

TESIS DE MAESTRÍA (Tesis 02)

**ESTADO DEL ARTE DE LOS COSTOS DE TONELADAS DE CARBONO
EQUIVALENTE PARA SER INCLUIDOS EN DISEÑOS MULTIOBJETIVO DE
SISTEMAS HIDRÁULICOS URBANOS**

Andrés David Ariza Mesa

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.
ENERO, 2022**

AGRADECIMIENTOS

A Dios,
a mis papás y mi hermano por su apoyo incondicional en todo este proceso,
a mi asesor Juan Saldarriaga por su guía y dedicación,
y a todos los que aportaron con ideas, información y asesoramiento para culminar este trabajo,

Gracias



TABLA DE CONTENIDO

1.	INTRODUCCIÓN	9
1.1.	Introducción	9
1.2.	Objetivos	11
1.2.1.	Objetivo General	11
1.2.2.	Objetivos Específicos	11
2.	MARCO TEÓRICO	12
2.1	Determinantes de impacto ambiental	12
2.1.1.	Carbono equivalente	12
2.1.2.	Análisis de Ciclo de Vida	13
2.1.3.	Huella de carbono	16
2.2.	Sistemas hidráulicos urbano	17
2.2.1.	Tipos de sistemas hidráulico urbano	18
2.2.2.	Materiales	19
2.2.3.	Métodos de instalación	26
3.	MARCO METODOLÓGICO	31
3.1.	Establecimiento del estado del arte	32
3.2.	Planteamiento de caso de estudio	32
3.3.	Modelación computacional	33
4.	ESTADO DEL ARTE	34
4.1.	Emissiones de CO ₂ por etapas de ciclo de vida en sistemas hidráulicos urbanos	34
4.1.1.	Fabricación y manufactura	34
4.1.2.	Transporte	39
4.1.3.	Instalación	42
4.1.4.	Operación	48
4.1.5.	Disposición y/o reutilización	51
4.1.6.	Resultados generales de Análisis de Ciclo de Vida	52
5.	CASO DE ESTUDIO	58
5.1.	Ubicación	58



5.2.	Selección de materiales.....	59
5.3.	Determinación de variables base	60
6.	MODELACIÓN DE CASO DE ESTUDIO.....	62
6.1.	Fabricación.....	62
6.1.1.	Acero	62
6.1.2.	Concreto	66
6.1.3.	PVC	69
6.1.4.	Escenario de PVC reciclado.....	73
6.1.5.	HDPE	75
6.1.6.	PP	77
6.1.7.	DI	79
6.2.	Transporte	80
6.3.	Instalación.....	81
6.4.	Operación.....	85
6.4.1.	Escenario 1 – Sistema con bombeo.....	85
6.4.2.	Escenario 2 – Mantenimiento del sistema.....	90
6.5.	Reciclaje.....	92
7.	RESULTADOS Y ANÁLISIS.....	94
7.1.	Fabricación.....	94
7.2.	Transporte	97
7.3.	Instalación.....	99
7.4.	Operación.....	102
7.5.	Reciclaje.....	104
7.6.	Resultados generales.....	106
7.7.	Compensación.....	110
8.	CONCLUSIONES	114
9.	RECOMENDACIONES	117
10.	REFERENCIAS	118
11.	ANEXOS	124

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1. Marco de referencial del ACV. Tomado de: ICONTEC. (2007).....	14
Ilustración 2. Tuberías de hierro dúctil. Tomado de: PAM. (2021).....	20
Ilustración 3. Tuberías de concreto. Tomado de: Argos. (2020).	21
Ilustración 4. Tuberías de Arcilla Vitrificada. Tomado de: Jannone. (S,f).....	22
Ilustración 5. Tuberías de PVC. Tomado de: PAVCO. (2019).....	23
Ilustración 6. Tuberías de HDPE. Tomado de: PAVCO. (2019).....	23
Ilustración 7. Tuberías de Acero. Tomado de: Accesorios de Bridas. (2019).	24
Ilustración 8. Tuberías de Polipropileno. Tomado de: Todo Ferretería. (2019).	25
Ilustración 9. Tuberías de FRP. Tomado de: Cosmos. (S,f).	26
Ilustración 10. Proceso de instalación a cielo abierto. Tomado de: Alarcón, J., & Pacheco, J. (2014).....	27
Ilustración 11. Esquema de proceso de Pipe bursting. Tomado de: Pinzón, J. (2011).	28
Ilustración 12. Esquema de proceso de Hincado de tuberías. Tomado de: Yepes, V. (2015).	29
Ilustración 13. Esquema de proceso de perforación con tornillos Sin-fin. Tomado de: Perforaciones e Ingeniería. (2015).	29
Ilustración 14. Esquema de proceso de Tuberías curadas in situ. Tomado de: Hidrotec. (2016).....	30
Ilustración 15. Esquema de proceso de Perforación horizontal dirigida. Tomado de: Brightway. (2018).....	30
Ilustración 16. Esquema de metodología general de la investigación	31
Ilustración 17. Esquema de proceso para establecer el estado del arte.....	32
Ilustración 18. Esquema de datos base para el caso de estudio	33
Ilustración 19. Resultados del análisis de ciclo de vida para el estudio de Piratla et al. (2012).....	52
Ilustración 20. Resultados del análisis de ciclo de vida para el estudio de Du et al. (2013).....	53
Ilustración 21. Resultados de categorías de impacto ambiental reportados por Petit-Boix et al. (2015).....	54
Ilustración 22. Resultados de categorías de impacto ambiental reportados por Vahidi et al. (2015).....	55
Ilustración 23. Resultados del análisis de ciclo de vida para el estudio de Chilana et al. (2016).....	55
Ilustración 24. Resultados del análisis de ciclo de vida para el estudio de Nandyala et al. (2019).....	56
Ilustración 25. Resultados del análisis de ciclo de vida para el estudio de Alsadi et al. (2020b).....	57
Ilustración 26. Vista satelital del punto de localización del caso de estudio	58
Ilustración 27. Esquema de transporte para la fabricación de tuberías de Acero	63



Ilustración 28. Esquema de transporte para la fabricación de tuberías de Concreto.....	68
Ilustración 29. Esquema de transporte para la fabricación de tuberías de PVC	71
Ilustración 30. Esquema de transporte para la fabricación de tuberías de HDPE.....	76
Ilustración 31. Interfaz principal del programa Trenchless-Technology-Calculator	81
Ilustración 32. Geometría de la zanja general para todos los materiales	82
Ilustración 33. Tabla de presentación de resultados con método de instalación a cielo abierto	84
Ilustración 34. Tabla de presentación de resultados con método de Pipe bursting.....	85
Ilustración 35. Esquema de transporte del camión tipo Vector	91
Ilustración 36. Esquema de transporte de reciclaje - Concreto.....	93
Ilustración 37. Esquemas de transporte de reciclaje – PVC, HDPE y PP (Izquierda) – Acero y DI (Derecha) 93	
Ilustración 38. Resultados E. Fabricación - D:250 mm	95
Ilustración 39. Resultados E. Fabricación - D:350 mm	95
Ilustración 40. Resultados E. Fabricación - D:700 mm	96
Ilustración 41. Resultados E. Fabricación - D:900 mm	96
Ilustración 42. Resultados E. Transporte - D:250 mm.....	98
Ilustración 43. Resultados E. Transporte - D:350 mm.....	98
Ilustración 44. Resultados E. Transporte - D:700 mm.....	98
Ilustración 45. Resultados E. Transporte - D:900 mm.....	98
Ilustración 46. Resultados E. Instalación - D:250 mm	100
Ilustración 47. Resultados E. Instalación - D:350 mm	100
Ilustración 48. Resultados E. Instalación - D:700 mm	101
Ilustración 49. Resultados E. Instalación - D:900 mm	101
Ilustración 50. Resultados E. Operación - D:250 mm	103
Ilustración 51. Resultados E. Operación - D:350 mm	103
Ilustración 52. Resultados E. Operación - D:700 mm y 900 mm	103
Ilustración 53. Resultados E. Reciclaje - D:250 mm	105
Ilustración 54. Resultados E. Reciclaje - D:350 mm	105
Ilustración 55. Resultados E. Reciclaje - D:700 mm	106
Ilustración 56. Resultados E. Reciclaje - D:900 mm	106
Ilustración 57. Resultados de emisiones totales de tuberías de 250 mm	107



Ilustración 58. Resultados de emisiones totales de tuberías de 350 mm	108
Ilustración 59. Resultados de emisiones totales de tuberías de 700 mm	109
Ilustración 60. Resultados de emisiones totales de tuberías de 900 mm	109
Ilustración 61. Compensación de huella de carbono según norma colombiana	112
Ilustración 62. Compensación de huella de carbono según norma europea	112
Ilustración 63. Compensación de huella de carbono según promedio mundial.....	113



ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Ventajas y desventajas del método de instalación a cielo abierto.....	27
Tabla 2. Nomenclatura de materiales.....	34
Tabla 3. Resultados de estudios de ciclo de vida - Etapa de fabricación.....	35
Tabla 4. Resultados de estudios de ciclo de vida - Etapa de transporte.....	40
Tabla 5. Nomenclatura de métodos de instalación	42
Tabla 6. Resultados de estudios de ciclo de vida - Etapa de instalación	43
Tabla 7. Resultados de estudios de ciclo de vida - Etapa de operación.....	49
Tabla 8. Resultados de estudios de ciclo de vida - Etapa de disposición final	51
Tabla 9. Resultados de emisiones y costos de CO ₂ reportados por Khan, L., & Tee, K. (2015).....	53
Tabla 10. Resultados del análisis de ciclo de vida para el estudio de Hajibabaei et al. (2019).....	56
Tabla 11. Aspectos incluidos y excluidos de cada etapa de análisis.....	61
Tabla 12. Cálculos de peso y consumo energético para la producción de tuberías de Acero.....	62
Tabla 13. Resultados de la estimación de tKm según la ruta para diámetros de 250 y 350 mm – Acero	64
Tabla 14. Resultados de la estimación de tKm según la ruta para diámetros de 700 y 900 mm - Acero.....	64
Tabla 15. Especificación de selección de procesos en Simapro para la fabricación de tuberías de Acero.....	64
Tabla 16. Mix de energía montado en Simapro	65
Tabla 17. Datos de peso y volumen de concreto y acero requeridos para la fabricación de los ductos	66
Tabla 18. Datos de consumo energético y de agua para la producción de concreto.....	67
Tabla 19. Consumo energético y de agua para la producción de los tramos totales según el diámetro	67
Tabla 20. Consumo energético para la producción del acero de refuerzo	67
Tabla 21. Resultados de la estimación de tKm según la ruta y para diámetros de 250 y 350 mm – Concreto .	67
Tabla 22. Resultados de la estimación de tKm según la ruta y para diámetros de 700 y 900 mm – Concreto .	68
Tabla 23. Especificación de selección de procesos en Simapro para la fabricación de tuberías de Concreto...	69
Tabla 24. Peso total del tramo de tuberías según el diámetro - PVC.....	69
Tabla 25. Insumos para la fabricación de resina de PVC según el diámetro	70
Tabla 26. Consumo energético y de combustibles para la producción total tuberías de PVC según fabricante	70
Tabla 27. Consumo energético y de combustibles para la fabricación de tuberías de PVC según el diámetro.	70
Tabla 28. Resultados de la estimación de tKm según la ruta para diámetros de 250 y 350 mm – PVC	71
Tabla 29. Resultados de la estimación de tKm según la ruta para diámetros de 700 y 900 mm – PVC	72



Tabla 30. Especificación de selección de procesos en Simapro para la fabricación de tuberías de PVC.....	72
Tabla 31. Distribución de peso de materiales para la fabricación de tuberías de PVC - Escenario de reciclaje	74
Tabla 32. Insumos para la fabricación de resina de PVC según el diámetro – Escenario de reciclaje.....	74
Tabla 33. Determinación de variables de transporte desde punto de fabricación hasta punto de instalación ...	80
Tabla 34. Profundidades de punto inicial y final del sistema	82
Tabla 35. Especificaciones para el cálculo del ancho (B) de la zanja según el material	83
Tabla 36. Valores del ancho de zanja (B) según el diámetro y el material.....	84
Tabla 37. Variables base del sistema para el escenario con bombeo.....	85
Tabla 38. Coeficientes de rugosidad de los materiales	86
Tabla 39. Resultados del cálculo del caudal máximo a transportar en las tuberías	87
Tabla 40. Potencia total de consumo energético por bombeo según el material – D:250 mm	89
Tabla 41. Potencia total de consumo energético por bombeo según el material – D:350 mm	89
Tabla 42. Descripción de consumo energético y de combustible en el proceso de mantenimiento	92
Tabla 43. Especificación de selección de procesos en SimaPro para el mantenimiento	92
Tabla 44. Estimación de distancias de transporte de materiales hasta el punto de aprovechamiento.....	93
Tabla 45. Resultados de emisiones en la Etapa de Fabricación.....	94
Tabla 46. Resultados de emisiones en la Etapa de Transporte	97
Tabla 47. Resultados de emisiones en la Etapa de Instalación	99
Tabla 48. Resultados de emisiones en la Etapa de Operación	102
Tabla 49. Resultados de emisiones en la Etapa de Reciclaje.....	104
Tabla 50. Resultados de totales de emisiones	106
Tabla 51. Resultados comparativos de costos de compensación	111



ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1. Interfaz de procesos en SimaPro	124
Anexo 2. Proceso productivo de recuperación de PVC. Fuente: Empresa del sector.....	124
Anexo 3. Clasificación del tipo de vehículo según su carrocería y capacidad de transporte. Fuente: Oak Ridge National Laboratory (2000).....	125
Anexo 4. Interfaz de selección de método de configuración de cálculo en SimaPro	125

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Introducción

Actualmente, el calentamiento global está siendo contemplado con preocupación por todas las naciones y sociedades, pues representa un riesgo para el correcto desarrollo de la vida en la Tierra. Este fenómeno ocurre debido a la emisión desmesurada de gases de efecto invernadero. La concentración de estos gases en la atmósfera ha provocado que la radiación infrarroja sea atrapada, evitando que esta sea emitida al exterior del planeta. Es decir, se crea calentamiento sobre la superficie terrestre causando un incremento sin precedentes de la temperatura del planeta, por ende, también se afecta la dinámica climática (Minambiente. 2020). Algunas de las consecuencias de tal anomalía son el descongelamiento de los glaciares polares, sequías prolongadas, la extinción de especies animales y vegetales, inundaciones irregulares, hectáreas de bosques incendiadas, el acrecentamiento desmesurado del nivel del mar, carencia de recursos naturales y diferentes implicaciones para la salud humana (UNHCR. 2018). Por estas razones, en las últimas décadas se ha pensado en la forma de reducir las emisiones de este tipo de gases como lo son el dióxido de carbono (CO_2), metano (CH_4), óxido nitroso (N_2O), ozono troposférico, vapor de agua y compuestos halogenados; ya que en su mayoría son producidos a partir de actividades antropogénicas y resultan ser de alta toxicidad para el medio ambiente y para el ser humano (IDEAM. 2007).

Paralelamente, otra problemática de gran importancia, que se agudiza con el calentamiento global, es la dificultad al acceso a agua limpia y segura. En los últimos años se han unido esfuerzos gubernamentales a nivel mundial, con el fin de mejorar el acceso a este recurso. Sin embargo, para 2015 cerca de 844 millones de personas, aún carecerían, incluso, de agua potable básica (PNUD. 2020). Por lo anterior, y en busca de solucionar de forma multilateral, la mayoría de los problemas que enfrenta hoy en día la humanidad, en diferentes naciones se trabaja con base en el cumplimiento de los Objetivos de Desarrollo Sostenible propuestos por las Naciones Unidas. Dentro de estos objetivos, la ingeniería hidráulica (que es la encargada del diseño, construcción y operación de obras relacionadas con el manejo del agua) cumple un papel fundamental, ya que se relaciona directamente con los objetivos 6, 9, 10, 11 y 13; que corresponden directamente a agua limpia y saneamiento; industria, innovación e infraestructura; reducción de las desigualdades; ciudades y comunidades sostenibles y acción por el clima. Por lo anterior, surge la necesidad de avanzar en el desarrollo de la ingeniería, con el fin de que la sostenibilidad sea un área del conocimiento globalizada, para que de este modo cumpla con las diferentes necesidades humanas (PNUD. 2020).

Sumado a esto, la ingeniería hidráulica en Colombia es un campo que ha estado ligado al constante avance e innovación -esto en palabras de la Sociedad Colombiana de Ingeniería (2019)-. Lo anterior, hace referencia a que, hoy en día, se está buscando que nuestro país sea un referente de globalización y adaptación en esta materia de conocimiento. Estos avances en ingeniería aportarían soluciones aplicadas por medio de profesionales que sean conscientes del impacto económico, social, ambiental,

cultural y de seguridad que rodea nuestro entorno. Por lo tanto, la investigación en recursos hídricos puede buscar soluciones eficaces, acertadas y con un componente de conciencia medioambiental que esté ligado al hecho que vivimos en un país que sobrepasa en casi seis veces el rendimiento hídrico promedio mundial y en más de dos veces el rendimiento latinoamericano (IDEAM. 2014). Esto permite pensar en los grandes beneficios que tiene Colombia en comparación con el resto de los países del mundo. Sin embargo, se ha demostrado que la forma en la cual se trata este recurso no es la mejor, a pesar de la gran oferta existente de recursos hídricos. Pues solo el 35% del área rural del país cuenta con sistemas de abastecimiento y la cobertura de alcantarillado es menor al 15% (Camacho, L. 2020). A su vez, dentro de los esfuerzos de avance de la ingeniería hidráulica se ha venido contemplando la implementación de nuevas tecnologías para el diseño, instalación, renovación y rehabilitación de sistemas hidráulicos urbanos. Esto con el fin de que día a día, sean procesos con mayor factibilidad de ejecución en cuanto a los aspectos económicos, un mejor rendimiento y, por supuesto, con menor huella de carbono. Esto último genera una pregunta de investigación enfocada en la forma en la que se pueden incluir los efectos de la estimación de carbono equivalente dentro de un diseño multiobjetivo de sistemas hidráulicos. En ese orden de ideas, surge la necesidad de establecer el estado del arte de la implementación de estas tecnologías e identificar la forma en la cual los beneficios antes mencionados pueden ser también tenidos en cuenta dentro de las redes urbanas. Esto puede ser aplicado a funciones en métodos de optimización multiobjetivo que incluyan la cuantificación de precios constructivos, como lo realizado por Aguilar, A (2019). En suma, estos costos pueden ser tenidos en cuenta al momento de utilizar algoritmos que estudian la forma de potenciar el diseño de redes de distribución de agua, como el propuesto por Saldarriaga et al, (2020) y de tal forma evaluar las mejores alternativas de aplicación de estos sistemas junto con un componente de cuantificación de carbono equivalente.

Por otro lado, la determinación de la huella de carbono en sistemas hidráulicos se puede llevar a cabo a partir de un Análisis de Ciclo de Vida (ACV) de los materiales. Este último se puede ejecutar por medio de la clasificación de materiales que se utilizan en este tipo de redes y a partir de ahí, se realiza la estimación de las emisiones de CO₂ equivalente de cada una de las etapas de vida. Estas fases pasan por la fabricación, transporte, instalación, uso y disposición final de cada material, por lo que representan todo su potencial de vida útil. Y según el alcance del estudio que se pretenda plantear, estas pueden ser estudiadas completa o parcialmente. Dentro de las variaciones que se pueden aplicar en el planteamiento de los diferentes sistemas está el uso, diámetro, presión interna, longitud y tiempo de operación. Además, esto permite que los escenarios que se pueden estudiar con esta metodología sean múltiples. Es por esto que, con la presente tesis de investigación, se busca construir un referente del estado actual de la contemplación de costos de toneladas de carbono equivalente en la ejecución de diseños multiobjetivo de sistemas hidráulicos urbanos. Lo anterior por medio de la constitución del estado del arte sobre análisis de ciclo de vida en este tipo de redes, con el planteamiento de un caso de estudio y haciendo uso del software computacional Simapro para realizar comparaciones válidas a lo largo del ciclo de vida de diferentes materiales utilizados en sistemas hidráulicos urbanos.

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo General

Determinar los costos de toneladas de carbono equivalente al momento de la ejecución de diseños multiobjetivo de sistemas hidráulicos urbanos, por medio de un análisis de ciclo de vida, para de tal forma establecer un punto comparativo en la selección de diseños de redes.

1.2.2. Objetivos Específicos

- Realizar una exhaustiva búsqueda bibliográfica sobre el estado del arte del análisis de ciclo de vida de sistemas hidráulicos urbanos.
- Identificar los principales avances tecnológicos a nivel nacional e internacional que han permitido la reducción de emisiones de carbono equivalente a lo largo del ciclo de vida de sistemas hidráulicos.
- Establecer un caso de estudio que pueda ser evaluado por medio del uso de herramientas computacionales, para establecer un punto comparativo entre materiales utilizados para la construcción de sistemas hidráulicos urbanos.
- Comparar de forma cualitativa y cuantitativa la posible ejecución de diferentes diseños hidráulicos a partir de los resultados obtenidos en la modelación computacional y según sus emisiones de carbono equivalente.
- Reconocer el impacto medioambiental y los costos monetarios relacionados con las emisiones de carbono equivalente que se generan al realizar la instalación de diferentes sistemas de redes hidráulicas.

2. MARCO TEÓRICO

2.1 Determinantes de impacto ambiental

Para entender la importancia y el alcance que comprende la estimación del impacto ambiental en diferentes escenarios, es significativo entender ciertas definiciones base y las normativas vigentes con las cuales gran cantidad de países alrededor del mundo se rigen y enmarcan la forma en la cual se deben realizar las estimaciones, así como, las alternativas de presentación de resultados. Por lo cual, a continuación, se definen los siguientes términos clave:

2.1.1. Carbono equivalente

Cuando se habla de carbono equivalente, según la Agencia de Protección Ambiental de EE. UU., (en adelante EPA por sus siglas en inglés) (2020), este corresponde a un cálculo por medio del cual se puede hacer una conversión de equivalencias de gases de efecto invernadero (GEI) a dióxido de carbono (CO_2) y posteriormente, en caso de ser necesario, se puede obtener un ponderado en cuantías económicas correspondientes al impacto generado. Por lo tanto, de esta forma es posible evaluar la factibilidad de un proyecto en específico, tanto por las emisiones de GEI que genera como por los costos monetarios arraigados a estas.

Las emisiones pueden presentarse en términos del uso de emisiones marginales de CO_2 promedio y pueden variar según la equivalencia de unidades por medio de la cual se establezcan las mediciones. La EPA (2020) establece algunas unidades de referencia que varían según el cálculo específico y que comprende el sistema determinado para EE. UU, estas son las siguientes:

- Reducciones de electricidad (Kilovatios-hora): Toneladas de CO_2 /kWh.
- Galones de gasolina consumida: Toneladas de CO_2 /Galón de gasolina.
- Galones de diésel consumido: Toneladas de CO_2 /Galón de diésel.
- Pasajeros de vehículo por año: Toneladas de CO_2 /Vehículo/año.
- Millas conducidas por un vehículo de pasajeros promedio: Toneladas de CO_2 /milla.
- Termas y mfc (mil pies cúbicos) de gas natural: Toneladas de CO_2 /Terma o Toneladas de CO_2 /mfc.
- Barriles de petróleo consumidos: Toneladas de CO_2 /Barril.
- Camiones cisterna con gasolina: Toneladas de CO_2 /Tanque de camión.
- Número de bombillas incandescentes cambiadas a bombillas de diodos emisores de luz: Toneladas de CO_2 /Bombilla reemplazada.
- Uso de electricidad en el hogar: Toneladas de CO_2 /Hogar.
- Uso de energía en el hogar: Toneladas de CO_2 /Hogar.
- Número de árboles urbanos cultivados durante 10 años: Toneladas de CO_2 /Árbol plantado.
- Acres de bosques de EE. UU., que almacenan carbono durante un año: Toneladas de CO_2 capturado/Hectárea/Año.

- Acres de bosque de EE. UU., preservados de la conversión a tierras de cultivo: Toneladas de CO₂ capturado/Acre/Año.
- Cilindros de propano utilizados para barbacoas caseras: Toneladas de CO₂/Cilindro.
- Vagones de carbón quemados: Toneladas de CO₂/Vagón.
- Libras de carbón quemadas: Toneladas de CO₂/Libra de carbón.
- Toneladas de residuos reciclados en lugar de dispuestos en vertederos: Toneladas de CO₂ Equivalente/Tonelada de material reciclado.
- Número de camiones de basura de residuos reciclados en lugar de vertidos: Toneladas de CO₂ Equivalente/Camión.
- Bolsas de basura recicladas en lugar de dispuestas en vertederos: Toneladas de CO₂ Equivalente/Bolsa.
- Emisiones de centrales eléctricas de carbón durante un año: Toneladas de CO₂ Equivalente/Planta de energía.
- Número de aerogeneradores en funcionamiento durante un año: Toneladas de CO₂ capturado/Año/Turbina de viento instalada.
- Número de teléfonos inteligentes cargados: Toneladas de CO₂ Equivalente/Celular cargado.

Las anteriores unidades son ejemplos específicos de las diferentes mediciones ya sean de consumo energético, de uso de combustibles o de captura de carbono, por medio de las cuales se puede presentar una estimación de carbono equivalente. Por lo tanto, estas unidades pueden variar y ser ajustadas según el caso de estudio que se plantee.

2.1.2. Análisis de Ciclo de Vida

Un Análisis de Ciclo de Vida (ACV) es un proceso mediante el cual se recopila información concerniente a los aspectos e impactos ambientales que tiene un producto a lo largo de todo su ciclo de vida, es decir, que se puede abarcar desde el momento de la adquisición de materias primas para su fabricación, hasta el final de su vida útil donde se consideran opciones de disposición final o reutilización de este. El ACV comprende variables referentes a la utilización de recursos, las emisiones y vertimientos generados, el uso de energía y demás variables que impliquen la generación de impactos en diferentes áreas ya sean ambientales, de salud pública, entre otras (ICONTEC. 2007).

Las principales etapas que comprenden este análisis según Puig et al. (1999) son:

- **Adquisición de materias primas:** Comprende las actividades y procesos necesarios para la obtención y/o extracción de recursos necesarios para la fabricación. A su vez, se tiene en cuenta el transporte que requieran estas materias primas previo a la producción.
- **Fabricación:** Son las actividades llevadas a cabo para convertir las materias primas y energía en el producto final. Es decir que tiene en cuenta las diferentes etapas y subproductos generados en la cadena de producción.

- **Transporte:** Se trata del traslado desde el punto de fabricación hasta el cliente final. Es decir que comprende el análisis de distancias recorridas y la utilización energética o de combustible que requiera el medio de transporte.
- **Uso, reutilización y mantenimiento:** En esta etapa se tiene en cuenta el tiempo y recursos necesarios para la utilización del producto y demás actividades que se requieran durante este periodo como reparaciones, mantenimientos y demás según el caso específico.
- **Reciclaje y gestión de residuos:** durante esta etapa se tiene en consideración que al final de la vida útil, el material puede ser reutilizado o dispuesto como un residuo, según las características del caso de estudio. A su vez, comprende la gestión de residuos generados en el resto de subetapas.

