

COMPARATIVO DE LA MEDICIÓN DE LA HUELLA DE CARBONO DEL PROCESO CONSTRUCTIVO DEL CONCRETO ESTAMPADO FRENTE A LOS ADOQUINES PREFABRICADOS EN EL ESPACIO PÚBLICO DE LA AVENIDA CARRERA 68 EN LA CIUDAD DE BOGOTÁ

Karen Julieth Fontecha Zarate
Lenny Viviana Monsalve Guzmán

¹ <https://orcid.org/0009-0008-7419-6559>, Universidad Libre, Bogotá, Colombia, karenj-fontechaz@unilibre.edu.co

² <https://orcid.org/0009-0004-1614-064>, Universidad Libre, Bogotá, Colombia, lennyv-monsalveg@unilibre.edu.co

Fecha de recepción: 09/06/2023

Fecha de aceptación del artículo: 10/06/2023

Resumen

La Huella de Carbono se define como la cantidad y volumen de emisión de gases de efecto invernadero (GEI) emitidos a la atmosfera que puedan llegar a ser relevantes en el cambio climático. Para el sector de la construcción se estima que la emisión de Dióxido de Carbono (CO₂) es proporcional a la cantidad generada. Esto hace necesario la búsqueda de nuevas alternativas que logren controlar y disminuir los GEI emitidos. Es por esto, que el presente trabajo busca realizar la comparación de la medición de Huella de Carbono del concreto estampado frente a los adoquines prefabricados en los procesos constructivos del espacio público en un tramo del corredor de la avenida carrera 68 de la ciudad de Bogotá, durante un periodo de medición de 12 meses iniciando en el mes de enero del año 2022. Esta comparación se realizó bajo la metodología GHG Protocol el cual establece el inventario de las emisiones para diferentes sectores productivos teniendo en cuenta las emisiones de GEI directas por fuentes fijas, combustión de fuentes móviles, generación de electricidad y otras emisiones indirectas como la extracción y producción de materiales. Una vez analizados los dos resultados de la medición de la huella de carbono se pudo concluir que el concreto estampado genera menos emisiones de GEI con un total de tCO₂e/año de 319,97, frente a los adoquines prefabricados con un total de tCO₂e/año de 334,67. Es importante resaltar que el aporte de la huella de carbono fue principalmente por la cantidad y volumen de los materiales usados para cada proceso constructivo.

Palabras claves: Adoquín, Concreto Estampado, Construcción, Emisiones, Huella de Carbono.

Abstract

The Carbon Footprint is defined as the amount and volume of greenhouse gas (GHG) emissions emitted into the atmosphere that may become relevant in climate change. For the construction sector, it is estimated that the emission of Carbon Dioxide (CO₂) is proportional to the quantity produced. This makes it necessary to search for new alternatives that achieve and reduce the published GHG. For this reason, the present work seeks to compare the measurement of the Carbon Footprint of stamped concrete against precast paving stones in the construction processes of public space in a section of the corridor of Carrera 68 avenue in the city of Bogotá, during a measurement period of 12 months starting in January 2022. This comparison was made under the GHG Protocol

methodology, which establishes the inventory of emissions for different productive sectors taking into account the sources of direct GHG emissions by fixed, combustion from mobile sources, electricity generation and other indirect emissions such as the extraction and production of materials. Once the two results of the carbon footprint measurement were analyzed, it was possible to conclude that stamped concrete generates fewer GHG emissions with a total of tCO₂e/year of 319.97, compared to precast pavers with a total of tCO₂e/year of 334.67. It is important to highlight that the contribution of the carbon footprint was mainly due to the quantity and volume of the materials used for each construction process.

Keywords: Cobblestone, Stamped Concrete, Construction, Emissions, Carbon Footprint.

I. INTRODUCCIÓN

La Huella de Carbono se define como la cantidad y volumen de emisión de gases de efecto invernadero (GEI) que son emitidos a la atmósfera que pueden llegar a ser relevantes para los procesos del cambio climático, al mismo tiempo es el indicador más eficiente para conocer a fondo la dinámica y comportamiento de estos, permitiendo analizar el impacto generado por el ser humano[1]. Estas emisiones se dan a raíz del desarrollo de actividades de producción de bienes y servicios los cuales se clasifican en dos grupos: el primero en emisiones que se dan de forma directa y el segundo hace referencia a las emisiones de forma indirecta[2].

