REVISTA CIENTÍFICA
CONECTIVIDAD
Instituto Superior Tecnológico Rumiñahui

Fecha de recepción: 13 / 05 / 2026
Fecha de aceptación: 11 / 11 / 2026
Fecha de publicación: 19 / 11 / 2026

Artículo Científico

Evaluación técnica de mezclas asfálticas modificadas con residuos plásticos reciclados mediante un prototipo experimental

Technical Evaluation of Asphalt Mixtures Modified with Recycled Plastic Waste Using an Experimental Prototype

Jacqueline Elizabeth Dávila Pabón[1], Luis Alfredo Alvarez Lazo[2], Lizeth Fernanda Fueres Fueres[3]

[1] Instituto Superior Tecnológico Rumiñahui, jacqueline.davila@ister.edu.ec, Sangolquí – Ecuador
[2] Instituto Superior Tecnológico Rumiñahui, luis.alvarez@ister.edu.ec, Sangolquí – Ecuador
[3] Instituto Superior Tecnológico Rumiñahui, lizeth.fueres@ister.edu.ec, Sangolquí – Ecuador

Autor para correspondencia: jacqueline.davila@ister.edu.ec

RESUMEN

El presente estudio evalúa de manera exploratoria el uso de residuos plásticos reciclados como modificadores en mezclas asfálticas destinadas a potenciales aplicaciones en infraestructura petrolera. La investigación se desarrolló mediante la construcción y evaluación funcional de un prototipo de mezclado térmico-mecánico, diseñado para incorporar plástico reciclado bajo condiciones controladas de temperatura y agitación. Para la fase experimental se prepararon formulaciones con distinta cantidad de plástico y diferentes condiciones de compactación. Las muestras fueron expuestas a carga estática y se observaron cambios en su forma, cohesión, superficie y presencia de fisuras o desprendimientos. La preparación se realizó entre 160 °C y 180 °C, empleando residuos de polietileno y polipropileno. Entre las formulaciones analizadas, M1 conservó mejor su forma y cohesión, con deformación controlada y sin fractura visible. M2 mostró mayor rigidez y una microfisura superficial después de la prueba, mientras que M3 presentó pérdida de forma, disgregación y menor cohesión. También se efectuó una estimación preliminar del componente ambiental y energético, obteniéndose reducciones aproximadas del 18 % en el consumo de energía y del 22 % en las emisiones de CO_2 equivalente frente al escenario convencional de referencia. Los resultados muestran posibilidades de aprovechamiento de residuos plásticos en mezclas asfálticas; sin embargo, al corresponder a una etapa experimental, se requieren pruebas posteriores con réplicas controladas, tratamiento estadístico y métodos de ensayo normalizados antes de considerar su aplicación a mayor escala.

Palabras clave: Asfalto modificado; Residuos plásticos reciclados; Infraestructura petrolera; Sostenibilidad; Economía circular.

ABSTRACT

This study provides an exploratory evaluation of the use of recycled plastic waste as a modifier in asphalt mixtures intended for potential applications in petroleum infrastructure. The research involved the construction and functional evaluation of an experimental thermal-mechanical mixing prototype designed to incorporate recycled plastic into asphalt mixtures under controlled temperature and agitation conditions. Mixtures with different proportions of recycled plastic and compaction conditions were prepared and subjected to a comparative evaluation through static load application and observation of deformation, cohesion, surface integrity, and the presence of cracks or disintegration. The experimental process was conducted at temperatures ranging from 160 °C to 180 °C, using polyethylene and polypropylene plastic waste incorporated into the asphalt binder. Preliminary results showed that formulation M1 exhibited the most favorable comparative behavior, with adequate cohesion, controlled deformation, and no apparent fracture. In contrast, M2 exhibited greater apparent stiffness and surface microcracking, while M3 showed loss of shape, disintegration, and lower cohesion. In addition, a preliminary environmental and energy assessment was conducted, estimating approximate reductions of 18% in energy consumption and 22% in CO_2-equivalent emissions compared with a conventional reference scenario. The incorporation of plastic waste promoted its valorization within the asphalt matrix. Overall, the results suggest favorable potential for the use of recycled plastic waste in asphalt mixtures; however, its application requires further validation through controlled replicates, statistical analysis, and standardized testing.

Keywords: Modified asphalt; Recycled plastic waste; Petroleum infrastructure; Sustainability; Circular economy.

Derechos de Autor

Los originales publicados en las ediciones electrónicas bajo derechos de primera publicación de la revista son del Instituto Superior Tecnológico Universitario Rumiñahui, por ello, es necesario citar la procedencia en cualquier reproducción parcial o total. Todos los contenidos de la revista electrónica se distribuyen bajo una licencia de Creative Commons Reconocimiento-NoComercial-4.0 Internacional.

Citar como:

Dávila Pabón , J. E., Alvarez Lazo, L. A., & Fueres Fueres, L. F. (2026). Evaluación técnica de mezclas asfálticas modificadas con residuos plásticos reciclados mediante un prototipo experimental. *CONECTIVIDAD*, *7*(2), e507. https://doi.org/10.37431/conectividad.v7i2.507

Fecha de recepción: 13 / 05 / 2026
Fecha de aceptación: 11 / 11 / 2026
Fecha de publicación: 19 / 11 / 2026

1. INTRODUCCIÓN

La acumulación de residuos plásticos representa uno de los principales desafíos ambientales a nivel mundial debido al incremento sostenido en la producción de polímeros sintéticos y a las limitaciones existentes en los sistemas de reciclaje y disposición final. Entre estos residuos se encuentran el polietileno (PE) y el polipropileno (PP), presentes tanto en productos de uso cotidiano como en diferentes actividades industriales. Una de las dificultades asociadas a estos materiales es su lenta degradación, por lo que pueden permanecer durante largos periodos después de ser desechados y acumularse en rellenos sanitarios y otros entornos naturales (Geyer et al., 2017). En las actividades industriales, esta situación se suma al uso continuo de materiales provenientes del petróleo, lo que hace necesario buscar alternativas que permitan recuperar y reincorporar parte de estos residuos en nuevos procesos.

En el sector petrolero, las vías de acceso, plataformas y patios operativos deben soportar el tránsito frecuente de vehículos y maquinaria pesada, además de cambios de temperatura y contacto eventual con hidrocarburos. Estas condiciones pueden afectar progresivamente las superficies asfaltadas y favorecer la aparición de deformaciones, fisuras y pérdida de cohesión, lo que incrementa las necesidades de mantenimiento. Ante este escenario, la incorporación de residuos plásticos reciclados en mezclas asfálticas constituye una alternativa que ha sido estudiada para modificar el comportamiento de estos materiales frente a diferentes condiciones de servicio (Ma et al., 2021).

