

EVALUACIÓN ECONÓMICA Y AMBIENTAL DEL PAVIMENTO TIPO PLACA-HUELLA PARA SU USO EN CAMINOS RURALES DE BAJO TRÁNSITO EN COSTA RICA

Aarón Monge-Naranjo^{1}; José Pablo Aguiar-Moya²; Alejandra Baldi³*

¹Escuela de Ingeniería Civil, Universidad Fidélitas, Costa Rica, amonge30131@ufide.ac.cr *autor correspondiente

²Director, Escuela de Ingeniería Civil, Universidad Fidélitas, Costa Rica, jaguiar@ufidelitas.ac.cr

³Coordinadora Investigación, Escuela de Ingeniería Civil, Universidad Fidélitas, Costa Rica, abaldi@ufidelitas.ac.cr

RESUMEN

El presente trabajo de investigación hace un acercamiento a la factibilidad de la implementación del pavimento placa-huella en Costa Rica. Este tipo de pavimento se recomienda específicamente para carreteras terciarias, localizadas en zonas rurales, con bajo tránsito vehicular.

Para abordar el tema, se elaboró una evaluación económica y ambiental que considera una comparativa de los pavimentos placa-huella, flexible y rígido. Esta evaluación se aplicó a una zona del país a manera de caso de estudio, la cual corresponde geográficamente al cantón de Tarrazú. El objetivo de la investigación es establecer un criterio técnico para recomendar o descartar el uso del pavimento placa-huella bajo sus consideraciones particulares, de frente a los pavimentos de uso convencional en Costa Rica.

Los resultados señalan que el pavimento flexible es la opción con el menor costo de construcción y el pavimento placa-huella es la alternativa con el menor costo de mantenimiento. Sin embargo, al sumar ambos costos se obtiene que el pavimento más económico para llevar a cabo una inversión es el pavimento placa-huella y el más caro es el pavimento flexible. Por otra parte, la evaluación ambiental indica que el pavimento con menor huella de carbono es el flexible. Al respecto, los insumos de esta investigación pretenden servir como criterio para las agencias administradoras de carreteras y para la comunidad ingenieril durante la elección de la alternativa constructiva más económica y ambientalmente amigable para su aplicación, principalmente, en zonas rurales con condiciones inadecuadas de movilidad vehicular.

PALABRAS CLAVE

Pavimento placa-huella, pavimento flexible, pavimento rígido, evaluación económica, evaluación ambiental.

INTRODUCCIÓN

En Costa Rica es ampliamente conocida la problemática existente en torno al estado de los caminos que conforman la Red Vial Nacional y la Red Vial Cantonal,

principalmente esta última. Desde el punto de vista funcional y su nivel de servicio, existen caminos que no cumplen con su cometido de brindar transitabilidad adecuada a los usuarios, ya sea porque nunca se han intervenido o por un mal mantenimiento rutinario o periódico (LanammeUCR, 2021).

Actualmente, en el país se utilizan los pavimentos del tipo flexible y rígido, únicamente. Una alternativa adicional a estos dos tipos de pavimento lo constituye el pavimento placa-huella, del cual no se registra su uso en Costa Rica, sin embargo, en otros países, como Colombia, se tiene referencia de investigación, uso y guías para su construcción (Jiménez Soto y Borrero Londoño, 2021).

El uso de pavimento placa-huella para el tratamiento de superficies de rueda está recomendado para caminos rurales, de bajo tránsito vehicular y rasantes con pendientes longitudinales altas (Orobio y Orobio, 2016; Caro-Cumbe, 2023). No obstante, tampoco se descarta su uso en zonas con topografías planas. Además, su implementación resulta útil en caminos alejados de plantas de asfalto y de concreto, donde los acarreos son cuantiosos y encarecen la construcción de pavimentos que utilizan estos materiales.

