

Life cycle analysis (LCA) of urban pavements in planning zone 3 of Ecuador

Análisis de ciclo de vida (ACV) de pavimentos urbanos en la zona de planificación 3 del Ecuador

Autores:

Ing. Pérez Martínez, Geovanny Alejandro
UNIVERSIDAD NACIONAL DE CHIMBORAZO
Ingeniero Civil
Riobamba – Ecuador



gaperez.fic@unach.edu.ec



<https://orcid.org/0009-0002-4338-3139>

Mgs. Pazmiño Chiluiza, Hernán Vladimir
UNIVERSIDAD NACIONAL DE CHIMBORAZO
Magister en Ingeniería Vial
Riobamba – Ecuador



hvpazmino@unach.edu.ec



<https://orcid.org/0000-0002-7169-7648>

Ing. Brito Noboa, Jessica Paulina
UNIVERSIDAD NACIONAL DE CHIMBORAZO
Master of Science in Water Resources (Practical Research Track)
Riobamba – Ecuador



jessica.brito@unach.edu.ec



<https://orcid.org/0000-0001-5550-5688>

Ing. Pérez Martínez, Ronald Lenin
UNIVERSIDAD ESTATAL PENÍNSULA DE SANTA ELENA
Ingeniero Civil
La Libertad – Ecuador



ronald.perezmartinez@upse.edu.ec



<https://orcid.org/0009-0004-4983-9250>

Fechas de recepción: 30-JUN-2024 aceptación: 06-AGO-2024 publicación: 15-SEP-2024



<https://orcid.org/0000-0002-8695-5005>
<http://mqrinvestigador.com/>



Resumen

Los procesos constructivos se constituyen de diferentes etapas en las cuales se desarrollan actividades que generan agentes contaminantes, estos agentes tienen un canal de entrada y salida pues se utiliza un recurso que puede o no emitir contaminantes, específicamente en los procesos de pavimentación ocurre lo propio, claro está según el recurso o maquinaria utilizados. Ante todo, el equipo caminero emite grandes cantidades de contaminantes atmosféricos, las maquinarias que intervienen son muy necesarias e indispensables en ciertos casos, por tal motivo es de gran importancia considerar estos detalles para de alguna manera mitigar los efectos adversos que pueden traer estas obras. Para realizar dichas consideraciones uno de los mecanismos es el Análisis del Ciclo de Vida (ACV) de los recursos utilizados, como una estrategia preventiva, óptima y necesaria que vislumbra el efecto adverso ambiental contrastado con la obra realizada. La metodología utiliza en el presente proyecto de investigación va desde un enfoque cualitativo y cuantitativo, metodología aplicada y con base en documentación de proyectos similares o de coyuntura al ACV; además fue de gran importancia adherir a la metodología utilizada instrumentos específicos para este tipo de casos como es el Método Delphi y la Matriz de Leopold que proponen parámetros específicos en el contexto de protección ambiental.

Palabras clave: Análisis de Ciclo de Vida; Impactos Ambientales; Pavimento Flexible; Pavimento Rígido; Pavimento Articulado; Sostenibilidad Ambiental

Abstract

The construction processes are made up of different stages in which activities that generate polluting agents are carried out, these agents have an entry and exit channel because a resource is used that may or may not emit pollutants, specifically in the paving processes the same thing happens, Of course, it depends on the resource or machinery used. First of all, the road equipment emits large quantities of atmospheric pollutants, the machinery involved is very necessary and indispensable in certain cases, for this reason it is of great importance to consider these details to somehow mitigate the adverse effects that these works can bring. To carry out these considerations, one of the mechanisms is the Life Cycle Analysis (LCA) of the resources used, as a preventive, optimal and necessary strategy that glimpses the adverse environmental effect contrasted with the work carried out. The methodology used in this research project ranges from a qualitative and quantitative approach, applied methodology and based on documentation of similar or current projects to the LCA; Furthermore, it was of great importance to adhere to the methodology used specific instruments for this type of cases such as the Delphi Method and the Leopold Matrix that propose specific parameters in the context of environmental protection.

Keywords: Life Cycle Analysis; Environmental Impacts; Environmental Sustainability; Flexible Pavement; Rigid Pavement; Articulated Pavement

Introducción

Investigaciones a cargo de la Agencia Europea de Medio Ambiente (2020) han abordado la sostenibilidad de los pavimentos en el contexto europeo, destacando la importancia de considerar aspectos locales y específicos de cada región en la toma de decisiones para el desarrollo urbano. Asimismo, como en el trabajo de Arena et al. (2001) llevaron a cabo un análisis comparativo del ACV de diferentes tipos de pavimentos en un entorno urbano. Su enfoque incluyó la evaluación de emisiones de gases de efecto invernadero, consumo de energía y agotamiento de recursos a lo largo del ciclo de vida de los pavimentos. Este estudio sirve como referencia para entender los enfoques metodológicos y los indicadores de impacto utilizados en análisis similares a nivel global. En el ámbito regional, estudios realizados en países latinoamericanos como Brasil y México han explorado la sostenibilidad de los pavimentos urbanos. Investigaciones locales, como el trabajo de Gómez (2018) en Arequipa, se enfocaron en evaluar el impacto ambiental de pavimentos flexibles y rígidos. Estos estudios regionales proporcionan insights valiosos sobre las particularidades climáticas y de infraestructura que pueden influir en los resultados del ACV. La revisión exhaustiva de antecedentes en el ámbito de los análisis de ciclo de vida (ACV) de pavimentos urbanos no solo ha proporcionado una visión integral de la sostenibilidad ambiental a nivel global, regional y local, sino que también ha identificado la carencia de estudios específicos para la Zona de Planificación 3 del Ecuador.

En la Zona de Planificación 3 del Ecuador, la falta de estudios detallados sobre el ACV de pavimentos urbanos limita la capacidad de los planificadores y responsables de políticas para tomar decisiones informadas sobre la sostenibilidad y el impacto ambiental de las infraestructuras urbanas. La metodología del ACV, que incluye la evaluación de todas las etapas del ciclo de vida del pavimento, desde la extracción de materias primas hasta la disposición final, es crucial para identificar áreas de mejora y proponer soluciones más sostenibles. De acuerdo con González et al. (2015), la adaptación de los métodos de ACV a las condiciones locales es esencial para obtener resultados precisos y relevantes para la toma de decisiones.

Además, el análisis de ciclo de vida de los pavimentos urbanos debe considerar las características específicas de la Zona de Planificación 3, como el clima, los materiales disponibles y las prácticas de construcción locales. Estudios previos en contextos similares, como el realizado por Ruiz et al. (2017) en regiones con condiciones climáticas comparables, han demostrado que las variaciones locales pueden tener un impacto significativo en los resultados del ACV. Por lo tanto, se requiere un enfoque adaptado que considere las particularidades de la región para lograr una evaluación efectiva de la sostenibilidad de los pavimentos en esta área.

