



**UNIVERSIDAD NACIONAL DE CHIMBORAZO
FACULTAD DE INGENIERÍA
CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL**

Evaluación de la huella de carbono del proceso de estabilización de subrasante con mezcla asfáltica reciclada en la vía Pungalá-Alao.

**Trabajo de Titulación para optar al título de
Ingeniero Civil**

Autor:

Ayala Cali, Odalis Yulissa

Tutor:

Mgs. Carlos Saldaña García

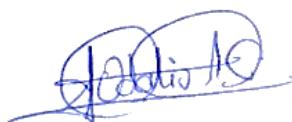
Riobamba, Ecuador. 2026

DECLARATORIA DE AUTORÍA

Yo, **Odalís Yulissa Ayala Cali** con cedula de ciudadanía 0605382597, autora del trabajo de investigación titulado: **“Evaluación de la huella de carbono del proceso de estabilización de subrasante con mezcla asfáltica reciclada en la vía Pungalá-Alao.”**, certifico que la producción, ideas, opiniones, criterios, contenidos y conclusiones expuestas son de mi exclusiva responsabilidad.

Asimismo, cedo a la Universidad Nacional de Chimborazo, en forma no exclusiva, los derechos para su uso, comunicación pública, distribución, divulgación y/o reproducción total o parcial, por medio físico o digital; en esta cesión se entiende que el cesionario no podrá obtener beneficios económicos. La posible reclamación de terceros respecto de los derechos de autor(a) de la obra referida, será de mi entera responsabilidad; librando a la Universidad Nacional de Chimborazo de posibles obligaciones.

En Riobamba, a los 30 días del mes de junio de 2026.



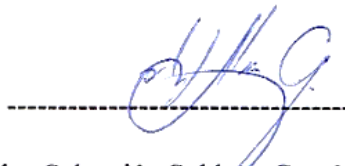
Odalis Yulissa Ayala Cali

C.I: 0605382597

DICTAMEN FAVORABLE DEL PROFESOR TUTOR

Quien suscribe, Ing. Carlos Sebastián Saldaña García, Mgs., catedrático adscrito a la Facultad de Ingeniería, por medio del presente documento certifico haber asesorado y revisado el desarrollo del trabajo de investigación titulado: **“EVALUACIÓN DE LA HUELLA DE CARBONO DEL PROCESO DE ESTABILIZACIÓN DE SUBRASANTE CON MEZCLA ASFÁLTICA RECICLADA EN LA VÍA PUNGALÁ-ALAO.”**, bajo la autoría de Odalis Yulissa Ayala Cali; por lo que se autoriza ejecutar los trámites legales para su sustentación.

Es todo cuanto informar en honor a la verdad; en Riobamba, a los 30 días del mes de junio de 2026



Ing. Carlos Sebastián Saldaña García, Mgs.

C.I: 0301496584

CERTIFICADO DE LOS MIEMBROS DEL TRIBUNAL

Quienes suscribimos, catedráticos designados Miembros del Tribunal de Grado para la evaluación del trabajo de investigación **“EVALUACIÓN DE LA HUELLA DE CARBONO DEL PROCESO DE ESTABILIZACIÓN DE SUBRASANTE CON MEZCLA ASFÁLTICA RECICLADA EN LA VÍA PUNGALÁ-ALAO.”**, presentado por Odalis Yulissa Ayala Cali, con cédula de identidad número 0605382597, bajo la tutoría de Ing. Carlos Sebastián Saldaña García, Mgs; certificamos que recomendamos la **APROBACIÓN** de este con fines de titulación. Previamente se ha evaluado el trabajo de investigación y escuchada la sustentación por parte de su autor; no teniendo más nada que observar.

De conformidad a la normativa aplicable firmamos, en Riobamba 30 de junio de 2026.

Ing. Hernán Vladimir Pazmiño Chiluiza.

PRESIDENTE DEL TRIBUNAL DE GRADO

Ing. Julio Andrés Fiallos Iglesias.

MIEMBRO DEL TRIBUNAL DE GRADO

Ing. Marcelo David Guerra Valladares.

MIEMBRO DEL TRIBUNAL DE GRADO



Dirección
Académica
VICERRECTORADO ACADÉMICO

en movimiento



UNACH-RGF-01-04-02.20
VERSIÓN 02: 06-09-2021

CERTIFICACIÓN

Que, Odalis Yulissa Ayala Cali con CC: 0605382597 estudiante de la Carrera de **Ingeniería Civil**, Facultad de **Ingeniería**; han trabajado bajo mi tutoría el trabajo de investigación titulado: "**Evaluación de la huella de carbono del proceso de estabilización de subrasante con mezcla asfáltica reciclada en la vía Pungalá-Alao.**", cumple con el 10% de acuerdo al reporte del sistema Anti plagio **COMPILATIO**, porcentaje aceptado de acuerdo a la reglamentación institucional, por consiguiente autorizo continuar con el proceso.

Riobamba, 17 de junio de 2026

Mgs. Carlos Saldaña García
TUTOR TRABAJO DE INVESTIGACIÓN

DEDICATORIA

Dedico este trabajo, en primer lugar, a Dios, por iluminar mi camino, darme fortaleza en los momentos de dificultad y bendecirme con la oportunidad de alcanzar una de las metas más importantes de mi vida.

A mis amados padres, Marco Hernán Ayala Álvaro y María del Rocío Cali Padilla, por ser el pilar fundamental de mi vida. Gracias por su amor incondicional, sus sacrificios, sus enseñanzas y por creer en mí incluso cuando el camino parecía difícil. Todo lo que hoy soy y este logro alcanzado llevan el reflejo de su esfuerzo y dedicación.

A mis hermanos, por formar parte de mi vida y por ser una fuente constante de alegría y motivación.

A toda mi familia, por acompañarme siempre con su cariño y por recordarme que cada esfuerzo vale la pena cuando se persigue un sueño con dedicación.

Con todo mi amor y gratitud, dedico este trabajo a quienes han sido parte esencial de mi historia y de este importante logro.

Odalís Yulissa Ayala Cali

AGRADECIMIENTO

Mi más profundo agradecimiento a Dios, por regalarme la vida, fortalecer mi fe, guiar cada uno de mis pasos y brindarme la sabiduría, la salud y la perseverancia necesarias para culminar con éxito esta etapa de mi formación profesional.

A mis padres, Marco Hernán Ayala Álvaro y María del Rocío Cali Padilla, les expreso mi eterna gratitud por el inmenso amor con el que me han acompañado, por los sacrificios realizados para brindarme una educación, por sus consejos, su confianza y por enseñarme que el esfuerzo, la humildad y la perseverancia son el camino para alcanzar los sueños. Este logro también es suyo.

A mis hermanos y a toda mi familia, gracias por su compañía, comprensión y por motivarme a seguir adelante cuando el camino parecía difícil. Su presencia fue un apoyo invaluable durante este recorrido.

Expreso también mi agradecimiento a todas las personas que creyeron en mí, me alentaron a continuar, compartieron sus conocimientos, me brindaron su ayuda cuando la necesité y confiaron en mis capacidades para alcanzar esta meta.

Finalmente, agradezco a quienes, de una u otra forma, contribuyeron a mi crecimiento personal y profesional durante esta etapa, dejando enseñanzas que llevaré conmigo a lo largo de mi vida.

Odalys Yulissa Ayala Cali

ÍNDICE GENERAL

DECLARATORIA DE AUTORIA
DICTAMEN FAVORABLE DEL PROFESOR
CERTIFICADO DE LOS MIEMBROS DEL TRIBUNAL
CERTIFICADO ANTIPLAGIO
DEDICATORIA
AGRADECIMIENTO
ÍNDICE GENERAL
ÍNDICE DE TABLAS
ÍNDICE DE FIGURAS
RESUMEN
ABSTRACT

CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN	13
1.1 Planteamiento del problema.....	14
1.2 Justificación del problema	15
1.3 Objetivos.....	16
1.4.1 Objetivo general	16
1.4.2 Objetivos específicos.....	16
CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO.....	17
2.1 Estado del arte.....	17
2.2 Bases Teóricas	18
2.2.1 Estabilización de subrasante	18
2.2.2 Mezcla asfáltica reciclada (RAP) como material no ligado.....	18
2.2.3 Lastrado convencional	19
2.2.4 Huella de carbono en la infraestructura vial	20
2.2.5 Análisis de Ciclo de Vida aplicado a infraestructura vial.....	20
2.3 Procesos constructivos de las alternativas evaluadas.....	21
2.3.1 Estabilización mediante RAP.....	21
2.3.2 Mantenimiento mediante lastrado convencional.....	22
CAPITULO III. METODOLOGÍA.....	24
3.1 Tipo de Investigación	24
3.2 Diseño de investigación.....	24

3.3	Diagrama Metodológico	25
3.4	Técnicas de recolección de datos	26
3.5	Instrumentos de procesamiento y análisis de datos.....	26
3.6	Zona de estudio	26
3.7	Población de estudio y tamaño de muestra.....	28
3.7.1	Población	28
3.7.2	Tamaño de muestra.....	28
3.8	Etapas de estudio.....	28
3.8.1	Definición de procesos	28
3.8.2	Sistematización de la información	29
3.8.3	Modelación y cálculo de la huella de carbono.....	36
3.8.3.5	Integración de huella de carbono	41
3.9	Procesamiento y análisis de datos.....	41
3.9.1	Análisis comparativo entre alternativas.....	41
3.9.2	Análisis dinámico temporal	42
3.9.3	Visualización y representación de resultados.....	42
CAPITULO IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....		43
4.1	Introducción al análisis de resultados.....	43
4.2	Caracterización de los procesos viales evaluados por simulación.....	43
4.2.1	Simulación 1- RAP directo	43
4.2.2	Simulación 2-RAP con acopio	43
4.2.3	Simulación 3- Lastrado convencional	43
4.3	Análisis estático de huella de carbono	44
4.4	Análisis dinámico temporal	45
4.5	Comparación de métodos constructivos por procesos	48
4.6	Comparación de métodos constructivos por categoría.....	49
4.7	Comparación de métodos constructivos por elemento.....	50

4.8	Síntesis comparativa global de simulaciones.....	51
4.9	Consideraciones para la optimización operativa.....	52
CAPITULO V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....		53
5.1	Conclusiones	53
5.2	Recomendaciones.....	54
BIBLIOGRAFIA.....		55
ANEXOS.....		58

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.	Distancias usadas para el análisis de huella de carbono	30
Tabla 2.	Resultados totales de huella de carbono para una intervención constructiva única	44
Tabla 3.	Proyección acumulada de emisiones de CO ₂ e por escenario en un horizonte de 10 años.	47

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.	Fases para el desarrollo de un ACV.	21
Figura 2.	Proceso de investigación	25
Figura 3.	Ubicación geográfica de la vía Pungalá–Alao, de cantera, stock RAP y puntos de captación de agua.	26
Figura 4.	Sectorización de la vía Pungalá–Alao según módulo resiliente y CBR mediante Geogauge.....	28
Figura 5.	Distribución porcentual de la huella de carbono por escenario evaluado (Análisis estático)	45
Figura 6.	Evolución temporal acumulada de la huella de carbono en un horizonte de 10 años (Análisis dinámico).....	47
Figura 7.	Comparación de emisiones de CO ₂ por procesos constructivos.....	48
Figura 8.	Comparación de la huella de carbono asociada a la categoría equipos.....	49
Figura 9.	Comparación de la huella de carbono asociada a la categoría mano de obra.	50
Figura 10.	Comparación de la huella de carbono por elemento constructivo.	51

RESUMEN

La presente investigación tuvo como objetivo determinar la huella de carbono teórica generada durante los procesos de estabilización de subrasante mediante mezcla asfáltica reciclada (RAP) en la vía Pungalá-Alao, incorporando un escenario comparativo de mantenimiento mediante lastrado convencional. El estudio se desarrolló bajo un enfoque cuantitativo y un diseño no experimental, aplicando principios del análisis de ciclo de vida (ACV), para cuantificar las emisiones de CO₂ asociados al transporte de materiales, la operación de maquinaria pesada y la ejecución de actividades constructivas.

La metodología consideró tres escenarios operacionales: estabilización mediante RAP directo, estabilización con RAP y acopio temporal, y mantenimiento mediante lastrado convencional. Para cada alternativa se evaluaron procesos de transporte, humectación y compactación, utilizando parámetros de rendimiento, consumo de combustible y factores de emisión.

Los resultados mostraron que el lastrado convencional presentó la menor huella de carbono inicial, mientras que los escenarios con RAP registraron mayores emisiones debido al transporte del material reciclado. No obstante, el análisis temporal evidenció un mejor desempeño ambiental del RAP a largo plazo, debido a la reducción de intervenciones de mantenimiento. Se concluye que la estabilización mediante RAP constituye una alternativa técnicamente viable y ambientalmente sostenible para el mantenimiento de caminos rurales andinos.

Palabras clave: Huella de carbono; Pavimento asfáltico reciclado (RAP); Análisis de ciclo de vida; Estabilización de subrasante; Caminos rurales.

ABSTRACT

This study aimed to determine the theoretical carbon footprint generated during subgrade stabilization processes using Reclaimed Asphalt Pavement (RAP) on the Pungalá–Alao road, including a comparative scenario based on conventional gravel road maintenance. The research adopted a quantitative, non-experimental design and applied Life Cycle Assessment (LCA) principles to quantify CO₂ emissions associated with material transportation, heavy equipment operation, and construction activities. The methodology considered three operational scenarios: direct RAP stabilization, RAP stabilization with temporary stockpiling, and conventional gravel maintenance. For each alternative, transportation, moisture conditioning, and compaction processes were evaluated using productivity parameters, fuel consumption data, and emission factors. The results showed that conventional gravel maintenance generated the lowest initial carbon footprint, whereas RAP-based scenarios produced higher emissions due to the transportation of recycled material. However, the temporal analysis revealed better long-term environmental performance for RAP stabilization, mainly due to the reduced frequency of maintenance interventions. It is concluded that RAP stabilization is a technically feasible and environmentally sustainable alternative for maintaining rural Andean roads.

Keywords: carbon footprint; reclaimed asphalt pavement (RAP); Life Cycle Assessment (LCA); Subgrade stabilization; Rural roads.



Reviewed by:
Mgs. Hugo Romero
ENGLISH PROFESSOR
C.C. 0603156258

CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN

La conservación y el mantenimiento de la infraestructura vial constituye un elemento fundamental para garantizar la conectividad y el desarrollo socioeconómico de las zonas rurales, especialmente en sectores donde las condiciones geotécnicas y climáticas aceleran el deterioro de la superficie de rodadura. En este contexto, la estabilización de subrasantes representa una técnica alternativa utilizada para mejorar la capacidad portante del suelo y prolongar la vida útil funcional de las vías no pavimentadas. Sin embargo, los métodos tradicionales de mantenimiento vial requieren una elevada extracción de materiales pétreos vírgenes y una utilización intensiva de maquinaria pesada, generando un incremento en el consumo energético y en las emisiones de gases de efecto invernadero [1], [2].

En respuesta a estos desafíos logísticos y ambientales, la estabilización de subrasantes empleando materiales alternativos se presenta como una alternativa técnica viable. Al respecto, investigaciones locales previas han demostrado que la estabilización de vías de tercer orden en el cantón Riobamba mejora notablemente la eficiencia operativa [3]. Por su parte, bajo los principios de la economía circular, se ha validado de forma específica el uso de RAP (mezcla asfáltica reciclada) en el corredor vial Pungalá- Alao [4]. En dichos estudios, el material reciclado fue empleado exclusivamente como capa de mejoramiento de la subrasante, sin considerar procesos de pavimentación definitiva.

A pesar de los resultados geotécnicos y operacionales obtenidos en investigaciones previas, aún existe una evaluación ambiental limitada relacionada con las emisiones generadas durante los procesos constructivos asociados a la estabilización vial en caminos rurales andinos. En este sentido, la huella de carbono constituye un indicador ambiental que permite cuantificar las emisiones de gases de efecto invernadero asociados al uso de maquinaria, transporte de materiales y ejecución de actividades constructivas dentro de proyectos de infraestructura vial [5]. Para ello, metodologías como el Análisis de Ciclo de Vida (ACV) permiten evaluar el impacto ambiental de diferentes alternativas constructivas mediante la integración de variables operacionales y logísticas asociadas al proceso constructivo.

