

**TESIS DE MAESTRÍA**

**DISEÑO OPTIMIZADO MULTIOBJETIVO DE REDES DE DRENAJE  
URBANO INCLUYENDO LA MINIMIZACIÓN DE COSTOS Y EMISIONES  
DE DIÓXIDO DE CARBONO EQUIVALENTE (CO<sub>2</sub>EQ):  
ESTADO DEL ARTE**

**Diana Carolina González García**

**Asesor: Juan G. Saldarriaga Valderrama**



**UNIVERSIDAD DE LOS ANDES  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL Y AMBIENTAL  
MAESTRÍA EN INGENIERÍA CIVIL  
BOGOTÁ D.C.  
2025**

## **AGRADECIMIENTOS**

A mi esposo, hijo y padres por su apoyo incondicional.

Al profesor Juan, por su motivación, guía y acompañamiento.



## TABLA DE CONTENIDO

1	RESUMEN .....	4
2	ABSTRACT .....	5
3	INTRODUCCIÓN .....	6
4	METODOLOGÍA.....	8
5	RESULTADOS .....	10
5.1	Etapa de materiales y fabricación de la tubería .....	13
5.2	Etapa de instalación de la tubería .....	15
5.3	Etapa de uso y mantenimiento/ rehabilitación de la tubería.....	18
5.4	Impacto económico .....	19
6	ANÁLISIS COMPARATIVO .....	21
7	DISCUSIÓN.....	23
8	CONCLUSIONES .....	26
9	AGRADECIMIENTOS.....	28
10	REFERENCIAS.....	29



---

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1   Metodología para la selección de documentos.....	8
Figura 2   Distribución geográfica de las publicaciones.....	9
Figura 3   Etapas en el ACV para un sistema de alcantarillado.....	10
Figura 4   Análisis del ciclo de vida y el costo total para un sistema de alcantarillado para tubería de PVC y Concreto (100m, diámetros de 300, 450, 500 y 600 mm).....	22



---

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1   Publicaciones revisadas y su metodología.....	11
Tabla 2   Resumen de supuesto y simplificaciones para el ACV y ACCV para diferentes sistemas de tuberías	22



## 1 RESUMEN

Este estudio tiene como propósito ofrecer una visión general de los resultados de investigaciones que evalúan las emisiones de dióxido de carbono y los costos asociados a sistemas de alcantarillado urbano mediante análisis de ciclo de vida. Para ello, se realizó una revisión detallada de publicaciones de la última década. En total se analizaron 20 estudios, a partir de los cuales fue posible identificar la metodología más empleada, los tipos de evaluación de impacto ambiental utilizados y el software predominante. Los resultados muestran que, aunque los estudios persiguen un objetivo común: cuantificar el impacto ambiental de los sistemas de alcantarillado, no es posible establecer comparaciones directas entre ellos debido a la variabilidad en las unidades funcionales y los límites del sistema seleccionados. Finalmente, se presentan recomendaciones y desafíos para la aplicación del análisis del ciclo de vida en este tipo de infraestructuras.

**Palabras clave** | Análisis del ciclo de vida (ACV); emisiones de  $\text{CO}_2$ ; tubería; costo; alcantarillado.



## 2 ABSTRACT

This study aims to provide an overview of research findings that assess carbon dioxide emissions and the costs associated with urban sewer systems through life cycle analysis. To this end, a detailed review of publications from the last decade was conducted. In total, 20 studies were analyzed, allowing the identification of the most employed methodology, the types of environmental impact assessments used and the predominant software. The results show that although the studies share a common objective: quantifying the environmental impact of sewer systems, direct comparisons cannot be made due to variability in the selected functional units and system boundaries. Finally, recommendations and challenges for the application of life cycle analysis in this type of infrastructure.

**Key words** | life cycle assessment (LCA);  $\text{CO}_2$  emissions; pipes; cost; sewerage.



### 3 INTRODUCCIÓN

Entre los años 2000 y 2022, el aumento de la población mundial fue de 1800 millones de personas, lo que la incrementó a 8000 millones de personas para finales del año 2022. De estos, 4600 millones de personas tuvieron acceso a un servicio de saneamiento gestionado de forma segura. Durante este periodo, la cobertura global de saneamiento gestionado de forma segura aumentó del 49% al 57%, mientras que en las zonas rurales la cobertura aumentó 10 puntos porcentuales, del 36% al 46%, y en las zonas urbanas aumentó 5 puntos porcentuales, pasando del 60% al 65% UNICEF & WHO (2023).

Las redes de alcantarillado es una infraestructura principalmente compuesta por tuberías, pozos de inspección y estaciones de bombeo (si se requiere). Su función es recolectar el agua residual de actividades domésticas, industriales y comerciales, y transportarlas hasta las plantas de tratamiento, donde se depuran los contaminantes antes de descargarla al medio ambiente sin que representen un riesgo para la salud humana ni para el medio ambiente. La construcción de esta infraestructura influye enormemente en la economía y el desarrollo de un gobierno, por lo cual es importante evaluar los impactos ambientales generados y su contribución a la huella de carbono. Los materiales de las tuberías, el transporte, el tipo de cimentación, la forma de mantenimiento, rehabilitación y disposición final inciden enormemente en los costos de compra, mantenimiento y operación durante el ciclo de vida y también afectan a las cargas ambientales, como el agotamiento de recursos, el consumo de energía y las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI). La Mejora de 2019 de las Directrices del IPCC de 2006 para los Inventarios Nacionales de Gases de Efecto Invernadero señaló que “las redes de alcantarillado son una fuente probable de gases de efecto invernadero particularmente de metano (CH<sub>4</sub>) y óxido nitroso (N<sub>2</sub>O). Sin embargo, no hay información suficiente para cuantificar las emisiones debido a factores asociados como al tipo de alcantarillado y a las condiciones operacionales” (IPCC, 2019). Las emisiones de gases de efecto invernadero son una de las causas del calentamiento global y el cambio climático. El cambio climático ya está afectando a diferentes fenómenos meteorológicos y climáticos extremos en todo el mundo, lo que está provocando impactos adversos en la seguridad alimentaria y del agua, la salud humana, la economía mundial, la sociedad, así como pérdidas y daños a la naturaleza y a las personas. Con el cambio climático, el cálculo de la huella de carbono se ha implementado ampliamente, ya que mide la cantidad total de emisiones de CO<sub>2</sub>, tanto directas como indirectas, causadas por una actividad o servicio a lo largo de su ciclo de su vida.

El análisis del ciclo de vida (ACV) comenzó a implementarse en la industria del agua en la década de 1990 para evaluar los efectos ambientales (Piratla et al., 2012). El ACV es un método estandarizado por la norma (ISO 14040, 2006) que se utiliza para evaluar el desempeño ambiental de un producto, servicio o actividad desde la perspectiva del ciclo de vida. El análisis del ciclo de



vida permite identificar los puntos críticos ambientales de los sistemas para propósitos de un diseño ecológico y ayuda a evitar cambios en la contaminación entre categorías de impacto o entre etapas del ciclo de vida (Loubet et al., 2014).

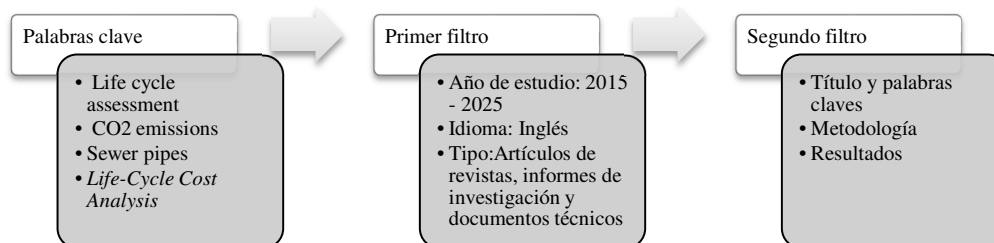
Tomando como referencia la revisión de un grupo de publicaciones existentes priorizadas, el objetivo de este artículo es proporcionar una visión general de los resultados de las investigaciones que incluyen la evaluación de las emisiones de dióxido de carbono provenientes de los sistemas de redes de alcantarillado durante su ciclo de vida. Estos resultados pueden ayudar a los responsables en la toma de decisiones a evaluar los impactos ambientales y económicos considerando diferentes variables, como los materiales y métodos de instalación, entre otros. Dado que estos factores, además de influir en los costos de adquisición, funcionamiento y mantenimiento, también tienen un gran impacto ambiental. La construcción de sistemas de alcantarillado sostenibles ayudará a reducir las causas del cambio climático.



