asfálticas, micropavimentos y reciclado en frío. Una de sus ventajas más significativas es su aplicación a temperatura ambiente, lo que se traduce en una reducción significativa de las emisiones de gases de efecto invernadero y del consumo energético. Las emulsiones asfálticas pueden definirse como un sistema, termodinámicamente inestable, constituido por dos fases líquidas, una orgánica y otra acuosa, una de las cuales se encuentra dispersada en la otra, en forma de glóbulos o partículas mayores de $0,4\ \mu\text{m}$, y cuya estructura se estabiliza por la presencia obligada de uno o varios surfactantes o compuestos tensoactivos (Márquez et al., 2009).

La clasificación de las emulsiones asfálticas se basa en dos criterios principales: la carga eléctrica de las partículas de asfalto y la velocidad de rompimiento. En cuanto a la carga, las emulsiones catiónicas se caracterizan por partículas de asfalto con carga positiva, lo que les confiere una mayor afinidad por los agregados silíceos, que presentan carga negativa. Por otro lado, las emulsiones aniónicas presentan partículas de asfalto con carga negativa, lo que las hace más compatibles con agregados calizos, que poseen carga positiva. Esta distinción es crucial para la selección adecuada de la emulsión en función de las características de los agregados utilizados en el proyecto, garantizando así un óptimo desempeño del pavimento (Ilanammeucr, 2022; Mercado et al., 2008).

2.6. Emulsiones catiónicas.

Las emulsiones catiónicas cumplen un papel importante en la ingeniería vial actual, se emplean principalmente cuando los agregados presentan carga superficial negativa, otorgándole una carga positiva a las gotas y favoreciendo la atracción electrostática con el agregado. Son las más utilizadas en aplicaciones viales en frío, los climas húmedos o lluviosos, la forma de rompimiento de estas emulsiones catiónicas, en la mayoría de los casos, mejora la adherencia y permite una mejor distribución de la mezcla, así mismo, garantiza que el asfalto se “pegue” con fuerza y no se desprenda fácilmente con la lluvia. Generalmente están constituidas por grupos aminos con carga eléctrica positiva, el grupo amino se va para la parte hidrofílica y el radical R se queda en la parte hidrofóbica. De esta forma se genera una repulsión electrostática de los glóbulos de asfalto los cuales están rodeados de iones del mismo signo (Gómez Huanca, 2017; Vizcarra Condori, 2016).

2.7. Emulsiones asfálticas nanomodificadas.

Las emulsiones asfálticas modificadas nanotecnológicamente representan una alternativa tecnológica para mejorar el rendimiento de las superficies de las carreteras, especialmente en condiciones de baja temperatura, donde es crucial optimizar la interacción entre los ligantes asfálticos, las soluciones acuosas y agregados pétreos. La adición de nanomateriales a estos sistemas mejora las propiedades superficiales y las características reológicas del asfalto residual, mejora la adhesión entre el asfalto-agregados, y aumenta la resistencia a mecanismos de degradación como el daño por humedad y la deformación residual. A nivel microestructural, los modificadores nanotecnológicos actúan en la interfaz entre el asfalto y el agua, y la superficie de los áridos, estimulando reacciones químicas y físicas que conducen a una distribución uniforme del ligante y a una mejora de las propiedades mecánicas del material tras el agrietamiento de la emulsión. En este contexto, las emulsiones asfálticas modificadas nanotecnológicamente son una opción adecuada para el mantenimiento y la reparación de carreteras, cumpliendo con los requisitos técnicos para aplicaciones en infraestructura vial (Calonge Vargas, 2023; Jordaan & Steyn, 2021a; Murphy et al., 2019).

3. Estado del arte

La emulsión asfáltica es un sistema coloidal en el que el asfalto, una sustancia hidrófoba, se encuentra disperso en una fase acuosa. La adición de un agente emulsificante reduce la tensión interfacial entre ambas fases, favoreciendo la formación y estabilidad de la emulsión. Esta tecnología permite la aplicación de ligantes asfálticos a temperatura ambiente, evitando los inconvenientes asociados al calentamiento del asfalto y la utilización de solventes. La estabilidad de las emulsiones asfálticas se ve comprometida por diversos

mecanismos, entre ellos la sedimentación y la floculación, ambos procesos reversibles que pueden mitigarse mediante agitación mecánica, tal como lo señalan Ronald, M. et al. (2016). Sin embargo, la coalescencia, un fenómeno irreversible y altamente dependiente de la formulación de la emulsión, representa la etapa final de su desestabilización. Durante el almacenamiento, las gotas de asfalto tienden a sedimentar y formar agregados, pero la agitación temprana puede restaurar la homogeneidad de la emulsión. En contraste, una vez que la coalescencia se ha iniciado, la recuperación de la emulsión resulta prácticamente inviable (Gualteros Morales, s. f.; Mercado et al., 2008; Ronald & Luis, 2016).

Una investigación realizada por (Murphy et al., 2019), aplicaron nanosilano en un proceso en frío aumentando la estabilidad de la emulsión y proporcionando una mejor dispersión en una capa base de 150 mm utilizando equipo convencional para mezclar 0,7% de emulsión nano-modificada (NME) denominada de “nueva generación” (aproximadamente 0,4% de betún residual), considerado “imposible” con la estabilización de la emulsión sin modificar. Según los autores, esta capa funcionó como una capa base estabilizada que cumple totalmente con las resistencias a la tracción indirecta (ITS) y las resistencias a la compresión sin confinamiento (UCS) según la especificación.

Cifuentes (2019) y Vargas (2023) muestran que, para la fabricación de una emulsión ya sea catiónica o aniónica, la adición de nanomaterial permitió reducir proporcionalmente el tamaño de gota y coalescencia. Taylor & Willis (2012) a través de un proyecto investigativo evaluaron el efecto que implicaba la adición de un nanomaterial a base silanos organofuncionales y determinaron que, aun con menor porcentaje de ligante residual la nano permitía obtener un comportamiento equivalente al de una emulsión sin modificar; mejoraba la adhesión, así como un 15% menos los gastos de producción.

En otra investigación realizada por (Jordaan & Steyn, 2021b), en donde se evalúa la modificación de una emulsión mediante la adición de nano-silano, se introduce en efecto un agente emulsionante con características diferentes en la mezcla, lo que conduce a una reducción en el tamaño de partícula. Los tamaños de partículas más pequeños dentro de la emulsión modificada tienen varias ventajas, incluida la estabilidad mejorada de la emulsión modificada y la facilidad de distribución de la emulsión dentro del agua de construcción, con ventajas relacionadas durante la construcción.