Bajo este enfoque, la presente investigación tiene como objetivo determinar la huella de carbono teórica asociada a los procesos de estabilización de subrasante mediante RAP en la vía Pungalá-Alao. Para ello, se consideran diferentes escenarios operacionales relacionados con el transporte, provisión y aplicación del material reciclado. Asimismo, se incorpora como escenario comparativo el mantenimiento mediante lastrado convencional, con el propósito de analizar las diferencias ambientales entre ambas alternativas constructivas. Para ello, se empleará información técnica y operativa obtenida de investigaciones previas desarrolladas dentro del mismo corredor vial, integrando parámetros de rendimiento, transporte, consumo de combustible y operación de maquinaria pesada.

Finalmente, mediante el modelamiento de emisiones y el análisis comparativo de escenarios, la investigación busca aportar información técnica relacionada con el desempeño ambiental de procesos de estabilización vial aplicados en caminos rurales de montaña. Los resultados obtenidos permitirán identificar las actividades con mayor incidencia en la generación de emisiones de CO₂ y contribuirán al análisis de alternativas de mantenimiento vial orientadas hacia prácticas constructivas con menor impacto ambiental dentro del contexto de la ingeniería civil.

1.1 Planteamiento del problema

La infraestructura vial constituye un elemento fundamental para el desarrollo económico y social en zonas rurales, debido a que permite la conectividad entre comunidades y facilita el transporte de bienes, servicios y actividades productivas. Sin embargo, gran parte de las vías rurales no pavimentadas presentan problemas relacionados con baja capacidad portante, erosión superficial y deterioro progresivo de la subrasante, situación que incrementa la necesidad de intervenciones periódicas de mantenimiento vial.

En las últimas décadas, el sector de la construcción ha sido identificado como una de las principales fuentes de emisiones de gases de efecto invernadero debido al uso intensivo de maquinaria, transporte de materiales y consumo de combustibles fósiles. Según la International Energy Agency (2022), el sector de la construcción y operación de infraestructura genera aproximadamente el 37% de las emisiones globales de CO₂ relacionadas con energía. Dentro de la ingeniería vial, los procesos tradicionales de mantenimiento de caminos rurales requieren grandes volúmenes de materiales pétreos provenientes de cantera, además de actividades constantes de transporte y operación de maquinaria pesada, generando impactos ambientales significativos [6].

Frente a esta problemática, diferentes investigaciones han promovido el uso de materiales reciclados como alternativa para disminuir el consumo de agregados vírgenes y reducir impactos ambientales dentro de proyectos viales. Entre estas alternativas destaca la utilización de RAP, material reutilizado proveniente del fresado de pavimentos asfálticos. Estudios desarrollados en infraestructura vial señalan que el uso de RAP puede reducir impactos asociados a la extracción y transporte de materiales pétreos, además de disminuir requerimientos energéticos dentro de procesos constructivos [7][8].

En América Latina, la aplicación de metodologías ambientales para la evaluación de proyectos viales aún es limitada. No obstante, investigaciones recientes han comenzado a incorporar herramientas como el Análisis de Ciclo de Vida (ACV) y la cuantificación de huella de carbono para evaluar el desempeño ambiental de obras de infraestructura. Espinoza *et al.* [9], en un estudio aplicado a la carretera La Abundancia-Florencia en Costa Rica, identificaron que el transporte de materiales y la operación de maquinaria representan las principales fuentes de emisiones dentro de proyectos de construcción vial. A pesar de ello, todavía existe una limitada cantidad de investigaciones enfocadas específicamente en la evaluación ambiental de procesos de estabilización de subrasantes mediante materiales reciclados en caminos rurales.

En el contexto ecuatoriano, gran parte de la red vial rural está conformada por caminos lastrados o no pavimentados que requieren mantenimiento constante debido al deterioro de la superficie de rodadura y la pérdida de material granular. Estas condiciones generan una demanda constante de materiales pétreos provenientes de cantera, así como actividades recurrentes de transporte y operación de maquinaria pesada, incrementando los costos de mantenimiento vial [3]. Aunque en el país se han desarrollado investigaciones relacionadas con la estabilización de suelos y el uso de materiales reciclados dentro de la ingeniería vial, la mayoría de estos estudios se han enfocado en aspectos geotécnicos y estructurales, dejando en segundo plano la evaluación de emisiones derivadas en los procesos constructivos [4].

A nivel local, la vía Pungalá-Alao, ubicada en la provincia de Chimborazo, presenta características representativas de los caminos rurales andinos, donde las condiciones climáticas y geotécnicas aceleran el deterioro de la vía. Investigaciones desarrolladas dentro de este corredor vial demostraron que la estabilización mediante RAP constituye una alternativa técnicamente viable para mejorar el comportamiento de la subrasante y optimizar el mantenimiento vial [3],[4]. Sin embargo, hasta la actualidad no se ha desarrollado una evaluación relacionada con la huella de carbono generada durante los procesos de provisión, transporte y aplicación del material reciclado dentro de este tipo de intervenciones [10].

En este contexto, surge la necesidad de desarrollar investigaciones que permitan evaluar ambientalmente los procesos de estabilización de subrasante aplicados en caminos rurales, incorporando variables relacionadas con transporte, consumo de combustible, operación de maquinaria y utilización de materiales. La cuantificación de la huella de carbono permitirá identificar las actividades con mayor incidencia en la generación de emisiones de y aportar criterios técnicos para la toma de decisiones dentro de proyectos de infraestructura vial sostenible.

Por consiguiente, la presente investigación busca evaluar la huella de carbono teórica asociada a los procesos de estabilización de subrasante mediante mezcla asfáltica reciclada en la vía Pungalá-Alao, considerando diferentes escenarios operacionales relacionados con provisión, transporte y aplicación del material reciclado, así como un escenario comparativo de mantenimiento mediante lastrado convencional. En función de lo expuesto, surge la siguiente pregunta de investigación: ¿Cuál es la huella de carbono teórica generada durante los procesos de estabilización de subrasante mediante mezcla asfáltica reciclada (RAP) en la vía Pungalá- Alao y cómo se compara ambientalmente con el mantenimiento mediante lastrado convencional?

1.2 Justificación del problema

La presente investigación surge de la necesidad de incorporar criterios ambientales dentro de la evaluación de alternativas de mantenimiento vial aplicadas en caminos rurales .Si bien diversas investigaciones han demostrado la viabilidad técnica del uso de RAP para el mejoramiento de subrasantes, aún existe información limitada respecto a las emisiones de gases de efecto invernadero generadas durante sus aplicación, particularmente en vías de la región interandina ecuatoriana, donde factores topográficos y logísticos alteran significativamente los consumos de combustible en la maquinaria.

En la vía Pungalá-Alao, estudios previos evidenciaron que la estabilización mediante RAP constituye una alternativa técnicamente viable para mejorar el comportamiento de la subrasante [3][4]. Sin embargo, dichas investigaciones se enfocaron principalmente en aspectos geotécnicos y operacionales, sin considerar el impacto ambiental asociado a las actividades de transporte, provisión de materiales y operación de maquinaria pesada. Bajo este enfoque, la cuantificación de la huella de carbono permite complementar el análisis técnico de estas alternativas mediante indicadores relacionados con sostenibilidad y eficiencia ambiental.

Desde el ámbito de la ingeniería civil, la investigación aportará información útil para la evaluación de los procesos constructivos aplicados al mantenimiento de caminos rurales, permitiendo identificar las actividades con mayor incidencia en la generación de emisiones y comparar ambientalmente la estabilización mediante RAP frente al lastrado

convencional. Asimismo, los resultados podrán servir como referencia para futuras investigaciones y para la planificación de estrategias de mantenimiento vial.

1.3 Objetivos

1.4.1 Objetivo general

Determinar la huella de carbono teórica de los procesos de estabilización de subrasante con mezcla asfáltica reciclada en la vía Pungalá-Alao.

1.4.2 Objetivos específicos

- Analizar los procesos constructivos asociados a la estabilización de la subrasante.
- Determinar los recursos requeridos en cada etapa de los procesos constructivos.
- Evaluar la huella de carbono generada por cada proceso constructivo relacionado con la estabilización de la subrasante con mezcla asfáltica reciclada.

CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO

2.1 Estado del arte

El estudio de la infraestructura vial y su impacto ambiental ha evolucionado significativamente a nivel mundial, transitando de un enfoque puramente geotécnico a una evaluación integral que prioriza la sostenibilidad. En el ámbito internacional, la necesidad de reducir la dependencia de las canteras tradicionales ha impulsado la evaluación de materiales reciclados. Edit *et al.* [11] llevaron a cabo investigaciones exhaustivas sobre las propiedades mecánicas del RAP (mezcla asfáltica reciclada) utilizado como base granular no ligada, demostrando que este posee una rigidez y un módulo resiliente equivalente a los agregados naturales, lo que consolida su viabilidad estructural. Esta base técnica ha sido complementada por Azam *et al.* [12], quienes mediante un Análisis de Ciclo de Vida (ACV), confirmaron que el uso de agregados reciclados de construcción y demolición reduce el potencial de calentamiento global hasta un 65% en comparación con los agregados vírgenes. Estos estudios internacionales sostienen que el valor del RAP reside en su capacidad para mitigar la huella de carbono embebida en la producción de materiales pétreos tradicionales.

En el contexto nacional y regional, el deterioro de vías no pavimentadas ha sido identificado como un problema multidimensional. Guevara y Sánchez [13] establecieron que las carreteras sin pavimentar están sujetas a un rápido deterioro debido a factores críticos como el tráfico vehicular pesado, el drenaje deficiente y las condiciones climáticas adversas, subrayando la urgencia de implementar estabilizaciones duraderas. Desde una perspectiva de innovación, Moreira y Ortiz [14] investigaron la utilización de carpetas asfálticas recuperadas para el mejoramiento de subrasantes en vías de alto tráfico en Manabí, comprobando mediante el ensayo CBR que la calidad del suelo mejora significativamente al adicionar RAP, logrando resultados óptimos con una dosificación del 60%. Complementariamente, Pérez [15] ejecutó un ACV de pavimentos urbanos en la Zona de planificación 3 del Ecuador; utilizando la Matriz de Leopold, cuantificó que los pavimentos flexibles tradicionales generan los mayores impactos ambientales negativos debido a las emisiones de gases y a la remoción intensiva de recursos naturales.

En el ámbito local, los estudios proporcionan el soporte geotécnico y logístico directo para las vías de segundo y tercer orden en la provincia de Chimborazo. Yunga [16] sentó precedentes en el cantón Alausí sobre la mejora de capacidades portantes mediante la adición de cal viva, optimizando los recursos destinados al mantenimiento. Por su parte, Jara [3] demostró que, en las vías de tercer orden del cantón Riobamba, la estabilización técnica genera un ahorro económico del 57% frente al lastrado convencional a lo largo de 5 años. En el mismo corredor de la vía Pungalá-Alao, Parra [4] validó que el uso del RAP es una alternativa mecánicamente efectiva para incrementar la resistencia de la vía rural, aplicándose estrictamente como capa de mejoramiento de la subrasante.

La revisión literaria evidencia que las investigaciones desarrolladas a nivel internacional, nacional y local han demostrado la viabilidad técnica del uso de materiales reciclados en infraestructura vial y han incorporado progresivamente criterios de sostenibilidad ambiental. Sin embargo, persiste una limitada evaluación de la huella de carbono asociada a los procesos constructivos de estabilización de subrasantes mediante mezcla asfáltica reciclada en caminos rurales. En particular, no se identificaron estudios que analicen este impacto ambiental dentro del corredor vial Pungalá-Alao, lo que se justifica el desarrollo de la presente investigación.

2.2 Bases Teóricas

2.2.1 Estabilización de subrasante

La estabilización de subrasante constituye una intervención geotécnica crítica en vías rurales andinas, donde la topografía accidentada y la alta pluviosidad comprometen la capacidad portante de la plataforma original [13]. Este proceso técnico busca modificar las propiedades físicas, químicas o mecánicas del suelo in situ para incrementar su valor de soporte (CBR) y mitigar su susceptibilidad a las variaciones de humedad [16]. En el marco de la presente investigación, la estabilización de subrasante se enfoca en el mejoramiento estructural del suelo base, un procedimiento que, ante la falta de presupuesto para pavimentación definitiva, resulta fundamental para prolongar la funcionalidad de la vía frente a las cargas vehiculares [3],[4]. Esta técnica permite, además, reducir los espesores requeridos en las capas superiores de la estructura del pavimento, optimizando así el consumo de materiales granulares vírgenes [12].

2.2.2 Mezcla asfáltica reciclada (RAP) como material no ligado

Para efectos de la presente investigación, el término Mezcla asfáltica reciclada utilizado en el título de este trabajo hace referencia directa al material conocido internacionalmente en la literatura técnica de la ingeniería de pavimentos por sus siglas en inglés RAP. Ambos conceptos se emplean de manera unívoca a lo largo del documento para definir al residuo granular proveniente del fresado de capas asfálticas envejecidas, empleado en este estudio en su estado granular no ligado como material de adición para el mejoramiento de la subrasante.

El RAP se define como el residuo granular compuesto por agregados pétreos triturados y ligante bituminoso envejecido, obtenido mediante procesos de fresado mecánico o demolición de capas de rodadura asfáltica que han culminado su vida útil [17]. En vías de bajo volumen de tránsito, el RAP puede emplearse directamente sobre la subrasante como material granular no ligado, aprovechando sus propiedades físicas y mecánicas para mejorar la capacidad estructural de la vía. En esta configuración, su comportamiento depende principalmente del enclavamiento mecánico entre partículas y de las características del agregado reciclado.

2.2.2.1 Propiedades relevantes del RAP como material no ligado

El desempeño del RAP funcionando únicamente como material granular no ligado bajo las condiciones climáticas y topográficas de la Sierra andina se fundamenta en dos propiedades físicas clave:

- **Hidrofobia y control de la humedad:** Las partículas de RAP conservan un recubrimiento preexistente de asfalto altamente envejecido que reduce su afinidad con el agua. Esta característica influye en el comportamiento hidráulico del material, disminuyendo la absorción de humedad y limitando la migración de finos desde los estratos inferiores de la subrasante [17]
- **Trabazón Mecánica y estabilidad de forma:** El RAP presenta partículas de elevada angularidad y superficies fracturadas producto del proceso de fresado, características que favorecen el enclavamiento mecánico entre agregados durante la compactación. Esta condición contribuye al

desarrollo de una estructura granular estable y con adecuada resistencia al esfuerzo cortante [11].

2.2.3 Lastrado convencional

El lastrado convencional constituye una de las prácticas de mantenimiento vial más utilizadas en caminos rurales no pavimentados. Técnicamente, consiste en la extracción de agregados pétreos vírgenes de cantera, su transporte hacia el sitio de intervención, distribución sobre la superficie de rodadura y posterior compactación. Al tratarse de un sistema granular no ligado, su comportamiento mecánico depende principalmente de la fricción y trabazón entre partículas, sin la incorporación de agentes cementantes o ligantes que proporcionen cohesión al material [17].

Dentro de la presente investigación, el lastrado convencional representa el escenario de referencia para la comparación ambiental de los procesos de estabilización mediante RAP, permitiendo analizar las diferencias asociadas al transporte de materiales, consumo de combustible y operación de maquinaria durante las actividades de mantenimiento vial.

El lastrado convencional se define como el proceso técnico de ingeniería vial que sostiene en la colocación, extendido y compactación de una capa de agregados pétreos seleccionados en su estado natural o triturado (material virgen), extraídos directamente de canteras de río o de peña [18]. En la Red vial provincial y cantonal, específicamente en caminos vecinales o vías de tercer orden, esta capa granular cumple la función provisional de superficie de rodadura desprovista de ligantes (cemento asfáltico o cemento hidráulico). Su objetivo es proporcionar una plataforma transitable que distribuya los esfuerzos inducidos por las cargas vehiculares hacia la subrasante, reduciendo la fricción directa sobre el terreno natural.

A pesar de ser la solución técnico-económica históricamente más empleada por los gobiernos autónomos descentralizados para la apertura de caminos de bajo volumen de tránsito debido a su bajo costo inicial, el lastrado con material virgen presenta un comportamiento elastoplástico altamente inestable. El material de afirmado común carece de cohesión intrínseca, dependiendo únicamente de la fricción entre sus partículas para mantener su integridad. De acuerdo con las evaluaciones de campo ejecutadas en la vía Pungalá-Alao por Parra [4] el afirmado convencional presenta un deterioro progresivo asociado a la pérdida de material granular y acción del tránsito vehicular.