La Huella de Carbono se mide en masa de Dióxido de Carbono (CO₂) siendo este el más relevante entre todos los gases de efecto invernadero (GEI), esto se debe al tamaño de sus partículas las cuales tienen menor capacidad para capturar los rayos infrarrojos. Por ende, es el mayor contribuyente al calentamiento global y el que más tiempo permanece en la atmósfera con una duración de hasta 200 años. La mayor preocupación es el calentamiento global donde se proyecta un aumento de 4 °C de la temperatura a nivel mundial para los siguientes dos siglos[3].

De acuerdo con las Proyecciones establecidas por más de 100 científicos expertos de la NOAA (Oficina Nacional de Administración Oceánica y atmosférica) la concentración de Dióxido de

Carbono (CO₂) en la atmósfera es de 424 partes por millón (ppm) para junio de 2023. Si el incremento de estas emisiones sigue aumentando existe un 50 % que se supere el calentamiento global de 1,5 °C en nueve años [4].

En el último informe del Panel Intergubernamental de expertos sobre Cambio Climático (IPCC) del año 2022 se confirmó que para encaminarse a limitar el calentamiento global a 1.5°C, se deben establecer medidas contundentes para reducir las emisiones globales anuales de gases de efecto invernadero (GEI) en un 45 % para el año 2030 y así lograr una reducción del 100 % para el año 2050 [5].

El IPCC también considera que una de las principales causas del cambio climático es producido por el desarrollo de actividades del ser humano como la quema de combustibles fósiles, utilización de fertilizantes, ganadería etc., se ven reflejados mediante la acumulación de estas en la atmósfera lo que genera una variación de las temperaturas a nivel mundial a lo largo de los años[6].

Desde el punto de vista del sector de la construcción, este consume casi el 50% de los recursos naturales, 40% del consumo energético, 12% del consumo de agua potable y produce un 38 % referente a periodos anuales de las emisiones globales de gases de efecto invernadero. Siendo uno de los sectores con mayor contaminación de la atmósfera mediante la aportación de emisiones de

Dióxido de Carbono (CO₂) durante sus fases de construcción, uso y demolición [7]. Otra línea de la construcción para tener en cuenta es el transporte de los materiales el cual aporta de 6-8% de las emisiones totales de gases de efecto invernadero en las obras [8].

En la fabricación del cemento el 100 % de las emisiones Dióxido de Carbono (CO₂) generadas se divide en dos, el 60% se da por el proceso de des carbonatación de la caliza para producir el Clinker, y el otro 40% se da por el proceso de combustión [9]. Teniendo en cuenta que el cemento Portland, es el principal componente del hormigón y su alta demanda en la fabricación de concretos es importante resaltar que su emisión es proporcional a la cantidad de material de construcción generado [10]. El uso del hormigón implica el consumo de 1.6 billones de toneladas de cemento y cada tonelada utilizada emite aproximadamente 1 tonelada de Dióxido de carbono (CO₂) a la atmosfera [11].

En el sector de la construcción, el hormigón es uno de los materiales más importantes y consumidos para el desarrollo de la infraestructura a nivel mundial y se considera como un material ecológico en comparación con otros materiales de construcción como el acero y el vidrio. sin embargo, el alto consumo de este material ha generado otra serie de problemas como la alta emisión Dióxido de Carbono (CO₂) y de recursos naturales [12]. Por lo tanto, es importante aplicar medidas que logren reducir el impacto generado por la producción de cemento y hormigón, minimizando el volumen de materiales requeridos generando una viabilidad de un uso más limpio y amigable con el medio ambiente.

Desde un punto de vista internacional se viene combatiendo constantemente el calentamiento global y sus consecuencias mediante acuerdos entre países los cuales buscan establecer soluciones a esta problemática como el acuerdo de París y el

protocolo de Kyoto; como verdaderos retos para los diferentes sectores industriales los cuales juegan un papel importante en el cumplimiento de la lucha contra el cambio climático a nivel mundial[13].

