RESUMEN – TRABAJO DE GRADO

AUTORES	**Juan José Villamizar León**
FACULTAD	**Ingeniería**
PLAN DE ESTUDIOS	**Ingeniería Civil**
DIRECTOR	**Wbeimar Alfonso Montagut Vargas**
TÍTULO DE LA TESIS	**Evaluación de la factibilidad económica y ecológica de los pavimentos naturales y sistemas de placa huella para vías terciarias en Colombia**
TITULO EN INGLES	**Evaluation of the Economic and Environmental Feasibility of Natural Pavements and Track-Slab Systems for Tertiary Roads in Colombia**

RESUMEN
(70 palabras)

El estudio analiza la factibilidad económica y ecológica de emplear asfaltos naturales y sistemas de placa huella en vías terciarias de Colombia. mediante una revisión documental y comparativa de proyectos, se evaluaron costos, sostenibilidad ambiental y desempeño técnico. los resultados evidencian que ambas alternativas son viables, aunque su implementación depende de factores territoriales y sociales. la investigación aporta criterios técnicos que orientan la planificación de infraestructura vial con enfoque sostenible y regional.

RESUMEN EN INGLES

This study examines the economic and ecological feasibility of using natural asphalts and slab track systems in tertiary roads in Colombia. Through a documentary and comparative review of projects, costs, environmental sustainability, and technical performance were evaluated. The results show that both alternatives are viable, although their implementation depends on territorial and social factors. The research provides technical criteria to guide the planning of road infrastructure with a sustainable and regional approach.

PALABRAS CLAVES	Asfaltos Naturales, Placa Huella, Vías Terciarias, Factibilidad Económica, Sostenibilidad Ecológica, Infraestructura Vial
PALABRAS CLAVES EN INGLES	Natural Asphalts, Slab Track Systems, Tertiary Roads, Economic Feasibility, Ecological Sustainability, Road Infrastructure

CARACTERÍSTICAS

PÁGINAS: 102	PLANOS: -	ILUSTRACIONES: 27	CD-ROM: -

Evaluación de la factibilidad económica y ecológica de los pavimentos naturales y sistemas de placa huella para vías terciarias en Colombia

Juan José Villamizar León

Facultad de Ingenierías, Universidad Francisco de Paula Santander Ocaña

Ingeniería Civil

Mg Wbeimar Alfonso Montagut Vargas

29 de agosto de 2025

Índice

Índice 2

Lista de figuras 5

Lista de tablas 7

Introducción 8

Justificación 10

Metodología 13

Capitulo 1. Generalidades 14

1.1 Los caminos. 16

1.1.1. Los primeros caminos 16

1.1.2. Las calzadas romanas 20

1.1.3. Los caminos durante la edad media 23

1.1.4. Los caminos en la época precolombina 26

1.1.5. Los caminos de la Colombia pre colombina. 28

1.1.6. Los caminos de reales 33

1.1.7. Los caminos durante la republica 36

1.2. Los asfaltos naturales 38

1.3. La placa huella 44

1.4. Las vías terciarias de Colombia 49

1.5. El impacto ambiental y la huella de carbono 54

Capitulo 2. Caracterización 57

2.1. Caracterización de los asfaltos naturales 57

Mina San Pedro – Armero, Tolima. 67

Mina Santa Teresa – Pesca, Boyacá. 70

Mina Las pavas - El pajuil, Caquetá 73

2.2. Placa huellas y las vías terciarias en Colombia 75

2.3. Análisis de datos 78

Capitulo 3. Factibilidad 82

3.1. Descripción de los Proyectos de Estudio 83

3.1.1. Proyecto Placa Huella: Mejoramiento Vías Rurales en Hatonuevo, La Guajira 83

3.1.2. Proyecto Asfalto Natural MAPIA: Mejoramiento Vía Acceso Campo Acordeonero (incl. El Diviso–Torcoroma), San Martín, Cesar 84

3.2. Factibilidad Económica 86

3.2.1. Análisis Económico: Proyecto Placa Huella (Hatonuevo, La Guajira) 86

3.2.2. Análisis Económico: Proyecto Asfalto Natural MAPIA (San Martín, Cesar) 87

3.2.3. Comparación Económica 87

Análisis Comparativo: 88

3.3. Factibilidad Ecológica 88

3.3.1. Análisis Ecológico: Proyecto Placa Huella (Hatonuevo, La Guajira) 89

3.3.2. Análisis Ecológico: Proyecto Asfalto Natural MAPIA (San Martín, Cesar)90

3.3.3. Comparación Ecológica 91

Capitulo 4. Resultados 93

4.1. Resultados Económicos 93

Costos de Construcción: 93

4.2. Resultados Ecológicos 94

4.3. Síntesis Comparativa Final 95

Capítulo 5. Conclusiones 97

Capítulo 6. Recomendaciones..... 99

Referencias..... 100

Lista de figuras

Figura 1 Sección transversal de carretera procesional en el templo de Ishtar, Babilonia (actual Irak)..... 17

Figura 2 Ruta de la Seda hacia el año 200 d.C (12.800 km de longitud) 19

Figura 3 *Segmento de calzada romana en la actualidad ubicada en Benaocaz, España*..... 20

Figura 4 Sección transversal de la Vía Apia, imperio romano 22

Figura 5 Ruta de peregrinación de Castilla y León, Santiago de Compostela, España 2023 23

Figura 6 Red de Caminos del imperio Inca 27

Figura 7 Rutas comerciales del imperio maya en la península de Yucatán, México. 28

Figura 8 Tipos de infraestructura en los caminos Taironas. 30

Figura 9 Caminos que conducen a la Ciudad perdida en la Sierra Nevada de Santa Marta..... 31

Figura 10 Ilustración de un carguero indígena 34

Figura 11 Tramo de camino conocido como “un gran camino a Oriente” por el cronista Cieza de León 35

Figura 12 Arena asfáltica o mapia extraída de la mina Isaza, Norcasia - Caldas. 42

Figura 13 Vía construida en el departamento de Caldas (2011) utilizando arena asfáltica extraída de la mina Isaza en su carpeta de rodadura..... 43

Figura 14 Esquema de pavimentación de tipo placa huella..... 44

Figura 15 Vehículo de diseño. Camión C-3 46

Figura 16 Sección transversal de pavimentos tipo placa huella 48

Figura 17 Distribución de la población por ubicación..... 50

Figura 18 Porcentaje de caminos rurales respecto al total de la red nacional 51

Figura 19 Condición de la red nacional de carreteras..... 53

Figura 20 Distribución de emisiones GEI en Colombia (INGEI 2021) 55

Figura 21 Alternativas de uso para el asfalto natural..... 58

Figura 22 Ubicación de minas legales de asfaltos naturales en Colombia 60

Figura 23 Ubicación del municipio Norcasia, Caldas – Mapa político Caldas 64

Figura 24 *Ubicación del municipio Armero, Tolima – Mapa político Tolima* 68

Figura 25 Ubicación municipio Pesca – Mapa político de Boyaca 70

Figura 26 Ubicación del municipio el Pajuil, Caquetá – Mapa político de Caquetá..... 73

Figura 27 Placa huella realizada en Vetas, Santander utilizando relave minero como agente cementante 76

Lista de tablas

Tabla 1. Numero de yacimientos de asfaltos naturales en el mundo ……..…….…….….41

Tabla 2. Ensayos para caracterizar muestras de asfaltos naturales invias……..……..…61

Tabla 3. Caracterización generalizada de minas legales de asfaltos naturales en Colombia……...……63

Tabla 4. Caracterización del asfalto natural de la mina La milagrosa, Norcasia, Caldas…….65

Tabla 5 Comparativa entre especificaciones invias y ensayos realizados……66

Tabla 6 Requisitos de los agregados pétreos combinados para la construcción de capas asfálticas con una mezcla asfáltica natural. (TABLA 442P-3) NORMA INVIAS - ART. 442P – 17……..69

Tabla 7 Resultados de laboratorio determina que el contenido de asfalto proveniente de la mina Santa teresa……71

Tabla 8. Caracterización de la Asfaltita (cantera santa teresa, Pesca-Boyacá) ……72

Tabla 9 Caracterización de la asfaltita de la mina Las pavas, en el Pajuil, Caquetá……...… 74

Tabla 10 Índices de pobreza rural en Colombia 2005-2023……80

Tabla 11 Comparación de características de los proyectos escogidos…….86

Tabla 12. Resultados comparativos claves obtenidos……...……97

Introducción

La red vial terciaria en Colombia es fundamental en su propósito de impulsar la economía de la nación, aunque a menudo sea subestimada en comparación con vías de mayor jerarquía. Las vías terciarias son cruciales en el desarrollo socio económico de nuestro país, pues facilitan el acceso a servicios básicos como la salud, la educación y el transporte de bienes y personas.

En muchas regiones de Colombia, especialmente en sus zonas montañosas y selváticas, la pavimentación terciaria se realiza con materiales naturales o con tecnologías alternativas. Dentro de las mismas se contempla el uso de placa huellas, que consiste en placas de concreto dispuestas sobre un suelo compactado; esta estrategia se utiliza de forma recurrente dado que en algunos casos puede ofrecer una solución factible para pavimentación por su facilidad de construcción y ligero impacto ambiental.

Sin embargo, la pavimentación terciaria presenta desafíos significativos en términos de mantenimiento y sostenibilidad, especialmente en nuestro país que cuenta con una topografía diversa y condiciones climáticas variables. Las condiciones de estas vías terciarias pueden deteriorarse rápidamente debido a la erosión, las fuertes lluvias y la falta de mantenimiento por el abandono estatal, lo cual agrava las condiciones de vida de las comunidades que se encuentran más alejadas de los cascos urbanos

En este contexto, la pavimentación terciaria en Colombia se encuentra en una encrucijada donde se deben equilibrar las necesidades de desarrollo económico con la conservación del medio ambiente mitigando los impactos socio ambientales negativos. Es por ello que se hace necesario un análisis integral que considere por igual, tanto aspectos económicos como

ecológicos en la planificación y ejecución de proyectos de infraestructura vial los cuales se reflejan directamente en la vida y entornos de estas comunidades.

Con esta investigación, se pretende recopilar proyectos de pavimentación en vías terciarias donde se utilizaron asfaltos naturales en su carpeta de rodadura y hacer una comparación de la factibilidad y el impacto ambiental que esta genera en comparación con proyectos de similares características en los cuales se utilizó pavimentos de tipo placa huella, para así brindar un análisis a profundidad en un tema de gran proyección/potencial como lo es la pavimentación terciaria de nuestra nación.

Justificación

Colombia es un país caracterizado por su diversidad geográfica y ecológica, con una extensa red de vías terciarias la cual corresponden al 67% de la malla vial total de la nación y están a cargo principalmente de los municipios (Correa Valderrama, 2017) En nuestro país el 80% de la carga se moviliza por carretera, en una red vial limitada de poca capacidad comparada con otros países latinoamericanos en desarrollo. Esto propicia el aumento de los costos y afecta la competitividad de los bienes transportados. (Pérez-Valbuena, 2005)

Rodríguez Salcedo (2019) expone que, de acuerdo a Departamento Nacional de Planeación, (2022) el 45,4 % de las vías terciarias no pavimentadas se encuentran en malas condiciones y un 36,1% se encuentras en estado regular. Lo cual sería un indicativo de la necesidad de mejorar la infraestructura vial terciaria de nuestra nación. (Rodriguez Salcedo, 2019)

Es importante resaltar la función de la red terciaria, pues esta permite la interconexión entre las veredas, las cabeceras municipales y las carreteras departamentales. Se convierten en un pilar fundamental para el enlace de las comunidades más apartadas y los centros urbanos. Aumentando también la competitividad en la comercialización de productos agrícolas, al mejorar la malla vial se podrían alcanzar procesos logísticos más eficientes en termino de tiempo y costos. (Arbeláez Agudelo, 2022)

El desarrollo de nuestra nación se ha visto afectado por el atraso en la construcción de corredores viales adecuados. Considerando que la principal actividad económica en los territorios rurales es la agricultura, estas vías no solo representan la apertura de mercados para sus productos si no también el acceso a insumos y bienes de capital. Con la mejora de la red

terciaria se impulsaría así el acceso a la producción agropecuaria, la salud y la educación. Generando nuevas oportunidades mediante el impulso del desarrollo, promoviendo la transformación y modernización de los territorios rurales se mejorarían las condiciones de vida de sus habitantes. (Perfetti, 2019)

A nivel regional Colombia ha sido pionera en la implementación de las economías circulares. En noviembre del 2018 el gobierno nacional impulsó la Estrategia Nacional de Economía Circular para promover nuevas formas de producción, consumo y aprovechamientos de desechos. La economía circular brinda beneficios económicos y ambientales, porque busca reducir la extracción de materias primas, propicia el uso de energías renovables, la reducción de emisiones y el uso eficiente del agua. (Celis et al., 2020)

En el año 2020, INVIAS adopto la Política de sostenibilidad para infraestructura de Transporte mediante la implementación de su comité de sostenibilidad. En esta nueva política, INVIAS reconoce los impactos negativos que se presentan a raíz del desarrollo no planificado y la explotación no controlada y acelerada de los recursos naturales, que afectan a nuestro país. En este enfoque INVIAS invita a la investigación académica para el desarrollo de infraestructura de transporte sustentable. (INVIAS, 2022) y define como transporte sustentable como aquel que "garantiza el acceso a los bienes y servicios esenciales, y al mismo tiempo promueve la calidad de vida y el desarrollo económico sin comprometer la capacidad de las futuras generaciones para satisfacer sus propias necesidades". Esto implica considerar aspectos como la eficiencia energética, la reducción de emisiones contaminantes, la seguridad vial, la equidad en el acceso y el uso eficiente del espacio público, entre otros. El transporte sostenible busca equilibrar las necesidades actuales con las futuras, promoviendo prácticas que minimicen el impacto ambiental y social, y maximicen los beneficios a largo plazo. (INVIAS, 2023)

Basándonos en lo hasta ahora expuesto, como parte de la comunidad académica y científica, invita a plantear nuevos enfoques para afrontar esta problemática. Se hace necesario entonces, identificar posibles alternativas para la implementación de tecnologías que sean factibles económica y ecológicamente en la pavimentación de las vías terciarias de nuestra nación. Actualmente en la UFPSO no se cuenta con un análisis investigativo que permita evaluar opciones comúnmente usadas en la pavimentación terciaria desde un enfoque ecológico.

Metodología

La metodología que se emplea se basa en un análisis documental, complementado con revisión de datos técnicos y económicos. El estudio será de tipo comparativo y descriptivo, con un análisis de la información recopilada. Para ello, se estudiarán proyectos de pavimentación en vías terciarais donde se utilice asfalto natural o placa huellas, comparando su viabilidad económica y su impacto ambiental. los criterios específicos en la comparación de ambas alternativas consideran; la factibilidad económica: Se estiman los costos de construcción y mantenimiento, la vida útil y su relación costo beneficio; la factibilidad ecológica: se considera el impacto ambiental en termino de emisión de CO2, consumo de recursos naturales, energía y agua en la producción y aplicación de cada tipo de pavimento; y además se analizarán los posibles impactos en la biodiversidad y el entorno local.

Los datos recopilados serán organizados e interpretados para generar una comparación objetiva entre ambos sistemas de pavimentación. Haciendo uso de tablas, análisis estadísticos y estudios de casos para sustentar los hallazgos. Con esta metodología se busca proporcionar una evaluación integral para la toma decisiones en proyectos de infraestructura vial, optimizando recursos y reduciendo el deterioro ecológico.

Capitulo 1. Generalidades

Para lograr sintetizar de manera adecuada los propósitos de esta investigación, se va a seccionar la investigación y el análisis de forma tal que se pueda interpretar de manera adecuada la relevancia que toman cada uno de los capítulos que conforman este estudio. Es por esto que de forma inicial se va a investigar la historia de los caminos, para lograr definir la relevancia que tienen los mismos en el desarrollo de las sociedades. Posteriormente se busca contemplar a los asfaltos naturales como un material que sea evaluable como alternativa en la pavimentación sostenible de vías terciarias en nuestra nación. Del mismo modo, se desarrollará un análisis general sobre el uso de la placa huellas en Colombia. Continuando con una interpretación general de las vías terciarias de Colombia y el manejo del impacto ambiental que se da en nuestra nación.

Los caminos han sido el tejido fundamental de las sociedades. La historia nos ha demostrado la relevancia que tomaron las vías en el desarrollo de las grandes civilizaciones. Los seres humanos hemos logrado conectar nuestras sociedades buscando siempre la forma más eficiente de transportarnos a nosotros mismos y a nuestros bienes. Esa capacidad única de comunicarnos es la que nos da como humanos la capacidad de crear y esparcir cultura; las grandes potencias actuales son muestra de ello. Como parte de la UFPSO, veo en la ingeniería civil la oportunidad adecuada para esparcir cultura a nivel regional, apropiándonos de las facultades para emitir directrices de valor vanguardistas y acertadas.

Gracias a los caminos las sociedades pudieron establecer acuerdos comerciales que permitieron el crecimiento de la cultura y la economía. Los caminos han estado en constante evolución para adaptarse a las nuevas exigencias de las sociedades (Tino Ramos, 2007) lo cual

nos podría llevar a afirmar que el origen de los caminos es a la vez el origen de las civilizaciones. Estos caminos, en la antigüedad eran de tierra, se recorrían a pie y fueron evolucionando en longitud y anchura. Paulatinamente estos recorridos permitieron transicionar a la tracción animal y posteriormente a la tracción mecánica. (García, 2017) A medida que las relaciones comerciales se fortalecían, los caminos continuaban creciendo en longitud y anchura. De forma directa también crecían las urbes que estos caminos conectaban.

El crecimiento económico que han experimentado las sociedades va ligado de forma directa a su capacidad para movilizar sus bienes y servicios. En el pasado, el comercio se daba entre personas de diferentes regiones que realizaban travesías para conseguir bienes exclusivos (telas, tintes, especias, etc.) para su época; la dificultad de estas empresas aumentaba el costo de dichos bienes y servicios lo cual podía ser beneficioso para los comerciantes si lograban completar sus extensos viajes. Estas grandes sociedades permitieron el desarrollo cultural de forma continua; comerciantes, militares y población civil en general recorrían las regiones llevando a su paso, noticias, aparejos, técnicas, ingredientes y un sinfín de elementos que propiciaba un intercambio culturar entre ellos.

Los caminos en las regiones (así como las autopistas en los países) son la columna vertebral de las economías, en las que la agricultura, la extracción de materias primas y el comercio representan la mayor parte de su actividad comercial. Existe una relación directa entre las condiciones de las vías y los sobrecostos en el comercio regional. Normalmente las regiones más apartadas son las que no pueden realizar mantenimientos adecuados a sus vías cayendo entonces en una desconexión que amplifica el distanciamiento al gobierno. El mantenimiento y la construcción de nuevos corredores viales debería ser una prioridad para los gobernantes; el fortalecimiento de las economías regionales da un real impulso a la economía nacional. Las vías

dejan de ser meras infraestructuras físicas y ganan importancia excepcional al representar un motor para la economía. Con una red vial bien diseñada y mantenida de forma adecuada se pueden reducir los costos, mejorar los tiempos y aumentar la competitividad de las regiones, promoviendo el desarrollo mediante la mejora de la calidad de vida de las personas.

Al ser un país de regiones, causa que Colombia presente considerables diferencias tanto en aspectos económicos como socio-culturales. Cada región produce un esquema económico centralizado en el cual se aglomera la mayor parte de su actividad e infraestructura en sus núcleos. (Galvis, 2002) Por lo cual, cada región puede solicitar consideraciones diferentes al momento de desarrollar las estructuras viales que los mantengan competitivos frente a regiones de similares características.

En su tesis de maestría (Rengifo Gutiérrez, 2018) plantea que las políticas nacionales en materia de infraestructura vial privilegian el actual modelo económico exportador; dando ventajas comerciales a industrias específicas y cuestiona si las inversiones que se desarrollan en materia vial, distribuyen la prosperidad de forma equitativa o si buscan un crecimiento macroeconómico que rezaga aún más las ruralidades y los pequeños municipios.

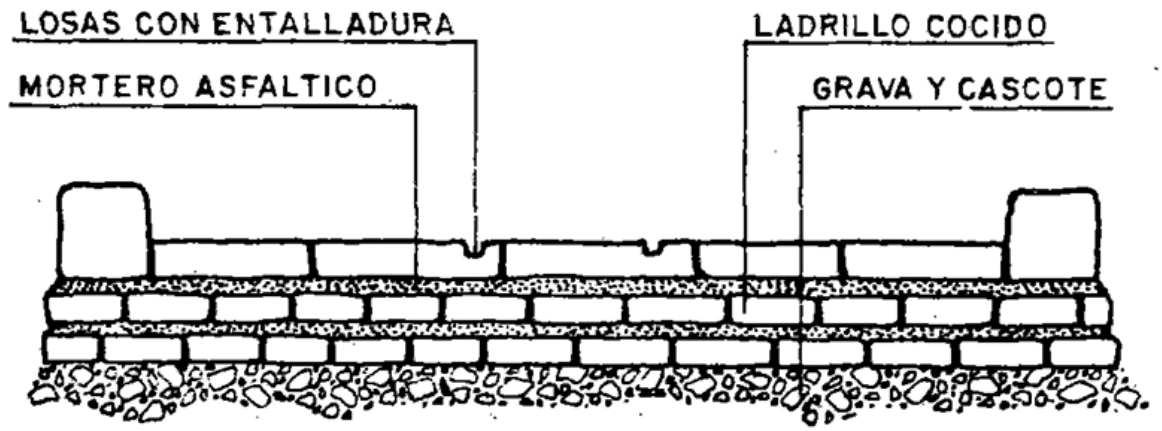
1.1 Los caminos.