Material y métodos

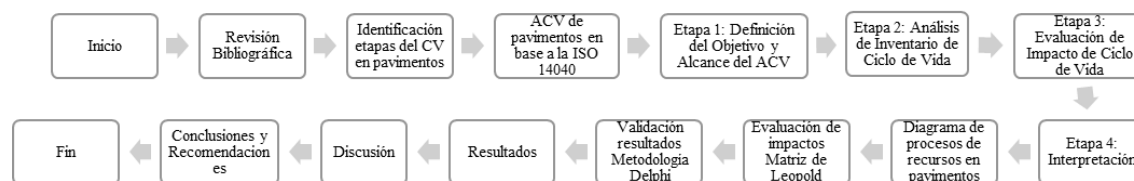
Este estudio se llevó a cabo tomando como referencia la construcción de pavimentos como flexible, rígido y articulado en la demarcación geográfica del Ecuador, específicamente en la zona

3 donde no existe mayor información referente al tema y tiene un enfoque explicativo del mismo. Su objetivo principal es la determinación y análisis de ciclo de vida de cada proceso o recurso utilizado en los proyectos de pavimentación, para así buscar la opinión de expertos en el área ambiental y el ACV que colaboren con su experticia del tema a plasmar soluciones y alternativas que permitan minimizar y mitigar los efectos adversos que provocan en el ambiente los trabajos de construcción de pavimentación que buscan mejorar la calidad de vida de los pueblos. Este análisis se basará mediante el uso de la Matriz de Leopold y la utilización de la Metodología Delphi con lo que serán validados los impactos ambientales por parte de los profesionales consultados. La investigación se desarrolla enfocándose en la finalidad de explicar, como se realizan los procesos en los trabajos de pavimentación, para de ahí partir al por qué de las consecuencias ambientales que generan cada uno de los procesos, recursos y maquinarias que se utilizan, cuantificando los efectos negativos o positivos de estos impactos en el ambiente, poniendo de manifiesto la necesidad de realizar de forma imprescindible un Análisis del Ciclo de Vida previo a ejecutar un proyecto constructivo. La correlación que existe entre las prácticas constructivas con el efecto en el ambiente es muy estrecha y es indispensable generar conciencia de que, dichos procesos deben cada vez ser mucho más amigables con la naturaleza para así hacer de los mismos una constante en la búsqueda de acciones enmarcadas en la protección y beneficio de los ecosistemas. Para el desarrollo de la investigación será necesario el uso de técnicas e instrumentos de recolección de datos, según el propósito de la misma:

- Consulta de diferentes fuentes relacionadas a proyectos de pavimentación tanto flexible, rígido como articulado, proceso, recursos utilizados en cada uno, maquinaria, además de las emisiones que estos producen.
- Consulta a expertos en Análisis de Ciclo de Vida y materia ambiental para que colaboren a la búsqueda de resultados y de recomendaciones para mitigar efectos adversos al ambiente.

Figura 1.

Metodología implementada en esta investigación.



Fuente: Pérez (2024)

Resultados

Las etapas que se han considerado para el presente estudio son: extracción, transporte y pavimentación propiamente dicha. Conforme a la información recopilada del proceso de producción se logra evidenciar las etapas de este tipo de procedimiento iniciando siempre con la

extracción de materias primas. Para dar inicio al proceso de pavimentación hay que realizar la extracción de materias primas; dicha extracción normalmente se realiza a cielo abierto por medio de sistemas de terrazeo, a continuación, se indica en la tabla 1 los valores de emisiones que se realizan los equipos de extracción de material en un promedio de una hora de trabajo.

Tabla 1.

Emisiones en proceso de Extracción a cielo abierto

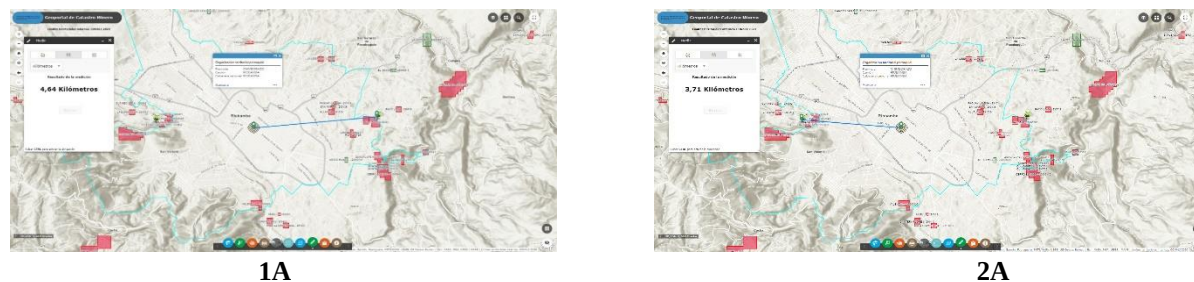
Contaminante (g/kWh)	Rango de potencia en kW		
	0-20	20-37	37-75
NO _x	14.4	14.4	14.4
CO	8.38	6.43	5.06
PM	2.22	1.81	1.51
PM 2.5	2.09	1.7	1.42

Fuente: León & Segura (2022)

El traslado de materias primas hacia la obra, para proceder con las actividades de ejecución del proyecto de pavimentación constituyen aspectos de gran importancia, pues involucra un rubro alto en el planillaje del proyecto. En su investigación León & Segura (2022), presentan los valores según la cantidad de combustible, diésel consumido y las emisiones de dióxido de carbono (CO₂) asociadas a estas actividades. En relación al transporte de materias primas, se emplean con mayor frecuencia volquetas con capacidades que oscilan entre 8m³ y 16m³, mostrando un consumo promedio de 0.3 a 0.4 litros de diésel por cada kilómetro recorrido por la volqueta que transporta la materia prima utilizada en el proceso de pavimentación. En promedio se estima que la producción de CO₂ fue de 2.5Kg de CO₂/ litro de combustible quemado. (Bórquez & Ramis, 2017). En este proyecto se ha considerado para su evaluación la Zona de Planificación 3 que está situada en el centro sierra y amazonia del Ecuador, el eje vial de las provincias de Cotopaxi, Tungurahua, Pastaza y Chimborazo es utilizado para el transporte de material pétreo de su origen hacia su destino en obra, para realizar un análisis comparativo de este particular se expone a continuación las distancias de algunas de las rutas utilizadas para ello. Zonas de Concesión y su distancia hacia el centro urbano de cada capital de las provincias de la coordinación zonal 3 del Ecuador.

Ilustración 1.

Distancia de zona de concesión minera 1A – 2A hacia el centro urbano de la ciudad de Riobamba.

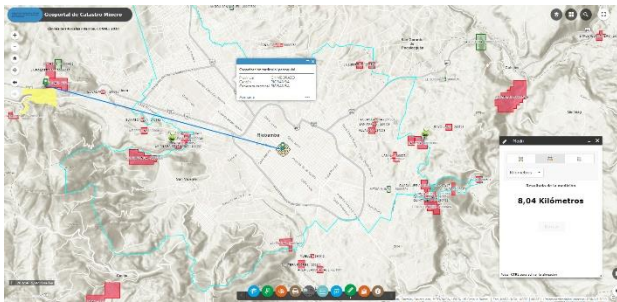


Fuente: <http://surl.li/tmbmvj>

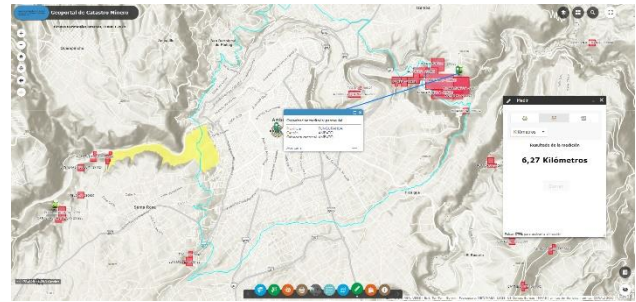


Ilustración 2.