La realización de este tipo de análisis se basa y se regula a nivel internacional por el grupo de Normas ISO 14040. A continuación, se presenta una síntesis de cada una de ellas:

ISO 14040 – Análisis de ciclo de vida, principios y marco de referencia

Esta norma técnica establece un marco de referencia para la ejecución y posterior evaluación de un ACV, teniendo en cuenta desde el planteamiento inicial del propósito, hasta la interpretación de resultados. Por ende, el proceso a seguir en este tipo de metodologías es el representado en la Ilustración 1:

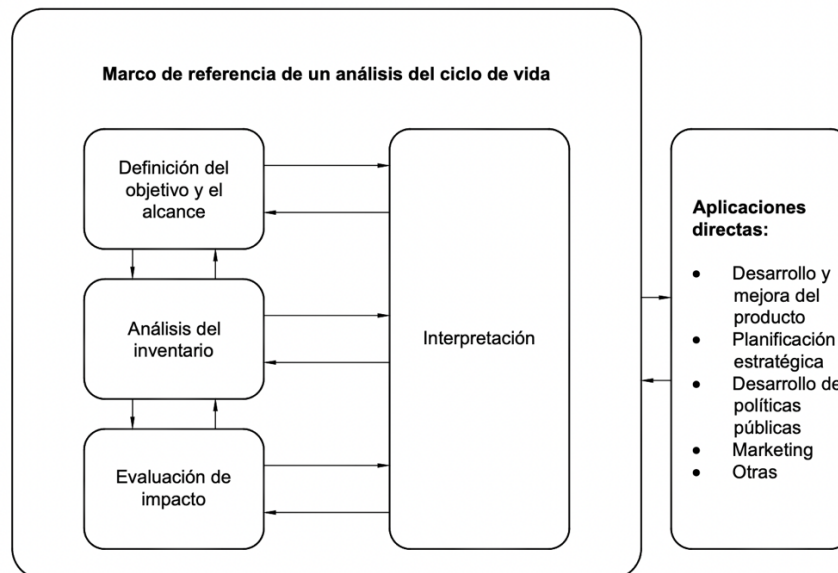


Ilustración 1. Marco de referencial del ACV. Tomado de: ICONTEC. (2007).

1. **Definición de objetivos y alcance:** En este paso se realiza el planteamiento de los objetivos; desde las razones que incitaron la investigación, hasta los resultados que se espera obtener. A su vez, es primordial realizar una delimitación dentro del sistema que se quiere

analizar, para de tal forma establecer el alcance. Lo anterior se hace teniendo en cuenta las siguientes etapas:

- **Función del sistema:** En los casos donde el sistema cumple varias funciones, es necesario definir que funciones se abarcarán en el ACV a realizar y establecer la justificación respectiva.
 - **Unidad funcional:** Se hace referencia a la base de cálculo sobre la cual se ejecutarán los diferentes balances de masa y energía. Es decir que pueden ser uno o varios parámetros preestablecidos que sirvan como punto de ejecución y comparación del análisis.
 - **Límites del sistema:** Esta etapa comprende la definición de procesos o subprocesos que abarca el estudio, así como la delimitación de variables como fuentes de materia prima, puntos de obtención de energía, límites geográficos, sistemas de transporte y demás que quepan dentro del alcance del proyecto.
2. **Análisis del inventario:** Corresponde a los balances de masa y energía que permitan establecer las variables de ingreso y salida del sistema funcional. También se deben tener en cuenta cualquier tipo de perturbación ambiental o antropogénica que se genere como vibraciones, ruido, vertimientos y demás, para su correcta interpretación y evaluación. El proceso recomendado es el siguiente:
1. Elaboración de diagramas de flujo.
 2. Estado de la calidad de datos.
 3. Definición de límites.
 4. Recolección de datos y realización de cálculos.
 5. Redefinición de objetivos y alcances.
3. **Evaluación de impacto:** En esta etapa se debe realizar la interpretación cualitativa y cuantitativa de los resultados obtenidos y se genera un análisis de las variables medioambientales relacionadas. Esto se realiza por medio de la definición de los efectos potenciales al medio ambiente, la caracterización relativa de las contribuciones de entrada y salida de cada etapa y la valoración de los diferentes impactos identificados.
4. **Interpretación:** En esta etapa final se evalúan las posibles mejoras o actividades de mitigación que se puedan ejecutar en búsqueda de reducir los impactos identificados a lo largo de ciclo de vida.

ICONTEC. (2007).

De forma complementaria a la ISO 14040, existen algunas otras normas que definen guías específicas para la ejecución de las etapas del ACV, que son las siguientes:

- **Norma ISO 14041:** Presenta parámetros para establece los objetivos y alcances del ACV y para realizar el análisis de inventario.
- **Norma ISO 14042:** Presenta una guía para ejecutar la fase de evaluación de impactos ambientales del ACV.

- **Norma ISO 14043:** Presenta una guía de interpretación de resultados del ACV.
- **Norma ISO 14044:** Genera los requisitos y directrices para llevar a cabo la evaluación del ciclo de vida.
- **Norma ISO 14048:** Indica información acerca del formato de datos que sirven de base para el ACV.
- **Norma ISO 14049:** Es una guía con ejemplos aplicados de la norma ISO 14041.

(Puig et al. 1999).

2.1.3. Huella de carbono

La huella de carbono hace referencia a un indicador de la totalidad de GEI emitidos de forma directa o indirecta por un individuo, evento, organización, producto o servicio y se expresa por medio del carbono equivalente. Esta estimación se relaciona inversamente con el desempeño del individuo como tal, ya que a mayor huella de carbono; peor desempeño, dado el inherente impacto negativo generado sobre el medio ambiente. A su vez, es imperante mencionar que en el cálculo de la huella de carbono se toman principalmente 6 contaminantes criterio; que fueron definidos como los mayores causantes del cambio climático en el Protocolo de Kioto de 1997, y son: dióxido de carbono (CO₂), perfluorocarburos (PFCs), metano (CH₄), óxido nitroso (N₂O), hidrofluorocarburos (HFCs) y hexafluoruro de azufre (SF₆). Dentro de los cálculos se puede considerar el inventario de gases de efecto invernadero que incluya los anteriormente mencionados u otros de los cuales sus emisiones sean considerables o que generen un impacto que pueda ser identificable y/o cuantificable. Asimismo, se tiene en cuenta la evaluación del ciclo de vida (Green Solution. 2016.).

Hoy en día existen normativas internacionales enfocadas en guiar y regular la forma en la cual se debe identificar, calcular e interpretar la huella de carbono, algunas de estas son:

GHC Protocol

Establece marcos estandarizados globales para la medición y manejo de GEI emitidos por la operación de sectores públicos o privados, y tiene en cuenta la cadena de valor y acciones de mitigación (GHC Protocol. 2021). Los estándares establecidos se presentan en guías a nivel corporativo o para ciudades, por lo cual, a continuación se explica cada tipo de guía:

- **Estándares corporativos:** Se enfoca en guiar las actividades de organizaciones hacia el cumplimiento de dos estándares separados pero vinculados. El primero es el estándar de informes y contabilidad corporativa del protocolo de GEI donde se proporciona una guía paso a paso para que las empresas la utilicen al cuantificar y reportar sus emisiones de GEI. El segundo es el estándar de cuantificación de proyectos del protocolo de GEI que es una guía para cuantificar las reducciones de los proyectos de mitigación de WBCSD, & WRI. (2012).
- **Estándares para ciudades:** Brinda herramientas que necesitan para medir sus emisiones, construir estrategias de reducción de emisiones más efectivas, establecer metas de reducción de emisiones medibles y más ambiciosas, y hacer un seguimiento de su progreso de manera

más precisa e integral. El análisis de emisiones se divide en sectores de energía estacionaria, transporte, desechos, procesos industriales, agricultura, entre otros (WBCSD, & WRI. 2014).

Familia de Normas ISO 14060:

En estas normas se explica de forma clara la cuantificación, el seguimiento, el informe y la validación o verificación de emisiones atmosféricas y remociones de GEI, con el fin de soportar el desarrollo sostenible por medio de actividades económicas bajas en carbono. Lo anterior también busca beneficiar y apoyar en este proceso de cuantificación y mitigación a organizaciones, proponentes de proyectos y partes interesadas de todo el mundo (ISO. 2018).

Dentro de la familia de normas ISO 14060, existen las siguientes normas complementarias que definen guías específicas para la cuantificación, verificación y validación de la huella de carbono; que son las siguientes:

- **Norma ISO 14064-1:** En esta norma se especifican los principios y requisitos para la cuantificación y el informe de emisiones y remociones de GEI a nivel de la organización.
- **Norma ISO 14064-2:** Expone los principios y requisitos para determinar las líneas base, y hacer seguimiento, cuantificación e informes de emisiones de un proyecto en específico.
- **Norma ISO 14064-3:** Detalla los requisitos para la verificación de las declaraciones de GEI relacionadas con sus inventarios, los proyectos de GEI, y las huellas de carbono de los productos.
- **Norma ISO 14065:** Presenta los requisitos para organismos que validan y verifican declaraciones de GEI.
- **Norma ISO 14066:** Valida los requisitos de competencia para los equipos de verificación y cumplimiento.
- **Norma ISO 14067:** Define los principios, los requisitos y las directrices para la cuantificación de la huella de carbono de los productos.

(ISO. 2018).

2.2. Sistemas hidráulicos urbano

El desarrollo de sistemas hidráulicos urbanos se considera como uno de los logros más destacables de la humanidad, ya que han permitido que exista un mejor manejo y control de los recursos hídricos que están disponibles en el planeta. Estos sistemas se enfocan en la canalización y transporte de agua, ya sea para consumo y/o abastecimiento; o bien para la recolección de aguas residuales o lluvias. Lo anterior ha traído grandes avances en términos de infraestructura, salud pública, desarrollo humano y social, por lo cual se trata de un área en constante investigación. Dentro de los avances que se pretenden día a día, es que estos sistemas sean cada vez más amigables con el medio ambiente, por lo que surge la necesidad de evaluar alternativas para establecer el impacto que generan y de tal forma crear estrategias de reducción, mitigación y/o compensación. A continuación, se describe en detalle

los tipos de sistemas hidráulicos urbanos y los principales materiales utilizados en la industria para la construcción de estos:

2.2.1. Tipos de sistemas hidráulico urbano

2.2.1.1 *Sistemas de abastecimiento*

Un sistema de abastecimiento cumple con la función de suministrar agua bajo condiciones de calidad óptimas para satisfacer las necesidades de consumo de un suscriptor. Este tipo de sistemas se compone por diversos puntos, los cuales son:

- **Captación:** Corresponde a la parte inicial y de donde se toma el agua, dependiendo de su disponibilidad, para suplir el resto del sistema. Los principales puntos de abastecimiento que se consideran hoy en día son: aguas superficiales, aguas subterráneas, aguas meteóricas y agua de mar (Jiménez, J. 2013).
- **Aducción y conducción:** Cuando se habla de aducción se hace referencia a la línea de estructuras civiles y electromecánicas que permiten transportar el agua desde el sitio de captación hasta el primer punto ya sea de almacenamiento o a un desarenador. Posteriormente, se cuenta con la línea de conducción que son las estructuras civiles que comunican el agua hasta la planta de tratamiento o sitio de consumo, dependiendo de la calidad y condiciones de suministro (Min Ambiente. 2010).
- **Planta de tratamiento:** Es el punto en el cual se ejecutan todos los procesos de nivel físico, químico y biológico para que el agua tenga las características necesarias para que sea apta para su consumo. En este caso se debe cumplir con tres objetivos específicos y es que el agua cumpla con estándares de seguridad, que sea estéticamente aceptable y que sea económicamente asequible (Jiménez, J. 2013).
- **Almacenamiento:** Se trata principalmente de tanques que permiten contar con un volumen óptimo de agua para cumplir tanto con el suministro como con agua de reserva en caso de situaciones de contingencia (Jiménez, J. 2013).
- **Línea de alimentación y red de distribución:** Comprende el conjunto de tuberías encargadas de conducir el agua hasta el punto final de suministros, es decir, a los consumidores. Se compone por válvulas, tuberías, tomas domiciliarias, medidores, equipos de bombeo y demás (Jiménez, J. 2013).

2.2.1.2 *Sistemas sanitarios*

Los sistemas sanitarios cumplen con la función de recolectar y transportar el agua residual generada por los suscriptores y también el agua lluvia producida por escorrentía en los centros poblados. Bajo lo anterior, existen dos tipos de clasificaciones de estos sistemas según su uso en específico, que sería de aguas combinadas (transporte de ambas en uno mismo) o separadas por sistemas independientes. A partir del análisis realizado por Jiménez, J (2013), estos sistemas de forma general contienen los siguientes componentes:

- **Red de atarjeas:** Son tuberías de reducido tamaño y se encargan de recibir las descargas domiciliarias de cada uno de los puntos en los cuales está ubicado un suscriptor. Generalmente tienen un tamaño mínimo de 200 mm.
- **Colectores:** Se compone por tuberías de mayor tamaño a las de las atarjeas (es decir > 200 mm) y reciben el agua que estas transportan.
- **Emisor:** En este conducto no se realizan conexiones directas de descargas de aguas residuales ya que cumplen con el fin de evacuar todo el volumen recolectado en los colectores y lo transporta hasta el punto de tratamiento.
- **Tratamiento:** El tratamiento de aguas residuales tiene como objetivo evitar en lo máximo posible la contaminación del cuerpo receptor, por lo cual es necesario separar completamente los sólidos con los que viene el fluido y realizar procesos químicos, físicos y biológicos dependiendo de la capacidad de asimilación de punto de vertimiento.
- **Sitio de vertimiento:** Es el punto donde se hace la descarga de las aguas después de pasar por el tratamiento requerido.
- **Obras conexas:** Se trata de obras complementarias o auxiliares que pueden ser requeridas a lo largo del sistema como pozos de inspección, tragatormentas y estaciones de bombeo.

2.2.2. Materiales

Actualmente, a nivel comercial se cuenta con gran variedad de materiales para construir sistemas de tuberías en redes hidráulicas urbanas. La implementación de estos va generalmente arraigada a el uso que vaya a cumplir el sistema, la vida útil, balances económicos, facilidad de transporte e instalación y demás. A continuación, se describirán los principales materiales que se encuentran en el mercado, sus principales usos y su forma de producción.

- **Hierro dúctil:** Es un tipo de hierro fundido con capacidades elásticas, flexibles y dúctiles, que permite el transporte de agua bajo condiciones de alta corrosión, lo cual destaca su alta resistencia. Puede ser utilizado para el transporte de agua potable, residual y hasta para ambientes salinos (McWane. 2009).

La fabricación del material comienza con el acopio de materias primas como chatarra, lingote y fundición reciclada; a lo que se añaden también materiales no férricos, coque, ferro silicio y caliza. Todo se dosifica y se agrega en un cubilote a más de 1600°, obtenemos la colada de fundición. En seguida se pasa a la desulfuración, cuya finalidad es la de reducir el azufre presente en el hierro líquido y optimizar así la nodularización del grafito (proceso de transformación de grafito lamelar en globular). A continuación, la colada se deposita en un horno canal donde se homogeneiza su composición y temperatura, y con un tratamiento de magnesio se consigue la fundición nodular. Con ello se modifica la estructura de cristalización del grafito logrando así altas propiedades mecánicas de la fundición dúctil. Para centrifugar el tubo, se mete el hierro líquido en la coquilla metálica que esta puesta en la maquina de centrifugación, donde por rotación y traslación se fabrica. Luego se saca el tubo

y se lleva al horno de tratamiento térmico para eliminar tensiones. Esta operación permite que el tubo adquiera sus propiedades mecánicas finales, así como una matriz 100% férrica. Posteriormente, el tubo se enfría y se reviste externamente por electro fusión con una capa de zinc. Interiormente las tuberías se recubren de mortero de cemento para garantizar la conservación de las características hidráulicas (Aguas Residuales. 2016). Un ejemplo de tuberías de este material se muestra en la Ilustración 2.



Ilustración 2. Tuberías de hierro dúctil. Tomado de: PAM. (2021).

- Concreto:** El concreto es un material pulverulento y es el más utilizado en la construcción de estructuras. Este cuenta con características de alta resistencia a la presión, es ininflamable, no tiene problemas de flotación y presenta a lo largo del tiempo deformaciones mínimas. Su uso en tuberías se contempla para el transporte de agua potable, residual, industrial y demás (Grupo Traber. 2018). El proceso de obtención de concreto inicia con la extracción de las materias primas iniciales, que son calizas y arcillas, de la cantera y su posterior transporte a la planta donde se trituran. En seguida se someten a un proceso de pre-homogenización donde una banda transporta el material y éste es analizado por un equipo de rayos gamma. Después el material es almacenado para recibir minerales de hierro y caliza correctiva alta que se dosifica dependiendo de qué tipo de cemento se requiera. Posteriormente, el material se pulveriza en el molino de crudo, obteniendo así un material con textura de harina, y se pasa al silo de homogenización. El proceso continúa con la transformación de la harina en Clinker (que es una especie de piedra pequeña cristalizada, redonda y gris, que es enfriada con rapidez) con el uso de altas temperaturas. Tras ser almacenado, el clinker pasa por un molino de rodillos y finalmente el clinker se muele con yeso, lo que determina el tipo de cemento (Holcim. 2021).

Para la elaboración de tuberías de concreto, primero se unifican los agregados en una mezcladora mecánica bajo adecuadas proporciones de cemento y agua que producen una mezcla homogénea. Enseguida se procede a colocar un conservador geométrico dispuesto para cada uno de los tubos de hormigón que permite mantener la geometría del este. Después se procede a colocarlo un refuerzo de acero con un molde de manera, con el fin de moldear el tubo depositando el hormigón en forma continua al encofrado para que el acomodado sea homogéneo, luego se procede al colocado del molde para luego someterlo una presión hidráulica. Una vez moldeado el tubo, se procede a colocar el conservador geométrico con una sujeción externa de cintas de goma mientras se está desmoldando hidráulicamente. Para la protección del traslado del tubo se usa una canastilla de acero adecuada al diámetro correspondiente y un transportador con el sistema del péndulo para evitar de esa manera cualquier movimiento brusco. Finalmente, el proceso de curación se realiza bajo techo con un sistema por saturación con agua, mediante pulverizadores (Preconal. 2009). Un ejemplo de tuberías de este material se presenta en la Ilustración 3.



Ilustración 3. Tuberías de concreto. Tomado de: Argos. (2020).

- Arcilla vitrificada:** Es un producto fabricado a base de arcilla, lo cual lo hace fácilmente reciclable y permite que tenga una vida útil bastante prolongada. Se resaltan sus altas propiedades contra la abrasión, resistencia a químicos y agentes biológicos, por lo que generalmente se usan para sistemas sanitarios (Grupo Jannone. S,f). Este tipo de tubos se fabrica a partir de una mezcla de diferentes tipos de arcillas y chamotas (es un material granular obtenido a partir de la trituración de ladrillo). Con ellas se forma una composición homogénea y moldeable. Después se lleva a cabo un proceso de extrusión para conseguir la forma y tamaño deseado, y los tubos se secan entre 50 y 70 horas para alcanzar su vitrificación. Como paso final los tubos se sinterizan a 1180°C (La obra. 2020). Un ejemplo de tuberías de este material se muestra en la Ilustración 4.



Ilustración 4. Tuberías de Arcilla Vitrificada. Tomado de: Jannone. (S,f).

- PVC:** El Policloruro de Vinilo o PVC es un tipo de termoplástico producido a partir de polímeros. Es el plástico más utilizado en el mundo y sus principales aplicaciones son en: tuberías, piezas de automóviles, empaques de alimentos, juguetes, pavimento, ventanas, muebles y demás. Tiene alta capacidad aislante, de alta durabilidad y resistencia corrosiva. Por otro lado, para la fabricación de resina de PVC, inicialmente se requiere llevar a cabo dos procesos de forma simultánea. El primero es de cracking, en el cual se procesan material primas como petróleo, gas natural y aceite, para la obtención de etileno (C_2H_4). El otro proceso paralelo requiere de sal, agua y de una fase de electrólisis con el objetivo de obtener cloro en forma de ácido clorhídrico (HCl). Nuevamente se llevan a cabo dos procesos simultáneos que son oxidocloración y cloración para producir dicloroetano (DCE). En el primero, se requiere oxígeno, etileno y ácido clorhídrico y en el segundo únicamente etileno y ácido clorhídrico. Posteriormente, se realiza una depuración para separar el dicloroetano de las trazas presentes de hidrocarburos y demás compuestos no deseados. Enseguida se lleva a cabo un proceso de pirolisis y finalmente una depuración para obtener monómero de cloruro de vinilo (MCV). Este último producto pasa por un proceso de polimerización para la obtención final de resina de vinilo (PVC).

En cuanto a la fabricación de tuberías como tal, de forma general, primero se lleva a cabo un proceso de extrusión que consiste en calentar la materia prima, que en este caso es la resina de vinilo, y ejercer presurización por medio de un dispositivo de tornillo sin fin para conseguir materia plástica. Posteriormente, este material debe pasar por calibre determinado que permite que tome la forma concéntrica y se corta según las especificaciones del producto. Finalmente, algunas tuberías son sometidas a un proceso de orientación molecular para mejorar sus propiedades mecánicas, por medio de un calentamiento a temperatura homogénea y por último se expanden en un molde donde permanecen listas para embalaje (Aguas Residuales. 2017). Un ejemplo de tuberías de este material se muestra en la Ilustración 5.



Ilustración 5. Tuberías de PVC. Tomado de: PAVCO. (2019).

- Polietileno de alta densidad (HDPE por sus siglas en inglés):** El polietileno es un polímero sintético que se obtiene a partir de la polimerización de etileno. Uno de sus tipos es el de alta densidad que contiene una estructura lineal y pocas ramificaciones. Dentro de sus propiedades está el ser incoloro, inodoro, no tóxico y resistente tanto a agentes químicos como a altos esfuerzos (Roca I. 2005).

Para la fabricación del polietileno se lleva a cabo un proceso similar que con el PVC, dado que es necesaria la obtención de etileno (C_2H_4), es decir que se ejecuta la fase de Cracking. Seguidamente, se pasa a una fase de separación de componentes que permiten obtener etileno sin la presencia de trazas de otros hidrocarburos o compuestos como propano, butano y demás. En seguida se realiza una mezcla con oxígeno y se procede a comprimir el gas bajo altas presiones y temperaturas, y se agrega un catalizador que permite iniciar la polimerización. Finalmente, el material es moldeado y enfriado en cincos con la geometría deseada. En cuanto a la elaboración de tuberías, primero se debe realizar el corte del polietileno en pequeñas partículas llamadas granza, lo cual facilita su fundición al pasar por una cámara de calefacción. Posteriormente, se realiza el moldeo en forma de tubería a través de un cabezal de extrusión, que permite obtener piezas sólidas con la longitud deseada sin necesidad de tener uniones. En seguida, el plástico pasa por un tanque de vacío que permite que disminuya su temperatura. Finalmente, la tubería se estira para la obtención del espesor deseado, dando paso al corte y enrollado final (Grupo IGC. 2019). Un ejemplo de tuberías de este material se presenta en la Ilustración 6.

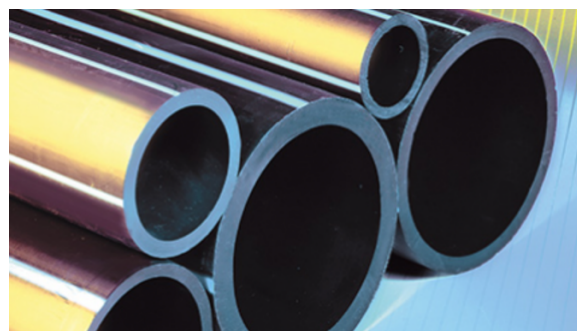


Ilustración 6. Tuberías de HDPE. Tomado de: PAVCO. (2019).

- **Acero:** El acero es un material con altas propiedades de fuerza y firmeza, lo cual lo hace de gran importancia para la industria de la construcción. A su vez, tiene una alta resistencia por cambio de temperaturas extremas y por ende es apto para que, a nivel de tuberías, sea usado en el transporte de aguas domésticas e industriales, así como en ductos especiales en el campo del automovilismo (Cosur. 2021).

Para la obtención de acero, es necesario ingresar materias primas como ganga de hierro, piedra caliza, coque, agentes reactivos y escorificantes (principalmente cal). Enseguida se desplaza la bóveda hasta cerrar el horno y se bajan los electrodos hasta la distancia apropiada, hasta fundir completamente los materiales cargados. Se continúa con un proceso de afinado donde primero se analiza la composición del baño fundido y se procede a la eliminación de impurezas y elementos indeseables y se realiza la adición de ferroaleaciones que contienen elementos necesarios como cromo, níquel, molibdeno, vanadio o titanio. El acero obtenido se vacía en una cuchara de colada en la que termina de ajustarse su composición y de dársele la temperatura adecuada para la siguiente fase en el proceso de fabricación. Posteriormente, la colada se lleva hasta la artesa receptora donde el acero se vierte directamente en un molde de fondo desplazable, cuya sección transversal tiene la forma geométrica del semiproducto y cuenta con paredes huecas para permitir su refrigeración con agua y aire. Finalmente, se procede a cortar el semiproducto en las longitudes deseadas usando sopletes (Velasco, R. 2019).

Para la fabricación de la tubería, se utilizan láminas que se cortan en el tamaño adecuado; posteriormente pasan a través de varios rodillos que le dan la forma tubular al acero. Por último, la máquina suelda los bordes de las láminas mediante diferentes procesos, ya sea una soldadura tradicional con costura interior o exterior, o mediante un proceso de fusión metálica. Se procede a someter el material, en caso de ser requerido, a un tratamiento térmico en un horno de convección para eliminar las posibles tensiones. Finalmente, se ejecuta un proceso de estirado en frío para obtener el tamaño deseado. Durante este proceso, la tubería es recubierta con una solución oxálica y jabonosa, que actúa como lubricante para reducir la fricción mientras se estira (Piecsa. 2020). Un ejemplo de tuberías de este material se muestra en la Ilustración 7.



Ilustración 7. Tuberías de Acero. Tomado de: Accesorios de Bridas. (2019).

- Polipropileno:** El polipropileno es un polímero plástico del cual se destacan varias aplicaciones como en fontanería (agua a presión, con altas temperaturas y agua residual), sistemas de calefacción y en climatización. Es un material inerte, inoloro, resistente a altas temperaturas y presiones, y que no sufre problemas por corrosión (Aquatarm. 2015). Para la obtención de propileno, uno de los procesos más utilizados es a partir de la destilación de gas licuado de petróleo que contiene una porción mayoritaria de componentes livianos como propano, propileno y demás. Primero se pasa por un proceso donde se dulcifica la mezcla y se remueven compuestos como el Anhídrido carbónico o Mercaptanos. Posteriormente, se separan los componentes livianos por medio de una columna de destilación y se procede a separar el propileno del propano, este proceso es complejo porque ambos tienen pesos específicos similares. Para lo anterior, es necesario utilizar una columna de destilación de mayor longitud con gran cantidad de platos y con un sistema muy complejo de reflujo condensado. Finalmente se eliminan los últimos componentes residuales, como arsina y se obtiene propileno que se puede polimerizar (Castillo, L. 2007). La fabricación de la tubería se realiza de forma similar a como con el PVC, ya que es necesario utilizar una máquina extrusora. Inicialmente, el material debe encontrarse en forma de gránulos para que sea más fácil su fusión en un horno que debe estar entre 230° y 250°. Posteriormente, se pasa a extrusora que por medio de presión permite obtener la forma deseada y finalmente se pasa por un tanque de enfriamiento en donde se termina de redondear (Marcilla, A., & Beltrán, M. 2012). Un ejemplo de tuberías de este material se presenta en la Ilustración 8.



Ilustración 8. Tuberías de Polipropileno. Tomado de: Todo Ferreteria. (2019).