Frente a esta problemática, el uso de asfaltos modificados con polímeros ha surgido como una alternativa para mejorar el comportamiento mecánico y térmico de los pavimentos. La incorporación de materiales poliméricos dentro de la matriz bituminosa permite mejorar la estabilidad, la resistencia a la deformación y el desempeño general de las mezclas asfálticas modificadas (Mashaan et al., 2021). En este contexto, diversos estudios han demostrado que los residuos plásticos reciclados pueden actuar como modificadores efectivos del ligante asfáltico, aportando propiedades similares a las obtenidas con polímeros comerciales, pero con menores costos y beneficios ambientales asociados a la valorización de residuos (Xu et al., 2021). De manera complementaria, revisiones recientes han demostrado que la incorporación de plásticos reciclados en mezclas asfálticas puede generar beneficios mecánicos, ambientales y económicos,

Fecha de recepción: 13 / 05 / 2026
Fecha de aceptación: 11 / 11 / 2026
Fecha de publicación: 19 / 11 / 2026

contribuyendo a estrategias de sostenibilidad y economía circular dentro de la infraestructura vial (Calderón-Ramírez et al., 2025).

A nivel internacional, diversos estudios han demostrado la viabilidad de incorporar residuos reciclados en mezclas asfálticas, obteniendo mejoras en propiedades mecánicas, durabilidad y sostenibilidad ambiental. Estas aplicaciones han evidenciado el potencial de los materiales reciclados para reducir el consumo de materias primas vírgenes y contribuir a estrategias de economía circular dentro de la infraestructura vial (Rahman et al., 2020). Sin embargo, gran parte de estas tecnologías requieren infraestructura industrial especializada, sistemas avanzados de control térmico y elevados costos operativos, lo que limita su aplicación en contextos experimentales, académicos o de pequeña escala.

En Ecuador, las investigaciones relacionadas con asfaltos modificados mediante residuos plásticos aún son limitadas, particularmente en aplicaciones orientadas al sector petrolero. Además, existe escasa información sobre el comportamiento técnico y ambiental de mezclas asfálticas desarrolladas mediante prototipos experimentales adaptados a condiciones locales. Esta situación evidencia la necesidad de generar investigaciones aplicadas que permitan evaluar alternativas sostenibles y técnicamente viables para la reutilización de residuos plásticos en infraestructura operativa petrolera. La evaluación ambiental mediante enfoques de análisis de ciclo de vida también se ha consolidado como una herramienta fundamental para determinar la sostenibilidad de los materiales utilizados en infraestructura vial (Santero et al., 2011).

En respuesta a esta necesidad, el presente estudio desarrolla y evalúa un prototipo experimental para la producción de mezclas asfálticas modificadas con residuos plásticos reciclados, incorporando materiales tipo polietileno y polipropileno mediante procesos de mezclado térmico y agitación mecánica controlada. El trabajo incluye la evaluación experimental del comportamiento estructural de mezclas con diferentes proporciones de plástico reciclado, así como un análisis preliminar de ciclo de vida, consumo energético y reducción de emisiones asociadas al proceso.

El objetivo principal de la investigación es evaluar la viabilidad técnica y ambiental del uso de residuos plásticos reciclados en mezclas asfálticas destinadas a aplicaciones en infraestructura petrolera, promoviendo estrategias de sostenibilidad, economía circular y valorización de

Fecha de recepción: 13 / 05 / 2026
Fecha de aceptación: 11 / 11 / 2026
Fecha de publicación: 19 / 11 / 2026

residuos dentro del contexto de la ingeniería aplicada.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. Materiales

Para el desarrollo experimental de las mezclas asfálticas modificadas se emplearon materiales convencionales utilizados en pavimentación, combinados con residuos plásticos reciclados seleccionados por su disponibilidad, facilidad de procesamiento y comportamiento térmico. La selección de los materiales se realizó considerando que los polímeros termoplásticos como el polietileno de alta densidad (HDPE), polietileno de baja densidad (LDPE) y polipropileno (PP) presentan mayor facilidad de incorporación en mezclas asfálticas debido a sus rangos de fusión y a su capacidad de interacción con el ligante bituminoso. Asimismo, estudios previos han señalado que la incorporación de plásticos reciclados puede mejorar propiedades como la estabilidad mecánica, la resistencia a la deformación y el desempeño general de las mezclas asfálticas cuando son utilizados en proporciones controladas (Xu et al., 2021).

El ligante utilizado correspondió a cemento asfáltico convencional empleado como matriz principal de la mezcla. Como agregado pétreo se utilizó granito lavado gris, seleccionado por su resistencia mecánica, estabilidad térmica y capacidad de integrarse con el ligante durante el proceso de mezclado. Los residuos plásticos incorporados correspondieron principalmente a plástico triturado y polipropileno reciclado, materiales que fueron acondicionados previamente mediante limpieza, reducción de tamaño y clasificación manual, con el fin de favorecer su distribución homogénea dentro de la matriz asfáltica. Los materiales seleccionados para la elaboración de las mezclas asfálticas modificadas, junto con su función y criterio de selección, se presentan en la Tabla 1.

Como se observa en la Tabla 1, los materiales empleados fueron seleccionados considerando tanto criterios técnicos como ambientales, priorizando la incorporación de residuos plásticos reciclados con propiedades adecuadas para su integración dentro de la matriz asfáltica.

El uso de residuos plásticos como modificadores del asfalto se fundamenta en su capacidad para actuar como refuerzo dentro de la matriz bituminosa, incrementando la cohesión interna, la rigidez y la resistencia a deformaciones permanentes. Estudios previos han señalado que la incorporación de plásticos reciclados puede mejorar propiedades relacionadas con la rigidez, la resistencia a fatiga

Fecha de recepción: 13 / 05 / 2026
Fecha de aceptación: 11 / 11 / 2026
Fecha de publicación: 19 / 11 / 2026

y el comportamiento mecánico de las mezclas asfálticas, siempre que se controle adecuadamente la temperatura, la dosificación y el tamaño de partícula (Modarres & Hamedi, 2014).

Tabla 1. Materiales utilizados en la elaboración de las mezclas asfálticas modificadas.

Material	Función dentro de la mezcla	Criterio de selección
Cemento asfáltico	Ligante principal de la mezcla	Permite unir los agregados y el plástico reciclado
Granito lavado gris	Agregado pétreo	Aporta resistencia mecánica y estabilidad estructural
Plástico triturado reciclado	Modificador polimérico	Reutilización de residuos y mejora de cohesión
Polipropileno reciclado	Modificador termoplástico	Buena estabilidad térmica y aporte de rigidez
Energía térmica	Fusión y homogeneización	Permite trabajar entre 160 °C y 180 °C
Sistema de agitación	Dispersión del material	Favorece mezcla uniforme entre ligante, agregado y plástico

Fuente: Elaborado por los autores.