Desde el punto de vista de la normatividad ambiental colombiana y la inclusión del desarrollo sostenible se hace necesario evaluar nuevas técnicas de construcción que sean más ecológicas y que logren contribuir a las metas establecidas de temas de reducción de gases efecto invernadero (GEI); logrando generar estrategias mediante la medición de la huella de carbono donde se establezca nuevas alternativas de implementación como el concreto estampado. Colombia cuenta con la *"Ley 1931 del 27 de julio del año 2018, la cual tiene como objeto establecer las directrices para la gestión del cambio climático en las decisiones de las personas públicas y privadas, la concurrencia de la Nación, Departamentos, Municipios, Distritos, Áreas Metropolitanas y Autoridades Ambientales principalmente en las acciones de adaptación al cambio climático, así como en mitigación de gases efecto invernadero, con el objetivo de reducir la vulnerabilidad de la población y de los ecosistemas del país frente a los efectos del mismo y promover la transición hacia una economía competitiva, sustentable y un desarrollo bajo en carbono"* [14].

Otra referencia normativa es la ley 2169 de diciembre de 2021, Por medio de la cual se impulsa el desarrollo bajo en carbono del país mediante el establecimiento de metas y medidas mínimas en materia de carbono neutralidad en la equivalencia a cero entre las emisiones y absorciones antropogénicas de Gases Efecto Invernadero – GEI y Resiliencia climática Capacidad de los sistemas sociales, económicos y ambientales de afrontar un suceso, tendencia o perturbación peligrosa, producto del cambio climático, respondiendo o reorganizándose de modo que mantengan su función esencial, su identidad y su estructura,

conservando al mismo tiempo la capacidad de adaptación, aprendizaje, transformación y desarrollo[15].

Para el año 2010 Colombia generó el 0,46% de las emisiones de gases efecto invernadero (GEI) a nivel mundial, si continuamos con el ritmo acelerado de creciente se proyecta que para el año 2030 este porcentaje aumentara a un 0,69% [10], bajo el reto establecido con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) a nivel mundial somos uno de los países que trazó la meta más alta a nivel América Latina, en el compromiso de reducir en un 20% las emisiones de Gases de Efecto Invernadero, si Colombia cumpliera con esta meta estaría cerca de mantener el mismo nivel de emisiones actuales per cápita de 4.8 Ton de CO₂ eq/Hab [16].

Es por esto, que los bonos de carbono se convierten en una iniciativa para la mitigación y compensación de las emisiones generadas en el país, los cuales deben ser validados y verificados bajos estándares específicos o en el marco de programas de certificación, donde cada crédito de carbono representa una tonelada de CO₂ equivalente o reducida o removida de la atmósfera [17].

Sin embargo, las grandes ciudades como Bogotá capital de Colombia ubicada en el centro del país, con una población de 7'743.955 habitantes para el año 2020 y con una participación del 25,5% del PIB del país, por su condición de urbanismo y gran demanda comercial e industrial, padece de mala calidad del aire. Por lo tanto, se debe buscar la disminución de GEI, con el fin de evitar riesgos de muerte y vidas saludables para la población[18].

Es por esto, que el objetivo de este trabajo es comparar la medición de GEI (Huella de Carbono) del proceso constructivo en la instalación de adoquines prefabricados frente a la implementación de concreto estampado, en la generación de espacio público, en el

tramo de la Av. Carrera 68 desde la Autopista Norte hasta la novena A, de la ciudad de Bogotá, con un área total de 47.635 metros cuadrados.

Esta comparación nace a partir estrategias que aporten a las proyecciones estimadas en cambio climático a partir de los compromisos adquiridos por el país ante las comisiones internacionales. Teniendo en cuenta la que actualmente el Instituto de Desarrollo Urbano (IDU), solo cuenta con la instalación de adoquines prefabricados a lo largo de los años y el proceso de concreto estampado para espacio público aún no está categorizado dentro de las primeras opciones de los procesos constructivos sostenibles.

Teniendo en cuenta lo anterior, a continuación, se describen los procesos constructivos a tener en cuenta, para el presente artículo:

- **Adoquines Prefabricados**

Para la fabricación de adoquines y concreto uno de los materiales principales es el cemento, hechos con conglomerantes hidráulicos compuestos de materiales artificiales y minerales finamente molidos con agua, formando pastas las cuales se fraguan y se endurecen a causa de las reacciones de hidrólisis e hidratación[19]. El cemento Portland es el ingrediente principal del hormigón, el concreto se forma cuando el cemento forma una pasta con agua que se une a la arena y la roca con el fin de endurecer[20].

Existen diferentes tipos de adoquines, los cuales son utilizados para pavimentar áreas urbanas hechos de piedra y hormigón.[21] Los adoquines prefabricados en concreto de alta resistencia son utilizados en las obras civiles de urbanizaciones, espacios públicos y andenes de tránsito peatonal por su diseño articulado, básicamente para vías de bajo flujo vehicular[22].