- Plástico reforzado con fibra de vidrio: (FRP por sus siglas en inglés):** Se trata de un material compuesto, que se compone por una matriz de plástico o por una resina, y un refuerzo con fibras de vidrio. Este material brinda propiedades de alta resistencia mecánica y por ende alto desempeño en cuanto presiones internas y cargas externas. Se utilizan generalmente en conducciones de abastecimiento, riego, saneamiento y demás. Las matrices más conocidas en el mercado son el poliéster, el polipropileno, resina de viniléster o resina

epóxica. Es un material emergente, que se encuentra escalando el mercado de tuberías en el mundo (FRP Systems. 2020). Un ejemplo de tuberías de este material se muestra en la Ilustración 9.



Ilustración 9. Tuberías de FRP. Tomado de: Cosmos. (S,f).

2.2.3. Métodos de instalación

Un proceso de instalación de tuberías comprende todo lo relacionado con la colocación de un sistema en un lugar específico, que puede no tener con un trazado previo o que puede contar con estructuras preexistentes que requieran su reemplazo, reparación, renovación, rehabilitación o demás. Este proceso requiere de una intervención por medio de una obra civil, ya que en esta se desarrolla infraestructura que va encaminada al beneficio y/o uso por parte de la población. Para la ejecución de este tipo de proyectos, actualmente se cuenta con dos tipos de métodos de intervención comúnmente usados alrededor del mundo. Estos se describen a continuación:

- **Método a cielo abierto o a zanja abierta:** En este proceso se hace necesaria la excavación manual o mecánica y se trabaja bajo condiciones de exposición directa del sitio de trabajo, como se ejemplifica en la Ilustración 10.

Este método requiere estudios de suelo para determinar el camino de instalación y las condiciones óptimas de ejecución de la obra. A su vez, requiere de un control de aguas lluvias en el sitio para evitar inundaciones de la zanja en caso de que se presenten precipitaciones. En el proceso, se estiman tiempos prolongados para la finalización de la intervención y se caracteriza por generar perturbaciones en el sitio que imposibilitan el tránsito o la realización de actividades externas.

Generalmente, el proceso requiere la contemplación de procesos posteriores que conlleven a la necesidad de repavimentar el espacio intervenido y se demanda el uso de maquinaria especializada para cimentación, remoción y colocación de tierras.

(Alarcón, J., & Pacheco, J. 2014).



Ilustración 10. Proceso de instalación a cielo abierto. Tomado de: Alarcón, J., & Pacheco, J. (2014).

A continuación, se presenta una comparación de las ventajas y desventajas de este método, según Pupo, C (2014):

Tabla 1. Ventajas y desventajas del método de instalación a cielo abierto

Ventajas	Desventajas
Se puede utilizar tanto para redes de acueducto como de alcantarillado, sin importar el diámetro del tubo.	Los tiempos de construcción son usualmente prolongados debido a la cantidad de perturbaciones que genera en la superficie.
No requiere mano de obra calificada o con alta capacitación.	Puede implicar alta inversión económica en su ejecución.
Es el método más utilizado al ser convencional, por lo que se cuenta con gran cantidad de experiencia y estudios en literatura.	Puede generar problemas de seguridad debido a inconvenientes en el tráfico, número de excavaciones y grandes equipos requeridos.
Permite reparar o construir otra infraestructura al mismo tiempo.	Genera altos costos de transporte por los grandes volúmenes de tierra que se extraen.
Uso de materiales y tecnologías disponibles en el medio.	Si se requiere estabilizar taludes por niveles freáticos altos, esto genera un incremento considerable en los costos de construcción.
Maquinaria y equipos abundantes y de fácil acceso.	Puede generar interferencias en la otras infraestructuras subterráneas.
Permite la ejecución de conexiones laterales.	Puede generar riesgo de movimientos en masa.
Se acomoda a cualquier condición de alineamiento y pendiente del terreno.	Genera contaminación auditiva por el uso de maquinaria.

- **Métodos sin zanja:**

Se trata de tecnologías emergentes y se llevan a cabo por medio de procesos que requieren del uso de maquinaria para ejecutar perforaciones entre puntos específicos, en donde se alojan tubos de canalización y estos se instalan o reemplazan ya sea tirando de ellos o generando tracción por empuje. Actualmente se cuenta con múltiples métodos sin zanja que se han venido desarrollando para generar alternativas en la intervención de sistemas que sean más fáciles, más costo efectivas, que requieran menos tiempo y generen menos alteraciones a nivel superficial. A continuación, se presentan algunas de estas:

Pipe bursting o Fraccionamiento de tubería: Esta tecnología emplea un cabezal de fractura que hace posible fragmentar la tubería existente, permitiendo así la instalación simultánea de una nueva sección de mismo o mayor diámetro. A su vez, se requiere de un pozo de levantamiento y uno de llegada en los extremos de la zona donde se realiza la operación, por lo que en este proceso se emplea excavación. El extremo posterior del cabezal de ruptura está conectado a la nueva tubería y el extremo delantero está conectado a un cable o varilla de tracción, este proceso se muestra de forma esquemática en la Ilustración 11 (Pinzón, J. 2011).

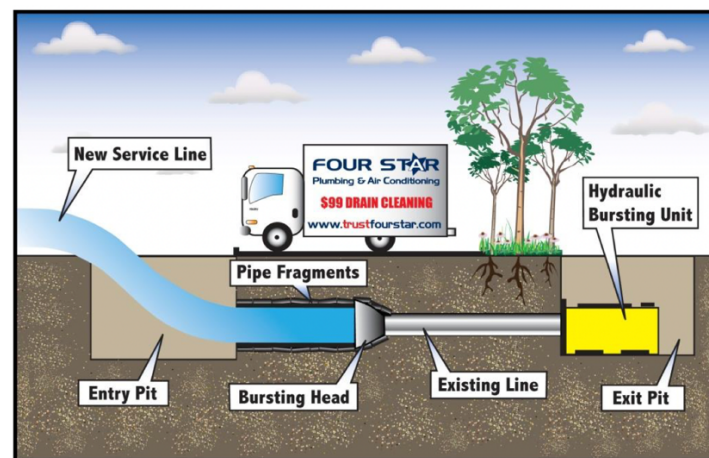


Ilustración 11. Esquema de proceso de Pipe bursting. Tomado de: Pinzón, J. (2011).

Tubo de hincado y microtunelado: Para estas técnicas su rango de aplicación va de un diámetro de tuberías desde 120 mm en adelante. En el caso del proceso de hincado, este funciona como un sistema de instalación de tubos tras un escudo, generalmente tripulado por un operario, el empuje es generado de manera hidráulica desde un pozo de ataque de manera que los tubos formen una tubería continua en el terreno. Estos tubos siempre se diseñan con el objetivo de soportar las fuerzas de empuje generadas por los suelos, así como también para ser ensamblados durante el proceso de instalación (Alarcón, J., & Pacheco, J. 2014). Por otro lado, el microtunelado se diferencia porque el escudo que permite la instalación de un tubo hincado va dirigido por control remoto, es decir, contiene un diámetro interior inferior que

no permite el acceso de personas (Viana, F. 2004). Un ejemplo de este proceso se presenta en la Ilustración 12.

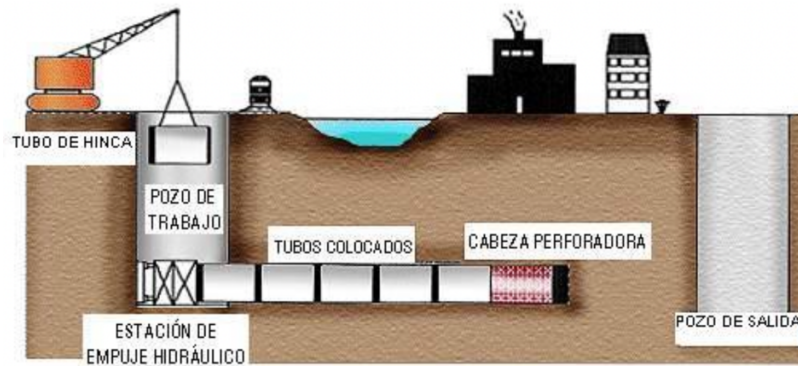


Ilustración 12. Esquema de proceso de Hincado de tuberías. Tomado de: Yepes, V. (2015).

Perforación con tornillos Sin-fin: Este método se emplea para la instalación, sin compactación, de un tubo de camisa en el terreno y la tubería definitiva se coloca posteriormente. Se diferencia de las tecnologías anteriores en cuanto a que la camisa se implementa como parte integral de la metodología de construcción, permitiendo que se reduzcan los costos de instalación. Sin embargo, se trabaja con limitantes de terreno dependiendo de la humedad de este (Alarcón, J., & Pacheco, J. 2014). En la Ilustración 13, se presenta un ejemplo esquemático de la maquinaria usada en el proceso.



Ilustración 13. Esquema de proceso de perforación con tornillos Sin-fin. Tomado de: Perforaciones e Ingeniería. (2015).

Tuberías curadas in situ (CIPP por sus siglas en inglés): Esta metodología consiste en la colocación de un revestimiento de carácter mono-pieza dentro de una tubería existente, que debe pasar previamente por un proceso de limpieza superficial para así mejorar las condiciones de fricción interna y rehabilitar el ducto. En este caso, generalmente se utilizan resinas epóxicas, de poliéster y de viniléster, y se tiene en cuenta un único vertimiento de la mezcla para evitar la existencia de empalmes o costuras que puedan llegar a afectar el

posterior flujo en la tubería (Manzzini, N., & Torres, C. 2015). En la Ilustración 14 se presenta un ejemplo de este proceso por medio de una manga continua con curado por vapor.



Ilustración 14. Esquema de proceso de Tuberías curadas in situ. Tomado de: Hidrotec. (2016).

Perforación horizontal dirigida (HDD por sus siglas en inglés): Esta técnica se utiliza para la realización de trazados rectos o gradualmente curvados con máquinas que varían su capacidad según el diámetro de tubería por instalar. En este caso, primero se realiza un trazado para llevar a cabo una perforación piloto y para esto se usa un equipo que controla la posición. Enseguida se procede a ensanchar dicha perforación de manera concéntrica y en sentido contrario al empleado en la perforación piloto. Posteriormente, según las condiciones del terreno y la tubería a instalar, se realiza el posicionamiento de esta por etapas o no (Alarcón, J., & Pacheco, J. 2014). Por medio de la Ilustración 15 se muestra un ejemplo del proceso.

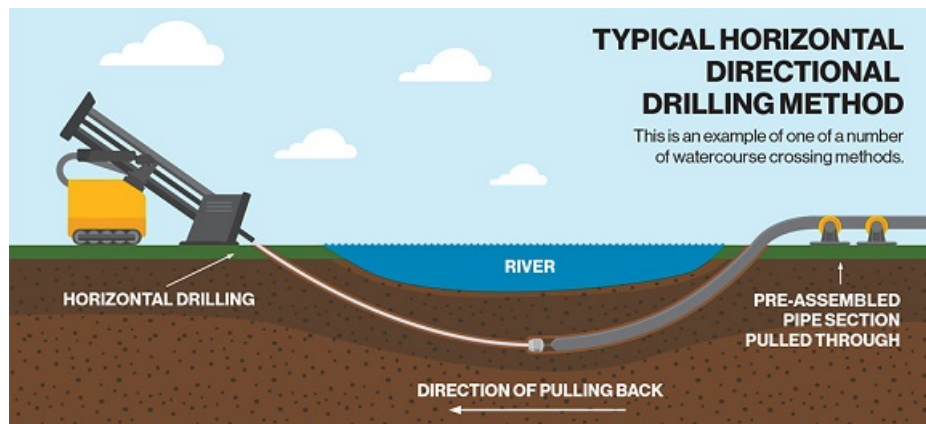


Ilustración 15. Esquema de proceso de Perforación horizontal dirigida. Tomado de: Brightway. (2018).

3. MARCO METODOLÓGICO

Para el presente trabajo de investigación fue necesario realizar diferentes consultas de información para establecer el estado del arte y por ende poder determinar las diferentes investigaciones previas que se encuentran en la literatura. Ya teniendo información base, se pudo establecer los planteamientos iniciales que serán contemplados en el caso de estudio, así como su alcance, limitaciones y puntos por asumir. Enseguida, se hizo la respectiva consulta de información con empresas del campo según la etapa de ciclo de vida de un sistema hidráulico urbano, para de tal forma establecer la información primaria con la que se cuenta para la investigación y buscar así la información secundaria que debe ser complementada. Ya con la información completa, se procede al paso de modelación computacional y respectivo análisis de resultados, esta etapa a su vez comprende la redacción de conclusiones y recomendaciones. Teniendo en cuenta lo anterior, en la Ilustración 16 se presenta de forma específica cada una de las etapas desarrolladas en la presente investigación que se llevan a cabo teniendo en cuenta los lineamientos de la norma ISO 14040:

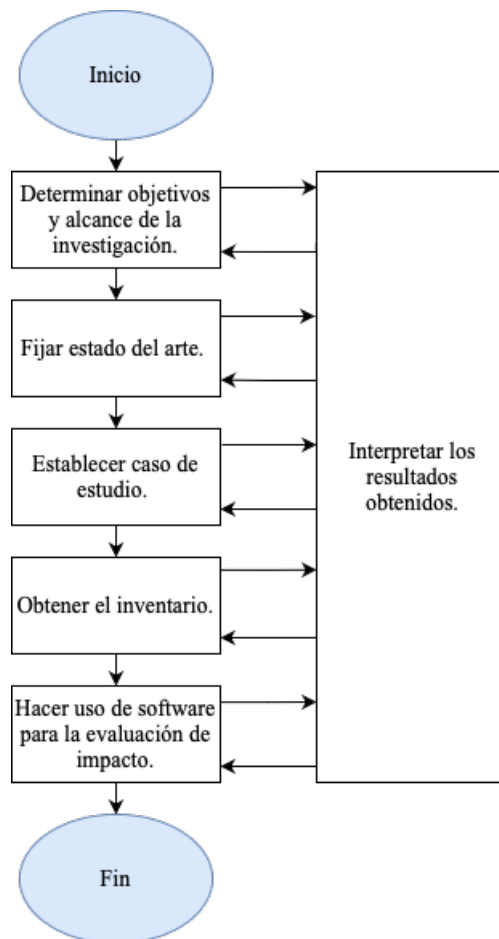


Ilustración 16. Esquema de metodología general de la investigación

A continuación, se describe de forma detallada cada uno de los procesos que comprende todo el trabajo de investigación:

3.1. Establecimiento del estado del arte

Para establecer el estado del arte, se realizaron consultas bibliográficas en múltiples fuentes de información; por lo que se establecieron dos puntos de partida. El primero fue por medio de consultas a nivel internacional y el segundo a nivel nacional. A partir del consolidado obtenido, se complementó la información con normativas vigentes sobre los diferentes determinantes de impacto ambiental. Finalmente, se procedió a organizar los resultados según las etapas del estudio ciclo de vida de un sistema hidráulico urbano. Esto se presenta en la Ilustración 17.

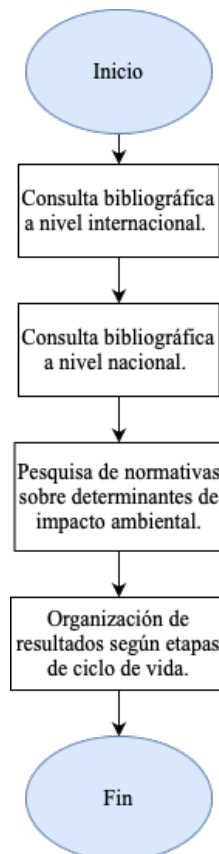


Ilustración 17. Esquema de proceso para establecer el estado del arte

3.2. Planteamiento de caso de estudio

Inicialmente se hizo el planteamiento de variables base, es decir, las que no depende de consultas externas y corresponden a longitud, diámetros, tiempo, tipos de sistemas y materiales a modelar. Posteriormente, según la información requerida en cada una de las etapas de ciclo de vida y teniendo en cuenta cada uno de los tipos de material, se procedió a realizar acercamientos con empresas

encargadas de comercializar cada sistema de tuberías a nivel nacional. En caso de que no fuese posible obtener un consolidado sólido con el acercamiento anterior, se buscó información con compañías internacionales. Si las respuestas anteriores resultaban negativas, se procede a tomar la información de la base de datos *Ecoinvent*, disponible en el programa SimaPro. Finalmente, se hizo un ajuste de las variables y se determinó cuales debían ser asumidos o no dentro del alcance de la investigación. Finalizado este proceso, se continuó con la modelación computacional. Todo lo anterior se esquematiza en la Ilustración 18.

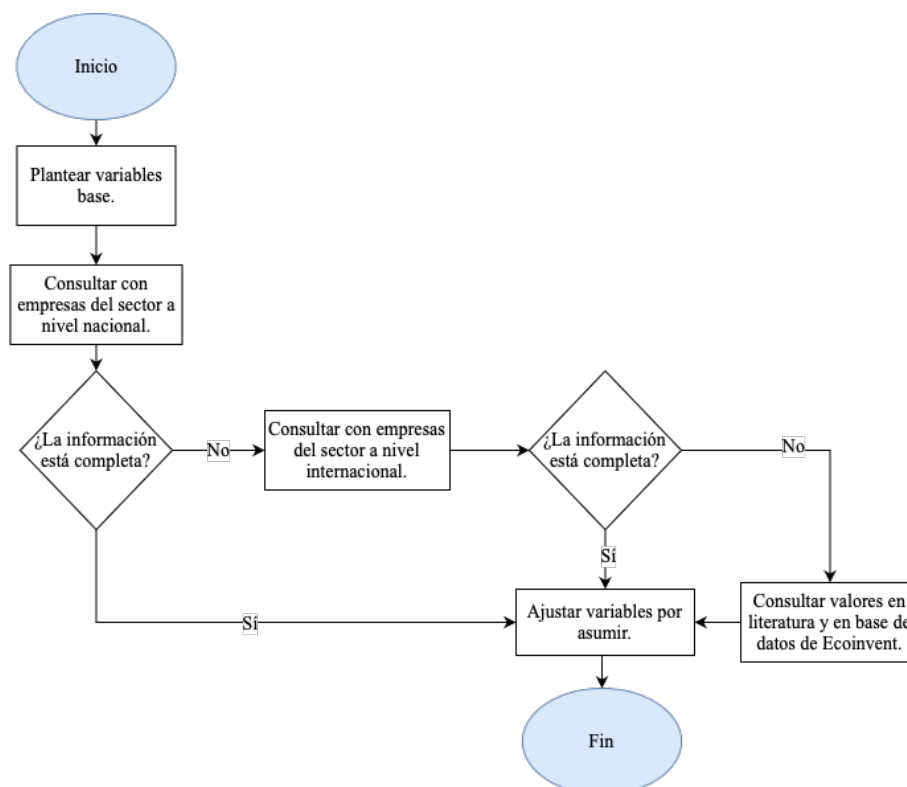


Ilustración 18. Esquema de datos base para el caso de estudio

3.3. Modelación computacional

El proceso de modelación computacional se realiza en el software de SimaPro en su versión 9.1.1, con especificación para fines educativos. Este es un programa que permite modelar y analizar diferentes etapas de ciclo de vida y de tal forma medir el impacto ambiental de productos y/o servicios. Este programa cuenta con una base de datos llamada *Ecoinvent*, la cual está basada en las normas ISO 14040 e ISO 14044, y permite acceder a información transparente y a conjuntos de datos para la mayoría de industrias (SimaPro. 2021). El proceso de modelación se basó en el ingreso de la información del caso de estudio y en complementarla con la presentada en la base de datos del programa. De tal forma fue posible cuantificar el impacto ambiental de cada uno de los escenarios establecidos. La interfaz del programa se presenta en el Anexo 1.

4. ESTADO DEL ARTE

La estimación de carbono equivalente y los análisis de ciclo de vida se han venido desarrollando a lo largo de los años y se han consolidado como una práctica de suma importancia, dada su calidad técnica y su aporte en la toma de decisión en estudios de impacto ambiental, informes de sustentabilidad y proyectos en diversos campos del conocimiento. Por lo tanto, para el presente trabajo de investigación es de vital importancia establecer antecedentes sobre este tipo de análisis en proyectos hidráulicos urbanos y de tal forma instituir los precedentes investigativos alcanzados. Esto específicamente en la fabricación de materiales, el transporte de estos, las tecnologías de instalación de los sistemas, así como su uso y disposición final; es decir, las diferentes etapas de ciclo de vida. A partir de lo anterior y llevando a cabo la investigación bibliográfica descrita en la metodología, a continuación, se presenta el estado del arte del análisis de ciclo de vida en sistemas hidráulicos urbanos, a partir de investigaciones recientes llevadas a cabo en todo el mundo. Las diferentes referencias bibliográficas se dividen dependiendo de la etapa del ciclo, por lo cual se muestran discretizadas según los resultados obtenidos en cada una de ellas, así como al final se presenta un consolidado de los resultados de los diferentes estudios.

4.1. Emisiones de CO₂ por etapas de ciclo de vida en sistemas hidráulicos urbanos

4.1.1. Fabricación y manufactura

La fabricación es una de las fases del ciclo de vida que más se estudia, no únicamente por ser la primera sino porque resulta ser, en múltiples casos, la que más emisiones aporta en el total de gases de efecto invernadero emitidos, es decir que a esta se atribuyen gran parte de los impactos ambientales generados de forma ponderada. Teniendo en cuenta esto, en la Tabla 3 se presentan diferentes estudios que contemplan esta etapa, así como la fuente de información, localización, tipo de sistema, materiales, diámetros, longitud, clasificación del impacto y finalmente los principales resultados. A su vez, en la Tabla 2, se sintetiza la nomenclatura que se maneja según el material al cual se hará referencia dentro del resumen de resultados.

Tabla 2. Nomenclatura de materiales

Nombre de material	Siglas en inglés
Tubería Cilíndrica de Concreto Pretensado	PCCP
Policloruro de Vinilo	PVC
Tubería Curada In Situ	CIPP
Hierro dúctil	DI
Hierro fundido	CI
Concreto reforzado	RC
Plástico reforzado con fibra de vidrio	FRP

Tabla 3. Resultados de estudios de ciclo de vida - Etapa de fabricación

Referencia	Localización	Materiales	Sistema y Diámetros	Longitud	Impacto	Resultados
Piratla et al. (2012). Estimation of CO ₂ Emissions from the Life Cycle of a Potable Water Pipeline Project Journal of Management in Engineering	Phoenix, EE.UU	PVC-O, PVC, HDPE y DI	Suministro. 200 mm	152.4 m	Emisiones de CO ₂	Las tuberías de PVC-O, HDPE y DI tuvieron 44.35%, 12.66% y 7.23% menos emisiones, respectivamente, en comparación con el PVC.
Du et al. (2013). Life Cycle Analysis for Water and Wastewater Pipe Materials Journal of Environmental Engineering	Tucson, EE.UU	PVC, DI, Concreto, HDPE, RC y CI	Suministro y sanitario. 305 mm	1 Km	Emisiones de CO ₂	En este caso, el DI presenta mayor cantidad de emisiones y en comparación con este, el concreto, CR, HDPE, PVC y el DI tuvieron 86.51%, 68.8%, 54.06%, 32.69% y 25.43% menos emisiones, respectivamente.
Khan, L., & Tee, K. (2015). Quantification and comparison of carbon emissions for flexible underground pipelines Canadian Journal of Civil Engineering	Reino Unido	Acero, DI y PVC	Suministro y sanitario. 400 mm	150 Km	Emisiones de CO ₂	Las tuberías de PVC y acero presentaron 28.44% y 21.89% menos emisiones, respectivamente, en comparación con el DI.
Petit-Boix et al. (2015). Integrated Structural Analysis and Life Cycle Assessment of Equivalent Trench-Pipe Systems for Sewerage	Barcelona, España	PVC, HDPE y Concreto	Sanitario. 300, 500 y 1000 mm	1 m	Emisiones de CO ₂ y Categorías de impacto ambiental	Los resultados varían dependiendo del tiempo de vida establecido y las variaciones de carga de tráfico. Por lo que al aumentar el tiempo de vida, el concreto resulta más competitivo porque genera menos emisiones en

Referencia	Localización	Materiales	Sistema y Diámetros	Longitud	Impacto	Resultados
Journal: Water Resources Management						comparación con los plásticos, pero cuando hay bajas cargas y se mantiene un tiempo de vida comparable entre los materiales, los plásticos presentan mejor rendimiento.
Vahidi et al. (2015) Comparative Life Cycle Analysis of Materials in Wastewater Piping Systems Journal: Procedia Engineering	EE.UU.	DI, Concreto, PVC y FRP.	Sanitario. 20 pulg	5 m	Emisiones de CO ₂ y Categorías de impacto ambiental	Se presenta que el DI es el material que más impactos ambientales genera en la mayoría de categorías como por ejemplo: Acidificación, cambio climática, radiación y demás. Así como el FRP genera altos impactos en la capa de ozono y el concreto en ecotoxicidad.
Chilana et al. (2016) Comparison of carbon footprints of steel versus concrete pipelines for water transmission Journal of the Air & Waste Management Association	Texas, EE.UU	Acero y PCCP	Suministro. 66, 72, 84 y 108 pulg	1 pie	Emisiones de CO ₂	Las tuberías de PCCP presentan cerca de un 26.6% menos emisiones que las de acero en su fase de fabricación.
Hajibabaei et al. (2019) Life cycle assessment of pipes and piping process in drinking water distribution networks to reduce environmental impact Journal: Sustainable Cities and Society.	Teherán, Irán	Acero, PVC, DI, HDPE y Fibrocemento	Suministro. 200 y 500 mm	1 m	Emisiones de CO ₂ y Categorías de impacto ambiental	El DI es el material que mayor impacto genera en gran parte de las categorías. Este genera 83.51%, 80.08%, 77.81% y 17.96% más emisiones de CO ₂ que el PVC, HDPE, fibrocemento y acero, respectivamente.



Referencia	Localización	Materiales	Sistema y Diámetros	Longitud	Impacto	Resultados
Nandyala et al. (2019) Comparison of Life Cycle Carbon Footprints of Steel and Concrete Pressure Pipes Book set: Pipelines 2019 - ASCE	EE.UU.	Acero y Concreto	Sanitario. 24, 48, 66 y 80 pulg	1 pie	Emisiones de CO ₂	En promedio, la producción de tuberías de concreto presenta cerca de 46,7% menos emisiones en comparación con las tuberías de acero.
Alsadi et al. (2020a) Environmental Impact Assessment of the Fabrication of Pipe Rehabilitation Materials Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice	Texas, EE.UU	PCCP, PVC y CIPP	Sanitario. 900 mm	30 m	Emisiones de CO ₂	Las tuberías de PCCP y PVC tuvieron 71.81% y 31.72% menos emisiones, respectivamente, en comparación con el CIPP.

A continuación, se realiza una descripción detallada de cada uno de los estudios, así como consideraciones clave:

Piratla et al. (2012) realizaron los cálculos de la fase de fabricación teniendo en cuenta la energía incorporada de cada uno de los materiales. La *energía incorporada* es la cantidad de energía requerida por todas las actividades relacionadas con un proceso productivo, incluyendo el consumo en la obtención de las materias primas, la energía para la elaboración de equipos y en otras funciones de apoyo (Treolar, G. 2004). Estos cálculos de energía es posible consultarlos en diferentes fuentes de información y en este caso, fueron consultados en un estudio de estimación de este factor para materiales usados en aplicaciones de uso del agua y alcantarillado, desarrollado por Ambrose et al. (2002). Por otro lado, en cuanto a los resultados, los autores analizan que una de las causas que hace que el PVC estándar genere más emisiones que el resto de materiales, y en el especial con el PVC-O, es por el rango de diferencia en su densidad y porque requiere de mayor grosor de paredes para tener la misma dureza y resistencia.