## 4 METODOLOGÍA

La búsqueda de los estudios relacionados con la estimación de las emisiones de dióxido de carbono del ciclo de vida de los sistemas de alcantarillado residual se realizó según la metodología indicado en la Figura 1, donde se analizaron diferentes publicaciones. La información se recopiló de diferentes bases de datos bibliográficas científicas, como ScienceDirect, Dimensions, Web of Science, Scopus, Springer y Google Scholar. Se utilizaron palabras clave “life cycle assessment”, “CO<sub>2</sub> emissions”, “Costs”, “sewer pipes” en las bases de datos. Con estas palabras clave se obtuvo una lista de 47 artículos para su evaluación. Esta lista se filtró para incluir solo los documentos publicados en los últimos 10 años (entre 2015 y 2025), escritos en inglés y que fueran artículos de revistas, informes de investigación y documentos técnicos. Tras este filtro, se obtuvieron 25 documentos para realizar una revisión en profundidad. Finalmente, se seleccionaron y revisaron detalladamente 20 documentos. Se incluyeron aquellos que evaluaran materiales para tuberías durante la totalidad o parte del ciclo de vida del sistema de drenaje, que se centraran en la medición de las emisiones de dióxido de carbono y en la identificación del impacto sobre el calentamiento global. Se valoraron aquellos documentos que incluían el costo del ciclo de vida o la monetización de las emisiones de CO<sub>2</sub>. Se excluyeron los documentos que integraban el estudio de sistemas de distribución de agua potable y los que realizaban una comparación directa y no detallada con las redes de drenaje y las plantas de tratamiento. Las publicaciones revisadas pueden ser divididas en dos tipos de estudios: estudios basados en un enfoque de ACV multicriterio, en los que se incluye un inventario de consumo de recursos y emisiones contaminantes, y estudios basados en un enfoque de huella de carbono, con un inventario limitado en la demanda de energética acumulada.

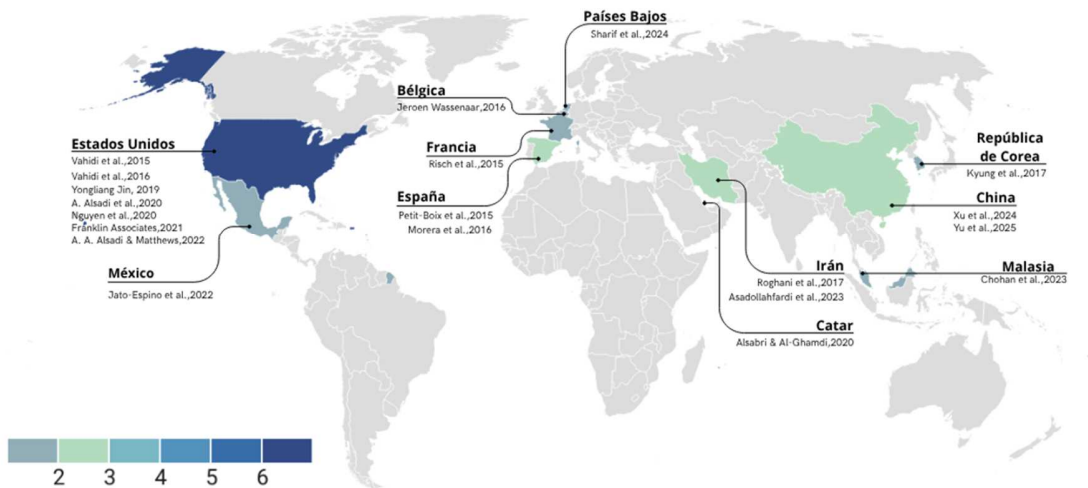
La información de cada publicación se registró en Microsoft Excel 365, donde se extrajeron datos generales tales como país de origen, año de publicación, materiales y etapas del ciclo de vida, métodos utilizados y características de los sistemas estudiados.



**Figura 1 | Metodología para la selección de documentos.**



La distribución geográfica de las publicaciones realizadas en la Figura 2 muestra que Estados Unidos encabeza la lista con siete publicaciones, representado el 35% del total. España, Irán, y China contribuyeron con dos publicaciones cada uno, mientras que México, Países Bajos, Bélgica, Francia, Catar, República de Corea y Malasia aportaron una cada uno conformado el 10% y 5% de las publicaciones respectivamente. Durante el periodo de estudio, se observó que la mayor cantidad de publicaciones se llevó a cabo en los años 2015, 2016 y 2020, con tres publicaciones anuales en cada año. Para los años 2017, 2022, 2023 y 2024 se realizaron dos publicaciones anuales. En los años 2019, 2021 y 2025 se encontró una publicación anual. En el año 2018 no se encontraron publicaciones relacionadas con la investigación. Es preciso indicar que no se encontró información publicada en América del Sur, África y Australia.



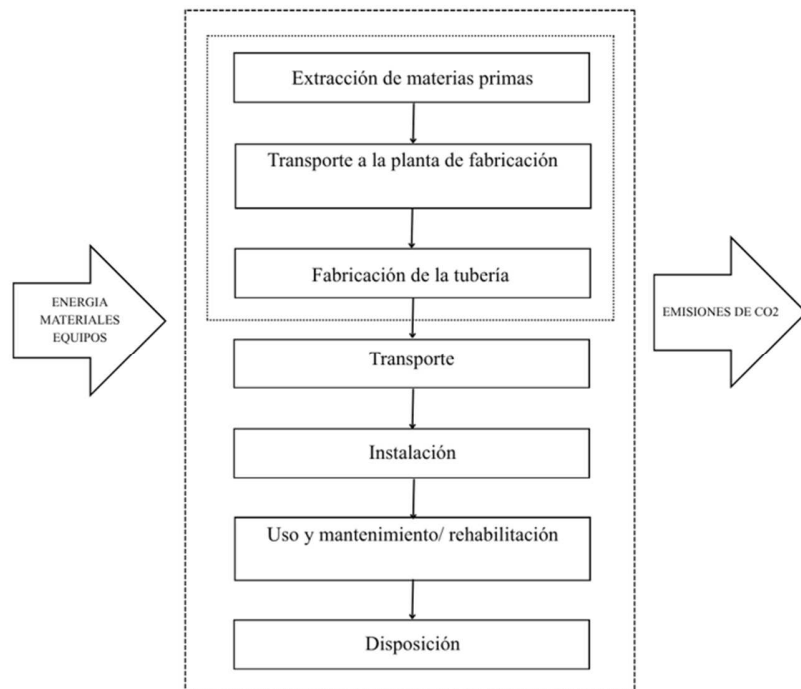
**Figura 2 | Distribución geográfica de las publicaciones**



## 5 RESULTADOS

El impacto de las emisiones de gases de efecto invernadero en el cambio climático se puede evaluar de diferentes maneras. El análisis del ciclo de vida es una herramienta teórica que permite identificar el impacto ambiental de un producto, proceso o actividad a lo largo de su ciclo de vida. Existen diferentes, estándares, normas y métodos para realizar esta medición o evaluación del ACV. La Tabla 1 presenta detalles de las publicaciones seleccionadas, incluidos el método para la evaluación del ACV, el método para la evaluación del impacto ambiental, las bases de datos consultados y los programas informáticos utilizados.

Una de las metodologías principalmente empleada por los autores de las publicaciones revisadas fue la evaluación del ciclo de vida, realizada mediante la metodología establecida en el estándar internacional (ISO 14040, 2006), que consiste en las siguientes cuatro etapas: 1) Definición del objetivo y el alcance, para identificar los objetivos y los límites del sistema analizado. 2) Análisis del inventario del ciclo de vida (ICV), se cuantifican los datos recopilados (entrada para el ACV, por ej., materiales y uso de la energía) y se calculan las salidas del ACV (resultado del ICV, por ej., emisiones y residuos). 3) Evaluación del impacto ambiental del ciclo de vida, se convierten los resultados del ICV en impactos ambientales. En esta etapa, los efectos ambientales se asignan a diferentes categorías de impacto para obtener valores de indicadores específicos para cada categoría. 4) Interpretación, en la que se evalúan y resumen los resultados obtenidos en las etapas anteriores para llegar a una conclusión integral (Du et al., 2013).