Previo a su incorporación, se evitó el uso de plásticos como PVC, ABS o policarbonato, debido a que pueden presentar aditivos halogenados, alto contenido de cloro o comportamientos térmicos inadecuados durante el calentamiento. Esta restricción es importante para reducir riesgos de emisiones no deseadas y asegurar una mezcla más estable desde el punto de vista ambiental y operativo (Mashaan et al., 2021).

Los principales tipos de plásticos evaluados y su aplicabilidad potencial en mezclas asfálticas modificadas se muestran en la Tabla 2.

Tabla 2. Tipos de plásticos considerados para mezclas asfálticas modificadas.

Tipo de plástico	Aplicabilidad en la mezcla	Observación técnica
HDPE	Alta	Buena resistencia térmica y mecánica
LDPE	Alta	Fácil fusión y buena distribución
PP	Alta	Aporta rigidez y estabilidad térmica
PET	Limitada	Requiere mayor temperatura de fusión
PVC	No recomendado	Riesgo de emisiones por contenido de cloro

Fuente: Elaborado por los autores.

La Tabla 2 evidencia que materiales como HDPE, LDPE y PP presentan mayor potencial de aplicación debido a sus características térmicas y mecánicas, mientras que materiales como PVC no fueron considerados debido a posibles riesgos ambientales durante el calentamiento.

La preparación de las muestras se realizó mediante un prototipo experimental construido específicamente para el proyecto. El equipo estuvo conformado por una cámara metálica de mezcla, un eje agitador con paletas, un motor eléctrico con sistema reductor de velocidad, un

Fecha de recepción: 13 / 05 / 2026
Fecha de aceptación: 11 / 11 / 2026
Fecha de publicación: 19 / 11 / 2026

sistema de calentamiento y una estructura metálica de soporte. Este diseño permitió realizar el mezclado térmico y mecánico del plástico reciclado con el ligante asfáltico bajo condiciones controladas de laboratorio.

Los componentes principales utilizados para la construcción y funcionamiento del prototipo experimental se describen en la Tabla 3.

Tabla 3. Componentes principales del prototipo experimental.

Componente	**Función**
Cámara metálica de mezcla	Contener el asfalto, agregado y plástico durante el proceso
Eje agitador con paletas	Homogeneizar la mezcla mediante agitación mecánica
Motor eléctrico con reductor	Proporcionar movimiento rotacional controlado
Sistema de calentamiento	Mantener la temperatura de trabajo entre 160 °C y 180 °C
Estructura metálica soporte	Dar estabilidad y seguridad al equipo
Termómetro digital	Controlar la temperatura durante el proceso

Fuente: Elaborado por los autores.

Como se muestra en la Tabla 3, el prototipo fue diseñado mediante la integración de componentes mecánicos y térmicos que permitieron controlar las variables críticas del proceso experimental.

2.2. Elaboración del prototipo experimental

Con el propósito de desarrollar un sistema capaz de incorporar residuos plásticos reciclados dentro de mezclas asfálticas bajo condiciones controladas, se diseñó y construyó un prototipo experimental de mezclado térmico–mecánico a escala de laboratorio. El prototipo fue desarrollado considerando criterios de funcionalidad, estabilidad térmica, seguridad operativa y facilidad de fabricación, buscando obtener un equipo adaptable a procesos experimentales de bajo costo y posible aplicación futura en proyectos de valorización de residuos dentro del sector petrolero.

El diseño conceptual del sistema se basó en la necesidad de mantener temperaturas elevadas y agitación continua durante el proceso de incorporación del plástico reciclado al ligante asfáltico. A diferencia de sistemas industriales complejos, el prototipo desarrollado presenta una configuración compacta y simplificada, adaptada para condiciones de laboratorio y experimentación académica. Este enfoque permite replicar a pequeña escala el comportamiento de mezclas asfálticas modificadas mediante incorporación directa de residuos plásticos.

El funcionamiento general del prototipo se estructuró mediante una secuencia operativa compuesta por dosificación manual del asfalto caliente, incorporación directa del plástico triturado, activación simultánea del sistema de calentamiento y agitación, homogeneización

Fecha de recepción: 13 / 05 / 2026
Fecha de aceptación: 11 / 11 / 2026
Fecha de publicación: 19 / 11 / 2026

térmica y mecánica de la mezcla y descarga manual del material modificado. La secuencia de funcionamiento implementada durante el proceso de mezclado se resume en la Tabla 4.

Tabla 4. Secuencia funcional del proceso dentro del prototipo experimental.

Etapa	Descripción
1	Dosificación manual de asfalto caliente
2	Incorporación del plástico triturado
3	Activación del sistema de calentamiento y agitación
4	Homogeneización térmica y mecánica
5	Descarga manual de la mezcla modificada

Fuente: Adaptado del diseño funcional del prototipo.

La secuencia presentada en la Tabla 4 permitió establecer un procedimiento estandarizado para la incorporación del plástico reciclado dentro de la mezcla asfáltica.

La estructura principal del prototipo estuvo conformada por un bastidor metálico de soporte construido en acero, diseñado para soportar las cargas mecánicas y térmicas generadas durante el proceso de mezclado. Sobre esta estructura se instaló una cámara metálica cilíndrica utilizada como recipiente principal para la mezcla de agregados pétreos, cemento asfáltico y residuos plásticos reciclados. El recipiente fue fabricado en acero metálico resistente a temperaturas elevadas y con capacidad aproximada entre 8 y 12 litros.

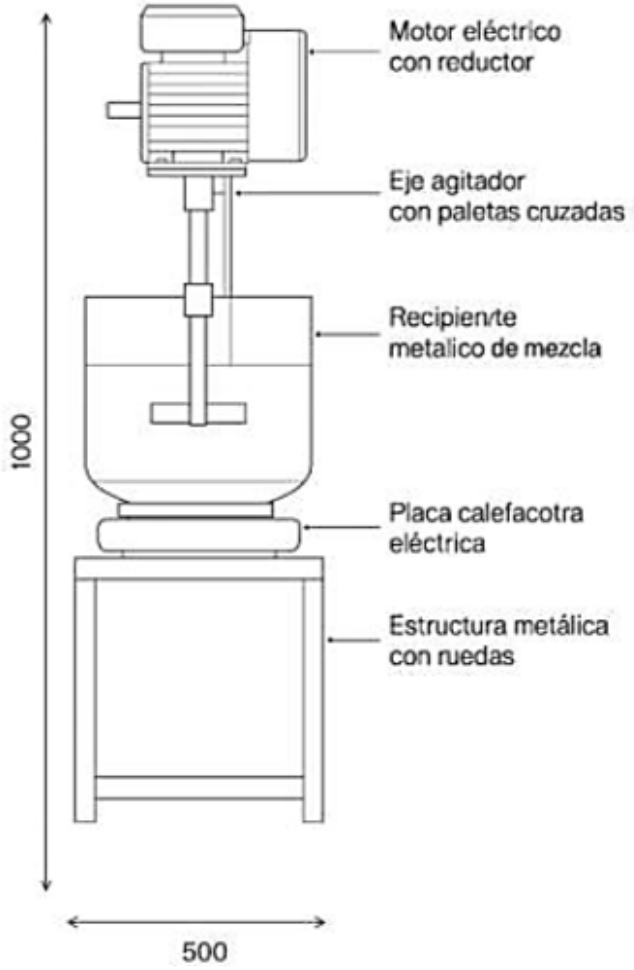
El sistema de agitación estuvo conformado por un eje vertical acoplado a un conjunto de paletas metálicas internas, diseñado para favorecer la homogeneización de la mezcla y evitar acumulación de material en las paredes del recipiente. El movimiento rotacional fue generado mediante un motor eléctrico con sistema reductor y controlado mediante un variador de frecuencia (VFD), permitiendo mantener velocidades de operación adecuadas para garantizar uniformidad de la mezcla.