Du et al. (2013) incluyeron dentro de su estudio la especificación de materiales a comparar, por lo que por cada uno realizaron una estimación de la energía necesaria para la adquisición de las materias primas y el posterior proceso de transformación y producción de las tuberías. A su vez, los autores reportan no haber incluido gastos energético por producción y mantenimiento de la maquinaria utilizada en esta fase. Este estudio también se basa en el uso de energía incorporada, es decir, la energía consumida desde la extracción de las materias primas hasta la obtención de tuberías. Teniendo en cuenta lo anterior, los resultados reportados establecen que los dos tipos de hierro (dúctil y fundido) son los que más emisiones generan en comparación con el resto de materiales. En suma, esta etapa en comparación con la instalación y el transporte es la que mas impactos ambientales genera.

Khan, L., & Tee, K. (2015) hicieron la estimación de emisiones en esta fase, también, a partir de la energía incorporada. En este caso se basan en dos fuentes de información para este proceso de la “Cuna a la tumba” y son por lo establecido por Ambrose et al. (2008) y Hammond, G., & Jones, C. (2008). Los autores de este estudio tiene en cuenta el peso y la longitud del tramo para el cálculo de las emisiones totales. Como resultados, obtuvieron que el acero y el DI generan mayor cantidad de emisiones que el PVC.

Petit-Boix et al. (2015) modelaron el proceso de fabricación a partir del uso del programa SimaPro, en donde a partir de la información disponible en la base de datos de Ecoinvent 2.2, fue posible calcular las emisiones de esta fase. Sin embargo, el documento del estudio no presenta resultados discriminados únicamente para esta fase, sino que se incluyen dentro el proceso completo de instalación y transporte que fueron las otras dos etapas tenidas en cuenta.

Vahidi et al. (2015) presentaron los resultados obtenidos en la fase de fabricación a partir de un proceso de modelación en SimaPro que les permitió obtener diferentes categorías de impacto. En este estudio, se enfocan principalmente en los resultados de esta fase ya que es la que más emisiones representa en todo el ciclo de vida de los diferentes materiales. Por lo cual, el material que genera

mayores impactos en todas las categorías ambientales es el DI, algunas de estas son: Cambio climático, radiación, acidificación, uso de suelo, combustibles fósiles y demás. En contraste, el PVC presenta la menor cantidad de efectos ponderados, seguido por el concreto que resulta tener alta ecotoxicidad.

Chilana et al. (2016) desarrollaron los cálculos de esta etapa de forma similar que varios de los estudios previos, ya que se basa en la energía incorporada de los materiales y utiliza como fuente el Inventario de Carbón y Energía (ICE) desarrollado por Hammond, G., & Jones, C. (2011) en la Universidad de Bath. En este estudio comparan dos materiales que son el concreto y el acero; para este último asumen un porcentaje de reciclaje del 39% y para el concreto tiene en cuenta una resistencia de 5000 psi. A su vez, agregan dentro de los cálculos la energía incorporada del cemento de mortero con una relación 1:3 cemento/arena y alambres de acero pretensado.

Hajibabaei et al. (2019) reportaron en su estudio que los valores de la fase de fabricación fueron obtenidos de industrias en Irán, por lo cual sus cálculos se basan en información real recolectada por los investigadores. Dentro de los datos que se incluyen están las materias primas vírgenes, los equipos de manufactura y recubrimientos de las tuberías; mientras que excluyen todo lo relacionado con la producción y mantenimiento de la maquinaria.

Nandyala et al. (2019) realizaron los cálculos de forma generalizada como fue presentado en estudios previos, es decir, teniendo en cuenta la energía incorporada de los respectivos materiales. Los resultados fueron reportados en unidades de peso/longitud/diámetro del sistema inglés (lb/Pies/Pulg). Este estudio comparó dos materiales y presentó como resultados que las tuberías de acero generan en promedio un 46.7% más emisiones en comparación con las de concreto con refuerzo de acero.

Alsadi et al. (2020a) efectuaron cálculos del peso de cada sección de tubería para determinar la huella de carbono, teniendo en consideración las dimensiones y densidades de cada material que compone cada tipo de tubería. En este caso, también contemplaron los valores de energía incorporada como la variable base de cálculo. Como resultado, obtuvieron que las tuberías de PCCP, tiene menor huella de carbono en comparación con el PVC y el CIPP.

4.1.2. Transporte

El transporte es una etapa que no es considerada en todos los estudios de ciclo de vida o que se puede contemplar intrínsecamente en otras fases. Sin embargo, algunos documentos de investigación la reportan como una etapa independiente ya que representa emisiones importantes que pueden llegar a varias los resultados si se quieren obtener con fines comparativos. Por lo tanto, en la Tabla 4 se presentan los consolidados obtenidos en diferentes estudios, en donde se hace referencia concretamente a la fuente de información, especificaciones clave, el tipo de impacto ambiental y los resultados destacables.

Tabla 4. Resultados de estudios de ciclo de vida - Etapa de transporte

Referencia	Especificaciones	Impacto	Resultados
Piratla et al. (2012). Estimation of CO ₂ Emissions from the Life Cycle of a Potable Water Pipeline Project Journal of Management in Engineering	Se consideró la distancia desde la planta de manufactura hasta el punto de distribución y posteriormente a la zona de instalación. Se asumió el uso del mismo tipo de vehículo para todos los materiales. Se tuvo en cuenta el peso y carga según el material.	Emisiones de CO ₂	El PVC-O, HDPE y PVC presentaron 17.79%, 12.62% y 10.89% menos emisiones en comparación con el DI.
Du et al. (2013). Life Cycle Analysis for Water and Wastewater Pipe Materials Journal of Environmental Engineering	Se tuvo en cuenta la distancia de transporte hasta el punto de instalación, el consumo de combustible y el tipo de vehículo.	Emisiones de CO ₂	El concreto reforzado genera más emisiones en comparación con el HDPE, PVC, CI, DI y concreto, siendo estas 93.12%, 89.47%, 65.99%, 64.37% y 8.50% menores, respectivamente
Khan, L., & Tee, K. (2015). Quantification and comparison of carbon emissions for flexible underground pipelines Canadian Journal of Civil Engineering	Contemplaron la distancia desde la planta de producción hasta el punto central de instalación del segmento. Se diferenciaron el peso según el material y se asumió el uso de un mismo tipo de vehículo.	Emisiones de CO ₂	El DI es el material que más emisiones genera por transporte, mientras que el acero y PVC generan 28.57% y 7.43% menos emisiones, respectivamente.
Petit-Boix et al. (2015). Integrated Structural Analysis and Life Cycle Assessment of Equivalent Trench-Pipe Systems for Sewerage Journal: Water Resources Management	Se asumió el transporte desde el punto de fabricación hasta el lugar de instalación, así como el transporte de materias primas para la instalación y las generadas por este proceso y que, del mismo modo, requerían disposición.	Emisiones de CO ₂ y Categorias de impacto ambiental	Se contempló un transporte promedio de 30 Km (concreto, cemento, etc) para materiales locales y 100 Km para plásticos y metales. El punto de disposición se ubicó a 10 Km.

Referencia	Especificaciones	Impacto	Resultados
Chilana et al. (2016) Comparison of carbon footprints of steel versus concrete pipelines for water transmission Journal of the Air & Waste Management Association	Se consideró la distancia desde la planta de fabricación hasta los diferentes puntos de instalación. Se tuvo en cuenta la longitud y peso de cada sección.	Emisiones de CO ₂ y Categorías de impacto ambiental	El transporte del acero genera 51.1% menos emisiones que el proceso para tuberías de PCCP.
Hajibabaei et al. (2019) Life cycle assessment of pipes and piping process in drinking water distribution networks to reduce environmental impact Journal: Sustainable Cities and Society.	Se tuvo en cuenta el transporte desde la fábrica hasta el punto de instalación y se contempló el peso de cada material.	Emisiones de CO ₂ y Categorías de impacto ambiental	Las tuberías de PVC, HDPE, DI y acero generan 14.35%, 14.35%, 25.97% y 26.42% menos emisiones en comparación con el Fibrocemento. Este comportamiento se mantiene para el resto de categorías de impacto ambiental.
Nandyala et al. (2019) Comparison of Life Cycle Carbon Footprints of Steel and Concrete Pressure Pipes Book set: Pipelines 2019 - ASCE	Contempló la distancia desde la planta de producción hasta el punto central de instalación del segmento. Se diferenció el peso del material.	Emisiones de CO ₂	En promedio, el transporte de tuberías de acero genera 51.87% menos emisiones en comparación con el concreto.
Alsadi et al. (2020b) Evaluation of Carbon Footprint of Pipeline Materials during Installation, Operation, and Disposal Phases Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice	Se contempla el transporte de forma directa en cada etapa en la que se requiere. Por ejemplo en la instalación se considera la llegada las emisiones por transporte de la tubería y toda la maquinaria y demás materias primas requeridas.	Emisiones de CO ₂	Los cálculos se incorporan en los resultados de las otras etapas.

De forma general, los resultados presentados en la etapa de transporte se basan en la estimación de distancias que se deben recorrer en cada uno de los trayectos y es importante tener en cuenta que, en todos los documentos consultados, se consideraron específicamente los tramos desde el punto de manufactura hasta la zona de instalación. A su vez, en varios estudios se especificó el tipo de vehículo utilizado para la carga de cada tubería y se estimó el consumo de combustible total, ya que esto permite obtener un total de emisiones y/o consumo energético haciendo uso de factores de conversión a CO₂ equivalente. En suma, algunas de las investigaciones también incluyeron las distancias de transporte de los insumos y equipos requeridos para la instalación de los diferentes sistemas, es decir que contemplaron las emisiones arraigadas a este proceso.

4.1.3. Instalación

La instalación de sistemas hidráulicos urbanos comprende el uso de tecnologías específicas que permiten la ubicación de redes de tuberías de forma subterránea para el transporte de agua, ya sea potable o sanitaria. Por lo cual, diferentes estudios comparan el impacto ambiental de instalar estos sistemas con una única metodología o haciendo un análisis paralelo de múltiples métodos que pueden ser a cielo abierto o con instalaciones sin zanja. Con base en los anterior, en la Tabla 6 se presenta un consolidado de los resultados obtenidos en múltiples estudios que abarcan esta etapa del ciclo vida de sistemas de tuberías. A su vez, esta información fue complementada con los estudios presentados en la revisión del estado del arte de métodos convencionales o sin zanja, realizada por Kaushal et al. (2020). Los datos se dividen en referencia, método, tipo de método, impacto y finalmente en resultados obtenidos.

La Tabla 5 presenta la nomenclatura utilizada de aquí en adelante para hacer referencia a los diferentes métodos de instalación que son presentados en los artículos de investigación.

Tabla 5. Nomenclatura de métodos de instalación

Método	Siglas
Instalación de tuberías a cielo abierto	OCPI
Sin zanja	TCM
Perforación horizontal dirigida	HDD
Microtunelado con tubo hincado	PTMT
Microtunelado	MT
Perforación con tubo sin-fin	AB
Fraccionamiento de tubería	PB
Tunelado a mano	HT
Tubería curada in situ	CIPP

Tabla 6. Resultados de estudios de ciclo de vida - Etapa de instalación

Referencia	Método y tipo de método	Impacto	Resultados
Rehan, R. & Knight, M. (2007) Do Trenchless Pipeline Construction Methods Reduce Greenhouse Gas Emissions? Report: University of Waterloo	Construcción: OCPI y TCM	Emisiones de CO ₂	TCM resultó tener entre un 70%-100% menos emisiones comparado con el OCPI.
Sihabuddin, S., & Ariaratnam, S. (2009a) Methodology for estimating emissions in underground utility construction operations Journal of Engineering, Design and Technology	Construcción: OCPI y HDD	Emisiones de CO ₂	HDD resultó tener menos emisiones en comparación con OCPI.
Sihabuddin, S., & Ariaratnam, S. (2009b) Quantification of carbon footprint on underground utility projects Construction Research Congress	Renovación: OCPI y PB	Emisiones de CO ₂	PB resulta en 80% menos emisiones en comparación con OCPI.
Joshi, A. (2012) A Carbon Dioxide Comparison of Open Cut and Pipe Bursting Thesis: Bowling Green State University	Renovación: OCPI y PB	Emisiones de CO ₂	PB resulta en 72.6% menos emisiones en comparación con OCPI.
Piratla et al. (2012). Estimation of CO ₂ Emissions from the Life Cycle of a Potable Water Pipeline Project Journal of Management in Engineering	Construcción: HDD	Emisiones de CO ₂	Se usa el HDD porque este presenta menos emisiones en comparación con un método OCPI. Por lo que presentan resultados generales sin diferenciación de material.
Du et al. (2013). Life Cycle Analysis for Water and Wastewater Pipe Materials Journal of Environmental Engineering	Construcción: OCPI	Emisiones de CO ₂	Bajo un mismo método de instalación, las tuberías de DI y CI son las que más emisiones generan, en comparación con el resto de materiales utilizados.

Referencia	Método y tipo de método	Impacto	Resultados
Ariaratnam et al. (2013) Quantification of Sustainability Index for Underground Utility Infrastructure Projects Journal of Construction Engineering and Management	Construcción: OCPI, PTMT, HDD, y MT	Emisiones de CO ₂	PTMT, MT y HDD resultaron tener 48.36%, 42.68% y 31.65% menos emisiones, respectivamente, en comparación con HT.
Khan, L., & Tee, K. (2015). Quantification and comparison of carbon emissions for flexible underground pipelines Canadian Journal of Civil Engineering	Construcción: OCPI	Emisiones de CO ₂	Teniendo en cuenta que se asumió el mismo método de instalación el acero genera mas emisiones por instalación, mientras que el DI y el PVC generan 66.66% y 28.88% menos, respectivamente.
Petit-Boix et al. (2015). Integrated Structural Analysis and Life Cycle Assessment of Equivalent Trench-Pipe Systems for Sewerage Journal: Water Resources Management	Construcción: OCPI	Emisiones de CO ₂ y Categorías de impacto ambiental	Los resultados son diversos ya que se varió la carga de tráfico y se utilizaron modelos con únicamente los materiales y otros escenarios con combinación entre plásticos y concreto, lo cual aumenta la resistencia a altas cargas.
Chilana et al. (2016) Comparison of carbon footprints of steel versus concrete pipelines for water transmission Journal of the Air & Waste Management Association	Construcción: OCPI	Emisiones de CO ₂	Dado que es un mismo proceso, las emisiones para las tuberías de PCCP son de 68.6 lb/pie, mientras que para el acero son de 67.8 lb/pie.
Mohit et al. (2017) Comparative study of greenhouse gas emissions from hand tunneling and pilot tube method underground construction methods Journal of Green Building	Construcción: HT y PTM	Emisiones de CO ₂	PTM resultó entre 17%-36% menos emisiones en comparación con HT.



Referencia	Método y tipo de método	Impacto	Resultados
<p>Monfared, M. (2018) Comparison of Trenchless Technologies and Open Cut Methods in New Residential Land Development Thesis: University of Alberta</p>	<p>Construcción: OC, AB y HDD</p>	<p>Emisiones de CO₂</p>	<p>AB y HDD resultan entre 70%-99% y 90%-99%, respectivamente, menos emisiones en comparación OCPI.</p>
<p>Loss et al. (2018) LCA comparison of traditional open cut and pipe bursting systems for relining water pipelines Journal: Resources, Conservation and Recycling</p>	<p>Renovación: PB y OCPI</p>	<p>Emisiones de CO₂</p>	<p>PB resulta tener menores emisiones en comparación con OCPI.</p>
<p>Hajibabaei et al. (2019) Life cycle assessment of pipes and piping process in drinking water distribution networks to reduce environmental impact Journal: Sustainable Cities and Society.</p>	<p>Construcción: OCPI</p>	<p>Emisiones de CO₂ y Categorías de impacto ambiental</p>	<p>Las tuberías de fibrocemento generan mayor impacto en todas las categorías ambientales que el resto de materiales, si se utiliza el mismo método de instalación para todos.</p>
<p>Nandyala et al. (2019) Comparison of Life Cycle Carbon Footprints of Steel and Concrete Pressure Pipes Book set: Pipelines 2019 - ASCE</p>	<p>Construcción: OCPI</p>	<p>Emisiones de CO₂</p>	<p>Al utilizarse un mismo método de instalación, ambos materiales generan emisiones similares, siendo estas 31.89 lb/pie para el acero y 30.99 lb/pie para el concreto.</p>
<p>Alsadi et al. (2020b) Evaluation of Carbon Footprint of Pipeline Materials during Installation, Operation, and Disposal Phases Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice</p>	<p>Construcción: OCPI, PB y CPP</p>	<p>Emisiones de CO₂</p>	<p>CIPP y PB resultan tener 89.07% y 81.62% menos emisiones en comparación con OCPI.</p>

A continuación, se realiza una descripción más detallada de cada uno de los estudios, así como consideraciones importantes que fueron tenidas en cuenta:

Rehan, R. & Knight, M. (2007) compararon la emisiones generadas por los métodos de instalación a cielo abierto (OCPI) y sin zanja (TCM) para sistemas de abastecimiento y sanitarios. El estudio tuvo en consideración el consumo de combustible generado por demoras en el tráfico y el usado por maquinaria requerida para operaciones de excavación, compactación, relleno y repavimentación. El estudio encontró que la instalación de sistemas sanitarios genera un alto incremento de emisiones de CO₂ por interrupciones en el tráfico de vías principales. En suma, concluyeron que los métodos TCM son más eficientes porque reducen el tiempo de duración del trabajo y se consiguen disminuciones de entre el 78% y el 100% de las emisiones.

Sihabuddin, S., & Ariaratnam, S. (2009a) dispusieron de un modelo para comparar el método OCPI y un método TCM que fue el de perforación horizontal dirigida (HDD). En este caso también consideraron el impacto ambiental generado por cada tecnología y sus resultados refuerzan la teoría de que los métodos sin zanja producen menos emisiones en comparación con la instalación a cielo abierto.

Sihabuddin, S., & Ariaratnam, S. (2009b) compararon las emisiones generadas por dos métodos de instalación de tuberías que fueron OCPI y fraccionamiento de tubería (PB); en la instalación de una línea de aguas residuales por medio de un programa de cuantificación de emisión de gases de efecto invernadero como el dióxido de carbono (CO₂), monóxido de carbono (CO), óxido de nitrógeno (NO_x), hidrocarburos (HC), óxidos de azufre (SO) y material particulado (TM). Obtuvieron como resultados que el método de PB genera 80% menos emisiones en comparación con el de OCPI.

Joshi, A. (2012) también investigó y comparó aspectos ambientales de los métodos de OCPI y PB para determinar las emisiones de CO₂ durante el uso de maquinaria de construcción y por afectaciones de tráfico durante los procesos de instalación. Este estudio determinó que por medio de PB se obtienen 72.6% menos emisiones en comparación con OCPI.

Piratla et al. (2012) hicieron la comparación entre el método a cielo abierto y un método TCM que es el de perforación horizontal dirigida (HDD), y presentan los resultados de este último. Para los cálculos, utilizan un programa llamado “Emission calculator”, desarrollado por Sihabuddin, S., & Ariaratnam, S. (2009a), el cual permite cuantificar emisiones resultantes de proyectos subterráneos y tiene la opción para clasificar cada proceso según el tipo de vehículo y de tal forma obtener cuantificaciones de tiempo de uso y gasto energético.

Du et al. (2013) en su estudio únicamente hacen uso de la metodología convencional a cielo abierto para la instalación de los ductos. Por lo que tuvieron en cuenta el cálculo de los volúmenes de suelo excavado para determinar el consumo de combustible de cada vehículo, así mismo, los autores se apoyaron en las diferentes normas de instalación según el material para determinar la profundidades y demás parámetros de la instalación. Los resultados de emisiones fueron similares para todos los

materiales, sin embargo, las tuberías de hierro (dúctil y fundido) son las que más emisiones generan y los plásticos (PVC y HDPE) los que menos. En la investigación reportan que la energía de producción y mantenimiento de la maquinaria de excavación no fue tomada en cuenta, así como la energía incorporada de los materiales de relleno del lecho.

Ariaratnam et al. (2013) contemplaron aspectos como impacto ambiental, costo e impacto social, al comparar cuatro métodos de instalación que fueron OCPI, HDD, microtunelado con tubo hincado (PTMT) y microtunelado (MT). El estudio introdujo un índice para generar un ranking que permita servir como herramienta en la toma de decisión para la escogencia de metodologías de instalación de tuberías. Los resultados demostraron que el PTMT genera 48.36% menos emisiones que el OCPI y para el MT y HDD estos porcentajes son del 42.68% y del 31.65%, respectivamente.

Khan, L., & Tee, K. (2015) consideraron dentro de su estudio la instalación por medio del método a cielo abierto. Para este realizaron la estimación de emisiones de procesos constructivos principales como excavación, recubrimiento de tuberías y relleno del lecho. Para cada proceso se estimó el tiempo de uso y el consumo de combustible en ese periodo para finalmente obtener las emisiones con un factor de conversión de 10.1 Kg de CO₂ por cada galón de diésel. Se obtuvo como resultado que el material que más emisiones genera es el acero, seguido por la de DI y finalmente el PVC.

Petit-Boix et al. (2015) establecen en su investigación únicamente el uso del método de instalación a cielo abierto. En este tienen en cuenta los procesos relacionados con excavación, relleno del lecho y compactación, en donde hacen diferentes variaciones de los materiales para el relleno y evalúan de tal forma la resistencia y durabilidad de estos a múltiples cargas de tráfico pasando por la superficie. Por lo tanto, los resultados obtenidos se presentan en la sección de emisiones totales del ciclo de vida.

Chilana et al. (2016) reportaron que para este estudio únicamente se tuvieron en cuenta actividades principales de instalación a cielo abierto como excavación, carga, relleno, acarreo y compactación. A su vez, diferenciaron cada material teniendo en cuenta el peso, longitud, sección transversal y volumen de excavación/relleno. También contemplaron factores relacionados con el suelo y los equipos utilizados, de tal forma establecieron el consumo de combustible por cada uno y se llegó a un total de emisiones. En este caso, los resultados reportan valores muy similares para ambos materiales, sin embargo, para el concreto es mayor.

Mohit et al. (2017) condujeron una investigación para comparar las emisiones de dos métodos que fueron tunelado a mano (HT) y PTMT. En este caso ambos se utilizaron para la instalación de tuberías de 27 pulg en una línea de alcantarillado de arcilla, con profundidades de 12.8 m y longitud de 60 m. Los resultados mostraron que el número de emisiones disminuía de un 17% a un 36% usando PTMT en comparación con el método tradicional de HT.

Monfared, M. (2018) realizó una comparación entre OCPI, perforación de tubo sin-fin (AB) y HDD, a partir de dos casos de estudio en Edmonton, Canadá donde se consideraron líneas de transporte de agua de suministro, residual y lluvias. Los resultados indicaron que las emisiones generadas con el

método de OCPI fueron significativamente mayores en comparación con los métodos sin zanja. La reducción fue entre un 70% y un 99% para AB y entre un 90% y 99% para HDD.

Loss et al. (2018) desarrollaron un estudio donde demuestran que el método de OCPI, generalmente, produce grandes problemas ambientales arraigados a la disposición de suelo como un residuo, al incremento en el consumo de combustibles y a mayores volúmenes de grava, arena y asfalto.

Hajibabaei et al. (2019) para la instalación tuvieron en cuenta únicamente el método a cielo abierto. En este caso, dentro del estudio se incluyó información referente al impacto ambiental de los procesos de excavación y compactación, así como los materiales requeridos para la realización y relleno de la zanja. No se incluyó datos sobre producción y mantenimiento de la maquinaria, drenaje de las tuberías y sus respectivos testeos hidrostáticos.

Nandyala et al. (2019) utilizaron únicamente un método de instalación para comparar los materiales y fue el de OCPI. En este caso contemplaron el uso de maquinaria y materiales para la excavación, relleno y pavimentación de la zanja por medio del tiempo de uso de cada uno. De tal forma se obtuvieron las emisiones generadas en el total de tiempo. Como resultado presentaron que en la instalación, las tuberías de concreto generan mayor cantidad de emisiones en comparación con las de acero.

Alsadi et al. (2020b) comparan tres metodologías de instalación que son OPCI, tuberías curadas in situ (CIPP) y PB. En este estudio tuvieron en cuenta las emisiones por transporte de equipos y materiales, por uso de maquinaria, relleno y pavimentación. Para la estimación hicieron uso del software e-calc desarrollado por la Arizona State University. Obtuvieron como resultado que los métodos de CIPP y PB resultan tener 89.07% y 81.62% menos emisiones en comparación con OCPI.

4.1.4. Operación

La fase de operación comprende la energía requerida para que el sistema funcione a lo largo de su vida útil, es decir que, según el estudio se puede considerar consumo energético por bombeo, mantenimiento y posibles reparaciones. Este tipo de estimaciones va arraigado con el tipo de tubería que se contemple ya que en estas varía el caudal que pueden transportar y la rugosidad de sus paredes. Sin embargo, esta es una etapa que no es considerada en todos los análisis de ciclo de vida, haciendo que el número de estudios que la contemplan sea más reducido. Teniendo en cuenta lo anterior, en la Tabla 7 se presentan diferentes investigaciones con sus resultados para la operación de tuberías y se divide la información en referencia, tiempo total de uso, tipo de impacto, consideraciones y resultados.

Tabla 7. Resultados de estudios de ciclo de vida - Etapa de operación

Referencia	Tiempo	Impacto	Consideraciones	Resultados
Piratla et al. (2012). Estimation of CO ₂ Emissions from the Life Cycle of a Potable Water Pipeline Project Journal of Management in Engineering	50 años	Emisiones de CO ₂	Se tuvo en cuenta el consumo energético y emisiones por bombeo, mantenimiento y reparaciones.	El PVC-O, PVC y HDPE presentaron 3.37%, 2.41% y 0.13% menos emisiones, respectivamente, en comparación con el DI.
Khan, L., & Tee, K. (2015). Quantification and comparison of carbon emissions for flexible underground pipelines Canadian Journal of Civil Engineering	50 años	Emisiones de CO ₂	Se asume únicamente el cálculo de emisiones por bombeo.	Los resultados son cercanos, sin embargo el acero genera más emisiones, mientras que el PVC y DI generan 9.67% y 3.22% menos, respectivamente.
Chilana et al. (2016) Comparison of carbon footprints of steel versus concrete pipelines for water transmission Journal of the Air & Waste Management Association	40 años	Emisiones de CO ₂	Se asume únicamente el cálculo de emisiones por bombeo.	Al utilizar la misma bomba en ambos sistemas, las emisiones son iguales, es decir 8.9 lb/pie.
Nandyala et al. (2019) Comparison of Life Cycle Carbon Footprints of Steel and Concrete Pressure Pipes Book set: Pipelines 2019 - ASCE	50 años	Emisiones de CO ₂	Se asume únicamente el cálculo de emisiones por bombeo.	Se establece el uso de un mismo tipo de bomba independiente del material y se tiene en cuenta el consumo energético.
Alsadi et al. (2020b) Evaluation of Carbon Footprint of Pipeline Materials during Installation, Operation, and Disposal Phases Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice	100 años	Emisiones de CO ₂	Se contempla el proceso de bombeo y mantenimiento de las tuberías.	Las tuberías de PCCP generan más emisiones en su fase de operación, mientras que las de PVC, HDPE y CIPP, registran 13.44%, 11.72% y 6.33% menos emisiones, respectivamente.