Distancia de zona de concesión minera 3A – 1B hacia el centro urbano de la ciudad de Riobamba.



3A

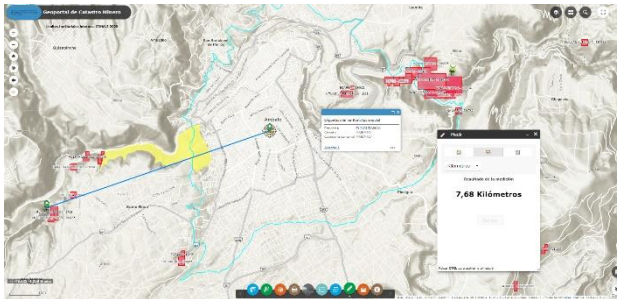


1B

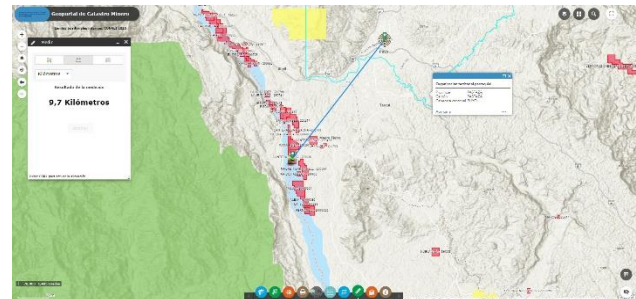
Fuente: <http://surl.li/tmbmvj>

Ilustración 3.

Distancia de zona de concesión minera 2B – 1C hacia el centro urbano de la ciudad de Riobamba.



2B



1C

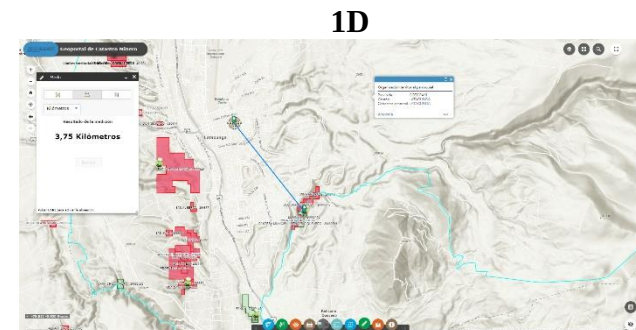
Fuente: <http://surl.li/tmbmvj>

Ilustración 4.

Distancia de zona de concesión minera 2C – 1D hacia el centro urbano de la ciudad de Riobamba.



2C



1D

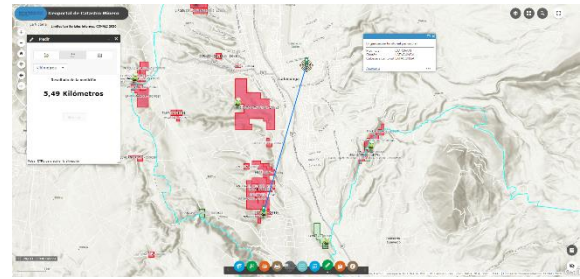
Fuente: <http://surl.li/tmbmvj>

Ilustración 5.

Distancia de zona de concesión minera 2D – 3D hacia el centro urbano de la ciudad de Riobamba.



2D

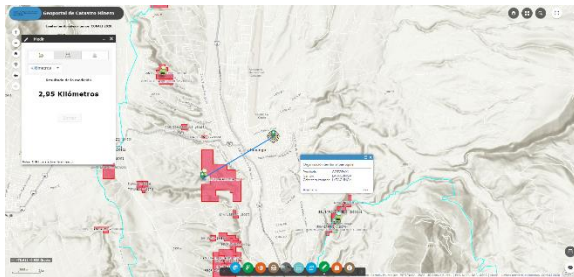


3D

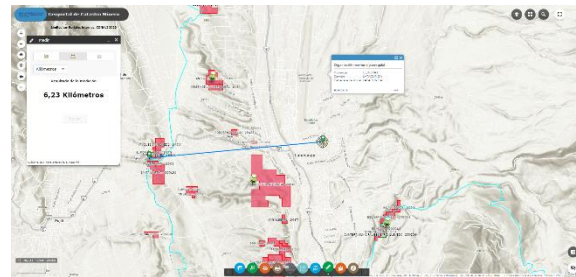
Fuente: <http://surl.li/tmbmvj>

Ilustración 6.

Distancia de zona de concesión minera 4D – 5D hacia el centro urbano de la ciudad de Riobamba.



4D

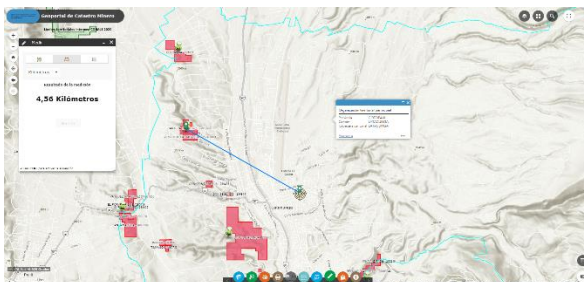


5D

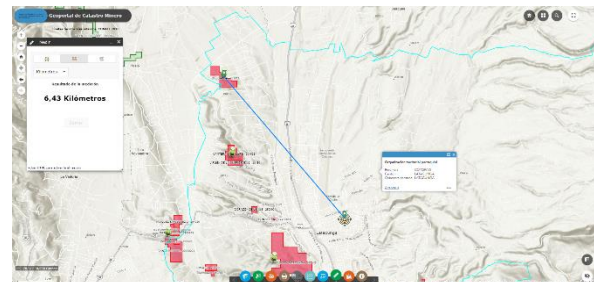
Fuente: <http://surl.li/tmbmvj>

Ilustración 7.

Distancia de zona de concesión minera 6D – 7D hacia el centro urbano de la ciudad de Riobamba.



6D



7D

Fuente: <http://surl.li/tmbmvj>

Tabla 2.

Resultado de litros de combustible consumido en la ruta

N*	Lugar	Zona de concesión	Distancia Promedio en Km	Consumo promedio de litro de diésel por Km recorrido	Resultado de litros de combustible consumido en la ruta
1	Riobamba, Chimborazo	1A	4.64	0.3-0.4	1.85
2	Riobamba, Chimborazo	2A	3.71	0.3-0.4	1.48

3	Riobamba, Chimborazo	3A	8.04	0.3-0.4	3.21
4	Ambato, Tungurahua	1B	6.27	0.3-0.4	2.50
5	Ambato, Tungurahua	2B	7.68	0.3-0.4	3.07
6	Puyo, Pastaza	1C	7.68	0.3-0.4	3.07
7	Puyo, Pastaza	2C	8.40	0.3-0.4	3.36
8	Latacunga, Cotopaxi	1D	3.75	0.3-0.4	1.5
9	Latacunga, Cotopaxi	2D	6.39	0.3-0.4	2.55
10	Latacunga, Cotopaxi	3D	5.49	0.3-0.4	2.19
11	Latacunga, Cotopaxi	4D	2.95	0.3-0.4	1.18
12	Latacunga, Cotopaxi	5D	6.23	0.3-0.4	2.49
13	Latacunga, Cotopaxi	6D	4.56	0.3-0.4	1.82
14	Latacunga, Cotopaxi	7D	6.43	0.3-0.4	2.57

Fuente: Pérez (2024)

El consumo de combustible utilizado en el transporte de material pétreo hacia las obras, y en el caso del presente análisis, se evalúa en primera instancia la distancia recorrida en kilómetros por los vehículos, para así obtener la cantidad promedio de combustible que se usa en esos trayectos, ya que estos datos ayudarán a cuantificar las necesidades y las afectaciones que las mismas generarán en el proceso.