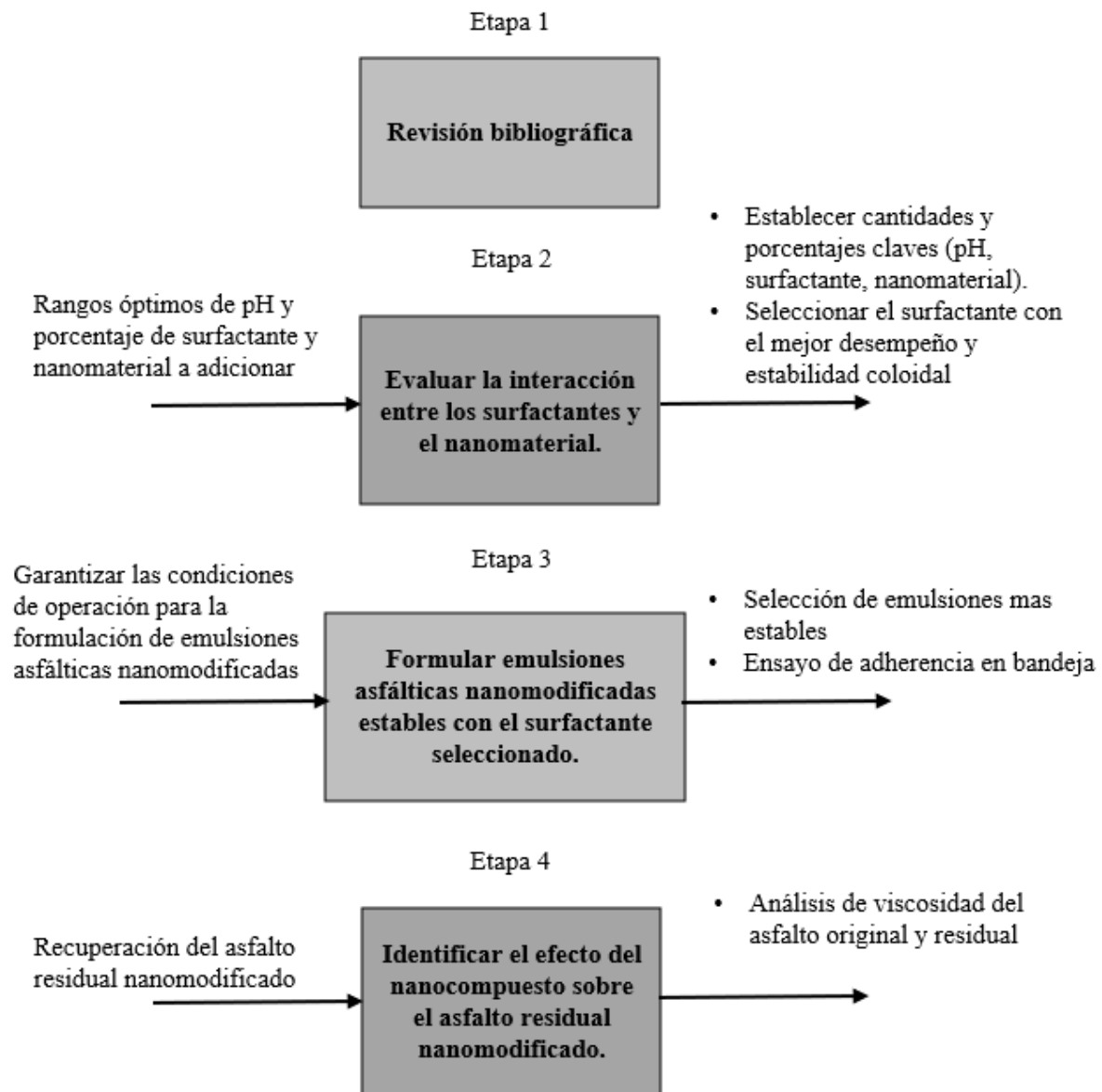
Según (Mohammed & Abed, 2023), la adición de nanosilano genera una estructura interna más cohesiva debido a su alta área superficial y a la presencia de grupos silanoles (Si-OH), que pueden formar enlaces de hidrógeno o interacciones físicas con las moléculas polares del asfalto, mejorando así la cohesión y compatibilidad entre fases. Esta modificación estratégica optimiza la durabilidad y adhesión de las emulsiones, siendo una alternativa prometedora para los modificadores asfálticos.

4. Descripción de la metodología

La metodología seguida en la presente investigación es ilustrada en la **Figura 1**. Las fases en las que fue dividida la metodología, correspondientes con los objetivos específicos, son detalladas a continuación.

Figura 1.

Diagrama de flujo de las etapas metodológicas de la investigación.



4.1 Revisión bibliográfica.

Se llevó a cabo una revisión bibliográfica enfocada principalmente en los siguientes temas: estabilización de material granular usando emulsiones modificadas con nanosilano y formulación de emulsiones asfálticas modificadas sobre el estudio de la interacción

surfactante-nanomaterial en emulsiones. La revisión se hizo mediante la búsqueda de artículos científicos, trabajos de investigación y la base de datos de la biblioteca UIS.

4.2 Evaluar la interacción entre los surfactantes y el nanosilano.

Se realizó un estudio para evaluar la interacción entre los surfactantes utilizados, se propuso hacer el análisis con dos surfactantes catiónicos, SC-1 y SC-2 de rompimiento lento y el nanosilano en dispersiones acuosas. Se prepararon soluciones acuosas con los surfactantes a diferentes pH y concentraciones y se adiciono el nanosilano en proporciones 0.5%, 0.75% y 1% en la fase acuosa respecto a la fase oleosa.

4.2.1 Análisis espectroscopia FTIR

El estudio de la compatibilidad entre el nanosilano y el surfactante se realizó mediante análisis con espectroscopía infrarroja por transformada de fourier (FTIR) para identificar las interacciones químicas entre los grupos funcionales de la superficie del nanocompuesto y el surfactante. Se prepararon muestras de nanocompuesto con y sin surfactante en solución para realizar las mediciones y detectar cambios en los picos de absorbancia característicos de los grupos funcionales en ambas muestras. Los cambios en los picos de FTIR indican interacciones entre los grupos funcionales del surfactante y de la superficie del nanosilano, como enlaces de hidrógeno o interacciones electrostáticas. Estas interacciones son importantes para la adsorción del surfactante en la superficie de las nanopartículas, lo cual puede contribuir a la estabilidad de la emulsión asfáltica.

4.2.2 Análisis de turbidez

La metodología para el análisis de turbidez incluyó la preparación de soluciones acuosas empleando dos agentes surfactantes catiónicos. Cuidadosamente se controlaron las

variables de concentración y pH, basándose en la información proporcionada por la ficha técnica de cada surfactante, con el objetivo de optimizar la actividad surfactante y prevenir que se comportaran como un jabón. Se preparó la fase acuosa de SC-2 y se adicionó en proporciones 1.2%, 1.35% y 1.5%, se controló su pH con ácido clorhídrico en un rango de 1.6, 1.7 y 1.8 respectivamente. El SC-1 se adicionó en proporciones de 1%, 1.1% y 1.2% también controlando el pH con ácido clorhídrico en un rango de 1.2, 1.7 y 1.95. El control riguroso del pH se realizó haciendo uso de un pH-metro Hanna HI 5222 el cual arrojaba datos con 3 cifras significativas para un mayor control del volumen de ácido adicionado. En 3 recipientes se vertió la fase acuosa para modificar con el nanomaterial utilizado, el cual fue Nanotac de la empresa Optimasoil, a 1%, 0.75% y 0.5% respecto a la fase oleosa (asfalto), posterior a esto, se almacenaron en tubos de ensayo las 3 muestras modificadas junto a la muestra sin modificar. Este mismo procedimiento se realizó para ambos surfactantes obteniendo 8 muestras las cuales se analizaron a 0h, 2h, 24h y 5 días. Se evaluó el impacto de la adición del surfactante y el nanocompuesto en la fase acuosa con ayuda de un turbidímetro portátil 2100Q, con el cual se monitoreó el cambio de la turbidez del sistema a lo largo del tiempo, lo que sirvió como un indicador de aglomeración y precipitación de las nanopartículas en la fase acuosa. Un aumento significativo en la turbidez del sistema indica que el nanocompuesto tiende a formar agregados o a precipitarse, reduciendo la estabilidad de la dispersión en la fase acuosa. Incrementos menos pronunciados permiten inferir que el nanocompuesto ayuda con la estabilidad coloidal del sistema a lo largo del tiempo. Con esta metodología se seleccionaron las condiciones de concentración, pH y porcentaje de nanosilano que obtuvieron un mejor comportamiento para cada surfactante.

4.2.3 Análisis suspensión DLS

Se midió el tamaño de las partículas en suspensión mediante el Dynamic light Scattering (DLS), para evaluar la estabilidad de la dispersión de las nanopartículas en presencia de surfactante. Las soluciones de nanocompuesto con diferentes concentraciones de surfactante fueron analizadas para determinar el tamaño de partícula a lo largo del tiempo usando un equipo de DLS. Si el tamaño de partícula permanece constante o disminuye al añadir surfactante, esto indicará que el surfactante está estabilizando las nanopartículas y previniendo la aglomeración. Aumentos en el tamaño de partícula sugieren que el surfactante no es efectivo para mantener la estabilidad de las nanopartículas en suspensión.

4.2.4 Análisis potencial Z

Con las condiciones establecidas y siguiendo el procedimiento para la preparación de las muestras descrito en la sección anterior, se determinó su potencial zeta, midiendo la carga de las nanopartículas dispersas en agua con y sin surfactante. Si el potencial zeta de las nanopartículas aumenta o se estabiliza al agregar el surfactante, esto indica que el surfactante es compatible y ayuda a estabilizar la suspensión de nanosilano, lo que es favorable para la formulación de una emulsión estable. Si el potencial zeta disminuye o fluctúa, puede haber desestabilización o aglomeración, indicando poca compatibilidad.