A continuación, se realiza una descripción más detallada de cada uno de los estudios presentados en esta etapa:

Piratla et al. (2012) realizan la cuantificación de la huella de carbono a partir de tres procesos principales que comprenden el uso de las tuberías y que son el bombeo, mantenimiento y reparaciones. Para el primero, los autores tuvieron en cuenta la rugosidad de cada material y la eficiencia de un tipo de bomba que se mantiene constante para los diferentes tipos de tubería, por lo que fue posible calcular la potencia requerida. Para el mantenimiento, aunque lo consideran, no reportan cálculos ya que se asume como mínimo al tratarse de tuberías para el transporte de agua potable. Por último, los cálculos de reparaciones fueron realizados a partir de análisis de regresiones para predecir modelos de fugas que dependían del tiempo, la longitud y el diámetro nominal de los ductos.

Khan, L., & Tee, K. (2015) proponen un proceso de estimación de uso de energía por bombeo de agua a través de las tuberías, para esto calcularon el consumo de energía total a partir de la potencia requerida por bombas de tipo centrífugas que serían utilizadas de mismo modo por los tres tipos de materiales. Por lo tanto, los factores diferenciales entre los materiales son las pérdidas de fricción que dependen de la resistencia que genere cada materia prima.

Chilana et al. (2016) consideró que los dos materiales por comparar (acero y cemento) deben llevar un recubrimiento interno de mortero de cemento al tratarse de tuberías para el transporte de agua. Por lo cual, la energía requerida para el bombeo en ambas tuberías es la misma porque comparten el mismo coeficiente de Manning. Es por esto que, el valor que reportan es un estimado de consumo de energía disponible para tuberías existentes.

Nandyala et al. (2019) consideraron la operación bajo condiciones de número de bombas requeridas, pendiente del terreno y condiciones específicas del proyecto. Por lo tanto, para este estudio asumieron el uso de la misma metodología que Chilana et al. (2016) y obtienen como resultado el mismo consumo energético para los dos tipos de materiales analizados.

Alsadi et al. (2020b) consideraron dos procesos para la etapa de operación que fueron el bombeo y mantenimiento de los ductos. Para el primero consideraron la medición del área de sección transversal, el coeficiente de fricción y la eficiencia de bombeo según cada material; por lo que esto permitió determinar que la eficiencia de bombeo varía con la edad, fabricante y condición de la tubería. En este caso asumieron una eficiencia de la bomba del 70%, un tiempo de operación por día de 6 horas y para calcular la potencia de la bomba se basaron en la ecuación de Hazen - Williams. En cuanto al mantenimiento, asumieron el uso del método de Pigging que consiste en la inyección de agua a presión en los ductos que permite la remoción de residuos o biopelículas. Para esto consideraron que las emisiones se generan a partir del uso de combustible para llegar al sitio de la operación, el combustible para realizar la limpieza y la energía requerida para tratar el agua residual generada. Como resultados, se obtuvo que las emisiones por limpieza son muy similares entre cada

material y casi despreciables en comparación con las generadas en el bombeo, por lo que el material con mayor huella de carbono es el PCCP, seguido por el CIPP, HDPE y PVC, respectivamente.

4.1.5. Disposición y/o reutilización

La última fase del ciclo de vida comprende el proceso de disposición, reutilización o abandono de los materiales de tubería. No obstante, es la fase menos estudiada en la literatura consultada, por lo que en la Tabla 8 se presentan algunas investigaciones que abarcaron estos procesos y la información se organiza en referencias, procesos y resultados obtenidos.

Tabla 8. Resultados de estudios de ciclo de vida - Etapa de disposición final

Referencia	Proceso	Resultados
Piratla et al. (2012). Estimation of CO ₂ Emissions from the Life Cycle of a Potable Water Pipeline Project Journal of Management in Engineering	Disposición final	Teniendo en cuenta que se necesita gastar mucha energía en excavar la cubierta sobre la tubería para poder reciclarla, en esta investigación se asume que las tuberías se abandonan después de su período de vida útil.
Nandyala et al. (2019) Comparison of Life Cycle Carbon Footprints of Steel and Concrete Pressure Pipes Book set: Pipelines 2019 - ASCE	Reciclaje y Disposición final	Se asume como reciclable el 80% del acero y que de las tuberías de concreto se puede extraer únicamente el acero de refuerzo para ser reutilizado.
Alsadi et al. (2020b) Evaluation of Carbon Footprint of Pipeline Materials during Installation, Operation, and Disposal Phases Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice	Reciclaje y Disposición final	Según el material se varió el % de reciclaje, menos en el PCCP que se dispone completamente. Esto permite que al usar materiales reciclados, el consumo energético de fabricación se reduzca en 81.75%, 40.85% y 57.35%, para el PCCP, PVC y HDPE, respectivamente.

A continuación, se realiza una descripción más detallada de cada uno de los estudios presentados en esta etapa:

Piratla et al. (2012) reportan que hay tres alternativas cuando el material de la tubería cumple con su funcionamiento y son: disponerlo, reciclarlo o abandonarlo. En este caso, consideran que una de las alternativas más comunes es el abandonarlo y deciden asumirla en este estudio. Lo anterior dado que se requeriría plantear un nuevo proceso de extracción de la tubería, lo cual implica el uso de energía adicional.

Nandyala et al. (2019) asumieron en su estudio un porcentaje de reciclaje de las tuberías de acero del 80%. En cuanto a los ductos de concreto, consideran que el acero utilizado como refuerzo también

puede ser reutilizado por lo que sería necesario llevar a cabo un proceso de separación. A su vez los agregados resultantes pueden usarse como materiales de relleno en el sitio de trabajo o en capas de pavimento. Como resultado, presentaron que usando acero reciclado se puede llegar a reducir en un 75% el consumo energético en la fabricación de este tipo de ductos, en comparación con el uso de materias primas vírgenes.

Alsadi et al. (2020b) calcularon las emisiones generadas por reciclar los materiales de tubería para así estimar el impacto en la fabricación de los materiales a partir del reciclaje de estos. A su vez, estimaron el gasto energético en el proceso de disposición de estos materiales. Los resultados del estudio mostraron que materiales como el PVC y el HDPE requieren de alta energía para su reciclaje dado que se asume que puede ser usado nuevamente en un 50%. En cuanto a la tubería de PCCP, esta se divide en acero, concreto, mortero y alambre pretensado, los cuales se reciclan en un 80%, 20%, 0% y 80%, respectivamente. Las tuberías de CIPP no cuentan con un proceso de reciclaje por lo que el total de energía se atribuye al proceso de disposición. Teniendo en cuenta lo anterior, el material que menores emisiones genera por reciclaje y disposición es el PCCP.

4.1.6. Resultados generales de Análisis de Ciclo de Vida

La cuantificación total de emisiones en un ciclo de vida considera la suma de los resultados de cada una de las etapas contempladas en los diferentes estudios. Por lo tanto, a continuación se presentan los resultados obtenidos en cada una de las investigaciones mencionadas anteriormente y que los consideran de forma ponderada:

En el estudio desarrollado por Piratla et al. (2012), se obtuvo que el DI es el material que más emisiones genera a lo largo de su ciclo de vida, emitiendo cerca de un 4.22% más que el material con menores resultados que el es PVC-O. A su vez, la fase que más emisiones genera es la de uso de las tuberías, ya que representa entre un 97.7% y 98.6% del total de emisiones, siendo esto contrastable con las etapas de instalación y transporte a las cuales se les atribuye una pequeña proporción. La comparación de los resultados por material se muestra en la Ilustración 19.

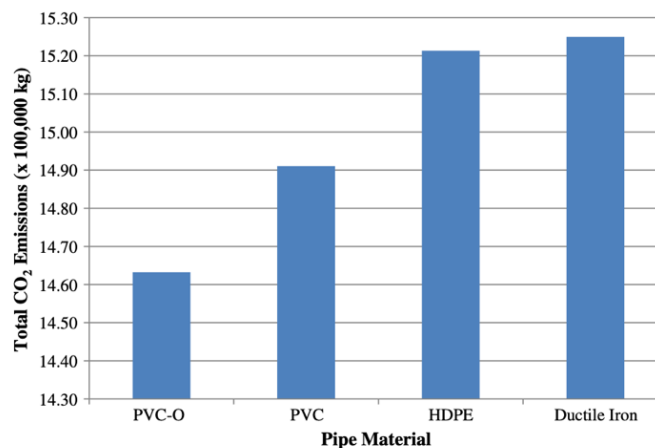


Ilustración 19. Resultados del análisis de ciclo de vida para el estudio de Piratla et al. (2012)

Du et al. (2013) reportaron que para tuberías de diámetros menores a 24 pulg, el DI es el material que más emisiones genera a lo largo de su ciclo de vida, sin embargo para diámetros mayores a 30 pulgadas las tuberías de PVC son las que mayor cantidad de impactos generan por kilómetro analizado. Lo anterior lo reportan como un hecho que se puede deber al grosor de la tuberías, ya que la relación grosor/diámetro incrementa más en los plásticos. El concreto resulta ser el material con menores emisiones a pesar de su alta demanda energética en la producción. A su vez, la fase de producción comprende entre el 92 y 99% de las emisiones de CO₂ totales y reportan que las etapas de uso y disposición final no fueron tenidas en cuenta. La comparación de los resultados por material y por diámetro se muestra en la Ilustración 20, teniendo en cuenta que el análisis fue hecho con la unidad funcional de Kg/Km.

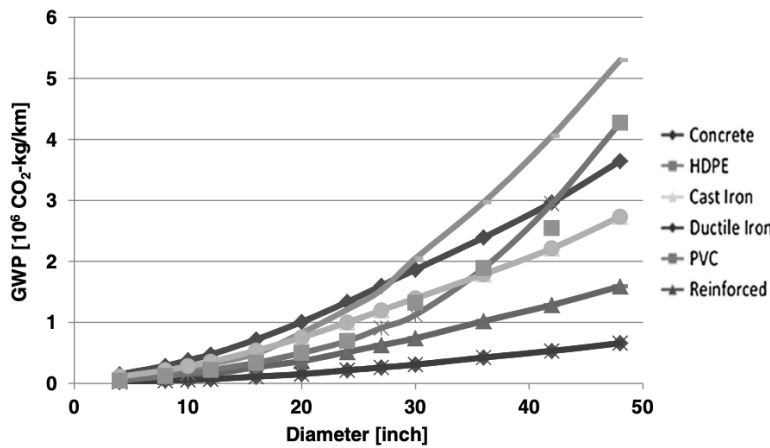


Ilustración 20. Resultados del análisis de ciclo de vida para el estudio de Du et al. (2013)

Khan, L., & Tee, K. (2015) presentaron el total de emisiones de CO₂ generadas en todo el ciclo de vida de los materiales desde la fase de manufactura hasta su uso completo en un periodo de 50 años. Por lo cual, como se puede ver en la Tabla 9, tanto en sistemas a gravedad como a presión el orden de mayor a menor cantidad de emisiones es: Acero, DI y PVC. A su vez, presentan un análisis de costo monetario de compensación de CO₂, el cual toman como £10/Ton emitida de este gas. Por lo cual, se mantiene el mismo orden de jerarquía en los costos de compensación según el material.

Tabla 9. Resultados de emisiones y costos de CO₂ reportados por Khan, L., & Tee, K. (2015)

Emisiones y precios del CO ₂ para sistemas a gravedad		
Material	Emisiones (Kg)	Precio (£/m)
Acero	12.0E+07	1.2
DI	9.02E+07	0.9
PVC	8.46E+07	0.846
Emisiones y precios del CO ₂ para sistemas a presión		
Material	Emisiones (Kg)	Precio (£/m)
Acero	12.21E+07	1.22
DI	9.18E+07	0.918
PVC	8.4E+07	0.84

Petit-Boix et al. (2015) presentaron los resultados de su estudio divididos en diferentes categorías de impacto entre las que se encuentra: Potencial de agotamiento abiótico (ADP), potencial de acidificación (AP), potencial de eutrofización (EP), potencial de calentamiento global (GWP), potencial de agotamiento de ozono (ODP), potencial de toxicidad humana (HTP), potencial de creación de ozono (PCOP) y demanda de energía acumulada (CED). En este caso realizaron la comparación de PVC y HDPE de diferentes grosores de pared de la tubería. Por lo tanto, se evidencia que los escenarios de HDPE tienden a generar mayor impacto que los de PVC, a excepción de las categorías de EP y HTP. Sin embargo, es importante anotar que la mayoría de los grosores reportados no son iguales por lo cual no se partiría de un mismo punto equitativo de comparación. Por otro lado, el estudio reporta que, en el caso de las tuberías de concreto, estas al tener el mismo grosor cumplen con todos los requisitos de carga de tráfico que fueron estudiados, lo cual no generan cambios en los parámetros de estudio ambiental y resulta ser un material óptimo por su alta resistencia.

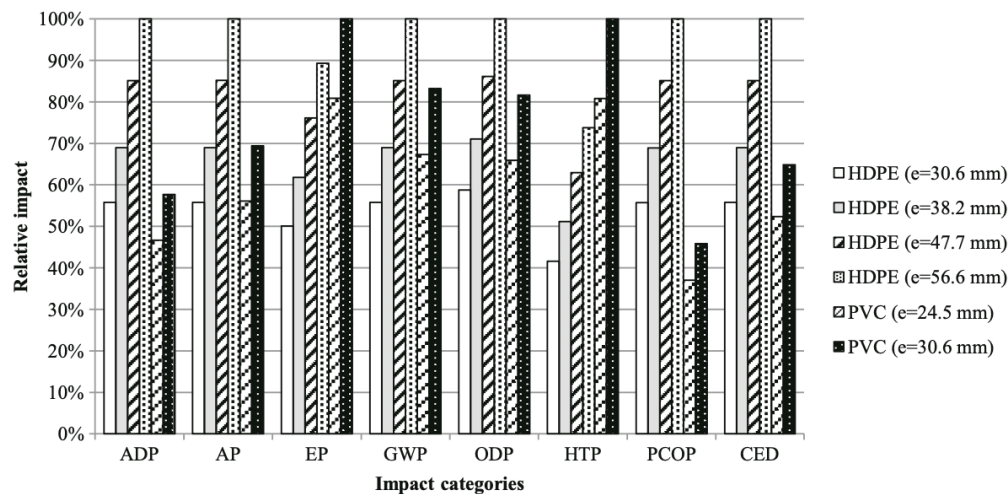


Ilustración 21. Resultados de categorías de impacto ambiental reportados por Petit-Boix et al. (2015)

Vahidi et al. (2015) ponderaron en su estudio las etapas de fabricación, transporte, instalación y uso. Sin embargo, solo presentaron de forma de tallada los resultados obtenidos en la fase de fabricación por ser la que mayores impactos genera y también las deducciones generales por cada material. Los resultados son discretizados según etapas de impacto ambiental, como se puede apreciar en la Ilustración 22. En este caso, se evidencia que el DI es el material que más impactos genera en casi todas las categorías y de forma general resulta tener más de cuatro veces los impactos del PVC. Hay dos categorías en específico en donde otros dos materiales resultan producir más problemas y son el FRP y el concreto, en afectaciones a la capa de ozono y ecotoxicidad, respectivamente.

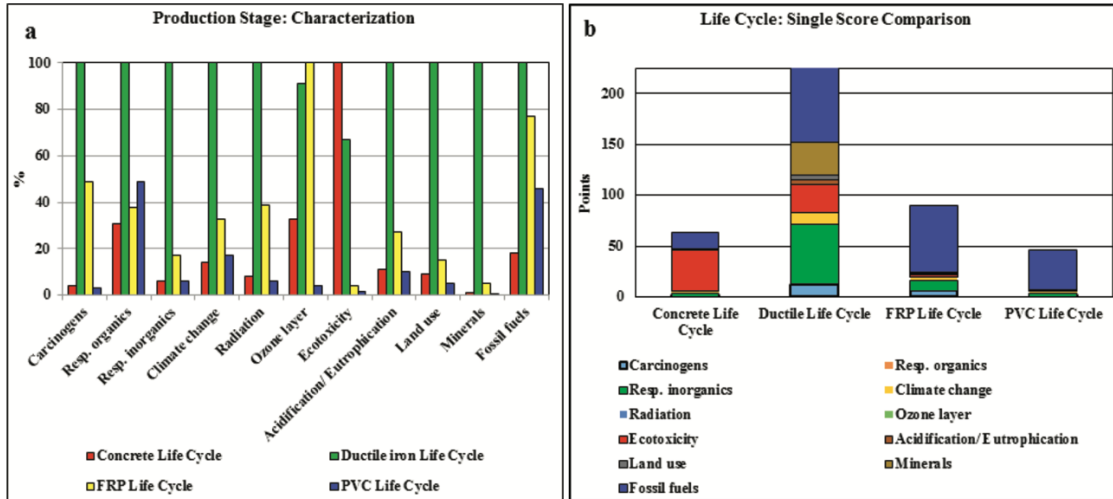


Ilustración 22. Resultados de categorías de impacto ambiental reportados por Vahidi et al. (2015)

Chilana et al. (2016) presentaron en la Ilustración 23 los resultados según cada etapa del estudio. En esta se puede apreciar que, en la fabricación el acero es el material que más emisiones de CO₂ genera y por ende, al ser esta la fase que mayor impacto genera en el ciclo, es el material con mayor huella de carbono a pesar de que se asume un porcentaje de reciclaje del 39%. Por parte del concreto, este material genera más emisiones en el transporte y en la instalación, pero la diferencia no es del todo significativa.

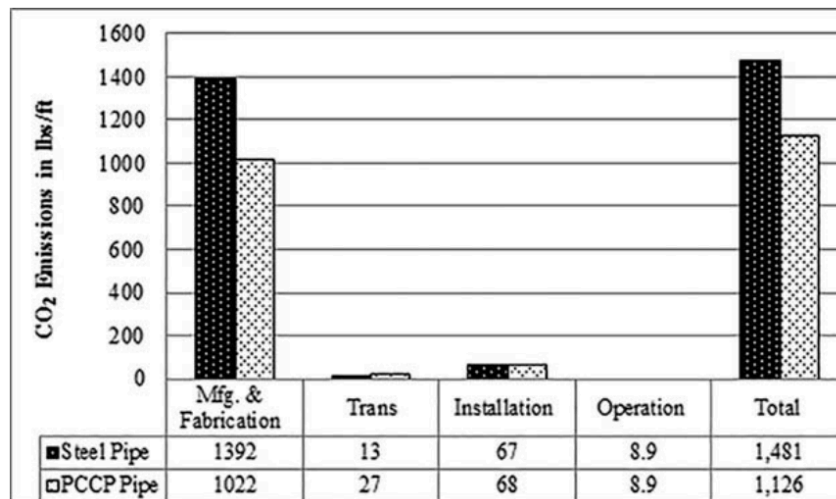


Ilustración 23. Resultados del análisis de ciclo de vida para el estudio de Chilana et al. (2016)

Hajibabaei et al. (2019) en su estudio consideraron una sección de la red de distribución de agua potable de la ciudad de Teherán en Irán. Los resultados de la Tabla 10 demuestran que el DI es el material que más impactos genera, en comparación con el resto que fue seleccionado, en todas las

categorías de impacto. A su vez, el acero es el siguiente material con más altos índices por categoría, en especial en calentamiento global (GWP). En cuanto al fibrocemento, este material resulta tener un alto impacto en demanda acumulada de energía, por lo cual, los termoplásticos presentan mejores resultados en este caso comparativo.

Tabla 10. Resultados del análisis de ciclo de vida para el estudio de Hajibabaei et al. (2019)

Categoría de impacto	Unidad	PVC	Fibrocemento	DI	Acero	HDPE
GWP	Kg CO ₂ eq	13324.09	230928.1	4883186	1352078	59943.81
OLD	Kg CFC-11 eq	0.002	0.03	0.49	0.08	0.007
PO	Kg C ₂ H ₄ eq	3.16	89.45	2358.30	537.91	16.79
AP	Kg SO ₂ eq	64.81	1980.79	33674.14	6806.15	296.06
EU	Kg PO ₄ eq	15.34	637.85	14950.76	3444.42	65.87
CED	MJ	230914.1	25391934	65361493	18090574	1288234

Nandyala et al. (2019) determinaron que las emisiones producidas a lo largo del ciclo de vida de las tuberías de acero son mayores que las del concreto. Sin embargo, al considerar la producción de acero desde materias primas recicladas, este puede llegar a tener una menor huella de carbono que el concreto. Por otro lado, la Ilustración 24 representa que en su mayoría las emisiones de CO₂ están arraigadas con el proceso de producción y fabricación de las tuberías, abarcando un 74.5%, mientras que para la instalación es del 21.5%, para la operación del 3.1% y para el transporte del 0.9%.

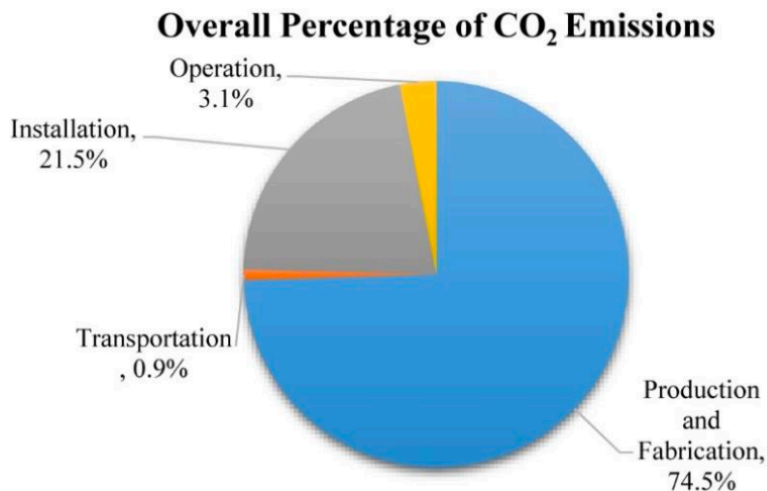


Ilustración 24. Resultados del análisis de ciclo de vida para el estudio de Nandyala et al. (2019)

Alsadi et al. (2020b) contemplaron en su estudio todas las etapas de ciclo de vida de cuatro diferentes materiales de tuberías. Por lo cual, a partir de la Ilustración 25 se puede apreciar que el material que mas emisiones genera es el CIPP, seguido por el PCCP, HDPE y finalmente el PVC. A su vez, se evidencia que en la mayoría de los casos la etapa que tiene más huella de carbono es la de operación y seguida por la de fabricación. Sin embargo, en el PCCP se evidencia que la etapa de instalación es

la segunda que más emisiones genera, sirviendo como contraste con la instalación que es la que menos impacto presenta en comparación con los otros materiales. Finalmente, se evidencia que la fase de disposición genera muy bajas emisiones en comparación con las otras etapas y resulta ser mayor en el CIPP ya que este material no permite ningún proceso de reciclaje.

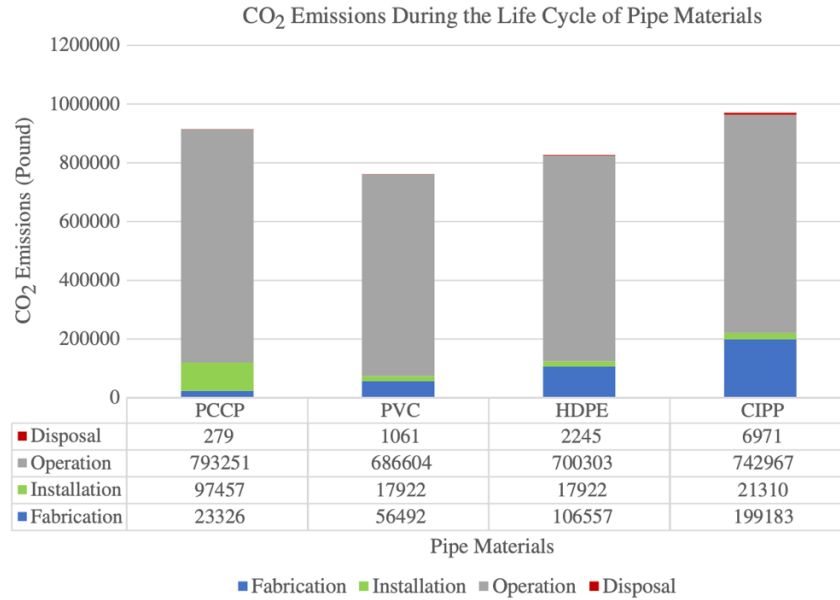


Ilustración 25. Resultados del análisis de ciclo de vida para el estudio de Alsadi et al. (2020b)

5. CASO DE ESTUDIO

A partir de lo establecido en el estado del arte fue posible comprender la importancia y el amplio rango de aplicación de los estudios de ciclo de vida, ya que estos aportan a la toma de decisión en la escogencia de variables dentro de obras, proyectos, políticas públicas y demás. Sin embargo, es imperante resaltar que aun no se cuenta con este tipo de estudios sobre proyectos hidráulicos urbanos en Colombia y, asimismo, hay vacíos de información sobre la existencia de estos en la región. Es por esto que, es de gran importancia incentivar la ejecución de este tipo de trabajos investigativos con variables locales que permitan aportar al desarrollo tanto económico como sostenible del país. Teniendo en cuenta lo anterior, en esta sección se presenta la información concerniente al caso de estudio y su respectiva justificación para la construcción del pertinente análisis del ciclo de vida.

5.1. Ubicación

La ubicación del lugar de instalación es de suma importancia ya que este punto representa el territorio de llegada y de partida para el transporte de las materias primas, de los insumos y equipos de instalación. Asimismo, en esta zona se realizan los trabajos de mantenimiento y operación dependiendo de la escogencia y alcance de las etapas del ciclo de vida.

En este caso, el lugar seleccionado es en la ciudad de Bogotá, específicamente en la Calle 127 con Avenida Suba. La localización de este punto se presenta en la Ilustración 26.

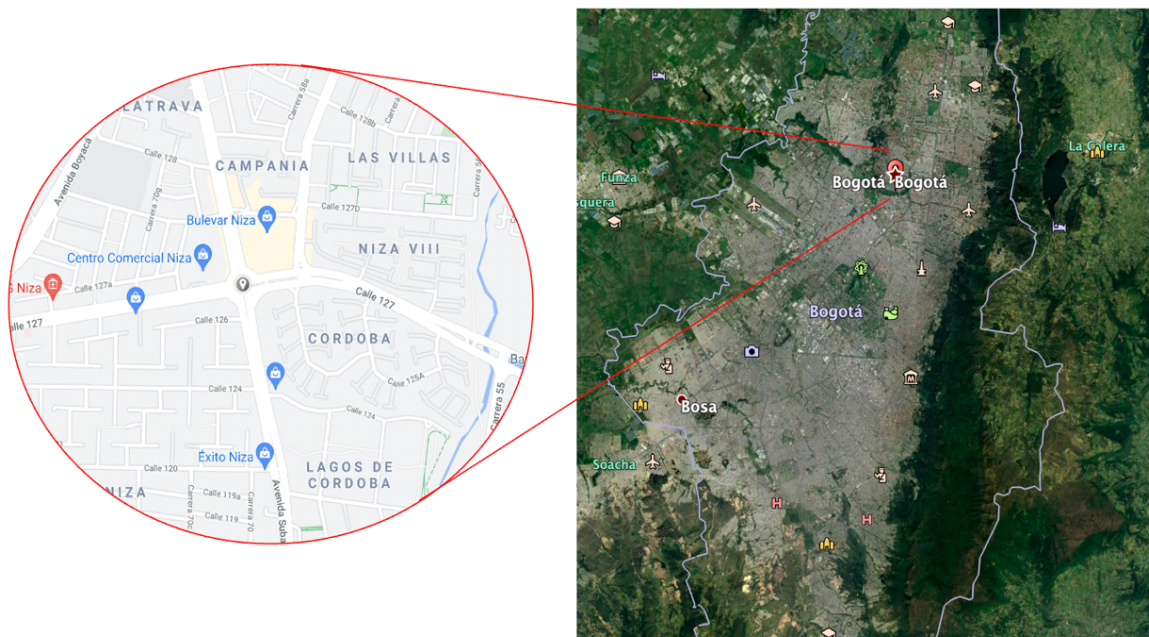


Ilustración 26. Vista satelital del punto de localización del caso de estudio

En cuanto a la justificación de la escogencia del proyecto en esta ciudad, es porque representa uno de los centros poblados con mayor crecimiento del país y porque en esta se desarrolla gran cantidad del comercio relacionado con tuberías de sistemas hidráulicos, por lo que el transporte es viable y hay múltiples vías de acceso. A su vez, el punto está localizado en el norte de la ciudad entre dos vías principales rodeadas de zonas comerciales y residenciales, por lo que se puede suponer la instalación de sistemas con múltiples diámetros que permitan solventar las necesidades de prestación de servicios.

