

**INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA
ESCUELA DE INGENIERÍA EN CONSTRUCCIÓN
MAESTRÍA EN INGENIERÍA VIAL**



**PROPUESTA DE ESTRATEGIAS DE CONSERVACIÓN VIAL EN RUTAS
NACIONALES NO PAVIMENTADAS CON TRATAMIENTOS SUPERFICIALES Y SU
APLICACIÓN MEDIANTE UN CASO DE ESTUDIO EN LA RUTA NACIONAL
TERCIARIA No. 746.**

Proyecto de graduación para optar por el grado académico de
Maestría en Ingeniería Vial

Realizado por:
Ing. Javier E. Brenes Pochet

Cartago, Noviembre de 2025

DEDICATORIA

Dedico este logro, en primer lugar, a Dios, por guiar mis pasos y brindarme la fortaleza para perseguir y alcanzar los sueños que me he propuesto, así como por inspirarme a avanzar con determinación en cada etapa de la vida.

Agradezco profundamente a mis padres, por sus enseñanzas, su constante apoyo y su ejemplo, que desde mis primeros años me han acompañado en la construcción de mis metas. Extiendo mi gratitud a toda mi familia, en especial a mi hermana, a mis sobrinos y a Manrique, quienes siempre me han brindado su apoyo, así como valiosas ideas que me han ayudado a forjarme como una persona integral y un profesional comprometido, con la constante motivación de alcanzar la superación y el desarrollo personal.

A mi mascota Ziggy que siempre me acompañó en tantas horas de estudio, en tantos días con retos nuevos, nunca te olvidaré por darme tanto amor y siempre estar presente para mí.

A mis compañeros del Ministerio de Obras Públicas y Transportes, cuyo ejemplo de constancia, dedicación y compromiso ha demostrado el verdadero valor del servicio en la función pública. Mi admiración y agradecimiento por inspirarme siempre a dar lo mejor, a trazar metas y cumplirlas.

AGRADECIMIENTOS

A los profesores, por mostrarme el camino de la educación y la formación continua, recordando que el aprendizaje nunca se detiene y siempre será insuficiente para afrontar los retos futuros en un país en constante cambio y desarrollo.

Al Ingeniero Esteban Coto Corrales, director regional Huetar Norte de la Gerencia de Conservación de Vías y Puentes del CONAVI, por su compromiso con el desarrollo de la zona norte y por la confianza brindada para la recolección de los insumos necesarios de la ruta en estudio.

Al Ingeniero Didier Rojas Argüello, Administrador Vial en la Zona 6-1 San Carlos, por su disposición y comunicación asertiva al aclarar dudas y comentarios relacionados con el mantenimiento periódico de las rutas nacionales no pavimentadas.

EPÍGRAFE

No importa lo despacio que vayas, siempre y cuando no te detengas.

Confucio

INTRODUCCIÓN.....	3
CAPÍTULO 1: GENERALIDADES DE LA INVESTIGACIÓN.....	4
1.1 Antecedentes	4
1.2 Planteamiento del Problema.....	8
1.3 Justificación del Estudio.....	9
1.4 Objetivos	11
1.4.1. Objetivo general	11
1.4.2 Objetivos específicos	12
Alcance y limitaciones	12
1.5.1 Alcance.....	12
1.5.2 Limitaciones.....	14
CAPÍTULO 2: MARCO TEÓRICO	15
2.1 Índice de Condición del Pavimento (PCI).....	15
2.1.2 Origen y Fundamento Normativo	15
2.1.3 Proceso de Evaluación del Índice de Condición Superficial (PCI).....	15
2.1.4 Tipos de Deterioro y Severidades	16
2.1.5 Niveles de Severidad.....	17
2.2 Análisis de Longitud de Unidad de Muestreo en Carreteras con Pavimento Flexible	20
2.2.1 Selección de las Unidades de Muestreo para Inspección	21
2.2.2 Cálculo del PCI y Valores Deducidos.....	22
2.3 Gestión de la conservación de caminos no pavimentados	22
2.3.1 Componentes de un Tratamiento Superficial	25
2.3.2 Tipos de Tratamientos Superficiales	27
2.3.3 Usos de los Tratamientos Superficiales	28
2.3.4 Material Perfilado de Capas Asfálticas (RAP, por sus siglas en inglés)	30
Ambientales	32
2.3.5 Construcción de RAP	33
2.3.6. Aspectos técnicos de la intervención con material de perfilado RAP	34
2.3.7 Aspectos metodológicos de la evaluación con RAP	35

2.4 Evaluación Económica de Estrategias de Conservación Vial	36
2.4.1 Análisis Costo-Beneficio (ACB) en Conservación Vial	37
2.5 Criterios de Priorización en el Mantenimiento y Conservación Vial	37
2.5.1 Fundamentos de la Priorización Vial	38
2.5.2 Aplicación en Costa Rica	39
2.5.3 Indicadores técnicos y económicos utilizados en Costa Rica para priorización vial	39
2.6 Priorización Multianual	41
2.7 Ranking de Intervenciones (RI)	42
2.8 Criterios Ambientales en la Conservación Vial	43
2.8.1 Impacto ambiental asociado a las actividades de conservación	43
2.8.2 Medidas ambientales asociadas a la conservación vial	44
2.8.3 Sistemas de priorización con enfoque ambiental	45
2.9 Políticas de mantenimiento vial e intervenciones en caminos no pavimentados	45
2.9.1 Enfoques de intervención	45
2.9.2 Herramientas de gestión y planificación	46
2.10 Normativa técnica y regulatoria aplicable a la conservación de caminos no pavimentados en Costa Rica	46
2.10.1 Ley General de Caminos Públicos (Ley No. 5060)	46
2.10.2 Manual de Especificaciones Técnicas Generales para la Construcción de Carreteras y Puentes (CR-2020)	46
2.10.3 Guías de diseño y conservación del LanammeUCR	47
2.10.4 Normas INTECO aplicables	47
CAPÍTULO 3: MARCO METODOLÓGICO	49
3.1 Tipo y enfoque de investigación	49
3.2 Fuentes y sujetos de información	50
3.2.1 Fuentes de información	50
3.2.2 Sujetos de información	51
3.3 Técnicas e Instrumentos de Investigación	52
3.4 Procesamiento y Análisis de Datos	53
CAPÍTULO 4: RESULTADOS Y ANÁLISIS	55

4.1 Diagnóstico del estado actual de la Ruta Nacional Terciaria No. 746	55
4.1.1 Visitas de campo y registros fotográficos	55
4.1.2 Evaluación de condiciones geométricas.....	62
4.1.3 Inventario de activos viales de la Ruta No. 746.....	64
4.1.4 Identificación de deterioros superficiales.....	65
4.1.5 Determinación del Índice de Condición Superficial (PCI)	65
4.1.5.1 Análisis de Longitud de Unidad de Muestreo.....	66
4.2 Deterioros más importantes de la ruta recorrida	69
4.2.1 Huecos (<i>Potholes</i>).....	69
4.2.2 Agrietamiento Transversal (<i>Transversal cracking</i>)	71
4.2.3 Agrietamiento de borde (<i>Edge cracking</i>).....	73
4.2.4 Desprendimiento (<i>Raveling</i>)	74
4.3 Cálculo de PCI de las Unidades de Muestreo seleccionadas	76
4.4 Evaluación visual del estado de la vía antes y después de la colocación del RAP	80
4.4.1 Evaluación del RAP y relación con el PCI	81
4.4.2 Equipo utilizado en la colocación del RAP.....	85
4.5 Estrategias de Conservación Vial.....	85
4.5.1 Matriz de Asignación de Intervenciones.....	86
4.6 Aspectos Económicos Ruta Nacional Terciaria No. 746	89
4.6.1 Cálculo del costo total y costo por km de intervención	90
4.6.2 Análisis económico desde el ciclo de vida del proyecto.....	92
4.7 Aspectos Ambientales a considerar.....	93
4.7.1 Matriz de Análisis Multicriterio Ambiental (AMC)	94
4.8 Consideraciones ambientales en la conservación de la Ruta Nacional No. 746	96
4.9 Resultados de la Priorización Multianual.....	98
4.9.1 Ranking de Intervenciones.....	99
CAPÍTULO 5: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	101
5.1 CONCLUSIONES	101
5.2 RECOMENDACIONES	102
CAPÍTULO 6: REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	103

CAPÍTULO 7: APÉNDICES	105
CAPÍTULO 8: ANEXOS.....	106

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Clasificación ampliada de tipo de superficie de ruedo para el registro de la Red Vial Nacional	6
Tabla 2. Actividades de conservación de vías lastradas.....	10
Tabla 3. Deterioros en pavimentos.....	18
Tabla 4. Severidad establecida para cada deterioro.	19
Tabla 5. Longitud de la Unidad de Muestreo.	20
Tabla 6. Componentes principales Evaluación Económica.	36
Tabla 7. Métodos de Evaluación Económica.	37
Tabla 8. Análisis costo beneficio (ACB).....	37
Tabla 9. Indicadores técnicos y económicos para priorización vial.....	41
Tabla 10. Normativa técnica y regulatoria aplicable a la conservación de caminos no pavimentados en Costa Rica.....	48
Tabla 11. Parámetros y valores mínimos en la Ruta Nacional No. 746.....	64
Tabla 12. Activos Viales de la Ruta Nacional Terciaria No. 746.	65
Tabla 13. Longitud de la Unidad de Muestreo.....	66
Tabla 14. Severidad obtenida en campo para Huecos.....	70
Tabla 15. Severidad establecida para Huecos.	70
Tabla 16. Severidad obtenida en campo para agrietamiento transversal.....	72
Tabla 17. Severidad obtenida para agrietamiento de borde.	73
Tabla 18. Severidad obtenida de levantamiento en campo.	75
Tabla 19. Orden establecido de los datos obtenidos en el levantamiento de campo.	76
Tabla 20. Procesamiento de datos obtenidos en levantamiento de campo para las correspondientes UM's.	77
Tabla 21. Valores Deducidos obtenidos del procesamiento.....	78
Tabla 22. Proceso de iteración para obtener el Valor Deducido Corregido (VDC).....	79
Tabla 23. Evaluación del RAP con respecto al PCI.	82
Tabla 24. Equipo utilizado en la colocación de RAP.....	85
Tabla 25. Definición de Umbrales de Conservación Vial.....	86
Tabla 26. Matriz de Asignación de Intervenciones de acuerdo con severidad del deterioro obtenido	89
Tabla 27. Parámetros establecidos de RAP en la ruta nacional.	90
Tabla 28. Costo total estimado por km de intervención.....	91
Tabla 29. Costos directos e indirectos de la intervención.	92

Tabla 30. Costo total del ciclo de vida del proyecto.	93
Tabla 31. Matriz de resultados Análisis Multicriterio Ambiental.	95
Tabla 32. Matriz de Asignación de Intervenciones integrando el criterio ambiental y económico. .	97
Tabla 33. Factores por considerar para el Beneficio-Ajustado	99
Tabla 34. Presupuesto para Priorización Multianual.....	99
Tabla 35. Ranking de Intervenciones	99

ÍNDICE DE FIGURA

Figura 1: Rutas nacionales pavimentadas y no pavimentadas de la Red Vial Nacional de Costa Rica.	5
Figura 2: Ruta Nacional Terciaria No. 746.	8
Figura 3. Rango de calificaciones metodología PCI.	16
Figura 4. Esquema general de gestión de la conservación de caminos no pavimentados.	24
Figura 5. Composición de un Tratamiento Superficial Simple	25
Figura 6. Composición de un Tratamiento Superficial Múltiple.	25
Figura 7. Ejemplo de RAP	31
Figura 8. Diagrama de flujo de proceso metodológico	50
Figura 9. Desprendimiento en aproximación de estructura de puente.	56
Figura 10. Deterioro en la junta de expansión de estructura de puente.	57
Figura 11. Detalle del deterioro en la junta de expansión del puente.	57
Figura 12. Tubería parcialmente obstruida (est 4+230).	58
Figura 13. Ausencia de cabezales en las alcantarillas (est 3+675).	59
Figura 14. Ausencia de conformación de cunetas a lo largo de la ruta.	59
Figura 15. Ausencia de elementos de barandas y visibilidad en los accesos de aproximación al puente. (est 4+800).	60
Figura 16. Falta de mantenimiento en señales verticales sobre el recorrido de la ruta.	61
Figura 17. Ausencia de demarcación horizontal sobre la ruta.	62
Figura 18. Ausencia de demarcación horizontal o límites de velocidad.	62
Figura 19. Huecos en la Ruta Nacional No. 746, estacionamiento (0+500).	71
Figura 20. Huecos en la entrada de la estructura de Puente Quebrada Sahíno, estacionamiento (0+500).	71
Figura 21. Agrietamiento transversal presente en la ruta, estacionamiento (4+800).	72
Figura 22. Vista general de agrietamiento transversal en la ruta.	72
Figura 23. Agrietamiento de borde. Estacionamiento (0+145).	74
Figura 24 y 25. Agrietamiento de borde presente en la ruta, estacionamiento (0+800); y estacionamiento (1+250) respectivamente.	74
Figura 26. Desprendimiento obtenido en campo, estacionamiento (0+110).	75
Figura 27 y 28. Desprendimiento en la ruta, estacionamiento (3+360); y estacionamiento (3+900) respectivamente.	76
Figura 29. Gráfica para la obtención del Valor Deducido Corregido (VDC)	79
Figura 30, 31, 32. Etapas constructivas antes durante y después de la colocación de RAP.	83

Figura 33, 34, 35. Etapas constructivas antes durante y después de la colocación de RAP.....	83
Figura 36, 37, 38. Etapas constructivas antes durante y después de la colocación de RAP.....	84
Figura 39, 40, 41. Etapas constructivas antes durante y después de la colocación de RAP.....	84
Figura 42. Resultados Análisis Multicriterio Ambiental (AMC).....	96

GLOSARIO

Auscultación: Conjunto de procedimientos (medidas, tratamiento de las lecturas, análisis e interpretación) cuyo objeto es medir, con la mayor precisión posible, los diversos deterioros superficiales de pavimentos.

Alcantarilla: Conducto subterráneo para recoger las aguas llovidas o inmundas.

Baches: Depresiones pequeñas en la superficie del pavimento.

Base: Capa inferior de la superficie de la carretera, que se coloca y compacta para formar una superficie lisa. Su función es servir como base para la pavimentación y absorber las cargas del tráfico para que la subrasante no se deforme.

Bombeo: Es la inclinación a la derecha y a la izquierda de la calzada de una vía para el drenaje superficial.

Carpeta Asfáltica (CA): Mezcla asfáltica en caliente (o tibia), muy bien controlada, de cemento asfáltico (de alta calidad) y agregado bien graduado (también de alta calidad), compactada para formar una capa densa y uniforme, todo según especificaciones vigentes, o similares.

Capa de imprimación: Riego uniforme de emulsión asfáltica que se aplica sobre la base granular, previo a la colocación del tratamiento superficial. Con su aplicación se busca mejorar la adherencia entre el tratamiento y la base granular, reducir la emisión del polvo y convertir la base en una superficie menos permeable.

Capa de protección: Tipo de capa de protección asfáltica sobre la superficie granular existente utilizada para reducir la pérdida de material por escorrentía superficial, tracción vehicular, entre otras, impermeabilizar la superficie y reducir la cantidad de partículas de polvo dispersas en el aire que se generan con el tránsito vehicular.

Chip seal: Tratamiento superficial ampliamente difundido para aminorar el deterioro causado por sol, agua y tráfico. También mejora la capacidad friccionante del pavimento. Es una aplicación sucesiva de ligante y agregado de tamaño uniforme, en varias capas sucesivas, sin mezclado. El espesor del tratamiento superficial depende del tamaño nominal del agregado.

Conservación vial: Conjunto de actividades destinadas a preservar, de forma continua y sostenida, el buen estado de las vías y los puentes, de modo que se garantice un servicio óptimo al usuario. Incluye mantenimiento (rutinario y periódico), refuerzo, rehabilitación y mejoramientos puntuales, excluyendo obras nuevas o restauraciones por emergencias (excepto por ley).

Cuneta: Zanja abierta en el terreno con el fin de recibir y canalizar aguas de lluvia.

Emulsión asfáltica: Mezcla de ligante asfáltico y agua que permite la adherencia entre el pavimento existente o base granular colocada y los agregados del tratamiento superficial.

Hormigón o concreto: Estructura constituida por una o varias losas de concreto apoyadas sobre capas granulares, estabilizadas u otras subyacentes.

Inventario Vial: Registro sistemático de la infraestructura vial que recopila información detallada sobre las características físicas, geométricas y funcionales de una vía, incluyendo el estado del pavimento, la señalización, las estructuras (como puentes y alcantarillas) y la demanda de tránsito, para permitir una planificación y gestión vial efectiva.

IRI: El Índice Internacional de Rugosidad (IRI) es un parámetro que mide la regularidad longitudinal de una superficie de rodadura. Expresa qué tan suave o irregular es el pavimento al circular sobre él.

Sección de Control: Es un segmento de una vía que se define de manera homogénea para efectos de gestión, evaluación y toma de decisiones relacionadas al mantenimiento.

Lastre o grava: Colocación de un espesor uniforme y compactado, de material granular a todo lo ancho de la calzada.

Lechada asfáltica “Slurry seal”: Mezcla de agregado fino bien graduado, relleno mineral (opcional), emulsión asfáltica y agua, aplicada como tratamiento superficial. No mejora la capacidad estructural, pero es útil en mantenimiento preventivo o correctivo ligero.

Material de perfilado: Se obtiene al remover total o parcialmente una capa asfáltica mediante el perfilado de pavimento. El material se reutiliza en la conservación vial.

Material de secado: Material granular fino colocado posterior al riego de emulsión para permitir apertura inmediata al tránsito mientras se da el curado del sello superficial.

Mantenimiento periódico: Actividades programables que renuevan la condición del pavimento sin alterar su estructura (por ejemplo, capas adicionales de lastre o tratamientos superficiales).

Mantenimiento rutinario: Labores continuas de limpieza, control de vegetación, reparaciones menores y mantenimiento de puentes, para conservar la operatividad y seguridad de la vía.

Mejoramientos puntuales: Modificaciones localizadas del estándar horizontal o vertical de las vías para mejorar la seguridad (e.g. bahías de buses, cruces, curvas).

Sello asfáltico: Tratamiento superficial delgado que mejora la textura e impermeabiliza la superficie, con o sin agregado.

Sello asfáltico con emulsión de rompimiento lento (SA): Estabilización parcial o total de una capa granular con emulsión de rompimiento lento y capa superficial de impermeabilización.

Sistema de drenaje: Obras y sistemas que controlan el exceso de agua para evitar daños a la carretera y el entorno.

Subbase: Capa de material granular colocada entre la subrasante y el pavimento, que proporciona una base sólida y resistente.

Subrasante: Capa de suelo natural preparada para soportar la estructura del pavimento.

Tratamiento superficial simple: Aplicación uniforme de ligante asfáltico sobre base granular, seguida por una capa de agregado de tamaño uniforme.

Tratamiento superficial múltiple: Sobreposición de varios tratamientos simples, aplicados uno sobre otro como si cada uno fuera un TS-1.

Unidades de Muestreo: Segmentos en los que se divide una carretera para evaluar su condición mediante el índice PCI (tamaño estándar: $225 \pm 90 \text{ m}^2$).

Ahuellamiento: El ahuellamiento es un deterioro del pavimento caracterizado por la formación de depresiones longitudinales en las zonas de rodadura de los vehículos. Estas hendiduras se producen principalmente por la deformación plástica de las capas del pavimento o del material de la subrasante debido al tránsito repetitivo, especialmente de vehículos pesados.

Cuero de lagarto: Es un deterioro del pavimento caracterizado por un conjunto de fisuras interconectadas que forman un patrón parecido a una malla o escamas. Esta condición aparece normalmente por fatiga del material, pérdida de soporte estructural o tránsito repetitivo.

Valores Deducidos: Rango de 1 a 100 que penaliza deterioros superficiales según su severidad y cantidad, con base en la norma ASTM-D6433.

ABREVIATURAS

- CGR: Contraloría General de la República
- CONAVI: Consejo Nacional de Vialidad
- CPS: Capa de Protección Superficial
- CR-2020: Manual de Especificaciones Generales para la Construcción de Carreteras, Caminos y Puentes
- DOP: División de Obras Públicas del MOPT
- LANAMMEUCR: Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales de la Universidad de Costa Rica
- MOPT: Ministerio de Obras Públicas y Transportes
- MP: Material en Perfilado
- PCI: Índice de Condición del Pavimento
- RNT: Ruta Nacional Terciaria
- RVN: Red Vial Nacional
- RI: Ranking de Intervenciones
- SC: Sección de Control
- SPS: Secretaría de Planificación Sectorial
- TSM: Tratamiento Superficial Múltiple
- TSS: Tratamiento Superficial Simple
- UM: Unidad de Muestreo
- VD: Valores deducidos

RESUMEN

El presente trabajo desarrolla un marco metodológico para la evaluación y optimización de estrategias de conservación vial en rutas nacionales no pavimentadas, utilizando como caso de estudio la Ruta Nacional Terciaria No. 746, ubicada en la provincia de Alajuela, cantón de San Carlos. La investigación integra criterios técnicos, económicos y ambientales con el fin de brindar una herramienta objetiva para la toma de decisiones en la priorización de intervenciones viales.

La metodología se estructuró en cuatro etapas principales: la revisión de aspectos técnicos y metodológicos asociados al uso de material de perfilado asfáltico (RAP); el diagnóstico del estado actual de la Ruta No. 746 mediante inspecciones de campo, registros fotográficos y análisis de durabilidad; y finalmente, la elaboración de un ranqueo de intervenciones priorizadas según la condición existente y las necesidades de conservación identificadas en la ruta.

Los resultados evidencian que el empleo de RAP constituye una alternativa viable para mejorar la durabilidad en rutas no pavimentadas, siempre que se acompañe de un adecuado control constructivo y un seguimiento periódico del comportamiento de la vía. Asimismo, el ranqueo de intervenciones aplicado sobre la Ruta No. 746 demostró ser un instrumento útil para jerarquizar necesidades de conservación y optimizar la asignación de recursos disponibles.

Se concluye que la metodología propuesta aplicada a la ruta en estudio permite establecer un procedimiento claro y reproducible para evaluar la condición de rutas no pavimentadas en contextos con información limitada, fortaleciendo la planificación de inversiones y promoviendo una gestión vial más eficiente y sostenible. Este enfoque aporta una referencia metodológica valiosa para futuros estudios y para la toma de decisiones en conservación vial a nivel institucional.

ABSTRACT

This study develops a methodological framework for evaluating and optimizing road conservation strategies on unpaved national routes, using National Tertiary Route No. 746, located in the province of Alajuela, canton of San Carlos, as a case study. The research integrates technical, economic, and environmental criteria to provide an objective tool for decision-making in the prioritization of road maintenance interventions.

The methodology was structured into four main stages: a review of technical and methodological aspects related to the use of reclaimed asphalt pavement (RAP); an assessment of the current condition of the road through field inspections, photographic records, and durability analysis; and finally, the development of a prioritized ranking of interventions based on the existing condition and conservation needs.

The results show that the use of RAP is a viable alternative for improving the durability of unpaved roads, provided it is accompanied by adequate construction control and periodic monitoring of roadway performance. Likewise, the intervention ranking proved to be a useful instrument for prioritizing conservation needs and optimizing the allocation of available resources.

It is concluded that the proposed methodology, applied to the route under study, provides a clear and reproducible procedure for assessing the condition of unpaved roads in contexts with limited information, strengthening investment planning and promoting a more efficient and sustainable road management approach. This framework offers a valuable methodological reference for future studies and for institutional decision-making in road conservation.

INTRODUCCIÓN

La conservación de la red vial nacional constituye un componente esencial en el desarrollo sostenible del transporte terrestre, particularmente en países donde las rutas terciarias desempeñan un papel crucial en la conectividad rural y el acceso a servicios básicos. En este contexto, las superficies de ruedo en lastre, predominantes en las rutas de bajo volumen de tránsito, representan un desafío persistente para las entidades responsables de su mantenimiento, debido a su limitada durabilidad, alta susceptibilidad a la acción climática y los elevados costos acumulativos asociados a su conservación rutinaria.

Actualmente, la Red Vial Nacional de Costa Rica cuenta con aproximadamente 1.200 kilómetros de vías con tratamiento superficial, incluyendo rutas nacionales terciarias. Este dato contempla únicamente tratamientos superficiales simples y múltiples, de acuerdo con su clasificación general (Informe de Evaluación de la Red Vial Nacional Pavimentada, LanammeUCR, 2023).

Si bien tradicionalmente se han empleado tratamientos superficiales para mejorar las condiciones funcionales de este tipo de rutas, su efectividad se ve limitada por su corta vida útil, la necesidad de intervenciones frecuentes y su baja contribución estructural. Estos tratamientos han demostrado ser útiles como capas de protección y mejoramiento funcional; sin embargo, en rutas terciarias con condiciones ambientales y operativas exigentes, su rendimiento puede resultar insuficiente para garantizar una solución sostenible a largo plazo.

Ante este escenario, surge la necesidad de explorar alternativas técnicas que permitan mejorar el desempeño superficial sin recurrir a procesos constructivos complejos ni a inversiones de gran magnitud. Una de estas alternativas es el uso de material perfilado, obtenido mediante el fresado de pavimentos asfálticos existentes, el cual puede colocarse como una nueva capa de ruedo para aumentar la durabilidad, mejorar la transitabilidad y reducir los requerimientos de mantenimiento periódico.

El material perfilado presenta ventajas significativas frente a otras soluciones convencionales, entre ellas su reutilización como insumo reciclado, su buena adherencia y compactación al emplearse como capa de rodamiento en rutas de bajo volumen, y su potencial para ofrecer un mejor desempeño funcional que el lastre o los tratamientos superficiales simples. Además, su incorporación contribuye a disminuir el impacto ambiental asociado al uso de agregados vírgenes y a la disposición de residuos provenientes del fresado.

En este contexto, la presente investigación se orienta a evaluar el desempeño de una superficie de ruedo compuesta por material perfilado como estrategia de conservación para rutas terciarias. El caso de estudio corresponde a la intervención ejecutada por la Macro Región San Carlos de la División de Obras Públicas del MOPT, en coordinación con el Consejo Nacional de Vialidad (CONAVI), mediante la colocación de una estructura conformada por una capa variable de subbase y un espesor promedio de 5 cm de material perfilado sin imprimación, a lo largo de 4,9 km en la Ruta Nacional Terciaria No. 746, Sección de Control No. 20970. Este segmento, anteriormente con superficie en lastre, se extiende desde la intersección con la Ruta Nacional Secundaria No. 250 en La Legua–El Pegón hasta su conexión con la Ruta Nacional Terciaria No. 745 en Veracruz de San Carlos.

El trabajo incluye una revisión documental que contextualiza brevemente los tratamientos superficiales como alternativas comúnmente utilizadas para la protección de superficies de ruedo en lastre; no obstante, se profundiza en el análisis del material perfilado como solución aplicada en la Ruta Nacional No. 746, considerando sus principales características, y realizando un inventario detallado en campo para aplicación de la nota del PCI. Posteriormente, se presentan los resultados obtenidos a partir del trabajo de campo y del procesamiento de datos, los cuales responden a los objetivos específicos planteados en la investigación. Finalmente, el documento concluye con una síntesis de hallazgos, conclusiones y recomendaciones técnicas relacionadas con el uso de material perfilado en este tipo de vías.

CAPÍTULO 1: GENERALIDADES DE LA INVESTIGACIÓN

1.1 Antecedentes

Las rutas nacionales no pavimentadas (lastre y tierra) de la Red Vial Nacional (RVN) de Costa Rica constituyen una parte importante de esta. De los 7,848.20 km de rutas nacionales que componen la RVN, 2,594.3 km son rutas en lastre, según estadísticas de informes realizados por LanammeUCR. Esto significa que representan aproximadamente un tercio de la RVN (ver Figura 1), convirtiendo su mantenimiento en una tarea relevante y desafiante para la Administración, desde la perspectiva de la gestión institucional a cargo de esta infraestructura vial. (Informe de Auditoría Técnica LM-INF-IC-D-004-2020, LanammeUCR).