1.1.1. Los primeros caminos

Los primeros registros de caminos de largas distancias datan del 3500 a.C, con la carretera real persa, que recorría desde Susa (actual Irán) a Esmirna (actual Turquía) con una longitud de 2.957 km que tomaba 93 días en recorrerla. (Zorio Blanco, 1987)

Figura 1

Sección transversal de carretera procesional en el templo de Ishtar, Babilonia (actual Irak)



Nota: Extraído de *Breve historia de las carreteras (Zorio Blanco, 1987)*

Aunque la mayor parte de estas rutas eran vías simplemente aplanadas o rellenadas para brindar confort a sus usuarios, también se registran carreteras (figura 1) procesionales que contaban con un diseño por capas. Estas carreteras procesionales más recientes (700 a 600 a.C.) estaban construidas de ladrillo cocido y piedra que se unían con un mortero bituminoso. Se especula que no eran usadas para el tráfico común y es posible que fueran precursoras de las calzadas romanas. (Zorio Blanco, 1987)

En china las carreteras imperiales coexistieron con la carretera real persa; contaban con una longitud de unos 3.200 km conectaba a las ciudades de Xian Fu, Nan King y Cheng Tu. Estos caminos eran de mala calidad dada la naturaleza montañosa del imperio chino, pero desempeñaron un papel fundamental para el desarrollo del sureste asiático. Se encuentra evidencia que en el norte de Europa se construían caminos formados por troncos para conducir el tráfico por zonas de pantanos y humedales. Se construían extendiendo troncos en el sentido del flujo sobre un lecho de ramas de 6 m, las cuales se cubrían perpendicular mente con troncos de

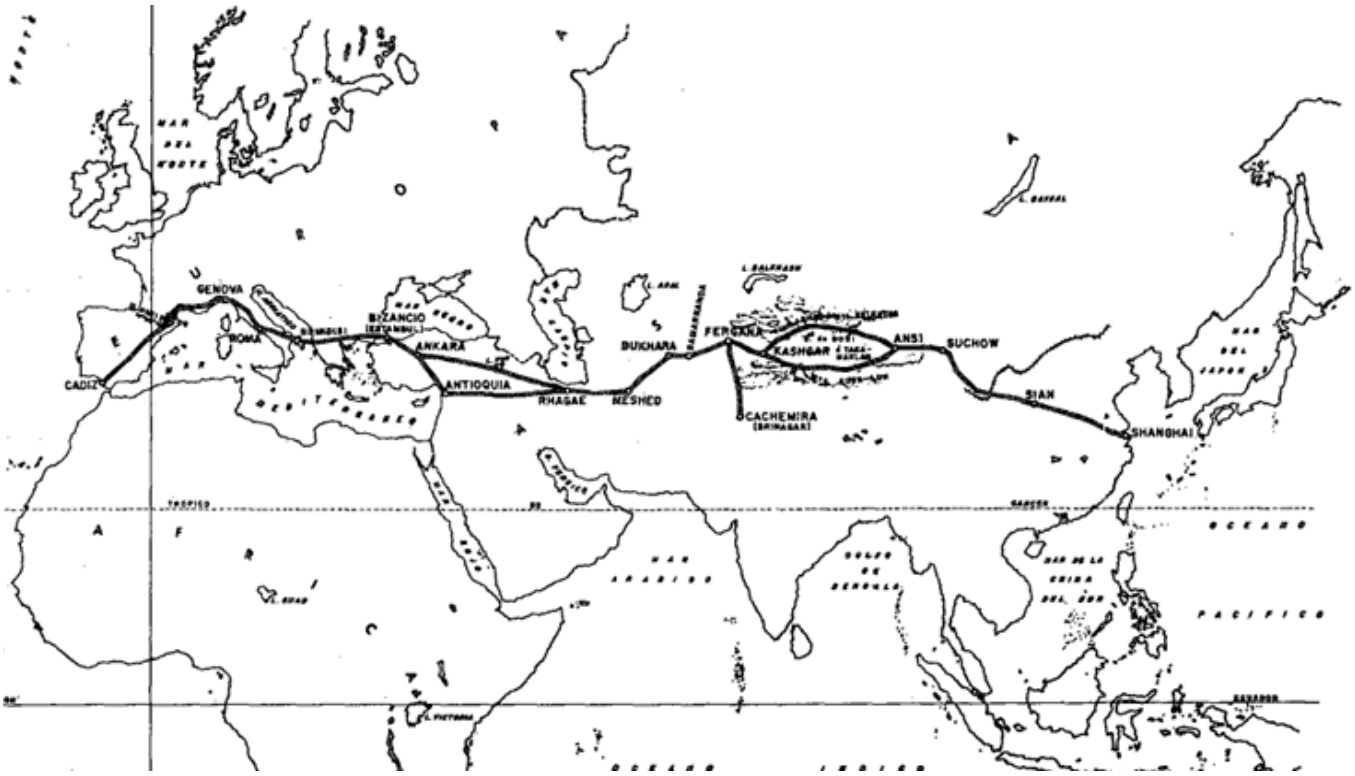
entre 2,7 m y 3,6 m extendidos de lado a lado y que a su vez se cubrían con arena, grava y césped. (Zorio Blanco, 1987)

También existió una ruta comercial muy importante y ampliamente conocida como la ruta de la seda. Estuvo en funcionamiento por 1.400 años y es una de las rutas de mayor extensión. Al conectarse con las calzadas romanas dio lugar a la ruta más larga del mundo durante más de 2.000 años. Iniciaba en *Gades* (hoy Cádiz, España) y terminaba en Shanghái (China) con una longitud de 12.800 km.

El origen de esta ruta se encuentra en el comercio de seda y otros productos que se dio entre Europa y Asia a partir del siglo I a.C. Si bien alcanzó su apogeo en la Edad Media, especialmente en el siglo XIII, en que se produjo una expansión económica y demográfica en Europa que facilitó el desarrollo de las ciudades; fue en este periodo donde se produjo el paso del sencillo arte románticо de base rural al grandioso gótico de la luz y las catedrales urbanas. En este proceso, la formación de una burguesía de carácter urbano y el fortalecimiento del comercio supusieron un aumento en la demanda de sedas en Europa, que entraban principalmente por Italia y Constantinopla, y en menor medida por los puertos del sur de Francia y España.(Sanz García, 2022) propiciando la mejora de los caminos por los cuales los comerciantes realizaban sus expediciones.

Figura 2

Ruta de la Seda hacia el año 200 d.C (12.800 km de longitud)



*Nota***:** Extraído de *Breve historia de la carreteras* (Zorio Blanco, 1987)

La ruta de la seda iba más allá que un intercambio de bienes. Eran miles de pequeños caminos que al interconectarse permitieron además un intercambio de religiones, culturas, ideas y tecnologías. Pues es en la interconectividad donde nace el desarrollo de las sociedades, como lo propicio la ruta de seda, que permitió alcanzar la cúspide comercial a los pueblos que de ella se beneficiaban. Desde el silgo I la ruta de la seda fue el más importante motor de integración cultural y política entre Europa, Asia y África (Martínez Portomeñe, 2020)

Durante este periodo antiguo la humanidad no tenía noción del papel que representaban los caminos en el desarrollo de las civilizaciones y en todas las actividades del país, especialmente en las de mayor importancia de la época (la administrativa, política y comercial)

pero corresponde a los romanos el mérito de entender el rol que tenían los caminos estatales (construidos y mantenidos por el estado) para mantener unificado el dominio y el poder centralizado que controlaba todas sus actividades desde Roma, lo que los lleva a construir una extensa red de caminos con el fin de asentar su poder político y militar. (Regal Alberti, 1936)

1.1.2. Las calzadas romanas

Con el surgimiento del imperio romano y su civilización inicialmente monárquica y su transformación a imperio, impulsaron la evolución de lo que hasta ahora eran caminos y rutas a carreteras diseñadas, planeadas y construidas con una calidad tal que aún se encuentran segmentos en buen estado.

Figura 3
Segmento de calzada romana en la actualidad ubicada en Benaocaz, España



Nota: Tomado de *(*LA CALZADA ROMANA - Ventana del Visitante - CMAOT*, s. f.)*

En la cumbre de su imperio, el sistema de carreteras romano alcanzaba unos 140.000 km. Todas sus calzadas iniciaban en Roma, capital del imperio y cubrían las provincias y conquistas

importantes, pues de acuerdo a la ley romana toda persona tenía derecho a usar las carreteras romanas y los designados para su mantenimiento eran los habitantes de las provincias o distritos por el que pasaban. (Tino Ramos, 2007)

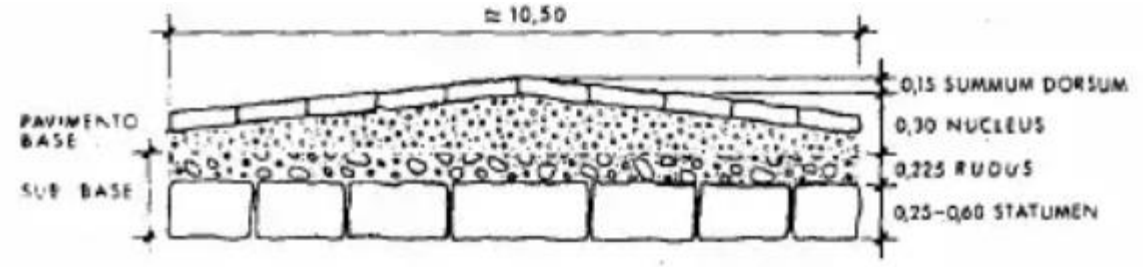
Fueron los romanos los primeros en construir sus carreteras de forma científica, llamadas comúnmente calzadas *(construidas de calx, calcis, piedra caliza)* Su técnica fue muy elaborada y su modelo fue utilizado por más de 2000 años. (Zorio Blanco, 1987)

Las calzadas romanas eran notables por su trazado rectilíneo, sin reparar en obstáculos pues surcaban pantanos, lagos, barrancos y montañas. Su técnica fue muy depurada para mejorar la construcción de sus caminos buscando optimizar tanto el uso de sus materiales como el tiempo de construcción. Podemos ver en una de sus calzadas más conocidas, la vía Apia (Tino Ramos, 2007) una vía militar que conectaba a Roma con Bríndisi (importante puerto para el comercio en el mar mediterráneo) por aproximadamente 212 km de extensión. (National Geographic, 2022)

La vía Apia se considera la máxima expresión de calidad romana; era construida en capas: Inicialmente en el terreno natural se esparcía un manto delgado de arena o mortero para posteriormente verter una capa de piedras planas que llamaban "*statumen"* de entre 25 y 60 cm de espesor, sobre la cual se extendía una capa de residuos de cantera que se mezclaba con cal a la que llamaban "*rudus"* de 22,5 cm de espesor. El "*statumen"* y el "*rudus"* formaban lo que hoy conocemos como subbase. Después, una capa de piedra partida aglomerada con una mezcla de cal y una pequeña cantidad de óxido de magnesio que tenía unos 30 cm de espesor. Esta capa era llamada "*nucleus"*, que a día de hoy conocemos como base. Continuando con una capa de baldosas de piedra con mortero y cal de 15 cm de espesor conocido como "*summa crusta"* la cual vendría a ser la capa de rodadura o pavimento. Generando una calzada con un espesor que variaba entre 90 y 150 cm de muy alta resistencia. (Zorio Blanco, 1987)

Figura 4

Sección transversal de la Vía Apia, imperio romano



*Nota***:** Extraído de *Breve historia de las carreteras* (Zorio Blanco, 1987)

Las calzadas construidas de esta forma eran conocidas como calzadas de primera categoría. Las calzadas de segunda categoría generalmente no contaban con el enlosado de pavimentación y en las de tercera categoría podían ser simplemente de tierra. La expansión romana por Europa y el Mediterráneo fue posible por el desarrollo que supieron hacer de estas infraestructuras y la gran capacidad que tenían las legiones romanas para construirlas. Sin las calzadas, Roma no habría sido lo que fue y sin Roma, las carreteras no habrían logrado tener el carácter civilizador que han tenido históricamente. (Sanz García, 2022)

Con la caída del imperio romano en occidente y su posterior fragmentación en pequeños reinos y estados feudales, llevaron a una serie de cambios significativos en la forma en la que se organizaban y se comunicaban las sociedades de la región. Los caminos posteriores a la caída del imperio romano fueron determinantes en la supervivencia y el crecimiento de las nuevas sociedades emergentes. La red vial romana, que había sido mantenida por siglos, continuaría siendo fundamental para el tráfico y el comercio en la región. Muchos de los trazados originales de estos caminos se deterioraron, o desaparecieron. (Santos, 2017) Algunos otros fueron utilizados como productos de cantería y fueron desmantelados para otros usos (Regal Alberti, 1936). Las invasiones bárbaras y la inestabilidad de las monarquías godas hicieron imposible

abordar el desarrollo de calzadas ya que los godos desconocían las tecnologías que utilizaron los ingenieros romanos.

1.1.3. Los caminos durante la edad media

Posteriormente durante la edad media fueron las iglesias y monasterios quienes se dedicaron a mantener nuevas rutas y caminos. Las peregrinaciones religiosas a lugares sagrados motivaron la mejora y expansión de los caminos. A su vez, el comercio a larga distancia genero interdependencia entre distintas comunidades y fomento el desarrollo de sistemas monetarios unificados, bancos y prácticas comerciales más sofisticada. (García López, 2023) Con el intercambio continuo de ideas, tecnologías, religiones, arte y conocimientos científicos se enriqueció la diversidad cultural y se promovió el desarrollo intelectual de estas sociedades.

Figura 5

Ruta de peregrinación de Castilla y León, Santiago de Compostela, España 2023



Nota: Tomado de (National Geographic, 2023)

La violencia era muy común a manos de bandidos que pululaban estas rutas y las noblezas se involucraban en empresas militares y guerras privadas para proteger sus intereses económicos y políticos. Esto conllevo a una crisis del sistema feudal que se había implementado generando una disminución notoria en la riqueza de los nobles lo cual los motivo a buscar nuevas formas de prosperar (Alarcón Dallos et al., 2023)

Los señores feudales conservaban algunos puentes y tramos de calzada por los que cobraban derechos de paso, pero no contaban con plan para conservar sus vías por lo que se convirtieron en caminos intransitables. Esta circunstancia era agravada por la carencia de suspensión de los carros y carretas que apoyaban todo su peso sobre los ejes de las ruedas, lo cual generaba que los viajeros debían soportar todos los golpes que la irregular superficie de rodadura provocaba (Zorio Blanco, 1987)

Así se propició el surgimiento de las plazas y los mercados, los cuales se convirtieron en centro sociales y de comercio fundamentales, donde se motivaba la creación de nuevos empleos, la reunión entre comerciantes y viajeros y el intercambio de bienes y servicios. Esta dinámica social generaba un continuo crecimiento económico y el fortalecimiento de la incipiente sociedad del medio evo. (Asenjo González, 2001)

Se hace evidente la relación que mantenía el desarrollo de las sociedades y las condiciones de los caminos que las conectaban. Pues no era solamente contar con el trazado de los caminos, si no también era necesario que estos caminos fueran seguros y dieran a sus usuarios indicaciones adecuadas para llegar a sus destinos. Los caminos se convirtieron en las arterias del sistema social de la humanidad que se mantuvo así durante mucho tiempo en el mundo durante la edad media.

Hablando de ingeniería vial, la era moderna se puede referir al periodo histórico que transcurre entre el descubrimiento de América y la primera revolución industrial. El estado de la técnica entre el 1492 y 1820 comprende dos partes claramente diferenciadas en el desarrollo tecnológico de carreteras. Desde el descubrimiento de América hasta mediados del siglo XVIII, su construcción se caracterizaba principalmente por las técnicas medievales: Tramos interurbanos montañosos que usaban la técnica del encachado de piedra, mientras que, en los tramos llanos, los firmes eran principalmente granulares y de considerable menor calidad y durabilidad que las técnicas romanas. En las proximidades a los centros del poder (capitales, grandes colonias y centros de comercio principal) se presenta con relevancia el uso de adoquines o enlosados. De forma inicial, durante el siglo XVII se da inicio a la academización de los sistemas en la construcción de caminos. Con esto se buscaba fijar criterios de acuerdo al tipo de terreno que se iba a intervenir (se consideraba la necesidad de los vehículos de tracción animal de contar con trazados que contaran con una estructura firme y una rodadura estable, pues las pendientes muy pronunciadas eran muy peligrosas para los mismos). (Sanz García, 2022)

Durante el reinado de Luis XV, iniciaría lo que se considera como la segunda etapa del desarrollo de las carreteras durante la modernidad con la apertura en 1747 en Paris de la *Escuela Real de Puentes y Calzadas.* Logrando la tecnificación y profesionalización en la construcción de carreteras en Europa. Sanz García asegura que esta modernidad desde el punto de vista tecnológico duraría hasta la irrupción de los ligantes bituminosos a finales del siglo XIX que surgió de la extracción del petróleo, abriendo una nueva era en la ingeniería vial. (Sanz García, 2022)

1.1.4. Los caminos en la época precolombina

El imperio inca. Durante el bajo medio evo, se alza la civilización inca como los constructores de una de las mayores redes viales de la historia humana. El imperio inca fue el estado más grande de la América precolombina. La red de caminos incas era la columna vertebral del imperio, ya que, a través de sus calzadas, se materializo el sistema administrativo por medio del control territorial, el transporte y la comunicación. Los caminos incas no fueron carreteras propiamente diseñadas para el tráfico rodado, ni tampoco caminos públicos abiertos a todo el mundo. Esta red era usada principalmente por funcionarios, soldados y oficiales que viajaban por asuntos estatales. Aunque algunos de sus tramos son anchos y bien construidos, la mayor parte de los mismo se trata de senderos estrechos que no podrían considerarse carreteras. (Sanz García, 2022)

La red inca llego a tener aproximadamente 23 000 km de longitud y su trazado se desarrolló en una de las zonas más montañosas del mundo, los andes. Esta red está compuesta principalmente por 3 caminos troncales, que se conectaban entre sí por una red secundaria.

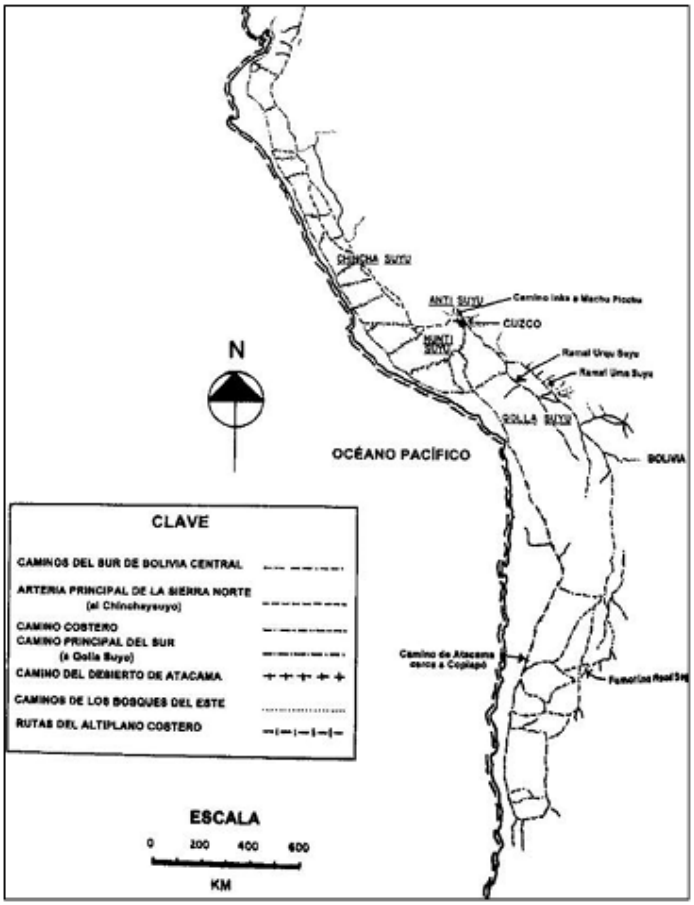
Camino principal al norte: Era la vía principal del imperio. Conectaba la capital, Cuzco, con el centro de poder en Quito. Ya que se trataba de una vía principal, en sus tramos se encontraban elementos constructivos artificiales que dan muestra de ingeniería en su diseño.

Camino principal de la costa: Este camino se extendía desde el sur de Ecuador hasta el norte chile. Construido por el deseo del emperador Huayna Capac de crear una vía que atravesara el rio Guayas

Camino principal al sur: Este camino conecta Cuzco con el sur del imperio. Fue el segundo camino más importante y es muy similar al camino del norte. Este camino se encuentra

en un pobre estado de conservación pues la actividad agrícola a destruido amplias secciones de este camino.

Figura 6
Red de Caminos del imperio Inca



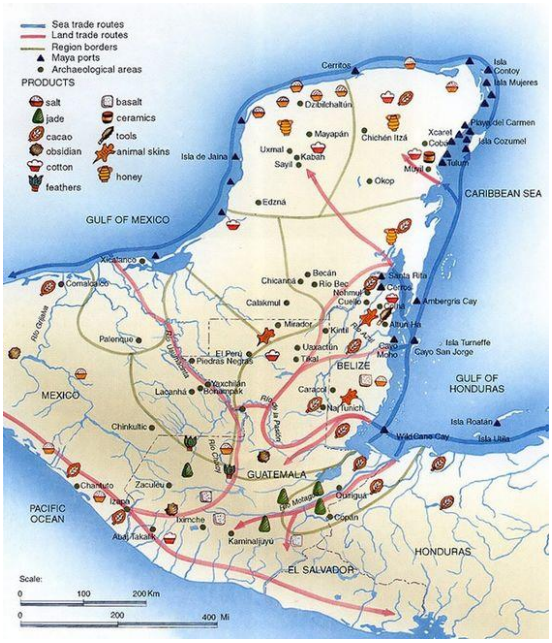
Nota: Extraído de *Evolución del firme de carreteras* (Sanz García, 2022) p 117.

El imperio Maya. Los mayas dominaron rutas comerciales desde Panamá hasta las costas del golfo de México. Trazando rutas terrestres por Guatemala y el salvador. Concibieron la ruta del Caribe que unificaba sus territorios, rodeando la península de Yucatán e internándose en el golfo de México. Los comerciantes mayas que pertenecían a la nobleza eran conocidos como *Polom* quienes dominaban las grandes rutas comerciales. Mientras que los pequeños

comerciantes que viajaban de pueblo en pueblo se les conocía como *Polomyok*. A lo largo de la península de Yucatán existieron los caminos blancos que comunicaban a las ciudades del imperio y favorecían así el intercambio comercial entre las mismas. Algunas de sus rutas más importantes fueron conocidas como Uxmal – Kabah y Izamal – Aké. Estas rutas contaban con protección para comerciantes y peregrinos que las utilizaban.

Figura 7

Rutas comerciales del imperio maya en la península de Yucatán, México.