2.2.3.1 Mecanismo de deterioro del lastrado ante la acción de la humedad

El desempeño de los caminos lastrados está condicionado por la interacción entre las cargas vehiculares y las condiciones climáticas. En regiones andinas caracterizadas por períodos de lluvia frecuentes, la infiltración de agua reduce la estabilidad del material granular y favorece la pérdida progresiva de partículas finas. Como consecuencia se producen deformaciones superficiales, baches y disminución de la capacidad portante de la vía [18].

Adicionalmente, la circulación vehicular sobre capas saturadas puede generar fenómenos de desplazamiento y pérdida de material fino, acelerando el deterioro de la estructura granular y reduciendo la calidad de rodadura[18].

Debido a estos mecanismos de degradación, los caminos mantenidos mediante lastrado convencional requieren intervenciones periódicas de reconformación y reposición de material para conservar condiciones adecuadas de servicio [18]. Estas actividades incrementan la demanda de agregados, transporte y operación de maquinaria pesada durante su vida útil.

2.2.4 Huella de carbono en la infraestructura vial

La huella de carbono en la infraestructura vial corresponde a la cuantificación de emisión de gases de efecto invernadero generados durante las diferentes etapas asociadas a la construcción, mantenimiento y operación de proyectos carreteros, expresadas generalmente en unidades de dióxido de carbono equivalente (CO₂ e). Dentro de la ingeniería vial, este indicador permite evaluar el impacto ambiental derivado de uso de materiales, consumo de combustible, transporte y operación de maquinaria pesada durante el ciclo de vida de la infraestructura [19].

En los últimos años, la evaluación ambiental de carreteras mediante metodologías de Análisis de ciclo de vida (ACV) ha adquirido mayor relevancia debido al incremento de emisiones asociadas al sector de la construcción y transporte. Diversos estudios indican que los principales aportes de emisiones en proyectos viales provienen de la producción de materiales, transporte de agregados y operación de equipos de construcción, especialmente en actividades relacionadas con capas granulares y mezclas asfálticas [7].

De acuerdo con investigaciones desarrolladas en proyectos de infraestructura vial en Latinoamérica, la cuantificación de huella de carbono permite identificar procesos críticos dentro de la ejecución de carreteras y establecer estrategias orientadas a disminuir impactos ambientales mediante optimización logística, reutilización de materiales y reducción de distancias de transporte. En el caso de estudio de la carretera La abundancia-Florencia en Costa Rica, se determinó que la producción y transporte de materiales asfálticos representa una de las principales fuentes de emisiones dentro del ciclo constructivo vial [9].

Asimismo, diversos estudios relacionados con evaluación ambiental de pavimentos señalan que los materiales reciclados constituyen una alternativa técnica para disminuir el consumo de agregados vírgenes dentro de proyectos de infraestructura vial [8].

Desde el enfoque de ingeniería civil, la huella de carbono constituye una herramienta técnica para la toma de decisiones dentro de proyectos de infraestructura vial, permitiendo comparar alternativas constructivas, optimizar procesos operacionales y evaluar el desempeño ambiental de diferentes soluciones de estabilización y mantenimiento de carreteras. En este contexto, el uso de metodologías basadas en ACV facilita la identificación de etapas con mayor incidencia ambiental y contribuye al desarrollo de estrategias de construcción vial sostenible [20].

2.2.5 Análisis de Ciclo de Vida aplicado a infraestructura vial

El ACV es una metodología estandarizada a nivel global que permite cuantificar de manera integral los impactos ambientales potenciales asociados a un sistema o producto a lo largo de todas sus fases de existencia [20]. Dentro de la ingeniería civil, esta metodología ha sido ampliamente aplicada en proyectos de infraestructura vial, para

analizar el desempeño ambiental de procesos constructivos y actividades de mantenimiento de carretera.



Figura 1. Fases para el desarrollo de un ACV.

Nota: Adaptado de Aguiar-Moya, Espinoza y Loría. (2019)

En el ámbito de la infraestructura vial, el ACV ha sido utilizado para evaluar los impactos ambientales asociados a la producción de materiales, transporte, construcción, mantenimiento y rehabilitación de carreteras. Su aplicación permite identificar las etapas con mayor incidencia ambiental dentro del ciclo de vida de un proyecto y comparar alternativas constructivas desde una perspectiva de sostenibilidad. Diversos estudios han demostrado que esta metodología constituye una herramienta eficaz para apoyar la toma de decisiones orientadas a la reducción de emisiones y al uso eficiente de recursos en obras de ingeniería civil [9].

2.3 Procesos constructivos de las alternativas evaluadas

Con el propósito de evaluar la huella de carbono asociada a procesos de estabilización vial y mantenimiento de caminos rurales no pavimentados, se plantearon diferentes escenarios operacionales correspondientes al uso de material reciclado tipo RAP y al método convencional de lastrado.

La definición de estos escenarios permitió representar condiciones reales de ejecución de obras dentro de procesos de conservación vial, incorporando actividades relacionadas con preparación de terreno, movilización de maquinaria, provisión y transporte de materiales, humectación y compactación.

2.3.1 Estabilización mediante RAP

En la presente investigación, el proceso constructivo de estabilización mediante RAP fue estructurado considerando las siguientes etapas operacionales:

a) Replanteo y preparación del terreno

Corresponde a las actividades iniciales orientadas a delimitar el área de intervención y acondicionar la superficie de trabajo para el desarrollo de los procesos constructivos. Estas actividades permiten establecer niveles, alineamientos y condiciones geométricas necesarias de la vía [18].

b) Movilización inicial de maquinaria

Comprende el traslado de maquinaria pesada hacia el frente de trabajo, incluyendo equipos de conformación, compactación y transporte requeridos para la ejecución de la estabilización. La movilización constituye una actividad relevante dentro de proyectos viales debido al consumo de combustible asociado al desplazamiento inicial de equipo [19].

c) Transporte del personal

Incluye el desplazamiento diario del personal operativo y técnico hacia la zona de intervención. Aunque representa un impacto menor respecto a maquinaria pesada, constituye parte de los procesos operacionales considerados dentro del análisis de emisiones en obra.

d) Escarificación del suelo existente

La escarificación corresponde a la remoción superficial del material existente para facilitar la incorporación del RAP sobre la subrasante.

e) Provisión del material RAP

Corresponde al suministro y transporte del material reciclado obtenido mediante fresado de pavimentos asfálticos. En la investigación se consideraron dos modalidades operacionales: transporte directo hacia obra y transporte mediante acopio temporal.

El RAP constituye un material proveniente del fresado de pavimentos asfálticos reutilizado dentro de procesos de estabilización y mejoramiento vial.

f) Re transporte y acopio temporal del RAP

En uno de los escenarios evaluados se incorporó una etapa adicional de almacenamiento temporal de material reciclado antes de su utilización final en obra. Este proceso incluyó actividades de descarga, acopio y Re transporte del RAP hacia el frente de intervención.

g) Distribución e integración del RAP

Consiste en el extendido y conformación del material reciclado sobre la superficie intervenida.

h) Humectación

La humectación corresponde a la aplicación controlada de agua sobre la capa estabilizada con el propósito de alcanzar contenidos óptimos de humedad que favorecen el proceso de compactación y densificación del material granular.

i) Compactación

La compactación corresponde a la densificación mecánica de la capa estabilizada mediante rodillos compactadores.

2.3.2 Mantenimiento mediante lastrado convencional

En la presente investigación, el proceso operacional del lastrado convencional fue estructurado mediante las siguientes etapas constructivas.

a) Replanteo y preparación del terreno

Comprende actividades de delimitación del área de trabajo y acondicionamiento inicial de la superficie existente para el desarrollo de las actividades de mantenimiento vial [18].

b) Movilización inicial de maquinaria

Incluye el traslado de equipos de conformación, compactación y transporte hacia el frente de intervención.

c) Transporte del personal

Corresponde el desplazamiento operativo del personal requerido para la ejecución de los trabajos de mantenimiento vial.

d) Reconformación de la vía

La reconformación consiste en el reperfilado y corrección geométrica de la superficie de rodadura mediante motoniveladora, permitiendo restablecer pendientes transversales y condiciones adecuadas de drenaje superficial. Según Pradena [21] , esta actividad constituye una de las principales operaciones de conservación en caminos rurales no pavimentados.

e) Explotación del material de cantera

Incluye actividades de extracción y carga del material granular utilizado como lastre. Desde el enfoque ambiental, la explotación de materiales pétreos representa una de las principales fuentes de impacto asociadas al mantenimiento de caminos rurales debido al consumo de recursos naturales y utilización intensiva de maquinaria pesada [7].

f) Transporte de cantera a obra

Comprende el traslado del material granular desde el punto de extracción hacia la vía intervenida mediante volquetas de transporte pesado.

g) Distribución e integración del lastre

Consiste en el extendido y conformación del material granular sobre la superficie de rodadura hasta alcanzar las condiciones geométricas requeridas para la vía.

h) Humectación

Actividad orientada a controlar el contenido de humedad del material granular antes de la compactación final.

i) Compactación

Este paso final del proceso constructivo orientada a mejorar la densificación y capacidad estructural de la capa granular mediante maquinaria compactadora. Una compactación adecuada contribuye significativamente al desempeño funcional y durabilidad de caminos granulares rurales [18].

CAPITULO III. METODOLOGÍA

3.1 Tipo de Investigación

El presente estudio se enmarca dentro de la tipología de investigación aplicada, con un enfoque cuantitativo. Al respecto, Ñaupas Paitan *et al.* [22] establecen que la investigación aplicada no persigue la formulación de nuevas teorías fundamentales, sino que emplea el conocimiento científico preexistente para dar solución a problemáticas técnicas concretas en escenarios reales. En este marco, el proyecto asimila los principios teóricos del análisis de ciclo de vida (ACV), la geotecnia vial y la mecánica de suelos para resolver un desafío ambiental tangible asociado a la cuantificación y mitigación de los gases de efecto invernadero emitidos durante los procesos constructivos de estabilización de la subrasante en la vía Pungalá- Alao, buscando validar operativamente la eficiencia de la mezcla asfáltica reciclada como agregado de mejoramiento.

3.2 Diseño de investigación

La evaluación se estructuró bajo un diseño de investigación no experimental y de corte transversal; según los postulados de Hernández Sampieri y Mendoza Torres [23], los diseños o experimentales consisten en el análisis de los fenómenos en su entorno natural, sin inducir manipulaciones deliberadas sobre las variables independientes.

En tal sentido, no se alteraron físicamente las capacidades de carga ni las distancias de la maquinaria, sino que se parametrizaron las dinámicas logísticas del reciclaje asfáltico y del lastrado convencional tal como dictaminan las normativas constructivas; igualmente, su carácter transversal obedece a que la recolección del inventario de emisiones operativas se ejecutó en un único corte temporal, para posteriormente ser proyectado a través de modelos matemáticos.

3.3 Diagrama Metodológico

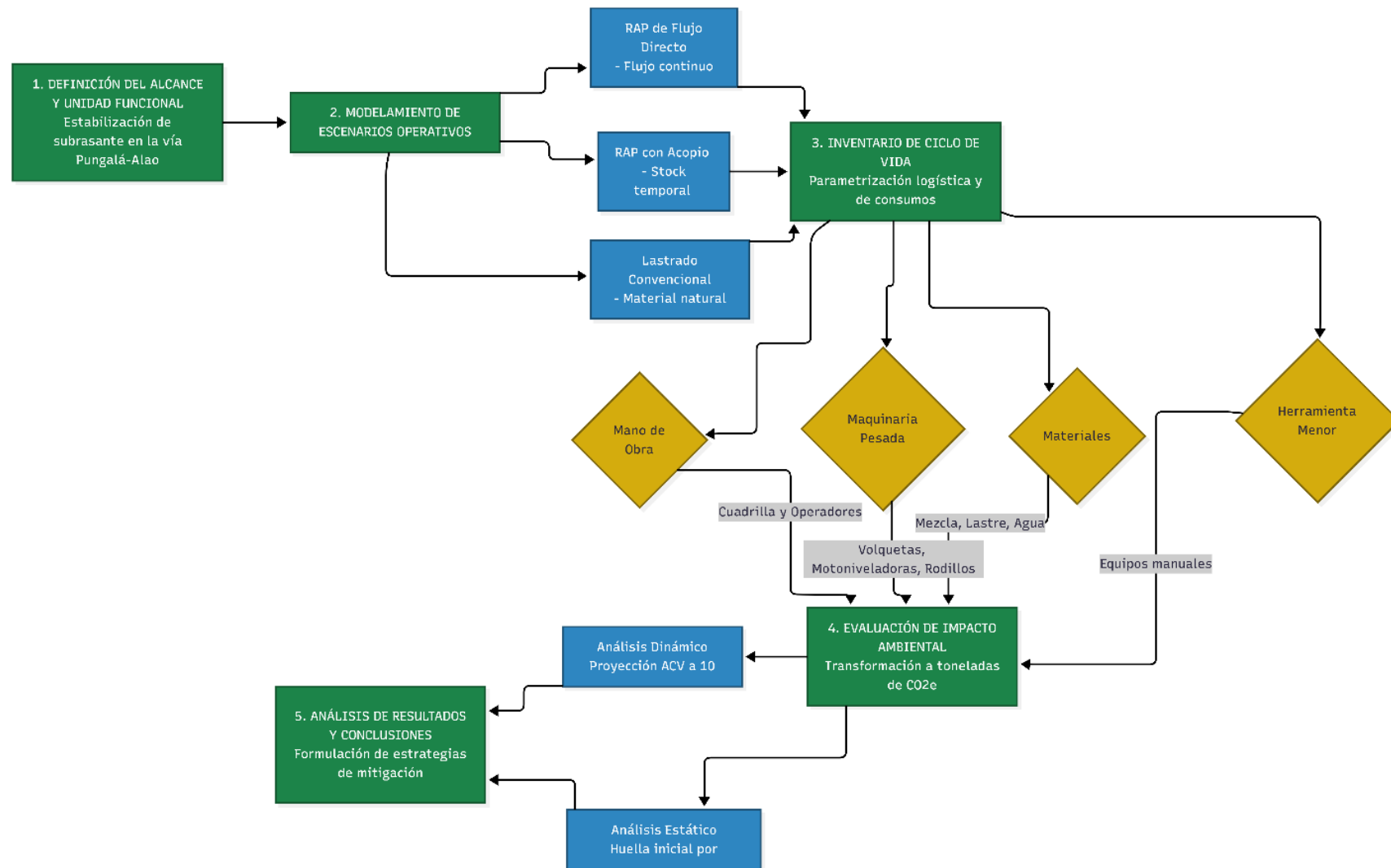


Figura 2. Proceso de investigación

Fuente: Elaboración Propia

3.4 Técnicas de recolección de datos

Para asegurar el rigor analítico de las simulaciones, la técnica principal de recolección empleada fue el análisis documental técnico; en ese contexto, las variables operativas correspondientes a los tiempos de ciclo y tasas de consumo energético se extrajeron y adaptaron a partir de los parámetros estandarizados de rendimiento para equipo pesado [24]. Por otro lado, para transformar estos consumos logísticos en métricas ambientales verificables, se utilizaron los factores de emisión globales y actualizados reportados en las síntesis científicas sobre mitigación climática [5].

3.5 Instrumentos de procesamiento y análisis de datos

El procesamiento y análisis de la información se realizó mediante herramientas informáticas de cálculo y gestión de datos. Para la determinación de distancias y rutas de transporte se emplearon Google Earth Pro y Google Maps, mientras que el cálculo de emisiones y la organización de la información operativa se desarrollaron mediante hojas de cálculo de Microsoft Excel.

3.6 Zona de estudio

La presente investigación fue desarrollada en la vía Pungalá-Alao, ubicada en la parroquia Pungalá, Cantón Riobamba, provincia de Chimborazo. Este corredor vial forma parte de la red vial rural de tercer orden y constituye una vía de conexión utilizada principalmente para actividades agrícolas, ganaderas y de movilidad local entre las comunidades del sector. La zona de estudio presenta características topográficas propias de la Sierra andina ecuatoriana, con pendientes variables, presencia de escorrentía superficial y periodos frecuentes de precipitación, condiciones que influyen directamente en el deterioro progresivo de la superficie de rodadura y en la pérdida de material granular de la vía.