5.2. Selección de materiales

La selección de los materiales para realizar el análisis se basó en diferentes variables de escogencia, estas se describen en seguida:

- Se analizó la composición de materiales de la red de tuberías de la zona 1 de Bogotá, para tener en cuenta la composición real de una red de la ciudad en la cual se localiza el caso de estudio. Lo anterior permitió que se seleccionaran materiales como el PVC, concreto, hierro dúctil (DI) y acero.
- Dentro de la amplia variedad de materiales que se encuentran en el mercado fue importante tener en cuenta los que más se comercializan en el país, para de tal forma poder realizar consultas con las diferentes industrias nacionales. A partir de este punto fue posible tomar la determinación de no tener en cuenta las tuberías de plástico reforzado con fibra de vidrio y las de arcilla vitrificada por su baja participación en el mercado.
- Se tuvo en cuenta la disponibilidad de información y la factibilidad de establecer colaboraciones con industrias para acceder a esta, o en dado caso, que la información estuviese disponible en la literatura.
- Otro factor importante es la existencia de materiales emergentes que se están posicionando en el mercado como alternativas factibles de escogencia gracias a sus propiedades cada más competitivas. Por ende, se incluyó a las tuberías de polietileno de alta densidad (HDPE) y de polipropileno (PP).
- Se decidió establecer un escenario en el cual se utiliza cierto porcentaje de PVC reciclado en la fabricación de las tuberías y el resto se contempla como material virgen. Por lo cual se instruye como un material aparte que puede ser comparado con el resto en la fase de manufactura.

Con base en lo anterior, los materiales seleccionados fueron los siguientes:



5.3. Determinación de variables base

La determinación de las diferentes variables base del estudio es de suma importancia para establecer el alcance investigativo y para poder organizar la información referente a la modelación computacional. Primero, se constituyó como un punto importante que el estudio abarque tuberías para sistemas de abastecimiento y sanitarios, ya que de esta forma se puede hacer acotaciones de diferentes diámetros a evaluar, así como la variación de factores fundamentales como la presurización o flujo a superficie libre del agua que pase por los ductos. Teniendo en cuenta la anterior, para la escogencia de los diámetros fue necesario combinar dos puntos clave que fueron el análisis de la red de tuberías de la zona 1 de Bogotá y la disponibilidad de diámetros a nivel comercial, por esto se instó a escoger los siguientes:

Abastecimiento

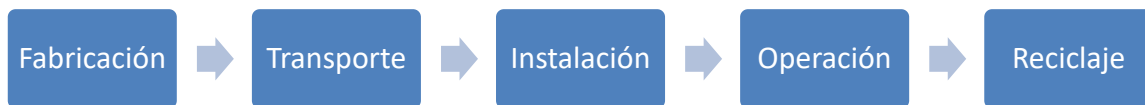
- 250 mm
- 350 mm

Sanitario

- 700 mm
- 900 mm

Por otro lado, la longitud total de análisis se determinó como de 100 metros y se estableció una diferencia de cabeza de altura entre el punto inicial y final del sistema de 0.5 metros. Lo anterior dado que se trata de un tramo con una longitud limitada y no tan pronunciada. A su vez, el tiempo de operación total de cada sistema se establece como de 100 años, ya que este periodo permite cubrir un tiempo de vida alto para todos los materiales de tuberías. Sin embargo, por la revisión bibliográfica es claro que no todos pueden alcanzar este tiempo de servicio pero, por efectos comparativos y al tratarse de un ejercicio teórico, se decidió establecerlo como un periodo base en el cual ninguno se reemplazaría.

En cuanto a las etapas del ciclo de vida que se busca abarcar, es fundamental que para que se trate de un análisis completo y por ende se contemple un periodo establecido como “Cradle to Grave” (desde la Cuna hasta la Tumba), es decir que se consideren cada una de las fases que serían las siguientes:



Dentro de cada una de las fases se contemplan ciertos aspectos que se incluyen o excluyen de cada análisis, por lo que en la Tabla 11 se especifica cada uno de ellos.

Tabla 11. Aspectos incluidos y excluidos de cada etapa de análisis

Fase	Incluido	Excluido
Fabricación	La manufactura de las materias primas requeridas para obtener cada insumo, así como los procesos de fabricación de los tubos.	La extracción de las materias primas vírgenes, la fabricación y mantenimiento de la maquinaria necesaria.
Transporte	Tipo de vehículo, distancia recorrida y consumo de combustible.	Producción y mantenimiento de los vehículos.
Instalación	Emisiones generadas por la maquinaria y transporte de materias primas.	Producción y mantenimiento de equipos, fabricación de insumos y proceso de repavimentación de la superficie.
Operación	Pérdidas por fricción, tiempo de uso diario por el periodo de modelación, uso de bombas y mantenimiento de los ductos	Presión de entrega, fabricación y mantenimiento de las bombas.
Reciclaje	Transporte hasta el centro de acopio o punto de reciclaje.	Proceso de reciclaje o transformación de los materiales.

Es importante tener en cuenta que dentro del ciclo de vida no se incluyen las estimaciones relacionadas con el proceso de desmantelamiento del sistema cuando este cumple su tiempo de vida útil.

6. MODELACIÓN DE CASO DE ESTUDIO

Para realizar el proceso de modelación computacional se recopiló información de cada una de las etapas descritas anteriormente para cada material. Estos datos se ingresaron al software SimaPro en forma de escenarios y así se pudo evaluar la huella de carbono. Cabe aclarar que la información que fue suministrada por medio de la consulta con empresas de la industria, se reporta con la fuente de “Fabricante” por términos de confidencialidad de esta. Con base en lo anterior, los datos y los cálculos correspondientes se describen a continuación según la etapa de ciclo de vida correspondiente.

6.1. Fabricación

Para la fase fabricación es importante establecer que se consultó información con empresas del sector de la manufactura de tuberías. A su vez, ciertos puntos clave fueron obtenidos de la literatura y se utilizó Google Earth y Google Maps para la referenciación de puntos y distancias de transporte. A continuación, se presenta la información utilizada en cada caso.

6.1.1. Acero

Para las tuberías de acero, el fabricante reportó que en promedio para el año 2020 se registró un consumo energético de 75.49 kWh para la producción de una tonelada de tuberías, bajo una proporción del 80% de ese valor para la producción de la lámina que se utiliza para moldear la tubería y del 20% para producir la tubería como tal. A su vez, se consultó el catalogo del fabricante para saber la longitud y el peso que puede tener una sección total de tubería según el diámetro. En este caso, es importante aclarar que no se producen tuberías de diámetros tales como 250, 350, 700 y 900 mm, por lo que este ejercicio de cálculo se realizó con fines netamente comparativos y asumiendo proporciones de consumo y peso de materiales similares a las de los diámetros disponibles en el mercado. En este caso, las secciones se producen en longitudes de 12 metros y el peso se reporta para la unidad completa, por lo que se interpoló el resultado para la longitud total de instalación de 100 m.

Con base en lo anterior, en la Tabla 12 se presentan los resultados de peso y consumo energético para la producción de cada uno de los diámetros considerados en esta investigación.

Tabla 12. Cálculos de peso y consumo energético para la producción de tuberías de Acero

Diámetro (mm)	Longitud (m/Und)	Peso (Kg/Und)	Peso total (Kg)	Energía total (kWh)	Energía fabricación de láminas (kWh)	Energía fabricación de tuberías (kWh)
250	12	369.88	3106.99	234.55	187.64	46.91
350	12	517.83	4349.79	328.37	262.69	65.67
700	12	1035.66	8699.58	656.73	525.38	131.35
900	12	1331.57	11185.17	844.37	675.49	168.87

Posteriormente, fue necesario establecer los puntos de transporte de materias primas para la fabricación. Por lo que se tuvo en cuenta todas las distancias relacionadas hasta el punto de manufactura únicamente. Para el caso de las tuberías de acero, se contempló transporte marítimo y terrestre, dado que las láminas se importan desde Brasil y llegan hasta el Puerto de Barranquilla que es el punto desde el cual se movilizan a la fábrica final. La esquematización completa del transporte se planteó en Google Earth, como se presenta en la Ilustración 27.

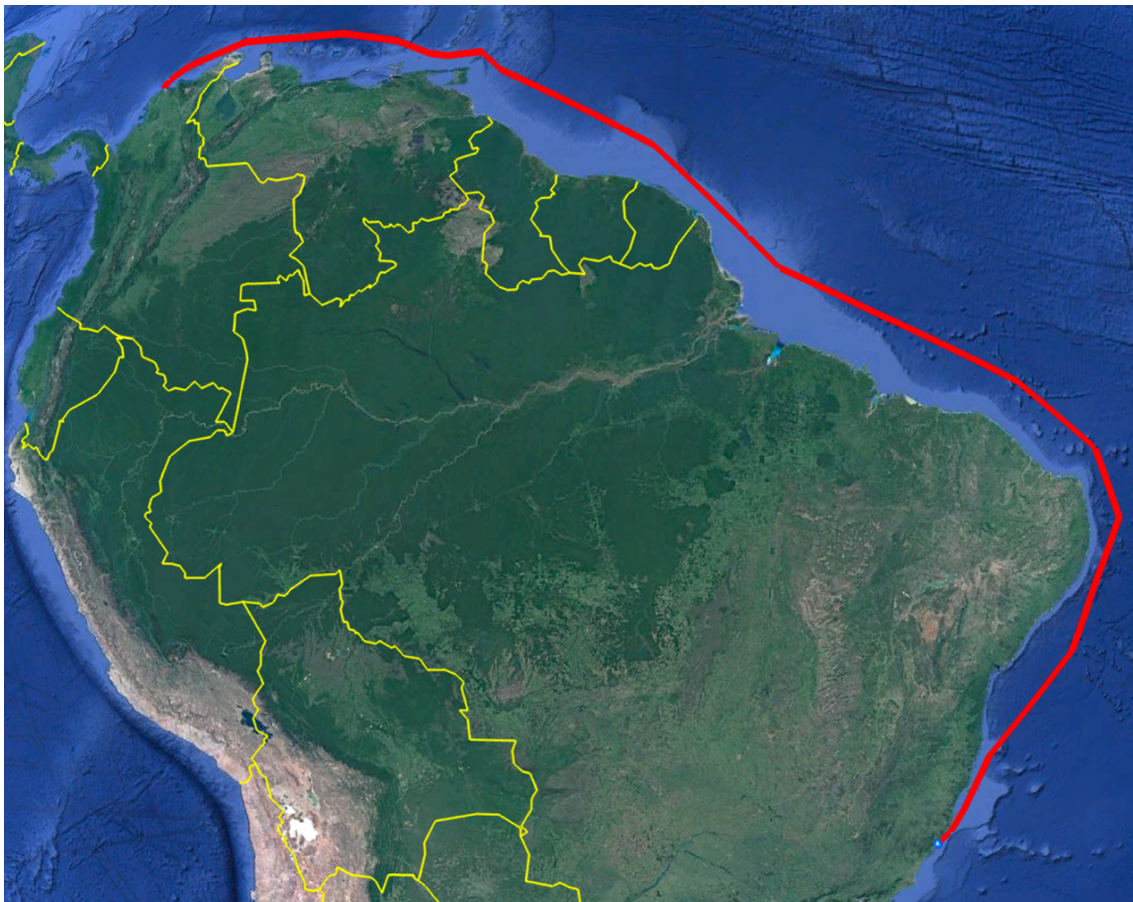


Ilustración 27. Esquema de transporte para la fabricación de tuberías de Acero

Por otro lado, se tuvo en cuenta que los sistemas de transporte que se pueden seleccionar en Simapro requieren el ingreso de la información en la unidad tonelada-kilómetro (tKm), que se obtiene de multiplicar el peso (M) de cada sección de tuberías según el diámetro por la distancia (D) estimada de desplazamiento, como se muestra en la Ecuación 1. Por consiguiente, en las Tablas 13 y 14 se presentan los resultados obtenidos según los diferentes puntos de partida y de llegada y teniendo en cuenta el diámetro específico de las tuberías del presente estudio.

$$tKm = M (Ton) * D(Km)$$

Ecuación 1

Tabla 13. Resultados de la estimación de tKm según la ruta para diámetros de 250 y 350 mm – Acero

Punto de partida	Punto de llegada	Distancia (Km)	Diámetros			
			250 mm		350 mm	
			Peso (Kg)	tKm	Peso (Kg)	tKm
Fábrica de láminas de Acero	Terminal Oceánica Vitória, Brasil	6.1	3106.99	19.0	4349.79	26.5
Terminal Oceánica Vitória, Brasil	Puerto de Barranquilla	7063	3106.99	21944.7	4349.79	30722.6
Puerto de Barranquilla	Fábrica de tuberías	6.8	3106.99	21.1	4349.79	29.6

Tabla 14. Resultados de la estimación de tKm según la ruta para diámetros de 700 y 900 mm - Acero

Punto de partida	Punto de llegada	Distancia (Km)	Diámetros			
			700 mm		900 mm	
			Peso (Kg)	tKm	Peso (Kg)	tKm
Fábrica de láminas de Acero	Terminal Oceánica Vitória, Brasil	6.1	8699.58	53.1	11185.17	68.23
Terminal Oceánica Vitória, Brasil	Puerto de Barranquilla	7063	8699.58	61445.1	11185.17	79000.86
Puerto de Barranquilla	Fábrica de tuberías	6.8	8699.58	59.2	11185.17	76.06

Posteriormente, se procedió a ingresar los respectivos datos a Simapro, sin embargo era necesario seleccionar el material, proceso o fuente de energía que mejor se acomodara a las condiciones del caso de estudio en Colombia o que en su defecto cumpliera con condiciones generales para todo el mundo. Para esto, se analizó la disponibilidad de datos en la database de Ecoinvent. Por lo cual, en la Tabla 15 se presentan las variables contempladas para la fabricación de las tuberías de acero.

Tabla 15. Especificación de selección de procesos en Simapro para la fabricación de tuberías de Acero

Nombre en SimaPro	Descripción	Unidad	Fuente
Reinforcing steel {RoW} production Cut-off, U	Acero para la fabricación de láminas.	Kg	Cálculo a partir de catálogo de productos.

Nombre en SimaPro	Descripción	Unidad	Fuente
# Electricity, high voltage {CO} market for electricity, high voltage Cut-off, U	Energía para la fabricación de tuberías.	kWh	Fabricante
# Electricity, high voltage {CO} market for electricity, high voltage Cut-off, U	Energía para la fabricación de las láminas.	kWh	Fabricante
Transport, freight, lorry >32 metric ton, EURO4 {RoW} transport, freight, lorry >32 metric ton, EURO4 Cut-off, U	Transporte terrestre desde fábrica de láminas a puerto en Brasil.	tKm	Google Earth
Transport, freight, sea, container ship {GLO} transport, freight, sea, container ship Cut-off, U	Transporte marítimo desde puerto en Brasil al puerto de Barranquilla.	tKm	Google Earth
Transport, freight, lorry >32 metric ton, EURO4 {RoW} transport, freight, lorry >32 metric ton, EURO4 Cut-off, U	Transporte terrestre desde el Puerto de Barranquilla a fábrica de tuberías.	tKm	Google Earth

A partir de la Tabla anterior es necesario realizar algunas aclaraciones de la información presentada, por lo que se abarca en los siguientes puntos:

- La energía que se utiliza en el proceso de modelación corresponde a un “mix” en el cual se ajustaron los valores disponibles en Ecoinvent, para un inventario específico de Colombia. Para esto, se consultó los reportes generados por la empresa XM del grupo ISA, que “gestiona con sistemas de tiempo real la administración del mercado de energía mayorista y el desarrollo de soluciones y servicios de energía e información” (XM. 2021). Por lo cual, se tuvo en cuenta la generación energética de los diferentes sectores productivos a nivel nacional. Estos valores que fueron ingresados a Simapro se presentan a continuación:

Tabla 16. Mix de energía montado en Simapro

Fuente	Unidad	Valor
Energía de carbón	kWh	0,076
Energía hidroeléctrica de reservorios	kWh	0,680
Energía hidroeléctrica de ríos	kWh	0,054
Energía de gas natural - Planta de poder combinada	kWh	0,137
Energía de gas natural - Planta convencional	kWh	0,018
Energía de petróleo	kWh	0,029
Energía eólica	kWh	0,001
Energía importada	kWh	0,006
Energía del mercado	kWh	0,036

- Cuando se hace referencia a un proceso y/o producto Cut-off, se considera que “El productor es totalmente responsable de la disposición de sus desechos, y que no recibe ningún crédito por la provisión de cualquier material reciclable” (EI Ecoinvent. 2021). Por lo cual, dentro del proceso de modelación de cada etapa no se está considerando la disposición o manejo de los sub-desechos generados.
- Por otro lado, las siglas en inglés RoW y GLO hacen referencia a Rest of the World y Geographical Location Global, respectivamente. Estas contemplan producción promedio a nivel mundial y permiten considerar un ponderado cuando en la base de datos de Ecoinvent no se cuenta con información local completa (EI Ecoinvent. 2021).
- Se decidió escoger el mismo tipo de medios de transporte tanto a nivel terrestre como marítimo para todos los materiales. Esto para estandarizar esta variable y hacer que las diferencias en las emisiones generadas se enfoquen en las distancias y en los pesos específicos de los tramos de tubería.

6.1.2. Concreto

Para el caso de las tuberías de concreto, se consultó información con un fabricante local de este tipo de ductos. En este caso, reportaron que para los diámetros de 250 y 350 mm se producen secciones de 1.25 m de longitud y suministraron datos sobre el peso de todos los tramos. A su vez, para los diámetros de 700 y 900 mm, se producen secciones de 2.50 m de longitud y por su tamaño deben incluir un refuerzo con acero. Con esta información, se pudo obtener el volumen de concreto requerido para la fabricación de la longitud total de 100 m de tuberías según el diámetro, para esto se tomó un valor de densidad del material de 2374 Kg/m^3 (ρ) y se realizó el respectivo despeje con la Ecuación 2, ya que se contaba con la información concerniente a los pesos totales de los tramos (M). Estos resultados se presentan en la Tabla 17.

$$\text{Volumen (m}^3\text{)} = \frac{M(\text{Kg})}{\rho \left(\frac{\text{Kg}}{\text{m}^3}\right)} \quad \text{Ecuación 2}$$

Tabla 17. Datos de peso y volumen de concreto y acero requeridos para la fabricación de los ductos

Diámetro (mm)	Longitud (m)	Concreto utilizado (Kg/Und)	Peso total concreto (Kg)	Acero (Kg)	Volumen (m³)
250	1,25	97	7760	0	3,26
350	1,25	165	13200	0	5,56
700	2,50	1250	50000	640	21,06
900	2,50	1953	78120	1080	32,91

Por otro lado, el fabricante suministró información sobre el consumo energético en los procesos de mezclado, compactación y manipulación del concreto, así como, el consumo máximo de agua, todo

esto para la producción total de 1 m³ de concreto con características propias necesarias para la fabricación de tuberías. Estos datos se presentan en la Tabla 18.

Tabla 18. Datos de consumo energético y de agua para la producción de concreto

Por producción de 1 m³ de concreto	
Planta de mezclado (kWh)	45,00
Compactación y manipulación (kWh)	9,02
Consumo máximo de agua (Kg)	121,63

Con los datos anteriores fue posible realizar los respectivos cálculos a partir del volumen de concreto requerido para cada diámetro de tuberías y según cada proceso. A continuación, en la Tabla 19, se presentan los resultados obtenidos.

Tabla 19. Consumo energético y de agua para la producción de los tramos totales según el diámetro

Proceso o consumo	Diámetro (mm)			
	250	350	700	900
Planta de mezclado (kWh)	147,09	250,21	947,77	1480,79
Compactación y manipulación (kWh)	29,49	50,16	190,00	296,86
Consumo máximo de agua (Kg)	397,59	676,31	2561,79	4002,55

Como para los diámetros de 700 y 900 mm es necesario realizar un refuerzo de acero, también se debe contemplar la energía concerniente a la fabricación de este material, teniendo en cuenta la proporción presentada en la sección anterior de producción de acero (75,49 kWh/Ton). Por lo cual, en seguida se especifica tal consumo según el diámetro.

Tabla 20. Consumo energético para la producción del acero de refuerzo

Diámetro (mm)	Energía acero (kWh)
250	0
350	0
700	48,31
900	81,53

En esta etapa de manufactura también se contemplan las distancias de transporte del cemento y del acero utilizado para refuerzo, por lo cual en las Tablas 21 y 22 se detalla la información de cada uno de los diámetros considerados en esta investigación para el caso de las tuberías de concreto.

Tabla 21. Resultados de la estimación de tKm según la ruta y para diámetros de 250 y 350 mm – Concreto

Diámetros	
250 mm	350 mm

Punto de partida	Punto de llegada	Distancia (Km)	Peso (Kg)	tKm	Peso (Kg)	tKm
Planta de fabricante de cemento	Fábrica de tuberías	27,5	7760,00	213,4	13200	363

Tabla 22. Resultados de la estimación de tKm según la ruta y para diámetros de 700 y 900 mm – Concreto

Punto de partida	Punto de llegada	Distancia (Km)	Diámetros			
			700 mm		900 mm	
			Peso (Kg)	tKm	Peso (Kg)	tKm
Planta de fabricante de cemento	Fábrica de tuberías	27,5	50000	1375,0	78120	2148,3
Fábrica de láminas de Acero	Terminal Oceánica Vitória, Brasil	6,1	640	3,9	1080	6,59
Terminal Oceánica Vitória, Brasil	Puerto de Barranquilla	7063	640	4520,3	1080	7628,04
Puerto de Barranquilla	Fábrica de tuberías	980	640	627,2	1080	1058,40

La estimación del recorrido desde la planta de fabricación de concreto y la fabrica donde se elaboran las tuberías se hizo por medio de Google Earth y comprende la ruta mostrada en la Ilustración 28.

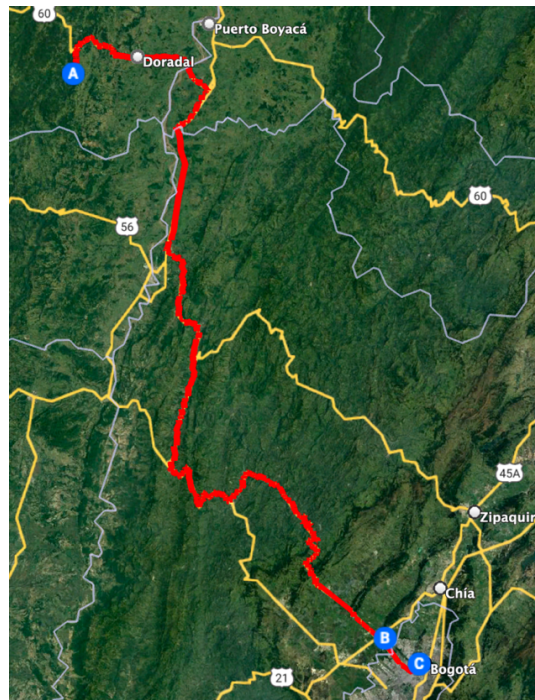


Ilustración 28. Esquema de transporte para la fabricación de tuberías de Concreto

Con la información anterior, se procedió a hacer la respectiva selección de las materias primas, medios de transporte y procesos en SimaPro. Es importante aclarar que para el caso específico del concreto, se encontró un material montado en la base de datos con información específica y local de Colombia. Este último presenta una resistencia de 40 MPa, que es un valor que se encuentra dentro del rango alto que es entre 32-60 MPa por lo cual se pudo realizar la selección (Nilson, A. 2001). La descripción de lo anterior se presenta en la Tabla 23.

Tabla 23. Especificación de selección de procesos en Simapro para la fabricación de tuberías de Concreto

Nombre en SimaPro	Descripción	Unidad	Fuente
Concrete, 40MPa {CO} concrete production, 40MPa, ready-mix, with cement, alternative constituents 21-35% Cut-off, U	Material base para la fabricación de la tuberías de concreto.	m ³	Fabricante
Transport, freight, lorry >32 metric ton, EURO4 {RoW} transport, freight, lorry >32 metric ton, EURO4 Cut-off, U	Transporte de fábrica de cemento a punto de fábrica de tuberías.	tKm	Google Earth
# Electricity, high voltage {CO} market for electricity, high voltage Cut-off, U	Consumo energético en la planta de mezclado.	kWh	Fabricante
# Electricity, high voltage {CO} market for electricity, high voltage Cut-off, U	Consumo energético en procesos de compactación y manipulación.	kWh	Fabricante
Water, deionised {RoW} water production, deionised Cut-off, U	Consumo máximo de agua en el proceso de fabricación de las tuberías.	Kg	Fabricante
Reinforcing steel {RoW} production Cut-off, U	Acero usado para el refuerzo de las tuberías.	Kg	Cálculo a partir de catálogo de productos.
# Electricity, high voltage {CO} market for electricity, high voltage Cut-off, U	Energía para la fabricación del acero para ser usado en el refuerzo.	kWh	Fabricante

6.1.3. PVC

En cuanto a la información sobre la manufactura de tuberías de PVC, se realizó la consulta de esta con compañías fabricantes en el sector. Por lo cual, inicialmente se realizó la estimación del peso total del tramo de 100 m a partir de la extrapolación de esta con referencia a lo reportado en un catálogo comercial. Lo anterior se presenta en la Tabla 24.

Tabla 24. Peso total del tramo de tuberías según el diámetro - PVC

Diámetro	Peso (Kg/m)	Peso total del tramo (Kg)
250	8,68	867,56

Diámetro	Peso (Kg/m)	Peso total del tramo (Kg)
350	12,15	1214,58
700	24,29	2429,17
900	31,23	3123,21

A partir del peso de cada tramo según el diámetro, se pudo estimar el consumo energético, el consumo de combustible y el uso de materiales primarios para la obtención de resina de PVC. Esto fue posible gracias a la información que fue suministrada por el fabricante con referencia al año 2019. Lo anterior se presenta en la Tabla 25.

Tabla 25. Insumos para la fabricación de resina de PVC según el diámetro

ITEM	Unidad	250 mm	350 mm	700 mm	900 mm
Peso del material	Ton	0,87	1,21	2,43	3,12
Electricidad	kWh	158,01	221,21	442,42	568,83
Gas Natural Caldera	m ³	3248,22	4547,49	9095,02	11693,57
VAM (Vinyl Acetate)	Kg	27,83	38,96	77,92	100,18
VCM (Vinyl Chloride)	Kg	854,58	1196,40	2392,82	3076,47

Por otro lado, el fabricante de tuberías reportó el peso total de ductos producidos en el año 2019 y el respectivo consumo energético y de combustibles para este proceso. Estos valores se referencian en la Tabla 26.

