



Marco de referencia estandarizado para la evaluación de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) en materiales eléctricos de construcción en proyectos colombianos

Pablo Alonso Mojica Vega

Trabajo de grado de maestría presentado para optar al título de Magíster en Sostenibilidad

Director

Juan Camilo Ortiz Cuervo, Especialista (Esp) en Producción Más Limpia

Universidad Pontificia Bolivariana

Escuela de Ingenierías

Maestría en Sostenibilidad

Medellín, Antioquia, Colombia

2025

El contenido de este documento no ha sido presentado con anterioridad para optar a un título, ya sea en igual forma o con variaciones, en esta o en cualquiera otra universidad.

Dedicatoria

Este trabajo de grado va dedicado principalmente a Dios, mis padres y mi esposa el amor de mi vida, quienes han sido un apoyo fundamental en este camino y muchos más que se han recorrido, con su inagotable y puro amor han sido mi guía, mi ejemplo y fuerza para seguir, agradezco todos los días por tenerlos; son el regalo mas grande y todo lo que hago esta sostenido en ellos.

Agradecimientos

Agradezco profundamente a todas las personas que hicieron posible la realización de este trabajo de grado.

En primer lugar, a Juan Camilo Ortiz Cuervo por su orientación, compromiso y valiosos aportes durante el desarrollo de este proyecto.

A mi esposa y padres, por su apoyo incondicional y paciencia.

A la Universidad Pontificia Bolivariana, por brindarme los conocimientos y el espacio académico para llevar a cabo este trabajo de grado.

Tabla de contenido

Resumen	10
Abstract	11
Introducción	12
Marco de referencia estandarizado para la evaluación de emisiones de GEI en materiales eléctricos.....	26
Enfoque comparativo de políticas en economías emergentes	26
Adopción de experiencias regionales en América Latina	27
Selección de criterios e indicadores de evaluación técnica.....	27
Construcción del marco metodológico.....	28
Instrumento de recolección de datos	29
Fuentes	30
Descripción / Valor	30
Bases de datos	30
Ecoinvent, GaBi o OpenLCA y ELCD.	30
Normas técnicas	30
RETIE, ISO 14040/14044, ISO 14067, GHG Protocol.	30
Fichas técnicas de fabricantes	30
(ej. Nexans, Procables, BTicino, Schneider Electric).	30
Informes de organismos multilaterales	30
(PNUMA, ONUDI) sobre economía circular y gestión de residuos electrónicos.....	30
Premisas metodológicas	31
Criterios de evaluación.....	31
Registro y consolidación de resultados	31
Aplicación del instrumento y recopilación de datos secundarios	31

Limitaciones y supuestos	32
Potencial de Calentamiento Global	34
Fuentes de datos	34
Inventario base por 1 m (variables).....	34
Factores de emisión (EF).....	35
Ecuación de cálculo (GWP100 por 1 m).....	35
Supuestos numéricos (ejemplo representativo):.....	35
Cálculo por término:.....	35
Suma total (GWP1m)	35
Análisis de resultados selección de materiales eléctricos	36
Referencias	41

Lista de tablas

Tabla 1	28
Tabla 2	29
Tabla 3	30
Tabla 4	30
Tabla 5	32
Tabla 6	33
Tabla 7	33
Tabla 8	36

Lista de figuras

Figura 1.	22
Figura 2.	23
Figura 3.	24
Figura 4.	25

Siglas, acrónimos y abreviaturas

GEI	Gases de Efecto Invernadero
WRI.	World Resources Institute
WBCSD	World Business Council for Sustainable Development
UPME.	Unidad de Planeación Minero-Energética
ACV	Análisis del Ciclo de Vida
EPD	Declaraciones Ambientales de Productos
RAEE	Residuos de Equipos Eléctricos y Electrónicos
EEE	Equipos Eléctricos y Electrónicos
EC	Economía Circular

Resumen

Este trabajo propone un marco de referencia estandarizado para evaluar las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) de materiales eléctricos en proyectos de construcción, destacando la circularidad en la gestión de proyectos. Se inicia identificando las prácticas actuales de evaluación de emisiones en el contexto colombiano. Luego, se diseña un marco que integra prácticas globales adaptadas a las necesidades locales. Se establecen conexiones con políticas gubernamentales, normativas del sector en Colombia. Este enfoque busca promover prácticas sostenibles y alinear proyectos de construcción con las demandas ambientales y gubernamentales del país.

Palabras clave: Emisiones, Circularidad, Normativa, Marco de referencia.

Abstract

This paper proposes a standardized framework to evaluate the emissions of electrical materials in construction projects, highlighting circularity in project management. It starts by identifying the current practices of emissions assessment in the Colombian context. Then, a framework is designed that integrates global practices adapted to local needs. Connections are established with government policies and sector regulations in Colombia. This approach seeks to promote sustainable practices and align construction projects with the environmental and governmental demands of the country.

Keywords: Emissions, Circularity, Regulations, Reference framework.

Introducción

En la introducción se menciona claramente el para qué y el porqué del documento, se incluye el planteamiento del problema, el objetivo, preguntas de investigación, la justificación.

Si bien se prefiere la narración en tercera persona (se realizaron las encuestas, se publicaron resultados, se establecieron parámetros, etc.), en Normas APA también se aprueba el uso de primera persona singular para un solo autor (realicé las encuestas) o primera persona plural (o mayestático) para dos o más autores (realizamos las encuestas); en todo caso, consulta con tu asesor el estilo a adoptar en la investigación ¹.

No menos importante es la utilización de conectores que unen elementos de una oración, tener una buena variedad de estos enriquecen la estructura y redacción del texto. Algunos ejemplos:

Sin embargo	En conclusión
Puesto que	En pocas palabras
Por consiguiente	A continuación
Dado que	Acto seguido
Teniendo en cuenta	Con motivo de
Entonces	A saber
Simultáneamente	De la misma forma
Posiblemente	En síntesis
En efecto	Así
Ya que	Para concluir
Ahora bien	Luego
En cambio	Resumiendo
En cuanto a	De igual manera
El siguiente punto es	Al mismo tiempo
Así pues	Probablemente
Recapitulando	

¹ No utilices los pies de página para citas bibliográficas. Los pies de página se utilizan para complementar información del texto, procura que sean fragmentos cortos para no distraer o confundir al lector.

1 Planteamiento del problema

En el contexto colombiano, se observa un interesante panorama con crecimiento económico continuo, el país ha logrado reducir la intensidad de carbono en su economía. Aunque las emisiones totales de CO₂ relacionadas con la energía aumentaron en un 42% desde 2000 hasta 2021, el PIB per cápita experimentó un incremento del 65%. En el año 2021, Colombia emitió aproximadamente 80 millones de toneladas de CO₂ procedentes de actividades del sector energético, principalmente asociadas a la combustión de combustibles fósiles. En este contexto, el transporte se destacó como el principal emisor en el sector energético, seguido de la industria, la generación de energía y los edificios. Sin embargo, cabe destacar que el sector energético no constituye el factor principal impulsor de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI); la agricultura y la deforestación son responsables de alrededor del 60% de las emisiones totales, según el Informe de Política Energética de Colombia (International Energy Agency, 2023)

Dentro del sector de formulación de proyectos para el sector de petróleo y gas (O&G) se debe presentar información sobre las emisiones relacionadas con los sistemas eléctricos de uso final, donde se toman como guía las regulaciones locales. La normativa a nivel local proporciona datos específicos llamados factores de emisión definido en la UPME a través de las resoluciones No. 000382 de 2021, No. 000320 de 2022 y No. 000762 de 2023. (como un valor representativo que intenta relacionar la cantidad de contaminante emitido a la atmósfera con una actividad asociada a la emisión del contaminante (Fecoc, 2016). Estos factores son usualmente expresados como la masa del contaminante dividido por una unidad de peso, volumen, distancia o duración, la UPME muestra esos factores como optativos, el cálculo de emisiones que se presenta con el fin de mostrar impactos positivos en la reducción de gases de efecto invernadero, estos factores relacionados en las resoluciones y metodologías se desarrollan en el marco del Mecanismo de Desarrollo Limpio (MDL) (united nations, 2008).