Hoy en día son los adoquines de color, los cuales se dan por la agregación de pigmentos inorgánicos directamente al concreto para una mayor durabilidad en el tiempo, la gama de colores va desde el verde, rojo, amarillo, blanco, terracota, arena y colores intermedios [23].

- **Pavimentos**

Un pavimento se compone por una capa de recubrimiento con mayor rigidez en sus capas inferiores con tensiones y deformaciones[24]. Los pavimentos se dividen en dos categorías flexibles y rígidos, un rígido se caracteriza por la consistencia de la superficie los cuales producen una buena resistencia y distribución de las cargas, está formado por la losa de hormigón hidráulico y subbase. El pavimento flexible al tener menos rigidez se deforma más y se generan mayores tensiones estas están formadas por capas asfálticas, base y subbase, sobre la capa subrasante[25].

- **Concreto estampado**

Los pavimentos estampados son materiales prefabricados de concreto, los cuales se instalan sobre una superficie con características de acabados, resistencia, durabilidad y vida útil [26]. Otra característica son los pisos texturizados los cuales se instalan de forma situ, con colorantes y estampados mediante moldes con diseños y fácil aplicabilidad a un bajo costo de mantenimiento [27].

Estos son usados en las vías las cuales permiten la circulación de vehículos en uno o dos sentidos de circulación [28]. Un factor importante de estos, son el porcentaje de agregados los cuales se encuentran dentro de un rango de estabilidad del 65% al 85% para su durabilidad y estabilidad. Estos se dividen en tres grupos [29]:

- Agregado o árido: es el conjunto de materiales con composición mineral de forma natural o artificial.

- Agregado grueso o grava: son materiales retenidos en el tamiz con un tamaño entre 7.6 cm y 4.76 mm.

- Agregado fino o arena: es el material que pasa por una malla y es retenido con tamaños entre 4.76 mm y 0.074 mm[29].

- **Obras Viales en Espacios Públicos**

El espacio público es uno de los grandes pilares en la ciudad de Bogotá, por el cual se mide la calidad de la ciudad y de vida de las personas, donde se tiene en cuenta que el mantenimiento sea constante y eficiente[30]. Por lo tanto, se hace necesario evitar algún tipo de sobrecosto en las actividades de mantenimiento las cuales deben ser analizadas para que se ejecuten en los tiempos determinados[31].

Para la construcción y diseño de obras en el espacio público en Bogotá se debe tener en cuenta que esta de contribuir a la mejora en la calidad ambiental ayudando a mitigar los efectos de isla de calor y a su vez disminuir la ocurrencia de posibles inundaciones y prevenir la emisión de gases de efecto invernadero[32].

Es importante empezar a pensar en nuevas alternativas y tecnologías para aplicar en los pavimentos para proyectos de infraestructura vial. Una alternativa para tener en cuenta es el concreto ecológico permeable, el cual está compuesto por agua, grava, cemento y arena con un aditivo que potencializa su unión, una vez este se pega forma una especie de hueco que sirve para filtrar el agua[33].

2. METODOLOGIA

2.1 Ubicación del proyecto

Para el análisis de comparación de la Huella de Carbono en los procesos constructivos del concreto estampado frente a los adoquines, se analizó el espacio público de un tramo en el corredor de la avenida carrera 68 de la ciudad de Bogotá, desde la carrera 48 hasta la carrera 9, con una longitud de 2,23 Km, durante un periodo de medición de 12 meses iniciando en el mes de enero del año 2022.

2.2 Metodologías establecidas para la medición de huella de carbono

Para la comparación de la Huella de Carbono se realizó una revisión bibliográfica de artículos científicos, trabajos de grado, trabajos de investigación y revistas científicas para el análisis de la Huella de Carbono para el sector de la construcción y el impacto generado sobre el ambiente; en las cuales se identificaron distintas metodologías para la cuantificación de las emisiones mencionadas a continuación:

1. Metodología de evaluación del ciclo de vida: consiste en medir y reportar las emisiones de GEI para producir estrategias significativas y rentables [34].
2. Metodología basada en procesos: evaluación sistemática que utiliza entradas (por ejemplo, materiales y energía) y salidas (por ejemplo, emisiones y desechos) para cada proceso de un producto[34].
3. Metodología de análisis de entrada y salida (IOA): A medida que el límite del sistema se amplía, el análisis de LCA para cada proceso se vuelve más complejo y laborioso. El enfoque del Análisis de Entrada-Salida (IOA) se desarrolló para cuantificar las emisiones directas e indirectas[34].