Nota: Tomado de *"Tulum: The City that Greets the Dawn"* (Quinn, 2023)

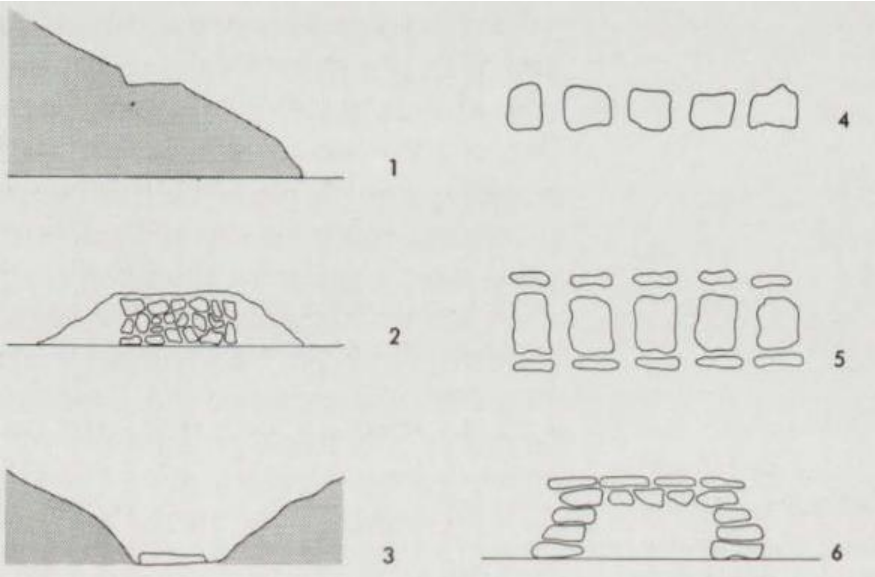
1.1.5. Los caminos de la Colombia pre colombina.

Antes de que iniciara la conquista y colonización ya existían en nuestro país caminos y carreteras que fueron construidos por los nativos. Estos caminos enlazaron poblados y comunicaban regiones muy distantes a través de cordilleras, paramos, desiertos, selvas y abismos insondables. (Gómez Casablanca, 2006)

Se tienen registros de que los *Taironas* construyeron en la sierra nevada de Santa Marta una extensa red de caminos enlosados. A la llegada de los españoles en esta región en 1525 los cuales encontraron estos caminos, pero no pudieron utilizarlos eficientemente pues no estaban diseñados para animales de carga si no para el transporte a pie. Después de un siglo en desuso estos caminos fueron consumidos por la selva. Posteriormente en 1922 el arqueólogo John Alden Mason confirmo que existió una amplia y compleja red de caminos, así como grandes aldeas construidas con piedra. Mason describió estos caminos como *una obra de ingeniería admirable.* Posteriormente el Instituto Colombiano de Antropología de la mano de las investigaciones del profesor Reichel Dolmatoff terminarían descubriendo la hoy conocida Ciudad Perdida Tairona en 1976. (Gómez Casablanca, 2006)

Los Taironas utilizaban estos caminos para el intercambio comercial de productos como la sal, el pescao, las conchas de mar, el algodón, las hojas de coca, joyas de oro y algunos textiles. De estos caminos se pueden identificar 6 tipos, siendo los más sencillos los que se componen de una sola línea de piedras espaciadas varios centímetros, hasta los de compleja estructura, con un desmonte o banqueo elaborado que podía alcanzar de 4 a 6 metros de ancho, con piedras trabajadas en formas rectangulares. (Cadavid Camargo & Falchetti, 1987)

Figura 8
Tipos de infraestructura en los caminos Taironas.



Nota: Tomado de *Buritaca 200 Arqueología y conservación de una población precolombina.* (Cadavid Camargo & Falchetti, 1987) *p. 63*

En la imagen 1 vemos un desmonte positivo del terreno sobre las curvas de nivel; en la imagen 2 vemos un rellenos en cascajo con un recubrimiento de tierra apisonada, para aumentar la estabilidad; en la imagen 3 vemos un banqueo negativo, para señalar el paso se utiliza una laja usada comúnmente en cañadas secas; la imagen 4 representa un camino con lajas irregulares separadas para demarcar la huella; la imagen 5 es similar a la anterior pero incluyendo lajas verticales para delimitar la huella; la imagen 6 ilustra un banqueo positivo con muros laterales.

Las huellas están formadas por lajas continuas. Estos caminos desempeñaron un papel crucial para lograr una comunicación efectiva entre las poblaciones relativamente distantes y localizadas en diferentes vertientes convirtiéndolas en poblaciones que mantenía una estrecha comunicación entre sí y pertenecían a un sistema de asentamientos que dependían entre sí. (Cadavid Camargo & Falchetti, 1987)

Figura 9
Caminos que conducen a la Ciudad perdida en la Sierra Nevada de Santa Marta



*Nota**:** extraído del blog: Ciudad Perdida: el trekking más espectacular de Sudamérica* (Arandia, 2019)

Por su parte, el historiador Ernesto Restrepo Tirado, registra que el valle de aburra donde hoy está situada la ciudad de Medellín, era el centro de los indígenas Catíos. Restrepo Tirado asegura que el conquistador y mariscal Jorge Robledo (conocido como el conquistador de Antioquia) encontró anchas calzadas talladas en rocas vivas con el estilo utilizado por los taironas, pero de mayor amplitud. El investigador Darío Ruiz Gómez expone la existencia de caminos previos a la llegada de los españoles. Esta red de caminos llegaba a comunicar incluso con centro América y el sur del continente; eran una seria de vías que permitieron a los conquistadores españoles "abrir trocha" para encontrar sociedades con economías complejas y desarrolladas en sus producciones. De acuerdo a Herman Trimborn, en la Antioquia indígena, para ser más exactos en el lugar conocido como Buriticá existió un importante centro de mercado precolombino. Desde este punto partían cuatro caminos, uno que se dirigía al Urabá, otro hacia la

sierra nevada de santa marta, uno más hacia territorios de los muiscas y otro hacia el territorio de los indígenas quimbayas. (Cadavid Camargo & Falchetti, 1987)

En la cordillera occidental podemos encontrar los vestigios de la civilización *Guane*. Los guanes construyeron caminos públicos que los comunicaban con los centros de sus diversas agrupaciones. Estos caminos seguían la dirección que los indígenas consideraban recta y remontaban en zigzag las cordilleras al borde de sus imponentes filos. No consideraban lo que hoy conocemos como curvas de nivel para suavizar las pendientes del camino.

El trazado de los caminos y carreteras de la Colombia precolombina buscaba suplir las necesidades de los indígenas nativos: el comercio, el control militar, el correo y las conexiones entre aldeas y regiones. A estos caminos les daban diversos usos, bien fuera para acarrear leña o agua, para pescar e incluso para hacer peregrinaciones. Las cumbres de las colinas eran sagradas dentro de las culturas andinas precolombinas. Estos caminos con frecuencia ruteaban los filos de las montañas y en otras discurrían sobre laderas imponentes; bordeaban precipicios inmensos y en ocasiones adaptaban sus trazados para suavizar las pendientes. Estos caminos indígenas eran abiertos en base a sus experiencias y su sabiduría milenaria y serían los españoles durante la colonia quienes los retomarían para convertirlos en *caminos reales,* aunque una gran parte serian olvidados. (Cadavid Camargo & Falchetti, 1987)

Importantes tramos de las carreteras actuales de nuestro país fueron trazados siguiendo los caminos reales en la época de la colina, de igual forma estos caminos reales se basaron en los caminos precolombinos para mejoraron las condiciones de las trochas y caminos indígenas. Esta superposición de rutas obedece a las características variables de nuestra topografía, donde se alternan valles, ríos y cordilleras. Lo cual era un reto que obligaba a buscar puntos críticos para

surcar las montañas y puntos de mayor estrechez en los causes de los ríos para vadearlos o incluso construir puentes. (Baquero Osorio, 2014)

Trazar caminos implicaba conocer las ventajas de la naturaleza para superar sus obstáculos. Los caminos casi siempre gozan de una existencia prolongada, los cuales se ven modificados en los diferentes periodos de quienes les dan uso. Antes a la llegada de los europeos, los indígenas definieron y trazaron múltiples caminos con los que lograban integrar sus culturas a la naturaleza y a su vez intercambiar sus productos. Las villas que posteriormente serian fundadas por los españoles en el nuevo mundo les permitieron apropiarse de estas tierras, funcionando como centros de colonización y expansión de las fronteras coloniales, sobrevivieron gracias a los caminos que las comunicaban entre sí. Estas vías adquirieron la calidad de *caminos del rey*. Estos caminos reales o caminos del rey se cimentaron sobre las antiguas rutas indígenas que habían sido establecidas a lo largo de su historia. (Useche Lozada et al., 1995)

1.1.6. Los caminos de reales

Si bien no existe una definición clara sobre lo que es o se llamó "*camino real"*, comúnmente se les llama a aquellos caminos que, dada su importancia, fueron costeados por la Real Hacienda de la corona española. El costo de la construcción y el mantenimiento estaban a cargo de los beneficiarios de la obra, de acuerdo a la ley. (Páez Botero, 2010)

Los caminos reales españoles consideraban que por ellos transitarían, además de las personas, también los caballos, los bueyes, las mulas y los llamados *indios cargueros.* (Baquero Osorio, 2014) cumplían características espaciales como el ser empedrados, manejar las aguas y controlar los cambios en su superficie. Estos caminos, fueran reales o no, no eran carreteables (LaRosa & Mejía, 2014)

Figura 10

Ilustración de un carguero indígena



Nota: Extraído de Caminos reales de Colombia (Useche Lozada et al., 1995) p. 9

Con la llegada de los españoles, llegaría a su vez la rueda, pero los caminos reales llegarían a ser carreteables hasta mucho tiempo después durante la época de la república. Los caminos más importantes durante esta época fueron de herradura y se parecían más a los caminos incas dado que estaban diseñados y construidos de forma tal que, a pie se recorrían fácilmente, pero no era lo mismo para las bestias de carga, los caballos y las carretas. Estos caminos contaban con escalones para atravesar las montañas facilitando salvar alturas considerables, lo cual imposibilitaba su uso como rutas comerciales recurrentes. “El costo de transportar mercancías a través de las regiones era más alto que el de enviarlas a Europa”. (Baquero Osorio, 2014)

Figura 11

Tramo de camino conocido como "un gran camino a Oriente" por el cronista Cieza de León



Nota: Tomado de *Redescubriendo los caminos antiguos de Colombia.* (Botero Páez, 2007)

Estas dificultades no redujeron el ritmo de los transportes durante la colonia, a pesar de su lentitud y altos costos causados por la precariedad de los caminos; las personas y mercancías, así como el correo, las noticias y los edictos del gobierno llegaban sin falta a las diversas poblaciones. Aunque la frecuencia de los viajes no era alta, la gente simplemente nacía y moría en el mismo sitio; cuando debían realizar viajes a lugares lejanos, debían planearlos con antelación entendiendo que les podía tomar meses o años en completarse.(LaRosa & Mejía, 2014) El costo del transporte de personas y mercancía eran tan elevado que imposibilitaba cualquier tipo de economía articulada. Todos se debía transportar por bestias a través de caminos vírgenes de selva espesa que conducían a puertos precarios a lo largo del Rio magdalena. Llegando así a Cartagena y luego a España; para de regreso volver con encomiendas, bienes y lujos a las poblaciones al interior de las cordilleras y planicies del país.

1.1.7. Los caminos durante la republica

Ya en el siglo XIX se pudo lograr una mejora considerable en los recorridos de la red carretera del país, pues fue ampliada significativamente y se dieron a la labor de construir caminos carreteables. Surgiendo así la noción del *Camino Nacional*. Esta denominación suponía que el estado consideraba a estas rutas como de utilidad pública, dictando medidas especiales para su mantenimiento y conservación. En el año de 1845, en un decreto del 16 de junio se establece lo que se considera el primer plan para una red de caminos nacional que buscaba garantizar la comunicación de la capital con los puertos y las fronteras con otros países. Para lograr esta mejora en la red de caminos, el estado ofreció terrenos baldíos y fomentaron la inmigración de técnicos mientras facilitaban la mano de obra que era ejecutada por los prisioneros de cada región. (LaRosa & Mejía, 2014)

En el año 1873 surge la fiebre vial en la nación y se propicia la construcción de caminos carreteables y carreteras. Se consideraba como carreteable a las vías con afirmado de al menos 4,6 metros de ancho y como carreteras las que sobrepasaran dicha longitud. Siendo una de las primeras en construirse, la ruta que conectaba a Cúcuta con Los Cachos, en el Zulia (Baquero Osorio, 2014). En nuestra nación los caminos y posteriormente las carreteras eran determinantes en las relaciones del poder entre el estado y la sociedad. Aquellas regiones que gozaban de relativa buena infraestructura contaban a su vez con una mejora considerable en sus estándares de vida. Otras regiones cayeron en el estatus de apartadas, pues la geografía de las misma eran un problema directo en la consecución de proyectos que le permitieran a sus comunidades ser parte del sistema económico mayoritario de la nación, el cual consistía en la agricultura y el comercio. La época de la colonia permitió la mejora sustancial de la herencia vial indígena y definiría en gran parte la estructuración comercial que devendría durante la república.

La construcción de nuevas carreteras estaba ligada directamente con el deseo estatal de mejorar la producción en zonas específicas del país. Esto genero un desarrollo centralizado del poder y la productividad, que a su vez propicio el atraso sectorizado de las regiones más apartadas durante la época de la colonia que a día de hoy aún se evidencian. Mientras tanto el mundo continuaba con el desarrollo de los caminos y las tecnologías que los mismos utilizaban para mejorar sus carreteras.

A través del tiempo los caminos han evolucionado de la mano de las personas que los transitan. Los pueblos que luego ciudades se conectan establecen entre si conexiones no solo comerciales si no también culturales, generando una hermandad necesaria para lograr trabajar en conjunto y reducir el consumo energético, la contaminación, el derroche de recursos y la contaminación del agua. Una tendencia Global muy importante ha sido la conservación de los recursos naturales. Colombia al ser un país diverso poseen una gran variedad de recursos naturales que le permiten ser un socio atractivo a nivel internacional. Los caminos se convirtieron en carreteras y las carreteras en autopistas, que conectaron toda la nación, pero estas carreteras se construyeron sobre los antiguos caminos indígenas que buscaban optimizar el viaje de personas o bestias y no Camiones. Es por eso que las vías terciarias de regiones apartadas están desconectadas de la sociedad comercial colombiana y de vuelta, Colombia de sus materias primas. Un país conectado es un país que puede buscar ser económicamente estable y a partir de ahí, buscar generar ganancias en base a economías que en otros tiempos eran insostenibles por el alto precio de transporte más que el precio de producción.

La economía de Colombia históricamente ha estado ligada a la explotación de sus recursos naturales. La falta de una infraestructura vial eficiente ha limitado el acceso a mercados nacionales e internacionales. Regiones de nuestro país que son ricas en materia prima están

aisladas, así que mejorar las vías terciarias es una necesidad logística. Sería una estrategia clave para impulsar el desarrollo económico del país al facilitar el transporte industrializado de productos agrícolas, minerales y otros recursos.

Si consideramos el relativamente nuevo interés por utilizar materiales innovadores y sostenibles en la pavimentación de estas vías terciarias, el asfalto natural extraído de municipios como Norcasia, armero, pesca y el pajuil son una alternativa eficiente y amigable con el medio ambiente. Este material tiene un alto contenido de betún/asfalto y ofrece una solución de menor impacto ecológico, si se adapta a las condiciones específicas de cada región geográfica del país. Con esta metodología, los caminos que aún no se han podido integrar a la red nacional podrían unificarse a la realidad nacional, al comercio y a la cultura.

1.2. Los asfaltos naturales

Los asfaltos naturales son una sustancia bituminosa que se compone principalmente por hidrocarburos pesados, que surgen en la naturaleza como el resultado prolongado de la biodegradación de materiales orgánicos en condiciones anaeróbicas como lo expone el doctor (Speight, 2015). Su transformación se da después de millones de años, generando depósitos geológicos donde afloran asfaltos naturales en diversas formas, como lo son los lagos de asfalto, las arenas bituminosas y las rocas impregnadas de asfaltos.

El asfalto natural tiene grandes propiedades adhesivas, es resistente al envejecimiento y a las condiciones climáticas extremas. En ciertas condiciones y combinándola con agregados, los asfaltos naturales pueden usarse para la pavimentación de rutas y caminos. (Garavito Arevalo, 2021). Los asfaltos naturales usados para la pavimentación afloran a la superficie en forma líquida o solida a través de las fisuras y porosidad de las rocas, donde se combinan en mayor o menor medida con componentes más ligeros que pueden cambiar sus propiedades. Estas

formaciones se pueden clasificar como ***manantiales, lagos, filtraciones o venas llenas de asfalto***. Dependiendo de su contenido también se pueden clasificar en *depósitos con alto contenido de asfalto,* donde el contenido de asfalto es mayor al 80%. *Depósitos con medio contenido de asfalto,* estos son los más recurrentes en el mundo y cuentan con un contenido de entre 25 y 80% de contenido de asfalto combinado con material mineral, arcillas coloidales, arenas y materia orgánica. Los *depósitos con bajo contenido de asfalto* son rocas impregnadas de asfalto que tienen entre 5 y 15% de contenido asfaltico; donde generalmente está conformado por calizas o areniscas. (Alarcon Peña, 2014)

Adicionalmente, (Speight, 2015) plantea que la asfaltita se puede clasificar en tres grupos dependiendo de su cantidad de bitumen. Su principal diferencia radica en su color, peso específico, punto de fusión, punto de ablandamiento y gravedad especifica. El doctor Speight propone que si el contenido de bitumen es mayor al 80% se pueden diferenciar como: *Gilsonitas;* asfalto natural de alta pureza, de baja gravedad especifica y bajo contenido de carbón y azufre. *Grahamita;* cuenta con alto contenido de carbón y puede identificarse por su tonalidad más oscuro. *Glace pitch;* es un asfalto intermedio entre los anteriores, pero con un punto de fusión y gravedad especifica más alta.

Las *mezclas de asfalto natural (**MAN**)* son un compuesto entre agregados y asfalto. Este material puede utilizarse para la pavimentación en capas de afirmado, en la subbase y en la base para diversos tipos de pavimentos y capas de rodadura con un correcto análisis granulométrico y una apropiada dosificación. Su origen se da por la metamorfosis del petróleo asfaltico donde, dependiendo de los cambios de temperatura y presión puede generarse petróleo asfaltico, asfalto blando, asfalto duro y pirobitumenes asfalticos. (Alarcon Peña, 2014)

Los tipos de *MAN* actualmente existentes son clasificadas por (Garavito Arevalo, 2021) de acuerdo a su producción, en donde encontramos:

(CMA o MAF) *Cold Mix Asphalt o Mezclas Asfalticas Frias:* Se mezclan a temperatura ambiente utilizando emulsiones o asfaltos espumados

(HWMA o MAST) *Hafl Warm Mix Asphalt o Mezclas Asfalticas Semitibias:* Se producen a temperaturas inferiores a los 100ºC

(WMA o MAT) *Warm Mix Asphalt o Mezclas asfalticas tibias:* Estas mezclas se elaboran en temperaturas entre los 120 y 140 ºC

Si bien, el uso de los asfaltos naturales datan de hace más de 5000 años en diversas aplicaciones, como elemento impermeabilizante en navíos, mortero de pega en muros e incluso momificación en el antiguo Egipto (Forbes, 1964) con el nacimiento de la ingeniería de pavimentos en el siglo XVII en Francia, es cuando las mezclas asfálticas naturales ganan relevancia en la construcción de caminos, bermas y pisos. (Garavito Arevalo, 2021) Posteriormente con su uso en los estados unidos para construcción de las carreteras de la ciudad de Philadelphia (1838) y New Jersey (1870) los asfaltos naturales empezaron a imponerse en la construcción de carreteras y caminos a nivel mundial. (Alarcon Peña, 2014)

Los yacimientos de asfaltos naturales se extienden por todo el mundo, pero se concentran mayormente a lo largo del continente americano.

Tabla 1.
Numero de yacimientos de asfaltos naturales en el mundo

Región	Yacimientos Descubiertos	Prospectos adicionales	Total
Norte América	1671	720	2391
Suramérica	2070	190	2260
Europa	17	0	17
África	13	33	46
Transcaucásica	430	0	430
Medio Oriente	0	0	0
Rusia	296	51	347
Sur Asia	0	0	0
Asia Oriental	10	0	10
Sudeste Asiático	4	0	4
Total	4512	993	5505

Nota: Tomado de *Estudio de la asfaltita y aplicaciones en mezclas asfálticas tibias y semitibias.* (Sanabria Torres et al., 2021)

En Colombia existen diversos yacimientos de asfaltos naturales. Cuyo uso se ha empleado como alternativa para la construcción y el mejoramiento de carreteras. Estos yacimientos se presentan mayoritariamente en los departamentos de Santander, Boyacá, Cundinamarca, Caldas, Chocó, Norte de Santander, Antioquia, Cauca, Caquetá, Meta y Tolima. (Garavito Arevalo, 2021)

El descubrimiento de la asfaltita en Colombia se remonta al año 1928, a manos del geólogo Emil Grosse. Grosse realizó estudios en el departamento de Boyacá donde se advertía la presencia de estos yacimientos de asfalto natural. Estos yacimientos evidenciaron un bajo porcentaje de asfalto y se determinaría inicialmente que no contaban con el potencial comercial

para ser usados en la pavimentación de carreteras. Garavito Arévalo plantea que, en base al descubrimiento de estos yacimientos en el departamento de Boyacá, se empieza a evaluar cómo aprovechar y explotar de mejor manera este recurso, que por falta de conocimiento y normativas no se podía hacer una correcta evaluación del mismo, lo cual restringía su aprovechamiento a gran escala. Para el año 1968, en el municipio de Chía, Cundinamarca se identifica una extensa zona de asfaltita del cual se pudo aprovechar para realizar un mejoramiento en las vías locales (Garavito Arevalo, 2021)

Figura 12

Arena asfáltica o mapia extraída de la mina Isaza, Norcasia - Caldas.