Tabla 3.

Resultado de Kg de CO₂/ litro de combustible quemado en la ruta

N*	Lugar	Zona de concesión	Distancia Promedio en Km	Emisión de Kg de CO ₂ / litro de combustible quemado	Resultado de Kg de CO ₂ / litro de combustible quemado en la ruta
1	Riobamba, Chimborazo	1A	4.64	2.5	11.6
2	Riobamba, Chimborazo	2A	3.71	2.5	9.27
3	Riobamba, Chimborazo	3A	8.04	2.5	20.1
4	Ambato, Tungurahua	1B	6.27	2.5	15.67
5	Ambato, Tungurahua	2B	7.68	2.5	19.2
6	Puyo, Pastaza	1C	7.68	2.5	19.2
7	Puyo, Pastaza	2C	8.40	2.5	21
8	Latacunga, Cotopaxi	1D	3.75	2.5	9.37
9	Latacunga, Cotopaxi	2D	6.39	2.5	15.97
10	Latacunga, Cotopaxi	3D	5.49	2.5	13.72
11	Latacunga, Cotopaxi	4D	2.95	2.5	7.37
12	Latacunga, Cotopaxi	5D	6.23	2.5	15.57
13	Latacunga, Cotopaxi	6D	4.56	2.5	11.4
14	Latacunga, Cotopaxi	7D	6.43	2.5	16.07

Fuente: Pérez (2024)

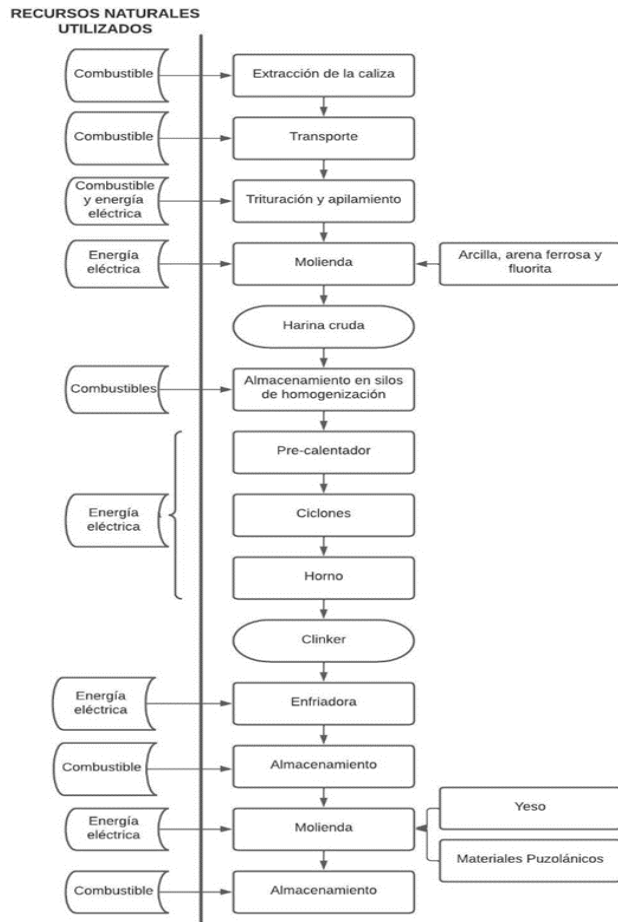
Después de obtener el dato real de combustible utilizado, es importante cuantificar los niveles de CO₂ quemado por los mismos y expulsados hacia el ambiente, en este sentido se pueden tomar medidas para mitigar estos efectos, como por ejemplo buscar concesiones mineras más cercanas a la ejecución de obra; de tal manera menorar el consumos de combustible y por ende los efectos

negativos que se generan en el proceso, esto es de vital importancia en el ACV como profesionales comprometidos con el cumplimiento de las normas de protección ambiental.

Producción. La transformación de materias primas hacia el producto final es un punto importante para el proceso, es aquí en donde por medio de maquinaria y diferentes reacciones tanto físicas y químicas se obtendrá el producto final.

Diagrama 1.

Recursos Naturales Utilizados



Fuente: León & Segura (2022)

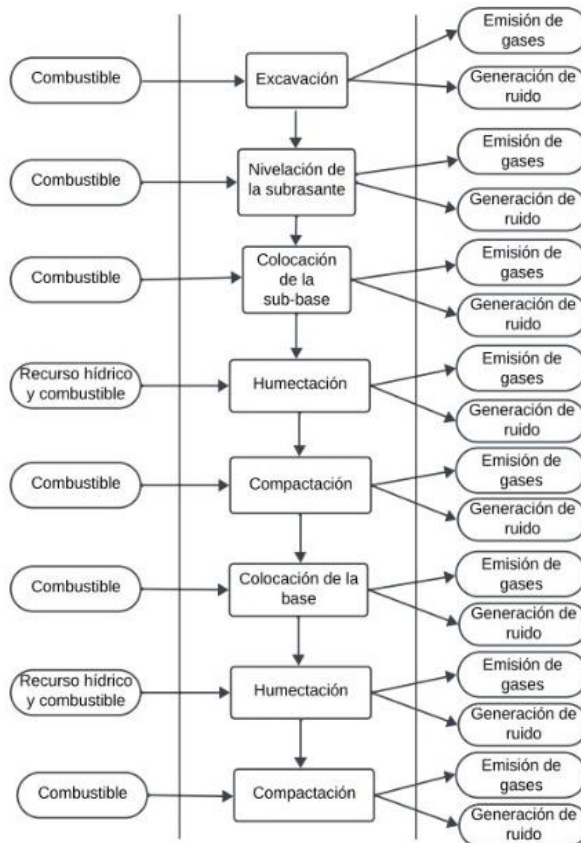
Se estima que las emisiones de CO₂ en la producción de Clinker rondan los 522 a 529 kg de CO₂ por cada tonelada de Clinker producido (MITECO, 2016). El consumo de energía eléctrica que se utiliza para mantener encendidas las maquinarias de los procesos productivos para la producción del hormigón tiene un valor estimado de energía consumida que ronda los 2000 KW/h. Por otro lado, el de menor impacto son los combustibles fósiles que son utilizados únicamente para maquinaria de transporte ligero dentro de la planta. El recurso hídrico es utilizado principalmente

para dos funciones, como parte de la mezcla para la fabricación de hormigón y la limpieza de las instalaciones, equipos y maquinarias.