La Placa-huella es un sistema de pavimentación en el cual se pavimentan únicamente las huellas por donde circulan las ruedas de los vehículos. La separación entre las franjas de concreto se rellena con piedra pegada, un material con las características de concreto ciclópeo, rocas distribuidas adecuadamente y pegadas con concreto (Contreras y Muñoz, 2015). Dependiendo del ancho de la vía, se construyen cunetas y bordillos en concreto para proveer a la vía de un sistema de drenaje superficial. Si se requiere la separación entre la parte exterior de cada placa-huella y la cuneta, se rellena también con piedra pegada (Orobio y Orobio, 2016).

En vista de que la placa-huella es, como se indicó previamente, un tipo de pavimento inexistente en Costa Rica, esta investigación busca establecer un criterio técnico para recomendar o descartar su uso, mediante un análisis económico y ambiental, en comparación con dos de los tipos de superficie de rodamiento tradicionales, como lo son el pavimento flexible y el pavimento rígido.

Para ello, primeramente, se pretende demostrar cuál de los tres pavimentos resulta más conveniente utilizar en la zona de estudio mediante una evaluación económica. Seguidamente, se determinará un indicador de huella de carbono para cada tipo de pavimento, con el objetivo de estimar el impacto ambiental de cada uno de ellos, en la etapa de construcción. El completar ambos análisis, económico y ambiental, permite la generación de un instrumento para toma de decisiones por parte de entes competentes en Costa Rica.

METODOLOGÍA

Definición de la muestra para el estudio

El estudio se desarrolló mediante un caso hipotético de estudio, definido en el

cantón de Tarrazú, en Costa Rica. La zona de Tarrazú es rural, de bajo tránsito vehicular y con una rasante cuya pendiente longitudinal es elevada (Monge, 2024).

Estimación del costo de construcción y mantenimiento para cada pavimento

Primeramente, se identificaron las actividades constructivas y los precios unitarios necesarios para la construcción y mantenimiento de los pavimentos placa-huella, flexible y rígido. En el caso de los pavimentos flexible y rígido, se obtuvieron los datos mediante consulta al Sistema Integrado de Compras Públicas (SICOP) de Costa Rica. El SICOP es una plataforma digital de acceso público fundamental para gestionar de forma transparente los procesos de adquisición pública. Por lo tanto, los datos consultados están actualizados y corresponden directamente a la realidad del país.

Los datos consultados corresponden a contratos de construcción y mantenimiento del Consejo Nacional de Vialidad (CONAVI) y de la Municipalidad de Tarrazú, los cuales permiten definir adecuadamente las actividades requeridas por ambos tipos de pavimento. Por otro lado, para el pavimento placa-huella, al ser un método constructivo que no se aplica en Costa Rica, se recurre a la Guía de Diseño de Pavimentos con Placa-huella de Colombia (Instituto Nacional de Vías, Ministerio de Transporte, 2015) con la finalidad de identificar sus actividades constructivas y de mantenimiento.

Una vez identificados los requerimientos, se determinan los costos de construcción de los tres tipos de pavimentos a evaluar mediante una búsqueda de precios unitarios en el SICOP. Para ello, se ubica en el sistema un sitio que reúna las características necesarias para elaborar esta investigación y donde coincidentemente se encuentre en una zona donde haya proyectos similares. Es importante aclarar que el pavimento placa-huella como tal no existe en el país, por lo que en el SICOP no se encuentra un proceso de contratación con este tipo de pavimento. Sin embargo, las actividades constructivas requeridas por dicho pavimento sí se pueden identificar y asignar los costos a cada línea necesaria para la construcción del pavimento tipo placa-huella.

Para el cálculo se consideran los siguientes materiales y dimensiones: para el pavimento flexible, una carpeta asfáltica de 0,07 m, una base granular de 0,15 m, una subbase granular de 0,15 m; para el pavimento rígido, una losa de concreto hidráulico de 0,15 m y una base estabilizada BE-25 de 0,15 m; para el pavimento placa-huella, se considera una sección transversal con concreto hidráulico, acero de refuerzo y una sub-base granular.