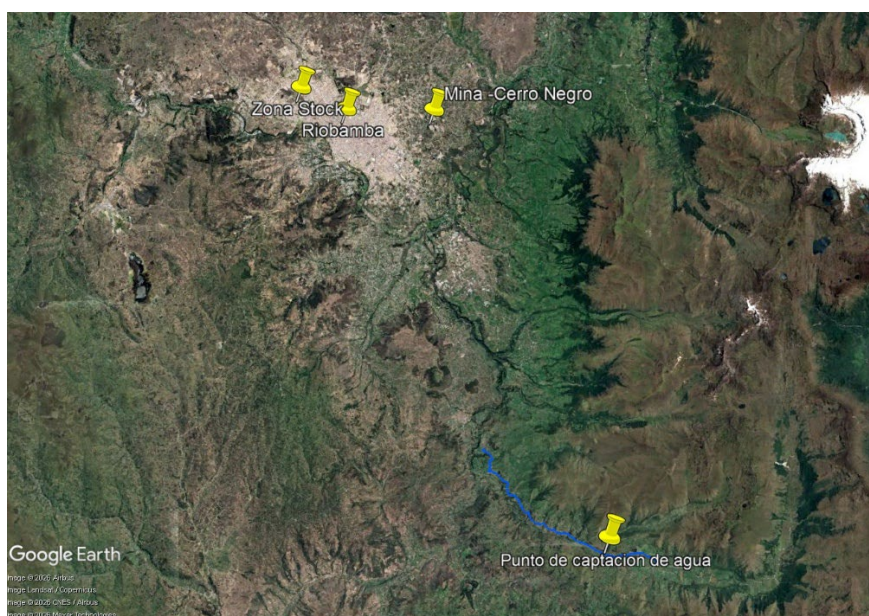


Figura 3. Ubicación geográfica de la vía Pungalá–Alao, de cantera, stock RAP y puntos de captación de agua.

Fuente: Google Earth

La selección del tramo de estudio se fundamentó en investigaciones previas desarrolladas dentro del mismo corredor vial, relacionadas con procesos de estabilización de subrasante y mantenimiento de caminos rurales. Jara [3] evaluó las alternativas de estabilización aplicadas en la vía Pungalá- Alao, mientras que Parra [4] analizó el comportamiento del material reciclado tipo RAP como alternativa de mejoramiento vial dentro del mismo tramo de intervención. Debido a ello, la vía presenta condiciones técnicas y operativas adecuadas para el desarrollo de un análisis comparativo asociado a huella de carbono y procesos constructivos de estabilización vial.

Desde el punto de vista operacional, el estudio también demostró los principales elementos logísticos involucrados en los procesos constructivos analizados, entre ellos la ubicación de la cantera utilizada para el suministro de lastre natural correspondiente a la Cantera “Cerro Negro” ubicada en el sector San Gerardo de Pungal, el área de almacenamiento temporal del material RAP ubicada dentro de las inmediaciones de los terrenos e instalaciones de investigación de la Politécnica Nacional de Chimborazo y los puntos de captación de agua empleados durante los procesos de humectación, los cuales se muestran en la Figura 3. La localización de estos elementos permitió estructurar los recorridos operacionales y los tramos de transporte considerados posteriormente en el análisis de huella de carbono.

Para efectos metodológicos, el tramo considerado en la investigación corresponde a 13.8 km de vía. Con propósito de representar de manera más precisa las condiciones reales del proyecto, las distancias utilizadas para el cálculo de transporte y movilización fueron analizadas considerando distintos sectores dentro de la vía.

La división por tramos como referencia de la investigación desarrollada por Jara [3], quien desarrolló sectores homogéneos en función de las características geotécnicas y del tipo de suelo presentes en la vía Pungalá-Alao. En la presente investigación, esta segmentación fue utilizada específicamente para los procesos de humectación, debido a que las variaciones de suelo influyen directamente en el requerimiento de agua y en las condiciones operativas asociadas a dicha actividad y se presenta en la Figura 4, donde se identifican los diferentes tramos establecidos en función de las propiedades geotécnicas de la vía.

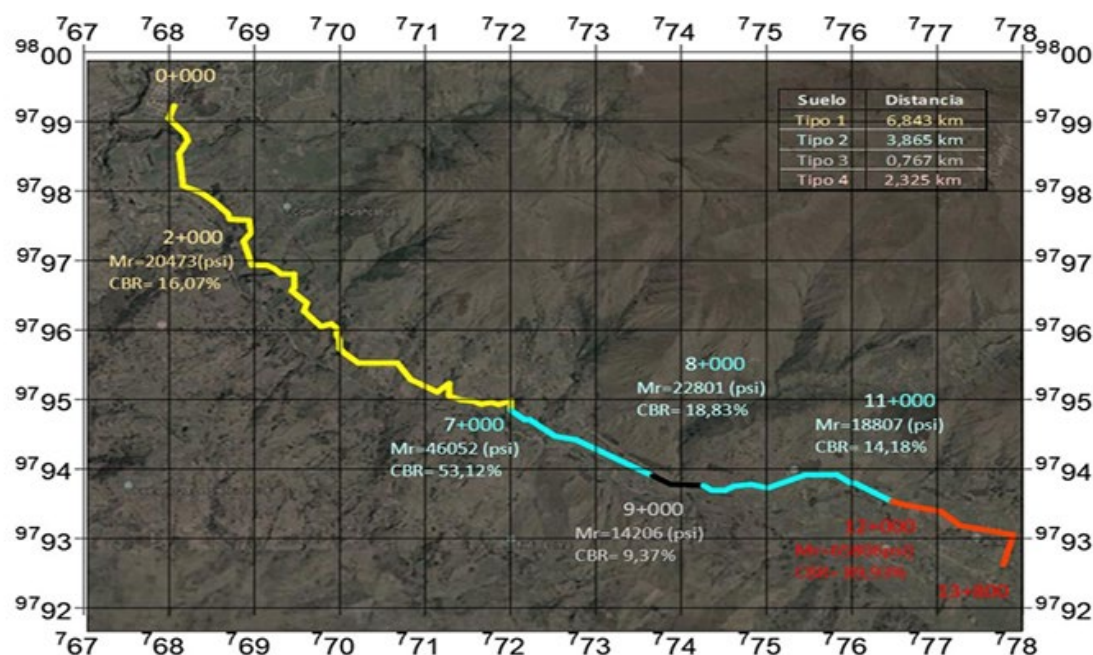


Figura 4. Sectorización de la vía Pungalá–Alao según módulo resiliente y CBR mediante Geogauge.

Fuente: Jara E (2024)

3.7 Población de estudio y tamaño de muestra

3.7.1 Población

La población de estudio estuvo constituida por los procesos constructivos asociados a la estabilización de subrasante mediante mezcla asfáltica reciclada y al mantenimiento mediante lastrado convencional desarrollados en la vía Pungalá-Alao.

3.7.2 Tamaño de muestra

Debido a la naturaleza de la investigación, no se aplicó un procedimiento de muestreo. El análisis consideró la totalidad de los procesos constructivos definidos para los escenarios evaluados.

3.8 Etapas de estudio

3.8.1 Definición de procesos

Como etapa inicial de la investigación, se realizó la definición detallada de los procesos constructivos correspondientes a las alternativas de estabilización con material reciclado (RAP) y lastrado convencional, mediante la elaboración de diagramas procesos.

Estos diagramas permitieron descomponer cada alternativa en una secuencia de procesos y subprocesos, representando de manera estructurada todas las actividades involucradas desde la preparación del terreno hasta la finalización de la intervención.

En cada subproceso identificado, se determinaron los siguientes elementos:

- Equipos y maquinaria
- Mano de obra
- Materiales
- Herramienta menor

Esta estructura permitió organizar de forma clara la información de cada etapa, con el fin de establecer una comunicación directa entre las actividades ejecutadas en campo y los cálculos realizados posteriormente en la hoja de cálculo.

3.8.2 Sistematización de la información

Una vez estructurados los procesos constructivos mediante los diagramas de procesos, la información obtenida fue organizada en una hoja de cálculo, con el fin de establecer una base de datos que permita el desarrollo sistemático de los cálculos requeridos para la estimación de la huella de carbono.

La sistematización de la información se la realizó considerando cada proceso y subproceso, integrando todos los parámetros técnicos en una misma estructura.

A partir de esta estructura, se desarrollaron los siguientes componentes fundamentales de análisis:

- Determinación de distancias de transporte
- Cálculo de rendimientos de maquinaria y mano de obra
- Determinación de volúmenes de obra
- Cálculo de huella de carbono

Cada uno de estos componentes fueron abordados de manera independiente, permitiendo desglosar el proceso constructivo en variables cuantificables que posteriormente fueron utilizadas para la estimación de la huella de carbono.

3.8.2.1 Determinación de distancias de transporte

La determinación de las distancias de transporte constituyó una etapa fundamental dentro de la investigación, debido a que las emisiones asociadas al traslado de maquinaria, materiales dependen directamente de las distancias recorridas durante la ejecución de los procesos constructivos.

Para la obtención de estas distancias se utilizó la herramienta Google Earth Pro, software ampliamente empleado en estudios de infraestructura y análisis territorial por su capacidad para realizar mediciones georreferenciadas de manera precisa y visual [25].

Las distancias fueron consideradas tomando en cuenta los siguientes recorridos:

- Transporte de maquinaria
- Transporte de material reciclado (RAP)

- Transporte de lastre natural
- Transporte de agua para humectación
- Movilización del personal

Para optimizar el procesamiento de la información, se adoptó el criterio del centro de gravedad de cada tramo de intervención. Este procedimiento consistió en tomar un punto representativo intermedio del tramo vial estudiado desde el cual se establece las distancias hacia los diferentes puntos de interés, tales como:

- Zona de stock del material reciclado
- Punto de captación de agua
- Ciudad de Riobamba
- Zona de obra
- Mina

Tabla 1. Distancias usadas para el análisis de huella de carbono

DISTANCIA (Tramo a estabilizar)	13.8	km
Distancia (Riobamba-Vía)	31.4	km
Distancia T1(Captación-Vía)	5.3	km
Distancia T2(Captación-Vía)	1.6	km
Distancia (Cantera-Obra)	29.5	km
Distancia (Riobamba-Stock)	3.1	km
Distancia (Stock-vía)	34.2	km
Distancias tramos por tipo de suelo		
Tramo 1	6.834	km
Tramo 2	3.865	km
Tramo 3	0.767	km
Tramo 4	2.325	km

Este criterio permite evita la sobreestimación o subestimación de distancias que podría generarse al considerar únicamente los extremos del tramo, proporcionando una aproximación más equilibrada y representativa del comportamiento promedio del transporte a lo largo de toda la vía.

3.8.2.2 Cálculo de rendimientos

El cálculo de rendimiento constituyó una etapa fundamental dentro de la investigación, debido a que los tiempos de operación, consumo de combustible y emisiones generadas por los procesos constructivos dependen directamente del rendimiento de los equipos y recursos utilizados.

Los rendimientos fueron determinados para cada una de las tres simulaciones desarrolladas en el estudio, correspondientes a los procesos de estabilización mediante RAP y lastrado convencional. Para ello, se analizaron individualmente todos los procesos y subprocesos previamente definidos anteriormente.

La determinación de los rendimientos se realizó mediante metodologías operacionales utilizadas en maquinaria pesada y construcción vial, considerando parámetros técnicos específicos para cada equipo.

Los datos técnicos de maquinaria fueron obtenidos a partir de fichas técnicas y manuales de fabricantes especializados, principalmente del Manual de rendimiento Caterpillar, fichas técnicas de volquetas JAC, tractocamiones Kenworth, tanqueros HOWO y equipos auxiliares utilizados en la investigación.

Asimismo, cada una de las variables empleadas dentro de las ecuaciones de rendimiento fueron sustentadas mediante las fichas técnicas ya mencionadas, permitiendo garantizar la validez metodológica de los cálculos realizados.

a) Factor de eficiencia operacional

Dentro de los cálculos de rendimiento se incorporó un factor de eficiencia operacional, con el propósito de representar de manera más realista las condiciones de trabajo en obra.

Este factor considera pérdidas operacionales asociadas a:

- Maniobras
- Tiempos de espera
- Interrupciones operativas
- Ajustes de maquinaria
- Fatiga operacional
- Variaciones propias del trabajo en campo

En la presente investigación, los valores de eficiencia operacional utilizadas fueron obtenidos en función del tiempo efectivo de operación, donde se establece una hora productiva equivalente a 50 min/h. Por lo tanto, la eficiencia de trabajo utilizada fue de 0.83, correspondiente a los 50 minutos de trabajo efectivo por cada hora de operación, conforme a lo establecido en el manual [24].

De igual manera, para ciertos procesos específicos se utilizaron factores de eficiencia de 0.75 a 0.90, dependiendo del tipo de actividad [24].

b) Expresión y conversión de rendimientos

Inicialmente, los cálculos expresados fueron en términos de producción por unidad de tiempo, dependiendo del tipo de proceso constructivo evaluado.

Sin embargo, para facilidad de cálculos, los valores de rendimiento obtenidos fueron invertidos posteriormente.

c) Rendimiento de replanteo topográfico

Para el proceso de replanteo, el rendimiento fue calculado considerando los tiempos operacionales requeridos para el montaje de la estación total, orientación del equipo, medición de puntos y desplazamiento entre estaciones.

Se calculo mediante la ecuación (1):

$$R = \frac{A * E}{T} \quad (1)$$

Donde:

- R: Rendimiento del equipo (m²/h).
- A: Área cubierta por estación total (m²).
- E: Factor de eficiencia operacional
- T: Tiempo total de operación (h)

Para la determinación del tiempo total se consideran actividades relacionadas con:

- Montaje de la estación total
- Orientación del equipo
- Medición de puntos
- Desplazamiento del equipo entre estaciones

d) Rendimiento de equipos lineales

Para actividades relacionadas con motoniveladoras y equipos de distribución superficial, el rendimiento fue calculado mediante:

$$R = \frac{S * W * 1000 * E}{N} \quad (2)$$

Donde:

- R: Rendimiento del equipo (m²/h).
- S: Velocidad de operación (km/h).
- W: Ancho efectivo de trabajo (m).
- E: Factor de eficiencia operacional
- N: Numero de pasadas requeridas

Para procesos de limpieza superficial, escarificación de la subrasante y distribución del material estabilizante tanto para RAP como para lastre natural y compactación del material, el calculo del rendimiento de la maquinaria se rige por (2).

En el caso del fresado de material para la estabilización con RAP se agrega la variable espesor, ya que su unidad es en metro cubico, como se muestra en la ecuación (3):

$$R = \frac{S*w*1000*E*e}{N} \quad (3)$$

Donde

- e: Espesor fresado

e) Rendimientos de excavación y carga

Para los procesos de excavación, extracción y carga de materiales se empleo la ecuación (4) basada en capacidad de balde, tiempo de ciclo y factor de llenado:

$$R = \frac{V*f*60*E}{T} \quad (4)$$

Donde

- V: Volumen del balde o cuchara (m3)
- f: Factor de llenado
- E: Factor de eficiencia
- T: Tiempo de ciclo (h)

Esta ecuación fue utilizada para los procesos de descapote, extracción de lastre natural, carga de RAP y carga de material granular.

f) Rendimientos de transporte

Para las actividades de transporte de material mediante volquetas y tanqueros, el rendimiento fue determinado a través de (5), considerando la capacidad útil, velocidad de recorrido, distancia de transporte y tiempo de ciclo operativo:

$$R = \frac{C*E*60}{T} \quad (5)$$

Donde:

- C: Capacidad útil de transporte (m3)
- E: Factor de eficiencia
- T: Tiempo total del ciclo (h)

En el tiempo de ciclo se incluyó:

- Tiempo de carga
- Tiempo de viaje cargado
- Tiempo de retorno vacío
- Tiempo de maniobra y descarga

En los procesos de transporte de RAP y lastre natural se consideró que las volquetas retornaban vacías hacia el punto de carga, razón por la cual la velocidad de retorno fue diferente a la velocidad de viaje cargado.

g) Rendimiento de captación de agua

El rendimiento correspondiente a la captación de agua fue calculado a través de (6), considerando el caudal máximo de bombeo de la motobomba y un factor asociado a pérdidas operacionales durante el proceso de extracción:

$$R = Q_{max} * f_{perdidas} * E \quad (6)$$

Donde:

Q_{max} : Caudal máximo de bombeo (m³/h)

$f_{perdidas}$: Factor de pérdidas operativas

E: Factor de eficiencia

Para esta actividad se empleó además la capacidad útil del tanquero, el tiempo de bombeo y las pérdidas asociadas al proceso de captación y llenado.

h) Rendimiento de aplicación de agua

Para la determinación de este rendimiento no se empleó una ecuación convencional de productividad, debido a que el proceso de humectación depende principalmente de la velocidad de desplazamiento del tanquero y del área efectiva cubierta durante la aplicación.