Tabla 26. Consumo energético y de combustibles para la producción total tuberías de PVC según fabricante

Producción (Ton)	Energía (kWh)	Gas natural (m ³)	Diésel (Kg)	GLP (Kg)
34961,15	26998676,00	89605,58	3618,12	50674,53

A partir de la información anterior, se estimó el consumo energético y de combustibles para la producción del tramo total de 100 m de tuberías para cada uno de los diámetros del presente estudio. Estos resultados se presentan a continuación.

Tabla 27. Consumo energético y de combustibles para la fabricación de tuberías de PVC según el diámetro

Diámetro (mm)	Producción (Ton)	Energía (kWh)	Gas natural (m ³)	Diésel (Kg)	GLP (Kg)
250	0,87	669,97	2,22	0,09	1,26
350	1,21	937,96	3,11	0,13	1,76
700	2,43	1875,92	6,23	0,25	3,52
900	3,12	2411,90	8,00	0,32	4,53

En cuanto al transporte de las materias primas, para el caso del PVC se contempló transporte marítimo y terrestre. Por lo que la estimación de los recorridos se realizó por medio de Google Earth y comprende las rutas mostradas en la Ilustración 29. En este caso se contempló el transporte para la importación de materias primas iniciales para la fabricación de resina de PVC desde Estados Unidos. A su vez, se comprende el recorrido hasta la planta de fabricación de tuberías de este material.

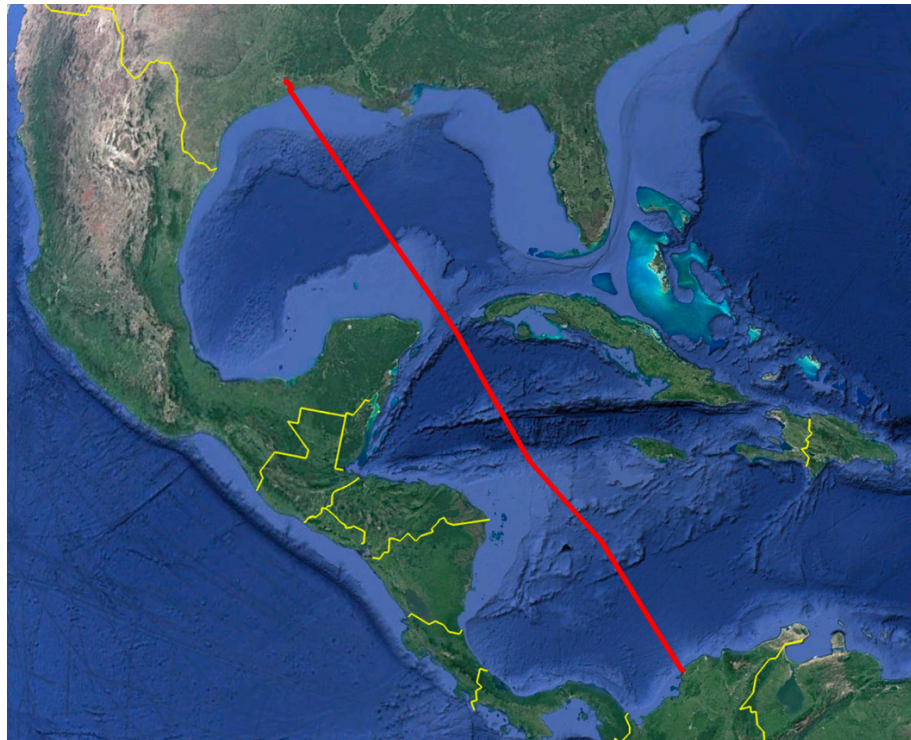


Ilustración 29. Esquema de transporte para la fabricación de tuberías de PVC

En las Tablas 28 y 29 se detalla la información de transporte para cada uno de los diámetros considerados en esta investigación.

Tabla 28. Resultados de la estimación de tKm según la ruta para diámetros de 250 y 350 mm – PVC

Punto de partida	Punto de llegada	Distancia (Km)	Diámetros			
			250 mm		350 mm	
			Peso (Kg)	tKm	Peso (Kg)	tKm
Puerto de Houston	Puerto de Cartagena	2994	867,56	2597,5	1214,58	3636,5
Puerto de Cartagena	Fabricante de resina de PVC	14,9	867,56	12,9	1214,58	18,1
Fabricante de resina de PVC	Fabricante de tuberías de PVC	1050	867,56	910,9	1214,58	1275,3

Tabla 29. Resultados de la estimación de tKm según la ruta para diámetros de 700 y 900 mm – PVC

Punto de partida	Punto de llegada	Distancia (Km)	Diámetros			
			700 mm		900 mm	
			Peso (Kg)	tKm	Peso (Kg)	tKm
Puerto de Houston	Puerto de Cartagena	2994	2429,17	7272,9	3123,21	9350,90
Puerto de Cartagena	Fabricante de resina de PVC	14,9	2429,17	36,2	3123,21	46,54
Fabricante de resina de PVC	Fabricante de tuberías de PVC	1050	2429,17	2550,6	3123,21	3279,38

A partir de las anteriores estimaciones fue posible seleccionar cada material, proceso y medio de transporte en SimaPro para la respectiva modelación. Por lo cual, a continuación se detalla el nombre de cada uno de la forma en la cual se encuentran disponibles en Ecoinvent y su respectiva descripción.

Tabla 30. Especificación de selección de procesos en Simapro para la fabricación de tuberías de PVC

Nombre en SimaPro	Descripción	Unidad	Fuente
Vinyl chloride {RoW} production Cut-off, U	Cloruro de vinilo requerido para la obtención de resina de PVC.	Kg	Fabricante
Vinyl acetate {RoW} production Cut-off, U	Acetato de vinilo requerido para la obtención de resina de PVC.	Kg	Fabricante
Natural gas, low pressure {RoW} natural gas pressure reduction from high to low pressure Cut-off, U	Gas natural requerido para la obtención de resina de PVC.	m ³	Fabricante
# Electricity, high voltage {CO} market for electricity, high voltage Cut-off, U	Energía requerido para la obtención de resina de PVC.	kWh	Fabricante
Transport, freight, sea, container ship {GLO} transport, freight, sea, container ship Cut-off, U	Transporte marítimo desde puerto en EE.UU. al puerto de Cartagena.	tKm	Google Earth
Transport, freight, lorry >32 metric ton, EURO4 {RoW} transport, freight, lorry >32 metric ton, EURO4 Cut-off, U	Transporte terrestre desde puerto de Cartagena hasta fábrica de resina de PVC.	tKm	Google Earth

Nombre en SimaPro	Descripción	Unidad	Fuente
Transport, freight, lorry >32 metric ton, EURO4 {RoW} transport, freight, lorry >32 metric ton, EURO4 Cut-off, U	Transporte terrestre desde fábrica de resina de PVC hasta fábrica de tuberías.	tKm	Google Earth
Liquefied petroleum gas {CO} liquefied petroleum gas production, petroleum refinery operation Cut-off, U	Combustible requerido en la fabricación de tuberías de PVC.	Kg	Fabricante
Refinery gas {CO} refinery gas production, petroleum refinery operation Cut-off, U	Combustible requerido en la fabricación de tuberías de PVC.	m ³	Fabricante
# Electricity, high voltage {CO} market for electricity, high voltage Cut-off, U	Energía requerida para la fabricación de tuberías de PVC.	kWh	Fabricante
Diesel {CO} diesel production, petroleum refinery operation Cut-off, U	Combustible requerido en la fabricación de tuberías de PVC.	MJ	Fabricante

6.1.4. Escenario de PVC reciclado

Dentro del alcance del presente trabajo de investigación está el proponer un escenario comparativo en el cual cierto porcentaje del material utilizado para la fabricación de las tuberías de PVC sea reciclado y poder así evaluar la variación de la huella de carbono de esta alternativa y de cuando se utilizan materias primas netamente vírgenes. Sin embargo, actualmente en Colombia no se cuenta con regulaciones que establezcan qué porcentaje de material puede ser utilizado con estos fines. No obstante, la Norma Técnica Colombiana NTC 979 (2020) en su séptima actualización busca introducir este tema, permitiendo que los ductos eléctricos y/o de cableado telefónico se compongan de hasta un 100% de PVC reciclado. Lo anterior es un factor que puede anteponer la evaluación y posible adjudicación de este tipo de normas para otra clasificación de ductos como los de transporte de aguas residuales y/o lluvias. Por lo cual, en un ejercicio teórico de la presente tesis se propone un valor del 40% para ser evaluado como material reciclado y que un 60% se mantenga con características convencionales. Esta distribución de porcentajes se realiza de forma aleatoria y teniendo en cuenta que el valor del material reciclado no debe ser excesivamente alto, ya que a nivel técnico y de mercado se debe contar con evaluaciones previas para establecer su efectividad tanto en funcionamiento como en acogida en actividades comerciales. A su vez, cabe resaltar que no se está teniendo en cuenta factores de pérdida de materiales al momento de la transformación, sino que, en el balance de masa el 100% de material reciclado que se recupera puede ser utilizado nuevamente para la fabricación de los nuevos ductos.

En este orden de ideas, en la Tabla 31 se presenta la distribución de pesos de cada clasificación a partir del peso neto del material para la fabricación.

Tabla 31. Distribución de peso de materiales para la fabricación de tuberías de PVC - Escenario de reciclaje

Diámetro (mm)	Peso total (Kg)	Material virgen (Kg)	Material reciclado (Kg)
250	867,56	520,54	347,02
350	1214,58	728,75	485,83
700	2429,17	1457,50	971,67
900	3123,21	1873,93	1249,29

A partir de lo anterior, se realizó un proceso de cálculo similar al tenido en cuenta en la sección anterior de PVC en donde solo el 60% del peso es de material virgen. Por lo cual, en la Tabla 32 se presentan los resultados para los insumos de la fabricación de la resina de PVC.

Tabla 32. Insumos para la fabricación de resina de PVC según el diámetro – Escenario de reciclaje

ITEM	Unidad	250 mm	350 mm	700 mm	900 mm
Producción	Ton	0,52	0,73	1,46	1,87
Electricidad	kWh	94,81	132,73	265,45	341,30
Gas Natural Caldera	m ³	1.948,93	2.728,50	5.457,01	7.016,14
VAM (Vinyl Acetate)	Kg	16,70	23,38	46,75	60,11
VCM (Vinyl Chloride)	Kg	512,75	717,84	1.435,69	1.845,88

Para el caso de la fabricación de las tuberías, se asumió que el consumo energético y de combustibles del proceso es el mismo que en el escenario con 100% de materiales vírgenes ya que el peso de los ductos se mantiene igual, por lo cual se utilizaron los resultados presentados en la Tabla 27. Por otro lado, para el transporte se contempla que no hubo variaciones ya que presentan los mismos resultados de toneladas por kilómetro (tKm) que fueron contemplados en las Tablas 28 y 29.

Por otro lado, para estimar el consumo energético y de combustible requerido para la transformación del material reciclado, se consultó a una empresa que recolecta y realiza el proceso en Bogotá. En este caso, suministraron el esquema presentado en el Anexo 2 del cual algunos puntos clave son los siguientes:

- El 2% de los residuos recolectados son considerados chatarra.
- El 3% de los residuos recolectados son considerados como plásticos no aprovechables.
- Otro 3% de los residuos recolectados son considerados como no aprovechables.
- Se genera un consumo energético de 0.08 kWh / Kg en el proceso de transformación del material reciclado a pellets.
- Se da la pérdida de 1% del material.

- La distancia de transporte desde el punto de reciclaje hasta la fábrica se estableció en 19,9 km a partir la esquematización consultada en Google Earth.

Al tener en cuenta los anteriores puntos fue posible realizar las siguientes estimaciones a partir del peso reciclado de cada uno de los diámetros considerados. Por lo que estos se presentan en la Tabla 33.

Tabla 33. Consumo energético y transporte de material reciclado según el diámetro

	D: 250 mm	D: 350 mm	D: 700 mm	D: 900 mm
Peso de material inicial (Kg)	347,02	485,83	971,67	1249,29
Consumo energético (kWh)	27,76	38,87	77,73	99,94
Transporte (tKm) desde punto de reciclaje a fábrica de tuberías	6,91	9,67	19,34	24,86

En cuanto al montaje de los datos en SimaPro, para este escenario de PVC reciclado se utilizaron los mismos materiales, procesos y medios de transporte que en el escenario convencional mostrado en la Tabla 30, sin embargo los valores y la distribución fueron los factores diferenciales que se analizan en la sección de resultados.

6.1.5. HDPE

La recopilación de información para el Polietileno de Alta Densidad no se pudo hacer con fuentes primarias, ya que no fue posible establecer contacto con fabricantes de este sector. Sin embargo, se realizó una aproximación teórica para que este material pueda ser comparado con el resto que ya fueron descritos anteriormente. En este caso, se extrapoló el peso de las tuberías para obtener un valor aproximado del peso para los diámetros que se trabajan en el presente estudio. Lo anterior se presenta en la Tabla 34.

Tabla 34. Peso total del tramo de tuberías según el diámetro - HDPE

Diámetro (mm)	Peso (Kg/m)	Peso total (Kg)
250	9,19	919
350	18,54	1854
700	37,08	3708
900	47,67	4767

Para este termoplástico también se estableció una ruta de transporte de materias primas hasta una planta que las procesa en Cartagena y permite su posterior distribución a fábricas de tuberías. Esto se realizó por medio de Google Earth y se presentan en la Ilustración 30.

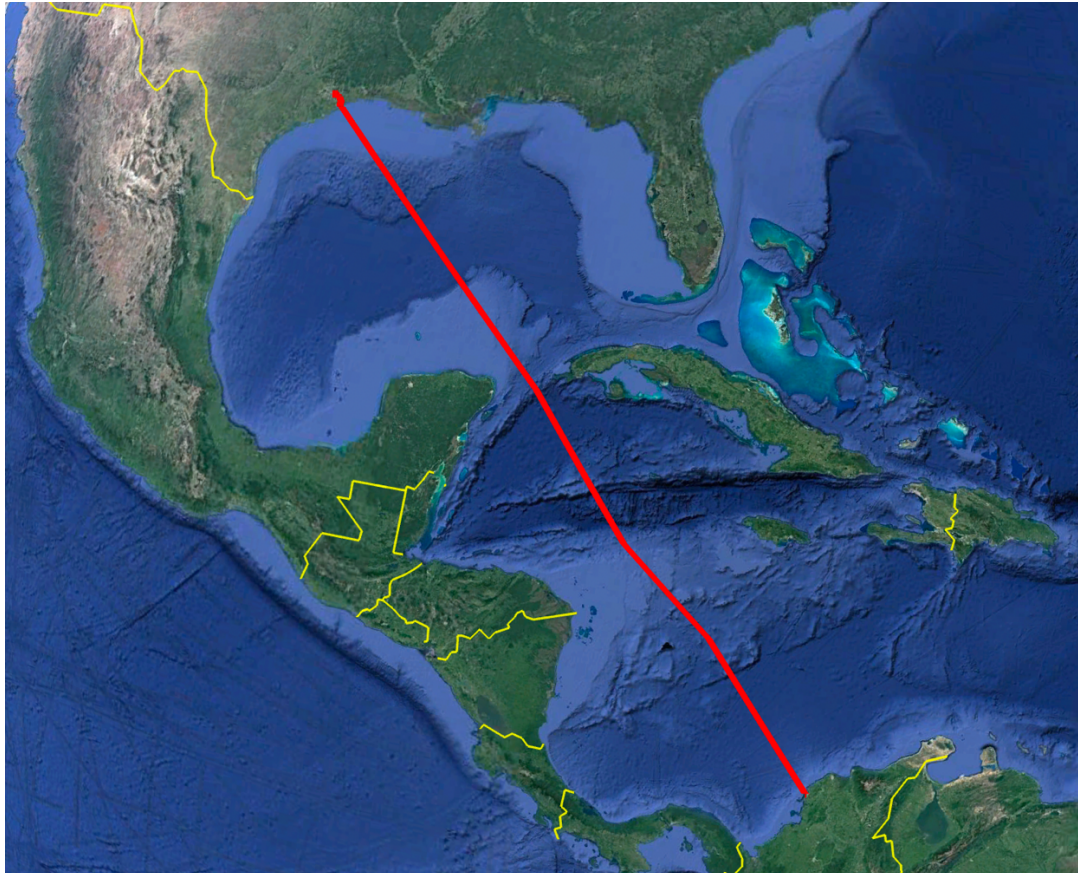


Ilustración 30. Esquema de transporte para la fabricación de tuberías de HDPE

A partir de lo anterior, se pudo establecer la información concerniente al transporte. Por lo cual, esta se presenta en las Tablas 35 y 36.

Tabla 35. Resultados de la estimación de tKm según la ruta para diámetros de 250 y 350 mm – HDPE

Punto de partida	Punto de llegada	Distancia (Km)	Diámetros			
			250 mm		350 mm	
			Peso (Kg)	tKm	Peso (Kg)	tKm
Puerto de Houston	Puerto de Cartagena	2994	919	2751,5	1854	5550,9
Puerto de Cartagena	Fabricante	12,9	919	11,9	1854	23,9
Fabricante	Fábrica de tuberías	1050	919	965,0	1854	1946,7

Tabla 36. Resultados de la estimación de tKm según la ruta para diámetros de 700 y 900 mm – HDPE

Punto de partida	Punto de llegada	Distancia (Km)	Diámetros			
			700 mm		900 mm	
			Peso (Kg)	tKm	Peso (Kg)	tKm
Puerto de Houston	Puerto de Cartagena	2994	3708	11101,8	4767	14273,68
Puerto de Cartagena	Fabricante	12,9	3708	47,8	4767	61,50
Fabricante	Fábrica de tuberías	1050	3708	3893,4	4767	5005,80

En cuanto al montaje de los datos en SimaPro, este se basó en la selección del material en la base de datos y se decidió escoger un proceso de extrusión de tuberías termoplásticas para simular así cuantías que se utilicen comúnmente en esta industria y que puedan aportar un valor comparativo en la huella de carbono de este material. A su vez, se utilizó el mismo tipo de medios de transporte que en los casos anteriores. Esto se presenta en la Tabla 37.

Tabla 37. Especificación de selección de procesos en SimaPro para la fabricación de tuberías de HDPE

Nombre en SimaPro	Descripción	Unidad	Fuente
Polyethylene, high density, granulate {RoW} production Cut-off, U	Material base para la fabricación de la tuberías de HDPE.	Kg	Fabricante
Transport, freight, sea, container ship {GLO} transport, freight, sea, container ship Cut-off, U	Transporte marítimo desde puerto en EE.UU. al puerto de Cartagena.	tKm	Google Earth
Transport, freight, lorry >32 metric ton, EURO4 {RoW} transport, freight, lorry >32 metric ton, EURO4 Cut-off, U	Transporte terrestre de puerto de Cartagena a fábrica de procesamiento de HDPE.	tKm	Google Earth
Transport, freight, lorry >32 metric ton, EURO4 {RoW} transport, freight, lorry >32 metric ton, EURO4 Cut-off, U	Transporte terrestre de fábrica de procesamiento de HDPE hasta fábrica de tuberías.	tKm	Google Earth
Extrusion, plastic pipes {RoW} extrusion, plastic pipes Cut-off, U	Proceso de extrusión para la fabricación de tuberías.	Kg	Fabricante

6.1.6. PP

En el caso de las tuberías de Polipropileno, se presentó un caso similar al de HDPE en donde la información no se pudo obtener de fuentes primarias. Por lo cual, se decidió realizar una

aproximación teórica y consultar directamente con el catálogo de un fabricante para saber los pesos de la totalidad de los ductos, como se presenta en la Tabla 38.

Tabla 38. Peso total del tramo de tuberías según el diámetro - PP

Diámetro	Peso (Kg/m)	Peso total (Kg)
250	7,82	782,00
350	10,95	1094,80
700	21,90	2189,60
900	28,15	2815,20

En cuanto a las distancias de transporte, se seleccionaron los mismos puntos que para el caso de las tuberías de HDPE, por lo que el factor de variabilidad para la obtención de los tKm es el peso que aporta el material. Estos resultados se presentan en las Tablas 39 y 40.

Tabla 39. Resultados de la estimación de tKm según la ruta para diámetros de 250 y 350 mm – PP

Punto de partida	Punto de llegada	Distancia (Km)	Diámetros			
			250 mm		350 mm	
			Peso (Kg)	tKm	Peso (Kg)	tKm
Puerto de Houston	Puerto de Cartagena	2994	782,00	2341,3	1094,80	3277,8
Puerto de Cartagena	Fabricante	12,9	782,00	10,1	1094,80	14,1
Fabricante	Fábrica de tuberías	1050	782,00	821,1	1094,80	1149,5

Tabla 40. Resultados de la estimación de tKm según la ruta para diámetros de 700 y 900 mm – PP

Punto de partida	Punto de llegada	Distancia (Km)	Diámetros			
			700 mm		900 mm	
			Peso (Kg)	tKm	Peso (Kg)	tKm
Puerto de Houston	Puerto de Cartagena	2994	2189,60	6555,7	2815,20	8428,71
Puerto de Cartagena	Fabricante	12,9	2189,60	28,2	2815,20	36,32
Fabricante	Fábrica de tuberías	1050	2189,60	2299,1	2815,20	2955,96

Para la selección de la información en SimaPro, se siguió con las mismas especificaciones que con el HDPE, por lo que esta información se presenta en la Tabla 41.

Tabla 41. Especificación de selección de procesos en SimaPro para la fabricación de tuberías de PP

Nombre en SimaPro	Descripción	Unidad	Fuente
Polypropylene, granulate {RoW} production Cut-off, U	Material base para la fabricación de la tuberías de PP.	Kg	Fabricante
Transport, freight, sea, container ship {GLO} transport, freight, sea, container ship Cut-off, U	Transporte marítimo desde puerto en EE.UU. al puerto de Cartagena.	tKm	Google Earth
Transport, freight, lorry >32 metric ton, EURO4 {RoW} transport, freight, lorry >32 metric ton, EURO4 Cut-off, U	Transporte terrestre de puerto de Cartagena a fábrica de procesamiento de PP.	tKm	Google Earth
Transport, freight, lorry >32 metric ton, EURO4 {RoW} transport, freight, lorry >32 metric ton, EURO4 Cut-off, U	Transporte terrestre de fábrica de procesamiento de PP hasta fábrica de tuberías.	tKm	Google Earth
Extrusion, plastic pipes {RoW} extrusion, plastic pipes Cut-off, U	Proceso de extrusión para la fabricación de tuberías.	Kg	Fabricante

6.1.7. DI

Con el hierro dúctil el escenario presenta varios vacíos de información, ya que tampoco fue posible la obtención de información primaria y en SimaPro no se encontraron procesos que estuvieran ya acoplados o que permitieran un montaje teórico. Por lo cual, en este trabajo de investigación se presenta una aproximación inicial para este material, pero para ejercicios futuros es necesario completar la información y de tal forma la comparación puede ser más acertada. En este caso, el peso de los materiales se obtuvo del catálogo de un fabricante y se extrapoló a los diámetros a estudiar, teniendo en cuenta los 100 m del tramo total. Lo anterior se presenta en la Tabla 42.

Tabla 42. Peso total del tramo de tuberías según el diámetro - DI

Diámetro (mm)	Kg/6 metros	Peso total (Kg)
250	215	3583,33
350	374	6233,33
700	1295	21583,33
900	1920	32000,00

En cuanto al transporte, se encontró que este tipo de tuberías no se fabrican a nivel nacional, sino que su distribución se da por un proceso de importación de diferentes partes del mundo. Por lo cual, no se agregó información concerniente a este factor en la etapa de manufactura, sino que se incluyó en la de transporte. Por otro lado, en SimaPro no se pudo encontrar un material específico que cumpliera con las mismas características del DI, por lo que se seleccionó hierro fundido como se presenta en la Tabla 43.

Tabla 43. Especificación de selección de procesos en SimaPro para la fabricación de tuberías de DI

Nombre en SimaPro	Descripción	Unidad
Cast iron {RoW} production Cut-off, U	Material base para la fabricación de las tuberías de DI.	Kg

6.2. Transporte

Para la etapa de transporte se estableció la carga que debe ser transportada únicamente desde el punto de fabricación de las tuberías hasta el punto de instalación. Es decir, se trata de valores que pueden cambiar en cada escenario dependiendo de la localización del fabricante y del lugar en el que se ubique la obra; que en este caso es fijo para todos los materiales. En la Tabla 33 se presentan las distancias y los resultados generales.

Tabla 33. Determinación de variables de transporte desde punto de fabricación hasta punto de instalación

Material	Distancia (Km)	Diámetros			
		250 mm	350 mm	700 mm	900 mm
		tKm	tKm	tKm	tKm
Acero	1007	3128,74	4380,24	8760,47	11263,47
Concreto	14,7	114,07	194,04	744,41	1164,24
PVC	19,3	16,74	23,44	46,88	60,28
PVC Reciclado	19,3	16,74	23,44	46,88	60,28
HDPE	19,3	17,74	35,78	71,56	92,01
PP	19,3	15,09	21,13	42,26	54,33
DI	8689	31135,58	54161,43	187537,58	278048,00

Los siguientes son algunos puntos clave en este escenario:

- En todos los escenarios se utilizó el mismo peso del material según el diámetro, como se presentó en la etapa de fabricación.
- Para el caso de las tuberías de acero, la fabrica de este material se encuentra en la Costa Caribe colombiana, por lo que la distancia resulta ser significativa.
- Para los termoplásticos (PVC, PVC reciclado, HDPE y PP) se escogió el mismo punto de fabricación dentro de la ciudad de Bogotá.
- Como las tuberías de DI no se producen a nivel nacional, su distribución en Colombia se da por importación de diferentes lugares del mundo. Uno de los principales puntos de origen es desde Río de Janeiro, Brasil. Esta resulta ser una de las más cercanas, por lo cual se escogió como ruta marítima y por esto la distancia en comparación con el resto de los materiales es mucho más elevada.

6.3. Instalación

Las estimaciones para la etapa de instalación de las tuberías se hicieron por medio del uso del programa Trenchless-Technology-Calculator desarrollado por la compañía canadiense PW Trenchless en conjunto con la Asociación Norteamericana de Tecnologías Sin Zanja (NASTT por sus siglas en inglés) en su capítulo de la provincia de Columbia Británica. Este programa calcula las emisiones de Dióxido de Carbono (CO₂) por medio de información que se agrega de cierto proyecto. En este caso, la interfaz principal del programa se presenta en el Ilustración 31 y en esta se evidencia que existen variables y constantes que uno puede escoger según el caso específico del estudio. Por lo cual, a continuación, se justifican algunas de las escogencias generales que se tuvieron en cuenta para la instalación de todos los materiales.