Pavimentación. Inicia el proceso de pavimentación con la excavación y preparación del área de trabajo, dicho proceso se lo lleva a cabo en los tres tipos de pavimento y se lo hace de la siguiente manera:

Diagrama 2

Entradas y salidas en Preparación del terreno



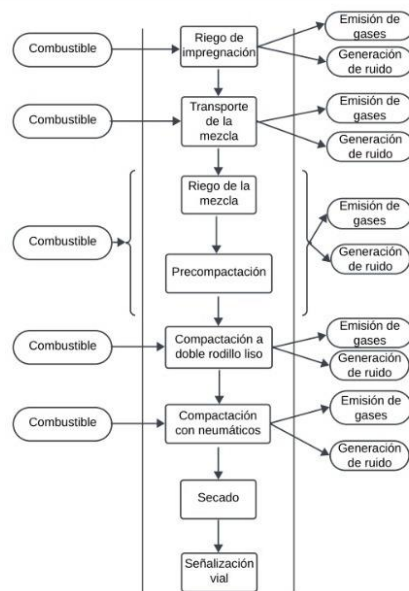
Fuente: Pérez (2024)

La excavación es el primer paso dentro del proceso de preparación del terreno, en esta etapa se utiliza como maquinaria la retroexcavadora; para la nivelación de la subrasante se utiliza un vehículo de rodillo compactador; para colocar la sub-base se usan volquetas para regar el material in situ; posterior se procede a humectar la sub-base con la utilización de un vehículo rociador de agua; seguido de una compactación con el rodillo compactador; se coloca la base con una volqueta; se humecta nuevamente con el vehículo rociador; y la respectiva compactación con el vehículo rodillo, todos estos vehículos funcionan con el uso de combustible que emiten gases y a su vez generan ruido.

Pavimento flexible. La pavimentación con material flexible es la que se la realiza con lo que comúnmente se llama asfalto y para detallar cada etapa del proceso y sus implicaciones ambientales se lo hace de la siguiente manera:

Diagrama 3

Entradas y salidas en Pavimento Flexible



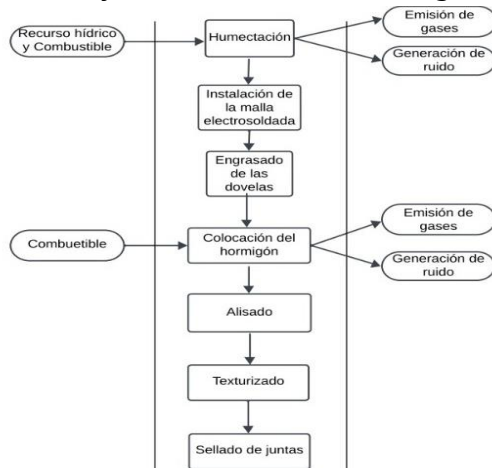
Fuente: Pérez (2024)

Se da inicio con el riego de impregnación para el cual se utiliza un vehículo petrolizador que coloca la emulsión asfáltica o brea; se transporta el material asfáltico en volquetas; para seguido colocarlo y distribuirlo con un vehículo pavimentador que lo distribuye uniformemente en el tramo trabajado, realizando a su vez una pre - compactación; el proceso continua con una compactación con vehículo doble rodillo liso; se realiza una nueva compactación pero en esta ocasión con un vehículo compactador con neumáticos; finalmente se espera el secado del asfalto para posterior realizar la pintura de señalización vial en asfalto según especificaciones, estos vehículos utilizados en el procesos funcionan con combustibles mismos que emiten gases al aire y generan ruido.

Pavimento rígido. El pavimento rígido se lo realiza en etapas las cuales utilizan recursos y generan salidas durante el proceso que se las detalla a continuación:

Diagrama 4

Entradas y salidas en Pavimento Rígido

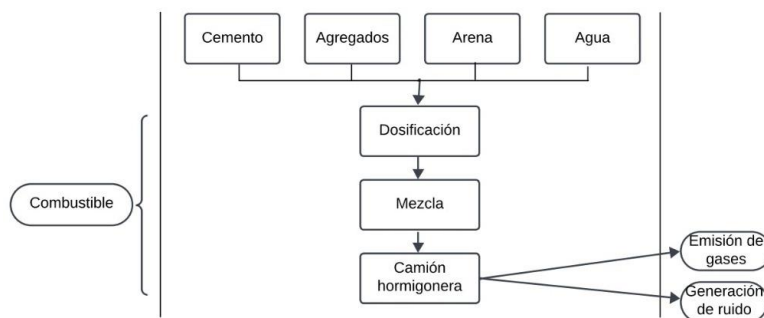


Fuente: Pérez (2024)

Inicialmente se procede a realizar la humectación del terreno donde se va a colocar el pavimento rígido por medio de un vehículo rociador; se coloca la malla electrosoldada; adicional se colocan las dovelas engrasadas; seguido se distribuye el hormigón que fue debidamente transportado en un camión hormigonera, esto se lo efectúa por tramos; se realiza un alisado de este hormigón con herramienta menor, de igual forma el texturizado; en la utilización de vehículos que colaboran en el proceso que funcionan con combustible la emisión de gases es el factor ambiental que se consideran como salidas, además de la generación de ruido. También es importante detallar el proceso de elaboración del hormigón utilizado en la pavimentación rígida, pues es el material que predomina en el mismo.

Diagrama 5

Entradas y salidas en Elaboración del Hormigón



Fuente: Pérez (2024)

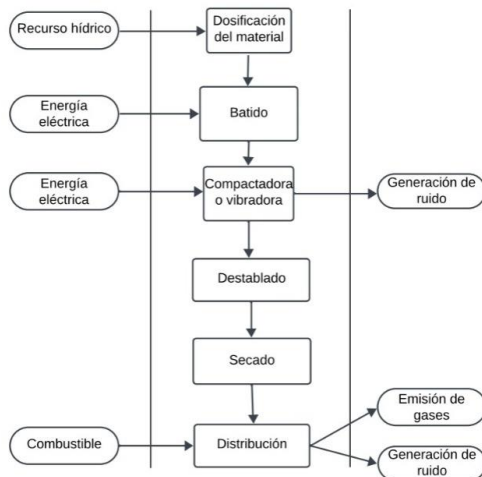
Para elaborar el hormigón se requieren los siguientes agregados: cemento, agregados finos, gruesos, arena y agua en dosificaciones específicas según la resistencia que se desea para el proceso en el caso de vías se requiere que sea de 30MPa, estos materiales son trasladados y

mezclados en un camión hormigonera, cuyo combustible emite gases como residuo de salida y genera ruido.

Pavimento articulado. Para ampliar el proceso se detalla adelante como se lleva a cabo la fabricación de los adoquines.