El sistema de calentamiento se ubicó en la parte inferior de la cámara de mezcla y estuvo compuesto por una placa térmica eléctrica regulable capaz de mantener temperaturas operativas entre 160 °C y 180 °C. Este rango térmico fue seleccionado debido a que permite la fusión parcial de polímeros reciclados como polietileno y polipropileno sin generar degradación térmica significativa del material (Mashaan et al., 2021).

Con el propósito de incorporar residuos plásticos en mezclas asfálticas bajo condiciones controladas, se diseñó y construyó el prototipo experimental mostrado en la Figura 1.

Fecha de recepción: 13 / 05 / 2026
Fecha de aceptación: 11 / 11 / 2026
Fecha de publicación: 19 / 11 / 2026

Figura 1. Prototipo experimental utilizado para la producción de mezclas asfálticas modificadas con residuos plásticos reciclados mediante mezclado térmico–mecánico controlado.



Fuente: Autores.

La configuración general del sistema de mezclado térmico-mecánico desarrollado para la investigación puede observarse en la Figura 2.

Los elementos mecánicos y operativos que conforman el prototipo experimental se presentan en la Tabla 5.

Tabla 5. Componentes principales del prototipo experimental.

Componente	Función
Motor eléctrico con reductor	Generar movimiento rotacional controlado
Variador de frecuencia (VFD)	Regular velocidad de agitación
Eje agitador con paletas	Homogeneizar la mezcla
Cámara metálica de mezcla	Contener los materiales durante el proceso
Sistema de calentamiento eléctrico	Mantener la temperatura operativa
Bastidor metálico	Proporcionar estabilidad estructural
Ruedas industriales	Facilitar movilidad del equipo
Termómetro digital	Controlar temperatura del sistema

Fuente: Elaborado por los autores con base en el diseño técnico del prototipo.

Fecha de recepción: 13 / 05 / 2026
Fecha de aceptación: 11 / 11 / 2026
Fecha de publicación: 19 / 11 / 2026

Figura 2. Prototipo experimental de mezclado térmico–mecánico utilizado para la elaboración de mezclas asfálticas modificadas con residuos plásticos reciclados en condiciones de laboratorio.



Fuente: Autores.

Los componentes descritos en la Tabla 5 fueron seleccionados para garantizar estabilidad mecánica, control térmico y homogeneidad durante el mezclado.

Durante la construcción del prototipo se realizaron pruebas preliminares de funcionamiento orientadas a verificar la estabilidad mecánica del sistema, la capacidad de agitación y el comportamiento térmico durante el mezclado. Las pruebas funcionales permitieron comprobar el correcto funcionamiento del sistema de rotación, ausencia de vibraciones significativas y estabilidad estructural durante la operación. Asimismo, se evaluó el comportamiento del sistema térmico mediante monitoreo progresivo de temperatura durante intervalos de calentamiento controlado. Los parámetros técnicos considerados durante la validación del prototipo se detallan en la Tabla 6.

Como se observa en la Tabla 6, el prototipo operó dentro de rangos de temperatura y velocidad adecuados para favorecer la integración de los polímeros reciclados con el ligante asfáltico.

Fecha de recepción: 13 / 05 / 2026
Fecha de aceptación: 11 / 11 / 2026
Fecha de publicación: 19 / 11 / 2026

Tabla 6. Parámetros operativos del prototipo experimental.

Parámetro	Valor aproximado
Temperatura de operación	160 °C – 180 °C
Velocidad de agitación	30–45 rpm
Tipo de mezclado	Térmico–mecánico
Sistema de calentamiento	Eléctrico
Escala del equipo	Laboratorio experimental
Tipo de operación	Discontinua

Fuente: Elaborado por los autores con base en pruebas funcionales del prototipo.

Adicionalmente, el prototipo fue diseñado bajo un enfoque de accesibilidad tecnológica, utilizando materiales de fácil adquisición y componentes mecánicos convencionales, con el propósito de desarrollar una alternativa experimental replicable en entornos académicos y de investigación aplicada. Esta característica amplía las posibilidades de utilizar el equipo en nuevos trabajos experimentales vinculados con la reutilización de materiales y el estudio de residuos plásticos destinados a mezclas para infraestructura vial y petrolera.

Una vez construido el equipo y comprobado su funcionamiento, se contó con un medio de trabajo para preparar las mezclas modificadas y controlar las principales condiciones del proceso. A partir de esta etapa fue posible continuar con la elaboración de las muestras, las pruebas de carga y el análisis ambiental contemplado en la investigación.

2.3. Procedimiento experimental

La preparación de las mezclas se organizó en varias etapas consecutivas. Estas comprendieron el acondicionamiento de los residuos plásticos, el calentamiento de los materiales, el mezclado en el prototipo y la posterior compactación de las muestras. Durante el procedimiento se controlaron principalmente la temperatura y la agitación, mientras que la compactación se modificó de acuerdo con la configuración experimental evaluada.

Antes del mezclado, los residuos plásticos fueron limpiados, clasificados y triturados para facilitar su incorporación al sistema. El cemento asfáltico se calentó de forma gradual y se trabajó dentro de un intervalo de 160 °C a 180 °C. Este rango permitió realizar la incorporación de los residuos de polietileno y polipropileno durante el proceso de mezclado, manteniendo las condiciones térmicas previstas para el ensayo (Xu et al., 2021).

Al alcanzar el intervalo de temperatura establecido, se añadieron los agregados pétreos y el plástico reciclado triturado. Durante esta etapa, el sistema de agitación del prototipo permaneció

Fecha de recepción: 13 / 05 / 2026
Fecha de aceptación: 11 / 11 / 2026
Fecha de publicación: 19 / 11 / 2026

en funcionamiento para mantener el movimiento de los materiales dentro del recipiente. La velocidad de agitación se mantuvo cercana a 30 rpm con el objetivo de favorecer una distribución homogénea del polímero dentro de la mezcla y evitar segregación de materiales.