4. Metodología GHG Protocol: medición de emisiones de GEI directas e indirectas.

Teniendo en cuenta lo anterior, se eligió para el caso estudio la metodología GHG Protocol descrita a continuación.

Cuantificación de emisiones de GEI con el método GHG Protocol

Para la cuantificación de emisiones se utilizó la herramienta de CAEM basada en el "Estándar Corporativo de Contabilidad y Reporte" del GHG Protocol, el cual satisface los requisitos de la Norma ISO 14064-1:2006; distintas corporaciones como La Corporación Ambiental Empresarial (CAEM), la Corporación Autónoma Regional (CAR) y la Cámara de Comercio de Bogotá (CCB), implementaron un protocolo para el cálculo de la Huella de Carbono para diferentes sectores productivos[35].

Este protocolo establece el inventario de las emisiones para diferentes sectores como empresas y organizaciones en sus operaciones internas mediante una serie de herramientas para su cálculo para actividades como[36]:

- Combustión fija y móvil, procesos, cemento y residuos sólidos.
- Medición directa de emisiones de GEI mediante el monitoreo de concentración y flujo.
- Balances de masas específicos para cada proceso.
- Aplicación de factores de emisión documentados.

Posteriormente se definieron los dos procesos constructivos:

- **Fuente de emisión 1:** Concreto estampado
 - Concreto hidráulico MR40
 - Subbase granular-SBG clase C-15 cm
 - Mejoramiento de material (grava)

- Geotextil
- **Fuente de emisión 2:** Adoquín
 - Adoquín
 - Subbase granular-SBG clase C-15 cm
 - Mejoramiento de material (grava)
 - Geotextil
 - Capa de soporte (arena)

Una vez definido esto se determinaron las entradas y salidas tales como:

- Generación de GEI a partir de las Fuentes fijas y móviles, emisiones de proceso y consumos energéticos para los dos procesos constructivos.
- Se incluyó el consumo de combustibles para cada proceso constructivo en un periodo de tiempo de un año.

Posteriormente, se incluyó en cada fuente de emisión (Concreto estampado y Adoquín) los alcances de la metodología de CAEM, descritos a continuación:

Alcance 1. Se refiere a las emisiones de GEI directas por fuentes fijas y combustión en fuentes móviles.

Alcance 2. Se refiere a las emisiones indirectas debido a la generación de electricidad consumida y comprada.

Alcance 3. Otras emisiones indirectas como la extracción y producción de materiales [35]

Adicionalmente, se agregaron los factores de emisión de los materiales que no se encontraron en la herramienta CAEM, por lo cual, a continuación, en la tabla No. 1 se describen los materiales que se tomaron como referencia para el cálculo de los dos procesos constructivos, con su respectivo factor de emisión:

Tabla 1. Factores de emisión de los materiales del proceso constructivo

FUENTE	FACTOR DE EMISIÓN	UNIDAD	REFERENCIAS
Concreto Hidráulico	212	KgCo2/m3	[37]
Subbase granular	10	kgCo2/ton	[38]
Mejoramiento de Material	10	kgCo2/ton	[38]
Geotextil	16000	kgCo2/ton	[38]
Adoquín	248	KgCo2/m3	[38]
Adoquín de Concreto	248	KgCo2/m3	[38]
Arena	0.03	KgCo2/m3	[39]

Finalmente, con esta información se diligenció la herramienta de CAEM y se calculó de la huella de carbono para cada proceso constructivo, obteniendo los resultados del inventario de GEI.

3. RESULTADOS

A continuación, se muestran los resultados del cálculo de la Huella de Carbono obtenidos a partir de los alcances establecidos.