**Figura 3 | Etapas en el ACV para un sistema de alcantarillado**

La evaluación del impacto ambiental puede realizarse de dos formas: a) centrándose en un único impacto, como la huella de carbono (HC) o el calentamiento global (PCG), o b) incluyendo varias categorías de impacto intermedio, como el cambio climático, la toxicidad humana, el uso del agua, los recursos fósiles, etc. También es posible agrupar estas categorías de impacto intermedio para



evaluar los daños finales en áreas de protección amplias (efectos sobre la salud humana, pérdida de biodiversidad y escasez de recursos). Esta agrupación simplifica la interpretación de los resultados de la evaluación de impacto ambiental, aunque esto aumenta la incertidumbre de los datos. Con el fin de establecer un estándar de comparación, el análisis se centrará únicamente en los resultados obtenidos por los autores en relación con el impacto del cambio climático, el calentamiento global y la huella de carbono.

El ACV se puede realizar estableciendo distintos alcances o límites del sistema: desde la cuna hasta la tumba, desde la cuna hasta la puerta (para analizar de la etapa de fabricación) o desde la puerta hasta la puerta (para analizar el método de instalación). Generalmente, el estudio de los sistemas de alcantarillado se realiza desde de la cuna hasta la tumba. Las etapas evaluadas en este análisis son la extracción de materias primas, la fabricación de materiales, el transporte de tuberías y maquinaria para su construcción, la construcción, la operación y el mantenimiento, y finalmente el reciclaje y la eliminación de residuos (Akhtar et al., 2014). La Figura 3 muestra el sistema de diagrama para un sistema de alcantarillado.

Para llevar a cabo el análisis del ciclo de vida de un sistema de alcantarillado, es necesario establecer una unidad funcional (UF) que sirva de base de comparación cuantitativa y equitativa. Las UF implementadas por los autores abarcan información real o estimada, como los años de operación, la longitud y el diámetro de la tubería, y el caudal. Cuatro de las publicaciones revisadas no especificaron una limitación de la vida útil. El 35% del total de las publicaciones ((Vahidi et al., 2015); (Petit-Boix et al., 2015); (Vahidi et al., 2016); (Roghani et al., 2017); (Jato-Espino et al., 2022); (Chohan et al., 2023); (Asadollahfardi et al., 2023)), estableció un periodo de vida útil de 50 años. El 25% de los autores indicaron 100 años para la operación del sistema ((Jeroen Wassenaar, 2016); (Nguyen et al., 2020); (Franklin Associates, 2021); (A. A. Alsadi & Matthews, 2022); (Sharif et al., 2024)). Otros autores tomaron 20, 30, 60 y 70 años como referencia.

**Tabla 1| Publicaciones revisadas y su metodología.**

Referencia / año	Método	Método LCIA	Base de datos	Software
(Risch et al., 2015)	ISO (2006) 14044 (2006)	14040 ISO Mindpoint (H)V1.07	Ecoinvent data	SimaPro 7.3
(Vahidi et al., 2015)	ISO (2006) 14044 (2006)	14040 -	Ecoinvent data	SimaPro 7.1.8
(Petit-Boix et al., 2015)	ISO (2006) 14044 (2006)	CML IA CED V1.08	MetaBase ITeC Ecoinvent data 2.2	SimaPro 7.2.0
(Morera et al., 2016)	ISO (2006) 14044 (2006)	14040 ISO (H)V1.09	Ecoinvent data 3 Ecoinvent data 2.1	SewerLCA Tool
(Vahidi et al., 2016)	ISO (2006) 14044 (2006)	14040 TRACI	Ecoinvent data 3	SimaPro 8
(Jeroen Wassenaar, 2016)	ISO 14020 ISO 14021	IMA Europe	Eco-Profiles by Europe Portland	Plastics Cement



			Association		
(Roghani et al., 2017)	EIO-LCA	EIO-LCA	Especificación producto	según	-
(Kyung et al., 2017)	GHG Protocol	IPCC	Especificación producto	según	-
(Yongliang Jin, 2019)	EIO-LCA	EIO-LCA	Ecoinvent data V2.1	según	EIO-LCA
(A. Alsadi et al., 2020)	Embodied energy (EE) and Embodied carbon (EC)	-	ICE database V2.0 eGRID		-
(Nguyen et al., 2020)	ISO 14040 (2006)	TRACI 2.1 ReCiPe Mindpoint	GaBi 6.0 DataSmart		SimaPro 8
(Alsabri & Al-Ghamdi, 2020)	Embodied energy (EE) and embodied carbon (EC)	-	-		-
(Franklin Associates, 2021)	ISO 14040 (2006) ISO 14044 (2006)	IPCC TRACI 2.1	Plastics Pipe Institute (PPI) U.S. LCI Database		-
(A. A. Alsadi & Matthews, 2022)	Embodied energy (EE) and Embodied carbon (EC)	-	Ecoinvent data	según	e-calc
(Jato-Espino et al., 2022)	ISO 14040 (2006) ISO 14044 (2006)	ReCiPe Mindpoint	Especificación producto	según	SimaPro 8v
(Chohan et al., 2023)	ISO 14040 (2006) ISO 14044 (2006)	GWP100	Ecoinvent data		
(Asadollahfardi et al., 2023)	ISO 14040 (2006) ISO 14044 (2006)	CML 2000 Baseline IMPACT	Ecoinvent 3 data		SimaPro
(Sharif et al., 2024)	ISO 14067 (2018)	GWP100	Op database Highways England Carbon Tool v2.2 (Government GHG Conversion Factors for Company Reporting calculator		
(Xu et al., 2024)	-	ReCiPe 2016 Mindpoint (H)	Ecoinvent data V3		OpenLCA
(Yu et al., 2025)	Carbon emission	-	Especificación producto	según	-

Según (Petit-Boix et al., 2015), indica que las tuberías de concreto han demostrado tener una vida útil máxima de 100 años, mientras que para las tuberías de plástico se le atribuyen 50 años. Sin embargo, otros autores establecieron un tiempo de vida útil de 20 años, basándose en la vida útil esperada del sistema de alcantarillado de un país, independientemente del material (Kyung et al., 2017).



Los principales resultados y conclusiones obtenidos por los autores en las publicaciones revisadas se agruparon por la etapa que generaba mayores emisiones de gases de efecto invernadero. A continuación, se describen brevemente:

## 5.1 Etapa de materiales y fabricación de la tubería

(Vahidi et al., 2015) realizaron un estudio comparativo de cuatro de las etapas del ciclo de vida de diferentes tipos de materiales (concreto, hierro dúctil (DI), policloruro de vinilo (PVC) y plástico reforzado con fibra de vidrio (PRFV). No se tuvo en cuenta la etapa de disposición final ni ningún gasto de recuperación. Según los autores, la etapa de fabricación es la etapa que más impacto tiene en el ACV para los cuatro tipos de materiales estudiados. La fabricación de la tubería de DI resultó ser la más perjudicial para el cambio climático, debido a la cantidad inevitable de materiales y energía requerida; le siguieron las tuberías de PRFV y PVC, y la producción de tuberías de concreto se encontró como la que menos efectos tenía.

(Vahidi et al., 2016) cuantificaron el impacto ambiental de diferentes materiales (concreto, hierro dúctil, PRFV, PVC, arcilla vitrificada y polietileno de alta densidad (PEAD)) para tuberías de alcantarillado con el fin de respaldar la selección del material más adecuado para un mejor desempeño ambiental durante el ciclo de vida de dos tipos de sistemas: uno de gravedad y otro por bombeo. Se consideró que las tuberías se dispondrían en un vertedero. En el sistema de gravedad, la etapa de fabricación predomina con independencia del tipo de material. La fabricación de tubería de hierro dúctil se identificó como la peor en todas las categorías ambientales debido a la gran cantidad de material y energía que se requiere en el proceso de fundición. El impacto de la etapa de transporte e instalación también tiene un impacto notable, especialmente cuando el material tiene una densidad alta. Se observó que, en esta etapa las tuberías en concreto reforzado y arcilla vitrificada tienen un mayor impacto en el calentamiento global comparado con otros materiales.

(Jeroen Wassenaar, 2016) aplicó el ACV a tuberías plásticas y de concreto, considerando las etapas de fabricación, transporte e instalación de la tubería y excluyendo las etapas de uso y de disposición final, ya que, según el autor, más del 95% de las tuberías se dejan en el lugar después de su período de vida útil, por lo que no afectarían a la huella de carbono. Se encontró que las tuberías de polipropileno modificado con minerales tienen el menor impacto en el indicador del potencial de calentamiento global (PCG), mientras que las tuberías de concreto tienen la mayor incidencia. Una de las principales razones es que no se considera el componente de energía interna. Solo si las tuberías fueran incineradas al final de su vida útil, esa energía interna se transformaría en emisiones de gases de efecto invernadero.