La necesidad de adoptar un marco de referencia se deriva de la falta de uniformidad y eficacia en la estructuración y evaluación de la información relacionada con las emisiones generadas por materiales eléctricos en proyectos de construcción. La actual carencia de estandarización en la elaboración de informes dificulta la transparencia, la comparabilidad y la

calidad de la información proporcionada. Este problema plantea desafíos significativos en la gestión ambiental, ya que la diversidad en la presentación de datos dificulta la identificación precisa de los impactos ambientales y la implementación de estrategias efectivas para abordarlos. La adopción de un marco estandarizado se presenta como una solución esencial para mejorar la coherencia y la fiabilidad de los informes, permitiendo una evaluación más efectiva y una toma de decisiones informada en relación con las emisiones generadas por los materiales eléctricos en proyectos de construcción.

1.1 Antecedentes

Para el entendimiento del marco de referencia para la evaluación de emisiones en materiales eléctricos de construcción en proyectos colombianos, se hace necesario la comprensión de conceptos clave relacionados con la generación de Gases de efecto invernadero, estándares de cálculo, normas y métodos.

En primer lugar, es importante comprender los gases de efecto invernadero. Son aquellos componentes gaseosos de la atmósfera, de origen natural o antropogénico, que absorben y emiten la energía solar reflejada por la superficie de la tierra, la atmósfera y las nubes. Los principales gases de efecto invernadero son el dióxido de carbono (CO₂), el óxido nitroso (N₂O), el metano (CH₄) los hidrofluorocarbonos (HFC), los perfluorocarbonos (PFC), el trifluoruro de nitrógeno (NF₃) y el Hexafluoruro de Azufre (SF₆). (UPME, 2023). Estos gases pueden ser cualificados mediante estándares como Greenhouse Gas Protocol (GHG Protocol).

El GHG Protocol, Desarrollado por el World Resources Institute (WRI) y el World Business Council for Sustainable Development (WBCSD), es un protocolo proporciona estándares y herramientas para medir y gestionar las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), incluyendo las relacionadas con materiales eléctricos en construcción. Según el GHG Protocol, las emisiones de GEI se clasifican en tres alcances: Alcance 1 (emisiones directas de fuentes que son propiedad o están controladas por la organización), Alcance 2 (emisiones indirectas asociadas a la generación de electricidad adquirida) y Alcance 3 (otras emisiones indirectas, como las que resultan del ciclo de vida de productos o servicios utilizados). Esta clasificación es relevante para la evaluación de materiales eléctricos de construcción, ya que muchos de estos materiales generan

emisiones principalmente en el Alcance 3, lo que implica retos metodológicos para su estimación. En el contexto colombiano tenemos herramientas para medir, un ejemplo es el Factor de Emisión el cual es un valor representativo que intenta relacionar la cantidad de contaminante emitido a la atmósfera con una actividad asociada a la emisión del contaminante. Estos factores suelen expresarse como la masa del contaminante dividido por una unidad de peso, volumen, distancia o duración (UPME, 2023).

La integración de información se hace en un Marco de Referencia Estandarizado siendo conjunto de normas, principios y pautas claras y consistentes utilizadas para guiar la evaluación, medición y análisis de ciertos aspectos o variables dentro de un determinado campo o área de estudio. Su propósito principal es establecer un punto de referencia común y confiable que permita la comparación, la coherencia y la replicabilidad de los resultados obtenidos.

Se tiene en cuentas normativas como la ISO 14025 - Declaraciones ambientales de productos (EPD) establece los principios y requisitos para la elaboración de declaraciones ambientales de productos, que incluyen información sobre las emisiones de GEI y otros impactos ambientales asociados con los materiales eléctricos utilizados en la construcción. Por otro lado, la norma ISO 14044 - Análisis del ciclo de vida (ACV) proporciona directrices detalladas para llevar a cabo un análisis del ciclo de vida de productos y procesos, lo que incluye la evaluación de emisiones durante la fase de producción, uso y disposición de materiales eléctricos en proyectos de construcción.

Además, la Unión Europea ha desarrollado métodos de huella ambiental ((Green Forum / European Commission, 2024) para evaluar el impacto ambiental de productos a lo largo de su ciclo de vida, incluyendo la evaluación de emisiones de GEI de materiales eléctricos.

2 Justificación

En el contexto actual, la gestión sostenible de proyectos de construcción se ha convertido en un imperativo tanto para la preservación del medio ambiente como para el desarrollo empresarial responsable. La adopción de un marco de referencia estandarizado para evaluar las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) de materiales eléctricos se presenta como una iniciativa estratégica que no solo aborda las deficiencias actuales en la estandarización de informes, sino que

también aporta beneficios a las empresas de construcción, firmas de ingeniería y consultoras de ingeniería.

El marco de referencia se trata de un conjunto de pautas, criterios y estándares estandarizados que se utilizan para evaluar las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) de materiales eléctricos en proyectos de construcción, proporcionando coherencia y fiabilidad a los informes sobre emisiones de materiales eléctricos, abordando así las deficiencias actuales en la estandarización de informes en este ámbito. Mediante un marco de referencia sólido y uniforme, se proporciona coherencia y fiabilidad a los informes sobre emisiones de materiales eléctricos en proyectos de construcción. La estandarización es el camino para la aplicación de prácticas sostenibles y la adopción de principios de economía circular en la industria.

EL marco de referencia aportará beneficios concretos a las empresas de construcción, firmas de ingeniería y consultoras de ingeniería. Al adoptar un enfoque más coherente y fiable para evaluar las emisiones de materiales eléctricos, se facilitará la integración de prácticas circulares en la gestión de proyectos. Esto, a su vez, permitirá una gestión más efectiva de los recursos, una reducción significativa en el impacto ambiental asociado y una mejora en la eficiencia general de los proyectos, Este marco se centrará en una selección representativa de materiales eléctricos de mayor uso en proyectos colombianos, como conductores eléctricos (cables), interruptores y tableros eléctricos. Esta delimitación busca facilitar el aseguramiento y recopilación de datos, se ha optado por restringir el análisis a una muestra manejable de materiales eléctricos y a los alcances 1 y 2 del GHG Protocol. Esta delimitación permitirá un estudio riguroso y factible.

Los beneficios específicos para las empresas de construcción incluyen la optimización de procesos, una mayor eficiencia en el uso de recursos y la mejora de la reputación empresarial al adoptar prácticas más sostenibles. Las firmas de ingeniería se beneficiarán al contar con datos más confiables y coherentes para informar sobre las emisiones de materiales eléctricos, lo que respaldará la toma de decisiones informada y la implementación de soluciones más efectivas. Además, las consultoras de ingeniería verán una mejora en la calidad de los servicios ofrecidos, lo que podría traducirse en una ventaja competitiva y un fortalecimiento de la relación con sus clientes.

3 Objetivos

3.1 Objetivo general

Proponer un marco de referencia estandarizado que permita la evaluación de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) producto de materiales eléctricos de construcción, basado en prácticas globales adaptadas al contexto local y en sintonía con las políticas y normativas del sector.

3.2 Objetivos específicos

- Identificar las prácticas actuales de evaluación de emisiones de GEI de materiales eléctricos en proyectos de construcción en el contexto colombiano.
- Diseñar un marco de referencia estandarizado que integre prácticas identificadas a nivel global y se adapte a las necesidades específicas del contexto colombiano.
- Establecer conexiones entre el marco de referencia y las políticas gubernamentales, normativas y tendencias del sector en Colombia.