El proceso de mezclado térmico–mecánico se realizó durante intervalos aproximados de 20 a 30 minutos, tiempo en el cual se observó la integración progresiva del plástico fundido con el ligante asfáltico. Durante esta etapa se controló permanentemente la temperatura mediante termómetro digital, evitando sobrecalentamientos que pudieran alterar las propiedades del ligante o generar degradación del polímero reciclado.

Las condiciones de operación utilizadas durante el proceso experimental de mezclado se muestran en la Tabla 7.

Tabla 7. Parámetros operativos del proceso experimental.

Parámetro	Valor operativo
Temperatura de trabajo	160 °C – 180 °C
Velocidad de agitación	Aproximadamente 30 rpm
Tiempo de mezclado	20 – 30 minutos
Sistema de calentamiento	Eléctrico
Tipo de mezclado	Térmico–mecánico
Escala experimental	Prototipo de laboratorio

Fuente: Elaborado por los autores.

Los parámetros operativos presentados en la Tabla 7 fueron mantenidos durante todo el proceso experimental para asegurar la repetibilidad de las pruebas realizadas.

Posteriormente, las mezclas fueron colocadas en moldes metálicos y sometidas a diferentes condiciones de compactación, con el propósito de analizar el efecto de la densificación sobre el comportamiento estructural de las muestras. La compactación permitió reducir vacíos internos y mejorar la cohesión entre los componentes de la mezcla, aspecto fundamental para incrementar la resistencia mecánica del material (Mashaan et al., 2021).

Con el fin de evaluar el efecto del contenido de plástico reciclado sobre las propiedades mecánicas de la mezcla, se elaboraron diferentes formulaciones experimentales con variaciones en la proporción de plástico incorporado. Las muestras obtenidas fueron identificadas y comparadas mediante observación física, comportamiento estructural y respuesta frente a carga estática.

El estudio se desarrolló a escala de prototipo bajo un enfoque experimental exploratorio y comparativo. Las formulaciones fueron preparadas bajo condiciones controladas de temperatura, agitación y compactación, con el propósito de identificar tendencias de comportamiento

Fecha de recepción: 13 / 05 / 2026
Fecha de aceptación: 11 / 11 / 2026
Fecha de publicación: 19 / 11 / 2026

entre las configuraciones evaluadas. Debido al alcance preliminar de la investigación y a las condiciones disponibles para la ejecución del proyecto, las pruebas mecánicas no se realizaron bajo procedimientos normalizados ASTM o AASHTO; por tanto, los resultados obtenidos corresponden a una evaluación comparativa del comportamiento de las muestras y no a valores de certificación o caracterización normalizada del material.

Las variables consideradas para la evaluación técnica de las mezclas asfálticas modificadas se resumen en la Tabla 8.

Por esta razón, los resultados presentados deben considerarse de carácter exploratorio y no como una caracterización estadísticamente representativa del desempeño de las mezclas asfálticas modificadas. La incorporación de réplicas experimentales y análisis estadístico constituye una etapa necesaria para futuras investigaciones orientadas a validar la reproducibilidad y significancia de las diferencias observadas entre formulaciones.

Tabla 8. Variables evaluadas durante el proceso experimental.

Variable	Objetivo de evaluación
Proporción de plástico reciclado	Analizar influencia sobre cohesión y rigidez
Temperatura de mezclado	Evaluar comportamiento térmico de la mezcla
Compactación	Determinar efecto sobre estabilidad estructural
Tiempo de agitación	Favorecer homogeneidad del material
Resistencia bajo carga	Analizar comportamiento mecánico

Fuente: Elaborado por los autores.

Como se resume en la Tabla 8, la investigación consideró variables mecánicas, térmicas y operativas que permitieron evaluar integralmente el comportamiento de las mezclas modificadas.

Debido al carácter exploratorio del estudio y a la disponibilidad de los registros experimentales, el análisis de los resultados se desarrolló principalmente mediante una comparación descriptiva entre las formulaciones evaluadas. En consecuencia, no se aplicaron pruebas estadísticas inferenciales para establecer diferencias significativas entre las configuraciones. Esta condición se reconoce como una limitación del estudio y deberá ser considerada en posteriores etapas de validación experimental mediante un diseño que incorpore réplicas controladas y tratamiento estadístico de los resultados.

Finalmente, se realizó una evaluación preliminar de tipo ambiental y energético orientada a analizar el comportamiento del proceso experimental desde una perspectiva de sostenibilidad. Para ello, se consideraron variables como el consumo energético del sistema térmico, el

Fecha de recepción: 13 / 05 / 2026
Fecha de aceptación: 11 / 11 / 2026
Fecha de publicación: 19 / 11 / 2026

aprovechamiento de residuos plásticos reciclados y la posible reducción del impacto ambiental asociado a la disposición final de estos materiales. Además, se analizaron de manera referencial aspectos relacionados con reducción de emisiones y valorización de residuos dentro de un enfoque de economía circular aplicado a infraestructura petrolera (United Nations Environment Programme, 2020). Este análisis consideró además la importancia del consumo energético y las emisiones asociadas a los procesos industriales, aspectos ampliamente utilizados para evaluar la sostenibilidad de tecnologías emergentes (International Energy Agency, 2023).

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Evaluación experimental de las mezclas asfálticas modificadas

La evaluación experimental de las mezclas asfálticas modificadas con residuos plásticos reciclados permitió realizar una comparación preliminar del comportamiento físico y estructural de las configuraciones elaboradas mediante el prototipo experimental. Las pruebas se desarrollaron bajo un enfoque exploratorio y los resultados fueron interpretados de manera comparativa y descriptiva, considerando principalmente la cohesión observable, rigidez aparente, deformación frente a carga estática, integridad superficial y presencia de fisuras o disgregación. Debido a que las pruebas no correspondieron a ensayos mecánicos normalizados, los resultados obtenidos representan tendencias comparativas entre las formulaciones evaluadas y no parámetros de caracterización o certificación del material.

Las configuraciones M1, M2 y M3 permitieron identificar tendencias iniciales asociadas tanto al contenido de plástico reciclado como al proceso de compactación. Debido al alcance exploratorio de las pruebas, las diferencias observadas entre las tres configuraciones se consideran hallazgos iniciales y deberán comprobarse en una etapa posterior mediante un diseño experimental que permita su análisis estadístico.

Durante la fase experimental se elaboraron tres configuraciones principales de mezcla: una mezcla con incorporación parcial de plástico reciclado y compactación controlada (M1), una mezcla con mayor contenido de plástico reciclado y compactación (M2), y una mezcla con elevado contenido de plástico sin compactación adecuada utilizada como muestra de control comparativo (M3). Estas configuraciones permitieron evaluar de manera exploratoria el efecto combinado de la dosificación de polímero y del proceso de compactación sobre

Fecha de recepción: 13 / 05 / 2026
Fecha de aceptación: 11 / 11 / 2026
Fecha de publicación: 19 / 11 / 2026

el comportamiento general de las mezclas. La distribución de las mezclas elaboradas y las condiciones experimentales aplicadas se presentan en la Tabla 9.