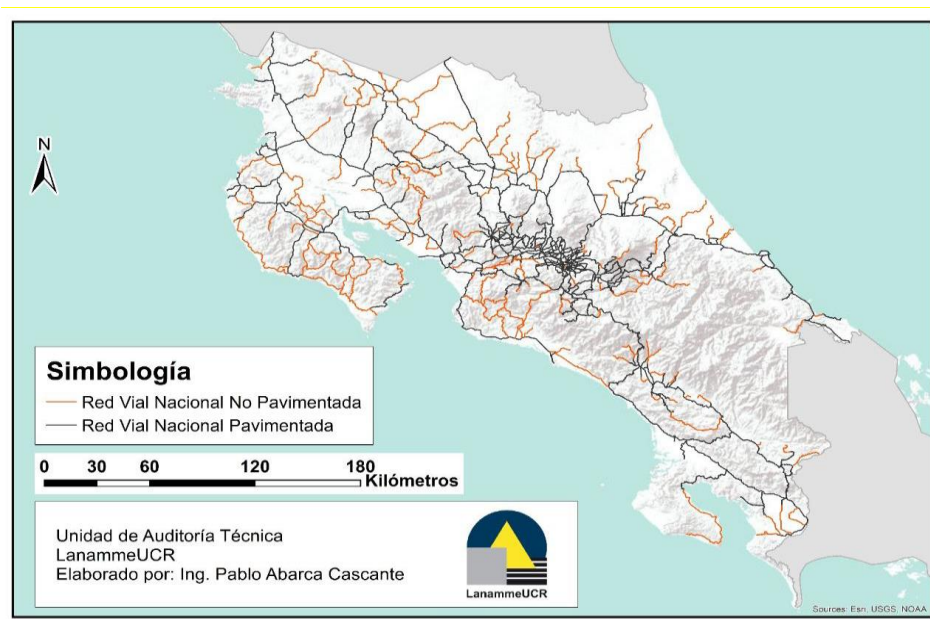


Figura 1: Rutas nacionales pavimentadas y no pavimentadas de la Red Vial Nacional de Costa Rica.

Fuente: LanammeUCR, 2020.

Como es esperable, las rutas nacionales en lastre o tierra se encuentran mayoritariamente en zonas rurales, fuera del Gran Área Metropolitana. Esto les confiere un papel fundamental en el desarrollo rural, al cumplir funciones clave de conexión y movilidad, ya que la infraestructura vial es considerada en general como esencial para el acceso a servicios y oportunidades tales como salud, educación, empleo y comercio.

Entre los principales actores involucrados en Costa Rica, se encuentra el Consejo Nacional de Vialidad (CONAVI), entidad responsable de la conservación y mantenimiento de la Red Vial Nacional. Además, planifica y ejecuta el programa de conservación vial para asegurar la vida útil de las estructuras de pavimento, lo que a su vez contribuye a la prolongación de otros elementos que forman parte de la vía, tales como el sistema de drenaje, obras complementarias y aspectos de seguridad, entre otros.

En años recientes, la Administración Estatal ha desarrollado varias experiencias relacionadas con tratamientos en rutas de lastre, cuyo principal objetivo ha sido el control del polvo. Algunos proyectos han consistido en intervenciones que incluyen la aplicación de una capa delgada de protección asfáltica en rutas de lastre, generalmente mediante la dosificación de emulsión asfáltica para estabilizar una capa superficial del material granular de la calzada, o mediante la imprimación directa de la superficie.

Este tipo de intervención surgió de la necesidad de controlar la generación de polvo en las rutas nacionales de lastre, siendo la base para contrataciones realizadas en 2015, como la licitación (005-2015 CONAVI-CNE), derivadas de la emergencia declarada bajo el Decreto No. 38642-MP-MAG, publicado en la Gaceta No. 62 del lunes 30 de marzo de 2015.

Por ejemplo, para la atención de la Ruta Nacional No. 150 amparada en este decreto, CONAVI, como unidad ejecutora del proyecto, decidió implementar este tipo de trabajos en otras rutas afectadas, no solo a través de CONAVI, sino también mediante la División de Obras Públicas del MOPT. Asimismo, se ha evidenciado la aplicación de diversas técnicas adicionales a la imprimación y sellos asfálticos, tales como la estabilización con emulsión asfáltica y el uso de material de mezcla asfáltica reciclado (“RAP”), conocido comúnmente como material perfilado de capas asfálticas.

Es importante mencionar que, en cuanto a las modalidades de contratación para la atención de las rutas en lastre de la RVN, CONAVI ha empleado diferentes tipos de licitaciones, por ejemplo, licitaciones abreviadas, que incluyen la ejecución de los trabajos, pero no su mantenimiento por periodos prolongados, a diferencia del mantenimiento de la RVN pavimentada, donde las contrataciones pueden definirse hasta por cuatro años.

En octubre de 2019, la Secretaría de Planificación Sectorial del MOPT emitió el informe MOPT-01-06-02-001-2019, que establece una clasificación ampliada de tipo de superficie de ruedo para el registro de la Red Vial Nacional. En dicho informe se crea una nueva categoría para las rutas nacionales: las rutas con “Capas de Protección Superficial” (CPS). De esta manera, la RVN se clasifica según su superficie en rutas pavimentadas, rutas con capas de protección superficial y rutas no pavimentadas.

A continuación, se presenta un cuadro que sintetiza esta clasificación:

Tabla 1. Clasificación ampliada de tipo de superficie de ruedo para el registro de la Red Vial Nacional

Tipo de ruta	Definición	Tipos de superficie
Pavimentada	Los caminos pavimentados son aquellos que cuentan con una estructura de pavimento rígido, flexible o semi rígido que se realizan mediante el diseño estructural con el fin de soportar las cargas de tránsito durante un periodo de vida útil determinado	-Carpetas asfálticas (CA) -Hormigón o Concreto (H)

Capas de Protección Superficial	Tipo de capa de protección asfáltica sobre la superficie granular existente utilizado para reducir la pérdida de material por escorrentía superficial, tracción vehicular, entre otras, impermeabilizar la superficie y reducir la cantidad de partículas de polvo dispersas en el aire que se generan con el tránsito vehicular.	-Sello asfáltico con emulsión asfáltica (SA) -Tratamiento superficial simple (TSS) -Tratamiento superficial múltiple (TSM) -Lechadas asfálticas (<i>Slurry Seals</i>) - Material de Perfilado (MP) -Otros
No pavimentada	Superficie de ruedo de material granular expuesta o con materiales estabilizadores y tierra sin ningún tipo de protección impermeabilizante superficial.	-Superficies granulares estabilizadas -Lastre Tierra

Fuente: Informe MOPT-01-06-02-001-2019.

Esta categoría surgió a partir de solicitudes para clasificar como pavimentadas las rutas nacionales tratadas en lastre que han sido intervenidas con sellos asfálticos u otras técnicas, como la colocación de material perfilado de capas asfálticas. La razón principal de esta solicitud, por parte de funcionarios de CONAVI, fue la necesidad de contar con herramientas contractuales adecuadas para el mantenimiento de estas obras.

En resumen, la Secretaría de Planificación Sectorial del MOPT, aclara que no es técnicamente procedente clasificar una ruta en lastre tratada con técnicas superficiales como ruta pavimentada, ya que no existe un cambio en la estructura del pavimento. Sin embargo, las rutas con capas de protección superficial presentan condiciones diferentes a las rutas de lastre, por lo que se categorizan de manera distinta. Es responsabilidad de CONAVI, como ente encargado de la RVN, generar las herramientas contractuales necesarias para su adecuado mantenimiento. (Informe MOPT-01-06-02-001-2019, LanammeUCR).

Para nuestro caso de estudio, la Ruta Nacional Terciaria No. 746, está conformada por una superficie en lastre, conecta la Ruta Nacional No. 745 en el poblado de Veracruz con la Ruta Nacional No. 250 en el poblado de La Legua. Sirve como ruta alterna ante cualquier eventualidad en la Ruta Nacional No. 745, en el tramo comprendido entre el cuadrante central de Pital y el cuadrante central de Veracruz. Además, esta ruta es de gran importancia para el comercio y desplazamiento vehicular de

la zona, donde se observan viviendas a ambos lados de la ruta, las cuales se ven afectadas por la contaminación generada por el polvo levantado por el tránsito vehicular.

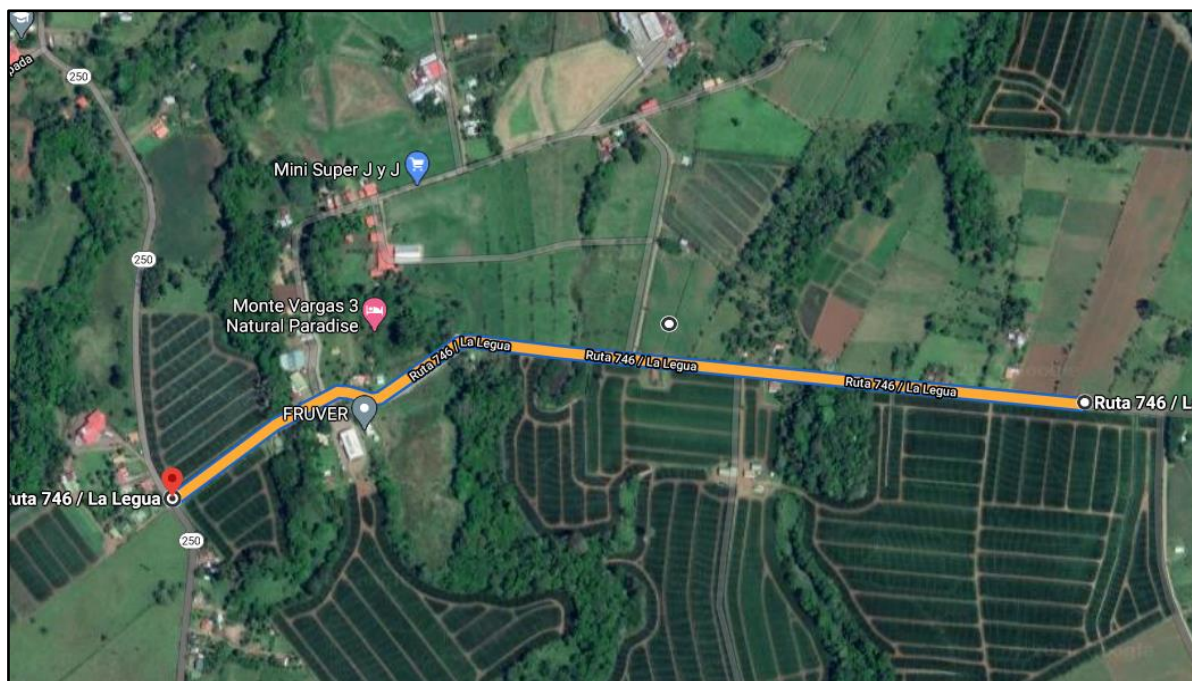


Figura 2: Ruta Nacional Terciaria No. 746.

Fuente: Google Earth, 2025.

1.2 Planteamiento del Problema

En Costa Rica, aproximadamente el 73% de la Red Vial Nacional (RVN) está conformado por rutas secundarias y terciarias no pavimentadas, las cuales desempeñan un papel clave en la conectividad del territorio y en el vínculo entre las zonas rurales y los centros productivos y comerciales del país. Su adecuado mantenimiento resulta esencial para garantizar el acceso a servicios básicos y fomentar el desarrollo económico, especialmente en áreas fuera del Gran Área Metropolitana. (LanammeUCR, 2017).

Debido a su bajo volumen de tránsito y a restricciones presupuestarias, la administración ha optado por implementar soluciones de bajo costo, como el uso de capas de protección, en lugar de estructuras de pavimento tradicionales. Estas soluciones, aunque viables en el corto plazo, requieren de un adecuado seguimiento y mantenimiento para conservar su funcionalidad.

En este contexto, el problema central radica en la necesidad de asegurar una estrategia de mantenimiento sostenible para las obras de conservación vial ejecutadas en la Ruta Nacional Terciaria No. 746, Sección de Control No. 20970. La falta de conservación adecuada ha provocado un

progresivo deterioro de la superficie de ruedo, caracterizado por la pérdida de material granular debido a factores climáticos, la exposición al tránsito vehicular y la escorrentía superficial.

Esta situación no solo genera elevados costos recurrentes para la Administración, sino que también impacta negativamente en la calidad de vida de los residentes a lo largo de la ruta, debido al polvo en suspensión y a la disminución de la seguridad y comodidad del transporte de personas, mercancías y bienes.

Además, se identifica una ausencia de metodologías estandarizadas y contextualizadas para la evaluación y planificación de estrategias de conservación vial en rutas no pavimentadas con capas de protección. Si bien existen experiencias aisladas y lineamientos generales, no se cuenta con un marco metodológico integral que permita valorar de manera técnica, económica y funcional la efectividad de estas intervenciones. Esta carencia limita la capacidad institucional para tomar decisiones basadas en evidencia, dificulta la comparación entre proyectos similares y obstaculiza el desarrollo de políticas sostenibles de mantenimiento. Por tanto, se vuelve necesario proponer un mecanismo de evaluación técnica que oriente la toma de decisiones y optimice la gestión de estas rutas dentro del sistema vial nacional.

1.3 Justificación del Estudio

La conservación de caminos, que incluye la implementación de mejores superficies de ruedo, se basa estrictamente en el *Manual de Especificaciones Generales para la Conservación de Caminos, Carreteras y Puentes* (MCV-2015), elaborado por el Ministerio de Obras Públicas y Transportes (MOPT) y el Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales de la Universidad de Costa Rica (LanammeUCR). Este manual tiene como objetivo brindar lineamientos generales para la conservación vial de la Red Vial Nacional, orientados a garantizar la utilización óptima de los recursos, asegurar la funcionalidad de las obras, la seguridad de los usuarios y trabajadores involucrados, así como la protección del medio ambiente. Todo esto mediante la ejecución de proyectos que se ajusten a la modalidad de conservación vial correspondiente, acompañados por un sistema básico de gestión, control y verificación de calidad.

Además, se busca promover la sistematización y uniformidad de criterios, tomando en cuenta la experiencia e investigación local cuando corresponda, así como una adecuada coordinación entre los diversos especialistas involucrados en este tipo de obras de infraestructura vial.

En particular, el capítulo 5 del MCV-2015 se dedica a la conservación de vías en lastre y define las actividades aplicables a rutas con este tipo de superficie de rodadura:

Tabla 2. Actividades de conservación de vías lastradas.

Capítulo 5 – Conservación de vías lastradas		Tipo de Conservación	
Sección CV-501	Bacheo manual en rutas de lastre	Rutinaria	
Sección CV-502	Reconformación de una ruta en lastre (bacheo mecanizado)		Periódica
Sección CV-503	Reposición de lastre o colocación de sobrecapa de lastre		Periódica
Sección CV-504	Reparación de sitios inestables en una ruta de lastre		Periódica
Sección CV-505	Mejoramiento de una superficie de ruedo en lastre		Periódica
Sección CV-506	Protección de una superficie de ruedo		Periódica
Sección CV-507	Control de polvo mediante riego de agua y otros estabilizadores	Rutinaria	

Fuente: (Manual de Especificaciones Generales para la Conservación de Caminos, Carreteras y Puentes. MOPT/ MCV-2015).

La sección CV-506 establece que se puede proteger el lastrado mediante la aplicación de un sello sobre una superficie de rodadura, con espesor y condiciones físico-mecánicas suficientes para impermeabilizar y mejorar la adherencia vehicular.

Esta sección reconoce que la aplicación de sellos asfálticos constituye una alternativa económica para la conservación de estructuras de pavimento granular, funcionando como una capa de protección y desgaste, impermeabilización y control del polvo. Así, estas técnicas pueden tener un carácter preventivo, correctivo o ambos, con el fin de proteger la capa de lastre de la erosión y mejorar la textura superficial para disminuir los costos periódicos de conservación y prolongar la transitabilidad del camino.

En este sentido, el CR-2020 permite la aplicación, mediante una técnica común en el mantenimiento de la Red Vial no asfaltada, de tratamientos superficiales con emulsión asfáltica y agregado, no constituyendo una mezcla asfáltica producida en planta, sino una capa de protección superficial colocada in situ.

De manera complementaria, la publicación especial de LanammeUCR “Tratamientos Superficiales como Alternativa en Rutas de Lastre” señala:

“Los tratamientos superficiales son una alternativa para preservar el buen estado de una carretera y mejorar algunas de sus características. Esta solución ha sido reconocida por su buena relación costo/desempeño, facilidad de colocación y porque puede emplearse sobre casi cualquier tipo de pavimento.”

Esta situación permite realizar inversiones en rutas de lastre de manera eficaz y eficiente, aplicando técnicas novedosas que no implican costos elevados ni obras de gran envergadura.

Por otra parte, el uso de material perfilado como alternativa de intervención en la Ruta Nacional No. 746 se justifica por su capacidad para mejorar las condiciones funcionales de la superficie de ruedo, manteniendo la transitabilidad y la seguridad vial en un tramo de bajo volumen de tránsito y con limitaciones presupuestarias para soluciones de mayor costo. Este tipo de material, proveniente del reaprovechamiento de capas granulares existentes o de material proveniente de cortes y préstamos controlados, permite restablecer el perfil longitudinal y transversal de la vía, corrigiendo deformaciones, irregularidades y pérdidas de nivel sin requerir procesos constructivos complejos.

Desde el punto de vista económico, el uso de material perfilado representa una solución de bajo costo en comparación con la colocación de nuevas capas estructurales o tratamientos bituminosos, lo cual resulta especialmente ventajoso en proyectos de conservación rutinaria o periódica dentro de la red vial cantonal o nacional. Su aplicación favorece el aprovechamiento de recursos locales, reduciendo los costos de transporte y minimizando la dependencia de materiales pétreos nuevos.

Finalmente, este proceso se complementa con la revisión de normativa internacional y nacional, el análisis de estándares de mantenimiento y procedimientos para la colocación del RAP, así como con un inventario detallado de la vía, registro fotográfico durante el proceso constructivo y de mejoramiento de la carpeta.

1.4 Objetivos

1.4.1. Objetivo general

Desarrollar un marco metodológico para evaluar y mejorar las estrategias de conservación vial en rutas nacionales no pavimentadas, incorporando criterios técnicos, económicos y ambientales, mediante el estudio de caso de la Ruta Nacional Terciaria No. 746 intervenida con material perfilado como capa de rodamiento.

1.4.2 Objetivos específicos

- Investigar los principales aspectos técnicos y metodológicos aplicables a la evaluación de rutas no pavimentadas intervenidas con el concepto de capa de protección.
- Diagnosticar el estado actual de la Ruta Nacional Terciaria No. 746 mediante visitas de campo, registros fotográficos, análisis de condiciones geométricas, funcionales, de drenaje, condiciones de seguridad vial, así como la identificación de deterioros superficiales para sacar la nota del PCI.
- Evaluar la efectividad y el desempeño funcional de las capas de protección aplicadas en rutas de lastre, mediante el seguimiento de condiciones previas y posteriores a la colocación del material perfilado en el caso de estudio de la Ruta Nacional Terciaria No. 746.
- Analizar los factores técnicos, económicos y ambientales que inciden en la selección de estrategias de conservación vial y priorización de las intervenciones, a partir de la elaboración de un ranqueo de intervención con base en datos recolectados y criterios normativos.

Alcance y limitaciones

1.5.1 Alcance

El presente estudio se enfoca en la evaluación de estrategias de conservación vial para rutas nacionales no pavimentadas utilizando una capa de protección y como complemento el caso de estudio en la Ruta Nacional No.746 ubicada en el cantón de San Carlos.

La investigación se desarrolla mediante la aplicación del método *Pavement Condition Index* (PCI) como herramienta de diagnóstico del estado superficial del pavimento, complementado con un análisis técnico, económico y finalmente un apartado ambiental que permita valorar la sostenibilidad del uso del RAP como alternativa de conservación para caminos no pavimentados y su uso en futuros proyectos.

El alcance del proyecto comprende las siguientes etapas:

1. Caracterización del tramo de estudio:

Se realiza la descripción de las condiciones geométricas vistas en la ruta, considerando pendientes longitudinales y transversales, radios de curvatura, aspectos de seguridad vial, con el fin de contextualizar las condiciones físicas en las que se aplicó el material de RAP.

2. Evaluación del estado superficial mediante el método PCI:

Se aplica el procedimiento establecido en la norma ASTM D6433, adaptado a superficies estabilizadas con RAP, para identificar los tipos de deterioro presentes, su severidad y extensión, obteniendo un índice de condición por una única sección de control. Los resultados permiten determinar el nivel actual de conservación del tramo y establecer un parámetro de evaluación.

3. Análisis de efectividad del RAP

Se efectúa una evaluación comparativa del desempeño del tramo intervenido con RAP, considerando el tiempo transcurrido desde su colocación hasta la fecha de evaluación. Se analiza la capacidad del material para mantener condiciones adecuadas de transitabilidad y de carga vehicular. Este análisis permite valorar la efectividad del RAP como tratamiento de conservación en caminos rurales.

4. Análisis económico:

En el componente económico se determina el costo por kilómetro asociado a la intervención con RAP. El análisis incorpora los costos directos de ejecución y la frecuencia prevista de mantenimiento, junto con la vida útil esperada del tratamiento. Esta información permite cuantificar de manera clara el impacto económico del uso de RAP dentro de las estrategias de conservación vial.

El estudio no aborda de manera detallada aspectos financieros o sociales ajenos al ámbito de la conservación vial, ni contempla un análisis estructural del pavimento. La investigación se enfoca en la recopilación de información técnica a partir de inspecciones visuales de campo, registros fotográficos y mediciones básicas, complementadas con la aplicación de la

metodología del Índice de Condición del Pavimento (PCI, por sus siglas en inglés), adaptada a las condiciones particulares de la Ruta Nacional Terciaria No. 746.

1.5.2 Limitaciones

El estudio presenta las siguientes limitaciones, las cuales definen el marco de alcance de la investigación y los criterios bajo los cuales se interpretan los resultados:

- La investigación se centra en un único caso de estudio, correspondiente a la Ruta Nacional No. 746, por lo que los resultados no pueden extrapolarse directamente a otras rutas sin considerar las particularidades de tráfico, clima, topografía y disponibilidad de materiales.
- El análisis económico se fundamenta en datos de costos unitarios referenciales obtenidos de fuentes institucionales y del mercado local, los cuales pueden variar con el tiempo y las condiciones de abastecimiento del material reciclado.
- El análisis ambiental se limita a una estimación de impactos a lo largo del ciclo de vida del material, utilizando un enfoque simplificado de evaluación cualitativa, sin incluir mediciones experimentales de emisiones o consumo energético.
- La evaluación de la durabilidad del RAP se basa en la comparación temporal del estado superficial obtenido mediante el método PCI y en observaciones visuales de campo, sin la ejecución de ensayos estructurales o de laboratorio.
- El estudio no contempla el diseño geométrico ni estructural de la vía, dado que se enfoca exclusivamente en la evaluación del desempeño del material reciclado y su efectividad como alternativa de conservación en la ruta analizada.

CAPÍTULO 2: MARCO TEÓRICO

2.1 Índice de Condición del Pavimento (PCI)

2.1.2 Origen y Fundamento Normativo

El Índice de Condición del Pavimento (PCI, por sus siglas en inglés) es una metodología desarrollada por el U.S. Army Corps of Engineers en la década de 1970 como parte de un sistema para evaluar objetivamente el estado de los pavimentos tanto en bases militares como en infraestructura civil. Posteriormente, esta metodología fue estandarizada y documentada por la ASTM International a través de la norma ASTM D6433 "Standard Practice for Roads and Parking Lots Pavement Condition Index Surveys", la cual establece los procedimientos técnicos para su aplicación en pavimentos flexibles y rígidos.

2.1.3 Proceso de Evaluación del Índice de Condición Superficial (PCI)

El procedimiento de evaluación del PCI se basa en una inspección visual detallada de los tramos de pavimento, donde se identifican y cuantifican los diferentes tipos de deterioro presentes, así como su extensión superficial y nivel de severidad. Este enfoque permite obtener una medición estandarizada y reproducible del estado funcional del pavimento, mediante un valor numérico entre 0 y 100, donde: la calificación de 0 es lo más deficiente y la calificación de 100 es la mayor nota.

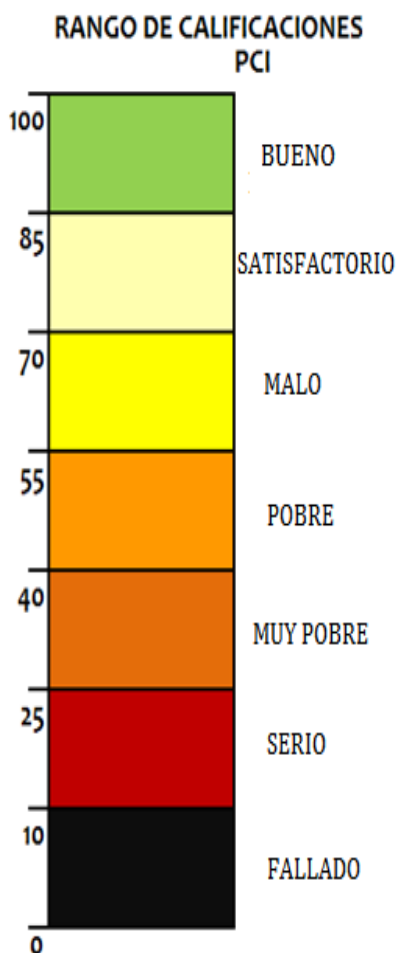


Figura 3. Rango de calificaciones metodología PCI.

Fuente: ASTM-6433.

2.1.4 Tipos de Deterioro y Severidades

La norma ASTM D6433 contempla una lista detallada de deterioros que varían dependiendo del tipo de pavimento (flexible o rígido). Para los pavimentos flexibles (asfálticos), que incluyen capas con tratamientos superficiales, algunos de los deterioros más comunes son:

- Piel de cocodrilo
- Exudación
- Agrietamiento en bloque
- Abultamientos y hundimientos

- Corrugación
- Depresión
- Grieta de borde
- Grieta de reflexión de junta
- Grieta longitudinal y transversal
- Huecos
- Baches
- Ahuellamiento
- Desprendimiento de agregados

Cada deterioro se clasifica en tres niveles de severidad: leve, moderado o severo, según criterios específicos definidos en la norma.

2.1.5 Niveles de Severidad

La metodología PCI clasifica los deterioros según su tipo, severidad y extensión. La severidad describe cuán avanzado está el deterioro, y se clasifica en tres niveles:

- Severidad leve (L): El deterioro está presente, pero no afecta significativamente la seguridad ni la funcionalidad del pavimento.
- Severidad moderada (M): El deterioro empieza a comprometer la integridad estructural o funcional del pavimento.
- Severidad severa (S): El deterioro es evidente, extenso y afecta de forma grave la operación y seguridad vial.

Cada tipo de deterioro posee criterios específicos de evaluación de severidad que están claramente definidos en la norma ASTM D6433. A modo de ejemplo, en pavimentos flexibles y tratamientos superficiales (como los presentes en la Ruta 746), los siguientes deterioros son más comunes:

Tipo de Deterioro	Descripción breve	Criterio de Severidad
Grietas longitudinales	Grietas paralelas al eje del camino. Se asocian a fallas por construcción o por deformaciones estructurales.	Ancho y cantidad de grietas; presencia de desintegración o bombeo.

Grietas transversales	Grietas perpendiculares al eje de la vía. Usualmente causadas por contracción térmica o asentamiento diferencial.	Igual que anterior.
Grietas en bloque	Formación de patrones cuadriculados que indican contracción del asfalto o envejecimiento del ligante.	Tamaño de bloques y nivel de desintegración.
Grietas tipo cocodrilo	Grietas interconectadas en forma de escamas. Representan falla estructural de la capa asfáltica o base.	Área afectada, profundidad y bombeo.
Desintegración / Raveling	Pérdida progresiva del agregado fino y grueso en la superficie del pavimento, frecuente en tratamientos superficiales con envejecimiento.	Grado de pérdida superficial.
Baches (Potholes)	Cavidades profundas causadas por colapso del material superficial, muy comunes en caminos con deficiente sellado o drenaje.	Profundidad y área afectada.
Ondulaciones y hundimientos	Deformaciones plásticas permanentes. Se presentan como irregularidades longitudinales (ondulaciones) o depresiones (hundimientos).	Profundidad de la deformación y su impacto en la conducción.

Tabla 3. Deterioros en pavimentos.

Fuente: Tomado de norma ASTM-D6433.

La severidad se determina mediante inspección visual directa, utilizando parámetros definidos en hojas de campo normalizadas. Por ejemplo:

- Una grieta de severidad leve puede tener un ancho menor a 6 mm sin desintegración del borde.
- En severidad moderada, las grietas tienen entre 6 mm y 19 mm, con bordes algo desintegrados.
- Para severidad severa, las grietas superan los 19 mm, presentan pérdida de material y afectan la transitabilidad.