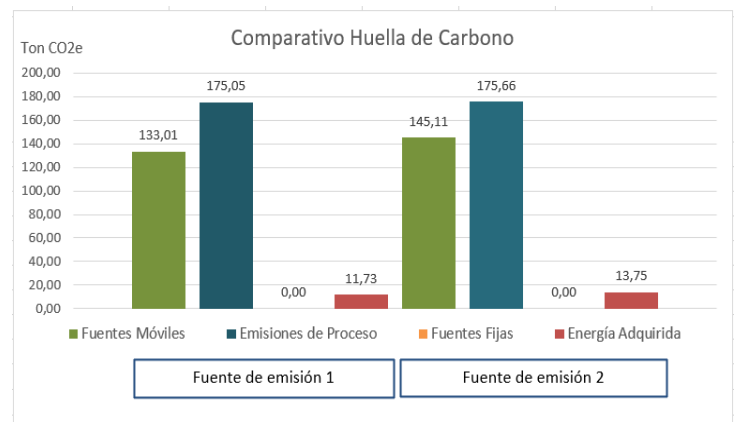


Fig. 1 Comparativo de la medición de la Huella de Carbono de los procesos constructivos

El cálculo total de la Huella de Carbono de la fuente de emisión 1 (Concreto estampado) arrojó un valor total de 319,97 (tCO₂e/año), en comparación la fuente de emisión 2 (Adoquín) el cual arrojó un valor total de 334,67 (tCO₂e/año). Ver figura 1. Donde se evidencia que las emisiones del proceso constructivo de

la fuente de emisión 2 son mayores lo que equivale al 51% del total de las emisiones. Ver anexo 1.

Si bien el proceso constructivo con concreto estampado genera menos emisiones de GEI que con el Adoquín, esta diferencia no es tan significativa (2%), sin embargo, frente a la duración y resistencia del material, el concreto estampado es más favorable.

Es importante mencionar que el concreto estampado está constituido por una losa de concreto hidráulico, sostenido de una capa de material seleccionado o subbase, en donde se infiere que, si se puede suprimir una de las capas incluso en los dos procesos constructivos, ambos disminuirían los valores de emisiones de GEI. Esto coincide con investigaciones actuales, donde mencionan que las emisiones influyen principalmente con el volumen y la cantidad de los materiales usado [8].

En Colombia aún falta implementar nuevas técnicas de construcción de pavimentos sostenibles que cuenten con criterios para su elección, con el fin de reducir el costo ambiental en cada uno de los procesos, esto va ligado a la elección de materiales que puedan llegar a tener un gran impacto sobre el ambiente [40].

4. RECOMENDACIONES

- Desarrollar más investigaciones y mediciones de huella de carbono en cada uno de los materiales con los que están hechos los adoquines y el concreto y verificar las ventajas que tiene el uso de concreto estampado en remplazo de los adoquines, no solo desde el punto de vista ambiental sino también en el análisis de costos de mantenimiento, durabilidad y final de la vida útil.
- Es importante tener en cuenta la inclusión de otros tipos de materiales (reciclados,

grano de caucho) y procesos constructivos en la medición de la huella de carbono [41], ya que los valores de las emisiones de concreto estampado analizadas en este trabajo, si bien fueron más bajas, no fueron tan representativas. Y así lograr determinar la contribución en los procesos de sostenibilidad del sistema de pavimento a nivel nacional e implementación de nuevos proyectos más amigables con el ambiente. [42].

- En Colombia, la regulación para el desarrollo de proyectos sostenibles contempla algunas medidas y políticas, como por ejemplo la Resolución 1257 de 2021 del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, que establece la gestión, aprovechamiento y disposición final de los Residuos de Construcción y demolición RCD's [43]. Y la Resolución 1447 del 01 de agosto de 2018, la cual establece que se puede optar por pagos o compensaciones similares para las reducciones de emisiones y remociones del GEI. Es por esto por lo que es primordial que se revise dentro de los proyectos constructivos, la inclusión de los bonos de carbono como medida de mitigación y compensatoria de los GEI generados [44].

5. BIBLIOGRAFIA

- [1] H. Schneider y J. Samaniego, «La huella del carbono en la producción, distribución y consumo de bienes y servicios».
- [2] J. Bautista, Y. Sierra, y J. F. Bermeo, «Greenhouse Gas Emissions in Higher Education Institutions», *Produccion y Limpia*, vol. 17, n.º 1, pp. 169-186, ene. 2022, doi: 10.22507/PML.V17N1A10.
- [3] Paula Badilla Arroyo José Andrés Elizondo Santiago Tatiana Fernández Martínez Marcela Quesada Yamasaki Jorge Eduardo Méndez Trejos Fabricio Mora Solano, «Cálculo Factor de Emisión para