4.3 Formular emulsiones asfálticas nanomodificadas estables con el surfactante seleccionado.

4.3.1 Formulación de emulsiones

Se realizó la selección más adecuada de las combinaciones surfactante-nanosilano en solución acuosa que cumplió los parámetros establecidos anteriormente, para formular

emulsiones asfálticas nanosilano con proporciones 60/40, 60% de asfalto y 40% de solución acuosa. El asfalto empleado corresponde a asfalto convencional de penetración 60/70 el cual, se caracterizó mediante los ensayos de penetración, punto de inflamación, punto de ablandamiento y viscosidad.

Con base en esto, se seleccionó el surfactante que presentó un mejor desempeño de interacción con el nanosilano en la etapa anterior. Considerando las condiciones de operación mostradas en la **Tabla 1**, la emulsión se preparó empleando un agitador de inmersión Wunder WHB-MISCHEN400 y un baño térmico para garantizar las condiciones de operación de la fase acuosa y la homogeneidad de la mezcla.

Tabla 1.

Condiciones de operación para la preparación de emulsiones asfálticas nanomodificadas.

Fase	Proporciones peso [%]	T[°C]
Oleosa	60	130
Acuosa	40	75

De acuerdo con la cantidad de emulsión que se va a preparar, se obtienen el valor de la cantidad de surfactante que se va a adicionar en la solución acuosa, también se obtiene la cantidad de nanosilano adicionado a la emulsión respecto al asfalto.

Con base a esto, se preparó la solución acuosa con las condiciones de pH y surfactante establecidas y se le adicionó calor hasta alcanzar una temperatura en un rango de 75°C a 80°C, posterior a esto se adicionó el asfalto a una temperatura entre 120°C a 130°C a lo largo de un minuto, se introdujo el agitador y se procedió a agitar de manera manual con el fin de no generar una interfase gas-liquido, se encendió el agitador y durante 5 minutos se agito de manera gradual para garantizar la homogeneidad de la mezcla obteniendo una emulsión

directa. Para finalizar se sumergió nuevamente el recipiente que contenía la emulsión en un baño a temperatura ambiente previniendo la formación de una capa de espuma debido al agua que se está evaporando.

Cuando la emulsión alcanzó una temperatura de 50°C se adicionó la cantidad de nanosilano establecida y se agitó nuevamente por 5 minutos de manera gradual incorporando completamente el nanosilano y se dejó enfriar hasta temperatura ambiente para poder verterla y analizar su estabilidad.

4.3.2 Evaluación de estabilidad

Se evaluó la estabilidad de las emulsiones con y sin nanosilano mediante la norma INV-764 del Instituto Nacional de Vías (INVIAS). Este ensayo hace referencia a la capacidad de una emulsión asfáltica para permanecer en dispersión uniforme durante el almacenamiento. Mediante este ensayo se determina las diferencias entre el porcentaje de residuo tomado por la parte superior e inferior de un cilindro de almacenamiento. El resultado se expresa mediante la diferencia de porcentajes de residuo de las muestras tomadas de la parte superior e inferior del cilindro (Instituto Nacional de Vías. 2013).

4.3.3 Recuperación del asfalto residual

Una vez se identificaron las emulsiones más estables, se recuperó el asfalto residual mediante destilación empleando la norma INV-762. Para este ensayo se pesan 200 g de emulsión en un matraz, el cual, se calienta hasta 260 °C y se mide el volumen de destilado obtenido, luego de terminado el periodo de calentamiento se pesa de nuevo el matraz con accesorios y se calcula el porcentaje de asfalto residual y el volumen de destilado mediante las siguientes ecuaciones.

$$\%Destilado = \frac{A - B}{C} * 100\% \quad Ec 1.$$

$$\%Residuo = 100\% - \%Destilado \quad Ec 2.$$

Donde:

A = Masa del recipiente con la muestra y accesorios antes del ensayo

B = Masa del recipiente con la muestra y accesorios después del ensayo

C = Masa de la muestra

El asfalto recuperado se caracterizó mediante la prueba de adherencia y el ensayo de viscosidad.

4.3.4 Ensayo de adherencia en bandeja

Mediante la norma INV-740 se realizó la prueba de adherencia en bandeja para determinar el porcentaje de adherencia entre el ligante bituminoso y el agregado garantizando la adhesión de la mezcla.

4.4 Efecto del nanosilano sobre el asfalto residual.

4.4.1 Prueba de viscosidad del asfalto residual

Se realizó el ensayo de viscosidad del asfalto original 60/40 y del asfalto residual modificado para analizar los efectos del nanosilano sobre el ligante. Se espera que la presencia del nanosilano contribuya a una mayor rigidez del ligante y mayor resistencia a fluir, así mismo, evaluar su compatibilidad al mejorar las propiedades reológicas del ligante.

5. Resultados y análisis

5.2.1 Análisis FTIR

En las **Figuras 2 y 3** se observa la espectroscopia de infrarrojo para el SC-1 y el SC-2

Figura 2.

Espectroscopia infrarroja SC-1.

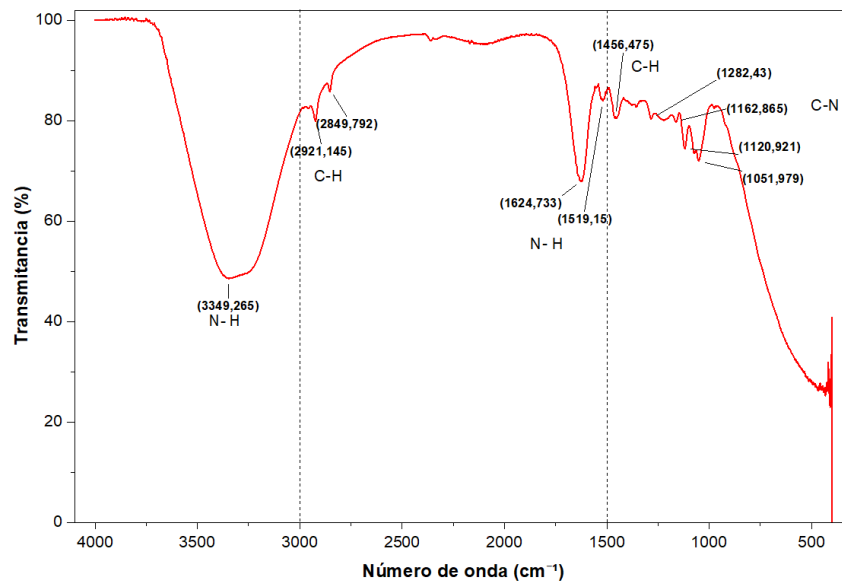
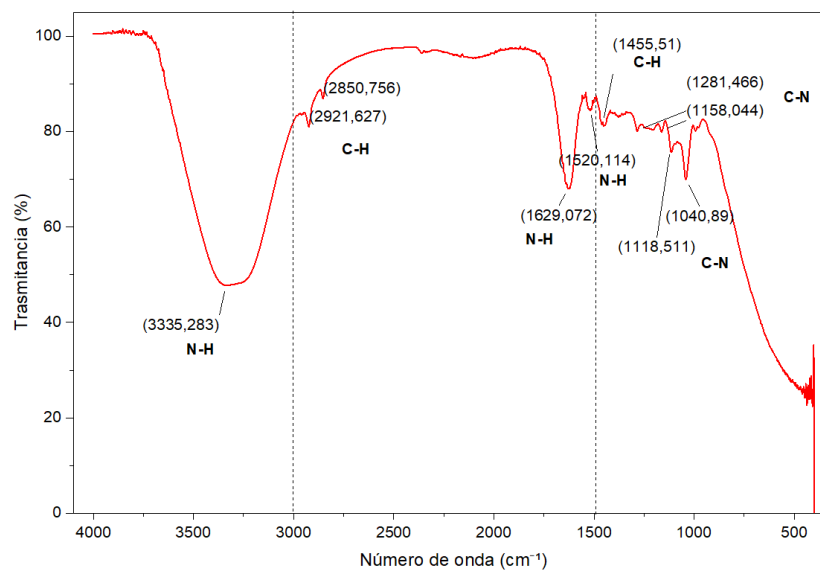


Figura 3. *Espectroscopia infrarroja SC-2.*



Los espectros de los surfactantes SC-1 y SC-2 presentan características típicas de compuestos catiónicos de naturaleza amínica. En ambos casos se observa una banda ancha entre $3335\text{--}3349\text{ cm}^{-1}$, asociada al estiramiento N–H de grupos amina primarios o secundarios, lo que confirma la presencia de funciones nitrogenadas responsables de la carga positiva de los surfactantes a pH ácido (El-Azazy, 2019).