Tipo de Deterioro	Severidad Leve (L)	Severidad Moderada (M)	Severidad Severa (S)
Grieta longitudinal o transversal	Ancho < 6 mm. Sin desintegración de bordes.	Ancho entre 6 mm y 19 mm. Bordes ligeramente desintegrados.	Ancho > 19 mm o presencia de bombeo, pérdida de material o agrietamiento adyacente.
Grieta en bloque	Cuadrículas grandes (>1.5 m²), ancho de grieta < 6 mm. Sin pérdida de material.	Cuadrículas medianas (0.5 a 1.5 m²), grietas entre 6 y 19 mm.	Cuadrículas pequeñas (<0.5 m²), grietas > 19 mm y con pérdida de agregados.
Grieta tipo cocodrilo	Grietas finas en patrón cerrado, sin bombeo ni desprendimiento.	Agrietamiento más cerrado, con bombeo ocasional o pérdida leve de material.	Densidad alta de grietas con bombeo, desprendimiento de material, o hundimiento.
Desintegración superficial	Ligera pérdida de ligante o agregados en áreas aisladas.	Desgaste visible en amplias zonas. Superficie rugosa y parcialmente expuesta.	Pérdida generalizada del sello o superficie muy expuesta. Alta rugosidad.
Bache	< 0.1 m² y < 2.5 cm de profundidad.	Entre 0.1 y 1.0 m², o profundidad de hasta 5 cm.	> 1.0 m² o profundidad > 5 cm. Afecta funcionalidad.
Ondulación/Hundimiento	Irregularidad perceptible visualmente, pero que no afecta el confort.	Deformación visible que interfiere levemente con el tránsito.	Deformación pronunciada que compromete la conducción o el drenaje.

Tabla 4. Severidad establecida para cada deterioro.

Fuente: Tomado de norma ASTM-D6433.

2.2 Análisis de Longitud de Unidad de Muestreo en Carreteras con Pavimento Flexible

La longitud de la unidad de muestreo (UM) dependerá del ancho de calzada en el caso de pavimentos flexibles y del tamaño de losa en pavimentos rígidos. El rango de valores que se definen a continuación para determinar la longitud de las unidades de muestra, es necesario, pues la metodología del PCI establece estos valores en sus curvas de deterioro para el cálculo de los “Valores Deducidos”.

El área de la unidad de muestreo debe estar en el rango de $225.0 + 90.0 \text{ m}^2$ (entre 135 y 315 m^2). Al respecto se indica la relación longitud - ancho de calzada pavimentada, que satisfacen dicha área:

Ancho de Calzada (m) Longitud de UM (m):

3,5 - 6,5	47
4,0 - 7,5	42
4,5 - 8,5	38
5,0 - 9,0	35
5,5 - 10	Máx 31

Tabla 5. Longitud de la Unidad de Muestreo.

Fuente: Tomado de norma ASTM-D6433.

Se recomienda utilizar la Unidad de Muestreo de menor longitud posible. Si el ancho de la calzada promedio de la ruta es mayor que los valores mostrados en la tabla anterior, se deberá dividir en dos, para que se cumpla con un área de $225 + 90 \text{ m}^2$ y la longitud mínima de 31 m, en cuyo caso será necesario realizar dos análisis independientes.

Cálculo del número total de Unidades de Muestreo (N)

Para calcular el número total de UM presentes en la sección de carretera a evaluar, se debe resolver la siguiente ecuación:

$$N = \text{Long proy} / \text{Long UM} \quad (1)$$

Donde,

N: Número total de unidades de muestreo en la sección de pavimento.

Long Proy: la longitud total del proyecto por evaluar (m).

Long UM: la longitud de la unidad de muestra seleccionada

Número Mínimo de Unidades a Evaluar (n).

Se recomienda seleccionar un número mínimo de unidades de muestreo. Para ello se debe aplicar la siguiente ecuación la cual produce un estimado del PCI ± 5 del promedio verdadero con confiabilidad del 95%.

$$n = (N \times \sigma^2) / ((e^2/4) \times (N-1) + \sigma^2) \quad (2)$$

Donde:

n: Número mínimo de unidades de muestreo a evaluar.

N: Número total de unidades de muestreo en la sección del pavimento.

e: Error admisible en el estimativo del PCI de la sección ($e = 5\%$). (Este valor debe ser anotado en la ecuación como 5 y no como 5%)

σ : Desviación estándar del PCI entre las unidades.

Durante la inspección inicial se asume una desviación estándar σ_i del PCI de 10 para pavimento flexible. En inspecciones subsecuentes se usará la desviación estándar real (o el rango PCI) de la inspección previa en la determinación del número mínimo de unidades que deben evaluarse, para asegurar el 95% de confiabilidad en los datos. Para estimar el valor real de la desviación estándar se utilizará la ecuación que se explica a continuación:

2.2.1 Selección de las Unidades de Muestreo para Inspección

Se considera:

Si $n < 5$, se deberán evaluar todas las unidades.

Si $N > 10$, se deberán crear x cantidad de tramos con valores de N igual o mayor que 100, en donde, para cada tramo se asignará un $N_1, N_2, \dots, N_x$. Además, para cada tramo se deberá calcular el número mínimo de unidades a evaluar, $n_1, n_2, \dots, n_x$.

Intervalo de Muestreo

El intervalo de muestreo calcula el número de UM que indica la separación que debe existir entre las unidades que se van a inspeccionar y las que no. Su valor se calcula de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$i = (N/n): \quad (3)$$

Donde;

N: Número total de unidades de muestreo de la sección del pavimento.

n: Número mínimo de unidades de muestreo a evaluar.

i: Intervalo de muestreo, se redondea al número entero inferior.

2.2.2 Cálculo del PCI y Valores Deducidos

El valor del PCI se determina mediante el cálculo de valores deducidos (*Deduct Values, DV*) para cada tipo de deterioro observado. Este valor depende del tipo de deterioro, su severidad y el porcentaje de superficie afectada. Luego, los valores deducidos se combinan en un procedimiento no lineal denominado "corrección de interacción de deterioros", el cual evita la doble penalización en zonas donde varios deterioros coexisten.

El resultado final se expresa como un valor único de PCI para cada unidad de muestra o segmento evaluado, permitiendo clasificar la condición del pavimento de acuerdo con rangos de calificación mostrados.

2.3 Gestión de la conservación de caminos no pavimentados

La gestión de los caminos no pavimentados como activos viales sigue el esquema general planteado por las guías AASHTO (*American Association of State Highway and Transportation Officials*). De forma genérica, este esquema para su conservación no difiere de lo que se aplica para carreteras pavimentadas y es presentado en detalle en la figura número 4.

Como se observa, se parte de la red de caminos a administrar, a la cual se le debe diagnosticar su condición. Para hacer esto, se utilizan diversas técnicas desde la inspección visual hasta la aplicación de ensayos a través de herramientas tecnológicas como el perfilómetro láser o el deflectómetro de

impacto para las redes pavimentadas, o el rugosímetro para caminos no pavimentados. (Informe de Auditoría Técnica LM-INF-IC-D-004-2020, LanammeUCR).

Los valores de condición determinados a partir de la evaluación anterior son agrupados en categorías de condición, estas categorías clasifican los valores de los índices estimados según lo adecuado o deteriorado del estado de los activos, por ejemplo, para la capa de rodadura. Típicamente estas categorías son conocidas como ventanas de operación o umbrales de intervención, como se le hace llamar en otros países de Latinoamérica.

El siguiente paso consiste en estimar el costo de las acciones a aplicar en cada una de las categorías de condición por unidad de análisis, desde la menos invasiva como mantenimiento rutinario hasta la más compleja, como podría ser la reconstrucción del activo en análisis. Con estos valores será posible estimar el costo de las intervenciones, ya que se conoce el costo de las técnicas a aplicar y la cantidad de kilómetros que se encuentran en la condición respectiva.

Con esto realizado, intervienen las limitaciones propias de todas las instituciones en cuanto a recursos disponibles (financiamiento, recurso humano, capacidades de gestión, etc). A través de la comparación de escenarios presupuestarios y la aplicación de criterios de priorización, las agencias o instituciones respectivas determinan la programación de proyectos a ejecutar.

Por último, una vez ejecutados los distintos tipos de trabajos, la información resultante se ingresa en las bases de datos respectiva, para continuar el flujo de gestión del activo tal como se muestra en la siguiente figura.

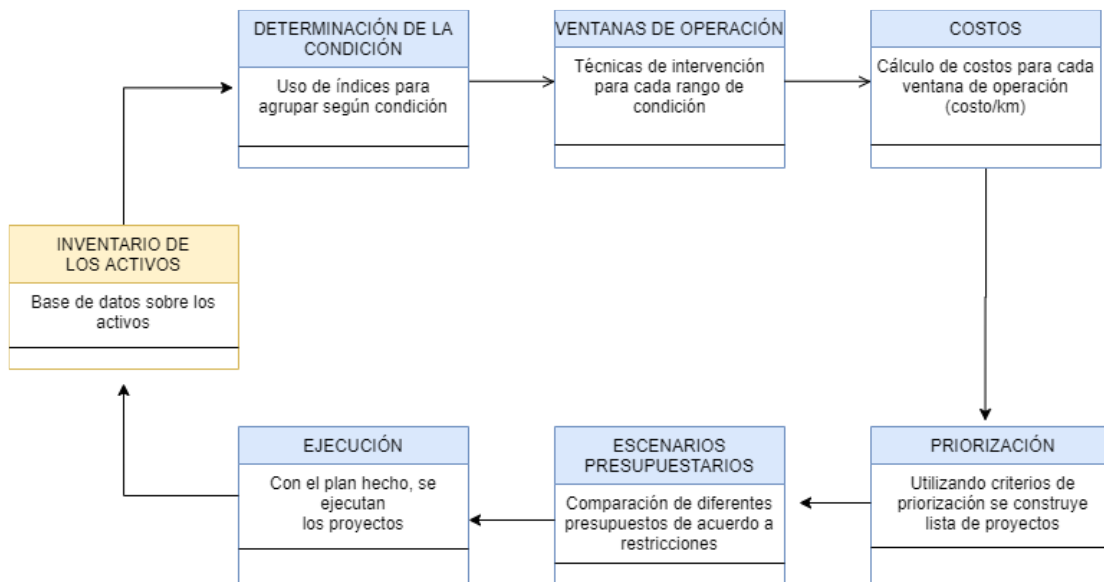


Figura 4. Esquema general de gestión de la conservación de caminos no pavimentados.

Fuente: Adaptación de AASHTO 2002 y Rodríguez-Morera (2011).

De acuerdo con Herra-Gómez, “Los Tratamientos Superficiales, en su variante más sencilla, se definen como una aplicación uniforme de un ligante asfáltico, usualmente emulsión asfáltica, cubierta por una capa uniforme de agregados de igual tamaño (*National Cooperative Highway Research Program*, 2005). Se pueden colocar casi sobre cualquier tipo de pavimento y sobre bases granulares, las cuales constituyen la base de rodamiento común en rutas secundarias y terciarias de la Red Vial Nacional”.

En general, los tratamientos superficiales pueden ser agrupados en simples y múltiples.

Simple: Este tratamiento consiste en la colocación de una capa de ligante asfáltico sobre la estructura de pavimento o base granular, seguida de una capa de agregado de tamaño uniforme.

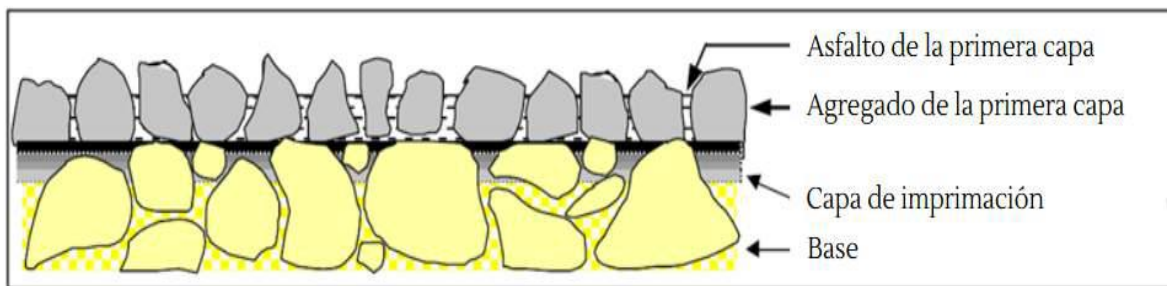


Figura 5. Composición de un Tratamiento Superficial Simple

Fuente: Publicación Especial Tratamientos Superficiales como Alternativa en Rutas de Lastre
LanammeUCR, Año 2017.

Múltiples: Corresponde a una sobreposición de tratamientos superficiales simples. Se procura que los agregados de cada capa colocada tengan aproximadamente la mitad del tamaño de los agregados que conforman la capa inferior, con el fin de garantizar el entrabamiento entre capas.

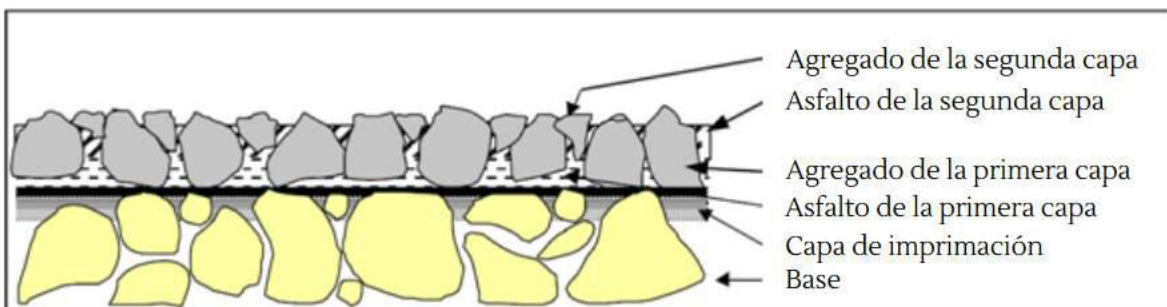


Figura 6. Composición de un Tratamiento Superficial Múltiple

Fuente: Publicación Especial Tratamientos Superficiales como Alternativa en Rutas de Lastre
LanammeUCR, Año 2017.

2.3.1 Componentes de un Tratamiento Superficial

Un tratamiento superficial está compuesto principalmente por dos elementos esenciales:

2.3.1.1 Emulsión asfáltica

Es una mezcla homogénea de asfalto y agua que se consigue mediante la aplicación de energía mecánica y los enlaces químicos que provee un agente emulsificante. Esta mezcla se considera

inestable, ya que sus componentes al ser inmiscibles entre sí (presentan una resistencia a formar una fase homogénea) tienden a separarse con el tiempo.

En comparación con el asfalto, la emulsión asfáltica ofrece muchas ventajas constructivas, ya que es un producto menos viscoso que requiere de menores temperaturas para ser trabajable. Desde el punto de vista de seguridad ocupacional, lo anterior es un factor que reduce el riesgo de quemaduras severas.

Al considerar las ventajas mencionadas anteriormente, el uso de emulsiones asfálticas no se ha limitado solo a la construcción de tratamientos superficiales, de modo que este producto se ha fabricado con diversas variantes en función de las necesidades a cubrir.

Para clasificar las emulsiones asfálticas de acuerdo con sus características, actualmente existe un sistema que facilita su nomenclatura y toma en cuenta los siguientes aspectos (Comparación del desempeño en laboratorio de tratamientos superficiales elaborados a partir de las metodologías de diseño de TxDOT y AustroadsTxDOT, 2010):

a) Tipo de carga de la emulsión: Este parámetro describe las cargas que rodean a las partículas de asfalto. Cuando la carga es positiva la emulsión es catiónica, de lo contrario se dice que la emulsión es aniónica. El sistema de nomenclatura establece que a las emulsiones catiónicas se les coloca el prefijo “C”, mientras que si no aparece esta letra la emulsión es aniónica.

b) Velocidad de rompimiento: El tiempo que los componentes de una emulsión (agua y asfalto) permanecen unidos depende de la velocidad de rompimiento. De acuerdo con la nomenclatura, las emulsiones pueden llamarse RS (*rapid setting*), MS (*medium setting*) o SS (*slow setting*), lo anterior depende de si se trata de una emulsión de rompimiento rápido, medio o lento respectivamente.

c) Viscosidad de la emulsión: A las emulsiones de baja viscosidad se les coloca el sufijo “1”, mientras que las emulsiones de alta viscosidad se les coloca el sufijo “2”.

d) Otros parámetros: Los sufijos *h* y *p* se utilizan para caracterizar el asfalto que constituye a la emulsión. El sufijo *h* indica que la emulsión se compone de un asfalto duro, mientras que la letra *p* indica que la emulsión fue elaborada a partir de asfalto modificado con polímero.

2.3.1.2 Agregado

En tratamientos superficiales los agregados tienen la función de proveer la textura deseada, resistir la abrasión producto del tráfico y las condiciones climáticas, transmitir las cargas vehiculares al pavimento y aumentar el coeficiente de fricción de la carretera (Zúñiga, 2012).

Para que el agregado utilizado en la construcción de tratamientos superficiales tenga un buen desempeño este debe cumplir con las siguientes características:

- **Limpieza:** Es importante que los agregados estén libres de agentes externos al tratamiento, como suciedad, polvo o partículas orgánicas. Estos elementos pueden provocar una pérdida prematura (desprendimiento) de agregado (*TxDOT*, 2010).
- **Resistencia:** Los agregados deben tener suficiente resistencia para soportar el aplastamiento durante la construcción y en condiciones de servicio. De lo contrario, el paso vehicular podría fracturar algunas partículas generando así suciedad, y consecuentemente una pérdida de adherencia.
- **Forma:** Se prefiere que la forma de los agregados que se utilizan en la construcción de tratamientos superficiales sea cúbica o tetraédrica. Las partículas aplanadas deben ser evitadas por su baja resistencia a la fragmentación. (*NCHRP*, 2005).

2.3.2 Tipos de Tratamientos Superficiales

Los tratamientos superficiales son técnicas económicas y efectivas para proteger y prolongar la vida útil de caminos no pavimentados y pavimentados. Cada tipo tiene características específicas, que se describen a continuación:

2.3.2.1 Fog Seal (Sello de niebla asfáltica)

Es una aplicación de emulsión asfáltica muy diluida sobre la superficie del pavimento existente. Su función principal es sellar pequeñas grietas y reducir la permeabilidad al agua, evitando que la humedad penetre y dañe la estructura base. Es un tratamiento ligero que no agrega resistencia estructural, pero mejora la impermeabilidad y la textura superficial.

2.3.2.2 Sand Seal

Consiste en la aplicación de una capa delgada de emulsión asfáltica seguida inmediatamente por una capa de arena fina. Esta combinación sella superficies porosas y mejora la textura superficial para aumentar la fricción.

2.3.2.3 Chip Seal

Es la aplicación de una capa de emulsión asfáltica seguida de una capa de agregado triturado (grava) de tamaño controlado, la cual se compacta para asegurar una buena adherencia. Este tratamiento mejora la resistencia estructural superficial y proporciona una textura rugosa que mejora la seguridad vial.

2.3.2.4 Slurry Seal (Sello de lechada asfáltica)

Es una mezcla homogénea de emulsión, agua, agregado fino (arena) y aditivos, que se aplica como una capa delgada y uniforme sobre la superficie del pavimento. Proporciona una renovación superficial con buena textura y sellado.

2.3.2.5 Micro-Surfacing (Microcarpetas)

Es un tratamiento similar al slurry seal, pero con mayores cantidades de cemento y aditivos para acelerar el fraguado y aumentar la resistencia mecánica. Se utiliza para reparar daños mayores y brindar una capa estructural ligera.

2.3.2.6 Cape Seal

Es un tratamiento combinado que consiste en la aplicación de un chip seal seguido inmediatamente por un slurry seal o micro-surfacing. Esta combinación aprovecha las ventajas de ambos tratamientos para obtener una superficie con alta durabilidad y textura óptima.

2.3.3 Usos de los Tratamientos Superficiales

El concepto de un tratamiento superficial es un término amplio que engloba varios tipos de aplicaciones de asfalto y asfalto-agregado, usualmente de menos de 25 cm de espesor. La aplicación de un tratamiento superficial se puede realizar ya sea sobre una capa granular imprimada, un asfalto existente o un pavimento en concreto. Un tratamiento superficial agrega poca capacidad estructural

por lo tanto normalmente no se le toma en cuenta al determinar la capacidad soportante como tal de un determinado pavimento.

Si bien es cierto que un tratamiento superficial empleado correctamente puede proveer una excelente superficie resistente al deslizamiento, no es una solución para todos los problemas que pueda presentar el pavimento.

Para obtener mejores resultados es esencial una clara comprensión de las ventajas y limitaciones de los tratamientos superficiales con emulsiones asfálticas.

La durabilidad de un tratamiento superficial depende de varios factores, entre ellos:

- Intensidad del tránsito
- Condiciones del pavimento existente o base existente
- Estructura del pavimento existente
- Condiciones climáticas
- Existencia y estado de los drenajes
- Materiales utilizados
- Metodología constructiva empleada
- Maquinaria empleada para el proceso constructivo

2.3.3.1 Sellos Asfálticos Superficiales en Rutas No Pavimentadas

Vargas y Ulate (2018) explican la importancia del control del polvo en caminos no pavimentados para lo cual existe a nivel internacional literatura y normativa al respecto. Dado que, en Costa Rica aproximadamente un 70% de los caminos son caminos en lastre o tierra (considerando rutas cantonales o no pavimentadas), este se vuelve un tema relevante para las comunidades vecinas ya que además de ser un tema relacionado con la salud, también incide en la seguridad vial por la disminución en la visión sobre el camino.

Y es por esto que se debe tomar una adecuada decisión sobre el tipo de intervención a realizar en un camino no pavimentado con miras a controlar la contaminación por el polvo, se debe partir de dos aspectos fundamentales: definir el objetivo de la intervención y una vez definida, cuantificar la afectación debido al polvo, para elegir la técnica más adecuada para poder controlarlo. Este punto es muy importante pues además de la limitación de recursos disponibles, generalmente se trata de rutas con bajo tránsito y poca población, por lo que la inversión debe justificarse correctamente ante las autoridades competentes.

Una vez que se determina la afectación a un sitio, existen distintas técnicas para mitigar la emisión de polvo iniciando por la selección del uso del material correcto (capa granular de rodadura), la conformación de la calzada (bombeo suficiente) y la instalación de buenos drenajes (cunetas y pasos de alcantarilla suficientes). Si alguno de los anteriores elementos no se atiende existen otras medidas que pueden ser consideradas, pero serán menos efectivas de lo previsto. (Informe de Auditoría Técnica LM-INF-IC-D-004-2020, LanammeUCR).

2.3.4 Material Perfilado de Capas Asfálticas (RAP, por sus siglas en inglés)

El material reciclado de pavimentos asfálticos se obtiene cuando se remueve total o parcialmente una capa asfáltica para rehabilitaciones o reconstrucciones de rutas pavimentadas. Esta operación se lleva a cabo mediante el “perfilado” del pavimento, motivo por el cual al material removido generalmente también se le llama “perfilado”. La utilización de este material en caminos de lastre permite abaratar los costos de los proyectos viales, pues disminuye la compra de material granular virgen, además de que reduce la explotación de nuevas fuentes de agregados (Camacho, 2016).

En rutas en lastre, este material es utilizado para conformar una capa superficial de rodamiento como sustituto del agregado granular virgen donde se utiliza ligante asfáltico para estabilizar y proteger el material de perfilado colocado. De igual manera que en los tratamientos superficiales aplicados sobre capas de lastre, esta técnica no aporta capacidad estructural en sí, por lo que se debe garantizar que antes de colocar la capa se cuente con adecuadas condiciones para el tránsito que recibirá. Por otro lado, es valioso indicar que a pesar de que se está reutilizando un material reciclado, se debe caracterizar el material para poder realizar control de calidad del proceso constructivo.

Se considera que el uso del perfilado para las rutas de lastre es bueno porque se reutiliza ese material, pero el uso más valioso del material de perfilado es la elaboración de mezclas asfálticas con material reciclado de la conservación de la red vial pavimentada, lograr esta incorporación es una meta que debería buscarse en el corto plazo para mejorar la gestión de recursos y sostenibilidad de la industria.

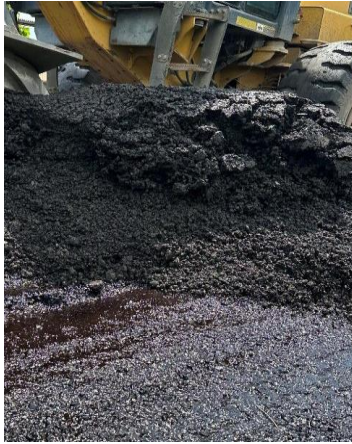


Figura 7. Ejemplo de RAP

Fuente: Tomado de registro fotográfico de la ruta nacional no. 746.

2.3.4.1 Uso de Material en Perfilado (RAP) en Caminos No Pavimentados

El RAP (Reclaimed Asphalt Pavement) es un material reciclado obtenido del fresado o escarificación de capas asfálticas existentes. Se compone principalmente de:

- Agregado pétreo (grueso y fino), previamente recubierto con ligante asfáltico.
- Ligante asfáltico envejecido, generalmente endurecido por oxidación.
- Posibles residuos finos, polvo de fresado, o contaminantes menores si no ha sido tratado adecuadamente.

En términos generales, el RAP puede contener entre un 85% y 95% de agregados pétreos reutilizables y entre un 5% y 10% de ligante residual.

2.3.4.2 Propiedades Técnicas del RAP

Las propiedades del RAP pueden variar según el origen del material, el tipo de mezcla original y el nivel de envejecimiento. Aun así, algunas características generales incluyen:

- Granulometría variable, dependiendo del tipo de fresado (perfilado fino o profundo).
- Contenido de ligante oxidado, que puede mejorar la cohesión inicial en capas no ligadas.
- Buena compactibilidad al ser reprocesado correctamente.
- Alta capacidad de drenaje en capas superiores cuando no se mezcla con finos plásticos.

2.3.4.3 Aplicación del RAP en Caminos No Pavimentados

En vías no pavimentadas, que presentan bajos niveles de tránsito, el RAP se puede usar de las siguientes maneras:

- Como capa de ruedo temporal (sin ligante nuevo).
- Estabilización de caminos de tierra mediante mezcla con material granular existente.
- Preparación para tratamientos superficiales (como lecho estabilizado).
- Capas de base o subbase mejoradas.

2.3.4.4 Ventajas del RAP

Económicas. El uso de RAP representa una alternativa altamente eficiente desde el punto de vista económico, ya que permite reutilizar materiales provenientes del fresado de pavimentos existentes, reduciendo de forma considerable los costos asociados a la compra, extracción y procesamiento de agregados vírgenes. Al ser un insumo disponible dentro de los propios proyectos de rehabilitación vial, disminuyen también los costos de acarreo y disposición final, lo que genera ahorros directos en las intervenciones viales. Asimismo, su utilización en rutas de bajo volumen contribuye a extender el periodo entre intervenciones de mantenimiento, lo que se traduce en menores gastos operativos para las instituciones responsables de la conservación.

2.3.4.5 Ambientales

Desde la perspectiva ambiental, el RAP constituye un material alineado con los principios de economía circular, pues reduce el volumen de residuos de construcción que de otra forma requerirían disposición en botaderos o rellenos. De igual manera, al aprovechar los agregados contenidos en el material fresado, se disminuye la demanda de recursos pétreos provenientes de canteras, lo que evita impactos negativos asociados a la actividad extractiva, como la alteración del paisaje, la generación de emisiones y el consumo de energía. Por lo tanto, su utilización contribuye a una gestión más sostenible de los recursos y a un menor impacto ambiental del sector infraestructura.

Logísticas. Una de las ventajas más relevantes del RAP es su aporte logístico, especialmente en zonas rurales o de difícil acceso, donde el transporte de materiales vírgenes suele implicar mayores costos y tiempos operativos. Al reutilizar material disponible dentro de la misma región o proveniente de proyectos cercanos, se reduce la necesidad de traslados de larga distancia, mejorando la eficiencia del proceso constructivo. Esto facilita la planificación de obras y permite atender de forma más rápida

segmentos críticos de la red vial, evitando interrupciones prolongadas en la transitabilidad y optimizando el uso de maquinaria y recursos institucionales.

Técnicas. Desde el punto de vista técnico, el RAP presenta un comportamiento favorable al ser utilizado como capa de rodamiento en rutas de bajo volumen de tránsito. Su composición incluye agregados seleccionados y una fracción de ligante asfáltico envejecido que favorece la compactación y estabilidad inicial del material cuando se coloca con el contenido de humedad adecuado. Además, al conformar una matriz más densa y uniforme que el lastre convencional, proporciona una superficie de rueda más estable, con menor generación de polvo y mejor resistencia al desgaste superficial. Estos atributos permiten que el RAP tenga un desempeño adecuado en escenarios operativos exigentes, especialmente en climas húmedos como los de muchas regiones del país.

2.3.5 Construcción de RAP

2.3.5.1 Etapas del proceso constructivo de RAP

2.3.5.1.2. Preparación de la superficie existente

- Se realiza una limpieza y nivelación previa del camino para eliminar polvo, vegetación y material suelto.
- Se corrigen depresiones o zonas blandas mediante perfilado o sustitución de material.
- Se aseguran las pendientes transversales adecuadas para el drenaje.

2.3.5.1.3. Procesamiento del RAP

- El RAP se tritura para obtener una granulometría controlada.
- En general, se busca un tamaño máximo de 19 mm o 25 mm, para que ocasione la fricción necesaria.
- Si proviene de fresado reciente, se puede usar directamente sin triturar adicionalmente.