- Materiales de la Industria de la Construcción», *Universidad de Costa Rica*, 2015.
- [4] Comunicaciones AOML, «Los niveles de dióxido de carbono en la atmósfera siguen aumentando », 14 de noviembre de 2022.
- [5] IPCC, « Informes especiales del IPCC más recientes», 2022.
- [6] A. de la Torre, Pablo. Fajnzylber, y J. Nash, *Low carbon, high growth: Latin American responses to climate change: an overview*. World Bank, 2009.
- [7] L. Rodríguez-Potes, K. Villadiego-Bernal, S. E. Padilla-Llano, y H. Osorio-Chávez, «Arquitectura y urbanismo sostenible en Colombia. », 2004.
- [8] H. Aceves-Gutierrez, O. López-Chávez, S. M. Mercado-Ibarra, y J. L. Arevalo-Razo, «Huella de carbono de una pavimentación con la metodología del ACV y SIMAPRO», *Revista de Energías Renovables*, pp. 8-20, jun. 2020, doi: 10.35429/jre.2020.12.4.8.20.
- [9] European Concrete Paving Association, «Pavimentos de Hormigon: Una Alternativa Inteligente y Sostenible».
- [10] Nicolás Steven Pardo Álvarez, «PardoNicolas_2019_DesarrolloConcreto Activados».
- [11] A. Enshassi, B. Kochendoerfer, y E. Rizq, «An evaluation of environmental impacts of construction projects Evaluación de los impactos medioambientales de los proyectos de construcción», 2014. [En línea]. Disponible en: www.ricuc.cl
- [12] A. Adesina, «Recent advances in the concrete industry to reduce its carbon dioxide emissions», *Environmental Challenges*, vol. 1, dic. 2020, doi: 10.1016/j.envc.2020.100004.
- [13] D. A. De Novaes Gomes, J. D. C. P. T. De Oliveira, y T. S. Mozer, «Quantification of greenhouse gas emissions of a steel factory in Brazil», *Atmosfera*, vol. 36, n.º 1, pp. 155-169, 2023, doi: 10.20937/ATM.52940.
- [14] Congreso de la Republica, «Directrices para la Gestion del Cambio Climatico », 27 de julio de 2018.
- [15] Asociacion Colombiana de Minería, «Ley 2169 de 2021 – Se impulsa el desarrollo bajo en carbono del país», 17 de enero de 2022.
- [16] G. Hernández, «Emissions of greenhouse gases and key sectors in Colombia», *Trimestre Economico*, vol. 88, n.º 350, pp. 523-550, abr. 2021, doi: 10.20430/ETE.V88I350.857.
- [17] Minambiente, «Mercados de Carbono».
- [18] Cideu, «Bogotá».
- [19] M. A. Sanjuán Barbudo y Servando. Chinchón Yepes, *Introducción a la fabricación y normalización del cemento Portland*. Universidad d'Alacant, 2004.
- [20] PCA Americas Cement Manufacturers, «Como se Hace el Cemento».
- [21] J. Manuel, M. Jimenez, D. Suaste Gutiérrez, A. Omar, A. Ruiz, y D. A. Castro González, «Diseño de una Mezcla con Materiales Reciclados para Producción de Adoquines».
- [22] Andres Felipe Navas Baquero y Cristian Camilo Rincon Gomez, «Adoquin Avanzado, un Prototipo de Pavimento Articulado para Vías de Alto Flujo Vehicular», 2020.
- [23] Luis Alfonso Ortiz, «Características y Cualidades de los Adoquines en Concreto».
- [24] Feredico Leon Castaño Martinez, Jorge Mario Herrera Betín, Jose Gómez Sáenz, y Fredy Reyes Lizcano, «Análisis Cualitativo del Flujo de Agua de Infiltración para el Control del Drenaje de una Estructura de Pavimento Flexible en la Ciudad de Bogota D.C.», 2009.
- [25] R. Javier, M. Rebolledo, y P. Contenido, «Deterioros en Pavimentos Flexibles y Rígidoss», 2010.
- [26] Y. Beatríz y H. Cepeda, «Environmental Solution in the Construction of Colombian Road Infrastructure».
- [27] Mónica López de Bomanite, «Pisos de