Las bandas en 2921 y 2850 cm^{-1} corresponden a las vibraciones de estiramiento asimétrico y simétrico del grupo $\text{--CH}_2\text{--}$, evidenciando las cadenas alquílicas largas características de surfactantes catiónicos de tipo amina-grasa o alquilamina. Las señales en la región de $1620\text{--}1630\text{ cm}^{-1}$ indican deformaciones N–H o vibraciones C–N, asociadas a la presencia de grupos amina protonados, responsables de la interacción electrostática con la superficie del asfalto y de la estabilización de la emulsión. Las múltiples bandas entre 1519 y 1050 cm^{-1} se atribuyen a deformaciones de enlaces C–H y estiramientos C–N o C–O, comunes en compuestos orgánicos alifáticos y que confirman la naturaleza orgánica de los surfactantes (Nandiyanto et al., 2019; Nelson, 2017).

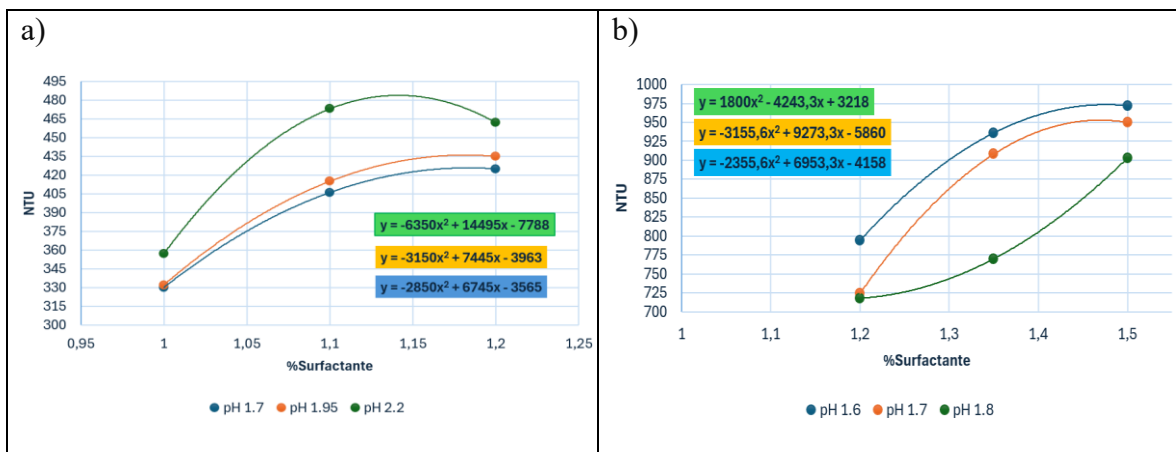
En general, ambos espectros muestran un comportamiento muy similar, lo cual sugiere que SC-1 y SC-2 poseen estructuras químicas análogas, posiblemente derivadas de poliaminas y alquilaminas de cadena larga, respectivamente. La ligera diferencia en la posición de la banda N–H (3349 cm^{-1} en SC-1 frente a 3335 cm^{-1} en SC-2) puede estar asociada a un diferente grado de protonación o interacción con moléculas de agua, esta pequeña diferencia da a entender que los grupos amino del SC-1 están libres o disponibles para protonarse intensamente haciendo que las gotas se repelan con más fuerza, al contrario del SC-2 que se enfoca más en la interacción de sus puentes de hidrógeno con el solvente que generando una carga neta.

5.2.2 Análisis de turbidez

En la **Figura 4** se muestran los resultados de turbidez tomados a las 2 horas de preparadas las soluciones acuosas a medida que se aumenta la concentración de surfactante a 3 diferentes valores de pH.

Figura 4.

Comportamiento de la turbidez para el SC-1 (a) y SC-2 (b) aumentando concentración de surfactante.



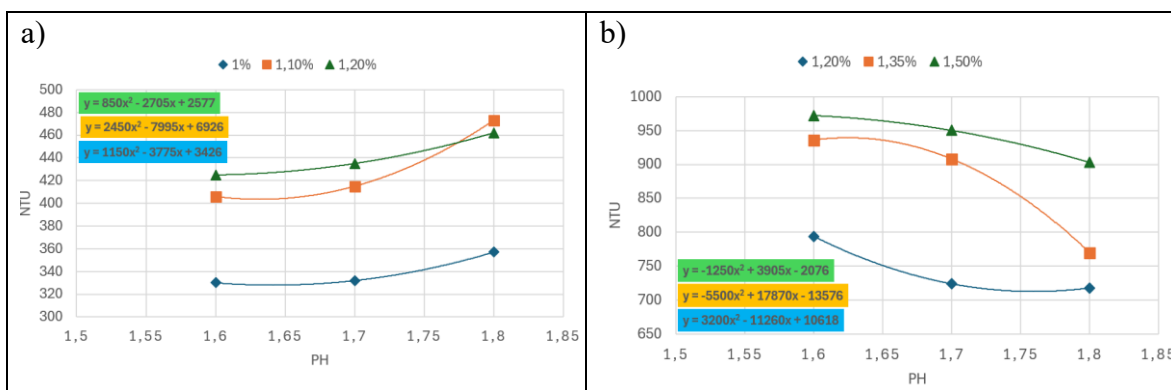
Se observa que, un aumento en la cantidad de surfactante para ambos casos genera un aumento significativo en la turbidez de las soluciones, debido a, la desestabilización coloidal y la agregación de nanopartículas en estructuras de mayor tamaño que dispersan la luz de manera más eficiente (Barrios et al., 2014) . Por otra parte, se observa una menor alteración en la turbidez a pH de 1,8 para el SC-2 y a pH de 1,7 para el SC-1, evidenciado por una menor pendiente para ambos surfactantes, lo cual indica el pH ideal de cada surfactante para mantener la estabilidad de las nanopartículas superando así las fuerzas de atracción. El comportamiento del SC-1 a pH 2,2 puede ser un indicativo de reorganización micelar al aumentar el porcentaje de surfactante, sin embargo, esto representa inestabilidad ante

variaciones mínimas de dosificación que podrían desestabilizar un sistema que opera cerca de su punto crítico de saturación micelar (Barrios et al., 2014; Tadros, 2013).

En la **Figura 5** se presenta el comportamiento de la turbidez a las 2 horas de preparadas las soluciones acuosas a medida que se aumenta el pH a 3 diferente porcentaje de surfactante.

Figura 5.

Comportamiento de la turbidez para el SC-1 (a) y SC-2 (b) aumentando el pH.



Se observa que para el SC-2, el aumento de pH resulta en una disminución en la turbidez del sistema para los 3 casos presentados de porcentaje de surfactante, al contrario del SC-1 que generó un leve aumento de la turbidez a medida que aumenta el pH. Por otro lado, en ambos escenarios la menor perturbación del sistema se presenta con el mayor porcentaje de surfactante en función del pH, evidenciado por una menor pendiente para ambos surfactantes, esto indica que, el sistema alcanza la mayor estabilidad y dispersión de partículas a estas condiciones específicas (Tadros, 2013).

Los resultados indican que para un porcentaje de surfactante determinado, un aumento en el pH mejora y mantiene la repulsión de las partículas en suspensión garantizando la menor turbidez posible. El SC-2 mostró un mejor comportamiento con un porcentaje de

surfactante del 1.5 % a pH de 1.8 y SC-1 demostró un comportamiento ideal con un porcentaje de 1.2% a pH de 1.7, lo que garantiza la concentración y pH para que exista la repulsión necesaria entre las partículas que permita generar un sistema estable con la menor turbidez y aglomeración posible (Soto Ramirez, 2019).