2.3.5.1.4. Transporte y extendido

- El material se transporta al sitio y se extiende con motoniveladora o equipo similar.
- El espesor de colocación varía entre 5 y 15 cm, dependiendo del nivel de tránsito y condiciones de la subrasante.

- Se controla la humedad óptima antes de la compactación (si está muy seco, puede requerir ligera humectación).

2.3.5.1.5. Compactación

- Se realiza con rodillo liso vibratorio o neumático hasta alcanzar la densidad especificada.
- El ligante asfáltico residual en el RAP actúa como aglutinante parcial, generando una superficie más cohesiva y resistente al desprendimiento.
- Se debe evitar la sobrecompactación que puede causar agrietamiento superficial o exudación.

2.3.5.1.6. Acabado y perfilado final

- Se perfila nuevamente la superficie para garantizar la correcta pendiente transversal.
- Se revisan los bordes y cunetas para mantener un buen drenaje lateral.
- En algunos casos se aplica un supresor de polvo o una ligera niebla asfáltica para sellar la capa.

2.3.6. Aspectos técnicos de la intervención con material de perfilado RAP

El uso del material perfilado asfáltico (RAP) en la intervención de rutas no pavimentadas constituye una alternativa mayormente adaptada en proyectos de conservación vial en Costa Rica. Su aplicación en rutas secundarias y terciarias de la RVN ha demostrado ventajas significativas frente a otras técnicas convencionales con el empleo de materiales granulares.

Entre sus principales características se encuentra la presencia de agregados con una granulometría favorable y un ligante residual que aún en estado envejecido, contribuye a mejorar la cohesión del material. Estas propiedades permiten obtener capas de mayor capacidad estructural en comparación con el lastre natural, lo cual se traduce en una mejor resistencia al tránsito y en una disminución de la pérdida superficial de material.

El proceso constructivo para la colocación del RAP en rutas no pavimentadas sigue lineamientos básicos que incluyen la preparación adecuada de la subrasante, la distribución uniforme del material, el control de humedad, y la compactación mediante equipo pesado. De acuerdo con experiencias

locales, los espesores aplicados suelen oscilar entre 10 y 20 cm, lo que proporciona una base más estable y con mayor durabilidad. Asimismo, se ha documentado que la aplicación del RAP reduce considerablemente la generación de polvo y mitiga la formación de corrugaciones, factores que mejoran la seguridad y comodidad de los usuarios.

No obstante, es importante señalar que este material presenta ciertas limitaciones derivadas de su variabilidad en origen, la posible presencia de finos plásticos y la necesidad de asegurar un control riguroso durante la compactación. Estos aspectos técnicos condicionan el desempeño del RAP y refuerzan la necesidad de evaluaciones periódicas que permitan validar su comportamiento en campo.

2.3.7 Aspectos metodológicos de la evaluación con RAP

La evaluación del desempeño de rutas intervenidas con RAP debe abordarse desde una perspectiva funcional, estructural y operacional, con el fin de disponer de una visión integral de su comportamiento a lo largo del tiempo.

En el plano funcional, el Índice de Regularidad Internacional (IRI) constituye un indicador clave para determinar la calidad del servicio al usuario. La medición de la regularidad superficial permite comparar las condiciones de confort antes y después de la intervención, identificando la efectividad del RAP en la reducción de irregularidades. Adicionalmente, la inspección visual de la superficie resulta fundamental para detectar deterioros recurrentes como baches, corrugaciones, pérdida de material y generación de polvo.

Desde el punto de vista estructural, la capacidad portante del material RAP puede evaluarse mediante ensayos de deflexiones con equipos como el Falling Weight Deflectometer (FWD) o el Benkelman Beam, cuando las condiciones lo permiten. Estas pruebas ofrecen información relevante sobre la capacidad de soporte de la capa reciclada y de la subrasante, lo que permite estimar su vida útil en función de las cargas de tránsito proyectadas.

En cuanto al tránsito, resulta indispensable realizar conteos vehiculares y clasificaciones por tipo de eje, ya que el tráfico pesado es determinante en el deterioro de caminos intervenidos con RAP. La proyección de ejes equivalentes facilita el análisis comparativo de desempeño respecto a secciones tratadas con materiales convencionales.

La metodología de evaluación debe apoyarse en referencias técnicas como los manuales emitidos por el LanammeUCR para Costa Rica, las guías de la AASHTO y experiencias documentadas en otros países de América Latina. Estos lineamientos enfatizan la importancia de integrar indicadores de

desempeño, ciclos de mantenimiento y análisis de costos de conservación en la gestión de rutas no pavimentadas tratadas con RAP.

2.4 Evaluación Económica de Estrategias de Conservación Vial

La evaluación económica en la conservación vial es fundamental para optimizar la asignación de recursos limitados, garantizando la máxima vida útil y funcionalidad de la infraestructura vial al menor costo posible. Dicha evaluación permite comparar diferentes alternativas técnicas, priorizar intervenciones y justificar inversiones ante organismos financiadores.

Componentes Principales:

Componente	Descripción	Ejemplos / Alcance
Costos Directos	Gastos asociados de forma inmediata a la ejecución de una estrategia de mantenimiento o rehabilitación.	• Materiales • Mano de obra • Maquinaria • Supervisión • Administración
Costos Indirectos	Impactos que afectan a los usuarios y al entorno durante la ejecución o estado del proyecto.	• Aumento en tiempos de viaje • Incremento en costos de operación vehicular (combustible, desgaste) • Efectos socioeconómicos
Beneficios	Resultados positivos derivados de la intervención, tanto para los usuarios como para la infraestructura.	• Mejora en la seguridad vial • Reducción de costos de operación y mantenimiento futuro • Incremento en la capacidad y calidad del servicio

Tabla 6. Componentes principales Evaluación Económica.

Fuente: Elaboración propia, 2025.

Métodos de Evaluación Económica:

Método de Evaluación	Descripción	Indicadores / Enfoque
Análisis Costo-Beneficio (ACB)	Compara los costos totales de un proyecto con los beneficios esperados durante un horizonte temporal definido.	• Valor Presente Neto (VPN) • Tasa Interna de Retorno (TIR)
Análisis Costo-Efectividad (ACE)	Evalúa el costo por unidad de mejora para determinar la alternativa más eficiente desde el punto de vista técnico.	• Costo por punto de incremento de PCI • Otras métricas de desempeño técnico

Modelos de Optimización y Programación Lineal	Asignan presupuestos limitados a varias obras o segmentos buscando maximizar el beneficio global de conservación.	• Optimización de recursos • Selección de intervenciones bajo restricciones presupuestarias
---	---	--

Tabla 7. Métodos de Evaluación Económica.

Fuente: Elaboración propia, 2025.

2.4.1 Análisis Costo-Beneficio (ACB) en Conservación Vial

El Análisis Costo-Beneficio (ACB) es una herramienta económica que permite evaluar la conveniencia de un proyecto o intervención comparando los costos asociados frente a los beneficios esperados, ambos expresados en términos monetarios y calculados durante el ciclo de vida del proyecto. El objetivo es determinar si los beneficios justifican la inversión y seleccionar la alternativa más eficiente.

Componente	Descripción	Ejemplos
Costos	Desembolsos asociados a la ejecución, operación y mantenimiento del proyecto.	• Costos iniciales de construcción o rehabilitación. • Costos recurrentes de mantenimiento. • Costos indirectos (desvíos, interrupciones o impacto ambiental).
Beneficios	Ahorros y ganancias generados por la intervención.	• Reducción en costos de operación vehicular (combustible, desgaste). • Disminución de accidentes y costos asociados. • Ahorros en tiempo de viaje. • Prolongación de la vida útil del pavimento.

Tabla 8. Análisis costo beneficio (ACB)

Fuente: Elaboración propia, 2025.

2.5 Criterios de Priorización en el Mantenimiento y Conservación Vial

La conservación de la red vial es una actividad estratégica que debe sustentarse en una adecuada priorización de intervenciones, dado que los recursos disponibles suelen ser limitados frente a las crecientes demandas de movilidad. La priorización en mantenimiento vial permite asignar

eficientemente los recursos públicos, maximizando el rendimiento de las inversiones y prolongando la vida útil de la infraestructura.

2.5.1 Fundamentos de la Priorización Vial

Los criterios de priorización responden a una combinación de factores técnicos, económicos, sociales y ambientales. En términos generales, los elementos clave considerados para jerarquizar las intervenciones son:

- **Condición estructural y funcional del pavimento:** Se consideran indicadores como el Índice de Condición del Pavimento (PCI), el Índice de Serviciabilidad Presente (PSI), y resultados de auscultaciones con Deflectómetro de Impacto (FWD).
- **Volumen de tránsito:** Se priorizan rutas con mayor tránsito promedio diario anual (TPDA), especialmente si incluyen alto porcentaje de vehículos pesados.
- **Funcionalidad y jerarquía vial:** Las rutas nacionales primarias y secundarias tienen prioridad frente a terciarias; sin embargo, dentro de la red terciaria se consideran también rutas estratégicas para la conectividad rural o zonas productivas.
- **Costos y beneficios de la intervención:** Se utilizan herramientas como el análisis costo-beneficio o costo-efectividad, para determinar el retorno social de las inversiones.
- **Impacto socioeconómico:** Se incluyen criterios como acceso a servicios básicos, conectividad con centros de salud o educación, así como el papel de la vía en el desarrollo económico local.
- **Factores de riesgo o vulnerabilidad:** Se consideran aspectos como riesgo geotécnico, deslizamientos, escorrentía, zonas inundables, o historial de afectaciones por fenómenos naturales.

Modelos de Priorización usados internacionalmente

Varios países y organismos multilaterales han desarrollado modelos sistemáticos para la priorización vial. Algunos ejemplos incluyen:

- **HDM-4 (Highway Development and Management):** Modelo desarrollado por el Banco Mundial que simula el comportamiento del pavimento y evalúa políticas de mantenimiento. Permite establecer escenarios y jerarquizar en función de costo de ciclo de vida.

- **PMS (Pavement Management System):** Sistemas de gestión de pavimentos que integran datos técnicos y económicos para apoyar la toma de decisiones.
- **Modelos multicriterio (MCDM):** Utilizan metodologías como AHP o análisis de utilidad ponderada para integrar múltiples factores (técnicos, sociales y ambientales).

2.5.2 Aplicación en Costa Rica

En el caso costarricense, el CONAVI y el MOPT han desarrollado herramientas como el Sistema de Gestión de Pavimentos (SGP), que permite priorizar intervenciones con base en la condición física de las vías y el volumen de tránsito. Adicionalmente, los contratos de conservación por nivel de servicio (CREMA y GMA) establecen parámetros mínimos de calidad y estándares de desempeño, que orientan las decisiones de mantenimiento.

La Estrategia Nacional de Transporte y Logística y el Plan Nacional de Desarrollo de Infraestructura Vial han destacado la necesidad de priorizar las inversiones no sólo en función de la condición de las vías, sino también considerando el impacto socioeconómico territorial, especialmente en regiones con rezago.

2.5.3 Indicadores técnicos y económicos utilizados en Costa Rica para priorización vial

En Costa Rica, el proceso de toma de decisiones para la conservación de la red vial nacional está apoyado por una serie de indicadores cuantitativos que permiten jerarquizar las intervenciones de manera objetiva, bajo criterios de eficiencia, impacto y sostenibilidad. Estos indicadores son aplicados tanto por el Consejo Nacional de Vialidad (CONAVI) como por el Ministerio de Obras Públicas y Transportes (MOPT), en el marco de los programas de conservación por niveles de servicio.

Entre los principales indicadores se destacan:

Categoría	Indicador	Descripción y Aplicación
A) Indicadores Técnicos	Índice de Condición del Pavimento (PCI)	Califica el estado superficial de la vía en una escala de 0 a 100 y es clave para definir el tipo de intervención (rutinaria, periódica o rehabilitación).

	TPDA (Tránsito Promedio Diario Anual)	Registra el volumen de vehículos que circulan por una vía ² . Se pone especial atención a los vehículos pesados por su impacto en la degradación estructural.
	Índice de Serviciabilidad Presente (PSI)	Estima el nivel de confort ofrecido a los usuarios a partir de condiciones como rugosidad y deformaciones.
	Auscultaciones estructurales (FWD, LWD)	Se utilizan para determinar la capacidad estructural de la vía. Son datos esenciales para diferenciar entre necesidades de mantenimiento superficial o reconstrucción ⁶ .
	Clasificación funcional y tipo de vía	Prioriza rutas nacionales primarias o aquellas terciarias que conectan centros de producción, comercio o instituciones de servicios.
B) Indicadores Económicos y Sociales	Costo de intervención por kilómetro	Estima los costos de ejecución de diferentes técnicas de mantenimiento (sello asfáltico, estabilización con RAP, etc.) para determinar la viabilidad con respecto al presupuesto disponible.
	Análisis Costo-Beneficio (ACB)	Se utiliza para justificar intervenciones de mayor escala, incluyendo estimaciones de ahorro en costos de operación vehicular, tiempo de viaje y reducción de accidentes.
	Índice de Accesibilidad a Servicios	Evalúa la importancia social de una vía por su conexión con centros educativos, de salud o mercados regionales, relevante en zonas rurales.
	Impacto en el desarrollo económico local	Valora el papel de la vía en actividades agroindustriales, turísticas o comerciales, siendo clave en regiones como la Huetar Norte o la Chorotega.
C) Herramientas Institucionales	Sistema de Gestión de Pavimentos (SGP-CONAVI)	Permite recolectar, procesar y analizar datos de condición de la red vial nacional para la programación de intervenciones a corto, mediano y largo plazo.

	Sistema de Información Geográfica (SIG) del MOPT	Integrado con indicadores viales y de planificación territorial, apoya la visualización espacial de prioridades e identifica rutas críticas o corredores logísticos.
--	--	--

Tabla 9. Indicadores técnicos y económicos para priorización vial

Fuente: Elaboración propia, 2025.

2.6 Priorización Multianual

Comprende una programación para varios años, utilizando modelos de desempeño para establecer en qué momento se requiere una intervención en cada proyecto. Lo usual es programar para períodos de aproximadamente 10 años, revisando las curvas de deterioro en forma periódica (por ejemplo, cada año), de acuerdo con la realidad de la situación del pavimento. Para la priorización multianual se debe seguir el siguiente procedimiento:

Utilizar el método de análisis de costos por ciclo de vida, definiendo las opciones de rehabilitación más económicas para cada sección de pavimentos.

Para cada proyecto de mantenimiento, rehabilitación y reconstrucción se evalúa su beneficio, analizando el área entre las curvas de desempeño al aplicar la medida de mantenimiento, rehabilitación y reconstrucción, y no hacer nada al respecto. Dicha área puede ser afectada por el volumen de tránsito y la longitud de la sección.

Esta técnica provee la información necesaria para evaluar los impactos a largo del tiempo, y con esto varias estrategias de rehabilitación a través de la evaluación de los siguientes parámetros:

- El tiempo de las intervenciones de rehabilitación.
- Un análisis económico factible de las alternativas de mantenimiento y rehabilitación.
- La predicción del impacto en la red a lo largo del tiempo, para cada combinación de los proyectos sobre un período de análisis.

Se introduce la fórmula del beneficio del proyecto (B), en relación con el valor presente:

$$B_{\text{ajustado}} = B \cdot TPD \cdot \text{longitud} \cdot FC \quad (4)$$

Donde, B ajustado: beneficio relativo al proyecto (valor presente).

B: beneficio del proyecto, a partir de la diferencia entre las curvas de desempeño de la intervención y la de no hacer nada.

TPD: tránsito promedio diario

Longitud: extensión del pavimento

FC: factor de cuantificación del ahorro en los costos del usuario. Depende del tipo de pavimento, del tipo de proyecto y del tipo de usuario.

Continuando con el procedimiento de cálculo, se determina el costo presente neto (C).

- Calcular la razón beneficio-costos (B ajustado / C) para cada proyecto.
- Priorizar los proyectos con base en la mayor relación beneficio-costos.
- Seleccionar los proyectos con mayor razón beneficio-costos, hasta que se agota el presupuesto del período multianual.

2.7 Ranking de Intervenciones (RI)

Es una de las formas más simples de priorizar proyectos en la etapa del mantenimiento del pavimento y las necesidades de rehabilitación basadas en el juicio de ingeniería o una medida como parámetro de la condición. Cada año, los pavimentos se “ranquean” de acuerdo con el presupuesto disponible para su mantenimiento y rehabilitación en proyectos prioritarios. Al año siguiente, el proceso se repite. En otros casos, el “factor de ranqueo” actualmente puede ser medido por factores adicionales como lo son; la importancia para la Institución encargada, los niveles de tráfico en las vías, o su especificación en cuanto a la clasificación funcional. Existen otros casos en donde el ranqueo se refiere a un solo año de priorización (*single-year prioritization*). (Tomado de presentación Módulo 10, Priorización, clase de Maestría Rehabilitación y Mantenimiento de Carreteras, TEC 2021).

Los factores más comunes de criterio para ranqueo son los siguientes:

- Ranqueo por condición.
- Ranqueo por costo inicial
- Ranqueo por costo y tiempo de las intervenciones
- Ranqueo mediante el ciclo de vida del proyecto.
- Ranqueo por costo/beneficio

En la mayoría de los casos, la condición actual del pavimento, o los deterioros presentes en la condición más reciente, son utilizados como parámetro para identificar la factibilidad económica y

las estrategias de rehabilitación idóneas para cada sección del pavimento. Uno o dos tratamientos son identificados para cada posible nivel de condición y las condiciones actuales en campo, que logran hacer “*match*” con los tratamientos descritos por el encargado de su conservación. A cada tratamiento se le debe asignar una sección del pavimento, así como el costo del proyecto puede ser calculado con la prioridad más alta que se encuentre asociada a un determinado presupuesto disponible.

2.8 Criterios Ambientales en la Conservación Vial

La conservación vial no solo debe atender criterios técnicos y económicos, sino también ambientales, en especial cuando se trata de rutas que atraviesan zonas rurales, agrícolas o ambientalmente sensibles. La aplicación de criterios ambientales en el mantenimiento de carreteras permite reducir impactos negativos, optimizar el uso de recursos naturales y avanzar hacia una infraestructura vial más resiliente y sostenible.

Se deben tener las siguientes consideraciones ambientales con respecto al estado del tiempo durante la construcción de tratamientos superficiales (*TxDOT*, 2010):

No debe colocarse emulsión asfáltica bajo la lluvia y debe considerarse la suspensión temporal del proyecto si de acuerdo con los pronósticos meteorológicos se esperan periodos de precipitación en la zona. Si durante la construcción del tratamiento llueve repentinamente, debe apagarse inmediatamente el distribuidor de asfalto, y proceder con la colocación del agregado necesario para cubrir la emulsión, finalmente se debe compactar adecuadamente el área. Este tramo debe someterse a un periodo de observación durante la apertura inicial al tránsito, para valorar su comportamiento. El reinicio de las obras, luego de un periodo de precipitación, puede ocurrir hasta que la superficie este completamente seca. Los tratamientos superficiales deben colocarse a una temperatura ambiental superior a los 16 °C.

La implementación de estos en rutas no pavimentadas también tiene importantes implicaciones desde la perspectiva ambiental. Su aplicación, además de ser una estrategia técnica de conservación vial, contribuye positivamente en los siguientes aspectos:

2.8.1 Impacto ambiental asociado a las actividades de conservación

Las actividades de mantenimiento, aunque menos intensivas que la construcción nueva, pueden generar impactos ambientales relevantes:

- **Emisiones atmosféricas:** Las labores de perfilado, bacheo, aplicación de mezclas asfálticas y uso de maquinaria pesada generan emisiones de gases contaminantes (CO₂, NO_x, partículas), que contribuyen al cambio climático y afectan la calidad del aire local.
- **Contaminación por escorrentía:** El escurrimiento superficial durante y después de intervenciones puede arrastrar sedimentos, hidrocarburos o residuos asfálticos hacia cuerpos de agua, especialmente si no se cuenta con obras de drenaje adecuadas o control de sedimentos.
- **Manejo del polvo en vías no pavimentadas:** La generación de polvo es una de las principales fuentes de contaminación del aire en caminos rurales. Esto afecta la salud humana, cultivos cercanos y la visibilidad, además de incrementar el desgaste de componentes vehiculares.
- **Extracción y transporte de materiales vírgenes:** El uso de materiales pétreos de canteras o ríos implica consumo energético y presión sobre ecosistemas. Esto puede minimizarse mediante la reutilización de materiales reciclados como el RAP.

2.8.2 Medidas ambientales asociadas a la conservación vial

Para mitigar estos impactos, se aplican diversas prácticas y tecnologías:

- **Uso de materiales reciclados:** El material en perfilado (RAP) reduce la necesidad de material virgen, disminuye el transporte de agregados y permite conservar energía. Su aplicación en caminos no pavimentados con estabilizantes naturales o en frío tiene bajo impacto ambiental.
- **Aplicación de sellos antipolvo o estabilizantes naturales:** Se utilizan productos como lignina, cloruro de calcio o emulsiones asfálticas diluidas para el control del polvo, especialmente en zonas habitadas o agrícolas.
- **Buenas prácticas de maquinaria:** El mantenimiento de maquinaria reduce emisiones y derrames. Algunas regiones aplican restricciones horarias y especificaciones técnicas sobre equipos que pueden usarse.
- **Control de escorrentía:** Se promueve la construcción de cunetas, disipadores de energía, filtros naturales y otras obras menores para evitar erosión y contaminación.

2.8.3 Sistemas de priorización con enfoque ambiental

Aunque tradicionalmente los sistemas de priorización han estado centrados en aspectos físicos y económicos, algunos enfoques recientes incorporan variables ambientales:

- **Análisis Multicriterio Ambiental (AMC):** Permite asignar peso a variables como sensibilidad ecológica del entorno, riesgo de contaminación hídrica o generación de polvo. Puede combinarse con criterios técnicos mediante matrices ponderadas.
- **Indicadores de desempeño ambiental:** Se han empezado a incorporar en sistemas de conservación por niveles de servicio. Estos indicadores incluyen:
 - Reducción de generación de polvo ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
 - Disminución en el uso de materiales vírgenes (%)
 - Control de escorrentía y erosión (número de tramos con obras funcionales)
 - Cumplimiento de buenas prácticas ambientales en obra (%)

2.9 Políticas de mantenimiento vial e intervenciones en caminos no pavimentados

La gestión y conservación de la red vial, especialmente en los caminos no pavimentados, no solo depende de criterios técnicos y financieros, sino también del marco normativo, institucional y de las políticas públicas que guían las decisiones de inversión, priorización y mantenimiento.

En Costa Rica, el Ministerio de Obras Públicas y Transportes (MOPT), a través de sus subprocesos técnicos y programas como el PEMIST, define lineamientos para la gestión de rutas terciarias en coordinación con el Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales (LanammeUCR), el cual ha emitido múltiples auditorías técnicas y recomendaciones para optimizar el uso de recursos públicos bajo esa óptica.

2.9.1 Enfoques de intervención

Las políticas de intervención en caminos de lastre han evolucionado hacia un enfoque preventivo y sostenible, priorizando técnicas como las capas de protección sobre soluciones más costosas y estructurales, especialmente en zonas con bajo volumen de tránsito (TPD bajo o moderado). Este tipo de intervenciones permiten:

- Maximizar cobertura con presupuestos limitados, aplicando soluciones de bajo costo con alta eficiencia.
- Reducir la frecuencia de mantenimiento, lo cual libera recursos para otras rutas críticas.

- Consolidar la red terciaria, permitiendo mayor conectividad rural y acceso a servicios básicos.

2.9.2 Herramientas de gestión y planificación

Entre las herramientas utilizadas para apoyar estas políticas se encuentran:

- **Planes de Conservación Vial por Niveles de Servicio (PCVNS):** Propuestos por LanammeUCR como una alternativa a la gestión por cantidad de kilómetros intervenidos.
- **Sistemas de Información Geográfica (SIG):** Permiten visualizar, planificar y actualizar las intervenciones en tiempo real.
- **Matrices de priorización y metodologías de selección de proyectos:** Desarrolladas por la Secretaría de Planificación Sectorial (SPS-MOPT) y complementadas por auditorías técnicas del LanammeUCR.

2.10 Normativa técnica y regulatoria aplicable a la conservación de caminos no pavimentados en Costa Rica

El diseño, construcción y mantenimiento de caminos no pavimentados en Costa Rica se encuentra regulado por un conjunto de lineamientos técnicos, legales y metodológicos que establecen los criterios mínimos de intervención, priorización y fiscalización. Estas normativas buscan estandarizar prácticas, optimizar recursos públicos y asegurar condiciones de transitabilidad adecuadas para la red vial nacional y cantonal.

2.10.1 Ley General de Caminos Públicos (Ley No. 5060)

Esta ley establece la clasificación de la red vial nacional en sus distintos niveles: primaria, secundaria y terciaria. También define la responsabilidad del Estado sobre la construcción, conservación y financiamiento de las vías públicas. En el caso de los caminos no pavimentados, su conservación suele recaer en entes como el Consejo Nacional de Vialidad (CONAVI) y las Municipalidades (en el caso de la red cantonal).

2.10.2 Manual de Especificaciones Técnicas Generales para la Construcción de Carreteras y Puentes (CR-2020)

Este manual, elaborado por el MOPT y adoptado como referencia normativa nacional, contiene especificaciones para materiales, métodos constructivos y procedimientos de control de calidad.

Aunque está enfocado principalmente en infraestructura pavimentada, también incluye lineamientos generales para capas granulares, estabilización de suelos y aplicación de tratamientos superficiales.

Algunas secciones relevantes incluyen:

- Sección 300: Capas granulares (lastre y sub-base)
- Sección 400: Tratamientos superficiales (con emulsión asfáltica)
- Sección 900: Control de calidad y muestreo

2.10.3 Guías de diseño y conservación del LanammeUCR

El Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales (LanammeUCR), a través de su Programa de Infraestructura del Transporte (PITRA), ha desarrollado múltiples documentos técnicos que orientan a las instituciones responsables en la toma de decisiones. Algunos documentos relevantes son:

- **Publicación Especial: “Tratamientos Superficiales como Alternativa en Rutas de Lastre” (2017):** Detalla la metodología constructiva, selección de materiales, funciones de las emulsiones asfálticas y tipos de tratamientos recomendados para caminos de bajo volumen de tránsito.
- **Informe de Auditoría Técnica LM-INF-IC-D-004-2020:** Analiza la efectividad de tratamientos en caminos no pavimentados, señalando debilidades en la programación y ejecución a nivel nacional y municipal.
- **Manual para la aplicación del método PCI en rutas no pavimentadas (2021):** Adapta el método del índice de condición del pavimento (PCI) al contexto costarricense, brindando criterios objetivos para el diagnóstico de caminos en lastre.

2.10.4 Normas INTECO aplicables

El Instituto de Normas Técnicas de Costa Rica (INTECO) también ha desarrollado normativas aplicables a ensayos de materiales, control de calidad y criterios ambientales. Algunos ejemplos relevantes son:

- INTE/ISO 9001: Gestión de calidad en obras viales.
- INTE/ISO 14001: Gestión ambiental aplicada a proyectos de infraestructura.
- Normas ASTM e INTE C para caracterización de agregados, emulsiones y suelos.

Por lo tanto, el marco normativo costarricense establece una base técnica robusta para la conservación de caminos no pavimentados. Sin embargo, su aplicación efectiva depende de la articulación entre actores institucionales, disponibilidad de recursos y capacidades técnicas locales. La implementación

de capas de protección se inscribe dentro de este marco como una herramienta de bajo costo y alto impacto que debe cumplir con criterios técnicos definidos y estándares de calidad.

Norma / Documento	Institución	Aplicación Específica
Ley No. 5060 - Ley General de Caminos Públicos	Asamblea Legislativa / MOPT	Define clasificación vial y responsabilidades institucionales.
CR-2020 - Manual de Especificaciones Técnicas Generales para la Construcción de Carreteras y Puentes	MOPT / CONAVI	Establece especificaciones técnicas para capas granulares y tratamientos superficiales.
Publicación Especial: Tratamientos Superficiales como Alternativa en Rutas de Lastre (2017)	LanammeUCR (PITRA)	Describe tipos de tratamientos superficiales y lineamientos constructivos.
Informe de Auditoría Técnica LM-INF-IC-D-004-2020	LanammeUCR	Evalúa la gestión técnica de rutas no pavimentadas en la red nacional.
Manual para la aplicación del método PCI en rutas no pavimentadas (2021)	LanammeUCR	Establece metodología adaptada para diagnóstico técnico.
Decreto Ejecutivo N.º 40112-MOPT-H	MOPT / Ministerio de Hacienda	Regula la priorización de proyectos viales en la red cantonal con criterios técnicos y sociales.
INTE/ISO 9001 e INTE/ISO 14001	INTECO	Normas de gestión de calidad y ambiental en obras viales.
Normas INTE C y ASTM	INTECO / ASTM International	Criterios para agregados, emulsiones, suelos y control de calidad en laboratorio.