Tabla 9. Configuración de mezclas evaluadas experimentalmente.

Mezcla	Característica principal	Condición experimental
M1	Incorporación parcial de plástico reciclado	Compactación controlada
M2	Alto contenido de plástico reciclado	Compactación controlada
M3	Alto contenido de plástico reciclado	Sin compactación

Fuente: Adaptado del diseño experimental de pruebas mecánicas.

Como se presenta en la Tabla 9, las mezclas M1, M2 y M3 fueron diseñadas para evaluar simultáneamente el efecto de la proporción de plástico reciclado y de la compactación sobre el comportamiento estructural de la mezcla asfáltica. Durante el proceso de mezclado se observó que las muestras presentaron adecuada integración entre el ligante asfáltico y los residuos plásticos reciclados cuando la temperatura se mantuvo dentro del rango operativo de 160 °C a 180 °C. Bajo estas condiciones, el plástico alcanzó una fusión parcial que favoreció la cohesión interna de la matriz bituminosa y permitió obtener mezclas relativamente homogéneas. Este comportamiento coincide con investigaciones previas que reportan mejoras estructurales en asfaltos modificados mediante incorporación controlada de polímeros reciclados (Xu et al., 2021).

El procedimiento de homogeneización de los materiales durante la fabricación de las mezclas asfálticas modificadas puede observarse en la Figura 3.

Como se observa en la Figura 3, el proceso de mezclado térmico–mecánico permitió la integración progresiva del ligante asfáltico, los agregados pétreos y los residuos plásticos reciclados bajo condiciones controladas de temperatura y agitación.

Las muestras obtenidas durante la fase experimental y utilizadas para las pruebas de evaluación se presentan en la Figura 4.

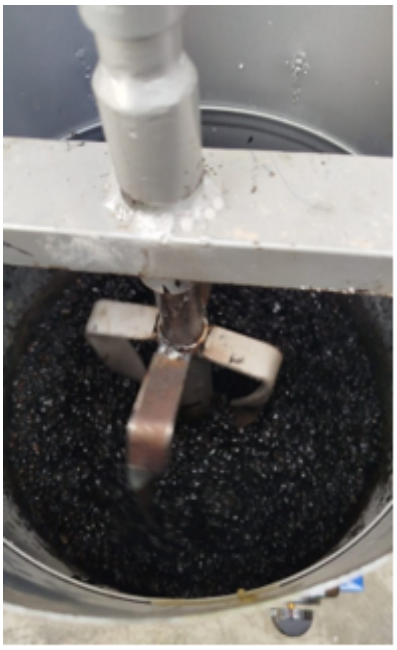
Las muestras obtenidas para la evaluación experimental, mostradas en la Figura 4, evidenciaron diferencias visuales asociadas al contenido de plástico reciclado y al nivel de compactación aplicado durante su fabricación.

En las pruebas de carga estática, la mezcla M1 presentó el comportamiento comparativo más favorable entre las configuraciones evaluadas. La muestra mantuvo una adecuada cohesión y presentó una deformación controlada frente a la aplicación de carga, observándose una ligera flexión sin fractura aparente. Este comportamiento sugiere que, bajo las condiciones

Fecha de recepción: 13 / 05 / 2026
Fecha de aceptación: 11 / 11 / 2026
Fecha de publicación: 19 / 11 / 2026

experimentales empleadas, la combinación de incorporación parcial de plástico reciclado y compactación favoreció la integridad estructural de la muestra.

Figura 3. Proceso de mezclado térmico–mecánico de la mezcla asfáltica modificada dentro del prototipo experimental durante la etapa de homogeneización de materiales.



Fuente: Autores.

Figura 4. Muestras experimentales de mezclas asfálticas modificadas con residuos plásticos reciclados utilizadas para evaluar cohesión, compactación y comportamiento mecánico.



Fuente: Autores.

Por su parte, la mezcla M2 presentó una mayor rigidez aparente asociada al mayor contenido de plástico reciclado. Durante la aplicación de carga mostró resistencia inicial a la deformación; sin embargo, después de retirar la carga se observó una microfisura superficial, lo que sugiere una menor capacidad de deformación respecto de M1. Este comportamiento es consistente con el efecto que puede generar una mayor proporción de fase polimérica sobre la rigidez de las mezclas asfálticas modificadas (Mashaan et al., 2021).

La mezcla M3 presentó el comportamiento comparativo menos favorable. La ausencia de

Fecha de recepción: 13 / 05 / 2026
Fecha de aceptación: 11 / 11 / 2026
Fecha de publicación: 19 / 11 / 2026

compactación adecuada estuvo acompañada de mayor porosidad, pérdida de forma, disgregación y menor cohesión de la muestra. Estas observaciones evidenciaron, dentro de las condiciones exploratorias del estudio, la influencia del proceso de compactación sobre la integridad física de las mezclas evaluadas.

Los resultados obtenidos durante la evaluación experimental de las diferentes mezclas se resumen en la Tabla 10.

Tabla 10. Comportamiento general de las mezclas evaluadas.

Mezcla	Condición experimental	Respuesta frente a carga	Integridad superficial	Observación experimental
M1	Incorporación parcial de plástico y compactación controlada	Deformación controlada y ligera flexión	Sin fractura aparente	Adecuada cohesión y comportamiento estable
M2	Mayor contenido de plástico y compactación controlada	Mayor rigidez aparente	Microfisura superficial posterior a la carga	Menor flexibilidad respecto de M1
M3	Mayor contenido de plástico sin compactación	Mayor deformación y pérdida de forma	Disgregación observable	Alta porosidad y baja cohesión

Fuente: Elaborado por los autores con base en resultados experimentales.
Nota. Los resultados corresponden a observaciones obtenidas durante una evaluación experimental exploratoria mediante aplicación de carga estática. No representan parámetros mecánicos determinados mediante ensayos normalizados ASTM o AASHTO.

Como se observa en la Tabla 10, la mezcla M1 presentó el comportamiento comparativo más favorable bajo las condiciones evaluadas, manteniendo adecuada cohesión, deformación controlada y ausencia de fractura aparente. La mezcla M2 mostró mayor rigidez, aunque presentó una microfisura superficial posterior a la aplicación de carga, mientras que M3 evidenció pérdida de forma, disgregación y menor cohesión. Estos resultados permiten identificar una tendencia preliminar favorable para M1; sin embargo, su desempeño deberá ser posteriormente validado mediante ensayos normalizados y un diseño experimental que permita realizar análisis estadísticos.