Diagrama 6

Entradas y salidas en Fabricación de adoquines



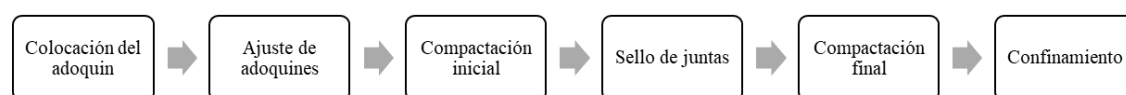
Fuente: Pérez (2024)

La elaboración del adoquín es un proceso en el cual se pueden detallar las siguientes entradas y salidas en cuanto a los recursos, en primer lugar se realiza el dosificado del material para lo que se utiliza agua (recurso hídrico); se procede a un proceso de batido por medio de un equipo eléctrico; a continuación se realiza la compactación el cual también utiliza energía eléctrica; posterior se realiza un destablado manual y el secado de los adoquines, hasta este momento del proceso no genera salidas de recursos o residuos; finalmente se distribuyen los adoquines, en esta etapa se utilizan vehículos de distribución mismos que utilizan combustible y generan ruido y emisiones de gases.

En el proceso de pavimento articulado se puede determinar un análisis de procesos el cual se detalla a continuación:

Diagrama 7

Entradas y salidas en Pavimento Articulado



Fuente: Pérez (2024)

El proceso inicia con la colocación del adoquín; se realiza el ajuste de los mismos; seguido por una compactación inicial la cual se la realiza don arena para el sellado de juntas; se realiza una compactación final y el confinamiento que evitará el desplazamiento de los adoquines, todos estos procesos se los realiza con mano de obra y herramienta menor, no intervienen vehículos ni maquinarias que utilicen combustibles, es decir no existe emisión de gases, ni salida de recursos que afecten al ambiente.

Identificación de los Indicadores de Impacto Ambiental

Para un Análisis efectivo del ciclo de vida es importante no solo identificar los recursos involucrados y afectados no solo de manera negativa o positiva, sino también los procesos en los que cada uno interviene.

Tabla 4.
Identificación de los Impactos Ambientales

FASE	ACTIVIDAD	IMPACTO	MEDIO AFECTADO
OBTENCION DEL MATERIAL	Excavación de la Zona	• Generación de ruido • Afectación al recurso suelo y aire • Afectación a la flora y fauna de la zona • Generación de empleo	• Físico • Biológico • Socioeconómico
	Extracción del Material	• Generación de ruido • Afectación al recurso suelo y aire • Afectación a la flora y fauna de la zona • Generación de empleo	• Físico • Biológico • Socioeconómico
	Transporte de Materia Prima	• Generación de ruido • Afectación al recurso suelo y aire • Afectación a la flora y fauna de la zona • Generación de empleo	• Físico • Biológico • Socioeconómico
ASENTAMIENTO	Remoción del Suelo	• Generación de ruido por maquinaria pesada • Emisión de gases por maquinaria • Migración de la población • Remoción de flora y fauna de la zona • Generación de empleo	• Físico • Biológico • Socioeconómico
	Preparación del Suelo	• Generación de ruido por maquinaria pesada • Emisión de gases por maquinaria • Generación de empleo • Consumo del recurso hídrico	• Físico • Socioeconómico
	Asentamiento de Equipos	• Generación de ruido por maquinaria pesada • Emisión de gases por maquinaria • Generación de empleo • Consumo del recurso hídrico	• Físico • Socioeconómico
PAVIMENTO FLEXIBLE	Riego del Material	• Generación de ruido por maquinaria pesada • Afectación al suelo • Emisión de gases por maquinaria • Generación de empleo	• Físico • Socioeconómico
	Compactación	• Generación de ruido por maquinaria pesada • Afectación al suelo • Emisión de gases por maquinaria • Generación de empleo	• Físico • Socioeconómico
	Secado	• Generación de ruido por maquinaria pesada	• Físico

		• Afectación al suelo • Emisión de gases por maquinaria	
PAVIMENTO RÍGIDO	Humectación	• Afectación al suelo • Generación de empleo	• Físico • Socioeconómico
	Instalación	• Generación de empleo	• Socioeconómico
	Colocación del Hormigón	• Generación de ruido por maquinaria pesada • Consumo del recurso hídrico • Emisión de gases por maquinaria • Generación de empleo	• Físico • Socioeconómico
	Alisado	• Generación de empleo	• Socioeconómico
	Texturizado	• Generación de empleo	• Socioeconómico
	Sellado de Juntas	• Generación de empleo	• Socioeconómico
PAVIMENTO ARTICULADO	Dosificación	• Consumo energético • Generación de empleo	• Físico • Socioeconómico
	Batido y Compactación	• Consumo energético • Consumo del recurso hídrico	• Físico • Socioeconómico
	Secado	• Afectación al suelo	• Físico
	Distribución	• Emisión de gases por maquinaria • Generación de ruido por maquinaria pesada • Generación de empleo	• Físico • Socioeconómico
	Colocación y Ajuste del Adoquín	• Generación de empleo	• Socioeconómico
	Compactación	• Generación de empleo	• Socioeconómico
	Sello de Juntas	• Generación de empleo	• Socioeconómico
	Compactación Final	• Generación de empleo	• Socioeconómico
ABANDONO	Levantamiento de Equipos	• Afectación a la calidad del aire • Generación de empleo	• Físico • Socioeconómico

Fuente: Pérez (2024)

En el proceso constructivo de un pavimento flexible existen diferentes etapas que se deben cumplir cada una de ellas genera un impacto en los diferentes recursos intervinientes, esta afectación puede ser negativa o positiva como es el caso de la generación de empleo que en el área socioeconómica aporta a su crecimiento.

Los procesos que son parte de la construcción de un pavimento rígido conllevan impactos en los recursos, estos recursos pueden ser afectados de manera positiva o negativa en el cumplimiento de estas actividades; es por ellos que identificar estos impactos es importante para un buen análisis de ciclo de vida.

Durante la ejecución de un proyecto de pavimento articulado existen varias etapas y procesos que se llevan a cabo por parte de los profesionales a cargo, las actividades que se realizan provocan inevitablemente impactos en los recursos, dichos impactos son evaluados como negativos o positivos según sea el caso y esta valoración permite una valoración más objetiva del análisis de ciclo de vida.

Valoración de impactos ambientales.

La matriz de Leopold nos ayudará en el presente proyecto de investigación a cuantificar la afectación ambiental que se producen en el proceso de pavimentación, la finalidad es, poder

Tabla 5.
Matriz de Leopold Evaluación del proceso para Pavimento Flexible

Fuente: Pérez (2024)

Matriz de Leopold Evaluación del proceso para Pavimento Rígido

Fuente: Pérez (2024)