Tabla 10. Normativa técnica y regulatoria aplicable a la conservación de caminos no pavimentados en Costa Rica.

Fuente: Fundamentos de diseño estructural de pavimentos rígidos y flexibles, Primer Programa Vial Cantonal PRVC-I MOPT – BID, 2017.

CAPÍTULO 3: MARCO METODOLÓGICO

3.1 Tipo y enfoque de investigación

El objetivo principal de esta investigación es desarrollar un marco metodológico para la evaluación y optimización de estrategias de conservación vial en rutas nacionales no pavimentadas con capas de protección, considerando aspectos técnicos, económicos y ambientales, tomando como caso de estudio la Ruta Nacional Terciaria No. 746, ubicada en el cantón de San Carlos.

En cuanto a su naturaleza, la investigación se enmarca dentro de un diseño metodológico de tipo descriptivo, dado que se orienta a analizar, caracterizar y representar de forma sistemática las condiciones actuales y los procedimientos involucrados en el mantenimiento de estas rutas.

Según Campos Ocampo (2017), *"el objetivo de la investigación descriptiva radica en especificar las propiedades del objeto o fenómeno que se va a estudiar y dar un panorama lo más exacto posible de éste. Es necesario, por lo tanto, seleccionar los rasgos o conceptos del fenómeno y determinarlos cada uno de forma independiente, con gran precisión"*. En esta línea, se definen variables tales como el tipo de deterioro, su severidad y frecuencia, que serán abordadas técnica y objetivamente.

De forma complementaria, Dankhe (1986) indica que "los estudios descriptivos tienen como propósito describir o determinar cómo se manifiestan determinadas situaciones o eventos, y miden y evalúan diversos aspectos, dimensiones o componentes del fenómeno a investigar".

Respecto al enfoque metodológico, esta investigación adopta un enfoque mixto, ya que combina componentes cualitativos y cuantitativos que se articulan para lograr una comprensión integral del fenómeno.

El componente cualitativo se emplea principalmente en la revisión documental, en el análisis de guías técnicas, normativa nacional e internacional, así como en la interpretación de hallazgos de estudios previos relacionados con los tratamientos superficiales y el uso de materiales reciclados (como el RAP). También se aplica en la descripción contextual de la Ruta Nacional No. 746, considerando sus características en la parte de inventario, aspectos ambientales, y económicos enfocados en este tipo de técnicas.

El componente cuantitativo se aplica a través de la recolección de datos técnicos en campo, como el tipo, severidad y frecuencia de deterioros. Además, se utiliza en la evaluación de desempeño

funcional mediante el cálculo del Índice de Condición del Pavimento (PCI), empleando curvas de deducción que permiten obtener una calificación numérica del estado de la superficie vial. Asimismo, se incluyen herramientas cuantitativas para valorar el impacto económico y ambiental de las estrategias de conservación propuestas.

Ambos enfoques se integran de manera complementaria: el análisis cualitativo permite contextualizar y sustentar teóricamente las estrategias evaluadas, mientras que el análisis cuantitativo permite validarlas y compararlas objetivamente, proporcionando una base sólida para la priorización y toma de decisiones en conservación vial.

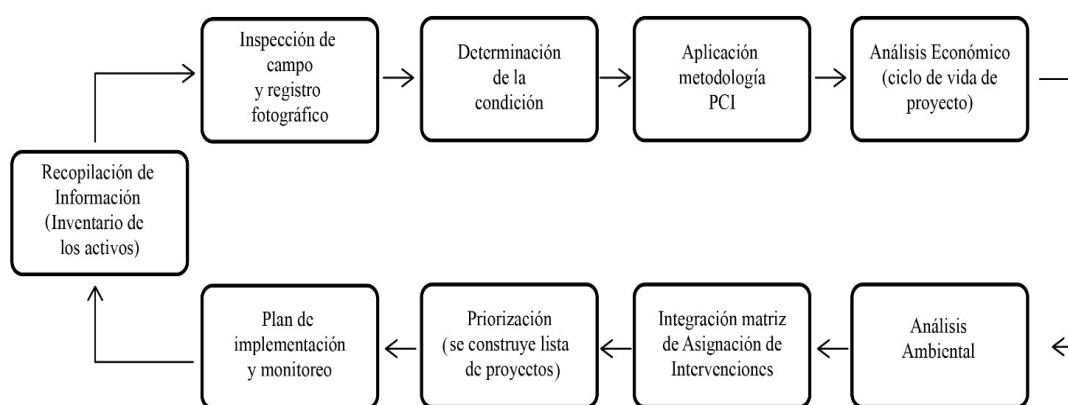


Figura 8. Diagrama de flujo de proceso metodológico

Fuente: Elaboración propia, 2025.

3.2 Fuentes y sujetos de información

3.2.1 Fuentes de información

La investigación se sustenta en una combinación de fuentes primarias y secundarias, con el objetivo de obtener una visión integral del estado actual de la infraestructura vial objeto de estudio y de los criterios técnicos utilizados en su conservación.

Entre las fuentes secundarias utilizadas se encuentran investigaciones técnicas, artículos especializados, informes institucionales y textos académicos de autores reconocidos en el ámbito de la conservación de superficies de rueda, particularmente en lo referente a la implementación de tratamientos superficiales.

Asimismo, se consultaron normas técnicas nacionales e internacionales, tales como:

- Especificaciones Generales para la Construcción de Carreteras del MOPT.
- Manual de Evaluación del Estado de las Carreteras con Base en el Índice PCI (LANAMME-UCR).
- Fundamentos de Diseño Estructural del PRVC-I, MOPT-BID (2017).
- Publicaciones del *Transportation Research Board* (TRB) sobre técnicas de mantenimiento en caminos no pavimentados.

Como fuente primaria, se incorporó información recopilada directamente en campo, incluyendo observaciones técnicas, mediciones básicas y un registro fotográfico georreferenciado, que permitió verificar el estado actual de los principales activos viales de la ruta.

3.2.2 Sujetos de información

Los sujetos de información fueron seleccionados con base en su rol técnico y administrativo en relación con la conservación y operación de la Red Vial Nacional, en particular de las rutas no pavimentadas bajo régimen de mantenimiento estatal. Para ello, se realizaron entrevistas semiestructuradas y reuniones técnicas orientadas a la recolección de criterios y experiencias aplicadas en el mantenimiento rutinario, periódico y correctivo de la vía en estudio.

Entre los actores clave consultados se encuentran:

- Ingenieros de la División de Obras Públicas del MOPT, Macro Región San Carlos.
- Administrador vial y personal técnico a cargo del mantenimiento de la Ruta Nacional Terciaria No. 746.

Estos aportes resultan fundamentales para comprender el contexto operativo, las restricciones presupuestarias, y los criterios técnicos actualmente empleados en la toma de decisiones sobre la conservación de este tipo de vía.

Diseño del instrumento de campo

Para la recolección de datos técnicos en campo, se diseñó una ficha de inspección visual estructurada, adaptada de los lineamientos del Manual PCI del LANAMME-UCR (2021). Esta ficha permitió registrar de forma sistemática los tipos de deterioro presentes más visibles y su severidad y frecuencia.

El protocolo de levantamiento incluyó las siguientes etapas:

- Segmentación de la vía: Se definieron unidades de muestreo de 100 m de longitud por 3 m de ancho (equivalentes a un carril estándar), siguiendo los criterios del método PCI. Estas unidades se seleccionaron de forma sistemática cada 500 m a lo largo de la sección intervenida de la Ruta Nacional No. 746.
- Aplicación en campo: En cada unidad se realizó un recorrido peatonal con apoyo de instrumental básico (cinta métrica, cámara digital), levantando información visual del deterioro y georreferenciando con odómetro vehicular las observaciones.
- Registro fotográfico y observaciones cualitativas: Se elaboró un registro fotográfico georreferenciado con anotaciones sobre condiciones especiales del terreno en puntos afectados.

3.3 Técnicas e Instrumentos de Investigación

La investigación se desarrollará mediante una revisión bibliográfica con metodologías empleadas en la construcción y mantenimiento de Capas de Protección Superficial (CPS), enfocándose en el análisis del mantenimiento preventivo y correctivo, así como en la periodicidad de las intervenciones necesarias para mantener un nivel de servicio adecuado en la ruta objeto de estudio.

Los datos e información obtenidos serán revisados y procesados mediante un análisis propio, orientado a generar un producto técnico con el objetivo de identificar y sustentar los principales retos, implicaciones y experiencias prácticas asociadas a la construcción y conservación de los caminos en lastre.

Dentro del alcance estadístico y técnico de la investigación, se incluirán datos básicos y característicos de la ruta, tales como:

- Tipo de vía.
- Longitudes de los tramos de carretera.
- Indicadores de deterioro observados en campo.
- Número de puentes presentes.
- Anchos de calzada y derechos de vía.
- Señalización vertical y demarcación horizontal.
- Deterioros presentes en la ruta.
- Otras características relevantes detectadas durante el recorrido y levantamiento de campo.

Criterios para la delimitación de las unidades de muestreo

Para la evaluación del estado de la vía, la ruta fue subdividida en unidades de muestreo donde el área de la unidad de muestreo debe estar en el rango de $225.0 + 90.0 \text{ m}^2$ (entre 135 y 315 m^2), siguiendo los criterios normativos establecidos en el Manual PCI del LANAMME-UCR y adaptados a las características específicas de la ruta.

Se seleccionaron un total de 16 unidades de muestreo lo que cumple con el número de unidades a inspeccionar distribuidas de manera uniforme a lo largo de la sección evaluada. Este criterio permitió obtener una cobertura adecuada para diagnosticar el estado real del pavimento y aplicar de manera consistente las curvas de deducción para el cálculo del Índice de Condición del Pavimento (PCI).

3.4 Procesamiento y Análisis de Datos

Para el procesamiento y análisis de los datos recolectados, se establecieron técnicas fundamentadas en la construcción y mantenimiento de Capas de Protección Superficial (CPS) en la Red Vial Nacional (RVN), con el objetivo de realizar un análisis que permita evaluar el estado de estas intervenciones sobre superficies en lastre.

En primer lugar, se aplicó el método del Índice de Condición del Pavimento (PCI) según el manual del LANAMME-UCR. El procedimiento incluyó las siguientes etapas:

1. Selección de las secciones de estudio: se dividió el tramo en unidades de muestreo homogéneas en cuanto a tránsito, geometría y características constructivas, siguiendo las recomendaciones de la ASTM D6433-20.
2. Registro y clasificación de deterioros: A partir de la inspección visual, se registraron los tipos de deterioro presentes en cada unidad de muestreo, así como su severidad y extensión.
3. Cálculo de valores deducidos: Utilizando las curvas de deducción propuestas por el manual PCI, se determinó el valor numérico correspondiente a cada tipo y grado de deterioro para cada unidad de muestreo.
4. Cálculo del PCI por unidad de muestreo: Se sumaron los valores deducidos para obtener una calificación única que refleja la condición general de la superficie vial en toda la sección de control de la ruta.

5. Interpretación de resultados: Los valores obtenidos se compararon con rangos estándar para clasificar el estado del pavimento en categorías tales como excelente, bueno, regular, malo o muy malo. Esto facilitó la identificación de acciones necesarias para su intervención.

Para el análisis y procesamiento de los datos, se empleó principalmente Microsoft Excel, donde se organizaron las tablas de datos, se aplicaron fórmulas para el cálculo del PCI que permiten visualizar el estado de los distintos segmentos de la ruta.

El análisis integrado de esta información permitió generar un diagnóstico técnico, que sustentó la priorización de las estrategias de conservación vial propuestas en el estudio, aportando criterios objetivos para optimizar la gestión del mantenimiento y preservación adecuada de toda la ruta.

CAPÍTULO 4: RESULTADOS Y ANÁLISIS

4.1 Diagnóstico del estado actual de la Ruta Nacional Terciaria No. 746

Para conocer el estado real de la Ruta Nacional Terciaria No. 746, se implementó un diagnóstico que combinó observación directa, mediciones de campo y registro fotográfico ubicado por estacionamiento. Este enfoque permitió identificar las condiciones existentes en términos geométricos y superficiales, proporcionando una base objetiva para evaluar la efectividad del tratamiento con material de perfilado asfáltico (RAP) que fue colocado.

4.1.1 Visitas de campo y registros fotográficos

En la ruta principalmente se identificó un deterioro superficial caracterizado por desprendimiento del material reciclado asfáltico (RAP), visible en zonas donde la capa de rodadura presenta pérdida de material y exposición del agregado fino y grueso. Este tipo de afectación indica un proceso de desintegración progresiva del ligante asfáltico, ocasionando una superficie irregular y con pérdida de textura funcional.

Las causas probables de este deterioro están asociadas a:

- Deficiencias en la compactación o en la homogeneidad del material RAP durante su colocación.
- Presencia de humedad persistente y drenaje lateral limitado, que debilitan la cohesión del material.
- Tránsito repetido de vehículos pesados en sectores angostos o de baja velocidad, lo que genera esfuerzos cortantes y desprendimiento por fatiga superficial.
- Envejecimiento del material bituminoso reciclado, especialmente en zonas con exposición directa a la radiación solar o con escasa protección superficial.

En términos funcionales, este deterioro reduce la uniformidad y la calidad de la superficie de rodadura, afectando la comodidad de los usuarios y favoreciendo la infiltración de agua hacia las capas inferiores, lo que puede acelerar la degradación estructural si no se atiende mediante un tratamiento de sellado o reposición localizada del material RAP.



Figura 9. Desprendimiento en aproximación de estructura de puente.

Fuente: Elaboración propia, 2024.

En la Ruta Nacional No. 746 se localiza una estructura de puente en el estacionamiento (4+800), donde se evidencia desgaste superficial y pérdida de continuidad entre el pavimento y la losa del puente, generando un escalón o diferencia de nivel en la junta de expansión, lo cual es muy notorio. Este tipo de deterioro es común en zonas de empalme entre estructuras rígidas y superficies flexibles o estabilizadas con RAP o que no cuentan con un buen mantenimiento periódico y no se atienden al momento oportuno donde inicia el desgaste en la junta.

Las causas probables son:

- Falta de tratamiento adecuado en la junta de expansión, lo que permite el ingreso de humedad y la pérdida progresiva del material.
- Diferencias de rigidez entre el puente (estructura de concreto) y el pavimento contiguo (material RAP o granular), que generan asentamientos diferenciales con el paso del tiempo.
- Ausencia de bordillos o confinamiento lateral, facilitando el desplazamiento del material reciclado en los bordes.
- Acción del tránsito pesado, que acentúa los impactos al ingresar o salir del puente, contribuyendo al deterioro localizado.

En términos funcionales, este deterioro afecta la comodidad y seguridad del usuario, además de favorecer la infiltración de agua hacia la base del pavimento, acelerando el deterioro del material adyacente.

Se recomienda realizar una reconfiguración del empalme, incorporando un sellado flexible, que reduzca los esfuerzos en la zona de unión y garantice una superficie de rodadura continua.



Figura 10. Deterioro en la junta de expansión de estructura de puente.

Fuente: Elaboración propia, 2024.



Figura 11. Detalle del deterioro en la junta de expansión del puente.

Fuente: Elaboración propia, 2024.

En otro tramo de la ruta se observa una alcantarilla de concreto parcialmente obstruida y con erosión evidente a su alrededor. La zona presenta acumulación de sedimentos, vegetación y residuos, lo que reduce la capacidad hidráulica de la estructura y favorece la saturación del terreno adyacente al borde del pavimento, lo cual puede ocasionar inconvenientes que se traducen en la superficie de rudo.

Las causas probables de este deterioro son:

- Deficiente limpieza y mantenimiento preventivo de las obras de drenaje, lo que ocasiona la obstrucción parcial del conducto.
- Sedimentación acumulada por arrastre superficial en eventos de lluvia intensa.

- Desgaste y crecimiento vegetal en los bordes de la tubería, que contribuyen al deterioro del concreto y a la pérdida de soporte lateral del pavimento.

El efecto funcional más relevante es la disminución de la eficiencia del drenaje, generando riesgo de infiltración de agua hacia la estructura del camino.

Se recomienda implementar un mantenimiento correctivo de limpieza, junto con la restitución del revestimiento hidráulico y la protección de la tubería, garantizando la estabilidad del borde del camino y el flujo adecuado del agua.



Figura 12. Tubería parcialmente obstruida (est 4+230).

Fuente: Tomado de informe de Obras Públicas Región San Carlos, 2024.

Cabezales de salida: Se ha evidenciado la colocación de pasos transversales de alcantarilla con ausencia de cabezales de salida y sin elementos de protección contra la erosión



Figura 13. Ausencia de cabezales en las alcantarillas (est 3+675).

Fuente: Elaboración propia, 2024.

A lo largo de varios tramos de la ruta se evidencia ausencia o deterioro de los sistemas de canalización superficial, particularmente en sectores donde el terreno presenta pendientes laterales y la escorrentía pluvial fluye directamente sobre la calzada. Esta condición genera riesgos tanto funcionales como de seguridad vial.

Desde el punto de vista técnico, la falta de cunetas o drenajes longitudinales definidos provoca:

- Concentración de escorrentías sobre la superficie de rodadura, acelerando el desgaste del material RAP y la pérdida de finos.
- Saturación de las capas de base y subrasante, lo que reduce su capacidad estructural y favorece asentamientos diferenciales.
- Erosión lateral y pérdida de borde de calzada, que comprometen el ancho útil de la vía y el espacio de circulación segura para los vehículos.



Figura 14. Ausencia de conformación de cunetas a lo largo de la ruta.

Fuente: Elaboración propia, 2024.

Desde el enfoque de la seguridad vial, se identificó la necesidad de colocación de señales verticales para mantener informados a los usuarios sobre las condiciones de la carretera, específicamente se ha señalado la importancia de la colocación de señales para indicar las prioridades de paso, velocidades reglamentarias, así como señales tipo “chevron”.

En la estructura del puente se observa un poste de señalización vertical dañado y la ausencia de demarcación visible, así como una baranda metálica deteriorada y deformada. Además, se identificó una señal vertical mal ubicada, colocada directamente sobre el suelo. Estas condiciones representan un riesgo potencial para los usuarios, especialmente durante la noche o en condiciones de lluvia, debido a la reducción en la visibilidad y la adecuada percepción del borde del camino. Los principales aspectos de seguridad afectados son:

- Deficiente visibilidad lateral del borde del puente, lo que incrementa el riesgo de salida de la vía.
- Falta de señalización retrorreflectiva, lo que dificulta la percepción del obstáculo y la alineación del camino.
- Ausencia de elementos de advertencia previos al ingreso del puente, como señales de “reducción de calzada” o “precaución de puente angosto de un solo carril”.

Se recomienda la reposición inmediata del dispositivo de señalización vertical, utilizando material retrorreflectivo, y la reparación o sustitución de las barandas metálicas donde se requiera. Además, es conveniente reforzar la señalización preventiva en los accesos de aproximación a la estructura de puente y así alertar a los conductores sobre la condición angosta y la posible reducción de velocidad requerida.



Figura 15. Ausencia de elementos de barandas y visibilidad en los accesos de aproximación al puente. (est 4+800).

Fuente: Elaboración propia, 2024.



Figura 16. Falta de mantenimiento en señales verticales sobre el recorrido de la ruta..

Fuente: Elaboración propia, 2024.

La siguiente imagen muestra un tramo con buenas condiciones de visibilidad diurna, favorecidas por una geometría recta y la ausencia de obstáculos visuales inmediatos. No obstante, se evidencia la falta de demarcación horizontal (líneas de borde y eje central) y la inexistencia de alumbrado público, factores que incrementan el riesgo durante la conducción nocturna, especialmente bajo lluvia o presencia de neblina.

La carencia de referencias visuales en el pavimento puede inducir a la pérdida del alineamiento direccional y comprometer la seguridad de los usuarios, principalmente en estas rutas rurales de bajo tránsito y con usuarios vulnerables como ciclistas, que utilizan la bicicleta para ir todos los días a su trabajo. También se observa la presencia de niños que transitan hacia sus escuelas por el borde de la carretera, debido a la ausencia de aceras peatonales.



Figura 17. Ausencia de demarcación horizontal sobre la ruta.

Fuente: Elaboración propia, 2024.

En la siguiente fotografía se muestra el mismo caso, tramo de carretera sin ningún tipo de señalización preventiva para límite de velocidad o con demarcación horizontal nula.



Figura 18. Ausencia de demarcación horizontal o límites de velocidad.

Fuente: Elaboración propia, 2024.

4.1.2 Evaluación de condiciones geométricas

Se revisó aspectos generales geométricos relevantes para la seguridad y operatividad de la ruta, incluyendo ancho efectivo de calzada y anchos de derecho de vía. No se cuenta con espaldón ni aceras a los lados lo que disminuye el margen en cuanto a seguridad vial se refiere.

4.1.2.1 Radio mínimo

Para carreteras en lastre o que han pasado a una condición mejorada, el radio mínimo recomendado es de 30 metros, considerando una velocidad de diseño de 30 km/h, un peralte máximo de 4% y un coeficiente de fricción de 0,17.

4.1.2.2 Pendiente Transversal

La pendiente transversal es un elemento clave para garantizar un drenaje eficiente y mantener condiciones adecuadas de seguridad vial. En carreteras en lastre o mejoradas, como la Ruta No. 746, se recomiendan los siguientes valores:

- Pendiente transversal mínima: 2%, necesaria para asegurar el escurrimiento del agua y evitar encharcamientos.
- Pendiente transversal máxima: 6%, con el fin de prevenir deslizamientos del material y mantener la estabilidad de la plataforma.

Para carreteras terciarias, en lastre o de bajo volumen de tránsito características que presenta la Ruta No. 746, se aceptan valores entre 8% y 10%, especialmente en zonas rurales o con limitaciones topográficas. No obstante, se procura evitar pendientes superiores a este rango, ya que pueden favorecer procesos erosivos, dificultar el tránsito de vehículos pesados y aumentar el riesgo de accidentes, particularmente durante eventos de lluvia.

En el caso específico de dicha ruta, en donde algunos tramos presentan pendientes variables, el cumplimiento de estos rangos resulta fundamental para facilitar el mantenimiento del material colocado y así reducir la velocidad de la escorrentía y minimizar la formación de baches y deformaciones.

Seguidamente se presenta un cuadro resumen con los parámetros y valores mínimos recomendados en rutas no pavimentadas o mejoradas, ajustados al contexto particular de la Ruta No. 746, considerando su condición de vía rural y de bajo volumen de tránsito.

Parámetro	Valores mínimos recomendados	Comentario aplicado a la Ruta 746
Velocidad de diseño	30–40 km/h	Coherente con su condición de ruta terciaria, con tramos sinuosos y visibilidad limitada en sectores.
Radio mínimo de curva (Rmin)	30 m	Considera peralte máximo de 4%, fricción 0.17 y velocidad de 30 km/h; adecuado para curvas cerradas presentes en la Ruta 746.
Pendiente longitudinal máxima	8–10%	Controla erosión del lastre y facilita el tránsito de vehículos pesados, especialmente en secciones montañosas de la 746.
Pendiente longitudinal mínima	0.5–1%	Asegura drenaje superficial en zonas planas o con poca inclinación dentro de la vía.
Pendiente transversal (peralte)	2–6%	El 2% garantiza drenaje mínimo y 6% limita inestabilidad del material en curvas.

Peralte máximo recomendado en curvas	Máx. 4%	Ayuda a contrarrestar fuerza centrífuga en curvas horizontales estrechas de la 746.
Visibilidad mínima	50–70 m en curvas y cambios de rasante	Necesaria para permitir distancia de detención segura, considerando presencia de niebla y lluvia frecuentes en la zona.
Seguridad vial	Señalización, mantenimiento del lastre, control de vegetación, limpieza de drenajes	Aspectos críticos en sectores con curvas cerradas y pendientes pronunciadas a lo largo de la Ruta 746.

Tabla 11. Parámetros y valores mínimos en la Ruta Nacional No. 746

Fuente: Elaboración propia, 2025

4.1.3 Inventario de activos viales de la Ruta No. 746

La Ruta Nacional No. 746 presenta activos viales básicos que permiten su funcionamiento, tales como la calzada conformada en material RAP y algunas obras de drenaje transversal como alcantarillas. Sin embargo, se evidencia la ausencia de cunetas en la mayor parte del recorrido, una señalización deficiente y la inexistencia de elementos de contención formales, condiciones que limitan el adecuado nivel de servicio y la seguridad de los usuarios.

El análisis de estos activos resulta fundamental para evaluar el desempeño global de la vía, especialmente considerando que la superficie está conformada por material de RAP, cuya durabilidad depende en gran medida del adecuado funcionamiento de los sistemas de drenaje y del mantenimiento de la señalización. La revisión de su estado permite orientar las acciones de conservación y asegurar la sostenibilidad operativa de la ruta dentro de la red vial nacional.

Inventario Activos Viales Ruta Nacional Terciaria No. 746						
ID	Tipo	Estacionamiento	Longitud (m)	Cantidad	Ancho (m)	Material
1	Paso de alcantarilla	0+250	11,00	3,00	1,20/0,70/0,70	Concreto
2	Puente Quebrada Sahino	0+500	12,00	1,00	3,90	Vigas de acero y losa de concreto
3	Paso de alcantarilla	0+725	10,00	1,00	0,40	Concreto
4	Paso de alcantarilla	1+115	11,00	1,00	1,50	Concreto

5	Paso de alcantarilla	1+625	10,50	1,00	0,80	Concreto
6	Paso de alcantarilla	1+715	11,00	1,00	0,80	Concreto
7	Paso de alcantarilla	2+000	9,00	3,00	0,90/0,90/0,90	Concreto
8	Paso de alcantarilla	2+200	10,00	2,00	0,90/0,90	Concreto
9	Paso de alcantarilla	2+675	12,50	1,00	1,50	Concreto
10	Paso de alcantarilla	3+425	9,50	1,00	0,70	Concreto
11	Paso de alcantarilla	3+675	10,00	1,00	0,70	Concreto
12	Paso de alcantarilla	3+750	10,00	1,00	No se pudo verificar por las condiciones del sitio	No se pudo verificar por las condiciones del sitio
13	Paso de alcantarilla	3+980	9,50	1,00	No se pudo verificar por las condiciones del sitio	No se pudo verificar por las condiciones del sitio
14	Paso de alcantarilla	4+230	12,00	1,00	0,80	Concreto
15	Paso de alcantarilla	4+585	10,50	1,00	0,70	Concreto
16	Puente Quebrada Gavilán	4+800	15,20	1,00	3,90	Vigas de acero y losa de concreto

Tabla 12. Activos Viales de la Ruta Nacional Terciaria No. 746.

Fuente: Administrador Vial, Zona de Conservación 6-1.

4.1.4 Identificación de deterioros superficiales

Se catalogó los principales defectos visibles en la superficie de la vía, clasificándolos según tipo y severidad, siguiendo criterios adaptados del método PCI. Entre los deterioros más frecuentes se encontraron: baches puntuales, agrietamiento longitudinal y transversal, pérdida de material por erosión y desprendimiento de partículas finas del RAP. Esta información permite priorizar las acciones de mantenimiento y evaluar la efectividad del material colocado.

4.1.5 Determinación del Índice de Condición Superficial (PCI)

El Índice de Condición Superficial (PCI, por sus siglas en inglés) da una idea general de la condición de la estructura de pavimento, pues permite determinar, de acuerdo con los deterioros presentes en la

carpeta las posibles causas del daño. Este índice se define y calcula de acuerdo con la metodología ASTM D6433 y varía de 0-100, donde 0 es la peor condición y 100 la mejor.

4.1.5.1 Análisis de Longitud de Unidad de Muestreo

La longitud de la unidad de muestreo (UM) dependerá del ancho de calzada en el caso de pavimentos flexibles. El rango de valores que se definió para determinar la longitud de las unidades de muestra, es necesario, pues la metodología del PCI establece estos valores en sus curvas de deterioro para el cálculo de los “Valores Deducidos”.

El área de la unidad de muestreo debe estar en el rango de $225.0 + 90.0 \text{ m}^2$ (entre 135 y 315 m^2). Al respecto se indica la relación longitud - ancho de calzada, que satisfacen dicha área:

Ancho de calzada (m) Longitud de UM (m):

3,5 - 6,5	47
4,0 - 7,5	42
4,5 - 8,5	38
5,0 - 9,0	35
5,5 - 10	Máx 31

Tabla 13. Longitud de la Unidad de Muestreo.

Fuente: Tomado de norma ASTM-D6433.

Se recomienda utilizar la Unidad de Muestreo de menor longitud posible. Si el ancho de la calzada promedio de la ruta es mayor que los valores mostrados en la tabla anterior, se deberá dividir en dos, para que se cumpla con un área de $225 + 90 \text{ m}^2$ y la longitud mínima de 31 m, en cuyo caso será necesario realizar dos análisis independientes. Para nuestro caso solo se realiza uno.