- Hormigon Estampado», 30 de septiembre de 2008.
- [28] Universidad Nacional de Colombia, «Cartilla guía de diseño de pavimentos con bajos volúmenes de tránsito y vías locales para la ciudad de Bogotá D.C.».
- [29] Libia Gutierrez de Lopez, «El Concreto Y Otros Materiales para la Construcción Universidad Nacional de Colombia Sede Manizales», 2003.
- [30] D. Esteban y R. Martin, «Losetas para espacio público, una nueva tipología para el piso peatonal de Bogotá», 2016.
- [31] L. F. Macea-Mercado, L. Morales, y L. G. Márquez-Díaz, «Un sistema de Gestión de Pavimentos Basado en Nuevas Tecnologías para Países en Vía de Desarrollo», *Ingeniería, Investigación y Tecnología*, vol. 17, n.º 2, pp. 223-236, abr. 2016, doi: 10.1016/j.riit.2016.06.007.
- [32] Secretaria Distrital de Planeación, «Cartilla de Andenes Bogotá D.C.».
- [33] J. Jaczblady y C. González, «Tecnologías Alternativas para Pavimentos Sostenibles en Colombia», 2019.
- [34] José A. García-Ochoa¹ ; Juan C. Quito-Rodríguez² ; Johan A. Perdomo Moreno, «2020_Análisis_huella_carbono», 2020.
- [35] I. L. Avellaneda, P. Asesora, y U. Libre, «Propuesta para la Reducción de la Huella de Carbono en las Instalaciones de la Dirección Regional del Magdalena Centro», 2016.
- [36] Word Resources Intitute, «El Protocolo de Gases de Efecto Invernadero», 1 de marzo de 2004.
- [37] Ledesma Oloriz, Mikel Rodríguez Hernández, y Jorge Valle Álvarez, «Estudio de comparación de procedimientos constructivos de Buenas Prácticas Ambientales en Carreteras».
- [38] Sebastián Vicuña, Carlos Marín, Andrés Pica, y Antonia Rivera, «Simulaciones del precio social del carbono en el sector Infraestructura en países seleccionados de América Latina y el Caribe», 2020.
- [39] Humberto Aceves Gutiérrez, Santa Magdalena Mercado Ibarra, Oscar López Chávez, y José Luis Arévalo Razo, «Procesos de construcción, emisión de dióxido de carbono y resultados socio-económicos durante la pandemia del covid-19 en México».
- [40] Y. Beatríz y H. Cepeda, «Environmental Solution in the Construction of Colombian Road».
- [41] C. Alberto Castro Medina Daniel Felipe Sabogal Meléndez y W. Darío Fernández Gómez, «Sistema de Calificación de Sostenibilidad Ambiental de Pavimentos Rígidos y Flexibles con Inclusión de Materiales Reciclados», 2020.
- [42] Monica Giovana, «Guía para la Medición de la Sostenibilidad de las Prácticas en Materiales y Diseño para Pavimento Rígido», 2016.
- [43] Minambiente, «Resolucion1257 de 2021», 21 de noviembre de 2021.
- [44] «15.-Resolucion-1447-de-2018».

ANEXO 1.

TABLA 2. RESULTADOS DE LA MEDICIÓN

FUENTE DE EMISIÓN	FUENTES	EMISIONES CO ₂ (t CO ₂ e/año)	EMISIONES CH ₄ (t CO ₂ e/año)	EMISIONES N ₂ O (t CO ₂ e/año)	EMISIONES Compuestos Fluorados (t CO ₂ e/año)	EMISIONES SF ₆ (t CO ₂ e/año)	HUELLA CARBONO TOTAL (t CO ₂ e/año)	% DEL TOTAL	INCERTIDUMBRE %
1	Fuentes Móviles	133,01	0,01	0,13	0,00	0,00	133,16	20,34%	+/- 14,72%
	Fuentes Fijas	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00%	+/- 0,00%
	Emisiones de Proceso	175,05	0,00	0,04	0,00	0,00	175,09	26,75%	+/- 13,76%
	Energía Adquirida	11,73	0,00	0,00	0,00	0,00	11,73	1,79%	+/- 0,00%
	SUBTOTAL	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	319,97	49%	+/- 28,49%
2	Fuentes Móviles	145,11	0,01	0,14	0,00	0,00	145,27	22,19%	+/- 13,50%
	Fuentes Fijas	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00%	+/- 0,00%
	Emisiones de Proceso	175,66	0,00	0,00	0,00	0,00	175,66	26,83%	+/- 13,72%
	Energía Adquirida	13,75	0,00	0,00	0,00	0,00	13,75	2,10%	+/- 0,00%
	SUBTOTAL	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	334,67	51%	+/- 27,22%
TOTAL HCC		0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	654,6460	100,00%	+/- 55,71%