5.2.3 Análisis en suspensión con DLS

En la **Tabla 2** se puede observar la polidispersidad de las muestras en suspensión tras un periodo de sonicación de 2 horas para cada porcentaje de nanosilano adicionado en solución acuosa manteniendo los parámetros de pH y concentración de surfactante para el SC-1 (pH 1.7, 1.2%) y SC-2 (pH 1.8, 1.5%).

Tabla 2.

Distribución del polidispersidad para el SC-1 y el SC-2.

	Polidispersidad (%)	
	SC-1	SC-2
Nano 0%	15.62	24.81
Nano 0.5%	19.8	26.86
Nano 0.75%	19.705	24.28
Nano 1%	23.11	25.46

Para la SC-1, se observa que la suspensión original (Nano 0%) presenta el menor valor de polidispersidad (15.62), lo que indica una distribución de tamaños relativamente más homogénea del sistema micelar del surfactante en solución acuosa. Con la adición progresiva de nanosilano, la polidispersidad aumenta de manera sistemática: pasa a 19.8 con 0.5 %, se mantiene prácticamente constante en 19.705 para 0.75 %, y alcanza un valor máximo de 23.11 en la muestra con 1 % de nanosilano. Este comportamiento evidencia que, aunque el sistema permanece constante, la incorporación del nanosilano disminuye la estabilidad coloidal progresivamente debido a interacciones nanopartícula–surfactante que

favorecen procesos de aglomeración parcial. En particular, el aumento más marcado a 1 % sugiere que existe un umbral de carga de nanopartículas a partir del cual el sistema se vuelve significativamente más disperso en términos de tamaño, reflejando una menor uniformidad estructural de la suspensión.

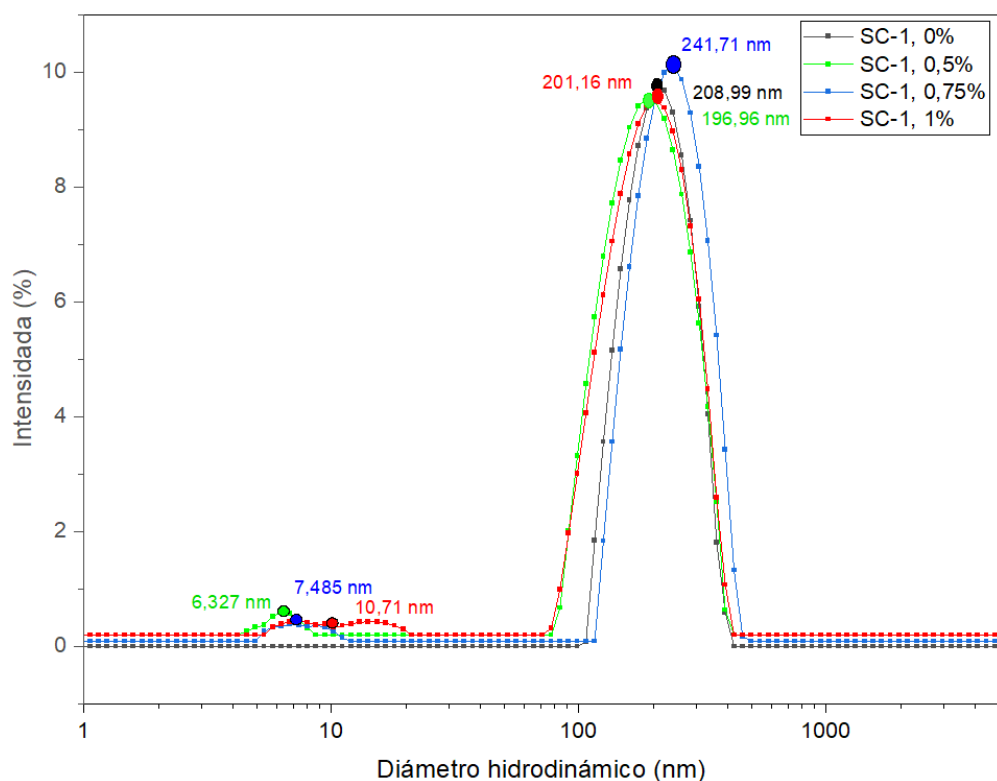
En línea con lo anterior, para la SC-2 se observa que la suspensión original (Nano 0%) presenta un valor de 24.81, lo que indica un sistema inicialmente heterogéneo. Con la adición de 0.5 % de nanosilano, la polidispersidad aumenta a 26.86, evidenciando una mayor dispersión de tamaños. Al incrementar la concentración a 0.75 %, la polidispersidad disminuye a 24.28, sugiriendo una mejor organización del sistema y una distribución de tamaños más homogénea. Finalmente, a 1 %, la polidispersidad vuelve a incrementarse (25.46), lo que indica un aumento nuevamente en la heterogeneidad. En conjunto, los resultados sugieren que concentraciones de 0.75 % de nanosilano corresponde a una concentración intermedia más favorable en términos de homogeneidad del sistema.

A continuación, se presenta el diámetro hidrodinámico de las suspensiones SC-1 y SC-2, con el fin de evaluar el efecto del nanosilano sobre la estabilidad del sistema. Como se observa en la **Figura 6**, se mantiene el tamaño de partícula en un rango estrecho, indicando una mejor estabilidad con la adición del nanosilano. Con la concentración de 0.5% se formaron micelas estables de hasta 6.327nm, siendo esta, la concentración más eficiente para este surfactante al otorgar una estabilidad hidrodinámica superior, un mayor control sobre la agregación masiva y manteniendo los aglomerados parciales por debajo de 200 nm. Con la concentración de 1% pese a que sus valores estuvieron cercanos y mantuvieron una diferencia mínima respecto a la 0.5%, se generan aglomerados mayores a los 200 nm indicando que

posiblemente parte del surfactante fue absorbido por el nanosilano permitiendo la aglomeración parcial de las nanopartículas en suspensión. (Farkas & Kramar, 2021).

Figura 6.

Distribución del diámetro hidrodinámico para el SC-1.

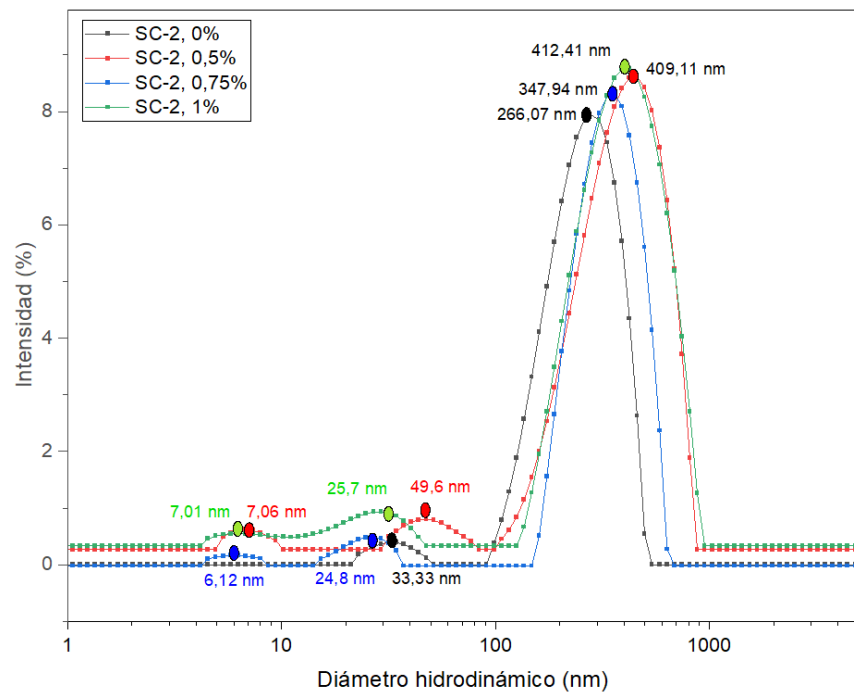


Para las suspensiones formuladas con SC-2, en la **Figura 7** se observa la distribución del diámetro hidrodinámico, la cual se caracteriza por un comportamiento trimodal que evidencia la coexistencia de micelas individualizadas, aglomerados parciales y aglomerados de mayor tamaño o flóculos. Este tipo de distribución sugiere una organización heterogénea del sistema, donde no todas las partículas permanecen estabilizadas de manera uniforme en la fase acuosa. La tendencia hacia la formación de agregados de mayor tamaño indica una disminución en la estabilidad hidrodinámica del sistema tras la incorporación del nanosilano, lo que puede estar asociado a una interacción limitada entre el surfactante y el nanomaterial.