3.2 Discusión de resultados

La comparación presentada en la Tabla 10 permite observar respuestas distintas entre M1, M2 y M3. En M1 se mantuvo la cohesión de la muestra y la deformación fue controlada, sin alteraciones visibles que comprometieran su superficie. M2 tuvo una respuesta más rígida y presentó una microfisura después de la aplicación de la carga. En M3, en cambio, fueron evidentes la pérdida de forma, la disgregación y una menor cohesión. Estas observaciones permiten diferenciar el comportamiento de las tres formulaciones ensayadas, aunque su alcance

Fecha de recepción: 13 / 05 / 2026
Fecha de aceptación: 11 / 11 / 2026
Fecha de publicación: 19 / 11 / 2026

es descriptivo y no permite establecer significancia estadística.

Al comparar las muestras, M1 presentó la respuesta más estable durante la prueba de carga. Esta formulación combinó una incorporación parcial de plástico reciclado con compactación controlada y, después del ensayo, conservó su cohesión e integridad superficial, además de mostrar una deformación limitada. Lo observado en esta muestra plantea que la cantidad de plástico incorporado debe analizarse conjuntamente con la compactación, ya que ambas condiciones pueden intervenir en la respuesta final de la mezcla.

Este comportamiento puede contrastarse con lo reportado por (Modarres & Hamedi, 2014), quienes estudiaron mezclas asfálticas modificadas con residuos plásticos y analizaron cambios relacionados con la rigidez y la respuesta a fatiga. Aunque las condiciones de su investigación difieren de las empleadas en este trabajo, sus resultados respaldan la importancia de controlar la incorporación del material plástico al evaluar el comportamiento de una mezcla modificada.

En el caso de M2 se observó una respuesta más rígida que en M1. Esta formulación contenía una mayor cantidad de plástico reciclado y mostró inicialmente menor deformación frente a la carga. Sin embargo, al finalizar la prueba se identificó una microfisura en su superficie. Esta observación indica que la mayor rigidez apreciada en la muestra no estuvo acompañada de la misma capacidad de deformación observada en M1.

Este comportamiento podría estar relacionado con la mayor proporción de fase polimérica presente en la formulación, condición que puede modificar la respuesta del ligante y reducir su capacidad de deformación. Investigaciones recientes han señalado que un contenido excesivo de plástico reciclado puede generar mezclas más rígidas, afectando parámetros relacionados con ductilidad y resistencia a fatiga (Mashaan et al., 2021).

Los resultados presentados en la Tabla 10 muestran que la mezcla M3, elaborada sin compactación adecuada, presentó el comportamiento comparativo menos favorable, caracterizado por mayor porosidad, pérdida de forma, disgregación y menor cohesión respecto de las formulaciones compactadas. Estas observaciones sugieren que la compactación constituye una variable relevante dentro del comportamiento de las mezclas evaluadas, debido a que una densificación adecuada contribuye a mejorar la integración física entre los componentes de la mezcla.

De igual manera, durante el desarrollo experimental, el control térmico constituyó una

Fecha de recepción: 13 / 05 / 2026
Fecha de aceptación: 11 / 11 / 2026
Fecha de publicación: 19 / 11 / 2026

variable operativa relevante dentro del proceso de mezclado. Como se aprecia en la Figura 3, el sistema de mezclado térmico–mecánico permitió mantener las condiciones requeridas para favorecer la integración progresiva de los materiales. El proceso de elaboración se desarrolló dentro de un rango aproximado de 160 °C a 180 °C, utilizado para favorecer la incorporación y homogeneización de los componentes durante el mezclado. El control de la temperatura resulta especialmente importante en mezclas modificadas con residuos plásticos, debido a que condiciones térmicas inadecuadas pueden afectar la homogeneización o favorecer procesos de degradación del polímero (Xu et al., 2021).

Desde el punto de vista ambiental, el desarrollo del prototipo experimental permitió evaluar preliminarmente la posibilidad de integrar residuos plásticos reciclados dentro de una matriz asfáltica. Las muestras obtenidas durante el proceso experimental, mostradas en la Figura 4, permitieron observar la incorporación de residuos plásticos dentro de la matriz asfáltica bajo las condiciones experimentales evaluadas. La reutilización de materiales plásticos de larga vida útil representa una alternativa técnicamente viable para reducir la disposición final de residuos y generar valor agregado dentro de aplicaciones de infraestructura vial y petrolera. Diversas investigaciones han demostrado que la valorización de residuos plásticos mediante aplicaciones industriales permite disminuir la acumulación progresiva de polímeros sintéticos en rellenos sanitarios y ambientes naturales, contribuyendo simultáneamente a reducir impactos asociados a disposición final e incineración informal (Geyer et al., 2017).

Asimismo, el uso de residuos plásticos reciclados dentro de mezclas asfálticas puede contribuir indirectamente a disminuir el consumo de materiales vírgenes derivados del petróleo, reduciendo parcialmente la demanda de recursos no renovables utilizados tradicionalmente en la producción de asfaltos convencionales. Bajo este enfoque, el aprovechamiento de residuos plásticos dentro de aplicaciones viales y petroleras se relaciona directamente con estrategias de economía circular orientadas a extender el ciclo de vida de los materiales y reincorporarlos dentro de nuevos procesos productivos (Geissdoerfer et al., 2017).

Adicionalmente, el comportamiento favorable observado en las mezclas con compactación adecuada sugiere que la incorporación controlada de residuos plásticos podría contribuir indirectamente a disminuir necesidades futuras de mantenimiento y rehabilitación de superficies

Fecha de recepción: 13 / 05 / 2026
Fecha de aceptación: 11 / 11 / 2026
Fecha de publicación: 19 / 11 / 2026

operativas. Esto implicaría potencial reducción en consumo de agregados, ligantes vírgenes, transporte de materiales y uso de maquinaria pesada asociada a procesos recurrentes de reparación vial. En consecuencia, los beneficios ambientales de la incorporación de polímeros reciclados no se limitan únicamente a la reutilización de residuos, sino también a una posible disminución del impacto ambiental acumulado durante el ciclo de vida operativo de la infraestructura.

A partir de las pruebas realizadas se comprobó que el prototipo permitió incorporar los residuos plásticos y obtener las tres formulaciones previstas para su comparación. Las diferencias observadas entre M1, M2 y M3 muestran que existe interés en continuar estudiando esta alternativa, especialmente para determinar con mayor precisión cómo intervienen la proporción de plástico y la compactación en la respuesta de la mezcla. Los hallazgos obtenidos en esta etapa sirven como punto de partida para ajustar las formulaciones y definir nuevas pruebas orientadas a valorar su desempeño bajo condiciones de operación más representativas.