Cálculo del número total de Unidades de Muestreo (N)

Para calcular el número total de UM presentes en la sección de carretera a evaluar, se debe resolver la siguiente ecuación:

$$N = \text{Long proy} / \text{Long UM} \quad (5)$$

Donde,

N: Número total de unidades de muestreo en la sección de pavimento.

Long Proy: la longitud total del proyecto por evaluar (m).

Long UM: la longitud de la unidad de muestra seleccionada

4.1.5.2 Cálculo del Mínimo de Unidades a Evaluar (n).

Se recomienda seleccionar un número mínimo de unidades de muestreo. Para ello se debe aplicar la siguiente ecuación la cual produce un estimado del PCI ± 5 del promedio verdadero con confiabilidad del 95%.

$$n = \frac{Nx\sigma^2}{\frac{e^2}{4} \times (N-1) + \sigma^2} \quad (6)$$

Donde:

n: Número mínimo de unidades de muestreo a evaluar.

N: Número total de unidades de muestreo en la sección del pavimento.

e: Error admisible en el estimativo del PCI de la sección ($e = 5\%$). (Este valor debe ser anotado en la ecuación como 5 y no como 5%)

σ : Desviación estándar del PCI entre las unidades.

Durante la inspección inicial, y dado que la Ruta 746 cuenta con una superficie en material RAP y no con un pavimento flexible convencional, se adopta de forma referencial una desviación estándar inicial (σ_i) de 10, tal como recomienda la metodología PCI para superficies no pavimentadas o tratadas. En inspecciones subsecuentes, la desviación estándar real o el rango PCI obtenido en la evaluación previa se utilizará para determinar el número mínimo de unidades a inspeccionar, garantizando un nivel de confiabilidad del 95% en los resultados.

4.1.5.3 Selección de las Unidades de Muestreo para Inspección

Se considera:

Si $n < 5$, se deberán evaluar todas las unidades.

Si $N > 10$, se deberán crear x cantidad de tramos con valores de N igual o mayor que 100, en donde, para cada tramo se asignará un $N_1, N_2, \dots, N_x$. Además, para cada tramo se deberá calcular el número mínimo de unidades a evaluar, $n_1, n_2, \dots, n_x$.

4.1.5.4 Intervalo de Muestreo

El intervalo de muestreo calcula el número de UM que indica la separación que debe existir entre las unidades que se van a inspeccionar y las que no. Su valor se calcula de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$i = (N/n): \quad (7)$$

Donde;

N: Número total de unidades de muestreo de la sección del pavimento.

n: Número mínimo de unidades de muestreo a evaluar.

i: Intervalo de muestreo, se redondea al número entero inferior.

Para nuestro caso se toman en cuenta los datos de la Ruta Nacional Terciaria No. 746 con una longitud total del camino: 4,900 km. (4900 m). El ancho promedio de la superficie de rueda corresponde a 6,50 m.

Como el ancho promedio de la calzada es de 6,50 m, se escoge el tamaño estipulado en la (tabla 9) dado con el criterio. Se realiza el cálculo del número de unidades de muestreo como se indica en la siguiente formula:

$$N = 4900 / 31 = 158,06$$

Para el número mínimo de unidades de muestreo,

$$n = \frac{Nx\sigma^2}{\frac{e^2}{4} \times (N-1) + \sigma^2} \quad (8)$$

$$n = 14,61 \text{ (redondeo} = 15)$$

Intervalo de muestreo: seguidamente es necesario calcular el intervalo de muestreo (i):

$$i = 158,06/15 = 10,53 \text{ se redondea a } 10. \quad (9)$$

Selección de las Unidades de muestreo: se selecciona un valor entre 1 e i ($i=10$), para lo cual se puede escoger en este caso (S) igual a 10.

Para obtener la totalidad de UM a inspeccionar se realiza el siguiente cálculo:

$$UM1 = S = UM1 = 10$$

$$UM2 = UM1 + i = 10 + 10 = 20$$

$$UM3 = UM2 + i = 20 + 10 = 30$$

$$UM4 = UM3 + i = 30 + 10 = 40$$

$$UM5 = UM4 + i = 40 + 10 = 50$$

$$UM6 = UM5 + i = 50 + 10 = 60$$

$$UM7 = UM6 + i = 60 + 10 = 70$$

$$UM8 = UM7 + i = 70 + 10 = 80$$

$$UM9 = UM8 + i = 80 + 10 = 90$$

$$UM10 = UM9 + i = 90 + 10 = 100$$

$$UM11 = UM10 + i = 100 + 10 = 110$$

$$UM12 = UM11 + i = 110 + 10 = 120$$

$$UM13 = UM12 + i = 120 + 10 = 130$$

$$UM14 = UM13 + i = 130 + 10 = 140$$

$$UM15 = UM14 + i = 140 + 10 = 150$$

$$UM16 = UM15 + i = 150 + 10 = 160 \text{ (se detiene el proceso en la UM)}$$

Se obtienen 16 unidades de muestra lo que cumple con el número de unidades a inspeccionar.

4.2 Deterioros más importantes de la ruta recorrida

4.2.1 Huecos (*Potholes*)

En la evaluación de la Ruta Nacional Terciaria No. 746 se identificó una cantidad de huecos de diferentes tamaños en la superficie del pavimento, caracterizados por su forma cóncava y bordes

afilados. La dimensión mínima de estos huecos en planta es de 150 mm. Los principales factores que contribuyen a su formación incluyen fundaciones y capas inferiores inestables, espesores insuficientes, defectos constructivos, acumulación de agua en zonas hundidas o fisuradas, así como la acción abrasiva del tránsito sobre sectores localizados de mayor debilidad del pavimento o sobre áreas donde se han desarrollado fisuras tipo “cuero de lagarto” con un nivel medio de severidad. Para la clasificación de estos deterioros se consideran criterios de severidad basados en la profundidad: baja (menos de 25 mm), media (25 a 50 mm), y alta (mayor a 50 mm), siendo la medición realizada por unidad de hueco.

Medición del deterioro: Por unidad.

Severidad encontrada: En el tramo evaluado se identificaron huecos con severidad moderada, localizados principalmente en la parte final del recorrido, cerca del inicio del Puente sobre la Quebrada Sahíno. Estos huecos presentan formas cóncavas de diversos tamaños, alcanzando profundidades entre 50 y 60 mm. Las dimensiones máximas observadas corresponden a áreas de 0,84 m² y 0,77 m², sumando un total afectado de 1,61 m².

Hueco	Longitud (m)	Ancho (m)	Área (m ²)	Profundidad (m)
1	0,90	0,85	0,77	0,050
2	1,40	0,60	0,84	0,060
Total	-	-	1,61	-

Tabla 14. Severidad obtenida en campo para Huecos.

Fuente: Elaboración propia, 2024.

Extensión: se toma en cuenta el siguiente procedimiento de acuerdo con su respectiva severidad, para obtención del PCI.

Profundidad máxima (cm)	2 unidades / Diámetro promedio del hueco (cm)		
	Menor a 70	70-100	Mayor a 100
< 2,5	B	B	M
De 2,5 a 5,0	B	M (severidad obtenida)	A
Mayores a 5,0	M	M	A

Tabla 15. Severidad establecida para Huecos.

Fuente: Tomado de la norma ASTM-D6433.



Figura 19. Huecos en la Ruta Nacional No. 746, estacionamiento (0+500).

Fuente: Elaboración propia, 2024.



Figura 20. Huecos en la entrada de la estructura de Puente Quebrada Sahíno, estacionamiento (0+500).

Fuente: Elaboración propia, 2024.

4.2.2 Agrietamiento Transversal (*Transversal cracking*)

En el tramo evaluado de la Ruta Nacional Terciaria No. 746 se identificó algunos agrietamientos transversales al eje del pavimento, localizados principalmente al inicio y a la mitad del recorrido. Estas fisuras, con un ancho máximo de 0,8 mm, fueron clasificadas con severidad moderada. Las causas principales de este tipo de deterioro incluyen la reflexión de grietas preexistentes en capas inferiores del pavimento, endurecimiento por envejecimiento, drenaje inadecuado y juntas de construcción mal ejecutadas. La ubicación dentro del carril es relevante, ya que determina el impacto sobre la zona de huella y la seguridad del tránsito. Para la clasificación de severidad se consideran criterios basados en el ancho de la grieta y la presencia de ramificaciones, estableciéndose rangos de baja, media y alta severidad según estas características.

Medición del deterioro: En metros lineales (m).

Severidad encontrada: Para la clasificación de severidad se consideran criterios basados en el ancho de la grieta y la presencia de ramificaciones, estableciéndose rangos de baja, media y alta severidad según estas características. Para nuestro caso la severidad encontrada es media.

Extensión: se toma en cuenta el siguiente procedimiento de acuerdo con la severidad encontrada.

Grieta	Longitud (m)	Sellador	En huella
1	3,5	No	Si
2	2,1	No	Si
3	1,7	No	Si
Total	7,3	-	-

Tabla 16. Severidad obtenida en campo para agrietamiento transversal.

Fuente: Tomado de la norma ASTM-D6433.



Figura 21. Agrietamiento transversal presente en la ruta, estacionamiento (4+800).

Fuente: Elaboración propia, 2024.

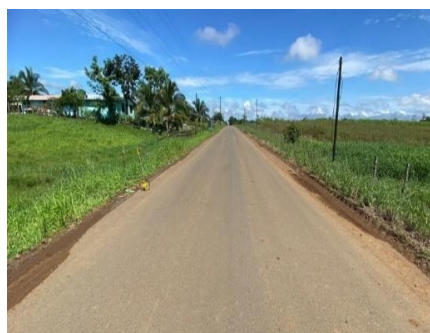


Figura 22. Vista general de agrietamiento transversal en la ruta.

Fuente: Elaboración propia, 2024.

4.2.3 Agrietamiento de borde (*Edge cracking*)

En la Ruta Nacional Terciaria No. 746 se observó agrietamientos de borde, presentes principalmente en los tramos adyacentes a los espaldones no pavimentados, dentro de los 0,6 m del borde del pavimento. Estas grietas, de forma semicircular, se producen por el debilitamiento de los bordes debido a condiciones climáticas, menor confinamiento lateral, compactación deficiente, fallas en los rellenos y la acción de las cargas de tránsito. La severidad se clasificó como moderada, considerando la presencia de pequeñas rupturas y pérdida limitada de material, afectando hasta un 10 % de la longitud del borde del pavimento. Este tipo de deterioro es relevante, ya que compromete la integridad lateral de la calzada y puede favorecer la progresión de otros daños en la superficie.

Medición del deterioro: En metros lineales (m).

Severidad encontrada: En el tramo evaluado de la Ruta Nacional Terciaria No. 746, se identificó agrietamientos de borde con severidad alta, distribuidos en varios sectores del recorrido. Estas grietas presentan excesivas quebraduras del pavimento y pérdida de material superior al 10 % de la longitud del tramo afectado, lo que indica un deterioro avanzado que requiere atención prioritaria para evitar la progresión hacia fallas estructurales más graves.

Extensión: Se cuenta con la siguiente información longitudinal en cuanto a grietas de borde.

Grieta	Longitud (m)	Sellado
1	8,0	No
2	4,9	No
3	6,5	No
4	4.8	No
Total	24,2	-

Tabla 17. Severidad obtenida para agrietamiento de borde.

Fuente: Tomado de la norma ASTM-D6433.



Figura 23. Agrietamiento de borde. Estacionamiento (0+145).

Fuente: Elaboración propia, 2024.



Figura 24 y 25. Agrietamiento de borde presente en la ruta, estacionamiento (0+800); y estacionamiento (1+250) respectivamente.

Fuente: Elaboración propia, 2024.

4.2.4 Desprendimiento (*Raveling*)

En el tramo evaluado de la Ruta Nacional Terciaria No. 746 se observó desprendimiento de la superficie del pavimento, caracterizado por la pérdida progresiva de partículas de agregado y del ligante asfáltico, generando una textura irregular y áspera. Este deterioro puede variar desde la exposición parcial de finos hasta la pérdida de agregados gruesos en sectores localizados. Las causas identificadas incluyen colocación irregular del material, uso de agregado con impurezas o polvo adherido, tránsito de vehículos pesados, ablandamiento de la superficie y derrames de aceites que afectan la adhesión del ligante. La severidad se clasifica en baja, media y alta según la cantidad de agregados desprendidos y el grado de exposición de la superficie; en este tramo se observa un desgaste

moderado que indica pérdida considerable de agregados sin llegar a desprendimiento total, lo cual requiere mantenimiento preventivo para evitar progresión a deterioro severo.

Medición del deterioro: En metros cuadrados (m²).

Severidad encontrada: se identificó algunos desprendimientos de la superficie del pavimento con severidad moderada, localizados en ciertos sectores del recorrido. En estas áreas se ha producido la pérdida de agregados y parte del ligante, generando una superficie moderadamente rugosa y ahuecada.

Extensión: se toma en cuenta el siguiente procedimiento de acuerdo con la severidad encontrada.

Desprendimiento	Longitud aproximada (m)	Ancho aproximado (m)	Área (m ²)
1	1,20	1,10	1,32
2	2,50	2,0	5,00
3	5,0	4,5	22,50
Total	-	-	28,82

Tabla 18. Severidad obtenida de levantamiento en campo.

Fuente: Tomado de la norma ASTM-D6433

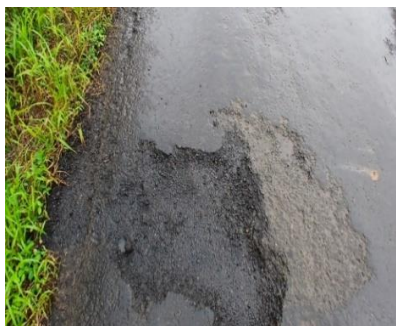


Figura 26. Desprendimiento obtenido en campo, estacionamiento (0+110).

Fuente: Elaboración propia, 2024.



Figura 27 y 28. Desprendimiento en la ruta, estacionamiento (3+360); y estacionamiento (3+900) respectivamente.

Fuente: Elaboración propia, 2024.

4.3 Cálculo de PCI de las Unidades de Muestreo seleccionadas

Una vez efectuadas las inspecciones de campo y con la información recolectada y procesada, se procede a realizar el cálculo del PCI para cada Unidad de Muestreo (UM). El cálculo se basa en los “Valores Deducidos” de cada daño de acuerdo con la cantidad medida y la severidad reportada.

Los Valores Deducidos se entienden como un rango de valores de 1-100 que castigan un tipo de deterioro superficial, estos valores se obtienen de las gráficas de la norma ASTM D-6433, creadas para el cálculo de PCI.

Unidad de muestra	Área de la UM	Deterioros auscultados	Severidad	Medida	Densidad	Valor Deducido
1						

Tabla 19. Orden establecido de los datos obtenidos en el levantamiento de campo.

Fuente: Elaboración propia, 2025.

Seguidamente se ingresó los datos obtenidos en campo para las correspondientes Unidades de Muestreo seleccionadas, y se obtienen los siguientes resultados:

Unidad de Muestra	Área de la UM	Deterioros auscultados	Severidad	Medida	Densidad	Resultado o Densidad
1	(6,5 m * 31 m) = 201,5 m ²	Huecos	Moderada	2 unidades	(2 unid/201,5 m ²) *100=	0,99
		Agrietamiento transversal	Moderada	7,3 m	(7,3 m ² /201,5 m ²) *100=	3,62
		Agrietamiento de borde	Alta	24,2 m	(24,2 m ² /201,5 m ²) *100=	12,01
		Desprendimiento	Moderada	28,82 m ²	(28,82 m ² /201,5 m ²) *100=	14,30

Tabla 20. Procesamiento de datos obtenidos en levantamiento de campo para las correspondientes UM's.

Fuente: Tomado de la norma ASTM-D6433.

Segundo paso: cálculo del número de deducciones admisibles (m).

Analizando los Valores Deducidos obtenidos del primer paso, se pueden obtener los siguientes casos:

- a) Ningún o sólo un valor deducido es mayor a 2
- b) Más de un valor deducido es mayor a 2 o todos los valores deducidos son mayores a 2.

Para los casos expuestos: en a) no se calcula el m, se utilizará el valor deducido total (la suma de todos los valores deducidos) sin corregir y se continúa en el siguiente paso, en b) se debe calcular el (m).

En el caso que todos los valores VD son mayores a dos, es necesario calcular (m).

$$m = 1 + 9/98 (100 - 28) \quad (10)$$

Para nuestro caso el cálculo.

$$m = 7,61.$$

Para calcular el m , se deberán ordenar los valores deducidos obtenidos del primer paso en orden descendiente (de mayor a menor), el mayor de estos valores se conoce como Mayor Valor Deducido Individual (MVDI), como se presenta a continuación:

Deterioros auscultados	Severidad	Valor Deducido	$m=7,61$
Huecos	Moderada	28	
Agrietamiento transversal	Moderada	9	
Agrietamiento de borde	Alta	26	
Desprendimiento	Moderada	21	

Tabla 21. Valores Deducidos obtenidos del procesamiento.

Fuente: Elaboración propia, 2025.

Como $m= 7,61$ se utilizarán todos los valores deducidos.

Cálculo del Máximo Valor Deducido Corregido (MVDC)

- Se determina el número de Valores Deducidos que sean mayores a 2. A este número se le llamará (q).
- Se determina el Valor Deducido Total (VDT) sumando todos los Valores Deducidos Individuales.
- Se determina el Valor Deducido Corregido (VDC) con (q) y el valor Deducido Total (VDT) utilizando la curva de corrección.

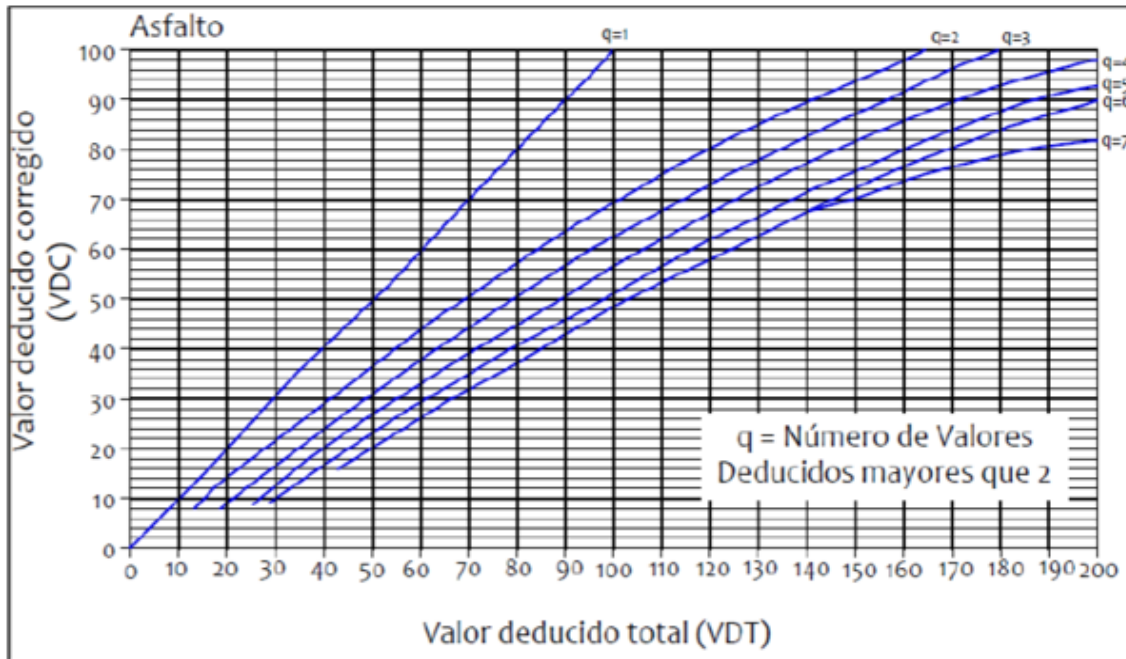


Figura 29. Gráfica para la obtención del Valor Deducido Corregido (VDC)

Fuente: Norma ASTM D-6433.

Se procede a calcular el valor de (**q**), que en este caso son todos los Valores Deducidos que sean mayores que 2. En nuestro caso este dato sería 4.

A continuación, se calcula el Valor Deducido Total:

$$\text{VDT} = 28 + 9 + 26 + 21 \quad (11)$$

$$\text{VDT} = 84$$

Se obtiene el Valor Deducido Corregido (VDC) obtenido para $q = 4$ que es de 84, y se realiza el siguiente proceso de iteración:

	q=4	q=3	q=2	q=1
	28	28	28	28
	26	26	26	2
	21	21	2	2
	9	2	2	2
ΣVDT	84	77	58	34
VDC	45	48	4	36

Tabla 22. Proceso de iteración para obtener el Valor Deducido Corregido (VDC).

Fuente: Elaboración propia, 2025.

Se obtiene el mayor Valor Deducido Corregido (MVDC) del paso anterior, por lo que se procede a determinar el PCI para las unidades de muestreo analizadas:

$$(\text{MVDC} = 48)$$

$$\text{PCI}_{\text{UM}} = 100 - 48$$

$$\text{PCI}_{\text{UM}} = 52$$

PCI: POBRE

En relación con la aplicación del método PCI, los valores obtenidos arrojaron un promedio de 52 puntos, ubicando a la ruta en la categoría de condición “Pobre”. Este resultado refleja que, si bien el material RAP permitió mejorar aspectos funcionales inmediatos como la regularidad y la disminución del polvo, la condición superficial general aún presenta deterioros relevantes que afectan la percepción de calidad de la vía, con presencia de baches puntuales, corrugaciones longitudinales y desprendimiento de partículas del RAP.

El seguimiento detallado del caso de estudio de la Ruta Nacional Terciaria No. 746 permitió profundizar en la evaluación de la efectividad y durabilidad de los tratamientos superficiales aplicados en rutas de lastre. La observación sistemática y la medición de indicadores como el PCI proporcionan evidencia sobre el comportamiento del RAP a lo largo del tiempo, resaltando que, aunque se presentan mejoras funcionales, la durabilidad plena del tratamiento depende de factores como la compactación, el control de humedad y la frecuencia de mantenimiento.

La calificación obtenida confirma que el RAP, aplicado en espesores y procedimientos constructivos como los implementados en esta ruta, no garantiza alcanzar niveles de buen desempeño por sí solo. Esto evidencia la necesidad de ajustes en el diseño, la ejecución y la planificación de intervenciones periódicas, a fin de maximizar la vida útil de los tratamientos y optimizar los recursos destinados a la conservación vial.

4.4 Evaluación visual del estado de la vía antes y después de la colocación del RAP

A partir del registro fotográfico obtenido en campo, se realizó una comparación visual entre las condiciones de la vía antes y después de la colocación del material perfilado (RAP). En la imagen correspondiente al estado previo a la intervención, se aprecia una superficie con presencia de irregularidades, pérdida de material fino y una textura discontinua, características que incidían negativamente en la comodidad de la superficie y en la seguridad de los usuarios.

Posterior a la colocación del material perfilado, la superficie presenta una mejor uniformidad y regularidad a lo largo de toda la sección de control. El aporte de material permitió restituir la geometría transversal del camino, mejorar las condiciones de drenaje superficial y optimizar el confinamiento del agregado granular. Se evidencia una superficie más compacta, estable y homogénea, lo que contribuye a una mayor durabilidad y capacidad de soporte ante las cargas de tránsito.

En términos funcionales, la intervención permitió una mejora significativa en el confort de rodadura y en la transitabilidad general de la ruta, al corregir ondulaciones, eliminar puntos de acumulación de agua y reducir la disgregación del material. Este resultado refleja la efectividad del proceso de perfilado como técnica de conservación rutinaria, especialmente en vías con superficie granular y tránsito moderado, como es el caso de la Ruta Nacional No.746.

4.4.1 Evaluación del RAP y relación con el PCI

La Ruta Nacional 746 fue intervenida con material reciclado mediante perfilado hace aproximadamente un año y medio, lo cual brinda un contexto adecuado para realizar una evaluación del Índice de Condición del Pavimento (PCI). Este periodo es considerado apropiado para una primera valoración, especialmente en vías de lastre, ya que durante el primer año la superficie todavía atraviesa un proceso activo de asentamiento y ajuste ante el tránsito y las lluvias. Evaluar el PCI en este momento permite detectar tempranamente posibles problemas de compactación, desplazamientos irregulares del material, aparición inicial de baches, erosiones o deformaciones, además de valorar la durabilidad del material reciclado colocado y la efectividad general del perfilado. Asimismo, esta medición se convierte en una línea base fundamental para comparaciones futuras y para ajustar la estrategia de mantenimiento preventivo.

Desde una perspectiva práctica, el resultado del PCI después de este periodo ofrece información clave sobre el desempeño del tratamiento aplicado. Un PCI alto (mayor a 80) sugiere que el material empleado y las labores de conservación han sido adecuadas, con un comportamiento estructural y superficial favorable. En contraste, un PCI bajo (menor a 70) puede evidenciar deficiencias en la compactación inicial, inadecuada selección o granulometría del material reciclado, o problemas asociados al drenaje y a las sollicitaciones de tránsito no previstas. Esta interpretación permite orientar decisiones de mantenimiento y ajustar futuras intervenciones de manera más precisa.

PCI	Estado de la vía	Posibles causas	Recomendaciones de mantenimiento
85–100	Excelente	Perfilado muy efectivo, material estable y bien compactado	Mantener perfilado preventivo cada 4-6 meses y monitoreo visual
70–84	Bueno	Perfilado adecuado, leves asentamientos o baches superficiales	Perfilado preventivo cada 3-4 meses, reparación de baches menores
50–69	Regular	Material original con desgaste, compactación insuficiente durante el perfilado, erosión por tránsito o lluvias	Perfilado más frecuente (cada 2-3 meses), relleno de baches, revisión de drenaje y control de erosión
<50	Malo	Perfilado insuficiente, material degradado, tránsito pesado, problemas de drenaje	Perfilado intensivo, reconstrucción de tramos críticos, mantenimiento intensivo y posible mejora de drenaje

Tabla 23. Evaluación del RAP con respecto al PCI.

Fuente: Elaboración propia, 2025.

A continuación, se adjuntan algunas fotografías en las que se detalla el antes, durante y después de los trabajos realizados. Con el fin de orientar el sentido de ubicación de cada una de las imágenes se asigna con el número 1 el entronque con la Ruta Nacional No.250 y con el número 2 el entronque con la Ruta Nacional No.745.

Primer punto estacionamiento (4+900) de la sección de control. En el sentido de circulación vehicular 1-2, inicio de proyecto. Fotografía antes tomada el 15.1.2024, fotografía durante tomada el 19.1.2024, y fotografía después tomada el 18.3.2024.



Figura 30, 31, 32. Etapas constructivas antes durante y después de la colocación de RAP.

Fuente: Tomado de informe División de Obras Públicas Región San Carlos, 2024.

Segundo punto analizado en el estacionamiento (3+900) de la sección de control. En el sentido de circulación vehicular 1-2. Fotografía antes tomada el 15.1.2024, fotografía durante tomada el 19.1.2024 y fotografía después tomada el 18.3.2024.

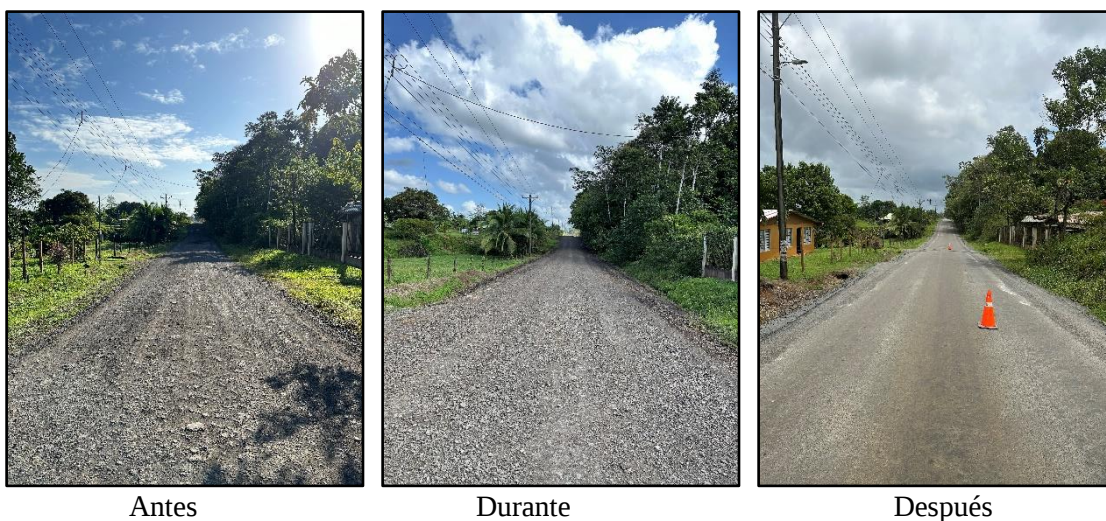


Figura 33, 34, 35. Etapas constructivas antes durante y después de la colocación de RAP.

Fuente: Tomado de informe División de Obras Públicas Región San Carlos, 2024.