(Roghani et al., 2017) calcularon las emisiones de gases de efecto invernadero y rastrearon el flujo monetario involucrados en la fabricación de tuberías de concreto y PEAD con diámetros de 200,



250, 300 y 350 mm para sistemas de alcantarillado. Se encontró que la fabricación de tuberías de mayor diámetro genera una mayor cantidad de GEI y que las emisiones de GEI durante la etapa de fabricación de tuberías de PEAD son menores o casi iguales a las de las tuberías de concreto del mismo diámetro. Una de las fuentes de emisiones de GEI en la fabricación de las tuberías de concreto es la fabricación del cemento, seguidos del transporte por camión y de la generación y suministro de energía. Por otra parte, la generación y el suministro de energía, seguidos del transporte por camión y de la fabricación de materiales plásticos y resinas, son los principales contribuyentes a la cantidad total de emisiones de GEI en la etapa de fabricación de tuberías de PEAD. El aumento del diámetro de la tubería (superior a 450 mm) conlleva un aumento de las emisiones de GEI para las tuberías de PEAD en comparación con las de concreto.

(Yongliang Jin, 2019) estimó las emisiones de CO<sub>2eq</sub>, entre otros gases, para un sistema de alcantarillado por gravedad de concreto no reforzado de 300mm de diámetro, evaluando dos opciones de distancia: una es la distancia entre el lugar de la instalación y la otra, la distancia desde el almacén de la tubería. La etapa de fabricación es la etapa que más contribuye a las emisiones durante todo el proceso. En la etapa de instalación, el transporte es el que más impacto ambiental tiene. El análisis indica que existen dos factores importantes en la estimación de emisiones: el tamaño del proyecto y la distancia del transporte.

(Alsadi et al., 2020) encontraron que la fabricación del material y la etapa de fabricación de las tuberías de concreto con cilindro pretensado (PCCP) tienen el menor consumo de energía en comparación con las tuberías de PVC y las tuberías curadas in situ (CIPP), lo cual es de esperarse dado que las materias primas son diferentes (acero y concreto frente a resinas basadas en petróleo). Las emisiones de CO<sub>2</sub> de la CIPP fueron casi tres veces mayores que las de la PCCP, y las de la PVC fueron casi el doble comparado con las de la tubería PCCP. En este estudio, se determinó la huella de carbono y la energía incorporada durante la fabricación de una tubería de un gran diámetro (900 mm).

(Nguyen et al., 2020) evaluaron la energía y las emisiones de GEI mediante el ACV para diferentes alternativas de tuberías de PEAD para sistemas de alcantarillado (PEAD, PEAD/PCR, PEAD/PCR/nanoarcilla y bio-PEAD), y consideraron tres rutas de disposición al final de su vida útil: reciclaje mecánico, disposición en vertedero e incineración con recuperación de energía. Destacan la relación entre el medio ambiente y los aspectos económicos de diferentes alternativas de tuberías de plástico. Limitaron el estudio asumiendo que la cristalinidad indicaba la vida útil del material de la tubería. Descubrieron que las mezclas recicladas y los nanocompuestos tienen un gran potencial para sustituir al PEAD virgen, ya que las emisiones de GEI y los costos son relativamente bajos, mientras que la tubería de origen biológico es casi un 20% más costosa. El abandono de la tubería en su lugar al final de su vida útil genera menores emisiones de GEI que la incineración y el reciclaje mecánico, ya que ambos procesos provocan una liberación directa de CO<sub>2</sub>.



(Alsabri & Al-Ghamdi, 2020) compararon el desempeño ambiental de tres polímeros: PVC, polipropileno (PP) y polietileno (PE). El estudio contempló el consumo energético, la huella de carbono y el impacto del ciclo de vida. El estudio puso de relevancia que el uso de plástico reciclado, puntualmente de PVC, ya que puede mejorar la escala de producción y así mismo reducir el calentamiento global. También indicó que el uso de PVC conlleva un mayor consumo de energía y una mayor emisión de gases de CO<sub>2</sub>, por lo que contribuye en mayor medida al calentamiento global en comparación con los demás polímeros. Se identificó la necesidad de adoptar medidas de reciclaje de residuos plásticos para la fabricación de tuberías, ya que en la región del Consejo de Cooperación del Golfo no es una práctica común, a diferencia de lo que ocurre en Japón.

(Franklin Associates, 2021) realizó un informe técnico sobre el análisis del ciclo de vida y el impacto ambiental de las tuberías corrugadas fabricadas con resina virgen de HDPE y materiales reciclados, concreto reforzado, PVC y acero aluminizado. Se consideraron tres escenarios para su disposición final: dejar in situ, reciclar y llevar a un vertedero. El potencial de calentamiento global de las tuberías de PEAD es menor en comparación que el de las tuberías de PVC, concreto reforzado y acero aluminizado en todas las etapas del ciclo de vida. El uso de resina reciclada reduce los resultados para la tubería de PEAD con un 50% de contenido reciclado en comparación con la tubería de PEAD virgen, pero las diferencias son demasiado pequeñas para ser consideradas.

(Asadollahfardi et al., 2023) realizaron un análisis del ciclo de vida para tres tipos de materiales (concreto, PVC y PE) para evaluar su impacto ambiental mediante tres metodologías diferentes. La comparación del ciclo de vida de los tres materiales mostró que la fabricación y el uso de tuberías de PVC tienen un mayor efecto en el calentamiento global (47.35%), seguido de las tuberías de concreto (29.65%) y las tuberías de PE (23.01%). La fabricación, es la etapa con mayor tasa de contaminantes en el PVC, concreto y PE, respectivamente. En la disposición final, al terminar su ciclo de vida, las tuberías de PE tienen la mayor tasa de contaminación, seguidas de las de PVC y las de concreto. Los resultados indican que, al reciclar las tuberías plásticas, se puede recuperar la energía utilizada en la extracción de la materia prima. Los resultados de la comparación del análisis del ciclo de vida a través de las distintas metodologías indican que los impactos asociados a los materiales no dependen de la metodología aplicada, ya que se obtuvieron resultados similares. Según el estudio, las tuberías de PE son las más respetuosas con el medio ambiente en comparación con las de PVC y las de concreto.

## 5.2 Etapa de instalación de la tubería

(Risch et al., 2015) plantearon un caso de estudio en donde se incluyó la construcción y la operación de una red de alcantarillado y una planta de tratamiento de aguas residuales, se modelaron cuatro etapas del ciclo de vida, se evaluaron el punto medio de las categorías de



impacto y los niveles de punto final. El resultado de este estudio indica que la etapa de construcción de un sistema de alcantarillado parece ser la que más contribuye a la categoría del cambio climático (65%). Los impactos provocados por el material de las tuberías son comparativamente pequeños. En este estudio no se contempló el mantenimiento de las redes y se asumió un ciclo de vida de 30 años, que es el que se usa comúnmente para la depreciación económica. También se indica que reducir a la mitad los años de vida útil se traduce en un aumento del 40-50% en las categorías de impacto que comprenden el trabajo civil asociado al consumo de diésel como el cambio climático.

(Petit-Boix et al., 2015) aplicaron el ACV para evaluar el comportamiento ambiental de tres materiales de tubería (concreto, PVC y PEAD) y diferentes tipos de cimentación. Dividieron las etapas del ciclo de vida en dos. El primer subsistema corresponde al flujo de energía y materiales relacionados con la producción de la tubería y su transporte hasta el sitio de su construcción, y el segundo subsistema abarca el tipo de cimentación considerado, la energía y los materiales necesarios para la instalación de la tubería, el transporte del material hasta la obra y el transporte del suelo excavado hasta su sitio de disposición. Los resultados del estudio indican que: reutilizar el material excavado genera importantes ahorros ambientales en comparación con reemplazar el suelo nativo con materiales recién extraídos. Una planificación a largo plazo debe tener en cuenta que las tuberías de concreto ofrecen mejores resultados que las tuberías de plástico (PVC y PEAD) para tuberías de gran tamaño durante un periodo de 100 años, ya que son más resistentes a los cambios en las cargas externas, mientras que las tuberías plásticas tienen un mejor comportamiento en un periodo de tiempo tanto corto como largo para diámetros pequeños (300 y 500mm).