La metodología utilizada consistió en transformar la velocidad de operación del equipo de kilómetros por hora a metros por segundo, permitiendo determinar el tiempo requerido para recorrer una determinada longitud de vía.

Posteriormente, mediante relaciones de proporcionalidad y regla de tres simple, se calculó el tiempo necesario para cubrir completamente el ancho de la vía, considerando el ancho efectivo de aplicación del tanquero y el número de pasadas requeridas para ejecutar la humectación total de la superficie estabilizada.

Finalmente, el tiempo obtenido para cubrir un metro cuadrado fue transformado a horas, permitiendo expresar el rendimiento operacional.

i) Homogeneización de unidades

Debido a la diversidad de unidades en los distintos subprocesos (m^2/h , m^3/h , viajes/h, h), se realizó un proceso de conversión para expresar los rendimientos en función del área de intervención (m^2), permitiendo su integración en el análisis de huella de carbono.

Esta selección de unidad funcional es adoptada también para que la huella de carbono calculada sea expresada en:

$$kg\ CO_2\ e / m^2$$

3.8.2.3 Determinación de volúmenes de obra

La determinación de volúmenes de obra constituyó una etapa fundamental dentro de la investigación, debido a que estos valores fueron utilizados posteriormente para el cálculo de tiempos operacionales, consumo de combustible y huella de carbono asociada a cada proceso constructivo.

Los volúmenes de obra fueron calculados para cada una de las simulaciones desarrolladas en el estudio, considerando las dimensiones geométricas de la vía y las características técnicas de los procesos de estabilización evaluados.

Para ello, se consideraron las características geométricas del tramo de estudio, específicamente la longitud, el ancho de la vía y el espesor de intervención de cada capa.

a) Determinación del área de intervención

Inicialmente, se determina el área total de intervención mediante la ecuación (7):

$$A = L * B \quad (7)$$

Donde:

A: Área de intervención (m^2)

L: Longitud de la vía (m)

W: Ancho de la vía (m)

b) Determinación de volumen de material

Posteriormente, para los procesos que implican movimiento colocación de material, el volumen se determinó a partir de la ecuación (8):

$$V = A * e \quad (8)$$

Donde:

- V: Volumen de material (m^3)
- A: Área de intervención (m^2)
- e: Espesor de capa (m)

Cabe mencionar, que para la determinación de los volúmenes de estabilización se usó un espesor de 15 centímetros, tomando como referencia previos estudios desarrollados para la vía Alao- Pungalá.[4]

c) Determinación de volúmenes en procesos de humectación

Para el caso de los procesos de humectación, la vía fue dividida en cuatro tramos homogéneos de análisis, considerando las variaciones de densidad seca máxima y humedad óptima, aplicados sobre el volumen de suelo estabilizado correspondiente a cada tramo.

El procedimiento metodológico empleado fue desarrollado en función de la investigación realizada por Jara (2024), donde se establece la división de la vía en tramos homogéneos de acuerdo con sus características geotécnicas y condiciones de subrasante, permitiendo evaluar de manera diferenciada las propiedades de cada sector de la vía Pungalá -Alao [3].

Por cada tramo, se obtuvo el volumen de suelo para si posteriormente, mediante la densidad seca máxima y el porcentaje de humedad optimo, se calculó la masa seca del material y el volumen de agua requerido para el proceso de humectación previo a la compactación.

3.8.3 Modelación y cálculo de la huella de carbono

3.8.3.1 Huella de carbono de maquinaria

La huella de carbono asociada a la maquinaria fue determinada mediante la integración de dos componentes principales: la huella de fabricación o carbono embebido y la huella generada durante la operación de los equipos. Este enfoque permitió obtener una estimación integral del impacto ambiental producido por la maquinaria empleada en las actividades constructivas, considerando tanto la etapa de fabricación como la fase operativa del equipo.

La metodología aplicada se fundamentó en los principios del ACV, el cual establece la evaluación de los impactos ambientales durante las diferentes etapas del ciclo de vida de un sistema o producto, desde su fabricación hasta su utilización [20].

a) Huella de carbono por fabricación

La huella de carbono por fabricación fue estimada a partir del peso total de la maquinaria y un factor de emisión asociado al proceso de fabricación del equipo. Para ello, se consideró principalmente el carbono embebido derivado de la producción de acero y de los procesos industriales involucrados en la fabricación y ensamblaje de maquinaria pesada.

La estimación se realizó mediante la ecuación (9):

$$HCO2_f = P * f \quad (9)$$

Donde:

- $HCO2_f$: Huella de carbono de fabricación (kg CO₂ e)
- P: Peso del equipo (kg)
- f : Factor de emisión de fabricación (kg CO₂e/kg)

Para el cálculo del factor de emisión de fabricación se tomó como referencia el factor de emisión del acero de ingeniería, incorporando adicionalmente un 50%

correspondiente a los procesos de ensamblaje y fabricación de los equipos. De esta manera, se adoptó un valor estandarizado representativo del carbono embebido de maquinaria pesada, consistente con los datos reportados en la base de datos Inventory of Carbon and Energy [26]

Posteriormente, a través de (10) la huella de fabricación fue distribuida a lo largo de la vida útil operativa de cada equipo:

$$HCO2_{\frac{f}{h}} = \frac{HCO2_f}{V_u} \quad (10)$$

Donde:

- $HCO2_{\frac{f}{h}}$: Huella de carbono de fabricación por hora (kg CO₂ e/h)
- $HCO2_f$: Huella de carbono total de fabricación (kg CO₂ e)
- V_u : Vida útil operativa del equipo (h)

b) Huella de carbono por operación

La huella de carbono por operación fue determinada mediante la ecuación (11), la cual se encuentra en función al consumo de combustible de cada equipo y del factor de emisión asociado al diésel utilizado durante las actividades constructivas. Esta etapa corresponde a las emisiones directas generadas durante el funcionamiento de la maquinaria en obra:

$$HCO2_o = C * f \quad (11)$$

- $HCO2_o$: Huella de carbono por operación (kg CO₂ e/h)
- C : Consumo de combustible del equipo (L/h)
- f : Factor de emisión de diésel (Kg CO₂ e/ L)

Los factores de emisión utilizados para el cálculo de las emisiones asociadas al consumo de diésel de maquinaria fueron obtenidos del documento “Intensidad energética del Ecuador y estimación de la huella de carbono”, adoptando un valor de 2.677 kg CO₂/L [27]

Adicionalmente, este valor fue contrastado con el factor reportado en el Inventario Nacional de Gases de Efecto Invernadero del Ecuador correspondiente a 74100 kg CO₂/TJ para diésel, obteniéndose mediante conversión de unidades un valor equivalente de 2.67 kg CO₂/L, corroborando la consistencia del factor empleado [28]

De igual manera, para las emisiones asociadas al transporte y retorno diario del personal se empleó gasolina como combustible de referencia. Para ello se utilizó el factor de emisión reportado en el Inventario Nacional de Gases de Efecto Invernadero del Ecuador, correspondiente a 69300 kg CO₂/TJ. Posteriormente, mediante conversiones se obtuvo un valor equivalente a 2.37 kg CO₂/L [28].

c) Huella de carbono total por equipo

La huella de carbono total de cada equipo fue obtenida mediante la ecuación (12):

$$HCO2_{MAQ} = HCO2_{\frac{f}{h}} * HCO2_o \quad (12)$$

Donde:

- $HCO2_o$: Huella de carbono por operación (kg CO₂ e/h)
- $HCO2_{fh}$: Huella de carbono de fabricación por hora (kg CO₂ e/h)
- $HCO2_{MAQ}$: Huella de carbono de la maquinaria (kg CO₂ e/h)

d) Conversión de emisiones por unidad de rubro

Con el propósito de integrar la huella de carbono de la maquinaria dentro de la unidad funcional de estudio, las emisiones obtenidas por hora de operación fueron transformadas a emisiones por unidad de rubro.

La conversión se realizó mediante la ecuación (13):

$$HCO2_{MAQ2} \text{ (kg CO}_2 \text{ e /m}^2\text{)} = \frac{HCO2_{MAQ}}{R} \quad (13)$$

Donde:

$HCO2_{MAQ2}$: Huella de carbono de la maquinaria por unidad de rubro. (kg CO₂ e/m²)

$HCO2_{MAQ}$: Huella de carbono de la maquinaria (kg CO₂ e/h)

R= Rendimiento del equipo (m²/h)

3.8.3.2 Huella de carbono de mano de obra

La huella de carbono asociada a la mano de obra fue estimada considerando el impacto ambiental derivado del metabolismo humano durante la jornada laboral, expresado en términos de consumo energético y su equivalente en emisiones de dióxido de carbono (CO₂).

Este enfoque permite incorporar una aproximación del impacto indirecto generado por el personal involucrado en los procesos constructivos.

a) Parámetros utilizados

Para la estimación de la huella de carbono asociada a la mano de obra, se emplearon parámetros representativos del consumo energético humano y su equivalente en emisiones de dióxido de carbono (CO₂), los cuales fueron obtenidos de fuentes técnicas y estadísticas reconocidas.

En primer lugar, se adoptó un consumo energético diario de 3996.3 kcal/día, correspondiente al gasto energético promedio de una persona sometida a actividades físicas pesadas [29]

Asimismo, para la conversión del consumo energético a emisiones de CO₂, se utilizó un factor de emisión de 0.0025 kg CO₂/kcal, basado en estudios de equivalencia energética y emisiones relacionadas con metabolismo humano y sostenibilidad ambiental [30]

Además, se consideró un valor promedio de generación de residuos sólidos de 0.84 kg/persona*día para estimar las emisiones indirectas asociadas al personal [31]

Finalmente, se incorporó un factor de emisión de 0.5 kg CO₂/kg, basado en metodologías de estimación de emisiones propuestas por el IPCC, ampliamente utilizadas en inventarios de gases de efecto invernadero [5]

Con estos datos se calculó el valor per cápita mediante (14), es decir las emisiones producidas durante una jornada de trabajo por cada trabajador, de la siguiente manera:

$$\text{Valor Per Cápita} \left(\text{kg} \frac{\text{CO}_2}{\text{persona}} * \text{dia} \right) = \frac{Ge * Fa}{Jn} + \frac{Gr * Fe}{Jn} \quad (14)$$

Donde

- Ge: Gasto energético (kcal/día)
- Fa: Factores de Emisión de la Alimentación (kg CO₂/Kcal)
- Gr: Generación de Residuos Sólidos (kg/ persona-día)
- Fe: Factor de emisión (kg CO₂/kg)
- Jn: Jornada de trabajo (h)

Posteriormente, la huella de carbono de la mano de obra fue expresada en función del área de intervención, esto con el fin de integrarla al análisis general del proyecto, mediante (15):

$$HCO2_{MO} = \frac{\text{Valor Per Cápita} * N}{\text{Avance diario}} \quad (15)$$

Donde

- HCO_{2 MO}: Huella de carbono de la mano de obra (kg CO₂ e/m²)
- Valor per Cápita: emisiones diarias por persona (kg CO₂/persona·día)
- N: Número de trabajadores
- Avance diario (m²/día): Cantidad de área ejecutada por día

Finalmente, los valores obtenidos fueron integrados por subprocesos y posteriormente un total por toda la obra.

3.8.3.3 Huella de carbono de materiales

a) Metodología general

Para los materiales que tienen un proceso de fabricación, la huella de carbono fue calculada a través de la ecuación (16):

$$HCO2_M = C * Fe \quad (16)$$

Donde:

- HCO_{2 M}: Huella de carbono de materiales (kg CO₂ e/m²)

- C: Cantidad del material utilizado (kg o m³)
- Fe: Factor de emisión del material (kg CO₂/unidad)

Los factores de emisión fueron obtenidos de bases de datos reconocidas internacionalmente, como la Inventory of Carbon and Energy, la cual proporciona valores de carbono embebido para distintos materiales de construcción [26]

b) Consideración del material reciclado (RAP)

En el caso del material reciclado tipo RAP para la simulación uno y dos, no se asigna una huella de carbono como material virgen, esto se debe a que el RAP es un material existente, cuyo impacto ambiental ya fue generado en su ciclo de vida anterior, por lo tanto, en este estudio, su utilización corresponde a un proceso de reutilización.

En el que el único impacto ambiental asociado al RAP dentro del proyecto de estudio corresponde al fresado del material y transporte del material reciclado, los cuales ya se encuentran contabilizados en la huella de carbono de la maquinaria.

c) Consideración de lastre natural

En el caso del lastrado, el material utilizado corresponde a lastre natural proveniente de cantera, por lo tanto, el impacto ambiental no fue considerado como carbono embebido independiente, sino que este se incluyó dentro de los procesos de extracción, carga y transporte los cuales son contabilizados dentro de la huella de carbono de la maquinaria.

d) Consideración del agua utilizada

En el caso de los procesos de humectación de las tres simulaciones realizadas, se utiliza agua cruda es decir que es proveniente directamente de fuentes naturales, en este caso del río Pungalá-Alao.

Al no ser sometida a procesos de tratamiento no se le asigna una huella de carbono como material.

3.8.3.4 Huella de carbono de herramienta menor

Para las tres simulaciones planteadas, los insumos correspondientes a herramienta menor, tales como palas, picos, rastrillos y demás implementos manuales no fueron considerados dentro del cálculo de la huella de carbono.

Esta decisión metodológica fue basándose en la aplicación del criterio de corte establecido en el ACV, en el cual se permite excluir del inventario aquellos elementos cuyo impacto ambiental es insignificante.

De acuerdo con la norma ISO 14044, es aceptable omitir entradas o salida del sistema cuando su aporte es menor a un umbral definido, siempre que dicha exclusión de no afecte la representatividad del estudio [20]

Por lo tanto, para este punto, se estimó el criterio de que aquellas herramientas que representen menos del 1% del impacto del proyecto total pueden ser excluidas del análisis, ya que no representan una variación significativa en los resultados.

3.8.3.5 Integración de huella de carbono

Una vez determinadas las emisiones de todos los componentes, se integró los resultados parciales de huella de carbono, la cual fue expresada en función de la unidad funcional del estudio:

$$Kg\ CO_2/m^2$$

Posteriormente, la huella de carbono obtenida por unidad funcional fue extrapolada al área total de intervención del proyecto, mediante (17):

$$HCO_{2\ PROYECTO} = \frac{CO_2\ m^2 * A}{1000} \quad (17)$$

Donde:

- $HCO_{2\ PROYECTO}$: huella de carbono total del proyecto (T CO_2)
- $CO_2\ m^2$: huella de carbono por unidad de área (Kg $CO_2\ e/m^2$)
- A: área total de intervención(m^2)

Este procedimiento fue aplicado de manera independiente para las diferentes simulaciones planteadas en el estudio, permitiendo así obtener la huella de carbono total por escenario de intervención.

3.9 Procesamiento y análisis de datos

Para el procesamiento y análisis de los resultados obtenidos en la investigación, se empleó un enfoque descriptivo-comparativo, debido a que este tipo de análisis permite identificar los componentes con mayor incidencia dentro de la huella de carbono total del proyecto, así como reconocer los procesos críticos desde el punto de vista ambiental.

3.9.1 Análisis comparativo entre alternativas

Se realizó un análisis comparativo entre las alternativas de estabilización evaluadas durante una única intervención constructiva, correspondientes al uso de RAP y el lastrado convencional

Dicha comparación se efectuó con el fin de identificar:

- Procesos con mayor generación de emisiones
- Equipos con mayor consumo energético
- Actividades con mayor aporte de CO_2
- Influencia del transporte y movilización de maquinaria

Permitiendo así establecer diferencias en el comportamiento de cada simulación, así también identificar cuál de las alternativas presentan menores emisiones de CO₂ y determinar los factores operacionales que influyen directamente en dichas diferencias.