Nota: tomado de *Tecnologías para vías terciarias: Perspectivas y experiencias desde la academia* (Caro & Caicedo, 2017)

En el año 1986, se descubriría un yacimiento importante en el departamento de Caquetá de lo que hoy se conoce comercialmente como *MAPIA* (material pétreo impregnado de asfalto) y posteriormente adecuadamente caracterizado y se emplearía en la construcción de carreteras en dicha región. En el departamento del Caldas mientras se construía la vía *La Dorada – Sonsón* durante la segunda mitad del siglo pasado se hallaron yacimientos de arena asfáltica, pero es en la década de los 90, durante la construcción del proyecto hidroeléctrico *Miel I* donde se toma la iniciativa de caracterizar este material con el fin de determinar los parámetros que permitirían

usarlo para la construcción de las carreteras internas del proyecto. El material extraído de esta mina (en la actualidad *Mina Isaza*) ha sido utilizado por más de 20 años en la región para la construcción de pavimentos de vías secundarias y terciaras (Caro & Caicedo, 2017).

Figura 13

Vía construida en el departamento de Caldas (2011) utilizando arena asfáltica extraída de la mina Isaza en su carpeta de rodadura



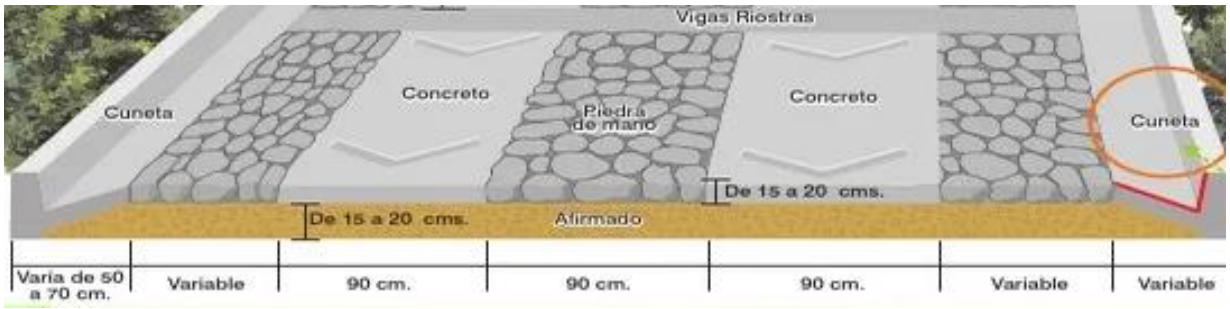
Nota: Tomado de *Tecnologías para vías terciarias: Perspectivas y experiencias desde la academia* (Caro & Caicedo, 2017)

También, (Gómez Galván et al., 2019) presentan un artículo en la revista INGENIO, en el cual utilizan MAPIA para la pavimentación de un tramo rural del municipio de San Martin, Cesar y sus beneficios económicos y ecológicos. La muestra que fue estudiada tiene características similares al asfalto 80/100 o cemento asfaltico producido por Ecopetrol.

1.3. La placa huella

La pavimentación de tipo placa huella es un sistema para vías con bajos volúmenes de tránsito. En el cual se utiliza pavimento flexible únicamente en las huellas donde circulan los vehículos, rellenando las franjas restantes con concreto ciclópeo. (Orobio & Orobio, 2016)

Figura 14
Esquema de pavimentación de tipo placa huella



Nota: Tomado de *secretaria de infraestructura - Gobernación de Caldas infografía de Jorge Morales, periódico La Patria.*

El instituto nacional de vías (Invias) define la placa huella como una losa de concreto reforzado fundida sobre una subbase, en donde el acero de refuerzo de la misma, trabaja en conjunto con el refuerzo de una riostra y el refuerzo de la placa huella del siguiente módulo de forma monolítica y cuyo mecanismo de falla es por carga ultima. Estas placas deben soportar los esfuerzos que se producen por el paso de vehículos a la vez que canaliza la circulación vehicular, permitiendo sustituir las franjas que no están sometidas a esfuerzos por un material de menor costo como el concreto ciclópeo, buscando reducir la inversión necesaria para estos proyectos. Los efectos causados por la precipitación se controlan mediante la correcta disposición de las obras de drenaje, para facilitar a su vez las obras de mantenimiento de la vía. (INVIAS, 2017)

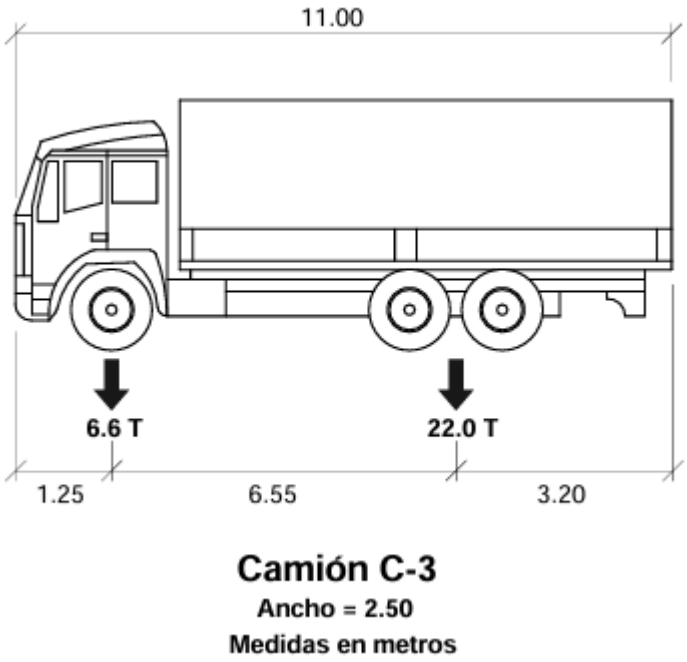
Son típicamente utilizadas sobre vías ya existentes y se consideran un tipo de mejoramiento. Con el uso de las placas huellas se busca mejorar tramos específicos de carreteras

que recurrentemente sufren con los periodos de lluvias. También se presentan como una alternativa probada para secciones de carreteras donde las pendientes (+10%) representan un desafío significativo en el flujo del tránsito. Es por esto que las placa huellas son un sistema ampliamente utilizadas en el ancho del territorio nacional.

En base a lo expuesto por INVIAS en la *Guía de Diseño de pavimentos con placa-huella* podemos denotar que estos pavimentos ofrecen condiciones de circulación satisfactorias durante un amplio periodo de servicio, además su mantenimiento es relativamente sencillo (obras de limpieza en el drenaje y las rocerías laterales), su construcción no requiere de hacer grandes modificaciones a la geometría de la vía existente y ofrece la posibilidad de utilizar materiales y mano de obra local. Comparado a la pavimentación convencional, sus costos de construcción y mantenimiento son considerablemente menores. (INVIAS, 2017)

En la *Guía de Diseño de pavimentos con placa-huella*, se considera para el diseño la metodología de resistencia última de las placa huellas; al ser estructuras de concreto reforzado que se apoyan sobre el suelo. Se concluye que si el eje de un vehículo que circule sobre este pavimento supere su resistencia ultima, una única pasada de dicho vehículo puede llevar a la ruptura de todas las placas huellas de la vía. En este diseño se prevé que estas vías estarán en servicio un mínimo de 20 años y al ser una vía de carácter veredal se espera que circulen camiones de tipo C-3 para el transporte de insumos y productos agrícolas, mineros o industriales. La resistencia esperada a los 28 días debe ser de $f'c = 210\ kg/cm^2$(INVIAS, 2017)

Figura 15
Vehículo de diseño. Camión C-3



Nota: Tomado de *Guía De Pavimentos De Tipo Placa Huella, p. 21* (INVIAS, 2017)

La placa huella se compondrá entonces de los siguientes elementos:

Subrasante. Generalmente constituida por suelo natural con una capa de afirmado con espesor variable. Invias recomienda no desestabilizar la superficie existente con excavaciones. Se espera obtener un perfil longitudinal aceptable donde se realizarían rellenos en pequeños tramos con material seleccionado o con el mismo material que se usara en la subbase. El aporte estructural de la capa de afirmado no se toma en cuenta y se considera un factor de seguridad

Subbase. La subbase debe tener como mínimo 15 cm de espesor a lo ancho de la sección transversal. En la subbase se considera la configuración del bombeo (-2%) y peraltes (2%) si no se pudo realizar en la superficie existente. La parte central y la parte externa de las curvas tendría

entonces un espesor mayor a los 15 cm. La subbase entonces proporcionará una base sólida y estable sobre la cual se construirá el resto del pavimento

Placa huella y riostra. Se consideran una construcción modular que trabaja en conjunto, estos módulos están compuestos por la placa huella y la riostra. Se construye en concreto reforzado y se funden monolíticamente con el siguiente modulo.
La placa huella en si es una losa de concreto reforzado que se funde sobre la subbase y donde su acero de refuerzo junto con el de la riostra de confinamiento se entrelaza con el siguiente modulo. La longitud máxima debe ser de 2,80 m y dado que el ancho de la riostra siempre será de 20 cm la longitud máxima de cada módulo será de 3,0 m. El espesor de las placa huellas será de 15 cm.

La Riostra. es una viga transversal de concreto reforzado en la cual su acero de refuerzo se entrecruza con el refuerzo de la placa huella del módulo anterior y el acero de refuerzo del módulo siguiente. Debe tener un ancho de 20 cm y un peralte de 30 cm y se apoya totalmente sobre la superficie existente previa a la colocación de un solado de limpieza de 3 cm. Su función es exclusivamente de confinamiento transversal y longitudinal.

Piedra pegada. es una capa de concreto ciclópeo con 15 cm de espesor. Se utiliza buscando reducir los costos de construcción pues su costo es menor al del concreto simple. Al ser de alta rugosidad desestimula a los conductores a circular por fuera de las placa huellas, que son los elementos diseñados para soportar los esfuerzos provocados por el tráfico de vehículos pesados.

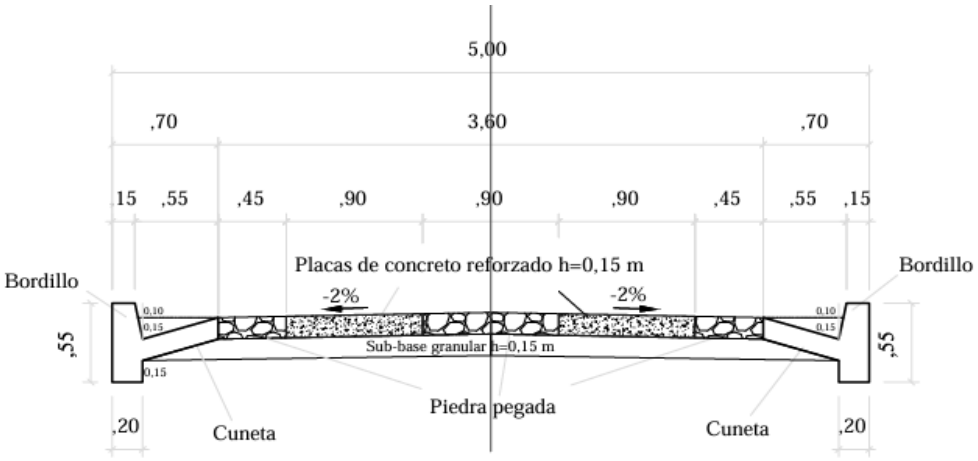
Berma-cuneta y bordillo. Son elementos de drenaje superficial construidos en acero reforzado y fundidos monolíticamente, articulados estructuralmente con la riostra.

Se funde monolíticamente buscando evitar juntas de construcción que con el paso del tiempo se pueden convertir en fisuras que permitirían la infiltración del agua y causarían deterioro en el pavimento. Además de brindar confinamiento a la subbase, permite la recolección y canalización de aguas lluvias para conducirlas a alcantarillas y aliviaderos. También funcionan como franjas de estacionamiento temporal para permitir, en caso de ser requerido, que el flujo del tránsito no sea interrumpido totalmente.

Otros elementos. Se deben considerar la construcción de alcantarillas y aliviaderos, así como de subdrenes en caso de ser requeridos.

Figura 16

Sección transversal de pavimentos tipo placa huella



Nota: Tomado de *Guía De Pavimentos De Tipo Placa Huella, p. 21*

Si bien las placa huellas han mejorado significativamente las condiciones en las vías terciarias en Colombia, toma relevancia abordar adecuadamente las deficiencias que se puedan presentar en su implementación y mantenimiento. Para potenciar estos beneficios es necesario desarrollar políticas sostenibles que promuevan los estándares de calidad en la construcción y el

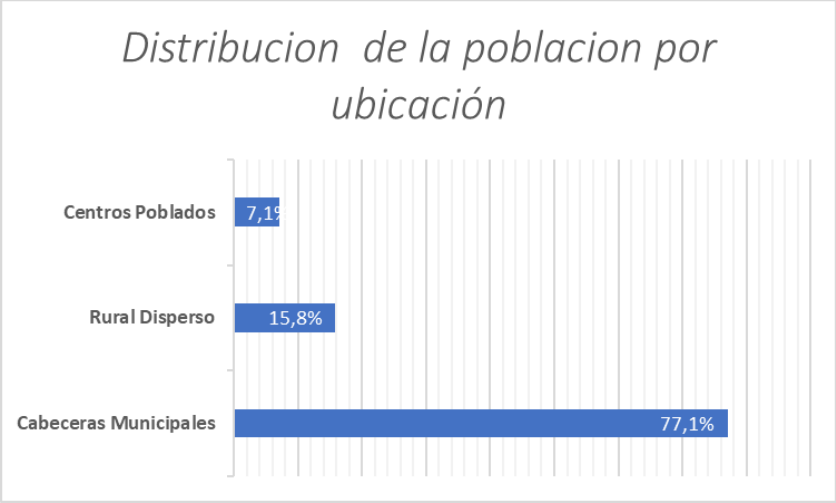
mantenimiento de las mismas. Es importante resaltar que sin una adecuada supervisión técnica el desarrollo de estos proyectos puede concluir en una construcción de baja calidad que se deteriora con rapidez dejando algunas vías en condiciones precarias. La naturaleza de estas obras, donde se manejan importantes recursos en las administraciones locales para desarrollar estos proyectos y sumado el poco interés de los gobiernos regionales en garantizar resultados de alta calidad, genera que durante la construcción de las placas huellas puedan presentarse desviación de los recursos; lo cual propicia los retrasos y la mala ejecución de obra. Se debe reconocer de igual forma que las placa huellas han demostrado ser efectivas en la estabilización y mejoramiento de los caminos, pues garantizan la accesibilidad a zonas que durante las épocas de invierno pueden quedar aisladas, generando así un impacto positivo en las economías locales. La construcción de las placas huellas ha logrado reducir la erosión que genera el flujo de agua en las vías rurales y directamente mejora el acceso a los servicios sociales de las comunidades rurales.

1.4. Las vías terciarias de Colombia

El papel que desempeña la ruralidad en el desarrollo económico de los países ha impactado durante décadas diversos sectores (agricultura, producción y manejo de los recursos naturales). Las zonas rurales se han percibido como regiones con menor desarrollo en comparación a las zonas urbanas, pero su contribución al desarrollo económico sustentable es fundamental. Son estas áreas rurales las que proveen la mayor parte de los alimentos, recursos naturales y productos básicos que mueven las economías urbanas. De acuerdo al Banco Mundial (*world bank*) a nivel mundial la agricultura representa el 4% del PIB y en países menos desarrollados puede llegar a representar hasta un 25% del PIB. El crecimiento en el sector agrícola es entre dos y cuatro veces más eficaz para subir el ingreso de los sectores más pobres.

(World Bank, 2024) Para nuestro país, la relevancia de las zonas rurales está más acentuada debido a las características geográficas y sociales de nuestra nación. De acuerdo al DANE, casi el 25% de los colombianos reside en áreas rurales.

Figura 17
Distribución de la población por ubicación.



Nota: Adaptado a partir de (*DANE - ¿Dónde estamos?*, 2024)

Uno de los factores esenciales para lograr un crecimiento sostenible es la conectividad, en este sentido, los caminos rurales hacen parte de las condiciones necesarias para un acceso igualitario a servicios de salud, educación y justicia; así como otros servicios sociales y administrativos para propiciar un desarrollo igualitario. La existencia de estas vías rurales y su adecuado mantenimiento facilitan la provisión de otros servicios esenciales como la energía, el agua y el saneamiento (Pérez, 2021)

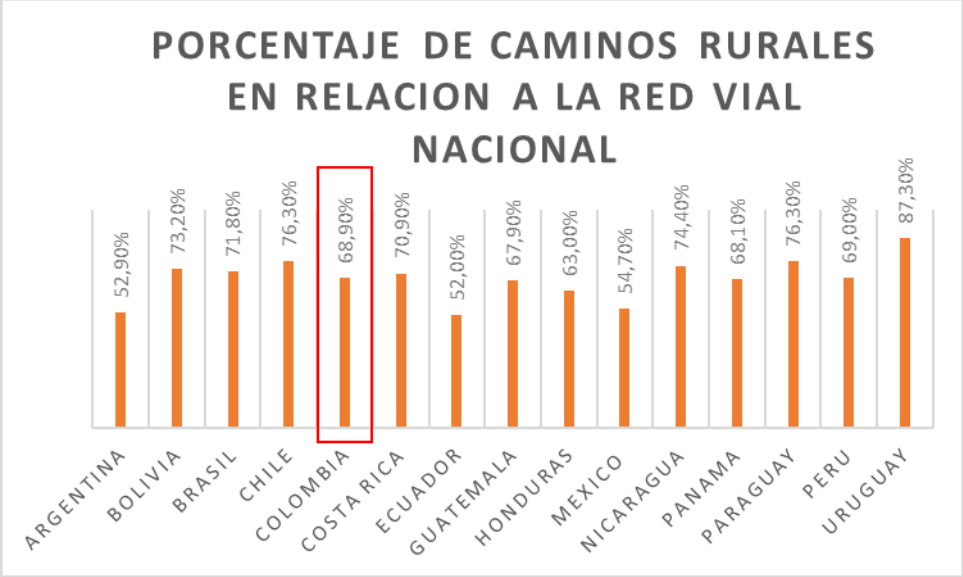
Es importante observar que la ruralidad en países desarrollados no es comparable con la observada en América Latina y el Caribe. Las diferencias no son únicamente en la densidad de los territorios, sino también en la cantidad y la calidad de la infraestructura. Una mejora en la

accesibilidad de los caminos rurales incrementaría la movilidad y estimularía el desarrollo de un mayor número de actividades sociales, política, culturas y económicas al aumentar directamente la calidad de vida de sus usuarios. (Pérez, 2020)

Dado que casi un tercio de la población de América Latina viven en áreas rurales, donde los servicios básicos y la conectividad a los centros poblados es deficiente, estos se ven relegados a vivir en un nivel de pobreza significativamente mayor a las de las áreas urbanas. De acuerdo al CEPAL (2019), las tasas de pobreza a nivel rural eran de 45.2% frente al 26,3% registrado en territorios urbanos. A nivel global se estima que aproximadamente 900 millones de habitantes de zonas rurales carecen de un acceso adecuado a un sistema de transporte formal (Pérez, 2021). En la siguiente grafica (Pérez-Salas, 2020) representa el porcentaje de caminos rurales en comparación al total de la red nacional para los países de América latina y el caribe.

Figura 18

Porcentaje de caminos rurales respecto al total de la red nacional



Nota: Adaptado de La falta de inversión en caminos rurales como un obstáculo a una recuperación económica sostenible (Pérez-Salas, 2020)

En Colombia, la red terciaria representa el 68,9% del total de la malla vial nacional con un total aproximado de 142.284 km (Rodríguez Salcedo, 2019) Corresponde a la mayor parte de la red vial nacional, pero carece de inventarios completos, actualizados y sistematizados, imposibilitando establecer así, el estado y necesidades específicas de la red (DNP, 2021) A corte del 30 de enero de 2024, el sistema integral nacional de información de carreteras reporta que se han inventariado 66.345 km de la red terciaria nacional (SINIC, 2024) Estando reportados aproximadamente un 46.6% de la red terciaria, se hace evidente la necesidad circunstancial en la mejora de sus condiciones actuales.

La red terciaria en su mayoría está a cargo de los municipios y no cuenta con las condiciones adecuadas para su óptimo funcionamiento. El crecimiento económico y social depende directamente de su infraestructura vial, pues permite articular la producción de las zonas rurales con los centros de acopio y distribución (Narváez, 2017). Es el mal estado de esta red la que genera consecuencias negativas en la productividad y la competitividad de las regiones rurales. Se afecta el traslado de pacientes a hospitales, la asistencia de los estudiantes a escuelas y colegios y aumenta el costo de transportar los productos de cada región. Por lo tanto, es importante que las comunidades rurales cuenten con mejores vías para optimizar el transporte, la comercialización y el acceso a servicios básicos como la salud y la educación. (Departamento Nacional de Planeación, 2016)

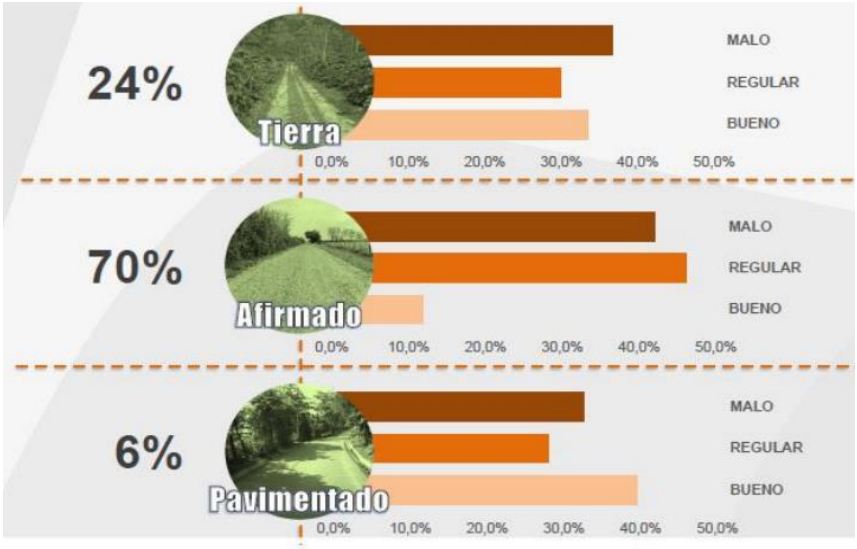
Las condiciones actuales de las vías terciarias actualmente están restringiendo y condicionando el potencial económico, político, social, turístico y cultural de nuestra nación. De acuerdo a (Martínez & Ramírez Cañón, 2023) “el estado actual de la red terciaria trunca el progreso económico y social de la ruralidad colombiana. Invertir en estas zonas es una apuesta por el campo, por la paz y por el desarrollo”. El desarrollo de nuestra nación catalogada a nivel

internacional como país *en desarrollo*, depende fuertemente de mejorar la red de carreteras terciarias.