(Morera et al., 2016) implementaron el ACV para comparar el impacto ambiental de la construcción y renovación de diferentes tipologías de sistemas de alcantarillado, con el fin de determinar cuál era la etapa, el proceso y los parámetros relativos que contribuían en mayor medida al impacto ambiental. Hicieron énfasis en el análisis de la influencia que tiene la renovación de la tubería en relación con el tiempo de vida útil según el material. Para ello, compararon para cuatro materiales de tubería (PVC, PEAD, concreto y concreto reforzado) con un tiempo de vida útil de  $25 \pm 5$  años,  $40 \pm 10$  años y  $70 \pm 20$  años, respectivamente. Se consideraron diámetros de entre 200 a 1600mm. En el caso de las tuberías de concreto y del exceso de tierra, se consideró su disposición final en vertederos, mientras que, para las tuberías de plástico, se consideró un proceso de recuperación de energía mediante la incineración. Los resultados de este estudio indican que los impactos ambientales generados en la etapa de instalación están principalmente asociados al tendido de la tubería (incluida su fabricación) y al relleno de la zanja. Durante la renovación, además del relleno de la zanja y el tendido de la tubería, la etapa de disposición del suelo de la zanja influyó considerablemente en los resultados. También indican que el impacto ambiental de la construcción y la renovación de la tubería es menor en el caso de las



tuberías de concreto prefabricado y las de PEAD, ya que tienen un mayor periodo de vida útil en comparación con el PVC. Esto se debe a que la producción de tuberías de PVC (por kg de material) tiene un gran impacto en comparación con el de otros materiales. La gran diferencia entre las tuberías del PVC y las de PEAD se debe a la diferencia de tiempo de vida útil (25 años implican dos renovaciones, mientras que 40 años implican una renovación). La instalación de asfalto sobre la zanja incrementa el impacto ambiental del 20 al 55%. Incluir el proceso de disposición de tuberías de plástico añade un 71% más de impactos sobre el cambio climático, principalmente debido a las emisiones de  $\text{CO}_2$  procedentes de la incineración. La recuperación parcial de la electricidad a partir del poder calorífico de los materiales plásticos incinerados no compensa los impactos negativos de las emisiones generadas durante este proceso. No incluir la renovación de la tubería supondría una subestimación de los impactos de entre el 40 y el 80% para diferentes materiales y diámetros de las tuberías.

(Alsadi & Matthews, 2022) buscan proporcionar una guía para la reducción de las emisiones de  $\text{CO}_2$  y así ayudar a los ingenieros en la toma de decisiones, según los resultados obtenidos indican que la tubería de PCCP emite menos emisiones de carbono al ambiente durante su vida útil en comparación con las tuberías de PEAD y CIPP, debido al ahorro significativo en emisiones de carbono durante la instalación, cuando se utilizan los mismos materiales de relleno. Por el contrario, las tuberías de PEAD presentan emisiones de carbono más altas entre los materiales analizados, debido al grosor de sus paredes. El estudio encontró que al realizar el reciclaje de los materiales se puede minimizar las emisiones de  $\text{CO}_2$ , en un 43% en el caso de tubería de PCCP y en un 60% para las tuberías de PVC Y PEAD. La tubería CIPP no puede reciclarse ya que está compuesto en un 100% por materiales vírgenes. Para la etapa de instalación se comprobó que las emisiones de  $\text{CO}_2$  se pueden reducir utilizando los mismos materiales de relleno y un pavimento de concreto, en lugar de emplear nuevos materiales de lleno y un pavimento asfáltico; la reducción de emisiones es de aproximadamente un 70% con el método de zanja abierta, un 60% con el método de pipe-bursting y un 44% con el método de curado in situ.

(Jato-Espino et al., 2022) implementó el ACV para evaluar los impactos ambientales, económicos e incluyó el impacto social en un caso de estudio. Según los resultados, la etapa de construcción genera un mayor impacto en el cambio climático debido a la alta cantidad de emisiones de GEI en comparación con las etapas de operación y desmantelamiento. La construcción de un sistema de drenaje tradicional provoca un cambio en la dinámica sociocultural de la población y genera alteraciones temporales en sus rutinas.

(Xu et al., 2024) presentaron un análisis del ciclo de vida integral y a nivel nacional en el que identificaron los puntos críticos ambientales en toda China. Los resultados indican que el potencial de calentamiento global del sistema de agua urbana alcanza los 87.4 mil millones de  $\text{kgCO}_{2\text{eq}}$ , cifra comparable con las emisiones de GEI de otros países como Australia, Bulgaria y Finlandia. Señalan que la energía requerida es el principal factor de las emisiones de gases de efecto invernadero,



con un 53.2%, seguido de la construcción de la infraestructura (18.4%) y las emisiones operativas de la etapa de recolección y tratamiento de aguas residuales, que suponen 14.5% del total del potencial del calentamiento global.

### 5.3 Etapa de uso y mantenimiento/ rehabilitación de la tubería

(Kyung et al., 2017) realizaron el análisis del ciclo de vida de un caso de estudio para evaluar las emisiones GEI presentadas como el potencial de calentamiento global. En el estudio se analizaron diferentes materiales (PVC, PE, concreto y hierro fundido) y diámetros de tubería (150, 300, 450, 700 y 900 mm). El total de emisiones de GEI es el resultado de la suma de la energía total requerida durante todas las etapas del ciclo de vida. Las tuberías con mayores diámetros demostraron tener un mayor factor de emisiones de kgCO<sub>2eq</sub> por metro lineal debido a que se requiere una gran cantidad de materiales para su fabricación. Se observó que el incremento de las emisiones relacionado con el aumento del diámetro varía en función del material. Las tuberías de hierro fundido, PE y concreto demostraron un incremento 6.4, 5.5 y 4.2 veces, respectivamente, al cambiar el diámetro de 300 a 900mm. Se estableció que las tuberías de plástico no son competitivas entre las de gran diámetro, ya que están fabricadas con derivados del petróleo. Los resultados indicaron que la etapa de operación es la que más contribuye a las de emisiones de GEI (3.51 x 10<sup>4</sup> t CO<sub>2eq</sub> por año) en el caso de estudio, debido a la generación de metano dentro de la tubería de alcantarillado y al consumo energético eléctrico para el funcionamiento del sistema de bombeo. La segunda etapa con mayor cantidad de emisiones de GEI es la etapa de fabricación (9.10 x 10<sup>3</sup> t CO<sub>2eq</sub> por año).

(Chohan et al., 2023) compararon el análisis del ciclo de vida de tres tipos de materiales (acero al carbono, PEAD y concreto). La etapa que más contribuye al potencial de calentamiento global es la etapa de uso, debido a la energía requerida para los sistemas de bombeo, el consumo energético y la producción de emisiones por los procedimientos de reparación e inspección, y finalmente, el consumo energético debido a la rehabilitación del sistema. Las tuberías de acero al carbono tienen un mayor impacto ambiental que las de PEAD y concreto durante la etapa operativa debido a la pérdida de fricción. La segunda etapa con mayor contribución es la fabricación de la tubería. La etapa del transporte y la evaluación de las emisiones de CO<sub>2</sub> están directamente relacionadas con la distancia entre el sitio de fabricación y el sitio de instalación, debido al peso del concreto hace que el transporte de tuberías de este material tenga mayor PCG en comparación con los otros. Al comparar los dos métodos implementados en la instalación de tuberías (zanja a abierta y sin zanja abierta), se estableció que las emisiones pueden reducirse en un 80% en comparación con las técnicas de zanja abierta.

(Sharif et al., 2024) evaluaron los impactos ambientales y la huella de carbono asociados a la etapa de mantenimiento y rehabilitación de cuatro tipos de tuberías (concreto, concreto reforzado, PVC y arcilla vitrificada). Se evaluaron las siguientes técnicas de mantenimiento o reparación:



reemplazo de tuberías mediante zanja abierta, rehabilitación sin zanja, reparación puntual mediante zanja abierta, reparación puntual sin zanja, limpieza hidráulica e inspección mediante CCTV. Al evaluar el reemplazo de tuberías mediante zanja abierta, se observó que las sustituciones de tuberías de concreto presentaron los valores más bajos de HC, mientras que el uso de tuberías de concreto reforzado resultó ser la peor opción. La rehabilitación sin zanja es mucho más sostenible que la rehabilitación con zanja abierta, ya que no es necesario reconstruir del pavimento. Cuando no es necesario rehabilitar el pavimento, el reemplazo con zanja abierta y la rehabilitación con CIPP presentan un desempeño similar en términos de huella de carbono. Para las reparaciones puntuales, se recomienda utilizar tecnologías sin zanja, ya que permiten reducir significativamente la huella de carbono. Los impactos ambientales de la etapa de mantenimiento y rehabilitación están dominados por la etapa de producción de materiales. Sin embargo, en el caso de las reparaciones puntuales, las etapas de transporte y limpieza de tuberías tienen una contribución significativa.