Adicional a lo anterior, el tramo hipotético de evaluación de los tres pavimentos un derecho de vía con un ancho de cinco metros, el tramo tiene una longitud de un kilómetro, consta de un carril con un ancho de 3,60 m. Se presupuesta una cuneta de 0,70 metros a cada lado de los pavimentos flexible y rígido. Por su parte, el pavimento placa-huella está conceptualizado con cunetas en sus extremos que drenan agua pluvial y a su vez confinan la estructura de sus elementos internos.

Es relevante mencionar que las dimensiones, espesores y características descritas corresponden a una estructura típica de un pavimento flexible en Costa Rica. En el caso de los otros dos tipos de pavimentos, se diseñaron de manera que sus características fuesen equivalentes al flexible.

Para el presupuesto del costo de mantenimiento se elabora un cronograma con las actividades estimadas de intervención a lo largo de 20 años de estudio. Los tres pavimentos tienen actividades de mantenimiento anuales, consistentes en limpieza de cunetas y chapea del derecho de vía. Los pavimentos flexible y rígido tienen adicionalmente mantenimientos cada cuatro años. El pavimento flexible contempla ruteo y sellado de grietas y sello de niebla asfáltica, ambos mantenimientos cada cuatro años. Se incluye un sellado de juntas y grietas cada cuatro años para el pavimento rígido. No se considera mantenimientos adicionales para el pavimento placa-huella, debido a la falta de evidencia y estudios que soliciten realizarlos. Debido a que es una alternativa relativamente nueva, la mayor parte de la información consultada se refiere a etapas de construcción y sus materiales. Adicionalmente, se espera que sea una estructura más duradera.

Estimación del impacto ambiental de cada pavimento

El impacto ambiental se estima en este estudio a partir de la cuantificación de la huella de carbono. La huella de carbono es un indicador ambiental asociada a la cantidad de gases de efecto invernadero emitidos a la atmósfera debido a una actividad productiva (Samaniego y Schneider, 2010).

En la actualidad, existen múltiples metodologías para la estimación de la huella de carbono de actividades específicas. Por ejemplo, el Protocolo de Gases de Efecto Invernadero (GHG Protocol) proporciona directrices para contabilizar y gestionar las emisiones (Bhatia y Ranganathan, 2004), la especificación británica PAS 2050 se utiliza para la cuantificación de emisiones de productos agrícolas (BSI, 2011). Por otro lado, la serie de normativas ISO 14060 está diseñado para abordar aspectos específicos relacionados con la gestión ambiental (ISO, 2006), siendo la norma ISO 14064 la que detalla el procedimiento de estimación de la huella de carbono de actividades o productos.

En este estudio el cálculo de la huella de carbono se realiza mediante la metodología denominada HueCO₂ (Tecniberia, 2014). Esta metodología es desarrollada por Tecniberia y auspiciada por el Gobierno de España, el Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente de este mismo país y por la Fundación Biodiversidad, también de España. La elección de la metodología HueCO₂ se debe a que está orientada a la construcción de carreteras y su ejecución está recomendada para la etapa de diseño, lo cual es coherente con el objetivo de la investigación.

Se cuantifica la huella relacionada con la etapa de construcción para cada tipo de

pavimento en estudio. Por lo tanto, los materiales y dimensiones incluidos en el cálculo corresponden a los mismos utilizados para la estimación de los costos. La estimación contempla la producción de materiales y la construcción de los pavimentos evaluados, sin embargo, no contempla acarreos de materiales al sitio de construcción y tampoco la etapa de operación de la obra vial.

Para la estimación se requiere el detalle de los materiales y combustible para la etapa a considerar, además del factor de emisión correspondiente a cada actividad constructiva. Las unidades de los factores de emisión deben ser congruentes con la actividad asociada, en este caso kg de CO₂ equivalente por la unidad de la actividad constructiva analizada (1 tramo de 1 km de longitud y un carril de ancho). El valor de la huella de carbono es la sumatoria de los kilogramos de CO₂ equivalente emitidos por cada actividad considerada.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Costo de construcción y mantenimiento de los pavimentos analizados

El detalle de las actividades y el costo asociado para la construcción del pavimento flexible se muestra en la Tabla 1. De acuerdo con la estimación realizada, el costo más elevado para la elaboración de 1 km de pavimento asfáltico de 1 carril de ancho corresponde a la mezcla asfáltica y las cunetas. Esto es esperado debido al alto costo que representan ambos componentes.