En un informe de 2020 titulado "*Caminos rurales: Vías claves para la producción, la conectividad y el desarrollo territorial"* la Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL) señaló que más del 88.7% del volumen de los recursos naturales exportados por Latinoamérica se desplaza por los caminos rurales.

Esta circunstancia destaca la relevancia significativa de estos caminos en la competitividad internacional de los países (Vargas Rubio, 2021) puesto que las vías terciarias representan el 70% de la red vial de carreteras. Sin embargo, en nuestro país un 94% se encuentra en mal estado. Por otra parte, en algunos territorios se evidencia la ausencia de infraestructura de transporte y su desconexión con el resto del país. (Consejo Privado de Competitividad, 2022)

Figura 19
Condición de la red nacional de carreteras



Nota: Extraído de (Barón Ramírez, 2020) p 13.

Se espera entonces un cambio real en el enfoque de la construcción de las vías terciarias en nuestro país, donde no solo se considere los aspectos económicos, sino también los aspectos ambientales y ecológicos.

1.5. El impacto ambiental y la huella de carbono

El impacto ambiental es la alteración del medio ambiente, provocada de forma directa o indirectamente por un proyecto o actividad determinada. Simplificando la definición, el impacto ambiental es la modificación del ambiente ocasionada por la acción del hombre la cual genera una ruptura del equilibrio medio ambiental. Lo más frecuentes son la contaminación del aire, del agua (ríos, lagos, etc.), del suelo y el empobrecimiento de los ecosistemas y/o la perdida de la biodiversidad. (RSyS, 2022)

La huella de carbono es un indicador que cuantifica la cantidad de gases de efecto invernadero (C02) son liberados en la atmosfera a causa de las actividades humanas y su concepto científico fue introducido en la década de 1990 por los ecólogos William Rees y Mathis Wackernagel. (GREEN POWER, 2023)

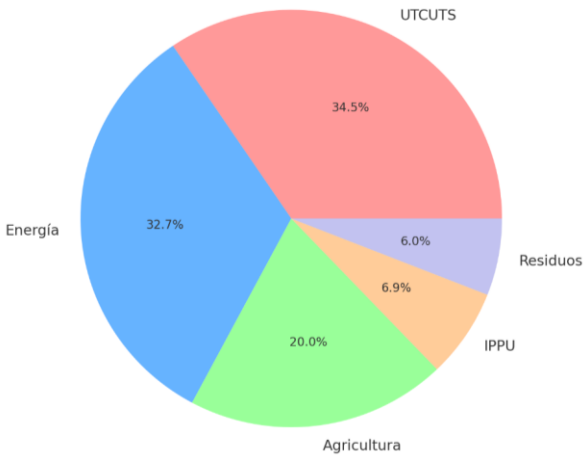
Si bien no existe un método único para realizar el cálculo de la huella de carbono, las personas, empresas, organizaciones o países tratan de realizar una estimación compleja que considera muchos factores, pues esta se define en función de normativas internaciones y criterios definidos por las comunidades científicas emitidas principalmente por la IPCC (Intergubernamental Panel for Climate Change).

En Colombia estas regulaciones están dadas por el ministerio de ambiente y desarrollo sostenible (MADS), la autoridad nacional de licencias ambientales (ANLA), el instituto de hidrología, meteorología y estudios ambientales (IDEAM) y las Corporaciones Autónomas

Regionales (CARS). Colombia como parte de la *Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático,* espera estabilizar y reducir sus emisiones de GEI (gases de efecto invernadero) buscando mitigar los efectos negativos del cambio climático. Dentro de estos compromisos adquiridos como, país se deben reportar periódicamente los avances en las implementaciones a nivel nacional de la CMNUCC mediante un inventario de gases de efecto invernadero (INGEI). (IDEAM, 2016) Cada kg de CO2 que va a la atmosfera contribuye al efecto invernadero, por lo que el calor producido por el sol queda atrapado en la atmosfera, generando un aumento significativo en las temperaturas medias de la tierra. De acuerdo al IPCC, la temperatura de la tierra ha estado subiendo 0,2 grados por década y se prevé que sin las acciones adecuadas los efectos que a día de hoy se hacen evidentes (olas de calor, inundaciones, largos periodos de lluvia o sequía, etc.) afectaran con mayor frecuencia a nuestro planeta. (GREEN POWER, 2023) De acuerdo al INGE 2021, la contribución de los sectores comerciales zmás importantes en estas emisiones netas para un total de 237.5 millones de toneladas de CO2 equivalentes:

Figura 20

Distribución de emisiones GEI en Colombia (INGEI 2021)



Nota: Información adaptada de *Inventario nacional y departamental de gases de efecto invernadero – Colombia* (IDEAM, 2021)

Es notorio que la industria energética junto a la agricultura encabeza la lista de emisores GEI, por ello es importante que las empresas industrializadas sean conscientes del impacto que tienen en nuestro medio ambiente y trabajen para reducir los mismos.

Colombia ha desarrollado dos estrategias buscando reducir la emisión de GEI. La Estrategia Colombiana de Desarrollo Bajo en Carbono (ECDBC) y la Estrategia Nacional para la Reducción de Emisiones por Deforestación y Degradación de Bosques (ENRDD+). LA ECDBC es un programa desarrollado por el MADS junto con el DNP. Esto para lograr un crecimiento económico nacional desligado del crecimiento de las emisiones GEI. El mecanismo de desarrollo limpio (MDL) puede ser aplicado a sectores industrializados, energéticos, forestales, de transporte o de residuos y permite a los países industrializados cumplir con sus compromisos de reducción GEI. El ministerio de Ambiente y desarrollo Sostenible tiene a disposición las resoluciones 2733 y 2734 de 2010 en la que se presenta la metodología para el ciclo de proyectos MDL. (SIAC, 2015)

La huella de carbono que tendríamos en cuenta para esta investigación consideraría los impactos ambientales causados de forma directa o indirecta en el diseño, los materiales utilizados, el transporte de los mismos y todos los insumos necesarios para desarrollar obras viales en carreteras terciarias de nuestro país, ya sea en proyectos de placa huella o de pavimentación con asfaltos naturales.

Capitulo 2. Caracterización

2.1. Caracterización de los asfaltos naturales

Los asfaltos naturales contienen una mezcla de betunes, minerales y materias orgánica; en la cual varia la proporción de hidrocarburos asfalticos y aromáticos dependiendo de la región donde son extraídos. En general, el asfalto natural es de alta viscosidad y tiene buena resistencia a la deformación y las altas temperaturas. (Delgado Pérez & Morales Vanegas, 2021) lo cual le da características idóneas para ser utilizado en diversas capas en el diseño de una vía.

Si bien los asfaltos naturales son un material utilizado de forma relativamente reciente en la construcción de carreteras, el asfalto como material se ha utilizado históricamente en diversas áreas. Tiene características impermeables y aglutinantes, es un recurso valioso que se ha utilizado desde la antigüedad. (Perea Muñiz, 2024).

Además, (Niño Estupiñan, 2016) expone las alternativas de uso que pueden tener los asfaltos naturales de acuerdo a sus características. Y plantea que “de forma empírica, se han colocado capas de rodadura con material natural, encontrando altas deformaciones por exceso de asfalto, presencia de agua o volátiles, falta de valor de estabilidad en la mezcla y deficiencia estructural del conjunto de capas del pavimento”. Por lo cual, sería recomendable prestar especial atención al diseño y la construcción de este tipo de vía. Los conglomerados asfalticos y las arenas asfálticas tienen los siguientes usos.

Figura 21
Alternativas de uso para el asfalto natural

CONGLOMERADOS ASFÁLTICOS	Afirmados estabilizados
	Capas de subbase en Pavimentos Rígidos
	Capas de subbase en Pavimentos Articulados
	Capas de subbase en Pavimentos Flexibles
	Capas de base en pavimentos flexibles
	Capas intermedias o antirreflectoras
	Capas de rodadura
ARENAS ASFÁLTICAS	Capas de sello
	Capas de subbase en Pavimentos Rígidos
	Capas de subbase en Pavimentos Articulados
	Capas de subbase en Pavimentos Flexibles
	Capas de base en pavimentos flexibles

Nota: obtenido de: (Niño Estupiñan, 2016) - *p. 17*

El uso de mezclas asfálticas naturales esta normatizado por medio de la resolución 10099 del 27 de diciembre de 2017. “Por la cual se adoptan las especificaciones particulares de construcción como alternativas de pavimentación utilizando asfalto natural en vías con bajos volúmenes de tránsito, categoría NT1”. El Ministerio de transporte a través de INVIAS contrato al consorcio Asfnaturales, para desarrollar un “estudio para caracterización y aplicación de los asfaltos naturales en Colombia con el fin de elaborar las especificaciones que se requieren en la utilización de carreteras nacionales”. En base a los resultados de estos estudios, INVIAS entrega 4 documentos de especificaciones técnicas de acuerdo a la capa que se diseña. Sub-base (ART 321P), base (ART 341P) y mezcla asfáltica. (ART 442P). En tal estudio también se emitieron las especificaciones técnicas para los Pavimentos asfalticos: “*Mezclas asfálticas en caliente con*

cemento asfaltico modificado con grano de caucho reciclado GCR" mediante en artículo 467-13, el cual no se tendrá en cuenta en esta investigación.

De acuerdo a INVIAS, existen 3 clasificaciones para las mezclas asfálticas naturales. MAN 38, MAN 25 y MAN 19. (Wilches Gómez & Villegas Camargo, 2019) La elección adecuada de la MAN se basa en un análisis detallado de las condiciones específicas del proyecto. Las MAN 38 contiene agregados con tamaño máximo nominal de 38 mm, proporcionando una estructura robusta y resistente ideal para capas base en pavimentos de alto tránsito. Las MAN 25, contiene agregados con tamaño máximo nominal de 25 mm, adecuadas para capas intermedias y las MAN 19 contiene agregados con tamaño máximo nominal de 19 mm, que presenta una textura mas fin, adecuada para capas de rodadura en vías de bajos volúmenes de tránsito.

Los asfaltos naturales presentan diversas características de acuerdo a su lugar de origen. En Colombia existen alrededor de 26 minas donde se extrae este material; siendo los yacimientos más grandes y de mayor explotación los encontrados en Pesca Boyacá, Norcasia Caldas, Pavas Caquetá, Armero Tolima, La Esperanza, Norte de Santander y Rio Negro en Santander. (Carreño, 2022)

Figura 22

Ubicación de minas legales de asfaltos naturales en Colombia



Nota: Generado con MyMaps a partir de (Piedrahita Tamayo, 2019)

Para lograr una caracterización adecuada de los asfaltos naturales, estos materiales se estudian a profundidad analizando sus propiedades físicas, químicas y mecánicas. Se enfoca principalmente en estudiar su composición, comportamiento y su potencial uso ya sea en la construcción de vías u otros usos industriales. INVIAS definió los ensayos para su caracterización adecuada como se representa en la tabla 2. (Gómez Galván et al., 2019)

Tabla 2.
Ensayos para caracterizar muestras de asfaltos naturales invias

Ensayo	Normativa	Descripción
Análisis granulométrico de los agregados finos y gruesos	INV E 213-13	Mediante este ensayo se determina cuantitativamente la distribución de los tamaños de las partículas de una muestra seca del agregado, por separación a través de tamices dispuestos sucesivamente de mayor a menor abertura de malla.
Resistencia a la degradación de los agregados de tamaños menores de 37.5 mm (1½") por medio de la máquina de los ángeles	INV E218-13	El método se emplea para determinar la resistencia al desgaste de agregados naturales o triturados, empleando la citada maquina con carga abrasiva.
Limite Líquido e Índice de plasticidad	Norma INV E-125 y 126-13	Limite líquido de un suelo es el contenido de humedad expresado en porcentaje del suelo secado en el horno, cuando este se halla en el límite entre el estado líquido y el estado plástico. El límite plástico permite la determinación en el laboratorio del límite plástico de un suelo, y el cálculo del índice de plasticidad si se conoce el límite liquido del mismo suelo

Ensayo	Normativa	Descripción
Equivalente de Arena suelos y agregados finos	Norma INV E-133-13	Este ensayo tiene por objeto determinar la proporción relativa del contenido de polvo fino nocivo, o material arcilloso, en los suelos o agregados finos. Es un procedimiento que se puede utilizar para lograr una correlación rápida en campo. Asigna un valor empírico a la cantidad relativa, finura y carácter del material arcilloso o similar, presente en una muestra de suelo o de agregado fino. Este método de ensayo permite determinar rápidamente en el campo, variaciones de calidad de los agregados durante su producción o colocación.
Proporción de Partículas Planas, Alargadas o Planas y Alargadas en agregados gruesos. Norma	INV E-240-13.	Este ensayo tiene por objeto determinar el porcentaje de partículas planas, alargadas o planas y alargadas, en un agregado grueso
Porcentaje de Partículas Fracturadas de un agregado grueso	Norma INV E-227-13	Este ensayo tiene por objeto determinar el porcentaje, en masa o por conteo, de partículas de un agregado grueso que tienen un número especificado de caras fracturadas.

Nota: Creado a partir de *Mezcla asfáltica natural artículo 442p* – Invias. p 4.

Las minas de San Pedro, Norcasia, Pesca y en Pavas cuentan con los permisos legales para la extracción a cielo abierto y diversos estudios han definido las características del material extraído. A modo de recopilación se tomaron los datos de estos estudios buscando principalmente el contenido de asfalto del material extraído.

Tabla 3.
Caracterización generalizada de minas legales de asfaltos naturales en Colombia

Ubicación de la mina/ Nombre de la mina	**Contenido Promedio de Asfalto**	**Uso recomendado (capa de diseño)**	**Característica del material**
1.Norcasia, Caldas *La milagrosa*	9.5 - 12 %	Base y sub base estabilizada	Roca caliza impregnada con asfalto
2.Armero Tolima *San Pedro*	10-14 %	Capa de rodadura vías bajo nivel de transito	Arenisca con asfalto natural
3.Pesca, Boyacá	6-9 %	Mezclas en frio para mantenimiento vial	Lutita Bituminosa
4.El Pajuil, Caquetá	7-11 %	Revestimiento y mejoramiento	Arcillas con betún natural

Fuente. Autor.

En la tabla 3 se presenta la recapitulación del estado del arte que se encontró respecto a caracterizaciones realizadas al material extraído de las minas mencionadas.

2.1.1 Mina la Milagrosa – Norcasia, Caldas

La mina la milagrosa se encuentra sobre el km 28 en la vía La Dorada – Norcasia, en el departamento de Caldas. De esta mina se extrae un material al cual denominan MAPIA, que se compone principalmente de arenas finas impregnadas de crudo de petróleo que ha sido refinado de forma natural.

Figura 23

Ubicación del municipio Norcasia, Caldas – Mapa político Caldas



Nota: obtenido de Wikipedia

En su investigación titulada “Análisis económico del uso de mezcla asfáltica natural proveniente de Norcasia, Caldas en el mejoramiento de la red vial regional de los municipios del Magdalena Medio” (Ruiz Núñez, 2021) analiza el impacto económico del uso del asfalto natural proveniente de la mina *La milagrosa*.

Tabla 4.
Caracterización del asfalto natural de la mina La milagrosa, Norcasia, Caldas.

Ensayo	Resultado	Requerimiento INVIAS	Detalle
Contenido de asfalto	9.5 – 12.1	5 – 7	Alto contenido de asfalto natural, facilitando mayor adhesión y cohesión en la mezcla
Densidad (g/cm3)	2.25-2.35	2.3-2.5	Se comporta similar a las mezclas densas en caliente lo que la hace adecuada para pavimentos flexibles con su correspondiente diseño
Estabilidad Marshall (kgF)	900-1200	>750	Brinda suficiente resistencia estructural para vías de bajo transito
Flujo	3.2-4.1	2-4	Buena flexibilidad sin comprometer la resistencia final del diseño
Resistencia a la tracción indirecta (MPa)	0.65-0.85	0.5-0.75	Datos similares a mezclas convencionales lo cual indica buena durabilidad
Permeabilidad (cm/s)	3.5x10-5	<5x10-5	Baja permeabilidad lo cual reduce el deterioro por infiltración de agua

Nota: Creado a partir de "Análisis económico del uso de mezcla asfáltica natural proveniente de Norcasia, Caldas en el mejoramiento de la red vial regional de los municipios del Magdalena Medio" (Ruiz Núñez, 2021)

Por su parte (Gómez Rojas, 2018) realizaron la investigación titulada "Evaluación de las especificaciones técnicas para el uso del asfalto natural procedente de la mina la milagrosa (Norcasia –Caldas) en afirmado, base y sub bases granulares" en el cual, por medio de los

ensayos de laboratorio logran caracterizar el material extraído. Este material presenta un contenido de asfalto de 11% lo cual es un valor ideal para su uso en el diseño de la carpeta asfáltica en vías de bajo volumen de tránsito. El autor genera una tabla donde compara los resultados a los ensayos realizados con las especificaciones y normativas invias para niveles de tránsito NT1 y NT2.

Tabla 5
Comparativa entre especificaciones invias y ensayos realizados

Ensayo Realizado	**Afirmados**	**Base Granular**	**Subbase granular**
Granulometría	No cumple	No cumple	No cumple
Limite liquido / Limite plástico	No cumple	No cumple	No cumple
Contenido de Terrones de arcilla	Cumple	Cumple	Cumple
Equivalente de arena	Cumple	Cumple	Cumple
Alargamiento y aplanamiento	Cumple	Cumple	Cumple
Caras Fracturadas	Cumple	Cumple	Cumple
Solidez con Sulfatos	Cumple	Cumple	Cumple
Angularidad de la fracción fina	Cumple	Cumple	Cumple
Valor del 10% de los finos	Cumple	Cumple	Cumple
Abrasion utilizando micro-deval	Cumple	Cumple	Cumple

Ensayo Realizado	Afirmados	Base Granular	Subbase granular
Ensayo Maquina de los Angeles	Cumple	Cumple	Cumple

Nota: Adaptado de "Evaluación de las especificaciones técnicas para el uso del asfalto natural procedente de la mina la milagrosa (Norcasia –Caldas) en afirmado, base y sub bases granulares. P, 41." (Gómez Rojas, 2018)

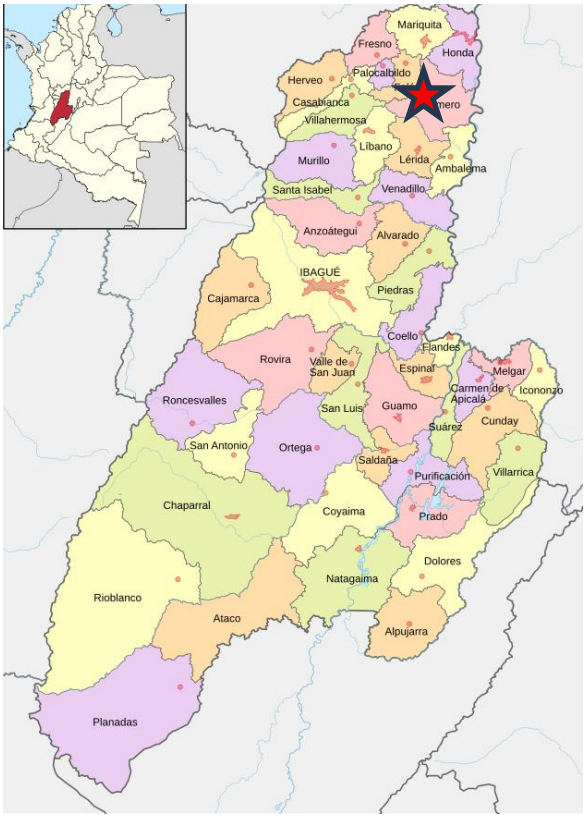
En base a los resultados se puede afirmar que este material no cumple con los requerimientos de granulometría, pero con un correcto ajuste granulométrico, cumple con las especificaciones, como lo indican los autores quienes a su vez concluyen que la asfaltita es una alternativa innovadora por su reducción en los costos y en el impacto ambiental.

2.1.2 Mina San Pedro – Armero, Tolima.

La mina San Pedro, es un yacimiento de asfalto natural que se ubica en zona rural del municipio de Armero, Tolima. El material de esta mina se ha extraído de forma intermitente a lo largo de los años, se extrae un material que se conoce localmente como "*chapapote".* El chapapote de la Mina San Pedro, consiste principalmente en arenas impregnadas con asfalto natural de alta densidad, resultante de la migración de hidrocarburos a través de formaciones rocosas sedimentarias. Este material presenta buena cohesión y resistencia a la deformación, lo que lo ha convertido tradicionalmente en la construcción y mantenimiento en las vías regionales.

Figura 24

Ubicación del municipio Armero, Tolima – Mapa político Tolima



Nota: extraído de Wikipedia

Desarrollando su infestación titulada “Asfalto natural alternativa de mejoramiento, rehabilitación y construcción de la Infraestructura vial del Alto Magdalena Colombia” (Velásquez Salguero et al., 2020) desarrollan una caracterización del asfalto natural proveniente de la mina san pedro en la cual presenta los resultados de los ensayos de laboratorio de a acuerdo a los requerimientos invias.