5 Marco teórico

La urgencia de descarbonizar el sistema energético de la Unión Europea (UE) se ha convertido en un tema central para alcanzar los objetivos climáticos delineados en el Pacto Verde Europeo para 2030 y 2050. En este contexto, el plan REPowerEU emerge como una iniciativa clave, destacando la energía fotovoltaica (PV) como un componente fundamental en la transición hacia fuentes más sostenibles. La necesidad crítica de que los nuevos módulos fotovoltaicos instalados en la UE sean tanto económicamente competitivos como ambientalmente sostenibles se presenta como un imperativo en este panorama en constante evolución. Hasta la fecha, la UE ha experimentado un aumento significativo en la capacidad de generación de energía solar PV, alcanzando aproximadamente 136 GW para fines de 2020, con un incremento notable de más de 18 GW solo en ese año. Este crecimiento ha contribuido significativamente, representando alrededor del 5% de la generación total de electricidad en la UE. No obstante, el plan REPowerEU proyecta metas aún más ambiciosas, proponiendo la instalación de más de 320 GW de energía solar PV para 2025 y casi 600 GW para 2030. Estas metas subrayan la necesidad inminente de una transformación a gran escala en la producción y consumo de energía en la región. A pesar de que la energía solar PV se considera una tecnología verde o de bajo carbono, es esencial reconocer que la fabricación de estos sistemas es un proceso intensivo en energía y con impactos evidentes en el uso del suelo, debido al espacio considerable requerido para la instalación de paneles solares. La sostenibilidad de la energía solar no se limita únicamente a la producción de energía verde; es crucial tener en cuenta criterios ambientales en todas las etapas del ciclo de vida, desde la obtención de materias primas hasta la disposición final (Polverini et al., 2023).

En este contexto, el momento actual se presenta como una oportunidad crucial para reflexionar y dirigir la producción de energía hacia una tecnología con prácticas verdaderamente sostenibles. La reducción de la huella de carbono del sector de PV requiere una identificación, cuantificación y evaluación exhaustivas de los flujos de materiales y energía asociados con la producción y desecho de sistemas de energía solar. Este análisis a fondo es esencial para asegurar que la expansión de la capacidad de generación de energía solar PV no solo contribuya a los objetivos climáticos, sino que también cumpla con estándares rigurosos de sostenibilidad ambiental y económica, esto es aplicable a todos los sectores asociados con la energía (Polverini et al., 2023).

Por otro lado, las prácticas de gestión de residuos de equipos eléctricos y electrónicos (RAEE) se posicionan en diversas regiones en conjunto con las estrategias adoptadas por distintos países. Se destaca un aumento en la generación de RAEE, especialmente en equipos de tecnologías de la información y telecomunicaciones, con una presencia notable en regiones menos desarrolladas (Ongondo et al., 2011).

En cuanto a las estrategias adoptadas, se observa la falta de regulaciones específicas en muchos países, excepto en Europa. En naciones en desarrollo, prevalece la reparación y reutilización en sectores de reciclaje informales, y persisten preocupaciones sobre el vertido de RAEE tanto en economías avanzadas como en las que están en desarrollo. Cuatro áreas prioritarias comunes en la gestión global de RAEE incluyen agotamiento de recursos, preocupaciones éticas, problemas de salud y ambientales, y estrategias de devolución de RAEE. Se destaca la necesidad de obtener información precisa y actualizada sobre la generación de RAEE en todo el mundo. La urgencia de abordar la gestión de RAEE a nivel mundial se destaca, resaltando la importancia de regulaciones efectivas, prácticas sostenibles y la conciencia de las implicaciones éticas, ambientales y de salud asociadas con estos residuos electrónicos (Ongondo et al., 2011).

Los equipos eléctricos y electrónicos desechados (RAEE) han adquirido relevancia como una corriente de residuos importante debido a su potencial de reciclaje y sus efectos negativos en los aspectos sociales, económicos y ambientales. Actualmente, la evaluación de los sistemas de gestión de WEEE se centra en partes específicas de su ciclo de vida (principalmente en opciones de reciclaje), proporcionando información sobre impactos ambientales y/o beneficios económicos. Por lo tanto, se hace necesaria una metodología que aborde todo el ciclo de vida de WEEE y los tres pilares del desarrollo sostenible (ambiental, económico, social) (Gavrilescu et al., 2021).

La metodología denominada SUSTWEEE, está exclusivamente dedicada a la corriente de WEEE y consta de cuatro niveles, con indicadores que abordan información de fondo, generación de WEEE, rendimiento técnico de WEEE y sostenibilidad. Los aspectos de rendimiento técnico y sostenibilidad se evalúan en siete categorías principales de indicadores, tanto cuantitativos como cualitativos, evaluados según 44 criterios. Todos los indicadores pasaron por una asignación de puntaje y un paso de normalización donde se asignó un porcentaje, puntaje cualitativo y códigos de color, lo que resultó en una matriz de evaluación de WEEE. En la etapa de validación, la

metodología se probó con éxito a nivel nacional para evaluar la sostenibilidad del sistema de gestión de WEEE en Rumanía en el año de referencia 2014. Los resultados obtenidos en este caso muestran un rendimiento bastante mixto, con indicadores en situaciones extremas. Los principales puntos críticos fueron las tasas de recolección muy bajas y la inexistente tasa de reutilización, al menos en datos oficiales, mientras que los demás indicadores indicaron al menos rendimientos medianos. Los mejores rendimientos se encuentran en el área de WEEE recolectado que se somete a un tratamiento adecuado, la existencia de instalaciones de WEEE en Rumanía capaces de realizar el tratamiento, la alta tasa de reciclaje y el indicador general de rendimiento ambiental (Gavrilescu et al., 2021).

La transición hacia una economía circular (EC) destaca la importancia de los modelos de negocios de economía circular (CBMs, por sus siglas en inglés) como elementos clave. A pesar de la creciente atención y la investigación sobre las barreras y facilitadores para la implementación de estos modelos, la evidencia empírica disponible sigue siendo limitada, especialmente en evaluaciones específicas del sector de equipos eléctricos y electrónicos (EEE por sus siglas en inglés, Electric and Electronic Equipment) (Rizos & Bryhn, 2022).

El sector de EEE se destaca por su gran potencial sin explotar en la implementación de prácticas circulares. La búsqueda de enfoques mediante el método de muestreo de bola de nieve, representando la muestra más grande utilizada hasta la fecha para examinar enfoques de EC en el sector de EEE. Los hallazgos revelan que, a pesar de la presencia de varios instrumentos políticos para impulsar la transición a la EC en este sector, existen brechas que requieren atención. Estas incluyen la falta de reglas de transparencia en las cadenas de suministro, la débil aplicación de las normativas de residuos de la UE, el uso limitado de criterios circulares en licitaciones públicas y la ausencia de estándares de EC (Rizos & Bryhn, 2022).

Además, los requisitos inconsistentes de diferentes dominios políticos pueden representar desafíos para las empresas que adoptan prácticas de EC. Entre las acciones sugeridas para facilitar las prácticas de EC se encuentran plataformas de intercambio de conocimientos y asociaciones empresariales, subvenciones para proyectos de I+D, etiquetas de EC para productos, incentivos financieros y campañas de sensibilización. La implementación efectiva de la EC en el sector de EEE requiere abordar estas lagunas mediante políticas específicas y acciones orientadas a mejorar

la transparencia, fortalecer la aplicación de normativas y fomentar la adopción de prácticas circulares (Rizos & Bryhn, 2022).

Para una revisión sistemática de la literatura que explora la intersección entre la Economía Circular (EC) y la cadena de suministro de Equipos Eléctricos y Electrónicos (EEE), centrándose en facilitadores, palancas y sus posibles beneficios ambientales, económicos y sociales. Se debe desarrollar un marco original que categoriza estos elementos, proporcionando una guía estructurada para la comprensión y evaluación de la implementación de la EC en el contexto de la cadena de suministro de EEE (Bressanelli et al., 2021).

Este enfoque metodológico proporciona una visión comprensiva de las investigaciones existentes en el área, permitiendo no solo identificar patrones y tendencias sino también desarrollar un marco conceptual sólido. Una revisión así destaca la necesidad de futuras investigaciones que aborden específicamente la función habilitadora de la digitalización, estrategias de diseño centradas en la reducción, modelos de negocios basados en servicios orientados a resultados, colaboración en la cadena de suministro y la evaluación de beneficios sociales y económicos para los usuarios. La metodología utilizada sienta las bases para avanzar en el conocimiento y orientar futuras investigaciones y políticas en la implementación de la EC en la cadena de suministro de EEE.