Tabla 1. Costo de construcción del pavimento flexible*

Ítem	Descripción	Cantidad	Unidad	Costo Unitario	Sub Total
1	Excavación de la vía	1 532,40	m ³	¢5 565,62	¢8 528 756,09
2	Sub-base granular	692,70	m ³	¢25 298,34	¢17 524 160,12
3	Base granular	587,70	m ³	¢26 220,98	¢15 410 069,95
4	Riego de imprimación	3 600,00	l	¢471,92	¢1 698 912,00
5	Material de secado	274,32	m ³	¢31 853,07	¢8 737 934,16
6	Mezcla asfáltica en caliente	630,00	ton	¢86 936,11	¢54 769 749,30
7	Cunetas revestidas	1 544,00	m ²	¢48 092,19	¢74 254 341,36
TOTAL					¢180 923 922,97

*corresponde a un tramo hipotético de 1km de longitud, 1 carril de ancho. Costos basados en Sistema Integrado de Compras Públicas (SICOP) de Costa Rica.

Los resultados obtenidos para el pavimento rígido se muestran en la Tabla 2, donde se observa que, similar al pavimento flexible, los componentes que requieren concreto hidráulico presentan los costos más elevados de toda la estructura. En tercer lugar, se muestra la colocación de base estabilizada BE-25 que, al requerir concreto, se eleva su costo.

Tabla 2. Costo de construcción del pavimento rígido*

Ítem	Descripción	Cantidad	Unidad	Costo Unitario	Sub Total
1	Excavación de la vía	1 080,00	m ³	¢5 565,62	¢6 010 869,60
2	Base estabilizada BE-25	667,70	m ³	¢46 813,06	¢31 257 080,16
3	Material de secado	182,88	m ³	¢31 853,07	¢5 825 289,44
4	Losa de concreto hidráulico con refuerzo	540,00	m ³	¢149 308,31	¢80 626 487,40
5	Cunetas revestidas	1 544,00	m ²	¢48 092,19	¢74 254 341,36

TOTAL	₡197 974 067,96
--------------	------------------------

*corresponde a un tramo hipotético de 1km de longitud, 1 carril de ancho. Costos basados en Sistema Integrado de Compras Públicas (SICOP) de Costa Rica.

Similarmente, se muestran los resultados de la estimación del costo de la construcción y mantenimiento del pavimento placa-huella en la Tabla 3. El costo del concreto que se requiere para la construcción de la placa-huella es el rubro más elevado para este tipo de pavimento, incluso si se compara con los materiales requeridos para los otros tipos se evidencia que el más costoso que la mezcla asfáltica o las losas de concreto. A pesar de ello, el precio de los demás materiales compensa el precio total, haciendo que esta alternativa de construcción se ubique en el segundo lugar entre las tres analizadas.