Tabla 6

Requisitos de los agregados pétreos combinados para la construcción de capas asfálticas con una mezcla asfáltica natural. (TABLA 442P-3) NORMA INVIAS - ART. 442P - 17

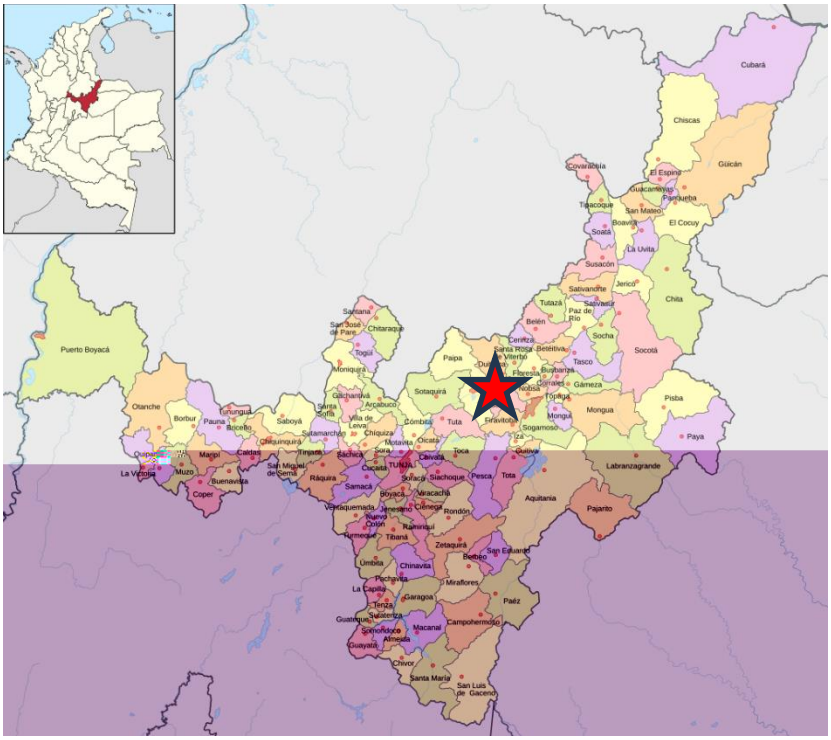
Ensayo	Normativa	Requisito	Resultado
Granulometría	E-212-13	MAN-38(Rodadura) ≥75 mm MAN-25 (Rodadura/Intermedia) ≥ 50 mm MAN-19 (Base) 40-50 mm	No cumple para ningún muestreo
Dureza del agregado grueso	Desgaste del agregado en la máquina de los ángeles E-218-13 (capa de rodadura)	Min 25 %	38.2%
Índice de plasticidad, máximo (%)	E-125-13 y E-126- 13	7	NP
Equivalente de arena, mínimo (%)	E-133-13	50 %	66 %
Partículas planas y alargadas, relación 5:1, máximo (%)	E-240-13	10 %	0 %
Caras fracturadas, mínimo (%) 1 cara (rodadura)	E-227-13	75 %	29.24 %

Nota: Adaptado a partir de “Asfalto natural alternativa de mejoramiento, rehabilitación y construcción de la Infraestructura vial del Alto Magdalena Colombia” (Velásquez Salguero et al., 2020)

2.1.3 Mina Santa Teresa – Pesca, Boyacá.

La Mina Santa Teresa se encuentra ubicada en el municipio de Pesca, Boyacá. Pesca se sitúa en la región andina central, que se caracteriza por un relieve montañosos y un clima templado a frio.

Figura 25
Ubicación municipio Pesca – Mapa político de Boyaca



Nota: extraído de Wikipedia

En su estudio titulado *"Utilización de asfalto natural en la construcción de pavimentos en Colombia: una recopilación bibliográfica"* (Sánchez Torres, 2017) hace una caracterización del material extraído de la cantera Santa Teresa en el municipio de Pesca, Boyacá. La autora describe el material como una mezcla heterogénea con altos contenidos de asfalto que varía en

función a su profundidad. De acuerdo a los resultados de laboratorio determina que el contenido de asfalto proveniente de la mina Santa teresa es de 6%.

Tabla 7

Resultados de laboratorio determina que el contenido de asfalto proveniente de la mina Santa teresa

Norma	Ensayo	Valor Norma	Resultado
INV E- 133-07	Equivalente de arena de suelos y agregados finos (%)	Min 50%	60%
INV E 222-07	Gravedad especifica y absorción del agregado fino (Gsa)	3.65%	2.69%
INV E 732-07	Extracción cualitativa de asfalto (%)	-	4 – 6 %
INV E 125-07	Limite liquido	≤ 40 %	17.18 %
INV E 126-07	Limite plástico	4 a 9	N.P
INV E 706-07	Penetración 1/10	200-250 mm	224.78 mm
INV E 709-07	Punto de ignición y llama mediante la copa abierta de Cleveland °C	≥ 200 °C	93 °C

Nota: Adaptado a partir de "*Utilización de asfalto natural en la construcción de pavimentos en Colombia: una recopilación bibliográfica 15.* (Sanchez Torres, 2017).

Por su parte (Higuera-Sandoval et al., 2012) desarrolla una caracterización de las asfaltitas extraídas de la cantera Santa Teresa, haciendo una corrección en la granulometría de la muestra y combinándolo con asfalto para conseguir las especificaciones solicitadas por invias. Los autores describen la muestra de asfaltita así: "La muestra a ensayar presenta una textura suave, de color negro, de olor orgánico, presenta partículas finas, su condición de humedad es importante al tacto. El porcentaje de arena equivalente indica que la arena se encuentra limpia porque la cantidad relativa de arcilla o contaminantes es baja. Los requisitos del agregado cumplen con NT1, NT2, NT3 para bases granulares."

Tabla 8.

Caracterización de la Asfaltita (cantera santa teresa, Pesca-Boyacá)

Norma	Ensayo	Valor norma	Resultado
INV E 133-07	Equivalente de arena de suelos y agregados finos %	Min 50%	66 %
INV E 222-07	Gravedad específica y absorción del agregado fino	3.65%	2.44%
INV E 732-07	Extracción cualitativa de asfalto %	-	4.1
INV E 125-07	Limite Liquido	$\leq$ 40 mm	17.18
INV E 126-07	Limite Plástico	N. P.	4 a 9
INV E 706-7	Penetración	200 – 250 mm	224.78 mm

Norma	Ensayo	Valor norma	Resultado
INV E 709-7	Punto de ignición y llama mediante la copa abierta de Cleveland °C	≥ 200°C	93

Nota: En base a (Salamanca Rodríguez, s. f.)

2.1.4 Mina Las pavas - El pajuil, Caquetá

La mina de asfalto natural como las pavas, está ubicada en la región norte del departamento de Caquetá, Colombia.

Figura 26
Ubicación del municipio el Pajuil, Caquetá – Mapa político de Caquetá



Nota: tomado de Wikipedia

En el estudio titulado "*Desempeño mecánico de una mezcla asfáltica natural proveniente de la mina las Pavas, Caquetá*", Cruz Chala y Salazar Cuellar realizaron una caracterización

detallada de la asfaltito extraída de la Mina a cielo abierto de asfalto natural, actualmente en el municipio del pajuil, Zona norte del departamento de Caquetá, en el km 54 de la vía Florencia – San Vicente del Caguán"; Este material es bituminoso de origen sedimentario, compuesto por agregados impregnados con betún natural. Su formación se asocia a procesos geológicos de migración y evaporación de crudos pesados, lo que le da una estructura heterogénea con variabilidad en su contenido de asfalto. Su comportamiento mecánico depende en gran medida de la relación entre el contenido de asfalto y la distribución granulométrica de los agregados que la conforman. Los resultados del estudio realizado a dos muestras se presentan en la siguiente tabla (Cruz-Chala & Salazar-Cuellar, 2019)

Tabla 9
Caracterización de la asfaltita de la mina Las pavas, en el Pajuil, Caquetá.

Norma	Ensayo	Valor norma	Resultado
INV E-732-13	Contenido de asfalto	≤ 10%	10.26%
INV E-213-13)	Tamaño máximo de partícula	19 mm	12.5 mm
INV E-213-13	% Pasa #4	50 – 60 %	98.1 %
INV E 213-13	% pasa #200	3 – 8 %	80.9 %
INV E 725-13	Resistencia a la tracción	≥ 750 kPa	85.46 kPa
INV E 748-13	Estabilidad Marshall	≥ 7500 N	1771 N

Nota: Basado en *Desempeño mecánico de una mezcla asfáltica natural proveniente de la mina las Pavas, Caquetá.* (Cruz-Chala & Salazar-Cuellar, 2019)

Por su parte, en el artículo titulado “Evaluación del comportamiento mecánico de asfalto natural a partir de muestras a temperatura ambiente provenientes de Caquetá, Colombia”; (Moreno Anselmi et al., 2016) realizan caracterización del material extraído de la mina ubicada a 30 km iniciando en el PR 54 del municipio de San Vicente del Caguán, Caquetá, saliendo hacia Neiva por la vía Minas Blancas–Santo Domingo–Balsillas, Neiva, en el PR 78. Utilizando la norma INV E 732-07, determinaron el contenido de asfalto promedio que resulto siendo de 13%. Es importante resaltar que, en este informe, los investigadores determinan que el muestreo extraído de la mina es muy heterogéneo por lo cual decidieron dividir el material en 4 muestras y posteriormente son sometidas a un ensayo a tracción indirecta, concluyendo que el material solo soporta cargas muy bajas si se utiliza de manera natural y a temperatura ambiente, por lo cual recomiendan mejorar la granulometría y el diseño para lograr las especificaciones mínimas solicitadas por invias.

2.2. Placa huellas y las vías terciarias en Colombia

La implementación del sistema de placa huella en Colombia ha surgido como método para estabilizar suelos complejos particularmente en zonas rurales de grandes pendientes y bajo tránsito vehicular (Palacios Cortes & Chavarro, 2022) Los sistemas placa huella ha sido objeto de diversos estudios y proyectos que buscan mejorar la infraestructura vial, además, las placa huellas permiten estudiar e implementar alternativas para reducir el impacto ambiental. Utilizar materiales reciclados en la construcción de placa huellas ayuda a reducir los costos y contribuye a la sostenibilidad de los proyectos sin llegar a comprometer la durabilidad y la resistencia de la estructura.

Figura 27

Placa huella realizada en Vetas, Santander utilizando relave minero como agente cementante



Nota: ((*Ingenieros de la UDES transforman residuos mineros en placa huella para sector rural de Santander*, s. f.)

En el capítulo 6.1 del documento emitido por el Departamento Nacional de Prosperidad que se titula “Mejoramiento de vías terciarias mediante el uso de placa huella” se presentan tres tipos de placa huella con sus respectivas características técnicas y aplicaciones. También podemos encontrar en la “Guía de diseño de pavimentos con placa-huella” por parte de INVIAS, en la sección 1.7 “Selección transversal para curvas horizontales” establece 12 tipos de secciones transversales en curva en función a su deflexión y su radio. Además, se han publicado diversos manuales por parte de empresas cementeras para el diseño, construcción y mantenimiento de placa huella. De acuerdo a (Carriedo Espinel & Sánchez Hernández, 2024)) dentro de los tipos de placa huella que se implementan, se diferencian según el ancho de la calzada disponible para implementar la estructura, dado que, a mayor zona por intervenir, se pueden generar más variaciones en los elementos a contener y la disposición de las losas.

Placa huella tipo 1. "Tiene una configuración que permite la circulación de los vehículos en doble sentido. El ancho establecido es de 7.60 m que se divide en tres franjas de concreto reforzado y dos franjas de concreto ciclópeo, adicionalmente dos cunetas con bordillo a los costados" (Carriedo Espinel & Sánchez Hernández, 2024))

Placa huella tipo 2. "Con esta configuración también permite la circulación de vehículos en ambos sentidos. Se establecen dos sub tipos de placa huella de este tipo, donde el primer tipo tiene un ancho establecido de 7.15 m dividida en 3 franjas de concreto reforzado y dos franjas de concreto ciclópeo, así como una cuneta en un lado y un bordillo en el otro. El segundo tiene un ancho de 6.20 m divididos en tres franjas de concreto reforzado y dos franjas de concreto ciclópeo sin cunetas en ningún costado, pero con bordillos en los dos extremos" (Carriedo Espinel & Sánchez Hernández, 2024)

Placa huella tipo 3. "Para esta configuración de placa huella solo es posible el tráfico en un solo sentido. Se compone de tres franjas de concreto reforzado y una de concreto ciclópeo con un ancho mínimo de 5.20 m. También se incluyen dos cunetas con bordillo a cada costado de la vía. El espesor recomendado es el mismo de las configuraciones presentadas anteriormente." (Carriedo Espinel & Sánchez Hernández, 2024)

Esta circunstancia permite a las entidades gubernamentales asignar recursos para la construcción de placa huellas que mejoren la movilidad de sus regiones rurales, dado que este sistema ha demostrado ser una alternativa confiable y de bajo costo. De forma complementaria, en la página web de la agencia nacional de contratación pública (Colombia compra eficiente) está a disposición de quien pueda interesar, documentos tipo que facilitan el proceso para la asignación de estos recursos. La construcción de placa huellas tiene un respaldo técnico para que

entidades sin capacidades logísticas avanzadas puedan ejecutar sus proyectos siguiendo manuales y guía sin llegar a comprometer la vida útil y el desempeño de la estructura.

2.3. Análisis de datos

Como lo vimos en la primera parte de este capítulo, la red vial de la actualidad fue altamente influenciada por el trazado previo de los indígenas precolombinos en sus caminos. Las economías se estructuraron en el comercio y a partir de ahí se fortalecieron las regiones que brindaban algún tipo de industria. Así los recursos para la mejora de los caminos llegaban directamente a sus interesados, quienes robustecían sus industrias o pequeñas economías pues lograban una estabilidad propia de las economías en crecimiento. Caso contrario a las poblaciones retiradas que concluían en economías cerradas, se restringían meramente a sus pobladores.

La asignación de recursos para la mejora de las vías terciarias ha sido un eje fundamental en las políticas públicas del manejo de nuestros recursos, pues como se pudo apreciar con anterioridad, el procedimiento de licitación, contratación, ejecución y mantenimiento para la red terciaria cuenta con manuales, guías y proyectos tipo.

Para Pening Gaviria (2023) “el presupuesto asignado es insuficiente para el desarrollo adecuado de las vías terciarias. La ejecución de los recursos es muy lenta y, además la asignación de estos recursos ha tomado criterios políticos. Para actividades de mantenimiento rutinario y periódico, el marco normativo vigente permite contratar mano de obra local para desarrollar actividades no tecnificadas (limpieza de drenajes, rocería, limpieza general, etc.) Sin embargo, para actividades de rehabilitación o reconstrucción será necesario garantizar un equipo profesional y técnico para obtener una correcta ejecución de los recursos en el proyecto”. Puesto que las vías no se comportan como se diseñan si no como se construyen, recae la responsabilidad

en los pobladores, no solo en la ejecución sino también en la veeduría. La correcta asignación de estos recursos es lo que garantiza la vida útil del proyecto. (Pening Gaviria, 2023)

Para Muñoz (2019) el subdesarrollo rural de Colombia se explica en gran medida por el sesgo urbano. Esta teoría inicialmente planteada por Michel Lipton (1977) planeta que el progreso económico de los países en vías de desarrollo estaba siendo guiado por el sesgo urbano, es decir, las políticas nacionales estaban altamente influenciadas por grupos políticos y económicos concentrados en las urbes, quienes asignaban estos recursos para favorecer áreas urbanas en detrimento de las zonas rurales. Muños agrega que si bien, esta teoría tiene más de 40 años, las ruralidades en Colombia están rezagadas por el abandono sistemático. Kay y Salazar plantean que el dinamismo de las grandes ciudades y los centros industriales, (Muñoz, 2019) junto a las importantes contribuciones que la industria puede hacer a la agricultura por medio de maquinarias especializadas, equipos e insumos modernos permite enfrentar esta situación. (Kay & Salazar, 2001)

La asignación de recursos para las ruralidades implica no solo el desarrollo, mejoramiento y mantenimiento de las vías, sino también un compendio extenso de políticas que subsane las condiciones históricamente adversas del colombiano rural. Para Macas Analuiza (2025) la desconexión de las ruralidades al comercio y los servicios sociales mínimos, mantienen un ciclo de pobreza que resulta difícil de superar sin intervención significativa en las políticas públicas. Si bien, la asignación de recursos en los últimos años ha ido en aumento, los índices de pobreza rural se han mantenido en el último trenteno. (Macas Analuiza, 2025) En la tabla X se presenta los datos presentados por el DANE y el DPS sobre los índices de pobreza rural en Colombia en los últimos 25 años.

Tabla 10
Índices de pobreza rural en Colombia 2005-2023

Año	IPR (índice de pobreza rural)
2005	69.0 %
2008	56.6 %
2009	59.3 %
2010	53.1 %
2014	44.1 %
2017	36.1 %
2018	36.1 %
2020	42.9 %
2022	45.9 %
2023	41.2 %

Nota: La información fue recopilada de dane.gov.co y dps.gov.co en sus informes de presupuestos anuales.

Nota 2: para los años que no se presenta información, no fue posible encontrar datos.

De acuerdo a Ico Ordóñez (2020), “Después de que durante siglos el sector agropecuario fuera la principal fuente de crecimiento y desarrollo en Colombia, se ha presentado una disminución en la participación y perdiendo importancia en los últimos 20 años (Ico Ordóñez,

2020). Según el DANE el PIB agropecuario representaba el 68% del PIB Nacional en el año 1965, para pasar al 24 % en el año 1975, posteriormente representaba un 18 % y para el año 2017 ese porcentaje se redujo al 6%. El sector agropecuario ha ido perdiendo importancia frente al desarrollo de la economía del país y esto ha sido principalmente por la baja productividad del sector." Evidenciando que las condiciones rurales en la actualidad son una respuesta sistemática a las falencias en las políticas nacionales para integrar orgánicamente las economías rurales que antaño, eran la principal fuente de ingresos de la nación. Y añade que el precario estado de las vías genera un sobre costo entre el 10% al 15%, generando aún más dificultades para erradicar la pobreza rural.

La organización internacional FIDA (Fondo Internacional de Desarrollo Agrícola) asegura que, en los últimos 25 años, la tasa de crecimiento agrícola ha sido la mitad de la tasa de crecimiento económico general del país. También plantea que la causa de este estancamiento en la productividad se debe a la falta de políticas claras para el apoyo a la producción. Los programas gubernamentales como Colombia rural y Caminos comunitarios para la paz, buscan ajustar las problemáticas sociales, culturales y de infraestructura actuales.

Si bien los proyectos de placa huella son alternativas muy presentes en los proyectos gubernamentales regionales, con la participación activa de la comunidad científica, podemos analizar si existen otras opciones en la pavimentación tercerías. El uso de asfaltos naturales para el desarrollo de proyectos de similares características, también ha mostrado resultados efectivos. Contraponer y evaluar proyectos de similares características pero que han utilizado bien sea placa huella o asfaltos naturales, brindará un correcto enfoque para el análisis asertivo de esta investigación.

Capitulo 3. Factibilidad

Para este capítulo se realizó una búsqueda de proyectos en vías terciarías en similares condiciones climáticas, topográficas y extensión tanto con sistemas de placa huella como con el uso de asfaltos naturales, se escogieron dos con las mejores similitudes para poder realizar la comparación de procesos y analizar las características seleccionadas donde se pueda identificar, la ubicación del proyecto, la longitud del proyecto, su costo total y las condiciones de la vía en la actualidad. Además, se analizará si estos proyectos cuentan con protocolos y/o procesos que tengan que ver con la mitigación del impacto ambiental y también su impacto directo en las economías locales.

Se comparará la factibilidad económica y ecológica, de las dos soluciones técnicas implementadas en la red vial terciaria de Colombia: los pavimentos construidos con asfaltos naturales y el sistema de placa huella. Siguiendo la metodología descrita, se realizará un análisis contrastivo basado en dos estudios de caso específicos: por un lado, el proyecto de mejoramiento vial utilizando asfalto natural MAPIA en el tramo El Diviso–Torcoroma (o Acceso Campo Acordeonero), localizado en el municipio de San Martín, Cesar; y por otro, el proyecto de construcción de placa huellas ejecutado en la zona rural del municipio de Hatonuevo, La Guajira. El análisis se centrará en desglosar y comparar los costos asociados a cada intervención y evaluar sus respectivos impactos y consideraciones ambientales, con el objetivo de proveer una base objetiva para la toma de decisiones en futuros proyectos de infraestructura vial terciaria en el país.

3.1. Descripción de los Proyectos de Estudio

A continuación, se muestran las características de los proyectos seleccionados, describiendo las principales a tener en cuenta

3.1.1. Proyecto Placa Huella: Mejoramiento Vías Rurales en Hatonuevo, La Guajira

Este proyecto se encuentra identificado con el código de la gobernación de la Guajira BPIN 2015002440014 y código en el SECOP I 19-1-202350. Este proyecto fue formulado en el año 2015

Ubicación. Zona rural del municipio de Hatonuevo, La Guajira, en las vías de acceso a las veredas La Gloria, Bañaderos, Angostura, La Cumbre, Paraíso y Cañabrava, incluyendo áreas del Resguardo Indígena Cerro de Hatonuevo.

Objetivo. Mejorar el acceso terrestre a estas comunidades rurales e indígenas.

Solución Técnica. Placa Huella.

Alcance. Placa huella de **9111 metros lineales (9.111 km)**.

Especificaciones Técnicas. Placa huella de doble franja (1.0 m ancho/huella), espesor 15 cm (Concreto 3000 PSI), enrocado central (0.90 m ancho), refuerzo (malla electrosoldada), juntas (asfalto sólido).

Costo Planificado (2015): $2,000,000,000 COP.

Costo/km Planificado (2015): Aprox. **$219.5 millones COP/km**.

Consideraciones Ambientales (Formulación): No se requirió Licencia Ambiental, Diagnóstico Ambiental ni PMA específico.

Aspectos Socioeconómicos: Beneficia a población rural/indígena, contempla mano de obra local.

3.1.2. Proyecto Asfalto Natural MAPIA: Mejoramiento Vía Acceso Campo Acordeonero (incl. El Diviso–Torcoroma), San Martín, Cesar

Este proyecto fue ejecutado por la empresa WAMCOL S.A.S. y se encuentra en un informe de pasantía y un artículo científico en 2020. Tomando en consideración que se asume el contrato descrito en el informe de pasantía ("Mejoramiento Vía Acceso Campo Acordeonero...") hace referencia al tramo El Diviso-Torcoroma mencionado en el artículo.

Ubicación. Vías de acceso al Campo Acordeonero, incluyendo tramos en la ruta El Diviso–Torcoroma, municipio de San Martín, Cesar. Zona de piedemonte.

Objetivo. Asfalto natural (MAPIA), estabilización y material.

Solución Técnica. Pavimento flexible con **Asfalto Natural MAPIA** (arena bituminosa 9-12% asfalto natural, aplicado **en frío**. Se requirió adecuación con triturado 3/4" y estabilización de la base.