Si bien a una concentración de 0,75 % de nanosilano se pueden identificar micelas estabilizadas con tamaños de 6,12 nm, estas coexisten con aglomerados parciales mayores a 300 nm, lo que evidencia la presencia de estructuras bien dispersas y zonas de agregación. Este comportamiento refleja una dispersión menos eficiente del nanomaterial en la solución acuosa y sugiere que el surfactante SC-2 presenta una capacidad limitada para mantener la estabilidad de la suspensión a medida que aumenta la concentración de nanosilano, afectando la homogeneidad del sistema, la estabilidad coloidal y favoreciendo procesos de aglomeración (Farkas & Kramar, 2021).

Figura 7.

Distribución del diámetro hidrodinámico para el SC-2.



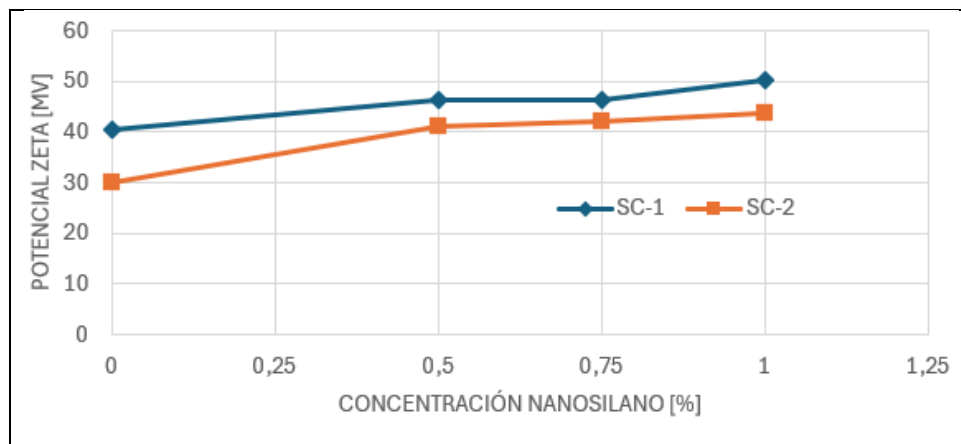
5.2.4 Analisis de potencial Z

En la **Figura 8** se presenta la variación del potencial zeta registrada después de la medición de tamaño de partícula mediante DLS, manteniéndose constantes las condiciones

de pH y concentración de surfactante para cada sistema. En el caso del SC-1, se trabajó con un pH de 1,7 y una concentración de surfactante del 1,2 %, mientras que para el SC-2 se empleó un pH de 1,8 y un contenido de surfactante del 1,5 %.

Figura 8.

Variación del potencial Z en función de la concentración de nanosilano.



Los resultados del potencial zeta evidenciaron que ambos surfactantes presentan una adecuada estabilidad electrostática dentro del rango de concentraciones del nanosilano evaluado, comportamiento característico de surfactantes catiónicos con alta estabilidad coloidal. Este aumento del potencial zeta indica que la adsorción del surfactante sobre la superficie del nanosilano favorece la formación de una doble capa eléctrica, intensificando las fuerzas de repulsión catiónica y reduciendo la tendencia a la aglomeración del nanomaterial. A partir los resultados obtenidos, se determinó la concentración óptima de nanosilano para el SC-1 de 0,5 %, ya que permite limitar la formación de aglomerados y conservar la estabilidad hidrodinámica con tamaños inferiores a 200 nm, mientras que para el SC-2 la concentración más favorable corresponde al 0,75 %, donde se observaron micelas de menor tamaño (2.5, 2022; Florentino Castillo, 1971).

5.3.1 Formulación de emulsiones

En la **Figura 9** se evidencia el cambio físico observado en las emulsiones formuladas sin nanosilano. De manera visual, se aprecia que pequeñas variaciones en las proporciones de los componentes afectan de forma significativa el comportamiento de la emulsión, generando condiciones de inestabilidad bajo los valores de pH y contenido de surfactante establecidos para la obtención de una emulsión 60/40. En particular, en la imagen correspondiente al lado izquierdo se observa el inicio de la separación de fases, con una acumulación del surfactante en la superficie de la emulsión, debido a esto, es crucial mantener las proporciones de la emulsión para evitar la coalescencia o la inconsistencia al excederse en alguna de las fases, también controlar parámetros como el pH y la concentración del surfactante y el nanomaterial, debido a que estos influyen directamente en la formación de la emulsión. El surfactante seleccionado fue el SC-1 a pH, porcentaje de surfactante y nanosilano de 1.7, 1.2% y 0.5% respectivamente. La emulsificación se llevó a cabo bajo agitación controlada garantizando que cumpla el criterio de ser 60/40 y la distribución homogénea de las fases (Tadros, 2013; Walstra, 1993).

Figura 9.

Evaluación visual de emulsiones de SC-1 sin nanosilano.



A pesar de que, para el SC-1 la concentración del 1% de nanosilano sugería una estabilidad coloidal óptima debido a su elevado potencial zeta y poseía una similitud en el tamaño de partícula respecto a la concentración de 0.5%, el comportamiento no fue el esperado. Las emulsiones obtenidas no se mezclaron correctamente, mostrando una separación de fases o rotura de fases casi instantánea luego de sumergidas en el baño a temperatura ambiente.

5.3.2 Evaluación de estabilidad

La **Tabla 3** muestra los datos de estabilidad evaluados a 24 h siguiendo la norma INVIAS-764.

Tabla 3.

Datos estabilidad de emulsiones catiónicas.

Muestra	Nanosilano [%]	Estabilidad [%]
1	0	66.02
2	0	60.87
3	0	63.60
4	0.5	83.58
5	0.5	94.23
6	0.5	91.71
7	1	164.21
8	1	171.43

Las emulsiones preparadas no mostraron una buena estabilidad a las 24 h, se presentó una separación de fase de al menos 200 ml a las 6 horas de preparadas las emulsiones, esto debe ser a varios factores como la temperatura de la fase acuosa o el asfalto, el tiempo de agitación o la velocidad de agitación que influye en la energía requerida para formar correctamente la emulsión y mantenerla en un rango de estabilidad entre 0 y 1% según la normativa INVIAS (Peng et al., 2018).

La adición del nanosilano no influyó directamente en la estabilidad de las emulsiones, presentando menor estabilidad en comparación con las emulsiones a las que no se les adición nanosilano, esto puede ser a una mala dispersión de las nanopartículas, también por otra parte puede que el nanosilano este absorbiendo el surfactante lo cual, disminuye la estabilidad coloidal de las gotas de asfalto impidiendo su correcta distribución. Con el mayor porcentaje de nanomaterial, se presentó una separación total de fases a 2 horas de preparada la emulsión, con una estabilidad coloidal muy baja debido al exceso de nanomaterial que impide la correcta dispersión para formar la interfase asfalto-agua lo que resulta en una mayor aglomeración de las nanopartículas (Linares Zorrilla, 2023; Peng et al., 2018).

Figura 10.

Estabilidad a las 2 horas de preparada la emulsión con 1% de nanosilano.



5.3.3 Recuperación del asfalto residual

Para el desarrollo del ensayo, de una muestra de 200 g de emulsión nanomodificada y según la norma INVIAS-762 el porcentaje de asfalto se calculó mediante la **ecuación 1**.

Tras el proceso de destilación, se obtuvo una masa de 126.5 g de asfalto residual y un volumen de 73 ml de agua. Los resultados obtenidos indican que la emulsión presenta un 63.25 % de asfalto residual, valores que se encuentran dentro del rango establecido por la norma INVIAS (50% - 70%). El valor del 63,25 % de asfalto residual obtenido puede atribuirse a una dosificación excesiva de ligante asfáltico durante su incorporación en la fase acuosa; asimismo, es posible que parte de la solución acuosa se haya evaporado durante el proceso de emulsificación, lo que habría modificado las proporciones originales de la emulsión formulada (Barreto & Alfonso, 2014; Hernández Hernández, 2014).