Tabla 7.
Matriz de Leopold Evaluación del proceso para Pavimento Articulado

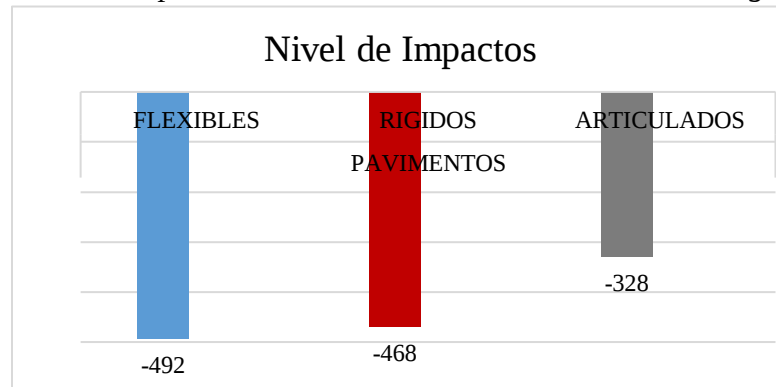
FACTORES AMBIENTALES		ACCIONES DEL PROYECTO	MATRIZ DE LEOPOLD - EVALUACIÓN DEL PROCESO PARA PAVIMENTO ARTICULADO																				
			OBTENCIÓN DEL MATERIAL			ASENTAMIENTO			FABRICACIÓN			PAVIMENTACIÓN			ABANDONO		PROMEDIOS POSITIVOS	PROMEDIOS NEGATIVOS	IMPACTO SUBCOMPONENTE	IMPACTO POR COMPONENTE	IMPACTO TOTAL DEL		
			EXCAVACIÓN DE LA ZONA	EXTRACCIÓN DEL MATERIAL	TRANSPORTE DE MATERIA PRIMA	REMOCIÓN DEL SUELO	PREPARACIÓN DEL SUELO	ASENTAMIENTO DE EQUIPOS	DOSIFICACIÓN	BATIDO Y COMPACTACIÓN	SECADO	DISTRIBUCIÓN	COLOCACIÓN Y AJUSTE DEL ADOSQUIN	COMPACTACIÓN	SELO DE JUNTAS	COMPACTACIÓN FINAL						LEVANTAMIENTO DE EQUIPOS	
FÍSICO	SUELO	EROSIÓN	-5	-8	-3	-8	-6	-1		-2	1			-1		-1		0	9	-119	-285	-328	
	AIRE	CALIDAD	-5	-8	-5	-5	-2	-2	-1				-5				-3	1	0	8			-120
	AGUA	CONSUMO					-4	-4	1		-5							0	3	-23			
	ENERGÉTICO	CONSUMO						1	-4		-5							0	2	-23			
BIOLÓGICO	FLORA	HABITAT	-5	-5	-1	-5												0	4	-56	-88		
	FAUNA	HABITAT	-5	-5	-1	-1												0	4	-32			
	POBLACIÓN	MIGRACIÓN	-2			-1	1											0	2	-5	45		
	ECONOMÍA	EMPLEO	3	3	5	5	5	5	2	2	5	3	3	3	1	1	1	13	0	50			
PROMEDIO POSITIVO			1	1	1	1	1	1	1	0	0	1	1	1	1	1	1						
PROMEDIO NEGATIVO			5	4	4	5	3	3	1	2	1	1	0	1	1	1	1						
PROMEDIO ARITMETICO			-61	-101	-31	-70	-27	-2	-6	-30	-2	-13	10	2	3	2	-2					-328	

Fuente: Pérez (2024)

En el pavimento flexible se puede observar que el recurso más afectado es el suelo y el aire en los procesos de obtención de material y asentamiento, es importante mencionar el impacto positivo que este tipo de trabajos genera en la población en el ámbito económico, social y de movilidad.

Ilustración 15.

Nivel de Impactos Ambientales en Pavimento Flexible, Rígido y Articulado



Fuente: Pérez (2024)

En la valoración de impactos utilizando la matriz de Leopold, se obtuvieron los siguientes resultados para los distintos tipos de pavimentos:

- Pavimentos flexibles: Con un valor de impacto de -492, este tipo de pavimento muestra el mayor impacto ambiental. Las principales preocupaciones incluyen las emisiones de gases

y la remoción de suelos durante los procesos de producción y asentamiento, lo que contribuye a un mayor deterioro ambiental.

- Pavimentos rígidos: Obtuvieron un valor de impacto de -468. El mayor impacto se concentra en el aire y el suelo debido a las emisiones y la remoción de suelos asociadas a su producción. A pesar de estos impactos negativos, los pavimentos rígidos son bien recibidos por sus beneficios económicos y sociales, como la mejora en la movilidad y el desarrollo económico.
- Pavimentos articulados: Registraron un valor de impacto de -328. Aunque también afectan el aire y el suelo, su impacto es menor en comparación con los pavimentos flexibles y rígidos. Un factor adicional en este tipo de pavimento es el consumo energético asociado a la producción y transporte de adoquines, que influye en el impacto total.

El pavimento flexible presenta el mayor impacto ambiental, seguido por el pavimento rígido y, finalmente, el pavimento articulado, que muestra el menor impacto de los tres.

Emisión de Gases en los Proceso de Pavimentación Flexible, Rígido y Articulado

En el proceso de pavimentación, los vehículos de carga pesada emiten diversos gases y partículas. Las emisiones incluyen óxidos de nitrógeno (NOx) entre 5 y 15 g/km, monóxido de carbono (CO) entre 3 y 7 g/lt de combustible, y dióxido de carbono (CO₂) entre 2 y 5 kg/lt de combustible. Las partículas en suspensión (PM) varían según el tipo de motor: los motores diésel antiguos emiten entre 0.1 y 0.5 g/km de PM, mientras que los motores más recientes con sistemas de filtración generan menos partículas (Instituto Ecuatoriano de Normalización, 2002, p. 6).

Emisión de Ruido en los Proceso de Pavimentación Flexible, Rígido y Articulado

Durante la construcción de pavimentos, los niveles de presión sonora varían entre 65.15 dBA en la elaboración de mezcla de concreto y 89.12 dBA en el corte de concreto. La exposición al ruido también oscila de 71.99 dBA en el pintado hasta 87.88 dBA en el corte de concreto, superando el límite permisible de 85 dBA (Huaquisto & Chambilla, 2021).

Discusión

Archila & Aparicio (2018) se refiere a aspectos ambientales en la etapa de pavimentación en la construcción de vías a todos los insumos que ingresan al sistema en evaluación. Todo lo que se consume o utiliza afecta principalmente la generación de salidas, por lo que es necesario considerar no solo los materiales empleados en el proceso, sino también la demanda de recursos naturales y el uso de maquinaria. (p. 30)

En el mismo contexto Hernández et al. (2001) en su investigación titulada Impacto Ambiental de Proyectos Carreteros efectos por la construcción y conservación de superficies de rodamiento

manifiestan la importancia de conocer las leyes, reglamentos y normas aplicables a los estudios de impacto ambiental, especialmente cuando se reconoce que el deterioro ambiental a menudo se debe a deficiencias en la aplicación de los controles normativos, que son incompletos y, en ocasiones, ineficaces, dadas las condiciones reales del país. (p. 47)

De la misma manera empresas como SIKI (2024) comprometida con la protección ambiental y cumplimiento de normativas legales ha emitido el artículo Pavimentos Soluciones Sostenibles más valor, menor impacto, donde observa la importancia de la implementación de ACV ya que propone el Análisis de Ciclo de Vida como un método estandarizado que permite evaluar y comparar las entradas, salidas y posibles impactos ambientales de productos y servicios a lo largo de su ciclo de vida. Cada vez más, los ACV son reconocidos como la mejor herramienta para evaluar la sostenibilidad de productos y sistemas. (p. 4)

Para determinar la opción más sostenible en pavimentación, es crucial evaluar los impactos ambientales de cada tipo de pavimento (flexible, rígido y articulado) y su durabilidad. Los procesos de pavimentación generan impactos físicos, biológicos y socioeconómicos que se valoran con una media ponderada, como se detalla en el Capítulo IV, apartado 4.4, de la valoración de impactos.