(Yu et al., 2025) evaluaron las emisiones de carbono de dos técnicas de reparación con y sin excavación. Se evaluaron las emisiones de tres materiales (PCCPE, PVC y CIPP). Las emisiones de CO<sub>2</sub> producidas por el CIPP son mayores en comparación con las del PCCPE y el PVC. La resina de los materiales de la tubería CIPP y el cilindro de acero de los materiales de la tubería PCCPE representan el 77.3% y el 42.5%, respectivamente, del total de las emisiones de carbono. El uso excesivo de materiales refinados o altamente procesados incrementa las emisiones totales de carbono. Por lo tanto, al seleccionar una técnica de reparación de tuberías, es esencial tener en cuenta las emisiones de carbono de los distintos materiales para minimizar el impacto ambiental global.

#### 5.4 Impacto económico

Según (Morera et al., 2016), el análisis del costo del ciclo de vida indica que, al estudiar las diferentes etapas, se observa que la etapa de construcción y relleno, que incluye el costo de la arena granítica, la maquinaria, el agua utilizada y la mano de obra, es la etapa más costosa, seguida de la instalación de las tuberías, que también considera la tubería, la maquinaria, el agua y la mano de obra. Recomienda incluir los costos de renovación, ya que se ha demostrado que son superiores a los de la construcción, puesto que cada vez que se renueva es necesario adquirir tubería nueva. También indica que las etapas que tienen una mayor contribución al impacto ambiental son las más costosas.

(Roghani et al., 2017) evaluaron el flujo monetario de los materiales involucrados en la fabricación de una tubería y concluyeron que el costo de la fabricación de las tuberías de PEAD es mayor que el de las tuberías de concreto. Para ello, utilizaron el modelo Carnegie Mellon. En este artículo se plantean los costos forestales equivalentes para la captura de CO<sub>2</sub> emitido durante la etapa de fabricación e instalación de la tubería, para diámetros de tubería de 200 a 350 mm. El costo para



crear espacios verdes es aproximadamente el mismo para los dos tipos de materiales, para los diámetros de 200 y 250 mm. Sin embargo, cuando los diámetros son de 300 y 350 mm, los costos de la tubería de concreto es aproximadamente 800 dólares superior al de las de PEAD. En general, los costos específicos aumentan a medida que las tuberías envejecen.

(Nguyen et al., 2020) calcularon el costo del ciclo de vida utilizando el valor actual neto (VAN) que incluye las cuatro etapas principales: producción, instalación, mantenimiento (o sustitución) y fin de la vida útil. La tubería de PEAD virgen presenta el menor valor actual neto entre todas las alternativas. El reciclaje mecánico tiene el VAN más alto en comparación con la disposición en vertedero. El estudio concluye que la etapa de mantenimiento anual supone aproximadamente el 38% del costo total del ciclo de vida de la tubería.

(Jato-Espino et al., 2022) el análisis del costo del ciclo de vida se centró en el valor actual neto, que representa el costo total de un proyecto a lo largo de su vida útil. Como lo indican en el artículo, el VAN está en función de la tasa de descuento y el periodo útil del sistema. Determinaron los impactos económicos como la suma de los costos de la construcción, operación y desmantelamiento de un sistema de drenaje. Según el estudio, los costos de operación (56.82 %) superan a los costos de la construcción (43.15 %) y a los costos derivados del desmantelamiento (0.03 %). Los costos de mantenimiento son los costos más divergentes en el análisis

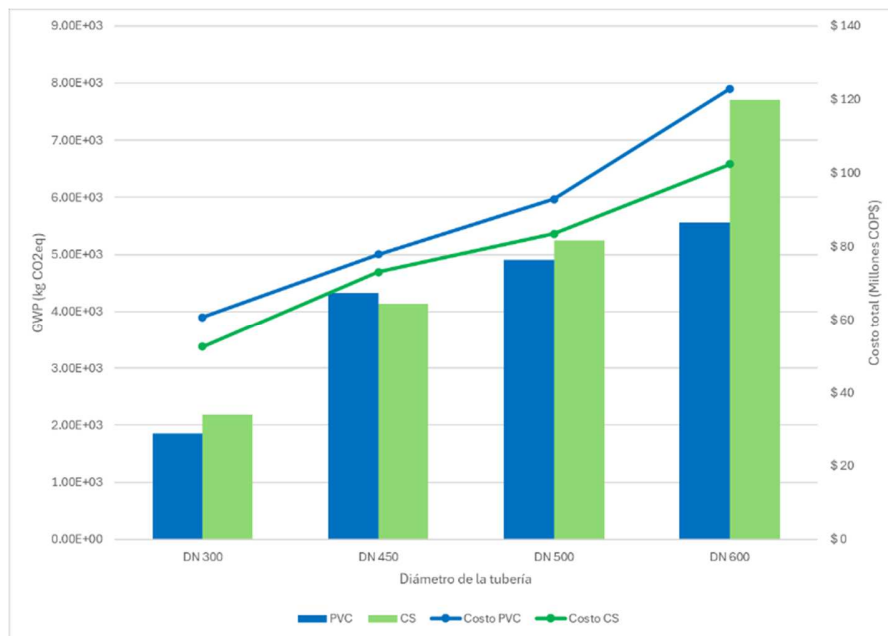


## 6 ANÁLISIS COMPARATIVO

Según la revisión bibliográfica, y como se mencionó anteriormente, en Latinoamérica no se ha realizado el análisis del ciclo de vida ni el análisis de costos de las redes de alcantarillado. Con el fin de aplicar las recomendaciones de los autores consultados, se realizó un análisis del ciclo de vida de un sistema de alcantarillado ubicado en la ciudad de Bogotá, Colombia. El estudio se llevó a cabo para los dos tipos de materiales más estudiados por los autores: el PVC y concreto simple. Las etapas analizadas fueron las siguientes: fabricación, transporte, instalación, operación/mantenimiento y disposición final. La unidad funcional aplicada en este análisis está definida como: una sección de una red de alcantarillado por gravedad con una longitud de 100 m y cuatro diámetros nominales de 300 mm, 450 mm, 500 mm y 600 mm, que opera en condiciones normales durante un periodo de 50 años y se les realiza una limpieza y mantenimiento a los 25 años de operación. Las emisiones de gases de efecto invernadero se expresan en términos de  $CO_{2eq}$ , usando el potencial de calentamiento global. Para evaluar del impacto ambiental, se utilizaron diferentes bases de datos y especificaciones de productos. Se siguieron las directrices y los precios para la construcción de alcantarillados de la Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá (EAAB, 2025). En la Tabla 2 se muestran los supuestos y las implicaciones para realizar el análisis del ciclo de vida y del costo total. La comparación de los resultados del ACV y del costo total para diferentes diámetros de tuberías de PVC y concreto se observan en la Figura 4, donde se pueden corroborar algunas de las afirmaciones de los autores, como que las emisiones de  $CO_2$  aumentan con el diámetro de la tubería y que, para diámetros superiores a 450 mm, se debe analizar el material a utilizar debido a los costos durante todo su ciclo de vida.


**Tabla 2| Resumen de supuesto y simplificaciones para el ACV y ACCV para diferentes sistemas de tuberías**

Etapa	Análisis del ciclo de vida		Análisis del costo del ciclo de vida	
	Incluido	Excluido	Incluido	Excluido
<b>Fabricación</b>	Extracción de materia prima	x, la fabricación y mantenimiento de la maquinaria		x
	Manufactura de la materia	x		x
<b>Instalación</b>	Fabricación de la tubería		x	
	Transporte de la tubería	Tipo de vehículo, distancia de la fábrica al sitio y consumo de gasolina	Producción y mantenimiento del vehículo	x
	Instalación de la tubería	Maquinaria, transporte de materias primas, pavimentación	Producción y mantenimiento de equipos	x
<b>Operación</b>	Operación			x
	Reparación / rehabilitación			x
<b>Disposición</b>	Limpieza/mantenimiento		x	
	Reemplazo de la tubería		x	x
	Reciclaje de la tubería		x	x
	Disposición de la tubería	x, transporte del material a sitios de disposición de la tubería	Procesos para transformación	x


**Figura 4| Análisis del ciclo de vida y el costo total para un sistema de alcantarillado para tubería de PVC y Concreto (100m, diámetros de 300, 450, 500 y 600 mm)**



## 7 DISCUSIÓN

El impacto ambiental de los sistemas de alcantarillado ha experimentado un avance notable durante la década. Esto se ha logrado mediante la medición de las emisiones de gases de efecto invernadero, utilizando métodos como el análisis del ciclo de vida y el balance de masa. La revisión bibliográfica ha revelado deficiencias y limitaciones en la integración óptima de estos sistemas en el diseño y la reducción de costos para las redes de alcantarillado, lo que puede ser útil para quienes toman decisiones.