Muestra [g]	Destilado [ml]	Residuo [g]	Asfalto residual [%]
200	73	126.1	63.05
200	72.5	126.9	63.45

5.3.4 Ensayo de adherencia en bandeja

Se evaluó la capacidad de recubrimiento de la emulsión con y sin nanosilano como se observa en la **Figura 11** mediante el ensayo de adherencia en bandeja empleando 50 piedras por lote según la norma INVIAS 740. Así mismo, en la **Tabla 4** se observan los datos de porcentaje de recubrimiento obtenidos para cada lote.

Tabla 4.

Porcentaje de recubrimiento para cada lote.

	Descubiertas	Parcialmente cubiertas	Completamente cubiertas	Porcentaje de recubrimiento [%]
Emulsión original	0	12	38	88
Emulsión modificada	0	5	45	95

Figura 11.

Ensayo de adherencia en bandeja emulsión original (izq) y emulsión modificada (der).



Los resultados obtenidos en el ensayo de adherencia presentan una buena capacidad de recubrimiento en las emulsiones nanomodificadas con un porcentaje de recubrimiento del 95% en comparación a las emulsiones sin el nanosilano que alcanzó un porcentaje de recubrimiento menor del 88%. El nanosilano puede contribuir a una mejor humectación y buena adherencia con los agregados, esto se puede atribuir a los grupos organosilanos los cuales tienden a mejorar la energía interfacial entre el ligante y el agregado (Huang et al., 2024; Mohammed et al., 2024; You, 2013).

5.4.1 Prueba de viscosidad del asfalto residual

La **Figura 12** muestra el cambio de la viscosidad respecto al incremento de la temperatura para el asfalto original y el asfalto residual obtenido de la emulsión con el SC-1 (pH 1.7 y 1.2% concentración) y 0.5% de nanosilano. Así mismo, en la **Tabla 5** se presentan los valores de viscosidad al incrementar la temperatura para el asfalto original y el asfalto residual.

Figura 12.

Viscosidad para asfalto original y residual respecto a la temperatura.

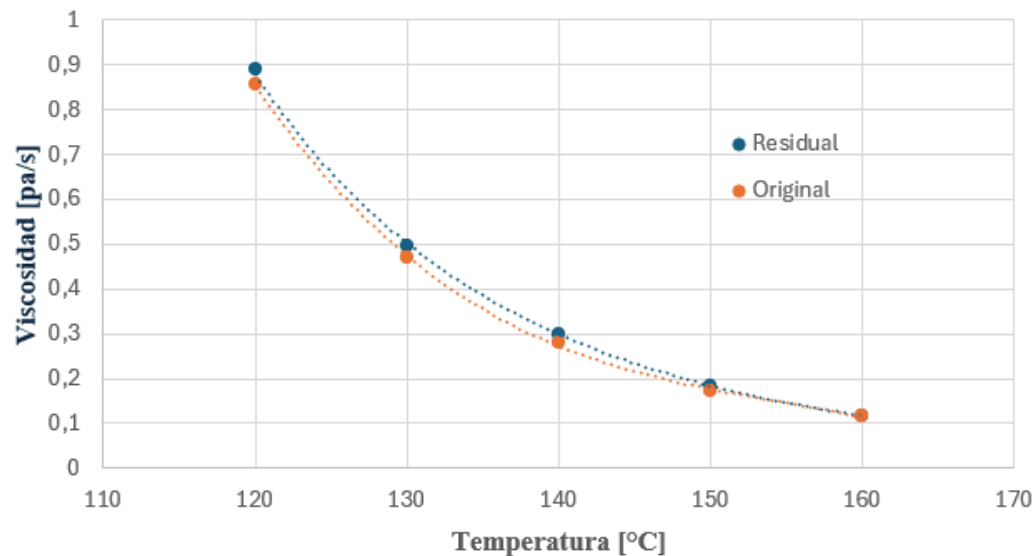


Tabla 5.

Valores de viscosidad del asfalto original y residual.

	Asfalto original	Asfalto residual
T[°C]	Viscosidad [Pa/s]	Viscosidad [Pa/s]
120	0.8547	0.8893
130	0.4694	0.4945
140	0.27815	0.2981
150	0.1728	0.1834
160	0.1145	0.1181

Se observa una disminución en la viscosidad con el aumento de la temperatura, típica de asfaltos convencionales, en ambos casos la viscosidad disminuye de manera exponencial reflejando su naturaleza viscoelástica, sin embargo, el asfalto residual presenta valores ligeramente superiores al asfalto original, este incremento se puede atribuir a residuos de surfactante o nanomaterial, como a posibles pérdidas ligeras durante el proceso de destilación. El asfalto residual mantiene un buen comportamiento reológico evidenciando una buena compatibilidad entre el asfalto original y los componentes empleados en la formulación de emulsiones (Kong et al., 2025; Ouyang & Meng, 2022; Zhang et al., 2021).

6. Conclusiones

La incorporación del nanosilano en las formulaciones evaluadas permitió analizar la compatibilidad entre el surfactante catiónico, la fase acuosa y el ligante asfáltico. Los análisis de tamaño de partícula y potencial zeta mostraron una interacción favorable en la estabilidad coloidal de la solución acuosa generando un menor tamaño de partícula y una mayor repulsión micelar para el SC-1 con la adición del nanosilano.

No se evidenció una mejora significativa en la estabilidad de las emulsiones, los resultados obtenidos muestran que las emulsiones presentaron comportamientos de inestabilidad, evidenciados por la separación de fases y la tendencia a la coalescencia temprana. Aunque los resultados sugieren que el nanosilano presenta una adecuada afinidad con el surfactante, promoviendo una mayor repulsión electrostática y una dispersión más eficiente del nanomaterial, esto no garantiza una estabilidad prolongada del sistema emulsionado, quizá por fallas que podrían ser atribuidas al proceso de producción de la emulsión.

Por otra parte, la incorporación del nanosilano evidenció una interacción efectiva con el ligante asfáltico, reflejada en un aumento de la viscosidad del asfalto residual. Este comportamiento indica que el nanosilano participa en la modificación del asfalto, favoreciendo una mayor cohesión interna y una resistencia superior al flujo, lo que indica una compatibilidad química y física entre el nanomaterial y el ligante.

En cuanto al ensayo de adherencia, las emulsiones nanomodificadas presentaron un mayor porcentaje de recubrimiento del material granular en comparación con las emulsiones sin modificar, lo que evidencia una mejora en la interacción asfalto-agregado. Este resultado confirma que el nanosilano contribuye de manera significativa a mejorar las propiedades

superficiales del sistema, actuando como un agente de acoplamiento que favorece la compatibilidad entre el ligante residual y los agregados pétreos.

Estos resultados permiten concluir que, el surfactante catiónico y el nanosilano a las condiciones establecidas de concentración y operación, actúa de manera efectiva potenciando las propiedades superficiales y reológicas del asfalto, así mismo, su interacción en solución acuosa con los surfactantes favorece la estabilidad coloidal y la repulsión electrostática de las nanopartículas dispersas. (Angel, 2007)

Referencias Bibliográficas

2.5: *Análisis de Potencial Zeta*. (2022, octubre 30). LibreTexts Español.

[https://espanol.libretexts.org/Bookshelves/Quimica/Qu%C3%ADmica_Anal%C3%ADtica/M%C3%A9todos_F%C3%ADsicos_en_Qu%C3%ADmica_y_Nano_Ciencia_\(Barron\)/02%3A_An%C3%A1lisis_f%C3%ADsico_y_t%C3%A9rmico/2.05%3A_An%C3%A1lisis_de_Potencial_Zeta](https://espanol.libretexts.org/Bookshelves/Quimica/Qu%C3%ADmica_Anal%C3%ADtica/M%C3%A9todos_F%C3%ADsicos_en_Qu%C3%ADmica_y_Nano_Ciencia_(Barron)/02%3A_An%C3%A1lisis_f%C3%ADsico_y_t%C3%A9rmico/2.05%3A_An%C3%A1lisis_de_Potencial_Zeta)

Angel. (2007, junio 7). Destilación de asfaltos diluidos | INGENIERIA CIVIL

(APUNTES). *Destilación de asfaltos diluidos | INGENIERIA CIVIL (APUNTES)*.