Finalmente, se evidencia la dificultad de medir la circularidad en procesos y organizaciones debido a la falta de métodos homogéneos y definiciones consistentes. Un ejemplo es la introducción de la norma técnica UNI/TS 11820:2022, estandarizando 71 indicadores para medir la circularidad y permitir evaluaciones replicables y comparativas. La investigación aplica esta norma en una organización de fabricación de equipos eléctricos, evaluando su eficacia y señalando posibles mejoras. Se destaca la utilidad a nivel micro, pero la complejidad entre organizaciones, subrayando la necesidad de esfuerzos conjuntos para su aplicación. A pesar de intentar proporcionar herramientas armonizadas, se identifican áreas de mejora, sugiriendo más promoción educativa en economía circular. Es importante contextualizar estos aspectos en la importancia de medir con precisión para avanzar hacia una economía circular (Amicarelli et al., 2023).

6 Metodología

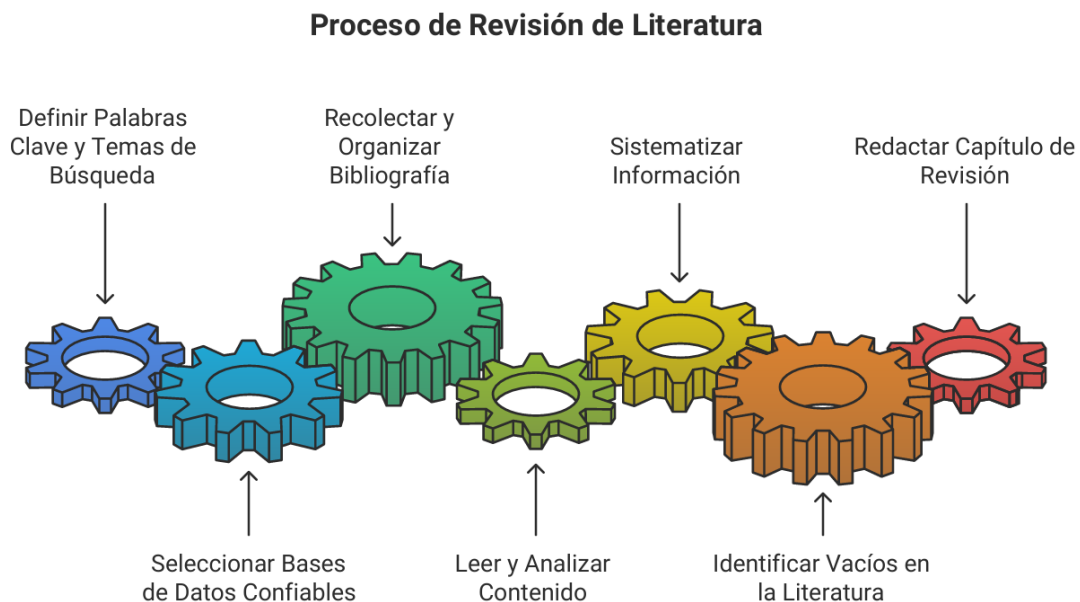
La metodología adoptada para este proyecto se estructura en cuatro fases principales, cada una alineada con los objetivos específicos del estudio. El enfoque general es mixto con predominancia cualitativa, permitiendo la integración de análisis normativo, técnico y contextual, para proponer un marco de referencia estandarizado que permita la evaluación de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) asociadas con materiales eléctricos de construcción, dentro del contexto colombiano.

1. Revisión de Literatura:

- Realizar una revisión exhaustiva de estudios previos sobre emisiones de GEI asociadas con materiales eléctricos en construcción, así como prácticas de gestión de RAEE a nivel global. (Bressanelli et al., 2020; Pan et al., 2022)
- Identificar y analizar normativas y estándares internacionales relevantes, como el GHG Protocol, ISO 14025 y 14044, y métodos de evaluación de huella ambiental de la Unión Europea.

Figura 1.

Fases Revisión de Literatura. Fuente: El autor.



2. Análisis del Contexto Colombiano:

- Consultar las regulaciones locales específicas sobre emisiones de GEI y gestión de RAEE, incluyendo los factores de emisión definidos en resoluciones como la No. 000382 de 2021, No. 000320 de 2022 y No. 000762 de 2023.(UPME, 2023)
- Analizar la situación actual de la gestión de RAEE en Colombia, incluyendo prácticas de reciclaje y disposición, y cómo se integran con las políticas de sostenibilidad.

Figura 2.

Fases Análisis del Contexto Colombiano Fuente: El autor.



3. Desarrollo del Marco de Referencia:

- Utilizar como referencias normativas como ISO 14025 y 14044 para desarrollar un marco de referencia estandarizado para la evaluación de emisiones de GEI y la gestión de RAEE en proyectos de construcción en Colombia.
- Mostrar indicadores aplicables para evaluar la sostenibilidad de los materiales eléctricos utilizados en la construcción, incluyendo emisiones directas e indirectas de GEI.
- La evaluación se enfocará en los Alcances 1 y 2, dado que estos presentan mayor disponibilidad de factores de emisión confiables. Aunque se reconocerá la importancia de las emisiones del Alcance 3, su inclusión dependerá de la disponibilidad de datos pertinentes y se considerará en una fase exploratoria o como recomendación para trabajos futuros.

Es importante aclarar que el análisis se realiza bajo un enfoque cuna a puerta, que cubre las emisiones directas e indirectas asociadas a los procesos de producción de los materiales, correspondientes a los Alcances 1 y 2 del fabricante. Sin embargo, desde la perspectiva de la empresa constructora o del proyecto, estas emisiones forman parte de su Alcance 3, es decir, de sus emisiones indirectas asociadas a la cadena de valor. Esta precisión técnica es clave, ya que demuestra que el marco propuesto no solo cuantifica impactos en el nivel del fabricante, sino que también genera información útil y transferible al usuario final (constructor), facilitando el cálculo de sus propias emisiones indirectas.

Figura 3.

Fases Desarrollo del Marco de Referencia Fuente: El autor.

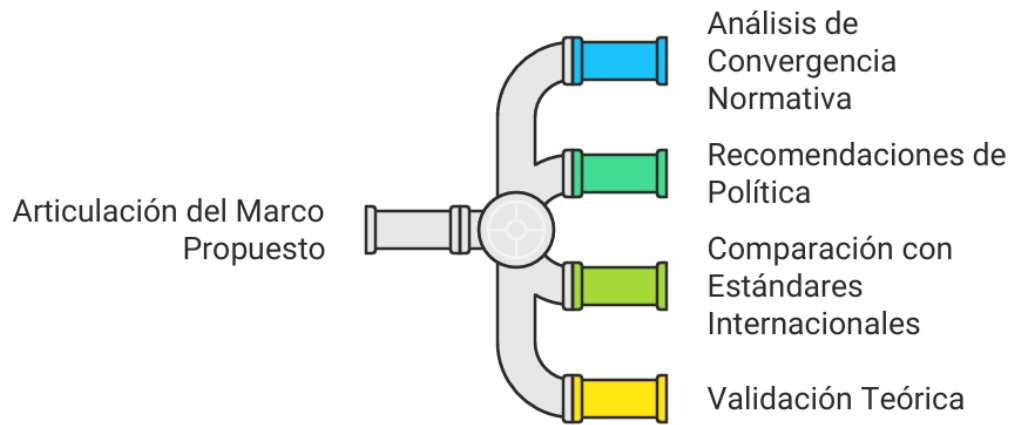


4. Conexión con Políticas Gubernamentales:

- Analizar cómo el marco de referencia propuesto se alinea con las políticas gubernamentales colombianas relacionadas con la sostenibilidad y la gestión de residuos electrónicos.
- Identificar áreas de mejora y recomendaciones para fortalecer la integración entre el marco de referencia y las regulaciones existentes.
- Evaluar las emisiones de GEI a lo largo de todas las etapas del ciclo de vida, desde la extracción de materias primas hasta la disposición final.(Baldé et al., n.d.)
- Validar los resultados obtenidos mediante la comparación con estándares internacionales y buenas prácticas globales.(Baldé et al., n.d.)

Figura 4.

Articulación del Marco Propuesto Fuente: El autor.