La revisión de las publicaciones identificó que la metodología más comúnmente aceptada para medir las emisiones de gases de efecto invernadero es la norma ISO 14040, ya que el 60% de los autores la implementaron. La evaluación de los impactos ambientales se realizó principalmente mediante el método ReCiPe, que evalúa categorías como la del impacto del cambio climático, y que es un método reconocido a nivel internacional.

Es crucial establecer claramente los límites del sistema y la unidad funcional desde el inicio de la evaluación, ya que, aunque no sean comparables entre las publicaciones, se ha observado que, sin una unidad funcional bien definida, los resultados del ACV pueden ser engañosos e indicar conclusiones erróneas sobre el impacto ambiental. Establecer un tiempo de vida útil repercute en la cantidad de veces que un sistema requiere mantenimiento o reparación/rehabilitación, y con ello se puede omitir o incluir la demanda de energía y las emisiones de gases de efecto invernadero durante el análisis del ciclo de vida. De la misma manera, si se excluye una etapa del ciclo de vida, los resultados del análisis de dicho ciclo pueden variar. Según la revisión de las publicaciones, al no tener en cuenta la etapa de uso y mantenimiento/reparación de las tuberías, se omiten las emisiones emitidas y la energía requerida por los procesos. Aunque muchos de los autores están de acuerdo en que el uso de sistemas de redes de alcantarillado por gravedad no genera emisiones de CO<sub>2</sub>, el hecho de no contemplar el mantenimiento o la reparación del sistema deja por fuera la cuantificación de las emisiones debidas al transporte de materias primas, la adquisición de tuberías nuevas, el transporte del suelo del lugar de intervención a otros lugares para su disposición, el uso de maquinarias y la repavimentación del lugar de intervención. Además, se determinó que la decisión de mantener la tubería en su lugar al final del proceso afecta la capacidad de medir la energía recuperada durante la extracción de la materia prima, ya sea a través del reciclaje de la tubería o de medir las emisiones de gases de efecto invernadero y la demanda de energía en estos procesos. Los estudios en los que no se incorporaba alguna de las etapas previamente indicaban señalaban que la etapa de extracción de materia prima y fabricación de la tubería generaba la mayor cantidad de gases de efecto invernadero. Ninguno de



los autores consideró que la etapa de transporte o de disposición final fuese la que más contribuía a las emisiones de dióxido de carbono, como se pudo observar.

El material de la tubería resulta ser uno de los factores determinantes para el rumbo de las investigaciones, ya que, dependiendo de este, se puede establecer un periodo de vida útil, el requerimiento de cimentación e instalación de la tubería y los posibles mantenimientos y reparaciones durante su ciclo de vida. Una de las principales conclusiones de esta investigación fue la identificación del material más estudiado, ya que, a lo largo de la revisión, se identificó que se estudiaron quince tipos de materiales para tuberías, siendo el PVC el que más estudiaron los autores, con un 21 %, seguido del concreto, con un 20 %, y de la tubería de PEAD, con un 16 %. El material que más emisiones de CO<sub>2</sub> provoca, según los resultados de las investigaciones, es el hierro dúctil, debido a la gran cantidad de materia y energía que se requiere en el proceso de fundición.

Los estudios sugieren que, cuando se realiza una comparación directa entre las tuberías de PVC y las tuberías de concreto, las primeras tienen un mejor comportamiento durante su vida útil cuando se utilizan diámetros de hasta 450 mm y que, en este caso, las emisiones de CO<sub>2</sub> son menores en el proceso de fabricación. Sin embargo, al aumentar los diámetros, las emisiones de CO<sub>2</sub> aumentan considerablemente debido a la cantidad de resina y combustibles fósiles necesarios para su fabricación. Este material es uno de los más recomendados, debido a su bajo costo en comparación con los otros materiales, considerando lo anteriormente expuesto. Por otra parte, los autores recomiendan utilizar tuberías de concreto cuando se requieran diámetros superiores a 450 mm, cuando estén expuestas a grandes cargas externas o cuando se requieran modificaciones superficiales, como la reparación de calzadas, ya que el sistema podría tener un período de vida útil más largo, lo que impacta directamente en las etapas de reparación, reemplazo y disposición de la tubería y lo que conlleva a una disminución de los costos y de las emisiones durante su ciclo de vida.

Evaluar todos los costos asociados a un sistema de alcantarillado, permite tomar decisiones sobre la opción económicamente más eficiente durante su diseño. Sin embargo, integrar el análisis del ciclo de vida y el costo del ciclo de vida permite encontrar la solución más sostenible a lo largo de un periodo determinado. Tan solo el 20% de las publicaciones revisadas realizaron el análisis de los costos. Existen diferentes metodologías para analizar los costos del sistema de alcantarillado; la más implementada fue el cálculo del valor presente neto (VPN), que permite analizar los costos que se podrían ocurrir en el futuro y realizar comparaciones directas entre materiales de tubería, técnicas constructivas, estrategias de mantenimiento y disposición final de la tubería. Por otro lado, también se pueden monetizar las emisiones de CO<sub>2</sub> usando un precio del carbono para obtener un costo total monetizado. Autores como (Roghani et al., 2017), evaluaron el costo forestal equivalente para la captura de CO<sub>2</sub>, que representa un valor monetario estimado que tendría que compensar la captura de emisiones mediante proyectos forestales.



Es necesario tener en cuenta la importancia del error debido a la incertidumbre de los parámetros y escenarios estudiados previamente, ya que solo algunos parámetros contienen estimaciones puntuales. Esto supone una limitación y afecta a las métricas del ciclo de vida, por lo que una comparación entre los diferentes análisis del ciclo de vida suele ser difícil debido a los diferentes alcances y supuestos en las unidades funcionales, que rara vez son los mismos.



## 8 CONCLUSIONES

Este documento presenta una revisión priorizada del estado actual de la investigación sobre la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero, especialmente dióxido de carbono, y la disminución de los costos asociados a los sistemas de redes de alcantarillado urbano a lo largo de su ciclo de la vida. En la revisión de la literatura se pudieron destacar diferentes recomendaciones y retos para llevar a cabo el ACV. A continuación, se presenta un resumen de estas:

- Es fundamental establecer desde el principio el alcance y el objetivo del estudio, así como la unidad funcional. Un planteamiento inicial erróneo puede dar lugar a resultados poco confiables
- Es necesario realizar el análisis del ciclo de vida del sistema en todas sus etapas, sin exclusión alguna. Si no se evalúa una de las etapas, se cambia el rumbo de la investigación y los resultados de esta.
- Se debe contar con una base de datos fiable, ya que, dependiendo de los datos de entradas, se obtienen resultados precisos.
- Aunque las suposiciones son inevitables en este tipo de análisis, se ha comprobado que, si no se tienen datos certeros, el resultado tendrá un mayor margen de error debido a la incertidumbre.

Es importante que los responsables de la toma de decisiones tengan una visión amplia de la implicación del diseño, la construcción, el uso, y el desmantelamiento de un sistema de alcantarillado. En el pasado, se han utilizado algoritmos genéticos y programación lineal (Duque et al., 2020) para optimizar las redes de alcantarillado. Sin embargo, es necesario tener en cuenta la integridad de todos los aspectos: hidráulicos, económicos, ambientales y sociales, ya que estas decisiones son relevantes para el desarrollo urbano y, en consecuencia, contribuirán a la planificación general de una infraestructura más sostenible.

En el mundo existen diferentes marcos jurídicos que regulan, autorizan u obligan a compensar las emisiones de CO<sub>2</sub> mediante la captura y absorción de carbono. También existe un mercado de créditos de carbono diseñado para reducir las emisiones de GEI. En este mercado, los gobiernos establecen un máximo de emisiones que una empresa puede emitir. Si la empresa emite menos de lo establecido, puede vender los créditos; pero, si se excede, debe comprarlos o asumir una multa.