<https://ingenieracivil.blogspot.com/2007/06/destilacin-de-asfaltos-diluidos.html>

Barrios, N. A., Agüero, B., & Pereira, J. C. (2014). Estudio del punto de turbidez de los surfactantes no-iónicos en solución acuosa: Efecto de la concentración. *Revista Ingeniería UC*, 21(2), 66-72.

Calonge Vargas, E. A. (2023). *Emulsiones asfálticas con adición de Nanosilice*.

<https://repository.eafit.edu.co/items/253979ec-a585-4bc6-a8c6-21b6bc9191ea>

Camacho, Á., & Zapata, M. (2017). *¿QUÉ ES UN NANOMATERIAL?*

<https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/67327>

El-Azazy, M. (2019). *Infrared Spectroscopy: Principles, Advances, and Applications*.

<https://books.google.com/books?hl=es&lr=&id=uwf8DwAAQBAJ&oi=fnd&pg=PR11&dq=Infrared+Spectroscopy:+Principles,+Advances,+and+Applications&ots=hF2Tkut4gt&sig=xkluxCEuwQBuTO1dCKLfnybG6qk>

Farkas, N., & Kramar, J. A. (2021). Dynamic light scattering distributions by any means.

Journal of Nanoparticle Research, 23(5), 120. <https://doi.org/10.1007/s11051-021-05220-6>

- Florentino Castillo, A. A. (1971). *Potencial zeta, su importancia en la desestabilización y estabilización de sistemas coloidales*. <https://ru.dgb.unam.mx/bitstreams/35a290b3-bff1-45dc-831e-9976e9b20c69/download>
- García, J. P. A. (2017, septiembre 13). Obtención de Asfalto desde Petróleo. *Asfalto Madrid*. <https://asfaltomadrid.com/blog/obtencion-de-asfalto-desde-petroleo/>
- Gualteros Morales, J. D. (s. f.). *Estado del arte del uso de nanotecnología para pavimentos hidráulicos y flexibles en Colombia* [PhD Thesis, Pregrado Ingeniería Civil]. Recuperado 29 de octubre de 2024, de <https://repository.usta.edu.co/handle/11634/45462>
- Huang, H., Wang, Y., Wu, X., Zhang, J., & Huang, X. (2024). Nanomaterials for modified asphalt and their effects on viscosity characteristics: A comprehensive review. *Nanomaterials*, *14*(18), 1503.
- Jordaan, G. J., & Steyn, W. J. vdM. (2021a). Engineering properties of new-age (nano) modified emulsion (NME) stabilised naturally available granular road pavement materials explained using basic chemistry. *Applied Sciences*, *11*(20), 9699.
- Jordaan, G. J., & Steyn, W. J. vdM. (2021b). Nanotechnology incorporation into road pavement design based on scientific principles of materials chemistry and engineering physics using New-age (nano) Modified Emulsion (NME) stabilisation/enhancement of granular materials. *Applied Sciences*, *11*(18), 8525.
- Kong, L., Liu, R., Peng, Y., Zhu, S., Li, Z., Jiang, X., Li, H., & Yang, B. (2025). Study on the stability of high-asphalt-content emulsified asphalt and its influencing factors based on quantitative analysis of droplet size. *Construction and Building Materials*, *496*, 143786.

- lanammeucr. (2022, octubre 5). Emulsiones asfálticas: Concepto, aplicación, clasificación, rompimiento y curado. *Blog LanammeUCR*.
<https://bloglanammeucr.wordpress.com/2022/10/05/emulsiones-asfalticas-concepto-aplicacion-clasificacion-rompimiento-y-curado/>
- Linares Zorrilla, R. G. (2023). *Análisis comparativo de la capacidad estructural de pavimentos flexibles con tratamientos superficiales con pen 60/70 y emulsión catiónica tipo CSS-1HP*. <https://repositorio.upla.edu.pe/handle/20.500.12848/5972>
- Márquez, G., Martín, J. J., Alejandre, F. J., Fortes, J. C., Prat, F., & Dávila, J. M. (2009). Effect of synthetic surfactants, salinity and alkalinity on the properties of asphalt emulsions. *Materiales de Construcción*, 59(295), 79-89.
- Mercado, R., Bracho, C., & Avendaño, J. (2008). Emulsiones asfálticas: Usos-Rompimiento. *Cuadernos FIRP S365-A. Mérida, Venezuela: Universidad de los Andes*.
<https://scholar.google.com/scholar?cluster=6030686943371159951&hl=en&oi=scholar>
- Mohammed, A. M., & Abed, A. H. (2023). Enhancing asphalt binder performance through nano-SiO₂ and nano-CaCO₃ additives: Rheological and physical insights. *Case Studies in Construction Materials*, 19, e02492.
<https://doi.org/10.1016/j.cscm.2023.e02492>
- Mohammed, A. S., Kavussi, A., & Manteghian, M. (2024). The role of nanomaterials in enhancing adhesion properties between bitumen and aggregate particles. *Results in Engineering*, 24, 103193.

- Murphy, M., Jordaan, G., Modise, T., & Dryburgh, R. (2019). *The influence of the characteristics of emulsifying agents on the stabilisation of granular materials using nano-silane modified bitumen emulsions.*
- Nandiyanto, A. B. D., Oktiani, R., & Ragadhita, R. (2019). How to read and interpret FTIR spectroscope of organic material. *Indonesian Journal of Science and Technology*, 4(1), 97-118.
- Nelson, D. L. (2017). Introduction to spectroscopy. En *Spectroscopic methods in food analysis* (pp. 3-34). CRC Press.
<https://www.taylorfrancis.com/chapters/edit/10.1201/9781315152769-1/introduction-spectroscopy-david-lee-nelson>
- Ouyang, J., & Meng, Y. (2022). Quantitative effect of droplet size and emulsion viscosity on the storage stability of asphalt emulsion. *Construction and Building Materials*, 342, 127994.
- Peng, C., Chen, P., You, Z., Lv, S., Zhang, R., Xu, F., Zhang, H., & Chen, H. (2018). Effect of silane coupling agent on improving the adhesive properties between asphalt binder and aggregates. *Construction and Building Materials*, 169, 591-600.
- Rada, D. (2025, agosto 11). *Mezcla Asfáltica y su Composición—Asfaltosrada.com.*
<https://asfaltosrada.com/mezcla-asfaltica-y-su-composicion/>
- Ronald, M., & Luis, F. P. (2016). Asphalt emulsions formulation: State-of-the-art and dependency of formulation on emulsions properties. *Construction and Building Materials*, 123, 162-173.
- Soto Ramirez, C. J. (2019). *Perfil de invasión de un surfactante aniónico en procesos de recobro mejorado* [PhD Thesis, Medellín-Minas-Maestría en Ingeniería-Ingeniería de Petróleos]. <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/78003>

Tadros, T. F. (Ed.). (2013). *Emulsion Formation and Stability* (1.^a ed.). Wiley.

<https://doi.org/10.1002/9783527647941>

Velázquez, M. (1969). *Manual del asfalto*. Urmo.

https://www.academia.edu/download/124891532/Manual_Del_Asfalto_Manuel_Vel_zquez_1_.pdf

Vizcarra Condori, Y. J. (2016). *Diseño de mezcla asfáltica con emulsión*.

<http://repositorio.ujcm.edu.pe/handle/20.500.12819/458>

Walstra, P. (1993). Principles of emulsion formation. *Chemical engineering science*, 48(2), 333-349.

You, Z. (2013). Nanomaterials in asphalt pavements. *International Journal of Pavement Research and Technology*, 6(3), IV.

Zhang, E., Qi, X., Shan, L., & Li, D. (2021). Investigation of rheological properties of asphalt emulsions. *Journal of Infrastructure Preservation and Resilience*, 2(1), 22.

<https://doi.org/10.1186/s43065-021-00036-z>