El alcance de esta investigación estuvo condicionado por la escala del prototipo y por el carácter exploratorio de las pruebas. La información obtenida permitió describir y comparar la respuesta de las formulaciones ensayadas, pero no corresponde a una caracterización mecánica normalizada. Además, los registros experimentales disponibles no fueron suficientes para aplicar un tratamiento estadístico inferencial a las diferencias encontradas entre M1, M2 y M3. Por esta razón, las observaciones reportadas deben considerarse resultados iniciales del proceso experimental. Una siguiente fase deberá incorporar réplicas bajo condiciones controladas y métodos de ensayo normalizados, acompañados de análisis estadístico, para obtener parámetros cuantitativos de resistencia, deformación, rigidez y comportamiento a largo plazo.

4. CONCLUSIONES

El prototipo térmico-mecánico construido permitió preparar las mezclas con residuos plásticos dentro de las condiciones de operación definidas para el estudio. Durante su funcionamiento fue posible mantener el calentamiento y la agitación requeridos para incorporar el plástico reciclado junto con el ligante asfáltico y los agregados, obteniéndose las formulaciones previstas para la fase experimental.

La comparación de las tres formulaciones mostró respuestas diferentes frente a la carga aplicada. M1 conservó mejor su cohesión y forma, presentó una deformación controlada y no mostró

Fecha de recepción: 13 / 05 / 2026
Fecha de aceptación: 11 / 11 / 2026
Fecha de publicación: 19 / 11 / 2026

fractura visible. M2 tuvo una respuesta más rígida y desarrolló una microfisura superficial, mientras que M3 presentó pérdida de forma, disgregación y menor cohesión. Estos resultados permiten establecer una primera comparación entre las formulaciones, pero todavía deben comprobarse mediante pruebas normalizadas.

Asimismo, las observaciones realizadas sugieren que el proceso de compactación constituye una variable relevante en el comportamiento de las mezclas asfálticas modificadas. La configuración elaborada sin compactación adecuada presentó mayor porosidad, pérdida de forma, disgregación y menor cohesión respecto de las formulaciones compactadas, lo que evidencia la necesidad de controlar esta variable en posteriores etapas de evaluación.

La compactación tuvo un papel importante en la respuesta observada de las muestras. La configuración que no recibió una compactación adecuada presentó mayor porosidad, pérdida de forma y disgregación, comportamiento que no se observó con la misma intensidad en las formulaciones compactadas. Por esta razón, esta variable deberá controlarse cuidadosamente en las siguientes etapas experimentales.

Desde la perspectiva ambiental, la incorporación de PE y PP reciclados permitió plantear una vía de aprovechamiento para materiales que normalmente serían destinados a disposición final. Su utilización dentro de las mezclas estudiadas abre una posibilidad de valorización de estos residuos y de continuidad del proyecto bajo criterios de economía circular y sostenibilidad.

El trabajo realizado deja una base experimental para continuar con el ajuste de las formulaciones y del propio sistema de mezclado. Antes de plantear una aplicación a mayor escala será necesario ampliar la fase experimental mediante réplicas controladas, análisis estadístico y métodos de ensayo normalizados que permitan obtener valores cuantitativos de resistencia, deformación, rigidez, durabilidad y comportamiento a largo plazo.

Contribución de los Autores (CRediT): JEDP: Conceptualización, Curación de datos, Análisis formal, Investigación, Metodología, Administración del proyecto, Visualización, Redacción - borrador original, Redacción - revisión y edición. LAAL: Investigación, Supervisión, Redacción – revisión y edición. LFFF: Investigación, Redacción - revisión y edición.

Conflicto de Intereses: Los autores declaran que no existen conflictos de intereses en esta publicación.

Declaración de Uso de Inteligencia Artificial: Los autores declaran que utilizaron una herramienta de inteligencia artificial (IA) en la mejora de la redacción y corrección de estilo del artículo. La herramienta utilizada para este fin fue: ChatGPT.

REFERENCIAS

Fecha de recepción: 13 / 05 / 2026
Fecha de aceptación: 11 / 11 / 2026
Fecha de publicación: 19 / 11 / 2026

Calderón-Ramírez, J., Sepúlveda-Valdez, D., García, L., Lomeli-Banda, M. A., Salazar-Briones, C., & Montoya-Alcaraz, M. (2025). Recycled plastics in asphalt mixtures: A systematic review of mechanical performance, environmental impact and practical implementation. *Applied Sciences, 15*(18), 9901. https://doi.org/10.3390/app15189901

Dalhat, M. A., Al-Abdul Wahhab, H., & Al-Adham, K. (2019). Recycled plastic waste asphalt concrete via mineral aggregate substitution and binder modification. *Journal of Materials in Civil Engineering, 31*(8). https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0002744

Geissdoerfer, M., Savaget, P., Bocken, N. M. P., & Hultink, E. J. (2017). The circular economy – A new sustainability paradigm?. *Journal of Cleaner Production, 143*, 757–768. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.12.048

Geyer, R., Jambeck, J. R., & Law, K. L. (2017). Production, use, and fate of all plastics ever made. *Science Advances, 3*(7), e1700782. https://doi.org/10.1126/sciadv.1700782

International Energy Agency. (2023). *CO_2 emissions from fuel combustion: Highlights*. IEA Publications. https://www.iea.org

Ma, Y., Zhou, H., Jiang, X., Polaczyk, P., Xiao, R., Zhang, M., & Huang, B. (2021). The utilization of waste plastics in asphalt pavements: A review. *Cleaner Materials, 2*, 100031. https://doi.org/10.1016/j.clema.2021.100031

Mashaan, N., Chegenizadeh, A., & Nikraz, H. (2021). Laboratory properties of waste PET plastic-modified asphalt mixes. *Recycling, 6*(3), 49. https://doi.org/10.3390/recycling6030049

Modarres, A., & Hamedi, H. (2014). Effect of waste plastic bottles on the stiffness and fatigue properties of modified asphalt mixes. *Materials & Design, 61*, 8–15. https://doi.org/10.1016/j.matdes.2014.04.046

Rahman, M. T., Mohajerani, A., & Giustozzi, F. (2020). Recycling of waste materials for asphalt concrete and bitumen: A review. *Materials, 13*(7), 1495. https://doi.org/10.3390/ma13071495

Santero, N. J., Masanet, E., & Horvath, A. (2011). Life-cycle assessment of pavements. Part I: Critical review. *Resources, Conservation and Recycling, 55*(9–10), 801–809. https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2011.03.010

United Nations Environment Programme. (2020). *Single-use plastics: A roadmap for sustainability* (2nd ed.). UNEP. https://www.unep.org/resources/report/single-use-

Fecha de recepción: 13 / 05 / 2026
Fecha de aceptación: 11 / 11 / 2026
Fecha de publicación: 19 / 11 / 2026

plastics-roadmap-sustainability

Xu, F., Zhao, Y., & Li, K. (2021). Using waste plastics as asphalt modifier: A review. *Materials, 15*(1), 110. https://doi.org/10.3390/ma15010110