La Ley 2169 de 2021 establece las metas y medidas mínimas en materia de neutralidad de carbono para Colombia (Congreso de la República, 2021). Una de las medidas establecidas en esta Ley es promover la reducción de GEI a partir del aumento de la cobertura de la gestión de las aguas



residuales domésticas. La aplicación del análisis del ciclo vida y del costo del sistema de alcantarillado permite garantizar el logro de metas como la anteriormente mencionada y la posibilidad de brindar un servicio básico a las personas.



## 9 AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen el apoyo de herramientas de inteligencia artificial utilizadas únicamente para apoyo en la traducción de los artículos y asistencia en redacción. Todas las interpretaciones, análisis y conclusiones del estudio fueron realizadas por los autores.



## 10 REFERENCIAS

- Akhtar, S., Reza, B., Hewage, K., Shahriar, A., Zargar, A., & Sadiq, R. (2014). Life cycle sustainability assessment (LCSA) for selection of sewer pipe materials. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 17(4). <https://doi.org/10.1007/s10098-014-0849-x>
- Alsabri, A., & Al-Ghamdi, S. G. (2020). Carbon footprint and embodied energy of PVC, PE, and PP piping: Perspective on environmental performance. *Energy Reports*, 6, 364–370. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2020.11.173>
- Alsadi, A. A., & Matthews, J. C. (2022). Reduction of Carbon Emission Is Optimized During the Life Cycle of Commonly Used Force Main Pipe Materials. *Frontiers in Water*, 4. <https://doi.org/10.3389/frwa.2022.735519>
- Alsadi, A., Matthews, J. C., & Matthews, E. (2020). Environmental Impact Assessment of the Fabrication of Pipe Rehabilitation Materials. *Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice*, 11(1). [https://doi.org/10.1061/\(asce\)ps.1949-1204.0000395](https://doi.org/10.1061/(asce)ps.1949-1204.0000395)
- Asadollahfardi, G., Panahandeh, A., Moghadam, E. I., Masoumi, S., & Tayebi Jebeli, M. (2023). Environmental life cycle assessment of different types of the municipal wastewater pipeline network. *Environmental Quality Management*, 32(3), 97–110. <https://doi.org/10.1002/tqem.21864>
- Chohan, I. M., Ahmad, A., Sallih, N., Bheel, N., Ali, M., & Deifalla, A. F. (2023). A review on life cycle assessment of different pipeline materials. *Results in Engineering*, 19. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2023.101325>
- Congreso de la República. (2021). Ley 2169 de 2021. Bogotá, Colombia. Obtenido de Sistema Único de Información Normativa.
- Du, F., Woods, G. J., Kang, D., Lansey, K. E., & Arnold, R. G. (2013). Life Cycle Analysis for Water and Wastewater Pipe Materials. *Journal of Environmental Engineering*, 139(5), 703–711. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)ee.1943-7870.0000638](https://doi.org/10.1061/(asce)ee.1943-7870.0000638)
- Duque, N., Duque, D., Aguilar, A., & Saldarriaga, J. (2020). Sewer network layout selection and hydraulic design using a mathematical optimization framework. *Water (Switzerland)*, 12(12). <https://doi.org/10.3390/w12123337>
- EAAB. (noviembre de 2025). Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá. Obtenido de [https://www.acueducto.com.co/wps/portal/EAB2/Home/inicio!ut/p/z1/hY5BC4JAEIV\\_iwev](https://www.acueducto.com.co/wps/portal/EAB2/Home/inicio!ut/p/z1/hY5BC4JAEIV_iwev)



zrRLYt22DoJEshJkewm1TQ11ZV3177fQKdjowRzmzfeGBwJyEEOxtHVhWjJUUnd1vIryH\_libCMkZeYbl-

Franklin Associates. (2021). Life Cycle Assessment of North American Stormwater Pipe Systems. <https://www.plasticpipe.org/>

IPCC. (2019). 2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories (Vol. Volume 5: Waste). (L. B. In H. S. Eggleston, Ed.) 5: Waste. Obtenido de <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2019rf/vol5.html>

ISO 14040. (2006). Environmental Management - Life Cycle Assessment – Principles and Framework: International Standard 14040. Geneva: International Organization for Standardization.

Jato-Espino, D., Toro-Huertas, E. I., & Güereca, L. P. (2022). Lifecycle sustainability assessment for the comparison of traditional and sustainable drainage systems. *Science of the Total Environment*, 817. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.152959>

Jeroen Wassenaar. (2016). Polypropylene Materials for Sewerage & Drainage Pipes with Reduced Energy and Carbon Footprints. *Journal of Materials Science and Engineering B*, 6(6). <https://doi.org/10.17265/2161-6221/2016.11-12.003>

Kyung, D., Kim, D., Yi, S., Choi, W., & Lee, W. (2017). Estimation of greenhouse gas emissions from sewer pipeline system. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 22(12), 1901–1911. <https://doi.org/10.1007/s11367-017-1288-9>

Loubet, P., Roux, P., Loiseau, E., & Bellon-Maurel, V. (2014). Life cycle assessments of urban water systems: A comparative analysis of selected peer-reviewed literature. In *Water Research* (Vol. 67, pp. 187–202). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2014.08.048>

Morera, S., Remy, C., Comas, J., & Corominas, L. (2016). Life cycle assessment of construction and renovation of sewer systems using a detailed inventory tool. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 21(8), 1121–1133. <https://doi.org/10.1007/s11367-016-1078-9>

Nguyen, L. K., Na, S., Hsuan, Y. G., & Spatari, S. (2020). Uncertainty in the life cycle greenhouse gas emissions and costs of HDPE pipe alternatives. *Resources, Conservation and Recycling*, 154. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2019.104602>

Petit-Boix, A., Roigé, N., de la Fuente, A., Pujadas, P., Gabarrell, X., Rieradevall, J., & Josa, A. (2015). Integrated Structural Analysis and Life Cycle Assessment of Equivalent Trench-Pipe Systems for Sewerage. *Water Resources Management*, 30(3), 1117–1130. <https://doi.org/10.1007/s11269-015-1214-5>



Piratla, K. R., Ariaratnam, S. T., & Cohen, A. (2012). Estimation of CO<sub>2</sub> Emissions from the Life Cycle of a Potable Water Pipeline Project. *Journal of Management in Engineering*, 28(1), 22–30. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)me.1943-5479.0000069](https://doi.org/10.1061/(asce)me.1943-5479.0000069)

Risch, E., Gutierrez, O., Roux, P., Boutin, C., & Corominas, L. (2015). Life cycle assessment of urban wastewater systems: Quantifying the relative contribution of sewer systems. *Water Research*, 77, 35–48. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2015.03.006>

Roghani, B., Tabesh, M., Amrollahi, M. S., & Venkatesh, G. (2017). Estimation and Evaluation of Greenhouse Gas Emissions during the Life-Cycle of Wastewater Pipelines: Case Study of Tehran, Iran. *Civil Engineering Infrastructures Journal*, 50(1), 191–206. <https://doi.org/10.7508/ceij.2017.01.012>

Sharif, O., Santos, J., Wonink, P., & Molegraaf, H. (2024). Carbon footprint assessment of maintenance and rehabilitation techniques for sewer systems. *Civil Engineering and Environmental Systems*, 41(1–2), 20–43. <https://doi.org/10.1080/10286608.2024.2373768>

UNICEF & WHO. (2023). Progress on household drinking water, sanitation and hygiene/hygiene 2000-2022: special focus on gender. <https://washdata.org>

Vahidi, E., Jin, E., Das, M., Singh, M., & Zhao, F. (2015). Comparative Life Cycle Analysis of Materials in Wastewater Piping Systems. *Procedia Engineering*, 118, 1177–1188. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.08.461>

Vahidi, E., Jin, E., Das, M., Singh, M., & Zhao, F. (2016). Environmental life cycle analysis of pipe materials for sewer systems. *Sustainable Cities and Society*, 27, 167–174. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2016.06.028>

Xu, H., Fu, G., Ye, Q., Lyu, M., & Yan, X. (2024). Life cycle environmental impacts of urban water systems in China. *Water Research*, 266. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2024.122350>

Yongliang Jin. (2019). Estimating life cycle emissions in managing practical sewer pipeline projects. *Journal of Environmental Management*, 231, 605–611. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.10.055>

Yu, X., Hu, X., Xie, W., Pan, A., Li, X., & Wang, H. (2025). Carbon emission modeling of excavation and non-excavation techniques in overall repair of drainage pipelines. *Systems and Soft Computing*, 7. <https://doi.org/10.1016/j.sasc.2025.200213>