3.9.2 Análisis dinámico temporal

Además, se incorporó un análisis dinámico temporal de emisiones, considerando la frecuencia de mantenimiento requerida por cada alternativa constructiva.

A diferencia del análisis estático inicial, el cual evalúa únicamente las emisiones generadas durante una intervención individual, este enfoque permitió analizar el comportamiento acumulado de la huella de carbono a lo largo del tiempo.

En este contexto, se demostró que las alternativas estudiadas presentan diferentes periodos de intervención y mantenimiento, por lo que el impacto ambiental total depende no solamente de las emisiones iniciales de ejecución, sino también de la cantidad de veces que los procesos constructivos deben repetirse durante la vida útil de la vía.

3.9.3 Visualización y representación de resultados

La representación gráfica y visualización comparativa de resultados fue desarrollada mediante Power BI, herramienta utilizada para el análisis visual e interpretación de emisiones, permitiendo identificar de manera visual los procesos y recursos con mayor impacto ambiental.

A través de esta plataforma se estructuraron tableros comparativos orientados al análisis de la huella de carbono en diferentes niveles de segregación, permitiendo evaluar el comportamiento ambiental de los procesos constructivos desde distintas perspectivas de análisis.

La visualización de resultados fue organizada teniendo en cuenta los siguientes criterios:

- Análisis estático de huella de carbono por intervención única
- Análisis dinámico temporal
- Comparación por métodos constructivos evaluados

Esta metodología de representación permitió identificar de manera visual los procesos, actividades y recursos con mayor incidencia dentro de la huella de carbono total del proyecto, facilitando posteriormente el análisis comparativo entre alternativas constructivas y la interpretación técnica de resultados.

CAPITULO IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Introducción al análisis de resultados

Una vez definida la metodología para el procesamiento de datos junto con el cálculo de emisiones correspondientes, el presente capítulo expone los resultados cuantitativos de la huella de carbono obtenidos en los tres escenarios de estabilización vial evaluados para la vía Pungalá – Alao. El objetivo es analizar el comportamiento ambiental de cada alternativa para determinar su viabilidad en términos de mitigación de gases de efecto invernadero.

4.2 Caracterización de los procesos viales evaluados por simulación

Para la correcta interpretación de las emisiones de gases de efecto invernadero generadas en la fase constructiva, es necesario establecer las fronteras operativas y logísticas de cada escenario evaluado. Las tres alternativas planteadas comparten la misma unidad funcional y el mismo requerimiento de diseño geométrico para el tramo e intervención, pero difieren sustancialmente en la procedencia de los materiales y en la configuración de sus flujos de transporte.

A continuación, se describen los parámetros operativos que definen a cada simulación:

4.2.1 Simulación 1- RAP directo

La simulación 1 corresponde al proceso de estabilización mediante material reciclado tipo RAP transportado directamente desde el frente de fresado hacia la zona de intervención, sin la utilización de puntos intermedios de acopio.

En este escenario el material fresado fue cargado y trasladado de manera directa hacia la vía Pungalá-Alao para posteriormente ser distribuido, humectado y compactado como capa de estabilización. Este procedimiento permitió reducir actividades adicionales de manipulación y transporte, optimizando la logística constructiva del proceso como se muestra en el Anexo 1 y 4.

4.2.2 Simulación 2-RAP con acopio

A diferencia del escenario anterior, esta simulación introduce un quiebre en el proceso logístico debido al almacenamiento temporal del material fresado, incorporando procesos adicionales de carga, descarga, almacenamiento y Re transporte del material.

Este escenario representa una realidad común en proyectos donde la disponibilidad del material fresado no está sincronizada con el avance físico de la obra como se muestra en el Anexo 2 y 5.

4.2.3 Simulación 3- Lastrado convencional

La Simulación 3 constituye la línea base tradicional de estabilización y emplea material granular natural proveniente de cantera, utilizado como alternativa comparativa

de referencia frente a los procesos de estabilización con RAP como se muestra en el Anexo 3 y 6.

4.3 Análisis estático de huella de carbono

El análisis estático constituye la primera fase de la evaluación comparativa de resultados y tiene como objetivo cuantificar el impacto ambiental generado por la ejecución de una sola intervención, para la conformación de la capa de rodadura. Este enfoque permite aislar y medir las emisiones operativas directas derivadas de la maquinaria, transporte, mano de obra y demás elementos planteados, sin considerar aun la vida útil del material o la exigencia futura de mantenimiento de la vía.

A partir de la integración de los cálculos matemáticos y logísticos, en la Tabla 2 se presentan los resultados finales de la huella de carbono totalizada para cada simulación, expresada en toneladas de dióxido de carbono equivalente (T CO₂ e).

Tabla 2. Resultados totales de huella de carbono para una intervención constructiva única

Escenario de Intervención		Huella de Carbono Total (T CO ₂ e)
Simulación 1	RAP (Directo)	240.76
Simulación 2	RAP (Con acopio)	282.00
Simulación 3	LASTRADO	231.44

Al analizar los datos, se evidencia un contraste importante respecto a la complejidad logística de cada alternativa. En el contexto de una intervención constructiva aislada, la simulación 3 (Lastrado) presenta menor huella de carbono. Es fundamental destacar que, aunque la cantera origen se encuentra a una distancia considerable del proyecto (lo que genera que la provisión y el acarreo del material de mejoramiento sea el rubro más contaminante de este escenario específico) la metodología tradicional registra un impacto inicial menor debido a la simplicidad de su cadena de producción in situ. Al emplear un material granular virgen directamente explotado, se prescinde por completo de actividades mecánicas de alta demanda energética en origen, como lo es el proceso de fresado y corte del pavimento antiguo requerido para las alternativas de reciclaje.

Por su parte, las alternativas sostenibles con material reciclado presentan emisiones iniciales superiores debido al procesamiento del pavimento asfáltico y sus variaciones en su proceso. La simulación 1 (RAP directo), se posiciona en un nivel intermedio. Sin embargo, al interrumpir el flujo continuo y agregar fases de almacenamiento, el impacto se dispara. Esto se evidencia en la Simulación 2 (RAP con acopio), la cual se posiciona como el escenario más contaminante en su fase de ejecución aislada. Este incremento significativo es la consecuencia directa de la doble manipulación del material pétreo y las horas- maquina adicionales requeridas para recargar y re-transportar el RAP desde la zona de stock hasta el frente definitivo de obra.

Para ilustrar de manera grafica esta carga ambiental comparativa, la Figura 5 presenta la distribución porcentual de las emisiones generadas por los tres escenarios durante esta primera intervención.

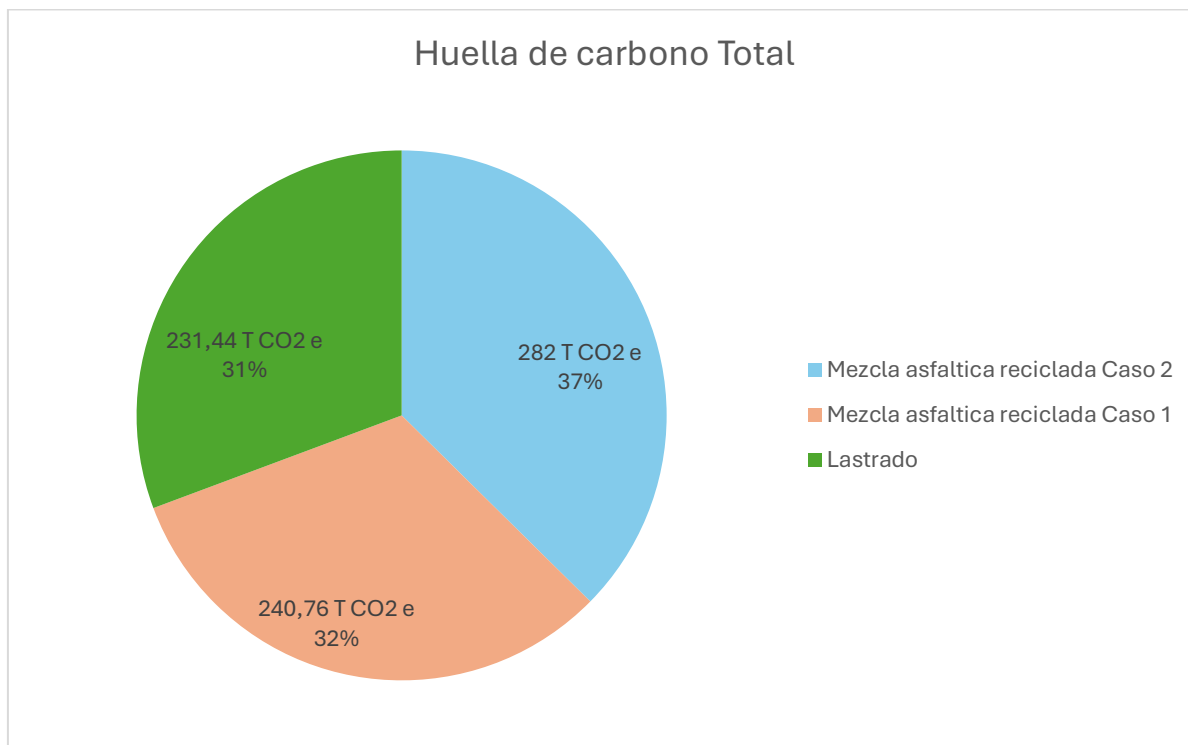


Figura 5. Distribución porcentual de la huella de carbono por escenario evaluado (Análisis estático)

Nota: [Elaboración propia]

Si la evaluación ambiental de la vía Pungalá-Alao se concluyera en esta etapa estática, los resultados numéricos sugerirían de forma engañosa que el lastrado tradicional es la opción de menor impacto. Sin embargo, fundamentar una decisión de infraestructura vial considerando de manera exclusiva las emisiones del proceso constructivo inicial constituye un análisis técnico deficiente. Esta aparente ventaja del material granular virgen omite su rápida degradación estructural frente a las cargas de tráfico y los agentes climáticos, lo que subraya la necesidad ineludible de proyectar estos datos hacia un análisis dinámico temporal a largo plazo.

4.4 Análisis dinámico temporal

Mientras que el análisis estático ofrece una perspectiva bidimensional y limitada al momento de la construcción, el análisis dinámico temporal expande la frontera de evaluación al proyectar la huella de carbono sobre un horizonte de diseño funcional de 10 años. En la ingeniería de pavimentos, este enfoque basado en los principios del análisis de ciclo de vida ACV constituye el mecanismo metodológico estandarizado para determinar la sostenibilidad real de una infraestructura, ya que integra la variable de degradación estructural del material y su consecuente demanda de mantenimiento a lo largo del tiempo[15].

Al introducir la variable temporal y las tasas de deterioro de cada capa de rodadura, la dinámica de emisiones de gases de efecto invernadero cambia radicalmente

respecto a la fase inicial. Esta inversión del comportamiento ambiental está gobernada estrictamente por la frecuencia de mantenimiento rutinario y periódico requerida por cada alternativa técnica:

Simulación 1 y 2 (Estabilización con RAP): La adopción de un ciclo de mantenimiento cada 2 años para la estabilización mediante RAP se fundamenta en las características físicas y mecánicas del material reciclado. El RAP contiene ligante asfáltico envejecido que conserva propiedades hidrofóbicas, reduciendo su interacción con el agua y modificando su comportamiento respecto a los suelos naturales [17]. No obstante, al emplearse como material no ligado para estabilización de subrasantes, la capa resultante puede experimentar un deterioro progresivo asociado al tránsito y a las condiciones ambientales, manifestado mediante corrugaciones, desprendimiento de material y formación de baches [18].

Si bien actualmente no existen criterios normativos específicos que definan intervalos de mantenimiento para subrasantes estabilizados con RAP en condiciones similares a las evaluadas en la presente investigación, estudios de caracterización mecánica reportan que este tipo de capas granulares experimentan un desarrollo acelerado de deformaciones permanentes y reordenamiento de partículas durante los primeros dos años de servicio bajo carga cíclica. En función de este comportamiento esperado y con el propósito de adoptar un escenario conservador para el análisis dinámico, se estableció un intervalo de conservación de dos para las alternativas basadas en RAP [32].

Simulación 3 (Lastrado): Por el contrario, el material granular virgen no estabilizado experimenta un proceso progresivo de degradación superficial debido a la acción combinada del tránsito vehicular y las condiciones climáticas predominantes en la zona de estudio. La pérdida de finos por erosión, la segregación del material y la formación de ahuellamientos reducen gradualmente la serviciabilidad de la vía, incrementando la necesidad de intervenciones periódicas de conservación [3].

Con el propósito de evaluar la influencia de la frecuencia de mantenimiento sobre la huella de carbono acumulada, se consideraron dos escenarios para el lastrado convencional. El primero corresponde a un mantenimiento semestral, equivalente a dos intervenciones por año, mientras que el segundo representa una condición operativa más exigente con cuatro intervenciones anuales, acorde con las necesidades observadas en la vía de estudio para conservar adecuadamente las condiciones de servicio [3].

La acumulación de emisiones asociadas a cada alternativa constructiva fue evaluada durante un horizonte de análisis de 10 años. Para el lastrado convencional se consideraron los escenarios de mantenimiento semestral y mantenimiento con cuatro intervenciones anuales, mientras que las alternativas basadas en RAP fueron modeladas con una frecuencia de mantenimiento bianual. Los valores acumulados obtenidos para cada escenario se presentan en la Tabla 3.

Tabla 3. Proyección acumulada de emisiones de CO2 e por escenario en un horizonte de 10 años.

Año	Sim 1 (T CO2 e)	Acumulado	Sim 2 (T CO2 e)	Acumulado	Lastrado (4 veces al año) (T CO2 e)	Acumulado	Lastrado (2 veces al año) (T CO2 e)	Acumulado
1	240.76	240.76	282	282	925.75	925.75	462.88	462.88
2		240.76		282	925.75	1851.5	462.88	925.76
3	240.76	481.52	282	564	925.75	2777.25	462.88	1388.64
4		481.52		564	925.75	3703	462.88	1851.52
5	240.76	722.28	282	846	925.75	4628.75	462.88	2314.4
6		722.28		846	925.75	5554.5	462.88	2777.28
7	240.76	963.04	282	1128	925.75	6480.25	462.88	3240.16
8		963.04		1128	925.75	7406	462.88	3703.04
9	240.76	1203.8	282	1410	925.75	8331.75	462.88	4165.92
10		1203.8		1410	925.75	9257.5	462.88	4628.8

Los resultados muestran que la frecuencia de mantenimiento influye directamente en la acumulación de emisiones a lo largo del tiempo. A medida que aumenta el número de intervenciones requeridas para conservar la vía en condiciones de servicio, se incrementan las actividades de transporte, humectación, perfilado y compactación, generando una mayor demanda de combustible y maquinaria pesada.

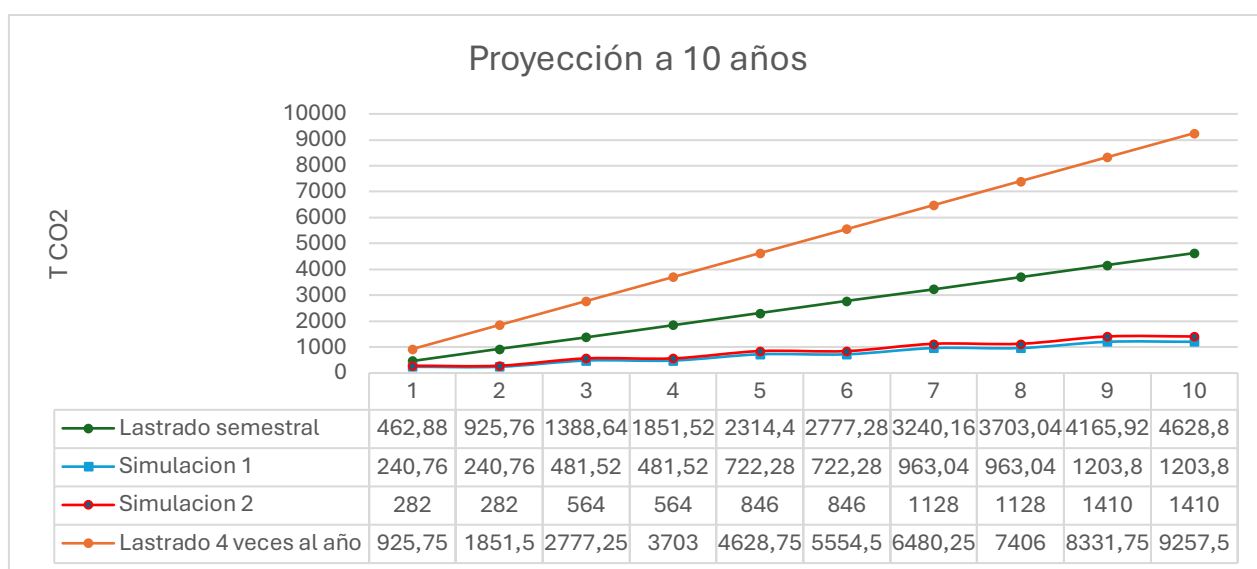


Figura 6. Evolución temporal acumulada de la huella de carbono en un horizonte de 10 años (Análisis dinámico)

Nota: [Elaboración propia]

Como se observa en la Figura 6, las alternativas basadas en RAP presentan una tasa de crecimiento moderada debido a la menor frecuencia de mantenimiento requerida. En contraste, los escenarios de lastrado exhiben pendientes de crecimiento más pronunciadas, especialmente en la condición de cuatro intervenciones anuales, donde la repetición continua de actividades constructivas incrementa significativamente la huella de carbono acumulada.