Tabla 3. Costo de construcción del pavimento placa-huella*

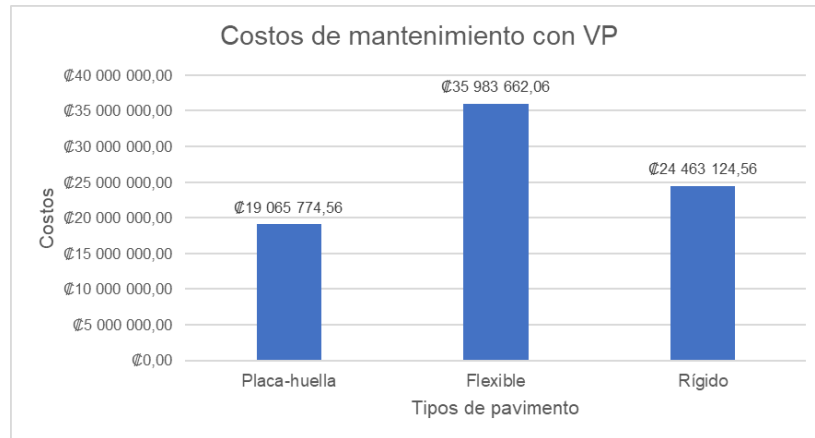
Ítem	Descripción	Cantidad	Unidad	Costo Unitario	Sub Total
1	Conformación de subrasante	3 600,00	m ²	₡356,78	₡1 284 408,00
2	Concreto hidráulico f'c= 210 kg/cm ²	691,50	m ³	₡135 299,14	₡93 559 355,31
3	Acero de refuerzo	38 981,16	kg	₡1 750,02	₡68 217 816,62
4	Piedra pegada (concreto ciclópeo)	252,00	m ³	₡70 293,24	₡17 713 896,48
5	Sub-base granular	578,67	m ³	₡25 298,34	₡14 639 306,08
TOTAL					₡195 414 782,49

*corresponde a un tramo hipotético de 1km de longitud, 1 carril de ancho. Costos basados en Sistema Integrado de Compras Públicas (SICOP) de Costa Rica.

Por otro lado, el mantenimiento del pavimento flexible consta de limpieza de cunetas y chapea del derecho de vía una vez al año, durante un período de 20 años. Además, se incluye dos mantenimientos más cada cuatro años, el primero es un ruteo y sellado de grietas y el segundo es un complemento con un sello de niebla asfáltica. Para el mantenimiento del pavimento rígido, también se contempla las actividades anuales correspondientes a la limpieza de cunetas y chapea del derecho de vía durante los 20 años de evaluación. Se incluye un mantenimiento consistente en un sellado de juntas y grietas cada cuatro años. La Guía de Diseño de Pavimentos con Placa-huella (2015) recomienda un mantenimiento para este pavimento consistente en limpiar los drenajes y chapear la materia vegetal de las orillas del camino. Por tanto, el cálculo del mantenimiento analizado en este trabajo, para el pavimento placa-huella, contempla limpiar las cunetas y chapear las orillas del camino una vez al año, durante los 20 años de servicio.

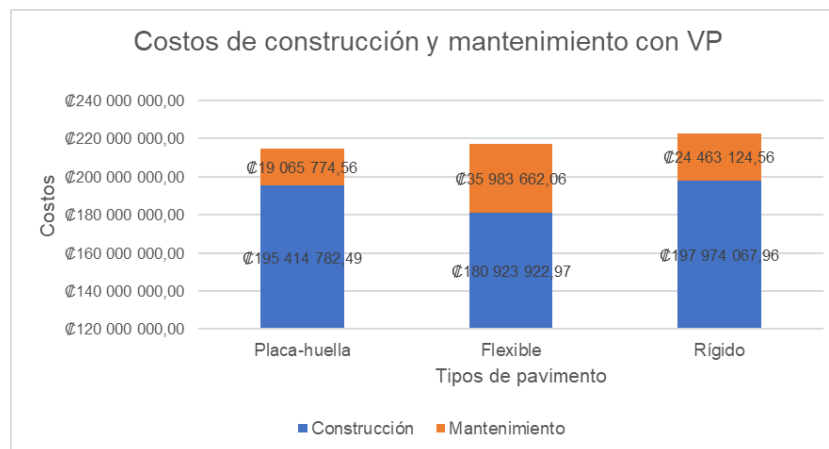
La estimación de los costos del mantenimiento se agrega el valor presente (VP) de los mantenimientos de cada año, aplicándolo por igual para todo el rango analizado de 20 años. La sumatoria de estos valores es denominada como costo anual de operación (CAO). Este costo anual de operación (CAO) más el costo inicial (CI) de la construcción representan el valor presente neto (VPN) de la obra, requerido para cada uno de los tres pavimentos. En el presente estudio se utiliza un valor supuesto para la tasa de interés compuesto de 7%. Los resultados se resumen en la Figura 1.