7 Resultados

Este capítulo expone los principales hallazgos obtenidos tras la aplicación del instrumento metodológico diseñado para la evaluación de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) en materiales eléctricos. A partir del procesamiento de la información recopilada mediante fichas técnicas, se construyó una matriz de evaluación comparativa que permitió estimar y contrastar el potencial de calentamiento global (GWP) de diferentes insumos representativos en el sector de la construcción. Los resultados presentados a continuación permiten no solo identificar los materiales con mayor carga ambiental, sino también evidenciar las oportunidades de mejora en la toma de decisiones técnicas en proyectos eléctricos, bajo un enfoque de sostenibilidad y economía circular. Este análisis constituye la base para la formulación de lineamientos dentro del marco de referencia estandarizado propuesto en este documento.

Marco de referencia estandarizado para la evaluación de emisiones de GEI en materiales eléctricos

El diseño del marco de referencia se fundamenta en un enfoque metodológico híbrido que combina elementos normativos, técnicos y de contexto. Para ello, se integran tres ejes clave:

- (i) Revisión de políticas públicas y experiencias internacionales.
- (ii) Principios de economía circular y gestión de residuos eléctricos.
- (iii) Criterios técnicos e indicadores de evaluación de sostenibilidad ambiental.

*Adaptados al caso de materiales eléctricos utilizados en el sector construcción en Colombia.

Enfoque comparativo de políticas en economías emergentes

Como punto de partida, se revisaron enfoques regulatorios aplicados en economías emergentes con características socioeconómicas y estructurales similares a las de Colombia, tal como se expone en el estudio de (Borthakur, 2020). Esta revisión permitió identificar barreras comunes como la informalidad en la gestión de residuos eléctricos y la falta de infraestructura para el reciclaje formal. Se destacan estrategias efectivas como la Responsabilidad Extendida del Productor (REP), aplicadas en países como China e India, que promueven el seguimiento del producto desde su diseño hasta su disposición final. Este componente se incorpora al marco propuesto como base para establecer mecanismos de trazabilidad en el uso de materiales eléctricos.

Adopción de experiencias regionales en América Latina

A partir del análisis de la experiencia brasileña documentada por Xavier et al. (2021), se identificaron elementos aplicables al contexto colombiano, especialmente en relación con la implementación de sistemas de logística inversa obligatoria para productos eléctricos. El modelo brasileño se basa en acuerdos sectoriales, donde los distintos actores —productores, distribuidores, recicladores y autoridades— comparten responsabilidades ambientales. Esta estructura sirvió de base para definir las relaciones institucionales y roles de los agentes que participarían en un futuro esquema de evaluación estandarizado en Colombia.

La pertinencia de adoptar este enfoque se alinea con los compromisos nacionales establecidos en el CONPES 4075 de 2022 (CONPES & DNP, n.d.), que define la Política Nacional de Transición Energética. Este documento promueve el uso eficiente de los recursos, la incorporación de principios de economía circular y el fortalecimiento de herramientas regulatorias que permitan avanzar hacia una infraestructura eléctrica más sostenible.

Asimismo, la Ley 1931 de 2018 (Congreso de Colombia, n.d.), que establece directrices para la gestión del cambio climático, otorga fundamento legal a la integración de instrumentos de mitigación basados en análisis de ciclo de vida y trazabilidad ambiental.

De manera complementaria, el Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas (RETIE) proporciona las bases técnicas para el diseño, instalación y uso seguro de los materiales eléctricos en Colombia, promoviendo el cumplimiento de criterios de calidad, seguridad y eficiencia energética. La incorporación de herramientas de evaluación ambiental, como las que propone este proyecto, contribuiría a fortalecer el RETIE, ampliando su alcance hacia aspectos ambientales relacionados con el ciclo de vida de los materiales.

En conjunto, estos lineamientos refuerzan la necesidad de adoptar esquemas colaborativos como los implementados en Brasil, adaptados a las condiciones regulatorias, institucionales y de mercado del contexto colombiano.

Selección de criterios e indicadores de evaluación técnica

La definición de indicadores clave del marco se realizó a partir del trabajo de revisión sistemática de (Gavrilescu et al., 2021b) quienes proponen un enfoque integral para evaluar la sostenibilidad de los sistemas de gestión de residuos eléctricos desde una perspectiva de economía circular. Se adoptaron indicadores como:

- Potencial de calentamiento global (GWP), expresado en kg CO₂-eq por unidad funcional del material,
- Porcentaje de material recuperado o reciclado,
- Consumo energético asociado al tratamiento del residuo, y
- Contribución del material a estrategias circulares como reutilización, reciclabilidad o desmontaje.

*Estos indicadores fueron seleccionados en línea con las recomendaciones de la norma ISO 14044:2006(ISO/TC 207/SC 5, 2006a), que guía la implementación de Análisis de Ciclo de Vida (ACV) para productos.

Construcción del marco metodológico

El análisis comparativo de políticas, experiencias regionales y la definición de indicadores técnicos permitió integrar los elementos necesarios para la construcción del marco metodológico.

Esta integración metodológica representa la consolidación de insumos técnicos y normativos que sustentan el marco de referencia. De este modo, se establecen las bases para que el marco no solo cuantifique las emisiones de GEI asociadas al uso de materiales eléctricos, sino que también pueda incorporar principios de economía circular aplicables al sector de la construcción en Colombia.

Tabla 1

Integración de fuentes en el diseño metodológico del marco de referencia

Eje metodológico	Fuente principal	Aplicación en el marco de referencia estandarizado
1. Revisión de políticas públicas y regulatorias	Mmereki et al. (2016)	Identificación de barreras comunes y adopción de instrumentos regulatorios como la Responsabilidad Extendida del Productor (REP).
2. Modelos regionales de economía circular	Besen et al. (2020)	Inclusión de esquemas de logística inversa y acuerdos sectoriales inspirados en la experiencia de Brasil en manejo de RAEE.

3. Indicadores técnicos y ambientales	Zhang et al. (2022)	Selección de indicadores de evaluación como el GWP (kg CO ₂ -eq), porcentaje de recuperación y eficiencia energética del reciclaje
--	---------------------	---

Instrumento de recolección de datos

Con el propósito de construir un marco de referencia estandarizado para la evaluación de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) en materiales eléctricos de construcción, se diseñó un instrumento de recolección de datos que permita sistematizar y comparar la información técnica, ambiental y normativa disponible sobre dichos materiales. Este instrumento adopta el formato de ficha técnica o matriz, y tiene como base metodológica los lineamientos de la norma ISO 14044 sobre análisis de ciclo de vida (ACV), así como criterios establecidos en estudios científicos recientes sobre sostenibilidad y economía circular. La ficha contempla variables como la unidad funcional del material, el potencial de calentamiento global (GWP).

Tabla 2

Recopilación de datos

Fuentes primarias (si aplica):	Fuentes secundarias	Normativas clave
Entrevistas a expertos en gestión ambiental o fabricantes de materiales eléctricos.	Bases de datos de ACV como Ecoinvent, GaBi, ELCD.	ISO 14044: Para guiar el análisis de ciclo de vida.(ISO/TC 207/SC 5, 2006b)
Encuestas a empresas del sector sobre materiales más usados o procesos específicos	Publicaciones científicas (como Zhang et al., 2022).	ISO 14067 :Para cuantificar la huella de carbono de productos.(ISO 14067:2018 Gases de Efecto Invernadero — Huella de Carbono de Los Productos — Requisitos y Directrices Para Su Cuantificación, 2018)

Normas como ISO GHG Protocol Product 14040, ISO 14044, ISO Standard. 14067 (para huella de carbono).
Informes técnicos de fabricantes (fichas de producto o declaraciones ambientales).