Año de Ejecución. 2019 (febrero a mayo)

Alcance (Longitud Estimada). El contrato reporta un volumen ejecutado de 1,650 m³ de MAPIA. Asumiendo un ancho de vía de 5 m y un espesor de capa MAPIA de 7.5 cm (basado en diseños típicos presentados en el Apéndice D de la tesis), la longitud estimada es de **aprox. 4.4 km**. *Nota: Esta es una estimación sujeta a la confirmación de los parámetros de diseño reales.*

Especificaciones Técnicas Principales. Estabilización de base (con aditivo cemento/cal/cenizas), imprimación (emulsión catiónica lenta), extensión de MAPIA en frío (con finisher), compactación (vibratorio y neumático).

Costo Ejecutado (2019) $2,124,776,130 COP (IVA Incluido). valor que representó un incremento sobre el presupuesto inicial.

Costo/km Estimado (2019). Aprox. **$483 millones COP/km** (Basado en el costo ejecutado de $2,125 M y la longitud estimada de 4.4 km).

Consideraciones Ambientales. El Proceso en frío reduce significativamente el consumo energético y emisiones en obra, pero se debe tener en cuenta que el impacto principal se relaciona con la extracción minera del MAPIA y su transporte. No se detallan permisos ambientales específicos en los documentos.

Aspectos Socioeconómicos: Proyecto ejecutado por contratista (WAMCOL S.A.S.) para mejorar infraestructura en zona rural. El informe menciona dificultades por tráfico y percepción comunitaria del material.

Tabla 11
Tabla Comparativa de Características de los proyectos escogidos

Característica	Proyecto Hatonuevo (Placa Huella)	Proyecto San Martín (MAPIA)
Ubicación	Hatonuevo, La Guajira	San Martín, Cesar
Año Ejecución/Plan.	2015	2019
Tecnología	Placa Huella (Concreto 3000 PSI, 15cm)	Asfalto Natural MAPIA (Aplicación en Frío)
Longitud (km)	9.111 km (Planificado)	~4.4 km (Estimado)
Costo Total (COP)	$2,000 Millones (Planificado 2015)	~$2,125 Millones (Ejecutado 2019)
Costo/km (COP)	~$219.5 Millones (Precios 2015)	~$483 Millones (Precios 2019, Estimado)
Permiso Ambiental Mayor	No Requerido (según ficha)	No Identificado
Proceso Constructivo	Colocación Concreto	Aplicación en Frío, Estabilización Base
Participación Comunitaria	Mano de obra local contemplada	No mencionado explícitamente (Contratista WAMCOL)

Nota: La información fue recopilada de ambos proyectos: Proyecto Hatonuevo (Placa Huella) y Proyecto San Martín (MAPIA)

3.2. Factibilidad Económica

Aquí se comparan los aspectos económicos de los proyectos de la Placa Huella en Hatonuevo y el pavimento con Asfalto Natural MAPIA en San Martín. Nos enfocaremos en los costos de construcción, tanto los que están documentados como los que hemos estimado.

3.2.1. Análisis Económico: Proyecto Placa Huella (Hatonuevo, La Guajira)

Costos de Construcción (Planificado 2015). El costo total de inversión planeado para la placa huella fue de $2,000,000,000 COP. El costo por kilómetro resultante fue de aproximadamente $219.5 millones COP/km (precios de 2015).

Costos de Mantenimiento y Vida Útil. El documento de formulación no detalla costos de mantenimiento, pero se asume el perfil típico de bajo mantenimiento rutinario para placa huella (limpieza de drenajes principalmente).

Beneficios Económicos (Planificados). Se proyectaron beneficios socioeconómicos enfocados en la mejora de la conectividad, seguridad vial, acceso a mercados y servicios de salud. todo mostró viabilidad.

3.2.2. Análisis Económico: Proyecto Asfalto Natural MAPIA (San Martín, Cesar)

Costos de Construcción (Ejecutado 2019). El proyecto de mejoramiento de la vía tuvo un costo final ejecutado (según Tabla 3 de la tesis) de $2,124,776,130 COP (IVA Incluido) en **2019**, este valor representó un incremento significativo (cercano al 58%) sobre el valor contractual inicial ($1,569M COP), lo cual se distingue en la tesis debido al aumento de cantidades y retrasos por factores externos (tráfico, comunidad).

Longitud del tramo pavimentado con MAPIA no se indica explícitamente. Haciendo un cálculo basado en el volumen ejecutado y una estructura típica de 7,5cm de espesor y 5m de ancho, se estima una longitud de aprox. 4.4 km. Con base en estos datos, el costo por kilómetro estimado es de $2,124,776,130 / 4.4 km ≈ $483 millones COP/km (precios de 2019).

Costos de Mantenimiento y Vida Útil. Aunque no se dispone de información específica, se asume la aplicación de consideraciones generales para pavimentos asfálticos, incluyendo la necesidad de mantenimiento periódico. La tesis plantea una posible inquietud sobre la correspondencia entre el diseño ejecutado y los parámetros mínimos, lo cual podría afectar la durabilidad del pavimento.

Beneficios Económicos. Se esperan los beneficios habituales de una vía mejorada. La tecnología en frío podría reducir costos energéticos iniciales, pero el costo final ejecutado por km parece elevado en este caso.

3.2.3. Comparación Económica

Ahora se procede a comparar los costos por kilómetro, cabe aclarar que se debe ajustar por inflación debido a la diferencia de años. se usa un índice de costos aproximado. Entre 2015 y 2019, la inflación acumulada en costos de construcción en Colombia estuvo alrededor del 20-

25%. usando un factor de seguridad conservador de 1.25 (25% acumulado) para actualizar el costo de Hatonuevo:

Costo Hatonuevo (Placa Huella) ajustado a precios 2019: 219.5 M COP/km (2015) ×1.25≈ $274.4 Millones COP/km (Precios 2019)

Costo San Martín (MAPIA) estimado (Precios 2019): ~483 Millones COP/km

Análisis Comparativo:

Costo Inicial. Considerando la inflación, el costo por kilómetro estimado para el proyecto MAPIA en San Martín resulta ser significativamente más alto (aproximadamente un 76% más) que el costo ajustado por inflación del proyecto de Placa Huella en Hatonuevo.

Factores de Diferencia. Esta diferencia puede deberse a múltiples factores: El costo del material MAPIA y su transporte desde la fuente. La necesidad de realizar estabilización de base y uso de triturado en el proyecto de San Martín. Los sobrecostos debido al aumento de cantidades y retrasos en San Martín. El costo relativamente bajo del proyecto de Hatonuevo en su año base (2015). La incertidumbre en la longitud estimada para San Martín (si la longitud real fuera mayor, el costo/km bajaría).

Mantenimiento y Ciclo de Vida. La placa huella tendría menores costos de mantenimiento rutinario que el MAPIA, cuyo seguimiento a largo plazo definirá sus necesidades reales. Un análisis del costo del ciclo de vida es necesario para una evaluación concluyente.

3.3. Factibilidad Ecológica

En esta parte se comparan los aspectos e impactos ambientales de los dos proyectos de construcción, el primero con placa huella (caso Hatonuevo) y el segundo con pavimento de

asfalto natural MAPIA (caso San Martín). Se enfoca la evaluación en el origen y consumo de materiales, el proceso constructivo, el uso de energía y agua, y las consideraciones generales sobre el impacto en el entorno, basándose en la información específica de los dos proyectos y las características inherentes de cada sistema constructivo

3.3.1. Análisis Ecológico: Proyecto Placa Huella (Hatonuevo, La Guajira)

Consumo de Materiales y Origen. Este método de construcción requiere cantidades significativas de cemento, agregados (arena, grava), acero y agua. La fabricación de cemento, por su consumo energético y emisiones de CO2, genera una considerable huella de carbono. La obtención de agregados altera el terreno en las canteras. Dada su ubicación rural, el traslado de estos materiales básicos hasta Hatonuevo implicó un notable gasto energético y un considerable aumento de emisiones. La utilización de piedra local (enrocado) en la parte central posiblemente disminuyó en parte la necesidad de agregados transportados.

Energía y Emisiones (Construcción): El mayor impacto energético que tiene este sistema es debido a la producción de los materiales (cemento, acero). La construcción en sitio implica consumo de energía para mezcla, transporte y colocación del concreto, pero tiene mucho menos impacto que los procesos en caliente. Las emisiones en obra se asocian principalmente a maquinaria y transporte.

Uso del Suelo y Biodiversidad: Esta parte implica la ocupación del terreno para el corredor vial y su alteración debido a las actividades propias del sistema constructivo como desmonte y excavaciones. El impacto indirecto clave es el asociado a las canteras de agregados y la producción de cemento.

Consumo de Agua. Requiere cantidades significativas de agua para la mezcla y el curado del concreto.

Permisos Ambientales. El proyecto, no requirió permisos ambientales específicos, sugiriendo un impacto considerado manejable para esa escala y contexto normativo.

3.3.2. Análisis Ecológico: Proyecto Asfalto Natural MAPIA (San Martín, Cesar)

Consumo de Materiales y Origen. El material principal es el **MAPIA**, una mezcla de arena y asfalto natural (9-12%). Su obtención implica minería con un impacto ambiental asociado a esa actividad extractiva. El transporte desde la mina hasta San Martín es un factor ecológico clave por consumo de combustible y emisiones. Este proyecto específico requirió estabilización de la base y la incorporación de triturado de 3/4" a la mezcla MAPIA. Esto añade el impacto ambiental asociado a la producción de cemento/cal y la extracción/trituración de agregados, similar a la placa huella. Se utilizó emulsión asfáltica para la imprimación de la base estabilizada.

Energía y Emisiones (Construcción). La ventaja ecológica más destacada, resaltada tanto en el artículo como en la tesis, es la aplicación del MAPIA en frío. Esto elimina el consumo de combustible y las emisiones asociadas al calentamiento de mezclas asfálticas convencionales, representando un ahorro energético significativo en la fase de colocación. No obstante, es importante tener en cuenta la energía utilizada en la fabricación, la estabilización (cemento/cal), la obtención y el traslado del MAPIA y los agregados, así como el funcionamiento de la maquinaria (como la finisher y los compactadores).

Uso del Suelo y Biodiversidad: Ocupación del terreno y alteración por construcción. Impacto indirecto por la mina de MAPIA, canteras de agregados y producción de estabilizantes.

Consumo de Agua: Considerablemente menor que la placa huella, aunque se requiere agua para la eventual estabilización de base y compactación.

Residuos: Principalmente material de excavación.

Permisos Ambientales: No se mencionan en los documentos.

3.3.3. Comparación Ecológica

Impacto Material Central: El sistema constructivo de la placa huella tiene alto impacto por el cemento, la MAPIA en su lugar tiene un impacto significativo por la minería y transporte, y en este caso particular, por el estabilizante (cemento/cal) y el agregado triturado adicionado.

Energía/Emisiones en Obra: hay una ventaja clara para este sistema por su aplicación en frío, eliminando la necesidad de calentamiento. La energía incorporada en el cemento de la placa huella es alta, pero su colocación no requiere calor.

Ciclo de Vida (Materiales): La placa huella usa materiales básicos de construcción (cemento, agregados, acero), en cambio MAPIA aprovecha un recurso natural específico, cuya extracción y transporte son factores determinantes. La necesidad de aditivos o agregados adicionales en el MAPIA reduce parte de su ventaja de "material natural único".

Agua: Ventaja para el asfalto natural por menor consumo hídrico durante la construcción.

Transporte: Este punto es crítico para ambos, resultaría favorable evaluar la distancia entre el sitio del proyecto y las fuentes de cemento/agregados vs. las minas de MAPIA/canteras de triturado.

Durabilidad y Mantenimiento: Aunque no es un factor ecológico directo de la construcción, una menor durabilidad implica reconstrucciones más frecuentes, lo cual aumenta el

impacto ambiental a largo plazo. La susceptibilidad a la temperatura del asfalto natural y las posibles deficiencias en el diseño ejecutado mencionadas en la tesis podrían influir negativamente en su ciclo de vida comparado con una placa huella bien ejecutada.

Capitulo 4. Resultados

Este capítulo resume los principales hallazgos del análisis comparativo de factibilidad económica y ecológica entre el sistema de placa huella (caso Hatonuevo, La Guajira) y el pavimento con asfalto natural MAPIA (caso San Martín, Cesar), previamente presentado. Se identifican y contrastan las similitudes y diferencias clave en términos de costos e impactos ambientales, con el propósito de dar respuesta al objetivo central de la investigación.

4.1. Resultados Económicos

El análisis comparativo de los costos de construcción y las consideraciones económicas generales arrojó los siguientes resultados:

Costos de Construcción:

Placa Huella (Hatonuevo, 2015). Se confirmó un costo de inversión planificado de $2,000 millones COP para 9.111 km, resultando en un costo unitario de ~$219.5 millones COP/km (precios de 2015).

Asfalto Natural MAPIA (San Martín, 2019. Se identificó un costo de ejecución final de ~$2,125 millones COP (IVA incluido). Basado en el volumen de MAPIA utilizado (1,650 m^3) y asumiendo un diseño típico (5m ancho, 7.5cm espesor), se estimó una longitud de ~4.4 km, lo que resulta en un costo unitario estimado de ~$483 millones COP/km (precios de 2019). Es relevante señalar que este proyecto tuvo un sobrecosto cercano al 58% sobre el valor inicial contratado.

Comparación de Costos Iniciales. Para una comparación más equitativa, se ajustó el costo de Hatonuevo por inflación a precios de 2019 (usando un factor estimado de 1.25): $219.5 M (2015) * 1.25 = $274.4 Millones COP/km (precios 2019). Al comparar este valor ajustado con el costo estimado de San Martín, se observa que, en estos casos específicos, el proyecto ejecutado con MAPIA resultó significativamente más costoso por kilómetro que el proyecto planificado con Placa Huella.

Factores Influyentes en Costos. La diferencia observada puede atribuirse a la inflación, pero también a factores específicos del proyecto con asfalto natural como el costo del material MAPIA, su transporte, la necesidad de estabilización de base y la adición de agregado triturado, además de los sobrecostos reportados durante la ejecución. El costo relativamente bajo del proyecto de Hatonuevo en 2015 también influye en la comparación.

Costos de Mantenimiento. No se encontraron datos para una comparación cuantitativa. Se anticipan menores costos de mantenimiento rutinario para la placa huella en comparación con los mantenimientos periódicos de pavimentos asfálticos.

Resultado Económico Principal. Si bien el asfalto natural aplicado en frío ofrece ahorros energéticos teóricos, el análisis de estos dos casos sugiere que su costo de construcción por kilómetro puede ser superior al de la placa huella, especialmente teniendo en cuenta los sobrecostos en ejecución y la necesidad de tratamientos adicionales como la estabilización de base. La factibilidad económica depende fuertemente de los costos específicos del material y de la complejidad del diseño requerido.

4.2. Resultados Ecológicos

La comparación ambiental de materiales y procesos reveló los siguientes resultados.

Impacto de Materiales. Este análisis revela que el cemento, usado mucho en la Placa Huella, tiene una huella de carbono bastante grande. También se identificó un impacto relacionado con la minería y el transporte del asfalto natural. Sin embargo, se descubrió que el proyecto de San Martín también usó cemento/cal/cenizas para estabilizar la base y agregado triturado, lo que añade estos impactos a la huella ecológica del proyecto MAPIA.

Proceso Constructivo y Energía. La aplicación en frío del MAPIA es su principal ventaja ecológica durante la construcción, reduciendo el consumo directo de energía y las emisiones en sitio comparado con alternativas en caliente. No obstante, la energía incorporada en el cemento (para la placa huella y para la estabilización de base en el caso MAPIA) y la energía consumida en transporte y maquinaria son factores relevantes para ambas soluciones.

Consumo de Agua. Se confirma la ventaja del asfalto en frío por un menor consumo de agua durante la etapa de construcción en comparación con el concreto de la placa huella.

Transporte: El impacto del transporte sigue siendo un factor crítico y dependiente de la ubicación específica del proyecto respecto a las fuentes de todos los materiales.

Resultado Ecológico Principal. La evaluación ecológica es compleja. La placa huella impacta significativamente por el uso de cemento, en contraste el asfalto natural en frío disminuye el impacto energético durante la construcción, pero su sostenibilidad general requiere analizar toda la cadena: extracción minera, transporte y otros materiales, la solución más sostenible está ligada al contexto específico del proyecto.

4.3. Síntesis Comparativa Final

La tabla numero 12 presenta de forma resumida los resultados comparativos clave obtenidos:

Tabla 12.
Resultados comparativos claves obtenidos

Aspecto	Hatonuevo (Placa Huella)	San Martín (MAPIA - Asfalto Natural)
Año Ejecución	2015 (Planificado)	2019 (Ejecutado)
Costo/km	~$219.5 M (2015) / ~$274.4 M (Aj. 2019)	~$483 M (2019, Estimado)
Proceso Const.	Colocación Concreto	Aplicación en Frío + Estab. Base
Materiales Clave	Cemento, Agregados, Acero	MAPIA, Estabilizante (Cem/Cal), Agreg. Trit.
Agua (Const.)	Alto	Bajo
Mantenimiento	Bajo (rutinario)	Periódico (esperado)
Permisos Ambientales.	No mayores (caso Hatonuevo)	No Identificado

Nota: La información fue recopilada de ambos proyectos: Proyecto Hatonuevo (Placa Huella) y Proyecto San Martín (MAPIA)

Capítulo 5. Conclusiones

Este estudio investigativo evaluó y comparó la factibilidad económica y el impacto ambiental de dos métodos principales para mejorar las carreteras terciarias en Colombia: los pavimentos naturales, usando el asfalto MAPIA como ejemplo, y el sistema de placa huella. Al analizar casos concretos – el proyecto de Placa Huella en Hatonuevo, La Guajira (2015) y el proyecto con Asfalto Natural MAPIA en San Martín, Cesar (2019) – se obtuvieron las siguientes conclusiones clave.

La placa huella se presenta como una alternativa técnica sólida y bien respaldada, con costos de construcción que pueden estimarse razonablemente y necesidades mínimas de mantenimiento regular. Su principal inconveniente ambiental radica en el uso de cemento Portland, cuya fabricación implica una considerable emisión de carbono. Sin embargo, su método de construcción y exigencias ambientales parecen ajustarse bien a entornos rurales, como se evidencia en la falta de permisos ambientales significativos en el caso analizado.

El asfalto natural MAPIA surge como una alternativa prometedora con potenciales beneficios económicos y ecológicos. El MAPIA, al aplicarse en frío, representa una ventaja ambiental considerable en la fase constructiva al reducir significativamente el consumo de energía y las emisiones directas en el lugar de la obra. No obstante, la experiencia del proyecto en San Martín expone las dificultades para utilizar este material. A pesar de los potenciales ahorros energéticos, el costo ejecutado por kilómetro fue considerablemente superior al de la placa huella. Este proyecto estuvo influenciado por sobrecostos en su ejecución, la necesidad de estabilización de base y la adición de agregado triturado.

Si bien el proceso en frío presenta una ventaja, es crucial considerar el impacto ambiental derivado de la extracción minera del MAPIA, su transporte y la incorporación de materiales complementarios, ya que todos estos elementos contribuyen a la huella ambiental global del proceso.

No se puede establecer una superioridad de una tecnología sobre la otra. La elección óptima para una vía terciaria específica depende de un balance entre factores económicos y ecológicos intrínsecamente ligados al contexto: por un lado la Placa Huella puede ser preferible donde la durabilidad a largo plazo y los bajos costos de mantenimiento son prioritarios, y donde el impacto del transporte sea manejable, en cambio, el Asfalto Natural (en frío) podría ser ventajoso donde se busque minimizar el consumo energético en obra, donde existan fuentes cercanas que reduzcan el impacto del transporte, y donde su costo de material puesto en obra resulte competitivo.

Esta investigación resalta que, si bien existen alternativas innovadoras al concreto tradicional, es fundamental superar las barreras de información para poder evaluar plenamente sus méritos económicos y ecológicos en comparación con soluciones establecidas como la placa huella.

Capítulo 6. Recomendaciones

Basándose en las conclusiones de este estudio comparativo, se proponen las siguientes recomendaciones:

Implementar sistemas robustos y transparentes para registrar y hacer públicos los datos detallados de costos, alcance, especificaciones técnicas y evaluaciones de desempeño a mediano y largo plazo para todos los proyectos de vías terciarias.

Continuar actualizando las guías para placa huella y desarrollar especificaciones claras para asfaltos naturales, abordando la variabilidad entre fuentes, criterios de diseño adaptados, y requisitos para aditivos

Exigir en la fase de factibilidad de los proyectos un análisis comparativo que incluya, además del costo inicial, una estimación del impacto por transporte de materiales y, si es posible, elementos básicos de análisis de ciclo de vida simplificado.

Financiar y ejecutar programas de seguimiento y evaluación del desempeño a largo plazo de diferentes soluciones implementadas en vías terciarias, para generar datos reales sobre durabilidad, costos de mantenimiento y ciclo de vida en condiciones colombianas.

Realizar estudios dedicados a recopilar y analizar costos de construcción y ciclo de vida de múltiples proyectos ejecutados con asfalto en frío y otros asfaltos naturales en Colombia, identificando los principales factores que influyen en su costo.

Implementar tramos de prueba instrumentados para comparar directamente el desempeño estructural, funcional y la durabilidad a largo plazo de placa huella vs. Pavimentos con asfaltos naturales bajo diferentes condiciones climáticas y de tráfico.

Referencias

Alarcón Dallos, J., Galvis Pinzón, W., Suarez Rivera, P., Alarcón Dallos, J., Galvis Pinzón, W., & Suarez Rivera, P. (2023). Factibilidad De Uso De Asfaltitas De Pesca Boyacá En Estructuras De Pavimento Flexible. *Revista Ingeniería De Construcción*, *38*(1), 90-103. Https://Doi.Org/10.7764/Ric.00054.21

Alarcon Peña, L. F. (2014). *Uso De La Asfaltita Para Pavimentos En Vías Terciarias En Boyacá Y Cundinamarca En La República De Colombia*. Http://Repository.Unimilitar.Edu.Co/Handle/10654/12013

Arandia, P. J. (2019, Febrero 27). *Ciudad Perdida: El Trekking Más Espectacular De Sudamérica*. Traveler. Https://Www.Traveler.Es/Naturaleza/Articulos/Guia-De-Viaje-Trekking-Senderismo-Ciudad-Perdida-Colombia-Como-Llegar-Donde-Dormir-Donde-Comer/14654

Arbelaez Agudelo, J. (2022, Agosto 30). *Vías Terciarias En Colombia: Un Reto Para El Desarrollo*. Bancolombia. Https://Www.Bancolombia.Com/Empresas/Capital-Inteligente/Especiales/Infraestructura-2022/Vias-Terciarias-En-Colombia

Asenjo González, M. (2001). El Comercio: Actividad Económica Y Dinámica Social En Las Plazas Y Mercados De Castilla, Siglos XIII-XV. *Cuadernos Del CEMYR*, *9*, 97-134.