En el tercer punto en el estacionamiento (2+900). En el sentido de circulación vehicular 1-2. Fotografía antes tomada el 15.1.2024, fotografía durante tomada el 19.1.2024 y fotografía después tomada el 18.3.2024.

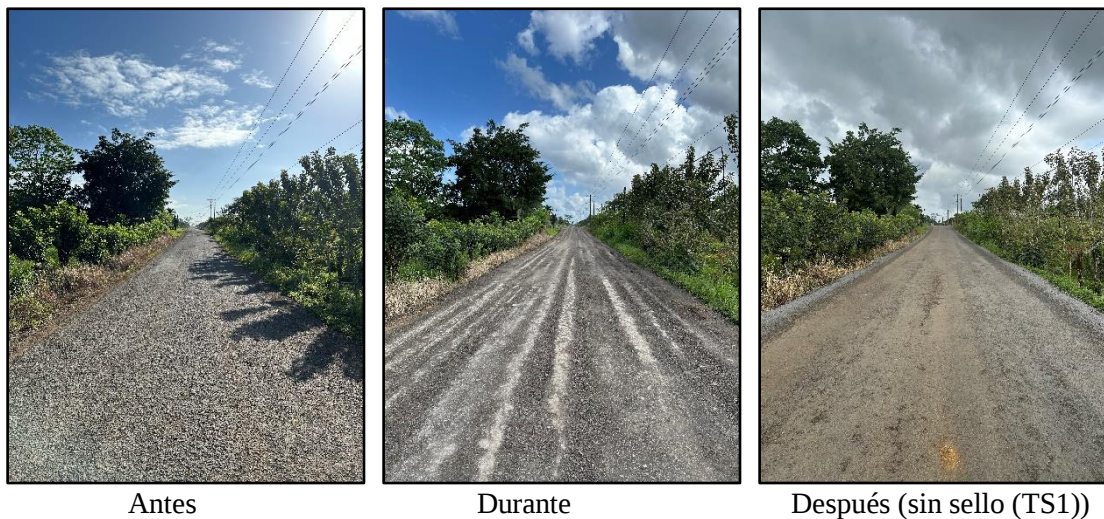


Figura 36, 37, 38. Etapas constructivas antes durante y después de la colocación de RAP.

Fuente: Tomado de informe División de Obras Públicas Región San Carlos, 2024.

Cuarto punto analizado en el estacionamiento (1+800) de la sección de control. En el sentido de circulación vehicular 2-1. Fotografía antes tomada el 15.1.2024, fotografía durante tomada el 19.1.2024 y fotografía después tomada el 8.4.2024.

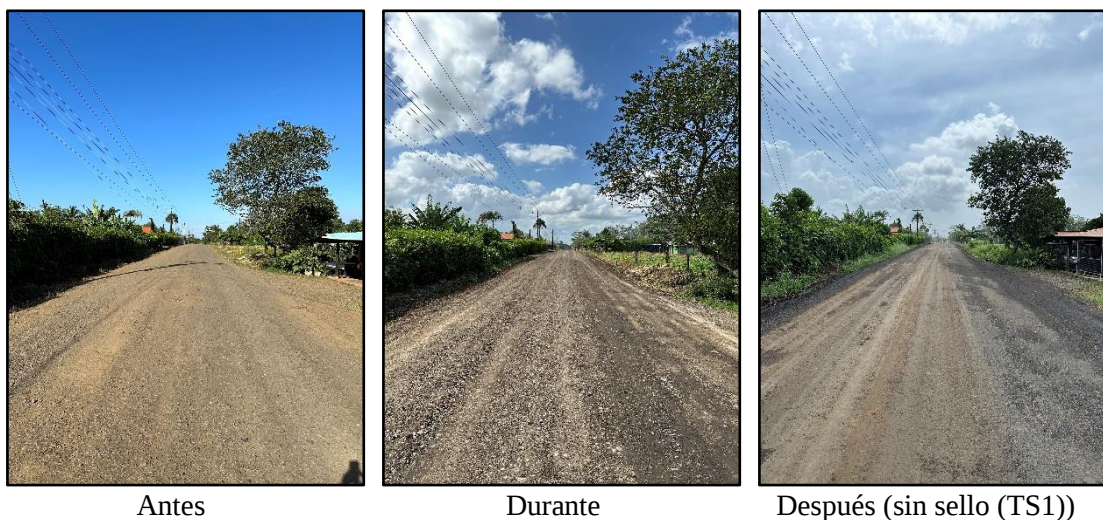


Figura 39, 40, 41. Etapas constructivas antes durante y después de la colocación de RAP.

Fuente: Tomado de informe División de Obras Públicas Región San Carlos, 2024.

4.4.2 Equipo utilizado en la colocación del RAP

En la siguiente tabla se detalla el equipo utilizado en el proyecto:

Número de Equipo	Descripción	Plantel de procedencia
232-1023	Vagonetas	San Carlos
115-125 y 115-135	Compactadoras	San Carlos
158-045	Back-hoe	San Carlos
144-194	Niveladora	San Carlos

Tabla 24. Equipo utilizado en la colocación de RAP.

Fuente: División de Obras Públicas Región San Carlos, 2024.

4.5 Estrategias de Conservación Vial

Para la gestión eficiente de una red de caminos se deben establecer los niveles límites de servicio del pavimento, considerando la condición global del mismo.

El límite inferior corresponde a la condición en la cual la intervención de un tramo es obligatoria, ya que; si no se hace la carretera ameritará trabajos de reconstrucción y no de mantenimiento, los cuales son mucho más costosos. El límite superior corresponde a la condición en la cual la intervención del tramo es recomendable pero no obligatoria.

A continuación, se definen los umbrales de conservación y el tipo de intervención que se requiera en cada situación.

Definición de Umbrales (%)	Tipo de Intervención
----------------------------	----------------------

De 0 - 30%	Mantenimiento de preservación: Son intervenciones de bajo costo relativo y constituyen principalmente intervenciones para mantener las rutas en buen estado, tanto en su parte funcional como estructural. Este tipo de actividades buscan aumentar la vida útil de los pavimentos en buen estado, conservando la integridad estructural y funcional de las rutas, adicionalmente, corrigen de forma eficiente deterioros funcionales de ocurrencia temprana como, desprendimientos de agregados, desnudamiento, exudación o fisuramiento superficial moderado.
De 30% - 75%	Rehabilitación: Estas técnicas además de extender la vida útil del pavimento, proveen una mejora de la capacidad estructural o de la serviciabilidad. Se tiene en este caso trabajos como sobrecapas asfálticas, perfilado y tratamientos superficiales, entre otros.
De 75% - 100%	Reconstrucción: Renovación completa de la estructura del camino, con previa demolición total de la estructura del pavimento. Por tratarse de rutas nacionales deben ser intervenidas urgentemente con soluciones que restituyan el nivel mínimo de seguridad vial, minimizando la posibilidad de accidentes por deterioros y planificando dentro de un esquema de gestión de redes, la recuperación de la vía en un plazo razonable. Las intervenciones en estos tramos son las de mayor costo dentro de un sistema de gestión de pavimentos.

Tabla 25. Definición de Umbrales de Conservación Vial

Fuente: Módulo 4. Inspección y control de obras de la Red Vial Cantonal, 2017.

4.5.1 Matriz de Asignación de Intervenciones

De acuerdo con los deterioros identificados en la Ruta Nacional Terciaria No. 746 mediante el procedimiento de auscultación visual, es necesario definir distintos tipos de intervención orientados a corregir dichas afectaciones. La selección de las medidas de corrección debe considerar la gravedad y el nivel de severidad del deterioro presente, de manera que se asegure una respuesta técnica adecuada y sostenible.

En este sentido, se presenta a continuación una matriz de referencia para la asignación de los tipos de intervención, en función de la clase de deterioro identificado y del nivel de severidad asociado a cada caso.

Tipo de Deterioro	Descripción	Severidad	Extensión	Intervención
Huecos (<i>Potholes</i>)	Huecos de al menos 150 mm de diámetro y menos de 25 mm de profundidad	Baja	Ocasional	Sand seal
			Frecuente Extensa	Corte y Bacheo
	Huecos de al menos 150 mm de diámetro y de 25 mm a 50 mm de profundidad	Media	Ocasional Frecuente Extensa	Corte y Bacheo
	Huecos de al menos 150 mm de diámetro y más de 50 mm de profundidad	Alta	Ocasional Frecuente	Corte y Bacheo
			Extensa	Sustitución de las capas granulares afectadas, en caso de que aplique Corte y Bacheo
				Perfilar sección de pavimento Colocar sobrecapa
Agrietamiento transversal (<i>Transversal cracking</i>)	Ancho menor a 6 mm o selladas en buenas condiciones y con un ancho que no se puede medir, sin ramificaciones en los bordes	Baja	Ocasional	Ninguna
			Frecuente Extensa	Limpieza y sellado

Tipo de Deterioro	Descripción	Severidad	Extensión	Intervención
	Ancho mayor a 6 mm y menor a 19 mm, o menor a 19 mm con ramificaciones pequeñas o grieta sellada rodeada de ramificaciones pequeñas	Media	Ocasional Frecuente. Extensa	Limpieza y sellado
	Ancho mayor a 19 mm, o grieta sellada con ramificaciones grandes e importantes, o grieta con ancho menor a 19 mm con ramificaciones grandes e importantes. Bordes de grieta normalmente degradados	Alta	Ocasional	Limpieza y sellado
			Frecuente Extensa	Limpieza y sellado Sand seal
Agrietamiento de borde (<i>Edge cracking</i>)	Grietas sin ruptura o pérdida de material	Baja	Ocasional	Ninguna
			Frecuente Extensa	Limpieza y sellado
	Grietas con alguna ruptura y pérdida de material de hasta el 10 por ciento de la longitud de la parte afectada del pavimento	Media	Ocasional	Limpieza y sellado
			Frecuente Extensa	Limpieza y sellado Sand seal
	Grietas con ruptura considerable y pérdida de material por más del 10 por ciento de la longitud de la porción afectada del pavimento	Alta	Ocasional	Limpieza y sellado Sand seal
			Frecuente Extensa	Corte y Bacheo

Tipo de Deterioro	Descripción	Severidad	Extensión	Intervención
Desprendimiento (<i>Raveling</i>)	Textura superficial rugosa; agregados parcialmente expuestos	Baja	Ocasional	Ninguna
			Frecuente	
	Desprendimiento considerable de agregados, al menos 20 partículas de agregado por metro cuadrado	Media	Extensa	Sand seal
			Ocasional	Sand seal
			Frecuente	Corte y Bacheo
			Extensa	
	La superficie se encuentra muy rugosa por la falta de agregado grueso, puede estar completamente desprendida en ciertos lugares	Alta	Ocasional	Sand seal
			Frecuente	Corte y Bacheo
			Extensa	Perfilar sección de pavimento Colocar sobrecapa

Tabla 26. Matriz de Asignación de Intervenciones de acuerdo con severidad del deterioro obtenido

Fuente: Elaboración propia, 2025.

4.6 Aspectos Económicos Ruta Nacional Terciaria No. 746

Considerando las características del tramo evaluado en la Ruta No. 746 con un ancho de calzada aproximado de 6,5 m, una longitud de 4,9 km y un espesor promedio de la capa de RAP de 5 cm; y utilizando una densidad estimada del material de 2,3 t/m³ como punto de partida, es posible determinar de manera secuencial el volumen colocado, la masa total de RAP utilizada y, posteriormente, estimar el costo por kilómetro según el precio por tonelada que se defina.

A continuación, se presenta una tabla resumen con los parámetros de la ruta.

Parámetro	Símbolo	Valor	Unidad
Ancho de calzada	(B)	6,5	m
Longitud total	(L)	4,9	km
Espesor de capa RAP colocado	(e)	0,05	m
Densidad de RAP	(P)	2,3	t/m ³

Tabla 27. Parámetros establecidos de RAP en la ruta nacional.

Fuente: Elaboración propia, 2025.

Cálculo del volumen total

$$V = B \times L \times e \quad (12)$$

$$V = 6,5 \times 4,900 \times 0,05 = 1,592.5 \text{ m}^3$$

Cálculo de la masa total

$$M = V \times P \quad (13)$$

$$M = 1,592.5 \times 2,3 = 3,662.75 \text{ ton}$$

4.6.1 Cálculo del costo total y costo por km de intervención

Se adopta un costo de referencia de 190 USD por tonelada, según consulta realizada al administrador vial de la zona de San Carlos. Con una estimación de 3,662.75 toneladas de RAP, el costo total asciende a 695 922.5 USD; para fines académicos, este valor se redondea a 696,000 USD.

A partir de este monto, se calcula el costo por kilómetro intervenido en función de la longitud total de la ruta.

$$\text{Costo por km} = 696,000 / 4,9 = 142,040.82 \text{ \$/km}$$

$$\text{Costo por m}^2 = 696,000 / (4,900 \times 6,5) = 21,89 \text{ USD/m}^2$$

Concepto	Resultado	Unidad
Volumen total	1,592.5	m ³
Masa total de RAP	3,662.75	ton
Costo total estimado	\$696,000	USD
Costo por kilómetro	\$142,040.82	USD/km
Costo por m ²	\$21,89	USD/m ²

Tabla 28. Costo total estimado por km de intervención.

Fuente: Elaboración propia, 2025.

A partir de las condiciones geométricas del tramo (ancho de 6.5 m, longitud de 4.9 km y espesor de 5 cm), y considerando una densidad promedio del RAP de 2.3 t/m³ y un costo unitario de 190 USD/t, se obtiene un costo total de intervención de aproximadamente \$696,000, equivalente a \$142,040 por kilómetro.

El incremento del 10 % sobre el costo del material RAP se aplica para representar los costos indirectos asociados a la ejecución del proyecto. Estos corresponden a gastos complementarios que no forman parte del precio del material, pero que son necesarios para su colocación y control de calidad en obra.

Entre ellos se incluyen:

- Transporte y acarreo del material RAP desde el centro de acopio hasta el sitio de aplicación.
- Operación y movilización de equipo para extendido y compactación.
- Mano de obra auxiliar y supervisión técnica.
- Costos administrativos y de control de calidad.

Concepto	Valor	Unidad
Costo directo total (solo material RAP)	\$696,000.00	USD
Costo total con +10 % indirectos	\$765,600.00	USD
Costo por kilómetro (directo)	\$142,040.82	USD/km
Costo por kilómetro +10 % indirectos	\$156,244.90	USD/km

Costo por m ² (directo)	\$21,89	USD/m ²
Costo por m ² +10 % indirectos	\$24,08	USD/m ²

Tabla 29. Costos directos e indirectos de la intervención.

Fuente: Elaboración propia, 2025.

Al incorporar un 10 % adicional por concepto de costos indirectos, el costo de intervención por kilómetro se incrementa de \$142,041 a \$156,245 lo que representa un ajuste razonable considerando los gastos complementarios asociados al transporte, operación de equipos, personal técnico y control de calidad.

Este valor final mantiene la intervención dentro de un rango económicamente viable, especialmente si se compara con alternativas tradicionales de rehabilitación que pueden superar los \$200,000 por kilómetro de intervención.

El costo total de la intervención para el tramo de 4,9 km de la Ruta Nacional No. 746, considerando la aplicación de una capa de 5 cm de material reciclado asfáltico (RAP), asciende a USD 765,600.00 equivalente a USD 156,245 por kilómetro o USD 24,08 por metro cuadrado.

A nivel de sostenibilidad, el uso de RAP representa una alternativa de bajo costo inicial y con reducida necesidad de mantenimiento, lo que permite inferir una mejor relación costo-beneficio en el ciclo de vida del pavimento, al disminuir la frecuencia de intervenciones futuras y aprovechar materiales reciclados de la misma ruta con que se cuenten.

4.6.2 Análisis económico desde el ciclo de vida del proyecto

El análisis económico basado en el ciclo de vida del proyecto permite evaluar la viabilidad del uso del material reciclado asfáltico (RAP) no solo desde el punto de vista del costo inicial, sino también considerando la durabilidad, mantenimiento y reaprovechamiento del material a lo largo del tiempo.

En este sentido, el costo inicial de aplicación del RAP en el tramo de estudio de la Ruta Nacional No. 746 fue de USD 156,245 por kilómetro, incluyendo un 10 % adicional por costos indirectos. Este valor corresponde a la etapa de construcción o intervención inicial, que representa la mayor inversión dentro del ciclo de vida del pavimento.

Para estimar el comportamiento económico a lo largo de 10 años, se consideran tres fases principales:

1. Intervención inicial (año 0): costo total de aplicación del RAP.
2. Mantenimiento menor (años 3 a 8): actividades de sellado o perfilado ligero, con un costo promedio estimado del 10 % del valor inicial.
3. Rehabilitación o reaprovechamiento (años 9 a 10): intervención parcial para reciclado o refuerzo superficial, con un costo estimado del 20 % del valor inicial.

Bajo estas condiciones, el costo total acumulado del ciclo de vida se refleja en la siguiente tabla:

Etapa	Año de aplicación	Costo relativo (%)	Costo acumulado (USD/km)
Intervención inicial	0	100 %	156,245
Mantenimiento menor	3-8	+10 %	15,624
Rehabilitación ligera	10	+20 %	31,249
Costo total estimado del ciclo de vida (10 años)	-	-	203,118 USD/km

Tabla 30. Costo total del ciclo de vida del proyecto.

Fuente: Elaboración propia, 2025.

Este valor muestra que el costo total a 10 años para la técnica con RAP asciende a 203,118 USD/km, lo que representa una reducción estimada de entre 30 % y 40 % frente a los costos promedio de rehabilitaciones convencionales, que suelen superar los 200,000 USD/km en pavimentos asfálticos nuevos.

En consecuencia, la utilización del RAP optimiza los recursos públicos, al mismo tiempo que disminuye la frecuencia de intervenciones y reduce el impacto ambiental asociado a la extracción y transporte de materiales vírgenes, generando una alternativa técnica y económicamente sostenible para la conservación de la red vial nacional.

4.7 Aspectos Ambientales a considerar

- **Emisiones atmosféricas:** Las labores de perfilado, bacheo, aplicación de mezclas asfálticas y uso de maquinaria pesada generan emisiones de gases contaminantes (CO₂, NO_x, partículas), que contribuyen al cambio climático y afectan la calidad del aire local.
- **Contaminación por escorrentía:** El escurrimiento superficial durante y después de intervenciones puede arrastrar sedimentos, hidrocarburos, o residuos asfálticos hacia cuerpos

de agua, especialmente si no se cuenta con obras de drenaje adecuadas o control de sedimentos.

- **Manejo del polvo en vías no pavimentadas:** La generación de polvo es una de las principales fuentes de contaminación del aire en caminos rurales. Esto afecta la salud humana, cultivos cercanos y la visibilidad, además de incrementar el desgaste de componentes vehiculares.
- **Extracción y transporte de materiales vírgenes:** El uso de materiales pétreos de canteras o ríos implica consumo energético y presión sobre ecosistemas. Esto puede minimizarse mediante la reutilización de materiales reciclados como el RAP.

4.7.1 Matriz de Análisis Multicriterio Ambiental (AMC)

Comparando tres alternativas:

- Mantenimiento convencional (material granular)
- Aplicación de RAP (alternativa más sostenible)
- Perfilado básico (intervención mínima)

Los puntajes reflejan condiciones típicas: RAP obtiene mejor desempeño en reducción de materiales vírgenes y control de polvo; el convencional tiene rendimiento medio; el perfilado es el peor.

Pesos utilizados:

- Sensibilidad ecológica: 25%
- Riesgo hídrico: 20%
- Polvo: 15%
- Reducción de materiales vírgenes: 25%
- Control de escorrentía/erosión: 15%

Escala: 1 (peor) condición a 5 (mejor)

Tabla 31. Matriz de resultados Análisis Multicriterio Ambiental.

Alternativa	Sensibilidad ecológica (25%)	Riesgo hídrico (20%)	Generación de polvo (15%)	Reducción materiales vírgenes (25%)	Control escorrentía / erosión (15%)	Puntaje final
Convencional	3	3	2	1	3	2.45
Uso de RAP	4	4	4	5	4	4.25
Perfilado básico	2	2	1	1	2	1.55

Cálculo detallado:

Convencional

$$0.25(3) + 0.20(3) + 0.15(2) + 0.25(1) + 0.15(3) = 0.75 + 0.60 + 0.30 + 0.25 + 0.45 = 2.45$$

Uso de RAP

$$0.25(4) + 0.20(4) + 0.15(4) + 0.25(5) + 0.15(4) = 1.00 + 0.80 + 0.60 + 1.25 + 0.60 = 4.25$$

Perfilado básico

$$0.25(2) + 0.20(2) + 0.15(1) + 0.25(1) + 0.15(2) = 0.50 + 0.40 + 0.15 + 0.25 + 0.30 = 1.55$$

Interpretación de matriz

- RAP es por mucho la alternativa con mejor desempeño ambiental global (4.25).
- Convencional tiene desempeño medio, afectado por su bajo aporte a reducción de materiales vírgenes.
- Perfilado básico presenta la peor calificación debido a su mayor generación de polvo y mínimo aporte ambiental.

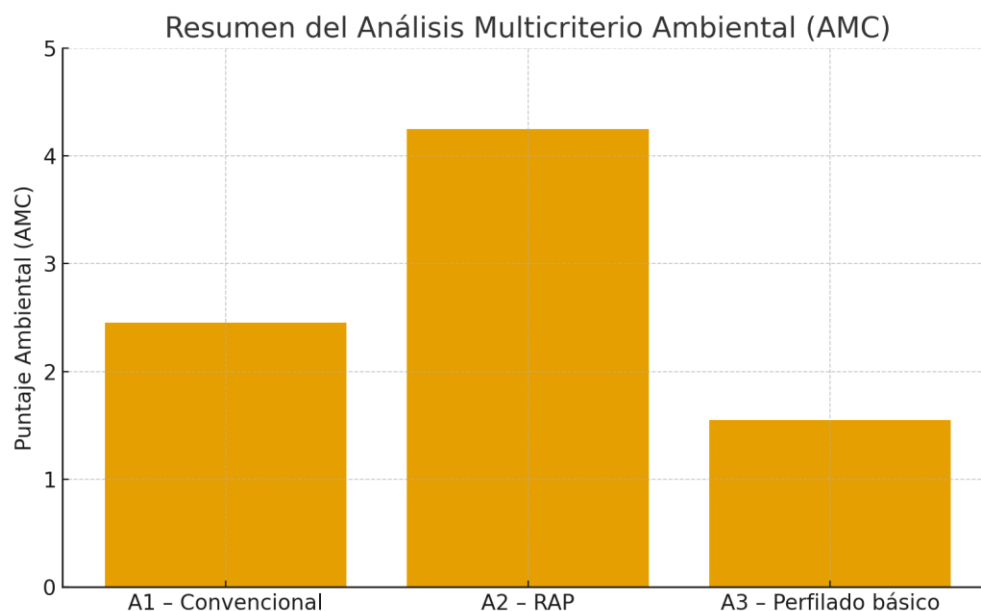


Figura 42. Gráfico de resultados Análisis Multicriterio Ambiental (AMC)

Fuente: Elaboración propia, 2025.

4.8 Consideraciones ambientales en la conservación de la Ruta Nacional No. 746

El desarrollo de actividades de conservación vial en la Ruta Nacional No. 746 implica una serie de interacciones con el entorno natural que deben ser consideradas dentro de una gestión responsable y sostenible del activo vial. Durante la ejecución de labores como el perfilado, el bacheo o la aplicación de capas de material reciclado, se generan impactos ambientales asociados al consumo de recursos naturales, la emisión de gases y polvo por operación de maquinaria, y la posible alteración temporal del drenaje superficial y de los suelos adyacentes. Por esta razón, resulta fundamental incorporar medidas de mitigación orientadas a reducir dichas afectaciones, tales como el control de polvo mediante riego, la protección de taludes y cunetas, y la adecuada disposición o reutilización del material extraído.

El uso de material asfáltico reciclado RAP constituye una alternativa ambientalmente favorable, ya que disminuye la necesidad de extraer agregados vírgenes y reduce significativamente el consumo energético y las emisiones derivadas del transporte y la producción de nuevos materiales. Además, la aplicación de técnicas de conservación que prolongan la vida útil del camino contribuye a reducir la frecuencia de intervenciones y, con ello, el impacto acumulado sobre el medio ambiente durante el

ciclo de vida del proyecto. Este enfoque promueve la eficiencia de recursos y la economía circular dentro del sistema de gestión vial.

Desde una perspectiva de evaluación, el componente ambiental debe formar parte de la matriz de priorización de intervenciones, complementando los criterios técnicos y económicos. La inclusión de un indicador de impacto ambiental permite valorar cada tratamiento según su grado de afectación y el nivel de sostenibilidad alcanzado, promoviendo la selección de alternativas con menor huella ecológica. Asimismo, la aplicación de buenas prácticas ambientales, la capacitación del personal de obra y el cumplimiento de las regulaciones nacionales establecidas por el MINAE y SETENA garantizan que las actividades de conservación se realicen bajo un marco de responsabilidad ambiental y coherencia con los principios de desarrollo sostenible.

Tabla 32. Matriz de Asignación de Intervenciones integrando el criterio ambiental y económico.

Tipo de deterioro	Descripción	Severidad	Extensión	Intervención sugerida	Criterio técnico	Criterio económico	Criterio ambiental
Huecos	Aberturas con pérdida de material ≥ 150 mm	Baja	Ocasional	Sellado superficial (Sand seal)	Restaura la superficie y reduce infiltración	Bajo costo, rápida ejecución	Bajo impacto
		Alta	Extensa	Corte y bacheo localizado	Recupera capacidad estructural	Costo medio	Impacto medio por uso de mezcla
Agrietamiento longitudinal / transversales	Grietas aisladas o en patrón	Baja	Ocasional	Sellado de fisuras	Evita infiltración de agua	Bajo costo	Bajo impacto
		Alta	Frecuente	Reperfilado con RAP + tratamiento superficial	Mejora funcionalidad y durabilidad	Costo moderado	Impacto medio mitigado por uso de RAP
Deformaciones (ahuellamiento, corrugaciones)	Deformaciones plásticas de la superficie	Media	Localizada	Reperfilado con RAP	Recupera soporte y confort de rodadura	Costo medio	Positivo: reutiliza material

Pérdida de agregados	Pérdida de agregado o textura	Baja	Extensa	Tratamiento superficial simple	Mejora fricción y sellado	Bajo costo	Bajo impacto
		Alta	Extensa	Revestimiento bituminoso o capa de rodadura con RAP	Aumenta seguridad y durabilidad	Costo medio	Reduce consumo de material virgen
Deficiencia de drenaje superficial con grietas de borde	Acumulación de agua o erosión	Media	Localizada	Limpieza y conformación de cunetas	Previene deterioro estructural	Bajo costo	Positivo: mejora manejo del agua
Falla estructural severa	Pérdida de capacidad portante generalizada	Alta	Extensa	Reconstrucción parcial o total con mezcla estabilizada con RAP	Restaura la estructura	Alto costo	Beneficio ambiental al reutilizar material

La matriz presentada permite visualizar de manera estructurada la relación entre cada tipo de deterioro identificado, su severidad, extensión y la intervención recomendada. Esta organización facilita la priorización de acciones de mantenimiento al evidenciar cuáles fallas requieren tratamientos superficiales simples y cuáles demandan intervenciones más profundas como corte y bacheo. Desde una perspectiva ambiental, la correcta selección de tratamientos permite minimizar el uso de materiales vírgenes y reducir la generación de residuos, especialmente cuando se opta por intervenciones menos invasivas. En términos económicos, la clasificación contribuye a asignar los recursos de manera más eficiente, evitando sobrecostos asociados a intervenciones innecesarias y enfocando la inversión en los tramos que realmente lo requieren. En conjunto, la matriz respalda una toma de decisiones integral que favorece la sostenibilidad técnica, ambiental y financiera de la ruta.

4.9 Resultados de la Priorización Multianual

Factores a considerar para el Beneficio Ajustado	
Beneficio del proyecto (B)	US\$ 0,765 millones
Tránsito Promedio Diario (TPD)	2938 (TPD utilizado como referencia en tramo Pital – Veracruz de San Carlos)

Longitud del pavimento (L)	4,9 km
Factor de cuantificación del ahorro en los costos del usuario (FC)	2,5

Tabla 33. Factores por considerar para el Beneficio-Ajustado

Fuente: Tomado de Presentación Módulo 10, Priorización, clase de Maestría Rehabilitación y Mantenimiento de Carreteras, TEC 2021.