Tabla 3

Fuentes secundarias

<i>Fuentes</i>	<i>Descripción / Valor</i>
<i>Bases de datos</i>	Ecoinvent, GaBi o OpenLCA y ELCD.
<i>Normas técnicas</i>	RETIE, ISO 14040/14044, ISO 14067, GHG Protocol.
<i>Fichas técnicas de fabricantes</i>	(ej. Nexans, Procables, BTicino, Schneider Electric).
<i>Informes de organismos multilaterales</i>	(PNUMA, ONUDI) sobre economía circular y gestión de residuos electrónicos

Tabla 4

Estructura ficha técnica

<i>Ítem</i>	<i>Descripción</i>
<i>Nombre del material</i>	Denominación comercial y técnica
<i>Código o norma asociada</i>	Normas técnicas nacionales o internacionales aplicables
<i>Unidad funcional</i>	Medida base para la comparación (ej. 1 metro de cable, 1 kg de producto)
<i>Etapas del ciclo de vida</i>	Extracción, producción, transporte, uso, disposición final
<i>GWP (kg CO₂-eq por unidad)</i>	Potencial de calentamiento global, según bases de datos o literatura
<i>Fuente de los datos</i>	Referencia exacta (fabricante, norma, base de datos, artículo científico)

<i>Otras ambientales Observaciones</i>	<i>variables</i>	Consumo energético, uso de agua, reciclabilidad, toxicidad, entre otros Limitaciones, supuestos metodológicos o incertidumbres
--	------------------	---

Premisas metodológicas

- Se prioriza la información proveniente de bases de datos con respaldo científico y normativo.
- En ausencia de datos específicos nacionales, se utilizarán referencias internacionales, aclarando las limitaciones de representatividad geográfica.
- El análisis es de tipo “cuna a puerta”, considerando desde la extracción hasta la entrega del material en obra.
- Los datos recopilados fueron utilizados para comparar materiales equivalentes desde una perspectiva de desempeño ambiental.

Criterios de evaluación

El análisis está en términos del indicador de Potencial de Calentamiento Global (GWP), expresado en kilogramos de dióxido de carbono equivalente (kg CO₂-eq) por unidad funcional del material. Este indicador se selecciona por su alta representatividad en estudios de huella ambiental y por ser el más reportado en bases de datos internacionales.

El enfoque de análisis es del tipo “cuna a puerta” (cradle to gate), considerando los impactos desde la extracción de materias primas hasta la salida del producto terminado de la planta de producción, sin incluir su uso ni disposición final.

Registro y consolidación de resultados

Con la información recopilada, se procedió al diligenciamiento de las fichas técnicas para cada material. Posteriormente, los datos serán consolidados en una matriz comparativa que facilitará el análisis en el capítulo de resultados, permitiendo identificar materiales equivalentes con menor impacto ambiental y establecer lineamientos para el marco de referencia propuesto.

Aplicación del instrumento y recopilación de datos secundarios

La aplicación del instrumento de recolección de datos se llevó a cabo mediante una selección cualitativa de materiales eléctricos representativos en proyectos de construcción en Colombia. Esta selección se basó en criterios como frecuencia de uso en obra, relevancia ambiental y disponibilidad de información técnica y normativa (ver Tabla 5).

El carácter cualitativo de la selección responde a la limitada disponibilidad de bases de datos locales y estadísticas oficiales específicas sobre el uso de materiales eléctricos en el sector construcción. Por ello, la elección se apoyó en referencias normativas (RETIE, ISO 14040/44, GHG Protocol), literatura científica y fichas técnicas de fabricantes reconocidos, asegurando la validez y pertinencia del análisis.

Adicionalmente, las fichas técnicas de fabricantes fueron incorporadas como fuente clave dentro del instrumento. Estas fichas permitieron complementar la información proveniente de bases de datos internacionales con datos específicos de productos utilizados en el contexto colombiano, como composición de materiales, procesos de fabricación y criterios de eficiencia energética. Su inclusión asegura una mayor representatividad y aplicabilidad local, al reflejar las características reales de los materiales empleados en obra. De esta forma, las fichas técnicas aportan un valor diferenciador frente a las bases de datos genéricas, al ofrecer información verificable, actualizada y alineada con las normativas nacionales (RETIE, ISO).

Limitaciones y supuestos

Entre las principales limitaciones encontradas en la fase de recolección de datos se destacan:

- Falta de acceso a información detallada sobre procesos de manufactura.
- Variabilidad en la composición exacta de algunos productos entre marcas.
- Supuestos sobre distancias de transporte estandarizadas.

Se asumió que todos los materiales corresponden a productos nuevos y que su uso representa condiciones promedio de obras urbanas en Colombia. En caso de ausencia de datos específicos, se utilizaron aproximaciones basadas en fuentes secundarias mencionadas.

Tabla 5

Criterio de selección materiales eléctricos

<i>Ítem</i>	<i>Criterio de selección</i>
<i>Interruptores</i>	Uso frecuente en obra
<i>Cables de cobre con aislamiento en PVC</i>	Huella ambiental
<i>Accesorios de conexión</i>	Uso frecuente en obra

Tabla 6

Fuentes secundarias utilizadas

<i>Fuente</i>	<i>Tipo de fuente</i>
<i>Ecoinvent, GaBi</i>	Bases de datos especializadas en ACV
<i>Nexans, Schneider Electric</i>	Fichas técnicas de fabricantes reconocidos*
<i>RETIE, ISO 14040/44, GHG Protocol</i>	Normas técnicas aplicables

* Una ficha técnica es un documento emitido por el fabricante que reúne las características esenciales de un producto, incluyendo su composición de materiales, propiedades físicas, eléctricas o mecánicas, condiciones de uso, normas de fabricación y requisitos de seguridad. En el contexto de esta investigación, el término ficha técnica se considera equivalente a la denominación internacional datasheet, dado que ambos describen la misma fuente de información estandarizada que permite asegurar la trazabilidad, comparabilidad y confiabilidad de los datos utilizados en el análisis de ciclo de vida (ACV).

Tabla 7

Matriz comparativa de materiales eléctricos

<i>Ítem</i>	<i>Criterio de selección</i>	<i>Unidad funcional</i>	<i>Método LCIA</i>	<i>GWP100</i>	<i>Supuestos clave</i>	<i>Fuente de datos</i>	<i>Observaciones</i>
<i>Interruptor plástico (BTicino)</i>	Uso frecuente en obra	1 unidad	IPCC GWP10 0	0.38	Transporte nacional, resinas plásticas vírgenes	(ecoinvent, 2025)	Incluye carcasa plástica y mecanismo interno
<i>Cable de cobre con PVC (Nexans)</i>	Huella ambiental	1 metro	IPCC GWP10 0	0.68	Transporte nacional, electricidad promedio país	(nexans, 2025)	Impacto extracción y fundición de cobre
<i>Conector eléctrico tipo ficha</i>	Uso frecuente en obra	1 unidad	IPCC GWP10 0	0.22	Transporte nacional, electricidad promedio país	(ecoinvent, 2025)	Pequeña masa plástica con componentes metálicos

Potencial de Calentamiento Global

La fase de Evaluación de Impacto del Ciclo de Vida (LCIA) se realizó conforme a ISO 14040/14044(ISO/TC 207/SC 5, 2006b). Se seleccionó la categoría de impacto “Cambio climático” expresada como Potencial de Calentamiento Global (GWP100), siguiendo el método del IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change / Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático). Los inventarios obtenidos para cada material fueron caracterizados aplicando factores de conversión a CO₂ equivalente (CO_{2e}), integrando emisiones directas de CO₂, CH₄ y N₂O. El indicador final se expresó en kg CO_{2e} por unidad funcional (kg O_{2e}/UF), como ejemplo se cuantifica el GPW100 para el Cable de cobre con PVC.

- Unidad funcional (UF): 1 m de cable.
- Límites del sistema: cuna-a-sitio (extracción y refinado de cobre, compuesto de PVC, trefilado/extrusión, embalaje, transporte hasta obra).
- Calidad de datos: temporal (≤ 10 años), geográfica (preferencia LATAM/ROW con ajuste), tecnológica (procesos actuales de trefilado/extrusión).

Fuentes de datos

- Ecoinvent (producción cobre, trefilado, PVC compuesto, embalaje, transporte genérico si aplica).
- Fichas técnicas de fabricante: composición del cable, consumo eléctrico en extrusión/trefilado, rendimiento, masa por metro.(nexans, 2025)
- Electricidad: factor de emisión de red nacional (fuente local).
- Transporte Colombia: factores y rangos típicos para camión (peso bruto y rendimiento); distancia estimada obra–planta.