Figura 1. Costos de mantenimiento con valor presente (VP) para los tres tipos de pavimento a lo largo de un período de 20 años



El pavimento flexible requiere una mayor inversión económica para llevar a cabo el mantenimiento requerido, tomando en consideración el valor presente (VP) de los precios unitarios para las actividades previstas a lo largo de los 20 años de mantenimiento en análisis. El mantenimiento de sello de niebla asfáltica se contempla solamente para el pavimento flexible, incrementa el costo total y, de esta forma, alcanza el valor más alto de los tres pavimentos. El menor costo de mantenimiento lo tiene el pavimento placa-huella. El pavimento placa-huella posee una ventaja en su mantenimiento con respecto a los otros dos pavimentos. Únicamente, contempla limpiar las cunetas y chapear el derecho de vía, mismos mantenimientos se incluyen en los pavimentos flexible y rígido. Los pavimentos flexible y rígido, además de necesitar los mantenimientos arriba indicados, requieren adicionalmente de otros mantenimientos para atacar el leve deterioro previsto. A continuación, se muestra un análisis de los costos de construcción sumados a los costos de mantenimiento (Figura 2). En este caso también se contempla el valor presente (VP) de los precios unitarios de las actividades de mantenimiento, para cada uno de los tres pavimentos en evaluación.

Figura 2. Sumatoria del costo de construcción y de mantenimiento con valor presente (VP) para los tres tipos de pavimento a lo largo de un período de 20 años



La Figura 2 muestra que el pavimento placa-huella es la alternativa con menor costo de inversión requerida para la construcción inicial y el mantenimiento, considerando el valor presente (VP) en los costos unitarios del mantenimiento durante los 20 años de estudio. En este escenario, la opción de pavimento con mayor costo de inversión es la del pavimento rígido (se considera la suma global de los costos de construcción inicial y mantenimiento).

Impacto ambiental: estimación de la huella de carbono

Los resultados de la estimación de la huella de carbono asociada a la construcción del pavimento flexible se muestran en la Tabla 4. De acuerdo con los resultados, las etapas con mayor huella de carbono corresponden a la elaboración de la mezcla asfáltica y de las cunetas revestidas, lo cual se debe a que la extracción de los materiales requeridos para ambas tiene asociada una importante liberación de gases de efecto invernadero por la naturaleza de cada proceso.

Tabla 4. Huella de carbono asociada a la etapa de construcción del pavimento flexible*

Ítem	Descripción	Cantidad	Unidad	Litros	Factor de emisión	Unidad F.E.	Sub Total
1	Excavación de la vía	1 532,40	m ³	1769,85	2,47	kg CO ₂ eq / l	4 373,29
2	Sub-base granular	692,70	m ³		5,92	kg CO ₂ eq / m ³	4 100,78
3	Base granular	587,70	m ³		5,92	kg CO ₂ eq / m ³	3 479,18
4	Riego de imprimación	3 600,00	l		0,20	kg CO ₂ eq / l	733,49
5	Material de secado	274,32	m ³		5,92	kg CO ₂ eq / m ³	1 623,97
6	Mezcla asfáltica en caliente	630,00	ton		80,432	kg CO ₂ eq / ton	50 672,16
7	Cunetas revestidas	161,40	m ³		296,69	kg CO ₂ eq / m ³	47 885,28
TOTAL (kg CO₂ eq)							112 868,16

*corresponde a un tramo hipotético de 1km de longitud, 1 carril de ancho.

La huella de carbono correspondiente a la construcción del pavimento rígido se muestra en la Tabla 5, donde se muestra que la elaboración de la losa de concreto y de las cunetas son los componentes con mayor huella ambiental debido a la naturaleza de la producción de los materiales requeridos para cada componente. La huella de carbono relacionada con las demás etapas está asociada principalmente a la quema de combustibles fósiles por el uso de maquinaria.