Por lo tanto,

$$B \text{ ajustado} = B * TPD * longitud * FC \quad (14)$$

$$B \text{ ajustado} = 0,765 * 2938 * 4,9 * 2,5$$

$$B \text{ ajustado} = 27\,532,73$$

Bajo el presupuesto global del costo del proyecto (US\$ 0,765 millones), se cuenta con la siguiente información:

Tabla 34. Presupuesto para Priorización Multianual

Deterioro Auscultado	Estacionamiento	Condición (nivel) m²	Condición (nivel) m	Tipo de Intervención	Costo asociado (US\$ millones)
Huecos	0+500	1,61	-	Menor	0,167 (se aproxima a 0,170)
Agrietamiento de borde	1+250	-	24,2	Mayor	0,250
Desprendimiento	3+360	28,82	-	Menor	0,167 (se aproxima a 0,170)
Agrietamiento transversal	4+800	-	7,3	Menor	0,180

4.9.1 Ranking de Intervenciones

La estimación de los costos de las intervenciones se realizó, considerando la magnitud de los deterioros y el tipo de acción requerida.

A continuación, se presenta el ranqueo realizado para nuestro caso de estudio:

Tabla 35. Ranking de Intervenciones

No. de ruta	Deterioro Auscultado	Estacionamiento	Ranking	Tipo de Intervención	Costo asociado (US\$ millones)
746	Agrietamiento de borde	1+250	1	Mayor	0,250
746	Desprendimiento	3+360	2	Menor	0,170
746	Agrietamiento transversal	4+800	4	Menor	0,180
746	Huecos	0+500	3	Menor	0,170

El ranqueo de intervenciones en la Ruta Nacional Terciaria No. 746 evidencia que los deterioros identificados presentan diferentes niveles de severidad y requieren intervenciones diferenciadas en función de su impacto sobre la transitabilidad y la conservación de la vía. El agrietamiento de borde ubicado en la estación 1+250 se posiciona como la prioridad principal, dado que representa una afectación estructural significativa y demanda una intervención mayor con un costo estimado de US\$ 0,150 millones. En segundo lugar, se identificó deterioros superficiales de menor severidad como desprendimientos, agrietamientos transversales y presencia de huecos, cuya atención mediante intervenciones menores contribuiría a mantener la funcionalidad del tramo y evitar una progresión acelerada de los daños. Este análisis permite priorizar de manera objetiva la asignación de recursos disponibles, optimizando la gestión de conservación vial.

CAPÍTULO 5: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 CONCLUSIONES

1. El valor promedio del PCI de 52 puntos en la ruta de estudio, correspondiente a la categoría de condición Pobre, refleja que, a pesar de las mejoras funcionales observadas en el confort y la reducción del polvo, la superficie de la vía presenta varios deterioros significativos. La catalogación de defectos mostró la presencia de baches puntuales, corrugaciones longitudinales y desprendimiento de partículas del RAP, evidenciando que la intervención no logra por sí sola garantizar un desempeño óptimo a largo plazo.
2. El análisis de durabilidad evidenció que la ruta presenta una vulnerabilidad significativa frente a la acción climática y el tránsito local, especialmente debido a la calidad heterogénea de los suelos, la falta de recubrimientos protectores y la acumulación de humedad. Estos factores aceleran la degradación y justifican la necesidad de intervenciones de preservación oportunas.
3. Los aspectos económicos evaluados mediante el uso del material de RAP constituyen una alternativa viable y eficiente para mejorar la capa de rodadura en segmentos no pavimentados. Su reutilización genera reducciones en los costos directos, disminuye el uso de agregados vírgenes y promueve decisiones alineadas con políticas de mantenimiento sostenible.
4. La combinación del diagnóstico físico, el análisis económico y la valoración ambiental permitió construir un marco robusto para la toma de decisiones en la Ruta No. 746, facilitando una priorización equilibrada y coherente con las necesidades reales de la ruta y con los objetivos institucionales de eficiencia y sostenibilidad.
5. El uso de material de perfilado constituye una práctica adecuada para proyectos de mantenimiento en superficies no pavimentadas. No obstante, se recomienda realizar ensayos de caracterización básica antes de su utilización, con el fin de determinar la necesidad de retirar partículas de sobretamaño o de adicionar arena o polvo de piedra para corregir la habitual escasez de finos. Contar con parámetros de laboratorio actualizados permite asegurar un adecuado control de calidad durante la colocación y compactación de la capa de protección superficial, mejorando el desempeño y la vida útil del tratamiento aplicado.

5.2 RECOMENDACIONES

1. Establecer un plan de conservación basado en un ranqueo de tramos críticos, optimizando recursos y considerando criterios económicos y ambientales.
2. Fortalecer los sistemas de registro de información vial, especialmente en rutas de bajo volumen, para mejorar la trazabilidad de intervenciones, estimar ciclos de vida y facilitar la actualización de modelos de priorización.
3. Realizar monitoreo periódico del estado de la ruta y estudios complementarios sobre la durabilidad del RAP colocado, evaluando la integración de tecnologías de seguimiento vial.
4. Complementar el análisis económico con modelos de optimización que permitan asignar presupuestos limitados de manera estratégica, maximizando el beneficio total de conservación a nivel de red.
5. Replicar la metodología desarrollada en esta investigación dentro del propio cantón o región, de forma que sirva como guía para evaluar, jerarquizar y justificar inversiones en caminos no pavimentados con criterios homogéneos y características similares.

CAPÍTULO 6: REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AASHTO. 2011. *Transportation Asset Management Guide: a focus on implementation*. Washington: AASHTO.
- Herra - Gómez, L. 2017. *Tratamientos superficiales como alternativa en rutas de lastre*. San José. LanammeUCR.
- Keller, G., & Sherar, J. 2008. *Ingeniería de caminos rurales*. México: Instituto Mexicano del Transporte.
- MOPT-01-06-02-001-2019. *Clasificación ampliada de tipo de superficie de rueda para el registro de la Red Vial Nacional*. Ministerio de Obras Públicas y Transportes.
- *Informe de Evaluación de la Red Vial Nacional Pavimentada de Costa Rica*, LanammeUCR, 2023.
- *Informe de Auditoría Técnica LM-INF.IC.D-004,2020*, LanammeUCR 2020.
- *Publicación Tratamientos Superficiales como Alternativa en rutas de Lastre*, 2017. LanammeUCR 2017.
- MOPT-02-01-09-001-2017. *Sello Asfáltico Integrado No Estructural Con Emulsión Asfáltica*, 2017. Ministerio de Obras Públicas y Transportes.
- *Manual de Especificaciones Generales para la Conservación de Caminos, Carreteras y Puentes*. 2015.
- *Manual de Auscultación Visual de Pavimentos de Costa Rica. Guía para profesionales*. MAV-2016.
- MS-16. *Asfalto En la Preservación y el Mantenimiento de Pavimentos*. Instituto del Asfalto.
- *Comparación del desempeño en laboratorio de tratamientos superficiales elaborados a partir de las metodologías de diseño de TxDOT y Austroads*. LanammeUCR 2019.
- *Tomado de presentación Técnicas de Mantenimiento y Rehabilitación, clase de Maestría Rehabilitación y Mantenimiento de Carreteras*, Instituto Tecnológico de Costa Rica 2021.

- Tomado de Presentaciones del módulo 4. *Inspección y control de obras de la Red Vial Cantonal*. - 1. ed. - San José C.R. 2017.
- American Society for Testing and Materials o ASTM International. Norma D-6433. American Society for Testing and Materials.
- Fundamentos de diseño estructural de pavimentos rígidos y flexibles, *Primer Programa Vial Cantonal PRVC-I MOPT- BID*, Ministerio de Obras Públicas y Transportes 2017.

CAPÍTULO 7: APÉNDICES

CAPÍTULO 8: ANEXOS

MINISTERIO DE OBRAS PUBLICAS Y TRANSPORTES
DIRECCION GENERAL DE PLANIFICACION
DEPARTAMENTO DE ESTUDIOS BASICOS

N° BOLETA 000016

REG / ZONA

INVENTARIO GENERAL DE CARRETERAS Y CAMINOS

(N)ac. (C)ant.

Razon Levantam.

Distrito

Provincia

Cantón

PITAL

ALA ZUELA

SAN CARLOS

Identificación Tramo/ DE: PEGON (LA LEGUA) (R.250) A: VERA CRUZ (R.745)

Factor		Levanta	
PISO EN LÍNEA DE VÍA		AMADO ZÚÑIGA	
IZQ.	DER.	KILOMETRO	ODOMETRO
Veracruz	R. 745		
CHAPARRAL +0509689 ALT +0509680 104	745 VERA CRUZ	4+910	17
+0509580 ALT +0509586 103	QUEB SIN N	4+805	
37H +0509586	FABRICA DE TARIMAS	4+655	
	LAGUNA	4+600	
El PALMAR		3+165	
FINAL	INICIO ASF2	3+135	
LAITRE 37H +0509680	QUEB SIN N	2+610	
	FINCA	2+300	
FINCA		2+260	
37H +0509680 FALTA 17H +0509680	QUEB SIN N	2+000	
	FINCA	1+670	
37H +0509680		1+100	
FINCA		0+820	
+0509588 ALT +0509588 87	QUEB SIN N	0+515	
CASERIO	TICA LINDA	0+300	
37H 3x0900/10 1x0900	FRUVER-COX S.A	0+230	
	QUEB SIN N	0+230	
	+0509588 ALT +0509588 94		
SAHINO	250 PITAL	0+000	
(La Legua)	El Pegón		
R.	250		

Fecha	08/19
Ruta Número	746
Número Sección Camino	20970
Estado de desarrollo	1
Long. (AL DEC. K.M.)	0491
Número de puentes y pasos inferiores	02
Puentes y pasos inferiores no adecuados y/o faltantes	02
Alcantarillas faltantes e inadecuadas	05
Tipo de terreno aledaño	2
Tipo de superficie de ruedo	7
Número de carriles	2
Ancho superficie de ruedo (décimo de metro)	070
Tipo de espaldón: 0=no hay 1=apoyamiento 2=mejor 3=tierra	0
Ancho espaldón al décimo de metro utilizable max. 3,0m	00
Ancho isla central (décimo de metro)	000
Velocidad promedio (K P H) vehículos livianos	40
T.P.D.	
Terrenos contiguos 0=Rural 1=Urbano	0
Distancia desde el inicio	00000
Alineamiento horizontal	5
Pendientes	4
Distancia de visibilidad	4
Espaldones	0
Señalamiento	1
Obras de drenaje menores	3
Superficie de ruedo	4
Estructura de pavimento Bajo S/R	4
Número alterno de Sección	

OBSERVACIONES: LA ALCA EN HICHO NOSE PUDO OBSERVAR AL MOMENTO DE LA VISITA
YA QUE ESTABA TAPADO

000015

LEVANTO:		AUXILIAR:		CHOFER:	
Amado Zúñiga		Jorge Vega		Amado Zúñiga	

CODIGO TARJETA	1-2	NUMERO DE CONTROL	14-21	FACTOR:
FECHA	3-6	00020970	14-21	ODOM. INICIAL:
RUTA	8-11	NUMERO DE Puentes	23-24	ODOM. FINAL:
ESTADO DE DESARROLLO	12	NUMERO DE PASOS INFERIOR	23-26	KM. INICIAL:
LLO4/	1	00	23-26	KM. FINAL:

PASO EN LIMPIO: Jorge Vega

[illegible]

01 PTE NUEVO VIGAS HIERRO Falta Señalis
02 VIGAS HIERRO, TALLERO LOSETAS HORIZONTAL DE PROTECCION REFIENDO SALIDA LA DERECH
AMPLIAR A 2 CARRILES

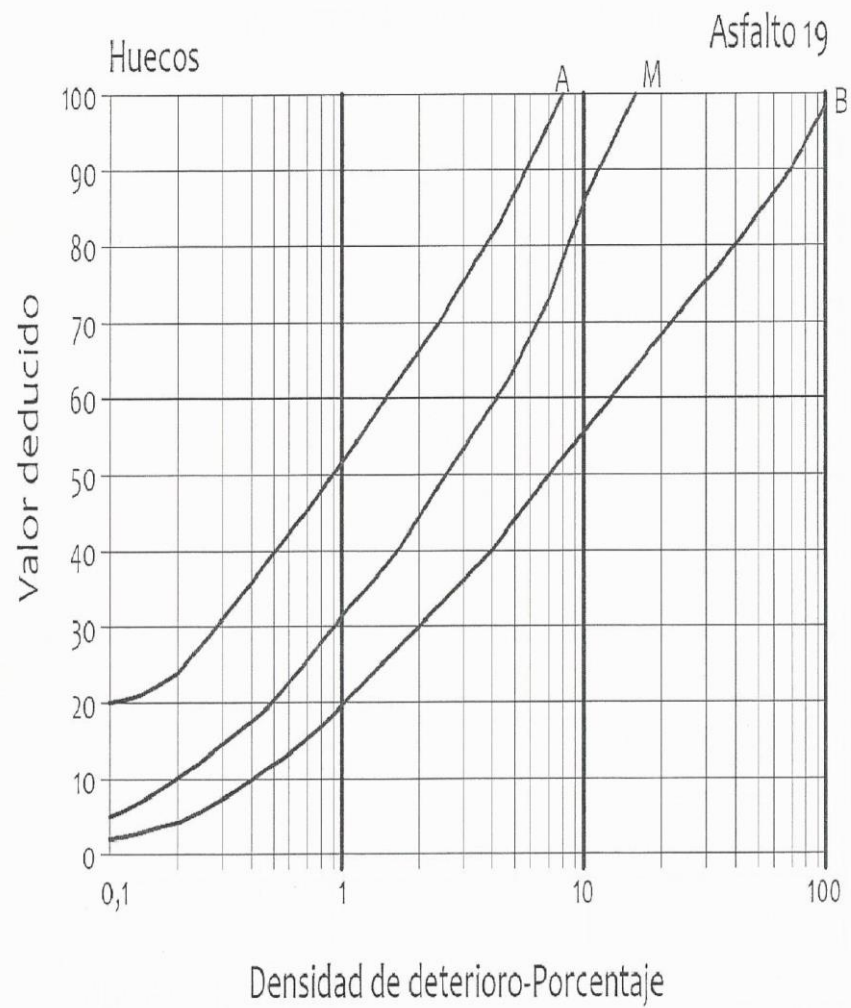
1/ Debe incluirse todos los puentes en la subsección (estructuras de una longitud, entre estribos o muros exteriores, igual o mayor de 6m.). En la descripción de los puentes se llenará una línea para cada puente. Esta hoja debe adjuntarse al Formulario No. 1, para la respectiva sección o subsección. Si falta un puente en un sitio, debe anotarse la longitud aproximada requerida.

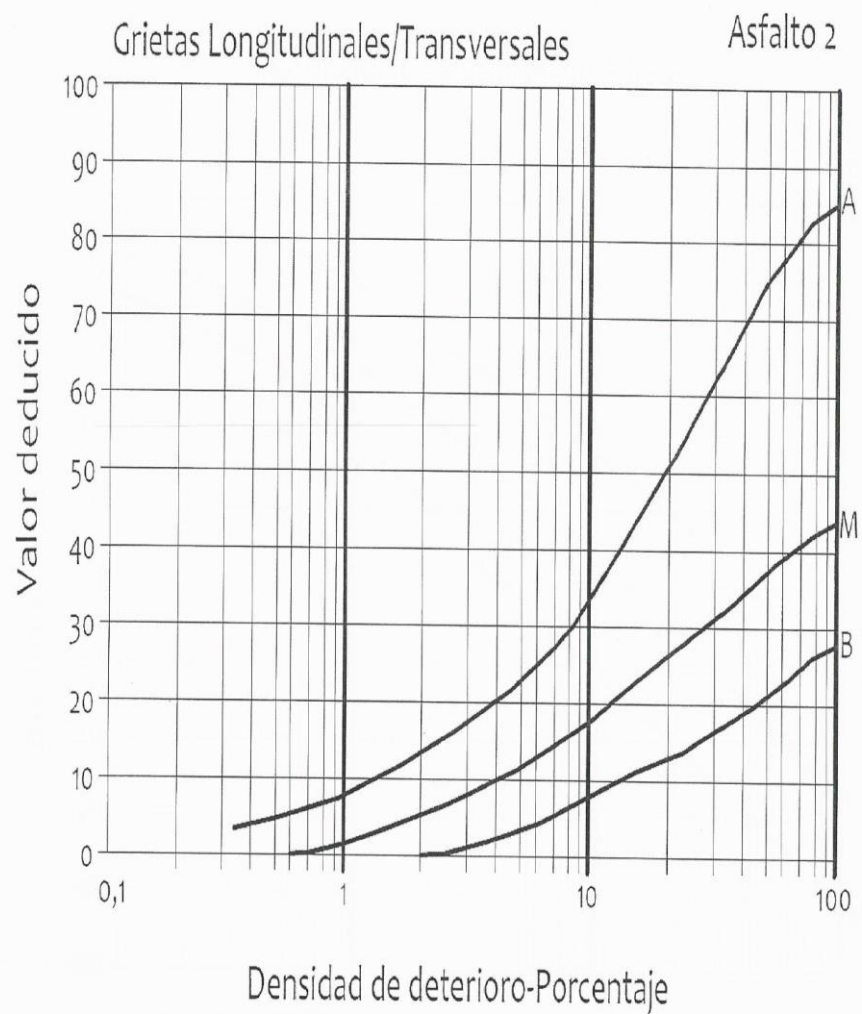
2/: Para "Funcion"=Puentes sobre Río o Quebrada
2=:Poso Superior sobre otro camino
3=:Poso Superior sobre Ferrocarril
4=:Poso inferior sobre otro camino
5=:Poso inferior bajo Ferrocarril

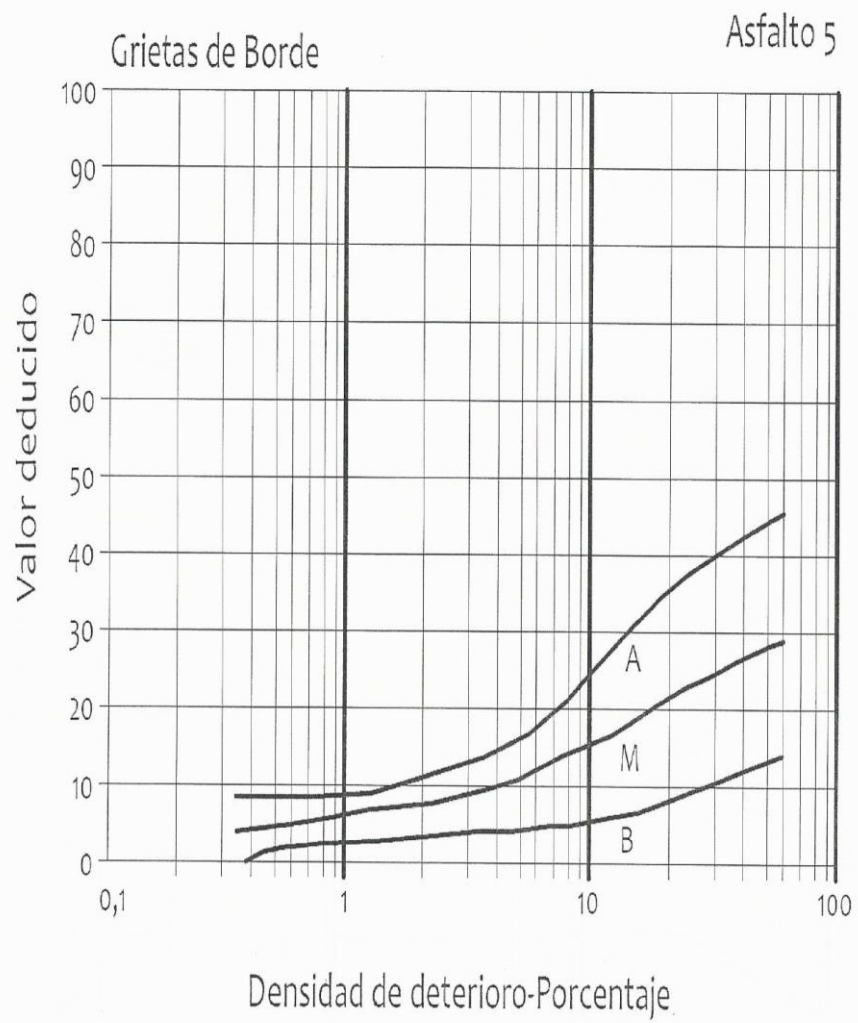
Para "Punto" 1: Tablero Inferior 2: Tablero Superior 3: Falta Punto
Para "Estructura" 1: Hormigón Armado 2: Metálico 3: Madera 4: Mampostería
Para "Tablero" 1: Hormigón Armado 2: Metálico 3: Madera 4: Otro

3/ : 1= Adecuado 2= Inadecuado

4/ Para "Estado de Desarrollo de la Sección": 1= Existente
2= En Construcción
3= Proyecto

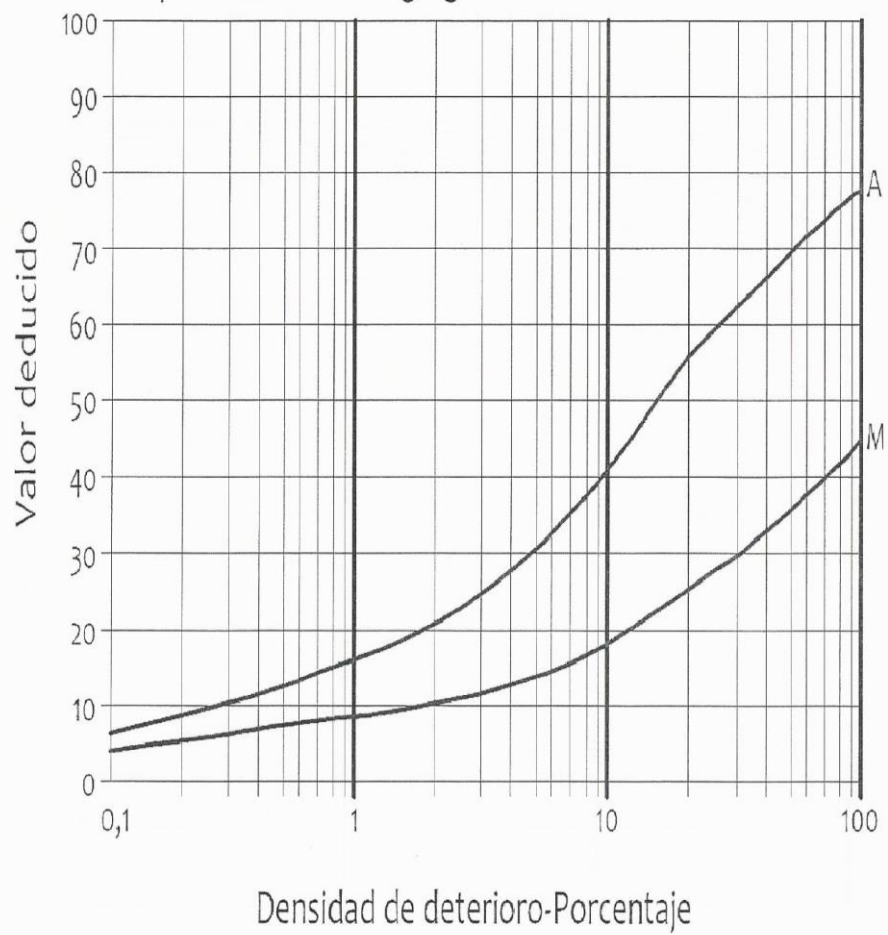






Desprendimiento de Agregados

Asfalto 15



**INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA
ESCUELA DE INGENIERÍA EN CONSTRUCCIÓN
MAESTRÍA EN INGENIERÍA VIAL**



**PROPUESTA DE ESTRATEGIAS DE CONSERVACIÓN VIAL EN RUTAS
NACIONALES NO PAVIMENTADAS CON TRATAMIENTOS SUPERFICIALES
Y SU APLICACIÓN MEDIANTE UN CASO DE ESTUDIO EN LA RUTA
NACIONAL TERCIARIA No. 746.**

Proyecto de graduación para optar por el grado académico de
Maestría en Ingeniería Vial

Realizado por:
Ing. Javier E. Brenes Pochet

Cartago, Noviembre de 2025

ANEXO 2: CONSTANCIA DE DEFENSA PÚBLICA



INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA
ESCUELA DE INGENIERÍA EN CONSTRUCCIÓN
MAESTRÍA EN INGENIERIA VIAL
CURSO IV 6404 INFORME FINAL DE PROYECTO

Estudiante: Javier E. Brenes Pochet

Nombre del proyecto: "PROPUESTA DE ESTRATEGIAS DE CONSERVACIÓN VIAL EN RUTAS NACIONALES NO PAVIMENTADAS CON TRATAMIENTOS SUPERFICIALES Y SU APLICACIÓN MEDIANTE UN CASO DE ESTUDIO EN LA RUTA NACIONAL TERCIARIA No. 746."

Fecha: jueves, 04 de diciembre de 2025

Informe escrito	Nota	%
Revisión de informe por parte del tutor: Esteban González Fonseca	93,60	60%
Revisión de informe por parte del lector: Ileana Aguilar A.	95,00	40%
Nota informe escrito	94,16	

Defensa oral	Nota
Profesor Lector: Ileana Aguilar A.	93,50
Profesor observador: Gerardo Páez G.	95,65
Coordinador Unidad de Posgrado: Irving Pizarro M.	88,75
Promedio defensa	92,63

NOTA FINAL (80% Trabajo escrito - 20% Defensa oral)

93,85

TEC | Tecnológico de Costa Rica
Firmado digitalmente por IRVING JORHANY PIZARRO MARCHENA (FIRMA)
Fecha: 2025.12.08 07:49:02 -06'00'

Prof. Dr. Irving Pizarro Marchena, Coordinador Unidad de Posgrado
Escuela de Ingeniería en Construcción

ANEXO 3: RESUMEN Y ABSTRACT

RESUMEN

El presente trabajo desarrolla un marco metodológico para la evaluación y optimización de estrategias de conservación vial en rutas nacionales no pavimentadas, utilizando como caso de estudio la Ruta Nacional Terciaria No. 746, ubicada en la provincia de Alajuela, cantón de San Carlos. La investigación integra criterios técnicos, económicos y ambientales con el fin de brindar una herramienta objetiva para la toma de decisiones en la priorización de intervenciones viales.

La metodología se estructuró en cuatro etapas principales: la revisión de aspectos técnicos y metodológicos asociados al uso de material de perfilado asfáltico (RAP); el diagnóstico del estado actual de la Ruta No. 746 mediante inspecciones de campo, registros fotográficos y análisis de durabilidad; y finalmente, la elaboración de un ranqueo de intervenciones priorizadas según la condición existente y las necesidades de conservación identificadas en la ruta.

Los resultados evidencian que el empleo de RAP constituye una alternativa viable para mejorar la durabilidad en rutas no pavimentadas, siempre que se acompañe de un adecuado control constructivo y un seguimiento periódico del comportamiento de la vía. Asimismo, el ranqueo de intervenciones aplicado sobre la Ruta No. 746 demostró ser un instrumento útil para jerarquizar necesidades de conservación y optimizar la asignación de recursos disponibles.

Se concluye que la metodología propuesta aplicada a la ruta en estudio permite establecer un procedimiento claro y reproducible para evaluar la condición de rutas no pavimentadas en contextos con información limitada, fortaleciendo la planificación de inversiones y promoviendo una gestión vial más eficiente y sostenible. Este enfoque aporta una referencia metodológica valiosa para futuros estudios y para la toma de decisiones en conservación vial a nivel institucional.

ABSTRACT

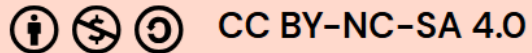
This study develops a methodological framework for evaluating and optimizing road conservation strategies on unpaved national routes, using National Tertiary Route No. 746, located in the province of Alajuela, canton of San Carlos, as a case study. The research integrates technical, economic, and environmental criteria to provide an objective tool for decision-making in the prioritization of road maintenance interventions.

The methodology was structured into four main stages: a review of technical and methodological aspects related to the use of reclaimed asphalt pavement (RAP); an assessment of the current condition of the road through field inspections, photographic records, and durability analysis; and finally, the development of a prioritized ranking of interventions based on the existing condition and conservation needs.

The results show that the use of RAP is a viable alternative for improving the durability of unpaved roads, provided it is accompanied by adequate construction control and periodic monitoring of roadway performance. Likewise, the intervention ranking proved to be a useful instrument for prioritizing conservation needs and optimizing the allocation of available resources.

It is concluded that the proposed methodology, applied to the route under study, provides a clear and reproducible procedure for assessing the condition of unpaved roads in contexts with limited information, strengthening investment planning and promoting a more efficient and sustainable road management approach. This framework offers a valuable methodological reference for future studies and for institutional decision-making in road conservation.

ANEXO 4: LICENCIA CREATIVE COMMONS



Creative Commons Attribution-NonCommercial-ShareAlike 4.0 International

This license requires that reusers give credit to the creator. It allows reusers to distribute, remix, adapt, and build upon the material in any medium or format, for noncommercial purposes only. If others modify or adapt the material, they must license the modified material under identical terms.

BY: Credit must be given to you, the creator.

NC:

Only noncommercial use of your work is permitted. *Noncommercial means not primarily intended for or directed towards commercial advantage or monetary compensation.*

SA: Adaptations must be shared under the same terms.

[See the License Deed](#)