Inventario base por 1 m (variables)

- m^{cu} = masa de cobre en 1 m [kg/m].
- m^{pvc} = masa de PVC en 1 m [kg/m]).
- E_{ext} = electricidad de extrusión/trefilado [kWh/m].
- m^{cab} = masa total del cable [kg/m] = $m^{cu} + m^{pvc}$ (+ embalaje si aplica).
- d_t = distancia de transporte a obra [km].

Factores de emisión (EF)

- $EF^{cu} = \text{kg CO}_2\text{e/kg}$ (refinado de cobre + trefilado).
- $EF^{pvc} = \text{kg CO}_2\text{e/kg}$ (compuesto de PVC).
- $EF^{elec} = \text{kg CO}_2\text{e/kWh}$ (red nacional).
- $EF^{trans} = \text{kg CO}_2\text{e/ton-km}$ (camión nacional).

Ecuación de cálculo (GWP100 por 1 m)

$$GWP1m = m_{cu} \cdot EF^{cu} + m_{pvc} \cdot EF^{pvc} + E_{ext} \cdot EF^{elec} + (m_{cab} \cdot dt) \cdot EF^{trans} \quad (1)$$

Supuestos numéricos (ejemplo representativo):

- Masa de cobre por metro, $m^{cu} = 0,150 \text{ kg/m}$
- Factor de emisión del cobre, $EF^{cu} = 3,60 \text{ kg CO}_2\text{e/kg}$
- Masa de PVC por metro, $m^{pvc} = 0,062 \text{ kg/m}$
- Factor de emisión del PVC compuesto, $EF^{pvc} = 1,80 \text{ kg CO}_2\text{e/kg}$
- Electricidad de proceso (trefilado/extrusión), $E_{ext} = 0,125 \text{ kWh/m}$
- Factor de la red eléctrica (Colombia, promedio), $EF^{elec} = 0,20 \text{ kg CO}_2\text{e/kWh}$
- Masa total del cable, $m_{cab} = 0,212 \text{ kg/m}$ (\approx cobre + PVC)
- Distancia a obra, $dt = 250 \text{ km}$
- Factor de transporte en camión, $EF^{trans} = 0,08 \text{ kg CO}_2\text{e/ton-km}$

Cálculo por término:

1. Cobre ($m_{cu} \cdot EF^{cu}$) = $0,150 \times 3,60 = 0,540 \text{ kg CO}_2\text{e/m}$
2. PVC ($m^{pvc} \cdot EF^{pvc}$) = $0,062 \times 1,80 = 0,1116 \text{ kg CO}_2\text{e/m}$
3. Electricidad de proceso ($EF^{elec} \cdot E_{ext}$) = $0,125 \times 0,20 = 0,0250 \text{ kg CO}_2\text{e/m}$
4. Transporte a obra = $(m_{cab} \cdot dt) \cdot EF^{trans} = 0,0530 \times 0,08 = 0,00424 \text{ kg CO}_2\text{e/m}$

Suma total (GWP1m)

$$0,540 + 0,1116 + 0,0250 + 0,00424 = 0,68084 \text{ kg CO}_2\text{e/m}$$

Análisis de resultados selección de materiales eléctricos

La selección de materiales se justificó con base en criterios cualitativos y normativos, priorizando aquellos productos eléctricos que presentan alta frecuencia de uso en el sector construcción, disponibilidad de información técnica confiable (fichas técnicas y literatura científica) y relevancia en términos de emisiones de GEI. Estos criterios permiten garantizar que los materiales analizados representen de manera adecuada el comportamiento del mercado colombiano, aun en ausencia de estadísticas nacionales consolidadas. La aplicación de este enfoque, alineado con lo planteado en la Tabla 8, asegura que los resultados obtenidos sean pertinentes, comparables y replicables, contribuyendo al fortalecimiento metodológico del marco propuesto. La selección se fundamentó en dos criterios principales:

- (i) frecuencia de uso en instalaciones eléctricas
- (ii) relevancia en términos de impacto ambiental potencial, particularmente su huella de carbono.

Los materiales priorizados fueron los siguientes:

Tabla 8

Materiales eléctricos

<i>Ítem</i>	<i>Unidad funcional</i>	<i>Criterio de selección</i>	<i>Material base</i>
<i>Interruptores plásticos</i>	1 unidad	Uso frecuente en obra	Plásticos de ingeniería + metal
<i>Cables de cobre con PVC</i>	1 metro	Huella ambiental significativa	Cobre + PVC
<i>Accesorios de conexión</i>	1 unidad	Uso frecuente en obra	Plástico + metal

Fuente: Elaboración propia con base en especificaciones técnicas del RETIE (Ministerio de Minas y Energía, 2024), catálogos comerciales y bases de datos.

Los materiales seleccionados fueron objeto de análisis cuantitativo para estimar su Potencial de Calentamiento Global (GWP100), expresado en kilogramos de CO₂ equivalente (kg CO₂e) por unidad funcional. Para ello, se recopilaron datos sobre composición de materiales,

procesos de fabricación, transporte promedio en Colombia y disposición final. La recopilación se apoyó en fuentes secundarias como bases de datos internacionales (Ecoinvent)(ecoinvent, 2025), normas técnicas (ISO 14040/14044)(ISO/TC 207/SC 5, 2006a) y literatura científica sobre evaluación ambiental de equipos eléctricos.

La caracterización detallada de estos materiales permitió consolidar una matriz comparativa de evaluación ambiental, que constituye la base del marco metodológico propuesto. Este instrumento no solo facilita la comparación entre alternativas tecnológicas, sino que también respalda la toma de decisiones en compras públicas sostenibles y en el diseño eléctrico con enfoque de bajas emisiones.

En cuanto a los resultados cuantitativos, el cable de cobre con aislamiento en PVC presentó el mayor valor de impacto (0,68 kg CO_{2e} por metro), debido principalmente a la intensidad energética de la extracción, fundición y transporte del cobre. El interruptor plástico mostró un impacto intermedio (0,38 kg CO_{2e} por unidad), atribuible a la combinación de plásticos y componentes metálicos, mientras que el conector eléctrico tipo ficha registró el valor más bajo (0,22 kg CO_{2e}), en correspondencia con su bajo peso y simplicidad de diseño. Estos resultados permiten establecer una línea base nacional para comparar materiales equivalentes en función de su desempeño ambiental.

Más allá de la cuantificación, los resultados se organizaron de manera que permiten evidenciar la pertinencia del marco de referencia propuesto. Se contrastaron las prácticas internacionales de evaluación de huella de carbono (ISO 14040/14044, Ecoinvent, IPCC) con las condiciones específicas del contexto colombiano (matriz eléctrica, transporte interno y normatividad vigente como RETIE(Ministerio de Minas y Energía, 2024) y Conpes 4075(CONPES & DNP, n.d.)). Mientras a nivel global se privilegia el uso de bases de datos genéricas, aquí se incorporaron fichas técnicas de fabricantes locales y factores nacionales, lo cual asegura que los valores sean representativos y aplicables en Colombia.

Los resultados también permiten identificar procesos críticos: la dominancia del cobre frente al PVC en los cables coincide con la literatura internacional, pero en este se valida bajo condiciones nacionales. Esto demuestra cómo el marco facilita la traducción de prácticas globales a la realidad local, lo que representa un avance frente a metodologías que dependen exclusivamente de datos externos.

Finalmente, el análisis de resultados permite articular un plan de acción que conecta las fases del marco: (i) recopilación de prácticas internacionales, (ii) adaptación al contexto colombiano y (iii) aplicación a materiales representativos. De este modo, los resultados no se limitan a valores numéricos, sino que demuestran que el marco diseñado responde al objetivo general de ofrecer una herramienta estandarizada, comparable y pertinente para la toma de decisiones en proyectos de construcción en Colombia.