Desde la perspectiva de la gestión de infraestructura vial, estos resultados evidencian que la frecuencia de mantenimiento constituye una variable determinante dentro del desempeño ambiental de las alternativas evaluadas. Aunque el lastrado convencional puede presentar menores emisiones durante una intervención aislada, la acumulación de intervenciones a lo largo de la vida útil de la vía genera una mayor carga ambiental respecto a las alternativas basadas en RAP. Este comportamiento resulta coherente con lo reportado por Jara [3], quien identifica que las condiciones operativas y de deterioro de la vía demandan intervenciones periódicas para conservar niveles adecuados de serviciabilidad.

4.5 Comparación de métodos constructivos por procesos

La figura 7 presenta la participación relativa de los procesos que conforman los escenarios evaluados. Los resultados evidencian que las mayores emisiones se concentran en las actividades relacionadas con la provisión y transporte de materiales, independientemente de la alternativa constructiva.

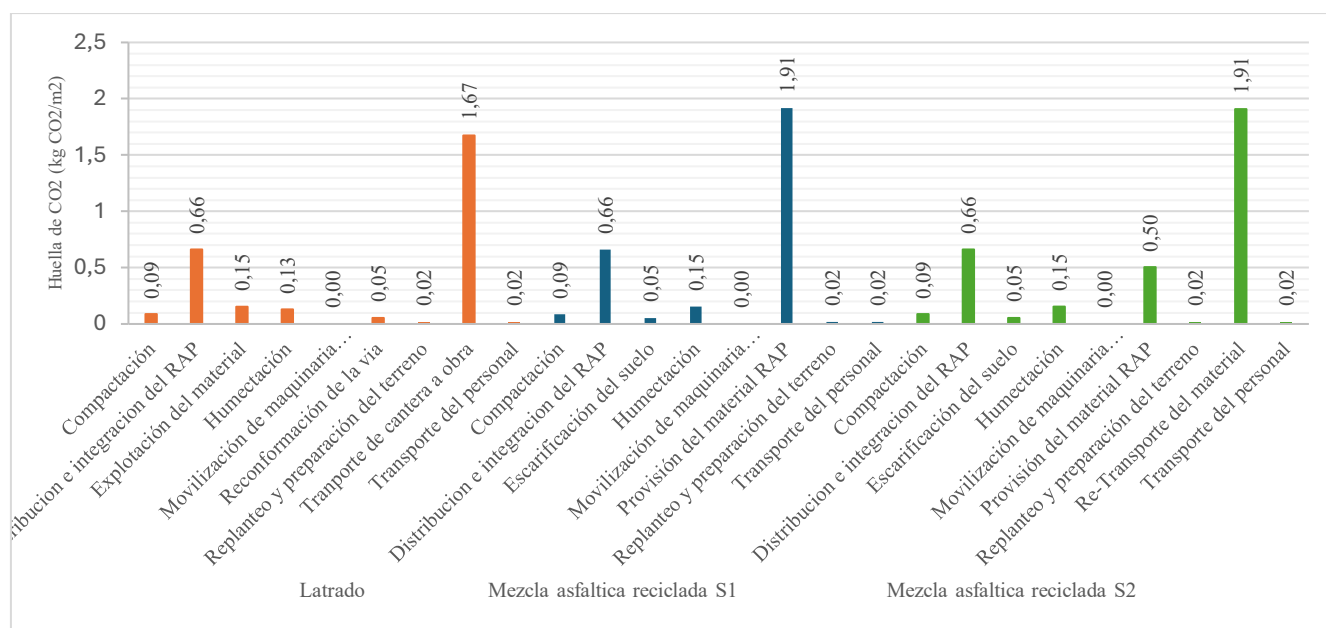


Figura 7. Comparación de emisiones de CO₂ por procesos constructivos

Nota: [Elaboración propia]

En el método de lastrado convencional, el transporte de material desde cantera registra la mayor contribución individual, alcanzando 1.67 kg CO₂ e /m². Por su parte, en la estabilización mediante RAP -Simulación 1, la provisión del material constituye el proceso dominante, con una emisión de 1.91 kg CO₂ e/m². En contraste, la estabilización mediante RAP-Simulación 2, presenta un comportamiento diferente, donde el re-

transporte desde el centro de acopio alcanza 1.91 kg CO₂/m², debido a la incorporación de etapas adicionales de movilización.

De manera general, se muestra que las diferencias observadas en los tres escenarios no se originan en las actividades de conformación de la subrasante, sino en los requerimientos logísticos asociados al suministro de materiales y transporte de materiales. En consecuencia, la optimización de las distancias de acarreo y la reducción de operaciones de re-transporte representa las principales oportunidades para disminuir la huella de carbono de los métodos constructivos evaluados.

Estos resultados coinciden con lo reportado por Huang *et al.* [19], quienes identificaron que las actividades de transporte constituyen una de las principales fuentes de emisiones dentro de los procesos de mantenimiento vial. De manera similar, Aguiar-Moya *et al.* [9] señalan que la logística de abastecimiento y movilización de materiales puede representar una proporción significativa de la huella de carbono en proyectos de infraestructura vial. En este sentido, los resultados obtenidos confirman que la eficiencia ambiental de una alternativa constructiva no depende únicamente del material empleado, sino también de la configuración logística utilizada durante su ejecución.

4.6 Comparación de métodos constructivos por categoría

La figura 8 y 9 presentan la distribución de la huella de carbono asociada a las categorías de equipos y mano de obra para los métodos constructivos evaluados. Cabe señalar que las categorías correspondientes a materiales y herramienta menos no se incluyen en el análisis gráfico debido a que sus contribuciones resultaron nulas o estadísticamente insignificantes dentro del inventario de emisiones desarrollado para los tres escenarios evaluados.

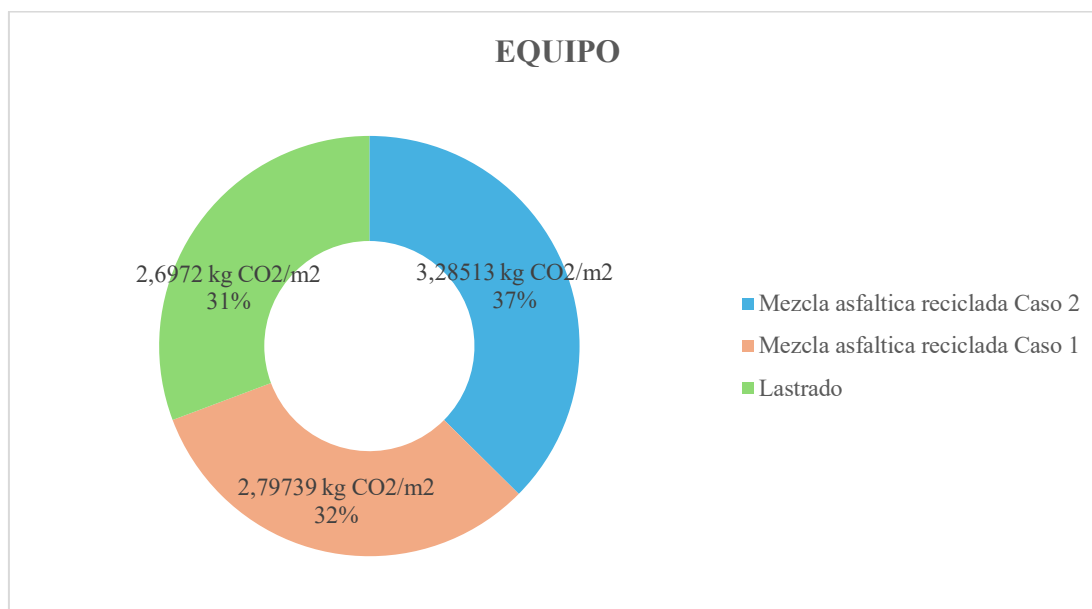


Figura 8. Comparación de la huella de carbono asociada a la categoría equipos.

Nota: [Elaboración propia]

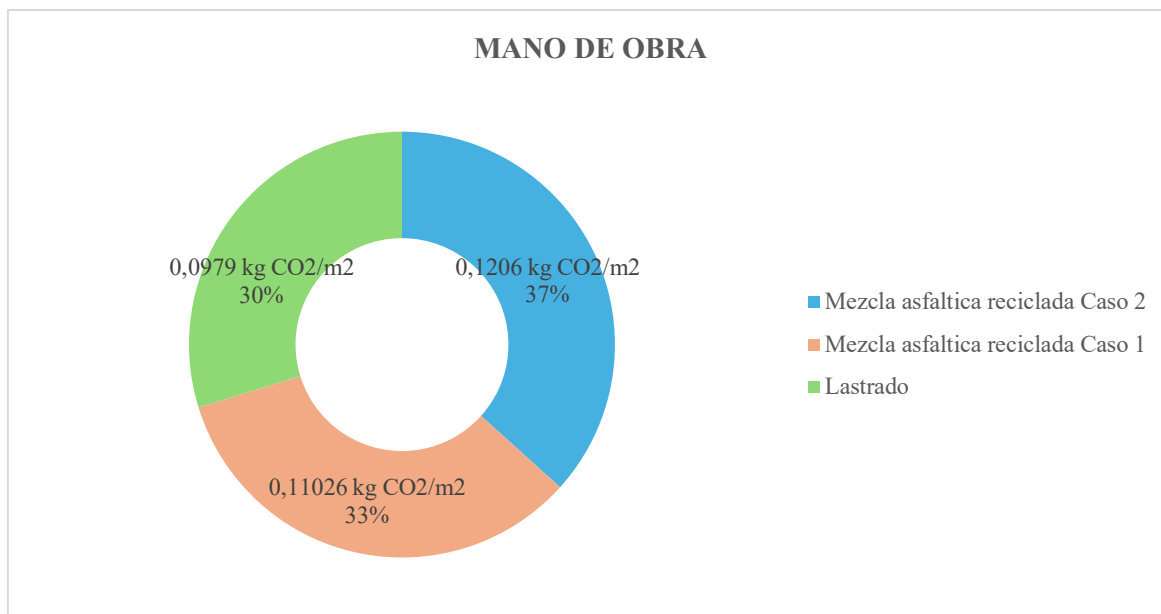


Figura 9. Comparación de la huella de carbono asociada a la categoría mano de obra.

Nota: [Elaboración propia]

En la categoría de equipos se observa que la estabilización mediante RAP-Simulación 2, registra la mayor contribución relativa de emisiones, seguida por la estabilización mediante RAP directo y el lastrado convencional. Este comportamiento se encuentra directamente asociado a la intensidad de utilización de maquinaria pesada durante las actividades de provisión, transporte y manipulación de materiales. Particularmente, el escenario con acopio incorpora operaciones adicionales de carga y re-transporte que incrementan el tiempo operativo de los equipos y, por consiguiente, el consumo de combustible.

Por otra parte, la categoría correspondiente a la mano de obra presenta una participación considerablemente menor respecto a la maquinaria pesada, manteniendo una distribución similar entre los tres escenarios analizados. Esto evidencia que la huella de carbono de los procesos constructivos evaluados está condicionada principalmente por la operación de equipos mecanizados y no por los recursos humanos requeridos para su ejecución.

4.7 Comparación de métodos constructivos por elemento

La figura 10 presenta la distribución de la huella de carbono según los elementos que intervienen en los métodos constructivos evaluados, evidenciando que estos se encuentran fuertemente condicionados por el uso de maquinaria pesada. En particular, las volquetas, motoniveladoras y tanquero concentran la mayor participación dentro del inventario de emisiones, lo que demuestra que el consumo de combustible constituye el principal mecanismo de generación de CO2 durante las actividades de mantenimiento vial.

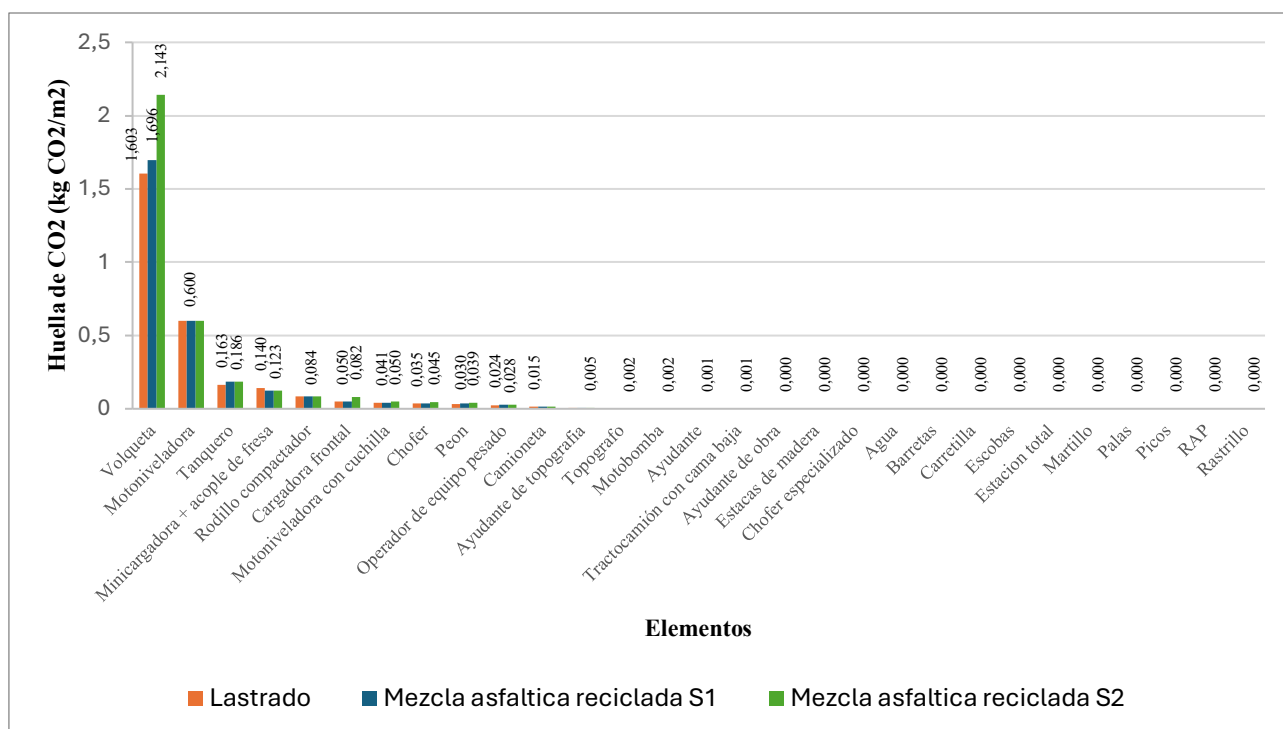


Figura 10. Comparación de la huella de carbono por elemento constructivo.

Nota: [Elaboración propia]

Las volquetas registran la mayor contribución a las actividades de acarreo y transporte de materiales, mientras que las motoniveladoras y tanqueros concentran emisiones asociadas a la conformación y humectación de la subrasante. Por el contrario, los elementos relacionados con mano de obra y apoyo técnico presentan contribuciones marginales dentro del balance global de emisiones.