Tabla 5. Huella de carbono asociada a la etapa de construcción del pavimento rígido*

Ítem	Descripción	Cantidad	Unidad	Litros	Factor de emisión	Unidad F.E.	Sub Total
1	Excavación de la vía	1 080,00	m ³	1247,35	2,47	kg CO ₂ eq / l	3 082,19
2	Base estabilizada BE-25	667,70	m ³		56,25	kg CO ₂ eq / m ³	37 558,13
3	Material de secado	182,88	m ³		5,92	kg CO ₂ eq / m ³	1 082,65
4	Losa de concreto hidráulico con refuerzo	540,00	m ³		296,69	kg CO ₂ eq / m ³	160 210,98
5	Cunetas revestidas	161,40	m ³		296,69	kg CO ₂ eq / m ³	47 885,28
TOTAL (kg CO₂ eq)							249 819,23

*corresponde a un tramo hipotético de 1km de longitud, 1 carril de ancho.

Finalmente, la huella de carbono de la construcción del pavimento placa-huella se

observa en la Tabla 6. Similar que los pavimentos flexible y rígido, el material con mayores emisiones corresponde al concreto hidráulico requerido, por la naturaleza de su producción.

Tabla 6. Huella de carbono asociada a la etapa de construcción del pavimento placa- huella*

Ítem	Descripción	Cantidad	Unidad	Litros	Factor de emisión	Unidad F.E.	Sub Total
1	Conformación de subrasante	3 600,00	m ²	338,57	2,47	kg CO ₂ eq / l	836,60
2	Concreto hidráulico f'c= 210 kg/cm ²	691,50	m ³		296,69	kg CO ₂ eq / m ³	205 159,06
3	Acero de refuerzo	38 981,16	kg		-	-	-
4	Piedra pegada (concreto ciclópeo)	252,00	m ³		120,17	kg CO ₂ eq / m ³	30 283,34
5	Sub-base granular	578,67	m ³		5,92	kg CO ₂ eq / m ³	3 425,71
TOTAL (kg CO₂ eq)							239 704,72

*corresponde a un tramo hipotético de 1km de longitud, 1 carril de ancho.

Los resultados muestran que el pavimento flexible es el que menos huella de carbono produce en su etapa de construcción. Las actividades constructivas que requieren concreto hidráulico y acero de refuerzo emiten muchos más kilogramos de CO₂ equivalente que la actividad de mezcla asfáltica en caliente. Al ser la mezcla asfáltica en caliente el componente más representativo del pavimento flexible, este pavimento obtiene una calificación ambiental más favorable que los otros dos pavimentos del presente estudio, los cuales utilizan materiales con un alto factor de emisión de gases de efecto invernadero (concreto hidráulico y acero de refuerzo).

Por ende, los resultados arrojados por esta investigación ubican al pavimento placa-huella como la opción a elegir por una administración que tome en cuenta solo aspectos económicos de su presupuesto y que tenga una disposición abierta a utilizar un tipo de pavimento no tradicional. El pavimento placa-huella es la alternativa más económica de construir y mantener, según este estudio. Sin embargo, es necesario resaltar que para este tipo de pavimentos se requiere diseñar adecuadamente el mantenimiento, tanto preventivo como reactivo y para ello se requiere el monitoreo a largo plazo con el objetivo de identificar los procesos de deterioro que se presentan en el tiempo en la estructura y así establecer los mecanismos de intervención adecuados.

Desde el punto de vista ambiental, el pavimento flexible reúne las condiciones requeridas por una administración que demande una construcción amigable con el medio ambiente y que no tenga restricciones en su presupuesto para poder disponer de los recursos económicos destinados al mantenimiento requerido por dicho pavimento a lo largo del tiempo (20 años de análisis). Lo anterior se debe a que el pavimento flexible emite la menor huella de carbono de las tres analizadas en el presente trabajo y su costo de mantenimiento es el mayor de los tres tipos de pavimento estudiados.

CONCLUSIONES

La elección final de un determinado tipo de pavimento para llevar a cabo la

construcción y mantenimiento de una carretera depende de los criterios de selección que utilicen las agencias administradoras de carreteras. La administración puede decantarse por criterios económicos o ambientales, e inclusive por una combinación de ambos. También, la administración puede tener a disposición otros criterios de selección no contemplados en este estudio.