8 Discusión

Los resultados obtenidos permiten abrir una reflexión crítica sobre la aplicabilidad del marco propuesto:

La Unidad Funcional: Una limitación natural en la comparación es que los materiales se analizan bajo unidades funcionales distintas (“1 metro” de cable vs. “1 unidad” de interruptor). Aunque esta aproximación es útil para establecer una línea base, el verdadero valor del marco radica en que el usuario final puede definir la unidad funcional en función de su proyecto (ejemplo: “emisiones totales de materiales eléctricos para una instalación de 15 m² de vivienda”).

La Relevancia del Impacto: Traducir los resultados a un lenguaje más práctico facilita la comprensión. Por ejemplo, el impacto de 3 metros de cable ($\approx 2,04$ kg CO₂e) es equivalente al de aproximadamente 5 interruptores ($\approx 1,90$ kg CO₂e). Estas comparaciones permiten a los responsables de proyectos priorizar acciones de mitigación en materiales que generan mayor huella relativa.

La Brecha de Información: Finalmente, los resultados evidencian una carencia de datos sobre circularidad y reciclabilidad en los materiales analizados. Esta ausencia constituye una limitación, pero también confirma la pertinencia del marco propuesto: al exigir indicadores de economía circular junto con el GWP, se fortalece la capacidad de los proyectos en Colombia para exigir, comparar y estandarizar información ambiental de manera uniforme.

9 Conclusiones

El presente proyecto tuvo como propósito diseñar un marco de referencia estandarizado que permita la evaluación de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) en materiales eléctricos de construcción en Colombia. A partir de la aplicación de una metodología basada en normas internacionales (ISO 14044, ISO 14067) y la integración de herramientas como fichas técnicas, bases de datos de ACV (Ecoinvent) y enfoques normativos nacionales (RETIE, CONPES 4075, Ley 1931 de 2018), se logró caracterizar el impacto ambiental de tres materiales eléctricos representativos: interruptores plásticos, cables de cobre con aislamiento en PVC y accesorios de conexión.

Los resultados demostraron diferencias sustanciales en el potencial de calentamiento global (GWP) entre materiales, siendo el cable de cobre el que presentó el mayor valor debido a la intensidad energética de su cadena productiva. Esto evidencia la necesidad de incorporar criterios ambientales en la selección de materiales eléctricos, más allá de los aspectos técnicos y económicos.

El marco propuesto permite establecer una base metodológica replicable para evaluar impactos ambientales en obras de infraestructura, y constituye un insumo para fortalecer instrumentos regulatorios como el RETIE, así como para apoyar la toma de decisiones en el marco de la transición energética nacional.

10 Recomendaciones

Institucionales: Se recomienda que entidades como la UPME y el Ministerio de Minas y Energía consideren la incorporación de indicadores ambientales (como el GWP) en el RETIE, para avanzar hacia una regulación más integral.

Académicas: Promover la investigación en evaluación ambiental de materiales eléctricos en universidades y centros de I+D, con énfasis en datos primarios y adaptados al contexto colombiano.

Industria: Fomentar que los fabricantes y distribuidores publiquen fichas técnicas con información ambiental (EPD, huella de carbono) para facilitar evaluaciones comparativas y transparentes.

Prácticas de compra: Integrar criterios de sostenibilidad en las compras públicas de materiales eléctricos, priorizando aquellos con menor impacto ambiental.

Continuidad del proyecto: Se sugiere validar el marco propuesto en proyectos reales de construcción eléctrica, para retroalimentar su aplicabilidad, escalabilidad y aceptación entre actores del sector.

Referencias

- International Energy Agency, I. (2023). *Colombia 2023 - Energy Policy Review*. www.iea.org
- Amicarelli, V., Primiceri, M., Misino, E., & Bux, C. (2023). An application of the UNI/TS 11820:2022 on the measurement of circularity in an electrical equipment manufacturing organization in Italy. *Journal of Cleaner Production*, 420. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.138439>
- Baldé, C. P., Kuehr, R., Yamamoto, T., McDonald, R., Althaf, S., Bel, G., Deubzer, O., Fernandez-Cubillo, E., Forti, V., Gray, V., Herat, S., Honda, S., Iattoni, G., Khetriwal, D. S., & Luda di Cortemiglia, V. (n.d.). *Global E-waste Monitor-2024*. <https://www.itu.int/itu-d/sites/environment>.
- Borthakur, A. (2020). Policy approaches on E-waste in the emerging economies: A review of the existing governance with special reference to India and South Africa. In *Journal of Cleaner Production* (Vol. 252). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119885>
- Bressanelli, G., Pigosso, D. C. A., Saccani, N., & Perona, M. (2021). Enablers, levers and benefits of Circular Economy in the Electrical and Electronic Equipment supply chain: a literature review. *Journal of Cleaner Production*, 298. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126819>
- Bressanelli, G., Saccani, N., Pigosso, D. C. A., & Perona, M. (2020). Circular Economy in the WEEE industry: a systematic literature review and a research agenda. *Sustainable Production and Consumption*, 23, 174–188. <https://doi.org/10.1016/J.SPC.2020.05.007>
- Congreso de Colombia. (n.d.). *LEY-1931-2018*.
- CONPES, & DNP. (n.d.). *DOCUMENTO CONPES 4075*.
- ecoinvent. (2025). *ecoinvent*. ecoinvent.org
- Fecoc. (2016, January). *CONSULTORÍA TÉCNICA PARA EL FORTALECIMIENTO Y MEJORA DE LA BASE DE DATOS DE FACTORES DE EMISIÓN DE LOS COMBUSTIBLES COLOMBIANOS-FECOC*.
- Gavrilescu, D., Enache, A., Ibănescu, D., Teodosiu, C., & Fiore, S. (2021a). Sustainability assessment of waste electric and electronic equipment management systems: Development and validation of the SUSTWEEE methodology. *Journal of Cleaner Production*, 306. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.127214>
- Gavrilescu, D., Enache, A., Ibănescu, D., Teodosiu, C., & Fiore, S. (2021b). Sustainability assessment of waste electric and electronic equipment management systems: Development and validation of

- the SUSTWEEE methodology. *Journal of Cleaner Production*, 306. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.127214>
- Green Forum / European Commission. (2024). *Environmental Footprint Methods*. Calculating the Environmental Impact of Products and Services. https://green-forum.ec.europa.eu/environmental-footprint-methods_en
- ISO 14067:2018 Gases de Efecto Invernadero — Huella de Carbono de Los Productos — Requisitos y Directrices Para Su Cuantificación, 2018 (2018).
- ISO/TC 207/SC 5. (2006a). *ISO 14040:2006 Environmental management — Life cycle assessment — Principles and framework*.
- ISO/TC 207/SC 5. (2006b). *ISO 14044:2006 Environmental management — Life cycle assessment — Requirements and guidelines* (1,2006). ISO.
- Ministerio de Minas y Energía. (2024). *Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas – RETIE*.
- nexans. (2025). *nexans*. Nexans. <https://www.nexans.co/es/products/Construcción/Cables-de-Cobre-de-Baja-Tensión-Aislados/Cable-THHN-THWN-2/Cable-Type24144.html>
- Ongondo, F. O., Williams, I. D., & Cherrett, T. J. (2011). How are WEEE doing? A global review of the management of electrical and electronic wastes. In *Waste Management* (Vol. 31, Issue 4, pp. 714–730). <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2010.10.023>
- Pan, X., Wong, C. W. Y., & Li, C. (2022). Circular economy practices in the waste electrical and electronic equipment (WEEE) industry: A systematic review and future research agendas. *Journal of Cleaner Production*, 365, 132671. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2022.132671>
- Polverini, D., Espinosa, N., Eynard, U., Leccisi, E., Ardente, F., & Mathieux, F. (2023). Assessing the carbon footprint of photovoltaic modules through the EU Ecodesign Directive. *Solar Energy*, 257, 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2023.04.001>
- Rizos, V., & Bryhn, J. (2022). Implementation of circular economy approaches in the electrical and electronic equipment (EEE) sector: Barriers, enablers and policy insights. *Journal of Cleaner Production*, 338. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.130617>
- united nations. (n.d.). *Methodological tool Tool to calculate the emission factor for an electricity system*.
- UPME. (2023). *RESOLUCIÓN No. 000762 de 2023*. https://www1.upme.gov.co/Normatividad/762_2023.pdf