Baquero Osorio, I. O. (2014). Breve Reseña Histórica De Las Vías En Colombia. *Ingeniería Solidaria*, *10*(17), Article 17. Https://Doi.Org/10.16925/In.V10i17.880

Baron Ramirez, A. A. (2020, Mayo 19). *Criterios De Sostenibilidad Aplicables A La Gestión De Proyectos Viales De Orden Terciario Basado En Las Guías De Sostenibilidad A Nivel Nacional E Internacional*. Https://Repository.Uamerica.Edu.Co/Handle/20.500.11839/7926

Botero Páez, S. (2007). Redescubriendo Los Caminos Antiguos Desde Colombia. *Bulletin De l'Institut Français D'études Andines*, *36 (3)*, Article 36 (3). Https://Doi.Org/10.4000/Bifea.3505

Cadavid Camargo, G., & Falchetti, A. M. (1987). *Buritaca 200: Arqueología Y Conservación De Una Población Precolombina (Sierra Nevada De Santa Marta- Colombia) | Boletín Museo Del Oro*. Https://Publicaciones.Banrepcultural.Org/Index.Php/Bmo/Article/View/7196

Caro, S., & Caicedo, B. (2017). TECNOLOGÍAS PARA VÍAS TERCIARIAS: PERSPECTIVAS Y EXPERIENCIAS DESDE LA ACADEMIA. *Revista De Ingeniería*, *45*, Article 45. Https://Doi.Org/10.16924/Revinge.45.3

Carreño, G. (2022, Noviembre 25). Minas De Asfaltita Colombia. *Cabo Rojo*. Https://Www.Caborojo.Co/Minas-De-Asfaltita-En-Colombia/

Carriedo Espinel, L. A., & Sánchez Hernández, D. A. (2024). *Guía De Supervisión E Interventoría Para La Construcción De Vías En Placa Huella, Para Implementar En La Empresa M.A.P.G Ingeniería Civil S.A.S*. Http://Hdl.Handle.Net/11634/53754

Celis, S., Roa, C., & Porras, L. (2020). Economía Circular Como Estrategia Para La Construcción De Vías En Colombia. Caso De Estudio. *Germina*, *2*, 70-94. Https://Doi.Org/10.52948/Germina.V2i2.211

Consejo Privado De Competitividad. (2022, 2023). *Informe Nacional De Competitividad 2022-2023*. Consejo Privado De Competitividad. Https://Compite.Com.Co/Informe/Informe-Nacional-De-Competitividad-2022-2023/

Correa Valderrama, E. (2017). EL ROL DE LAS VÍAS TERCIARIAS EN LA CONSTRUCCIÓN DE UN NUEVO PAÍS. *Revista De Ingeniería*, *45*, 64-71. Https://Doi.Org/10.16924/Revinge.45.9

Cruz-Chala, D. E., & Salazar-Cuellar, W. O. (2019). *Estudio Del Desempeño Mecánico De Una Mezcla Asfáltica Natural, Proveniente De La Mina De Pavas, En El Departamento Del Caquetá*. Https://Repository.Ucatolica.Edu.Co/Entities/Publication/972bab7e-3512-4e94-Bc68-714472bdf03b

DANE - ¿Dónde Estamos? (2024). Https://Www.Dane.Gov.Co/Index.Php/Estadisticas-Por-Tema/Demografia-Y-Poblacion/Censo-Nacional-De-Poblacion-Y-Vivenda-2018/Donde-Estamos

Delgado Pérez, E. M., & Morales Vanegas, H. (2021). *Análisis De Los Asfaltos Naturales, Para El Mejoramiento En Vías Terciarias, Implementando La Información Técnica De Los Diferentes Estudios Existentes Colombianos*. Https://Repository.Ucatolica.Edu.Co/Entities/Publication/6026b00e-8fab-46c0-B9f4-12cb31e074ad

Departamento Nacional De Planeacion. (2016). *Mejoramiento De Vías Terciarias—Vías De Tercer Orden*. Https://Proyectostipo.Dnp.Gov.Co/Index.Php?Option=Com_K2&View=Item&Layout=Item&Id=125

DNP, D. N. De P. (2021). *Inventario Y La Categorización De La Red Vial Nacional*. DEPARTAMENTO NACIONAL DE PLANEACIÓN.

Https://Proyectostipo.Dnp.Gov.Co/Index.Php?Option=Com_K2&View=Item&Id=211:Inventario-De-La-Red-Vial-De-Tercer-Orden&Itemid=278

Forbes, R. J. (1964). *Studies In Ancient Technology / By R.J. Forbes.* (Second Revised Edition.). E.J. Brill.

Galvis, L. A. (2002, Febrero). *La Topografía Económica De Colombia | Banco De La República*. Https://Www.Banrep.Gov.Co/Es/Topografia-Economica-Colombia

Garavito Arevalo, V. (2021). *Asfaltita: Introducción A La Asfaltita*. Http://Hdl.Handle.Net/1992/54587

García, J. P. A. (2017, Julio 18). El Origen De Los Caminos. *Asfalto Madrid*. Https://Asfaltomadrid.Com/Blog/El-Origen-De-Los-Caminos/

Garcia Lopez, L. (2023, Junio 21). *Las Rutas Comerciales En La Edad Media*. Genially. Https://View.Genial.Ly/64931d87d4f7b90019ce5e2d/Presentation-Las-Rutas-Comerciales-En-La-Edad-Media

Gómez Casablanca, L. H. (2006). Ingeniería Precolombina. *Boletín De Historia Y Antigüedades*, *93*(833), 431-462.

Gómez Galván, M., Gallardo Amaya, R., & Macgregor Torrado, A. A. (2019). Pavimentación Con Asfalto Natural “MAPIA”. Estudio De Caso: Proyecto Mejoramiento De La Vía El Diviso – Torcoroma Del Municipio De San Martin, Cesar. *Revista Ingenio*, *16*(1), Article 1. Https://Doi.Org/10.22463/2011642X.2334

Gómez Rojas, O. E. (2018). *Evaluación De Las Especificaciones Técnicas Para El Uso Del Asfalto Natural Procedente De La Mina La Milagrosa (Norcasia –Caldas) En Afirmado, Base Y Sub Bases Granulares*. Https://Repository.Upb.Edu.Co/Handle/20.500.11912/5618

GREEN POWER, E. (2023, Septiembre 14). *Qué Es La Huella De Carbono Y Cómo Se Calcula*. Https://Www.Enelgreenpower.Com/Es/Learning-Hub/Transicion-Energetica/Huella-De-Carbono

Higuera-Sandoval, C. H., Salamanca-Rodríguez, E. C., & Santos-Chaparo, C. F. (2012). Caracterización De Las Asfaltitas De Pesca En Boyacá-Cantera Santa Teresa. *Revista Ingenio*, *5*(1), Article 1. Https://Doi.Org/10.22463/2011642X.2005

Ico Ordóñez, L. M. (2020). *Análisis De La Inversión Pública En El Sector Agropecuario En Colombia (2010—2020)*. Http://Hdl.Handle.Net/10654/37207

IDEAM. (2021). *Inventario Nacional Y Departamental De Gases De Efecto Invernadero—Colombia*. Https://Archivo.Minambiente.Gov.Co/Images/Asuntosmarinoscosterosyrecursosacuatico/INGEI.Pdf

Ingenieros De La UDES Transforman Residuos Mineros En Placa Huella Para Sector Rural De Santander. (S. F.). UDES Bucaramanga. Recuperado 10 De Marzo De 2025, De Https://Bucaramanga.Udes.Edu.Co/Investigacion/Noticias/Ingenieros-De-La-Udes-Transforman-Residuos-Mineros-En-Placa-Huella-Para-Sector-Rural-De-Santander

INVIAS. (2017, Octubre 30). *Guía De Diseño De Pavimentos Con Placa—Huella*. Https://Www.Invias.Gov.Co/Index.Php/Archivo-Y-Documentos/Documentos-Tecnicos/6644-Guia-De-Disenoo-De-Pavimentos-Con-Placa-Huella

INVIAS. (2022, Julio 12). *Guía De Manejo Ambiental De Proyectos De Infraestructura—MODO CARRETERO - Versión Corta*. Https://Www.Invias.Gov.Co/Index.Php/Archivo-Y-Documentos/Documentos-Tecnicos/13304-Guia-De-Manejo-Ambiental-De-Proyectos-De-Infraestructura-Modo-Carretero-Version-Corta

INVIAS. (2023, Abril 19). *Invías Y Su Política De Sostenibilidad Se Alinean Con Los Objetivos De Desarrollo Sostenible (ODS)*. Https://Www.Invias.Gov.Co/Index.Php/Sala/Noticias/5030-Invias-Y-Su-Politica-De-Sostenibilidad-Se-Alinean-Con-Los-Objetivos-De-Desarrollo-Sostenible-Ods

Kay, C., & Salazar, G. (2001). Estructura Agraria, Conflicto Y Violencia En La Sociedad Rural De América Latina (Agrarian Structure, Conflict And Violence In Rural Society In Latin America). *Revista Mexicana De Sociología*, *63*(4), 159-195. Https://Doi.Org/10.2307/3541472

Larosa, M., & Mejía, G. (2014, Febrero 6). *Historia Concisa De Colombia (1810-2013)*. Https://Repository.Urosario.Edu.Co/Items/3c940477-1803-4b4e-A0a5-C69701b8c049

Macas Analuiza, A. M. (2025). *Pobreza Rural Y Producción Agrícola En América Latina* [Bachelorthesis, Riobamba: Universidad Nacional De Chimborazo]. Http://Dspace.Unach.Edu.Ec/Handle/51000/14476

Martinez, K. V. Q., & Ramirez Cañón, M. C. (2023, Enero 25). *Entre Trochas Y Carreteras: Caminar Por Las Vías Terciarias Colombianas* [Text]. ELESPECTADOR.COM. Https://Www.Elespectador.Com/Economia/Estado-De-Las-Carreteras-En-Colombia-Las-Vias-Terciarias-Que-Frenan-El-Desarrollo/

Martínez Portomeñe, J. (2020). *La Nueva Ruta De La Seda: Infraestructura, Comercio Y Geopolítica = The New Silk Road: Infrastructure, Trade And Geopolitics*. Https://Buleria.Unileon.Es/Handle/10612/12439

Moreno Anselmi, L. A., Reyes Ortiz, Ó. J., & Ruíz Acero, J. C. (2016). Evaluación Del Comportamiento Mecánico De Asfalto Natural A Partir De Muestras A Temperatura Ambiente Provenientes De Caquetá, Colombia. *Revista De Investigación, Desarrollo E Innovación*, *6*(2), Article 2. Https://Doi.Org/10.19053/20278306.3115

Muñoz, L. V. L. (2019). Pobreza Y Subdesarrollo Rural En Colombia. Análisis Desde La Teoría Del Sesgo Urbano. *Estudios Políticos*, *54*, Article 54. Https://Doi.Org/10.17533/Udea.Espo.N54a04

Narvaez, L. (2017). VÍAS TERCIARIAS: MOTOR DEL DESARROLLO ECONÓMICO RURAL. *Revista De Ingeniería*, *45*, Article 45. Https://Doi.Org/10.16924/Revinge.45.11

National Geographic. (2022, Junio 27). Que Todos Los Caminos Regresen A Roma: El Plan Para Recuperar La Mítica Vía Apia. *National Geographic En Español*. Https://Www.Ngenespanol.Com/El-Mundo/Para-Que-Todos-Los-Caminos-Regresen-A-Roma-El-Plan-Para-Recuperar-La-Mitica-Via-Apia/

National Geographic. (2023, Julio 24). *3 Ways To Plan A Camino De Santiago Hiking Pilgrimage*. Travel. Https://Www.Nationalgeographic.Com/Travel/Article/Hike-Camino-De-Santiago-Ways

Niño Estupiñan, D. F. (2016, Diciembre 12). *Caracterizar Y Realizar El Diseño Con Material De La Región De San Luis, Tolima Para El Mejoramiento De La Red Secundaria Y*

Terciaria Del Departamento De Cundinamarca, Utilizando Como Material Ligante La Mapia – Asfaltita. Https://Repository.Umng.Edu.Co/Items/38ac6a3b-F717-4240-857b-D9b7ba1f6ad2

Orobio, A., & Orobio, J. C. (2016). Pavimentos Con Placa-Huella De Concreto Simple: Análisis Con Elementos Finitos 3D. *DYNA*, *83*(199), 9-18. Https://Doi.Org/10.15446/Dyna.V83n199.55350

Páez Botero, S. (2010). Elementos Para Leer Un Palimpsesto: Indígenas, Caminos, Piedras, Mulas Y Caballos En Colombia. *Boletín De Antropología*, *20*(37), Article 37. Https://Doi.Org/10.17533/Udea.Boan.6899

Palacios Cortes, D. A., & Chavarro, W. (2022). *Diagnóstico De Viabilidad Técnica Para La Construcción De Placa Huella Entre La Vereda Pénjamo Y La Vereda La Cunchalita En El Municipio De Otanche – Boyacá*. Https://Repository.Ucatolica.Edu.Co/Entities/Publication/4c356035-E8c5-4978-9475-9d8d58d33665

Pening Gaviria, J. P. (2023, Noviembre 23). *Inversión De Recursos Públicos En Infraestructura De Vías Terciarias*. Https://Www.Dnp.Gov.Co:443/Publicaciones/Planeacion/Paginas/Inversion-De-Recursos-Publicos-En-Infraestructura-De-Vias-Terciarias.Aspx

Perea Muñiz, J. U. (2024). *Metodología Para Diseño De Pavimento Asfaltico Reciclado, Y Su Aplicación En Capas De Rodadura De Vías Urbanas* [Masterthesis, Machala; Universidad Técnica De Machala]. Http://Repositorio.Utmachala.Edu.Ec/Handle/48000/23093

Pérez, G. (2020, Julio). *Caminos Rurales: Vías Claves Para La Producción, La Conectividad Y El Desarrollo Territorial | CEPAL*.

Https://Www.Cepal.Org/Es/Publicaciones/45781-Caminos-Rurales-Vias-Claves-La-Produccion-La-Conectividad-Desarrollo-Territorial

Pérez, G. (2021). *Impactos Sociales De Los Caminos Rurales En Mesoamérica*. Comisión Económica Para América Latina Y El Caribe. Https://Www.Cepal.Org/Es/Publicaciones/47566-Impactos-Sociales-Caminos-Rurales-Mesoamerica

Pérez-Salas, G. (2020, Julio 7). *La Falta De Inversión En Caminos Rurales Como Un Obstáculo A Una Recuperación Económica Sostenible*. Https://Es.Linkedin.Com/Pulse/La-Falta-De-Inversi%C3%B3n-En-Caminos-Rurales-Como-Un-Una-P%C3%A9rez-Salas

Pérez-Valbuena, G. J. (2005). *La Infraestructura Del Transporte Vial Y La Movilización De Carga En Colombia*. Banco De La República. Https://Doi.Org/10.32468/Dtseru.64

Perfetti, J. J. (2019, Mayo 12). *¿Por Qué Hay Que Construir Y Mejorar Las Vías Terciarias En Colombia?* Semana.Com Últimas Noticias De Colombia Y El Mundo. Https://Www.Semana.Com/Por-Que-Hay-Que-Construir-Y-Mejorar-Las-Vias-Terciarias-En-Colombia/615782/

Piedrahita Tamayo, N. (2019, Mayo 21). *Mezclas Asfálticas Naturales Para La Salud Del Planeta*. Https://Www.Udea.Edu.Co/Wps/Portal/Udea/Web/Inicio/Udea-Noticias/Udea-Noticia/!Ut/P/Z0/Fywxc8iwfit_Ikthsaw16lgcbhfwegmzycon-Jtja5nuxf9vqoo4ubx3x3fhjkuydhdhm0qkbyblworjyrnkj2xbt1wugpdiv8zm-Xq6P3C2YfI_Kb7w2nwyzfkri_Orwdwsj2d6rkpgifymc1n98yoohevucchj77xdhgbqw7faizwociwfc1h7jfv9vabcgmijtaktdrb7d0yh1t5k_Qlbufu7/

Quinn, R. (2023, Abril 17). *Tulum: The City That Greets The Dawn*. Rcquinn.Com. Https://Www.Rcquinn.Com/Tulum-The-City-That-Greets-The-Dawn/

Regal Alberti, B. (1936). Los Caminos Del Imperio Romano. *Revista De La Universidad Católica. Tomo IV Año 5 N°23 (Jun. 1936)*. Https://Repositorio.Pucp.Edu.Pe/Index/Handle/123456789/52966

Rengifo Gutiérrez, O. A. (2018). *INFRAESTRUCTURA VIAL Y DESARROLLO ECONÓMICO TERRITORIAL EN COLOMBIA: ¿PROSPERIDAD PARA QUIÉN?*

Rodriguez Salcedo, C. (2019, Febrero 15). *Del Total De La Red Vial Terciaria Con La Que Cuenta Colombia, 96% Está En Mal Estado*. Diario La República. Https://Www.Larepublica.Co/Infraestructura/Del-Total-De-La-Red-Vial-Terciaria-Con-La-Que-Cuenta-Colombia-96-Esta-En-Mal-Estado-2828335

Rsys, E. (2022, Febrero 19). *Impacto Ambiental: Qué Es, Definición, Tipos, Causas, Medición Y Ejemplo*. Responsabilidad Social Empresarial Y Sustentabilidad. Https://Responsabilidadsocial.Net/Impacto-Ambiental-Que-Es-Definicion-Tipos-Causas-Medicion-Y-Ejemplo/

Ruiz Núñez, K. Y. (2021). *Análisis Económico Del Uso De Mezcla Asfáltica Natural Proveniente De Norcasia, Caldas En El Mejoramiento De La Red Vial Regional De Los Municipios Del Magdalena Medio* [Bachelorthesis, Escuela De Ingenierías]. Https://Repository.Upb.Edu.Co/Handle/20.500.11912/11397

Salamanca Rodriguez, E. C. (S. F.). *Elaboración De La Especificación Particular Para Mezclas Asfálticas Usando La Asfaltita De Pesca- Boyacá—Cantera Santa Teresa*. Recuperado

28 De Febrero De 2025, De Https://Repository.Umng.Edu.Co/Items/5b31bce5-07b9-40d6-B853-45ce9844f660

Sanabria Torres, A. E., Ariza, M. C. A., & Acevedo Pérez, J. V. (2021). Estudio De La Asfaltita Y Aplicaciones En Mezclas Asfálticas Tibias Y Semitibias. *Avances Investigación En Ingeniería*, *18*(2), Article 2. Https://Doi.Org/10.18041/1794-4953/Avances.2.7068

Sanchez Torres, Y. D. (2017, Diciembre 16). *Utilización De Asfalto Natural En La Construcción De Pavimentos En Colombia: Una Recopilación Bibliográfica*. Https://Repository.Umng.Edu.Co/Items/9caf0032-4eed-4f11-8d2e-87d87ceed50e

Santos, D. (2017). *Aspectos De La Historia Del Imperio Romano: Textos De Morstein-Marx, Rosenstein, Mattingly, Ziolkowski, Grey Y Drinkwater* [Recurso Electrónico]. La Plata, Argentina.

Sanz García, J. M. (2022). *Evolución Del Diseño En Firmes De Carreteras Y Nuevos Materiales En La Era De La Economía Circular: Un Cambio De Paradigma* [Phd Thesis, Universidad Politécnica De Madrid]. Https://Doi.Org/10.20868/UPM.Thesis.72063

SIAC. (2015). *GASES DE EFECTO INVERNADERO, IDEAM*. Http://Www.Siac.Gov.Co/Web/Siac/Climaticogei

SINIC. (2024, Enero 30). *Inventarios Viales*. Https://Lookerstudio.Google.Com/Reporting/De6f248c-9156-4f11-87a0-Bb70a4307744/Page/Srood

Speight, J. G. (2015). *Handbook Of Petroleum Product Analysis*. John Wiley & Sons.

Tino Ramos, R. (2007). Vías, Carreteras Y Otras Calzadas: Breve Historia De Las Mismas. *Cimbra: Revista Del Colegio De Ingenieros Técnicos De Obras Públicas*, *376*, 16-25.

Useche Lozada, M., De La Cruz Federici, M. L., Rodriguez De Leon, M., & Sierra Restrepo, A. (1995). *Caminos Reales De Colombia*. Https://Babel.Banrepcultural.Org/Digital/Collection/P17054coll10/Id/3383

Vargas Rubio, P. (2021, Diciembre 10). *Colombia Continúa Rezagada En Vías Terciarias | Más Colombia*. Https://Mascolombia.Com/Colombia-Rezagada-En-Vias-Terciarias/

Velásquez Salguero, L. A., Montealegre Monroy, H., Parra Rodríguez, L. K., & Vera Chila, F. E. (2020). *Asfalto Natural Alternativa De Mejoramiento, Rehabilitación Y Construcción De La Infraestructura Vial Del Alto Magdalena Colombia*. *5*(05).

Wilches Gòmez, L. M., & Villegas Camargo, J. D. (2019). *Utilización De Mezcla Asfáltica Natural (MAN), Procedente De La Mina San Pedro, Ubicada En El Municipio De Armero Guayabal, Departamento Del Tolima, Colombia, Con Adición De Gránulo De Caucho Reciclado (GCR), Para Reparcheo Localizado. Reparcheo Ecológico*. Http://Hdl.Handle.Net/11634/17951

World Bank. (2024). *Agricultura Y Alimentación* [Text/HTML]. World Bank. Https://Www.Worldbank.Org/En/Topic/Agriculture/Overview

Zorio Blanco, V. (1987). *Breve Historia De Las Carreteras*.