Por ejemplo, a la luz de los resultados arrojados por esta investigación, el pavimento placa-huella representa la opción a elegir por una administración que tome en cuenta solo aspectos económicos de su presupuesto y que tenga una disposición abierta a utilizar un tipo de pavimento no tradicional.

El pavimento flexible reúne las condiciones requeridas por una administración que desee implementar una construcción amigable con el medio ambiente y que no tenga restricciones en su presupuesto para poder disponer de los recursos económicos destinados al mantenimiento requerido por el pavimento a lo largo del tiempo. Lo anterior se debe a que este pavimento emite la menor huella de carbono de las tres analizadas en el presente trabajo y su costo de mantenimiento es el mayor de los tres tipos de pavimento estudiados.

Es importante señalar que esta investigación corresponde a un caso de estudio particular. Para su eventual aplicación a proyectos específicos, debe analizarse en apego a la metodología presentada para verificar los costos de construcción y mantenimiento y el cálculo de la huella de carbono.

REFERENCIAS

- Bhatia, P., y Ranganathan, J. (2004). *The Greenhouse Gas Protocol*. Recuperado de: <https://www.wri.org/research/greenhouse-gas-protocol-0?msclkid=5d7cb593c65f11ecae304b9cf489b954>
- BSI (2011). *Specification for the assessment of the life cycle greenhouse gas emissions of goods and services*. Recuperado de: <http://clearcarbontech.com/data/upload/image/20210815/1629020896125747.pdf>
- Caro Cumbe, H. (2023). *Análisis del estado de la red vial de orden terciario de los municipios de Guamal, Castilla La Nueva y San Martín pertenecientes al departamento del Meta* (Tesis de grado). Universidad Cooperativa de Colombia, Colombia. Recuperadode: <https://repository.ucc.edu.co/entities/publication/199dff9-32c3-4600-960a-7d7c1a11f3df>
- Contreras, F. & Muñoz, J. (2015). *Manual de Diseño y Construcción de Placa Huella*. Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Bogotá, Colombia.
- Instituto Nacional de Vías, Ministerio de Transporte (2015). *Guía de Diseño de Pavimentos con Placa-huella*. República de Colombia.
- ISO (2006). *Gestión ambiental — Análisis del ciclo de vida — Principios y marco de referencia*. Recuperado de:

<https://www.iso.org/obp/ui#iso:std:iso:14040:ed-2:v1:es>

Jiménez Soto, C. J., y Borrero Londoño, E. S. (2021). *Optimización de la guía vigente para el diseño de placa-huella en vías rurales de Colombia* (Tesis de grado). Universidad La Salle, Colombia. Recuperado de: https://ciencia.lasalle.edu.co/ing_civil/934

LanammeUCR (2021). *Informe de evaluación de la red vial nacional pavimentada de Costa Rica años 2020-2021*. Recuperado de: https://www.lanamme.ucr.ac.cr/repositorio/bitstream/handle/50625112500/2270/E_IC-Lanamme-INF-0193-2021?sequence=1&isAllowed=y

Monge-Naranjo, A. (2024). *Evaluación de pavimento tipo placa-huella en caminos rurales de bajo tránsito* (Tesis de grado). Universidad Fidélitas, Costa Rica.

Orobio A. y Orobio J.C. (2016). Pavimentos con placa-huella de concreto simple: Análisis con elementos finitos 3D. *DYNA*, 83(199), 9-18. doi: <http://dx.doi.org/10.15446/dyna.v83n199.55350>

Samaniego, J., & Schneider, H. (2010). *La huella del carbono en la producción, distribución y consumo de bienes y servicios*. Recuperado es: <https://hdl.handle.net/11362/3753>

Tecniberia (2014). *hueCO2 Huella de carbono de la construcción de obras públicas*. Recuperado de: <https://hueco2.tecniberia.es>