El pavimento flexible tiene un impacto de -492 y una duración de 15 a 30 años. El pavimento rígido presenta un impacto de -468 y dura entre 30 y 50 años. El pavimento articulado muestra un impacto de -328 y una duración de 20 a 30 años. Este análisis sugiere que los pavimentos articulados ofrecen menores impactos ambientales y una vida útil competitiva.

Este estudio se centra en la Zona 3 del Ecuador y puede servir como referencia para otras áreas, ajustando las evaluaciones a las condiciones locales específicas. Aunque el pavimento flexible y rígido también son viables, se deben implementar estrategias para mitigar sus impactos ambientales

Conclusión

La presente investigación siguiendo los parámetros que se mencionan en las metodologías utilizadas ha obtenido un resultado de impactos ambientales tanto para los pavimentos flexible, rígido y articulado con valores de -492, -468 y -328 respectivamente, con esta información se puede decir que los impactos ambientales que generan dichos pavimentos son relativamente moderados; sin embargo siempre se puede reducir el impacto que se genera al ambiente, por eso se proponen alternativas sostenibles para mejorar este tipo de procesos de construcción en el área de protección ambiental.

El análisis de ciclo de vida de cada tipo de pavimento es fundamental para comprender sus impactos ambientales y tomar decisiones informadas, técnicamente sustentadas sobre la selección y diseño en futuros proyectos de pavimentación.

La colocación de cualquier tipo de pavimento en zonas urbanas en la capa de rodadura en la Zona 3, da como resultado la identificación de variables que se consideran para una mejor medición de impactos y establecer la opción más óptima a ser implementada.

La investigación destaca la importancia de considerar soluciones que minimicen el impacto ambiental de las obras civiles como lo es la pavimentación y las que más relevancia tendrían son la implementación de energías alternativas, programas de reforestación y prácticas de reciclaje que en conjunto van a sumar pequeñas acciones que resulten en que el proceso de pavimentación sea una práctica mucho más amigable con el ambiente.

Referencias bibliográficas

- Agencia Europea de Medio Ambiente. (2020). Normas resistentes al clima para el diseño, la construcción y el mantenimiento de carreteras. <https://climate-adapt.eea.europa.eu/en/metadata/adaptation-options/climate-proofed-standards-for-road-design-construction-and-maintenance>
- Archila, A., & Aparicio, M. (2018). Impactos ambientales derivados del proceso de pavimentación de vías de transporte en Colombia. Universidad Nacional Abierta y a Distancia, 69.
- Arena, A., Correa, E., & DelaRosa, C. (2001). Estudio de las implicancias ambientales relacionadas con la construcción y uso de distintos pavimentos utilizados en calles residenciales de la ciudad de Mendoza. <https://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/79662>
- Bórquez, D., & Ramis, F. (2017). Cálculo Del Consumo De Combustible Y Emisiones De Co2 De Camiones Mineros, Mediante Simulación Discreta Fuel Consumption and Co2 Emissions Measurement of Mining Trucks, Using Discrete Simulation. 151–168. <https://doi.org/10.22320/S07179103/2017.10>
- Centro Universitario Interamericano. (2016). Investigación Correlacional Diseño de Investigación : Diferencias entre explicativo , descriptivo y correlacional. 1–4.
- Eurostat. (2016). Economy Wide Material Flow Accounts. 2016.
- Ferreira, A., Santos, J., & Flintsch, G. (2014). Un modelo de evaluación del ciclo de vida para la gestión de pavimentos: metodología y marco computacional.
- Gobierno de España, Ministerio de Trabajo, M. y S. S. (2010). Base de datos de sustancias tóxicas y peligrosas RISCTOX. <https://risctox.istas.net/index.asp?idpagina=620>
- Gómez, J. (2018). Impacto Ambiental de Pavimentos en Arequipa: Un Estudio de Caso. Revista de Ingeniería y Desarrollo, 27(1), 43-58.
- Gómez, P. (2018). “Análisis De Ciclo De Vida De Los Pavimentos Urbanos En Arequipa Aplicando La Metodología Iso 14040”. 1–94.
- Gómez, P. A. T. (2018). “Análisis De Ciclo De Vida De Los Pavimentos Urbanos En Arequipa Aplicando La Metodología Iso 14040”. 1–94. <http://tesis.ucsm.edu.pe/repositorio/handle/UCSM/8469>

- González, M., et al. (2015). Adaptación Metodológica del Análisis de Ciclo de Vida a Condiciones Locales. *Journal of Sustainable Construction*, 18(3), 204-219.
- Hernández, J., Sánchez, V., Castillo, I., Damián, S., & Téllez, R. (2001). CONSTRUCCION Y CONSERVACION DE SUPERFICIES DE RODAMIENTO : I PAVIMENTOS FLEXIBLES. 163.
- Huaquisto, S., & Chambilla, I. (2021). ESTUDIO DEL RUIDO GENERADO POR LA MAQUINARIA DE CONSTRUCCIÓN EN INFRAESTRUCTURA VIAL URBANA. http://www.scielo.org.bo/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2518-44312021000100007
- Instituto Ecuatoriano de Normalización. (2002). NORMA TECNICA: GESTIÓN AMBIENTAL. AIRE. VEHÍCULOS AUTOMOTORES. LÍMITES PERMITIDOS DE EMISIONES PRODUCIDAS POR FUENTES MÓVILES TERRESTRES DE DIESEL. Primera. 2002.
- León, S., & Segura, P. (2022). RECURSOS NATURALES COMO FACTORES DE RENDIMIENTO EN CERTIFICACIONES ENERGÉTICAS AMBIENTALES PARA VIVIENDAS PREFABRICADAS DE HORMIGÓN.
- Ministerio de Obras Públicas y Transporte. (2013). Clasificación de carreteras.
- MITECO. (2016). Fabricación de cemento (proceso de descarbonatación). 1–8.
- Online Browsing Platform (OBP). (2006). ISO 14040:2006(es) Gestión ambiental — Análisis del ciclo de vida. <https://www.iso.org/obp/ui#iso:std:iso:14040:ed-2:v1:es>
- Online Browsing Platform (OBP. (2006). ISO 14040, 2006. <https://www.iso.org/obp/ui#iso:std:iso:14040:ed-2:v1:es>
- Ruiz, L., et al. (2017). Variabilidad Climática y su Impacto en el Análisis de Ciclo de Vida de Pavimentos. *Environmental Impact Assessment Review*, 62, 124-13
- Secretaría Nacional de Planificación. (2023). Agencia de Coordinación Zonal 3. <https://www.planificacion.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2023/09/AgendaZ3.pdf>
- SIKA. (2024). PAVIMENTOS SOLUCIONES SOSTENIBLES MAS VALOR MENOR IMPACTO. 1–24.
- Universidad de Guanajuato. (2024). Buenas Prácticas Ambientales. <https://www3.ugto.mx/ugsustentable/buenas-practicas-ambientales#:~:text=Son un conjunto de acciones,cotidianas en el medio ambiente.>

Conflicto de intereses:

Los autores declaran que no existe conflicto de interés posible.

Financiamiento:

No existió asistencia financiera de partes externas al presente artículo.

Agradecimiento:

N/A

Nota:

El artículo no es producto de una publicación anterior.