4.8 Síntesis comparativa global de simulaciones

Con base en los comportamientos estáticos y dinámicos fundamentados en las secciones anteriores, la viabilidad definitiva de los escenarios se define por su eficiencia operativa cruzada. Al confrontar las tres alternativas de estabilización para la vía Pungalá-Alao, se establecieron las siguientes métricas comparativas de impacto ambiental:

- **Penalización por logística intermedia:** En la fase de ejecución aislada, la decisión de incorporar un centro de acopio temporal (Simulación 2) representa un incremento del 17.12% en las emisiones (282.00 T CO₂ e) frente a la logística de flujo directo de la Simulación 1 (240.76 T CO₂ e). Esta métrica confirma que desconectar el fresado del tendido anula la viabilidad ambiental de reciclaje a corto plazo.
- **Limitaciones ambientales del material virgen:** Si bien la Simulación 3(Lastrado) presenta la menor huella inicial (231.44 TCO₂ e), esta aparente optimización se quiebra al aplicar la variable durabilidad. La diferencia de apenas un 3.88% de ahorro inicial frente al RAP directo no

justifica, bajo ninguna métrica de ingeniería, la vulnerabilidad estructural de la capa.

- **Ahorro acumulado a largo plazo:** La brecha ambiental definitiva se consolida en el horizonte de diseño de 10 años. Al contrastar las intervenciones rutinarias de cada 2 años del RAP frente a las más de 40 intervenciones requeridas por el material natural en una década, la simulación 1 acumula un total de 1203.80 TCO₂ e, mientras que el escenario de lastrado convencional, considerando cuatro intervenciones anuales de mantenimiento, alcanzó 9257.50 TCO₂ e. Esto representa una reducción aproximada del 87% en la huella de carbono global del proyecto. Incluso bajo una condición más conservadora de dos intervenciones anuales, el lastrado convencional acumuló 4628.80 TCO₂ e, valor que continua siendo considerablemente superior al obtenido mediante estabilización con RAP, demostrando que la línea base tradicional es una alternativa operacional y ambientalmente insostenible.

4.9 Consideraciones para la optimización operativa

A partir de la analítica de emisiones y la identificación de los procesos críticos en la ejecución de la vía Pungalá- Alao, resulta imperativo establecer directrices de ingeniería para optimizar la constructibilidad y reducir la huella de carbono in situ. Estas estrategias se enfocan en corregir ineficiencias logísticas y mecánicas detectadas en las simulaciones, proporcionando un marco de acción práctico para la dirección de obra:

- **Sincronización de rendimientos en la flota de acarreo (Teoría de colas):** Dado que las volquetas representan más del 55% de las emisiones operativas en todas las alternativas, la principal estrategia de mitigación consiste en calibrar matemáticamente el tamaño de la flota. En la simulación 1 (RAP directo), los picos de contaminación por ralentí se producen cuando la capacidad de transporte supera la tasa de producción de la fresadora en origen. El ingeniero residente debe igualar los rendimientos horarios, despachando las unidades bajo un esquema logístico Just-In-Time (Justo a tiempo). Según Peurifoy *et al.* [33], el equilibrado de la flota mediante la teoría de colas garantiza que el camión llegue al frente de corte exactamente cuando la tolva esté lista para descargar, minimizando los tiempos ociosos del equipo de acarreo y su consecuente quema de combustible.
- **Optimización topográfica del diagrama de masas para centros de acopio:** Para los escenarios donde la logística obligue a utilizar un almacenamiento temporal, la ubicación del stock no debe ser arbitraria. La zona de acopio debe replantarse topográficamente en el centro de gravedad geométrico del tramo a pavimentar, basándose en el diagrama de masas del proyecto. La aplicación de este diagrama permite minimizar el momento de transporte (volumen x distancia) durante la fase de re-acarreo, optimizando los rendimientos de la maquinaria de carga y reduciendo el kilometraje total de la flota [34].

CAPITULO V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 Conclusiones

- Se analizaron los procesos constructivos asociados a la estabilización de la subrasante mediante mezcla asfáltica reciclada, identificándose actividades de transporte, acopio, humectación, conformación y compactación como componentes fundamentales de la intervención. El análisis permitió establecer que la configuración logística de estos procesos influye directamente en el desempeño operativo y ambiental de cada alternativa evaluada, siendo las actividades de transporte y manipulación de material las de mayor incidencia dentro de la huella de carbono total.
- La cuantificación de recursos evidenció que la maquinaria pesada constituye la principal fuente de emisiones dentro de los escenarios evaluados, representando más del 96% de la huella de carbono total. Particularmente, las actividades de transporte mediante volquetas concentraron la mayor incidencia ambiental debido a las distancias de recorrido y al consumo de combustible asociado.
- La evaluación de la huella de carbono demostró que las etapas de transporte y manipulación del material representan los procesos con mayor generación de emisiones. Asimismo, la incorporación de centros de acopio temporales incrementó la huella de carbono del proceso de estabilización mediante RAP, debido a la necesidad de realizar operaciones adicionales de carga y transporte.
- El análisis dinámico proyectado a 10 años evidenció que la frecuencia de mantenimiento constituye una variable determinante dentro del desempeño ambiental de las alternativas evaluadas. Aunque el lastrado convencional presenta una menor huella de carbono durante la intervención inicial, la acumulación de mantenimientos semestrales y de cuatro intervenciones anuales incrementa progresivamente sus emisiones a lo largo del tiempo. En contraste, la estabilización mediante mezcla asfáltica reciclada presenta una menor acumulación de emisiones debido a la reducción de intervenciones requeridas durante su vida útil, confirmando su viabilidad ambiental y técnica para la conservación de caminos rurales.

5.2 Recomendaciones

- Se recomienda priorizar esquemas de transporte y suministro continuo del material RAP, minimizando la utilización de centros de acopio temporales que generen recorridos adicionales y mayores emisiones asociadas al transporte.
- Se recomienda optimizar las operaciones de distribución y conformación del material en obra mediante una adecuada planificación de las descargas y recorridos de maquinaria, con el fin de reducir tiempos improductivos y consumo de combustible.
- Se recomienda desarrollar futuras investigaciones que incorporen mediciones directas de consumo de combustible y emisiones en campo, con el propósito de validar los resultados obtenidos mediante modelación teórica.
- Se recomienda ampliar el análisis a otros caminos rurales de la región andina ecuatoriana, considerando diferentes condiciones geográficas, climáticas y logísticas que permitan contrastar el comportamiento ambiental de las alternativas evaluadas.

BIBLIOGRAFIA

- [1] J. V. A. A. Campos Rodríguez, “Estabilización de suelos con concreto asfáltico reciclado,” Tesis de grado, Universidad Nacional del Santa, Chimbote, Perú, 2019.
- [2] P. Rajbongshi, “Técnicas sostenibles para la estabilización de suelos utilizando materiales reciclados,” *Revista de Ingeniería Vial*, vol. 14, no. 2, pp. 45–58, 2018.
- [3] E. Jara, “Reducción de tiempos en mantenimiento vial de las vías de tercer orden del cantón Riobamba mediante estabilización de subrasante,” Tesis de grado, Universidad Nacional de Chimborazo, Riobamba, Ecuador, 2024.
- [4] C. Parra, “Estabilización del suelo empleando el reciclaje de pavimento en la vía de tercer orden Alao – Pungalá,” Tesis de grado, Universidad Nacional de Chimborazo, Riobamba, Ecuador, 2024.
- [5] IPCC (Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático), “Combustión estacionaria,” en *Directrices del IPCC de 2006 para los inventarios nacionales de gases de efecto invernadero. Volumen 2: Energía*, H. S. Eggleston, B. L. Buendia, K. Miwa, T. Ngara y K. Tanabe, Eds. Japón: IGES, 2006, cap. 2.
- [6] International Energy Agency, “Global status report for buildings and construction,” IEA, París, Francia, 2022. [En línea]. Disponible en: <https://www.iea.org/reports/2022-global-status-report-for-buildings-and-construction> (Accedido: 24 de mayo de 2026).
- [7] N. J. Santero, E. Masanet y A. Horvath, “Life-cycle assessment of pavements. Part I: Critical review,” *Resour. Conserv. Recycl.*, vol. 55, no. 9–10, pp. 801–809, jul. 2011, doi: 10.1016/j.resconrec.2011.03.010.
- [8] S. Ullah, B. F. Tanyu y A. Dawson, “Reclaimed Asphalt Pavement (RAP) as an Unbound Base Course Material: A Mechanistic Design Approach Based on Multi-stage Repeated Load Triaxial Tests,” *Transportation Geotechnics*, vol. 33, p. 100729, mar. 2022, doi: 10.1016/j.trgeo.2022.100729.
- [9] M. Espinoza, J. Aguiar y L. Loría, “Caso de estudio: Cuantificación de la huella de carbono en la construcción de la carretera La Abundancia-Florencia, San Carlos,” ResearchGate, 2019. [En línea]. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/336810122_Caso_de_estudio_Cuantificacion_de_la_huella_de_carbono_en_la_construccion_de_la_carretera_La_Abundancia-Florencia_San_Carlos (Accedido: 24 de mayo de 2026).
- [10] M. Paredes Herrera y E. García Vallejo, “Huella de carbono en proceso de construcción vial, caso de estudio vía San Alfonso – Santo Domingo,” Tesis de grado, Universidad de Guayaquil, Guayaquil, Ecuador, 2024.
- [11] T. B. Edil, C. H. Benson y J. M. Tinjum, “Engineering properties of recycled materials for unbound applications,” University of Wisconsin-Madison, Madison, WI, EE. UU., Rep. de Investigación, 2009.
- [12] A. Azam et al., “Life cycle assessment and pavement performance of recycled aggregates in road construction,” *Case Studies in Construction Materials*, vol. 20, p. e02910, jul. 2024, doi: 10.1016/j.cscm.2024.e02910.
- [13] G. R. Guevara y E. C. Sánchez, “Factores que influyen en el deterioro de carreteras sin pavimentar,” *Ciencia Norandina*, vol. 7, no. 1, pp. 12–25, 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.unach.edu.pe/rcnorandina/index.php/ciencianorandina/article/view/247/334> (Accedido: 24 de mayo de 2026).
- [14] M. V. Moreira y E. Ortiz, “Utilización de carpetas asfálticas recuperadas para el mejoramiento de la subrasante en vías de altos volúmenes de tráfico,” *Dominio*

- de las Ciencias, vol. 10, no. 1, pp. 328–345, ene. 2024, doi: 10.23857/dc.v10i1.3715.
- [15] G. Pérez, “Análisis de ciclo de vida (ACV) de pavimentos urbanos en la zona de planificación 3 del Ecuador,” Tesis de grado, Universidad Nacional de Chimborazo, Riobamba, Ecuador, 2024.
 - [16] A. S. Yunga, “Mejora de la capacidad portante de la subrasante aplicando cal en vías de segundo orden del cantón Alausí,” Tesis de grado, Universidad Nacional de Chimborazo, Riobamba, Ecuador, 2023.
 - [17] F. M. Argüello y J. P. Aguiar, “Mezclas asfálticas con RAP: Pavimentos asfálticos reciclados,” LanammeUCR, San José, Costa Rica, Boletín Técnico, vol. 10, no. 1, ene. 2018. [En línea]. Disponible en: <https://www.lanamme.ucr.ac.cr/repositorio/bitstream/handle/50625112500/1421/Boletin%201%20%20Mezclas%20asf%C3%A1lticas%20con%20RAP.pdf> (Accedido: 24 de mayo de 2026).
 - [18] Ministerio de Transporte y Obras Públicas, “Especificaciones técnicas generales para la construcción de caminos y puentes,” en Norma Ecuatoriana Vial (NEVI-12), vol. 3, Quito, Ecuador: MTOP, 2013.
 - [19] Y. Huang, R. Bird y M. Bell, “A comparative study of the emissions by road maintenance works and the disrupted traffic using life cycle assessment and micro-simulation,” Transp. Res. D Transp. Environ., vol. 14, no. 3, pp. 197–204, may. 2009, doi: 10.1016/j.trd.2008.12.003.
 - [20] International Organization for Standardization, Gestión ambiental — Análisis de ciclo de vida — Principios y marco de referencia, Norma ISO 14040:2006, Ginebra, Suiza, 2006.
 - [21] M. Pradena, J. P. Mery y E. Novoa, “Estabilización y mantenimiento de caminos no pavimentados sometidos a condiciones de hielo-nieve en zona de montaña,” Revista de la Construcción, vol. 9, no. 2, pp. 97–107, dic. 2010, doi: 10.4067/S0718-915X2010000200010.
 - [22] H. Ñaupas Paitán, M. R. Valdivia Dueñas, J. J. Palacios Vilela y H. E. Romero Delgado, Metodología de la investigación cuantitativa - cualitativa y redacción de la tesis, 5ta ed. Bogotá, Colombia: Ediciones de la U, 2018. [En línea]. Disponible en: http://www.biblioteca.cij.gob.mx/archivos/materiales_de_consulta/drogas_de_abuso/articulos/metodologiainvestigacionnaupas.pdf (Accedido: 22 de mayo de 2026).
 - [23] R. Hernández-Sampieri y C. P. Mendoza Torres, Metodología de la investigación: Las rutas cuantitativa, cualitativa y mixta. Ciudad de México, México: McGraw-Hill Interamericana, 2018. [En línea]. Disponible en: http://www.biblioteca.cij.gob.mx/archivos/materiales_de_consulta/drogas_de_abuso/articulos/sampierilasrutas.pdf (Accedido: 22 de mayo de 2026).
 - [24] Caterpillar, Caterpillar Performance Handbook, 49a ed. Peoria, IL, EE. UU.: Caterpillar Inc., 2022.
 - [25] Google, Google Earth Pro versión 5.0, software de mapas, Google Inc., 2009.
 - [26] Circular Ecology y C. Jones, “ICE - Inventory of Carbon and Energy - Version 4.1,” Circular Ecology, 2024. [En línea]. Disponible en: <https://circularecology.com/> (Accedido: 24 de mayo de 2026).
 - [27] E. Prado-Carpio y C. J. Castro Armijos, “Intensidad energética del Ecuador y estimación de la huella de carbono,” Revista Universidad y Sociedad, vol. 9, no. 3, pp. 48–56, jul. 2017. [En línea]. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/340364326_Intensidad_energetica_del

- Ecuador_y_estimacion_de_la_huella_de_carbono (Accedido: 17 de junio de 2026).
- [28] Ministerio del Ambiente, Agua y Transición Ecológica, “Documento del Inventario Nacional de Gases de Efecto Invernadero del Ecuador 2024,” MAATE, Quito, Ecuador, Informe Técnico, 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.ambiente.gob.ec/> (Accedido: 17 de junio de 2026).
 - [29] Á. Carbajal, “Energía,” en Manual de Nutrición y Dietética, Departamento de Nutrición, Universidad Complutense de Madrid, Madrid, España, 2018. [En línea]. Disponible en: <https://www.ucm.es/data/cont/docs/458-2018-09-20-cap-4-energia-2018.pdf> (Accedido: 17 de mayo de 2026).
 - [30] S. Clune, E. Crossin y K. Verghese, “Systematic review of greenhouse gas emissions for different fresh food categories,” *J. Clean. Prod.*, vol. 140, pp. 766–783, ene. 2017, doi: 10.1016/j.jclepro.2016.04.082.
 - [31] Instituto Nacional de Estadística y Censos (INEC), “Resumen estadístico contenido 2023,” INEC, Quito, Ecuador, Boletín de Prensa, 2023.
 - [32] S. C. Thakur, J. S. Tinjum y M. S. Edil, “Mechanistic-empirical pavement design guide parameter evaluation for unbound reclaimed asphalt pavement and recycled concrete aggregate,” *Transp. Res. Rec.*, vol. 2369, no. 1, pp. 68–78, ene. 2013, doi: 10.3141/2369-08.
 - [33] R. L. Peurifoy, C. J. Schexnayder y A. Shapira, *Construction Planning, Equipment, and Methods*, 7ma ed. Nueva York, NY, EE. UU.: McGraw-Hill Education, 2006.
 - [34] C. Kraemer, J. M. Pardillo y S. Rocci, *Ingeniería de carreteras*, vol. 1. Madrid, España: McGraw-Hill/Interamericana de España, 2005.

ANEXOS