Project Name/Number/Address	101	Test	Model and assumption uncertainty		
Trenchless Technology	102	Pipe Bursting	GHG savings tonnes CO ₂ e	10,4	
Soil Type	103	Medium Soil	Litres of Diesel Fuel saved	3,684	
Ground Conditions	104	Wet	No. of trucks off the road	25	
Surface Type	105	Asphalt	Fewer return truck trips	37	
Project Parameters		Box #	User Input	Default/Estimated Value	Unit
Pipe Diameter (D)	106		250		millimetre
Pipe Total Length (L)	107		100		meter
Pipe Depth At Start (Z ₁)	108		1,20	1,35	meter
Pipe Depth At End (Z ₂)	109		1,70	1,35	meter
Percentage of excavated material reused	110		0%	0%	%
Soil /gravel/sand truck capacity	111		7,5	7,5	cubic meter
Project site to dump site	112		26,4	10	kilometer
Service Pits and lateral connection inputs		Box #	Number (each)	Default/Estimated Value	Dimension Units
Total Number of Manholes	113		0	2	meter
Lateral/Service Connections Near-Side	114		0		meter
Lateral/Service Connections Far-Side	115		0		meter
Entry Pits	116		1	1	meter
Exit pits	117		1	1	meter
Number of runs if applicable	118		1	1	each
OpenCut Estimated Project Parameters		Box #	User Input	Default/Estimated Value	Unit
Trench Upper Width (X)	119		1,52	1,3	meter
Trench Lower Width (Y)	120		1,5	0,8	meter
Productivity for open cut section of project	121		51,6	51,6	meters per 8hr day

Ilustración 31. Interfaz principal del programa Trenchless-Technology-Calculator

- Según el Geoportal del IGAC (Instituto Geográfico Agustín Codazzi) el tipo de suelo con el que se cuenta en el lugar de instalación es de arcillas, turbas, y arcillas arenosas con niveles delgados de gravas. Por lo cual, se seleccionó dentro del programa un suelo medio y con condiciones húmedas.
- La superficie al tratarse de una zona urbana rodeada de vías principales se escoge como cubierta de asfalto.
- Según el RAS (2016), la profundidad mínima en la cual debe estar instalado un sistema de suministro es de 1.0 m y de 1.2 m para un sistema sanitario o combinado. A su vez, se decide tomar un diferencial de altura entre punto inicial y final de la tubería de 0.5 m, teniendo en

cuenta que la longitud del sistema no es pronunciada. Por lo anterior, las profundidades seleccionadas como Z_1 y Z_2 son los siguientes valores.

Tabla 34. Profundidades de punto inicial y final del sistema

Sistema	Profundidad inicial – Z_1 (m)	Profundidad final – Z_2 (m)
Suministro	1	1.5
Sanitario	1.2	1,7

- Se decide colocar los valores recomendados por la hoja de cálculo en donde el material reutilizado en el sitio sería del 0% y la capacidad del vehículo de transporte es de 7.5 m^3 .
- La distancia desde el punto de instalación hasta el relleno sanitario más cercano para la disposición de residuos de construcción y demolición es de 26.4 Km según Google Earth.
- Se decide no colocar ningún pozo de inspección ni conexiones laterales, por lo que este valor permanece como cero.
- Al inicio y en la finalización del sistema debe haber un pozo, por lo que se coloca uno en este factor. A su vez, se coloca el valor recomendado de número de corridas que también corresponde a uno.
- Para la abertura de la zanja se decide colocar el valor recomendado en la hoja de cálculo de 51.5 m por cada 8 horas trabajadas al día. Por otro lado, en cuanto al tamaño de esta se dispone que para todos los materiales y por simplicidad al momento de la comparación, se debe mantener una misma geometría rectangular como se muestra en la Ilustración 32, donde el ancho superficial es el mismo que el del fondo (B).

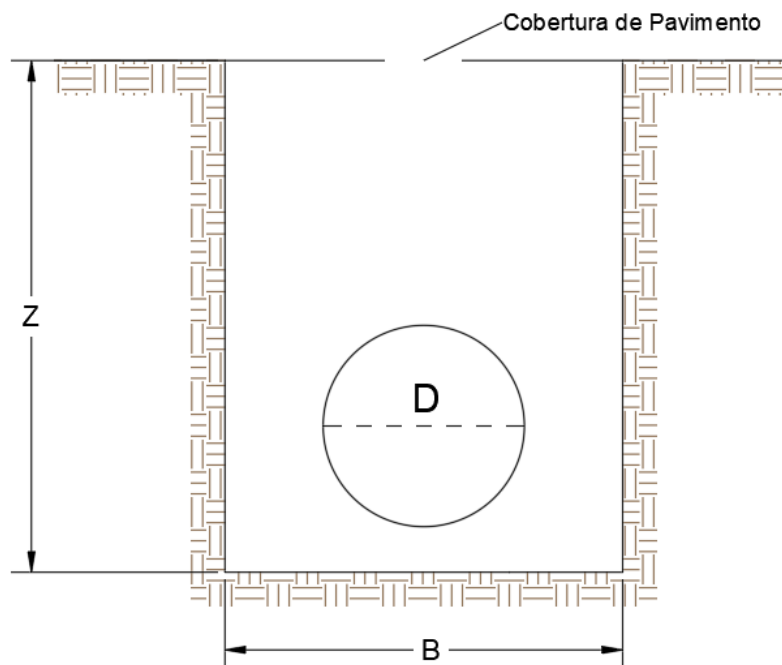


Ilustración 32. Geometría de la zanja general para todos los materiales

- En cuanto al tamaño de la zanja, se decide seguir las recomendaciones encontradas en un Manual de Instalación de Tuberías elaborado por el Gobierno Federal de México (CONAGUA. 2012), en el cual se hace una diferenciación del tamaño del ancho de esta, según el material. Por lo cual, en la Tabla 35 se presentan las especificaciones con las cuales se determinó el ancho, teniendo en cuenta una ecuación o valores ya establecidos.

Tabla 35. Especificaciones para el cálculo del ancho (B) de la zanja según el material

Ancho de zanja			
Material	B (m)		
Acero	$B = \frac{4}{3}D + 400 \text{ mm}$		
Concreto	Diámetro (mm)	Ancho (m)	
	250	0.680	
	350	0.910	
	700	1.50	
	900	1.70	
PVC	$B = 1.25 * D + 300 \text{ mm}$		
HDPE y PP	Diámetro (mm)	Ancho (m)	
	250	0.71	
	350	0.86	
	700	1.68	
	900	1.98	
DI	Diámetro (mm)	Ancho (m)	
	250	0.864	
	350	0.965	
	700	1.37	
	900	1.52	

Teniendo en cuenta las anteriores especificaciones, los resultados obtenidos para cada uno de los materiales y según el diámetro son los presentados en la Tabla 36.

Tabla 36. Valores del ancho de zanja (B) según el diámetro y el material

Ancho de zanja				
Material	B (m) – D:250 mm	B (m) – D:350 mm	B (m) – D:700 mm	B (m) – D:900 mm
Acero	0,73	0,87	1,33	1,6
Concreto	0,68	0,91	1,5	1,7
PVC	0,61	0,74	1,18	1,43
PP	0,71	0,86	1,68	1,98
HDPE	0,71	0,86	1,68	1,98
DI	0,86	0,97	1,37	1,52

Al agregar todas las variables en el programa, este muestra los resultados como se presentan en la Ilustración 33. Es decir que, las emisiones de CO₂ que se contemplan corresponden de forma general al uso de la maquinaria para la abertura de la zanja y el transporte de materias primas.

Parameter	Unit	Output
Open Cut		
Trench Cross Section Area	square meter	-
Cross Section Area Adjusted for Lateral Connections	square meter	-
Open Cut Excavation Volume	cubic meter	-
Open cut no. of return trips	each	-
Open Cut Productivity	meters length per 8hr day	-
Open Cut excavation duration	hours	-
Open Cut machinery emissions	kgCO ₂ e	-
Open Cut hauling emissions	kgCO ₂ e	-
Open Cut total emissions	kgCO ₂ e	-

Ilustración 33. Tabla de presentación de resultados con método de instalación a cielo abierto

De forma adicional, el programa permite evaluar alternativas sin zanja por lo cual se decidió montar un escenario en el cual se comparara la tecnología de reemplazo de tuberías de Pipe bursting o Fraccionamiento de tubería con la convencional a cielo abierto. Dentro de la hoja de cálculo no fue necesario realizar modificaciones o agregar información adicional. Sin embargo, esta técnica solo se pudo evaluar con el HDPE ya que actualmente es el material con el cual comúnmente se emplea. La forma de presentación de los resultados se basa en los mismos factores que son el uso de la maquinaria para excavación y el transporte de materias primas. Estos se presentan en la Ilustración 34.

Trenchless Technology	Pipe Bursting	
Total Pit Excavation Volume	cubic meter	-
Lateral Connections Excavation Volume	cubic meter	-
Total Trenchless Excavation Volume	cubic meter	-
Trenchless Excavation Cross Section Area	square meter	-
Trenchless No. of return trips	each	-
Trenchless excavation Productivity	meters length per 8hr day	-
Trenchless excavation duration	hours	-
Trenchless machinery emissions	kgCO ₂ e	-
Trenchless hauling emissions	kgCO ₂ e	-
Trenchless total emissions	kgCO ₂ e	-

Ilustración 34. Tabla de presentación de resultados con método de Pipe bursting

6.4. Operación

Dentro de la fase de operación se decide establecer dos escenarios. El primero en el que se tenga en cuenta la energía de bombeo por el tiempo total de operación de 100 años y otro en el cual no se requiera bombeo, sino que simplemente se realicen mantenimientos periódicos del sistema. A continuación, se describen las características y variables que fueron consideradas en cada escenario.

6.4.1. Escenario 1 – Sistema con bombeo

Este escenario se contempla únicamente para los sistemas de suministro de agua potable, por lo que se plantea para los diámetros de tubería de 250 y 350 mm. Inicialmente fue necesario tener en cuenta ciertas variables base que son características de la red y se establecieron de la siguiente forma.

- La viscosidad, densidad y peso específico del fluido que se transporta en los ductos se tomaron como valores estándar del agua a 20°C.
- Se tomó un valor de diferencia de altura de 0.5 m y una pendiente baja de 0.5%.
- Se establece una eficiencia (η) de funcionamiento de las bombas del 70%.
- Se determina que las bombas funcionaran por un periodo de 8 horas al día de forma ininterrumpida. Es decir que, al funcionar por 100 años en el sistema, estarían siendo operadas por 292.000 horas.

A continuación, se presenta la información detallada.

Tabla 37. Variables base del sistema para el escenario con bombeo

Variabes base	Valor
Viscosidad ν (m ² /s)	1,E-06
Peso específico (N/m ³)	9810
Delta z (m)	0.5

VARIABLES BASE	VALOR
S (m/m)	0,005
ρ (Kg/m ³)	1000
Gravedad (m/s ²)	9,81
Longitud (m)	100
Eficiencia η (%)	70
Tiempo de uso (horas/día)	8
Uso en 100 años (horas)	292000

Otro factor importante para los cálculos es la selección de los coeficientes de rugosidad K_s , según el material. Para esto se tuvo en cuenta los valores reportados en el libro de Hidráulica de Tuberías de Saldarriaga, J. (2019). Estos se presentan en la Tabla 38.

Tabla 38. Coeficientes de rugosidad de los materiales

Ks (m)	
Material	Valor
Concreto	0,0003
PVC	2,E-06
Acero	0,00046
HDPE	7,E-06
DI	0,00025
PP	6,E-06

Inicialmente, se realizó el cálculo del caudal que puede ser transportado por cada uno de los materiales para determinar un caudal base comparable para todos. Para este proceso se inició estableciendo una relación de llenado completa de la tubería ya que se asumió un funcionamiento a presión. Posteriormente, se encontró la altura de nivel máxima ($Y_{m\acute{a}x}$) que resulta ser el mismo diámetro (D) al mantenerse una relación de llenado completa. En seguida se calculó el ángulo θ para determinar la geometría de la sección, a partir de $Y_{m\acute{a}x}$ y D , como se muestra en la Ecuación 3.

$$\theta = \pi + 2 * \text{ARCSIN} \left(\frac{\left(Y_{m\acute{a}x} - \frac{D}{2} \right)}{\frac{D}{2}} \right) \quad \text{Ecuación 3}$$

A continuación, se calculó el área de la sección (A) a partir de los valores de θ y D , como se presenta en al Ecuación 4.

$$A \text{ (m}^2\text{)} = (\theta - \text{SIN}(\theta)) * D * \frac{D}{8} \quad \text{Ecuación 4}$$

Se prosiguió con el cálculo del perímetro mojado con la Ecuación 5.

$$P = \frac{\theta * D}{2} \tag{Ecuación 5}$$

En seguida, se realizó el cálculo del radio hidráulico con la Ecuación 6.

$$R (m) = \left(1 - \left(\frac{\text{SIN}(\theta)}{\theta} \right) \right) * \frac{D}{4} \tag{Ecuación 6}$$

Para el cálculo de la velocidad media se hizo uso de la Ecuación 7, en donde se utilizaron términos como la gravedad (g), la pendiente (S), el radio hidráulico (R) y el coeficiente de rugosidad (Ks), como se presenta en la Ecuación 7.

$$V \left(\frac{m}{s} \right) = -2 * \sqrt{(8 * g * R * S)} * \text{LOG}_{10} \left(\left(\frac{Ks}{14.8 * R} \right) + \left(\frac{2.51 * v}{4 * R * \sqrt{8 * g * R * S}} \right) \right) \tag{Ecuación 7}$$

Finalmente, se realizó el cálculo del $Q_{\text{máx}}$ con la Ecuación 8.

$$Q_{\text{máx}} \left(\frac{m^3}{s} \right) = V * A \tag{Ecuación 8}$$

Este procedimiento se realizó para los dos diámetros de tubería y para todos los materiales, por lo que los resultados se presentan en la Tabla 39.

Tabla 39. Resultados del cálculo del caudal máximo a transportar en las tuberías

Acero								
d (m)	y/d	Y max (m)	θ (rad)	A (m ²)	P (m)	R (m)	V (m/s)	Q (m ³ /s)
0,25	1	0,250	6,283	0,049	0,785	0,063	1,016	0,050
0,35	1	0,350	6,283	0,096	1,100	0,088	1,260	0,121
Concreto								
d (m)	y/d	Y max (m)	θ (rad)	A (m ²)	P (m)	R (m)	V (m/s)	Q (m ³ /s)
0,25	1	0,250	6,283	0,049	0,785	0,063	1,065	0,052
0,35	1	0,350	6,283	0,096	1,100	0,088	1,319	0,127
PVC								
d (m)	y/d	Y max (m)	θ (rad)	A (m ²)	P (m)	R (m)	V (m/s)	Q (m ³ /s)
0,25	1	0,250	6,283	0,049	0,785	0,063	1,293	0,063

0,35	1	0,350	6,283	0,096	1,100	0,088	1,610	0,155
HDPE								
d (m)	y/d	Y max (m)	θ (rad)	A (m²)	P (m)	R (m)	V (m/s)	Q (m³/s)
0,25	1	0,250	6,283	0,049	0,785	0,063	1,282	0,063
0,35	1	0,350	6,283	0,096	1,100	0,088	1,595	0,154
PP								
d (m)	y/d	Y max (m)	θ (rad)	A (m²)	P (m)	R (m)	V (m/s)	Q (m³/s)
0,25	1	0,250	6,283	0,049	0,785	0,063	1,282	0,063
0,35	1	0,350	6,283	0,096	1,100	0,088	1,595	0,154
DI								
d (m)	y/d	Y max (m)	θ (rad)	A (m²)	P (m)	R (m)	V (m/s)	Q (m³/s)
0,25	1	0,250	6,283	0,049	0,785	0,063	1,085	0,053
0,35	1	0,350	6,283	0,096	1,100	0,088	1,343	0,129

A partir de los anteriores resultados se pudo comparar los caudales máximos a transportar según cada material y se escogió el menor caudal según el diámetro, para de esta forma asegurar que todos los ductos puedan cumplir con esta condición de diseño. Por lo cual, estos valores serían de 0.050 m³/s y 0.121 m³/s para los diámetros de 250 y 350 mm, respectivamente.

Teniendo en cuenta los anteriores caudales base, se pudo realizar un proceso de cálculo de la potencia de la bomba a utilizar según el material. Para esto, fue necesario calcular el área del ducto con la Ecuación 9.

$$A (m^2) = \left(\frac{\pi * D^2}{4} \right) \tag{Ecuación 9}$$

Posteriormente, se determinó la velocidad a partir del caudal y del área como se presenta en la Ecuación 10.

$$V \left(\frac{m}{s} \right) = \frac{Q}{A} \tag{Ecuación 10}$$

Al conocer el factor de velocidad fue posible calcular el número de Reynolds con la Ecuación 11.

$$Re = \frac{D * V}{\nu} \tag{Ecuación 11}$$

Con la Ecuación 12 (Ecuación de Colebrook – White), se realizó el despeje del factor de fricción.

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 * \log_{10} \left(\frac{Ks}{3.7 * D} + \frac{2.51}{Re\sqrt{f}} \right) \tag{Ecuación 12}$$

Para conocer las pérdidas por fricción se hizo uso de la Ecuación de Darcy – Weisbach.

$$h_f(m) = f * \frac{l v^2}{d 2g}$$

Ecuación 13

En seguida, se realizó el cálculo de la cabeza de altura total que es la suma de las pérdidas por fricción y el Δz del sistema.

$$H_p(m) = h_f * \Delta z$$

Ecuación 14

Para el cálculo de la potencia se utilizó la Ecuación 15, en donde se emplea la densidad (ρ), la gravedad (g), el diámetro de la tubería (D), la cabeza de altura (H_p) y la eficiencia de la bomba (η).

$$\text{Potencia (kWh)} = \frac{\rho * g * D * H_p}{\eta}$$

Ecuación 15

Finalmente, la determinación de la potencia total se obtuvo a partir de la Ecuación 16, en donde se multiplica la potencia por el tiempo total de funcionamiento de la bomba en los 100 años de operación.

$$\text{Potencia total (kWh)} = \text{Potencia} * \text{Uso en 100 años (horas)}$$

Ecuación 16

A partir del procedimiento anterior se pudo calcular la potencia requerida para cada diámetro según el respectivo material, por lo que los resultados se presentan en las Tablas 40 y 41.

Tabla 40. Potencia total de consumo energético por bombeo según el material – D:250 mm

Diámetro: 250 mm								
Material	A (m²)	V (m/s)	Re	f	hf (m)	Hp (m)	Potencia (kWh)	Potencia total (kWh/100 años)
PVC	0,049	1,016	222806,66	0,015	0,32	0,82	0,57	166468,91
Concreto	0,049	1,016	222806,66	0,022	0,45	0,95	0,67	194815,95
Acero	0,049	1,016	222806,66	0,024	0,51	1,01	0,70	205123,97
HDPE	0,049	1,016	222806,66	0,016	0,33	0,83	0,58	168616,41
DI	0,049	1,016	222806,66	0,021	0,44	0,94	0,66	192238,95
PP	0,049	1,016	222806,66	0,016	0,33	0,83	0,58	168616,41

Tabla 41. Potencia total de consumo energético por bombeo según el material – D:350 mm

Diámetro: 350 mm								
Material	A (m²)	V (m/s)	Re	f	hf (m)	Hp (m)	Potencia (kWh)	Potencia total (kWh/100 años)
PVC	0,096	1,260	386696,33	0,014	0,32	0,82	1,40	408329,84
Concreto	0,096	1,260	386696,33	0,021	0,49	0,99	1,67	488521,90

Diámetro: 350 mm								
Material	A (m ²)	V (m/s)	Re	f	hf (m)	Hp (m)	Potencia (kWh)	Potencia total (kWh/100 años)
Acero	0,096	1,260	386696,33	0,022	0,50	1,00	1,70	495395,50
HDPE	0,096	1,260	386696,33	0,014	0,32	0,82	1,40	408329,84
DI	0,096	1,260	386696,33	0,020	0,46	0,96	1,63	477065,89
PP	0,096	1,260	386696,33	0,016	0,36	0,86	1,46	425513,85

Al obtener el consumo energético a lo largo del periodo de modelación, estos se agregaron en SimaPro con la especificación mostrada en la Tabla 42.

Tabla 42. Especificación de selección de procesos en SimaPro para el sistema de bombeo

Nombre en SimaPro	Descripción	Unidad
# Electricity, high voltage {CO} market for electricity, high voltage Cut-off, U	Energía requerida para el bombeo del agua.	kWh

6.4.2. Escenario 2 – Mantenimiento del sistema

El escenario de mantenimiento del sistema comprende la limpieza de las tuberías tanto de suministro como sanitarias cada cierto periodo de tiempo. Para esto es necesario establecer los escenarios que se deben llevar a cabo en este proceso de mantenimiento, por lo que se consultó que tipo de métodos de limpieza se tienen actualmente y se determinó que se clasifican en:

- Mecánicos:** Requiere el uso de maquinaria abrasiva sobre la superficie de la tubería. En estos procesos se incluyen la limpieza abrasiva, limpieza hidráulica y limpieza térmica. En esta se requiere especial atención por la posible ocurrencia de raspaduras o fisuras de la tubería.
- Químicos:** No requiere desmantelamiento de los conductos y por ende permite acceder a ciertas áreas limitadas con otros métodos. Se hace uso de inhibidores de corrosión, lo cual no se generan daños superficiales. Genera problemas de disposición de químicos después de su uso y requiere enjuague de las tuberías.
- Métodos especiales:** Requiere el uso de equipos especiales y del manejo de personal especializado. Algunos son:
 - Chorro de agua a ultra alta presión.
 - Limpieza explosiva.
 - Cocción térmica.
 - Chorros de pellets de CO₂.

(Martínez, S. 2010).

Con base en lo anterior, bajo el contexto del uso de este tipo de métodos en Colombia y después de la consulta con empresas del sector, se determinó que la metodología más conveniente es una mecánica donde se utilice agua a presión tipo flush por medio de un camión tipo Vector. Para esto, fue necesario establecer las siguientes determinaciones.

- Realizar mantenimiento de los sistemas de suministro cada 10 años.
- Realizar mantenimiento de los sistemas sanitarios cada 5 años.
- Usar un camión Vector 2100 en los mantenimientos (Camión Clase 5-6 según la tabla de clasificación del cuerpo de vehículos del Anexo 3) donde a partir del Transportation Data Book desarrollado por Davis, S. C. et al. (2010) se determinó un consumo de combustible de 3.18 Km/L de diésel.
- Una distancia de 4.73 Km entre el sitio de almacenamiento del camión y la ubicación del sistema como se puede apreciar en la Ilustración 34, obtenida de Google Earth.

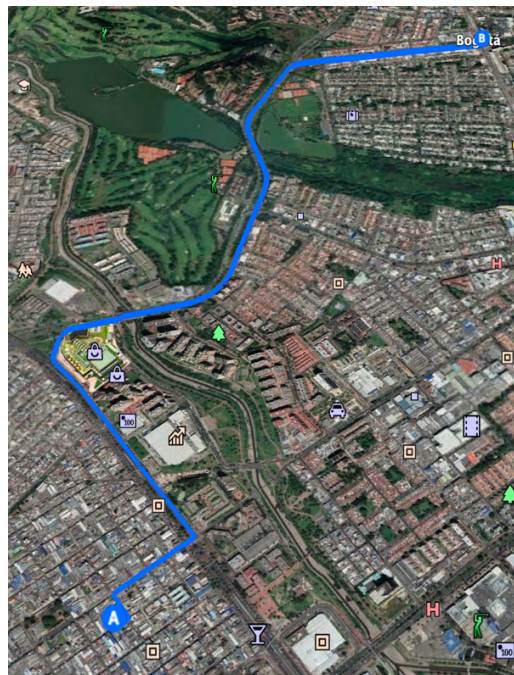


Ilustración 35. Esquema de transporte del camión tipo Vector

- El agua que se utiliza para el mantenimiento de las tuberías debe pasar por un proceso de tratamiento que idealmente se debe realizar en la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales – PTAR El Salitre. En esta planta, según el informe general del mes de febrero del 2021 se obtuvo un consumo energético de 0.077 kWh/m³ de agua tratada.
- Se calcula el consumo total de combustible incluyendo la ida y el regreso del camión.

Teniendo en cuenta los anteriores puntos se realizó el siguiente proceso de cálculo, en donde se comenzó con la estimación del volumen de las tuberías a partir de los diámetro (D) y longitud (L).

$$Volumen_{Tuberías}(m^3) = \pi * \left(\frac{D^2}{4}\right) * L \quad \text{Ecuación 17}$$

Para conocer el consumo energético total por el tratamiento del agua residual, se requiere conocer el consumo por m³, el volumen de las tuberías y la cantidad de veces que se realizan los mantenimientos en el periodo de 100 años.

$$kWh_{por\ tratamiento} = \frac{kWh}{m^3} * Volumen * \# de\ mantenimientos \quad \text{Ecuación 18}$$

Finalmente, para conocer el consumo total de combustible se realiza un cociente entre la distancia recorrida y el consumo de combustible por vehículo, y esto se multiplica por el número de viajes y la cantidad de mantenimientos realizados, como se expresa en la Ecuación 19.

$$Combustible_{total} = \frac{Distancia}{Consumo_{vehículo}} * \# de\ viajes * \# de\ mantenimientos \quad \text{Ecuación 19}$$

A partir del anterior procedimiento, los resultados obtenidos se presentan en la Tabla 42.

Tabla 42. Descripción de consumo energético y de combustible en el proceso de mantenimiento

Diámetro (mm)	Volumen de tuberías (m ³)	Combustible por viaje (L)	Total consumo energético (kWh)	Consumo total de combustible (L)
250	1,23	2,97	0,95	29,75
350	2,41	2,97	1,86	29,75
700	9,62	2,97	14,87	59,50
900	15,90	2,97	24,59	59,50

Los resultados obtenidos se agregaron en SimaPro con las especificaciones señaladas en la Tabla 43.

Tabla 43. Especificación de selección de procesos en SimaPro para el mantenimiento

Nombre en SimaPro	Descripción	Unidad
# Electricity, high voltage {CO} market for electricity, high voltage Cut-off, U	Energía requerida para el tratamiento del agua residual.	kWh
Diesel {CO} diesel production, petroleum refinery operation Cut-off, U	Combustible requerido para el transporte del camión tipo Vactor.	L

6.5. Reciclaje

En la etapa de reciclaje se contempla el proceso de transporte del sistema de tuberías desmantelado hasta los diferentes puntos de aprovechamiento según el material. Es decir que no se contemplan estimaciones relacionadas con el proceso como tal, ya que el ciclo de vida llega hasta el punto donde el material se entrega a la empresa de reciclaje. Teniendo en cuenta lo anterior, en la Tabla 44 se presenta las estimaciones generadas por el transporte según el diámetro y el material. A su vez, en las

Ilustraciones 36 y 37 se presentan los esquemas de transporte de donde se obtuvo las respectivas distancias de los concernientes materiales, por medio de Google Earth.

Tabla 44. Estimación de distancias de transporte de materiales hasta el punto de aprovechamiento

Material	Distancia (Km)	Diámetros			
		250 mm	350 mm	700 mm	900 mm
Acero	166	515,76	722,06	1444,13	1856,74
Concreto	14	108,64	184,8	700	1093,68
PVC	7,8	6,91	9,67	19,34	24,86
HDPE	7,8	7,17	14,46	28,92	37,19
PP	7,8	6,10	8,54	17,08	21,96
DI	166	594,83	1034,73	3582,83	5312,00

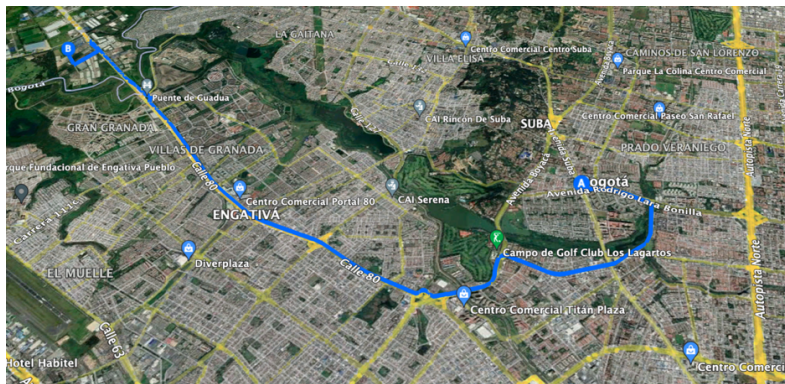


Ilustración 36. Esquema de transporte de reciclaje - Concreto

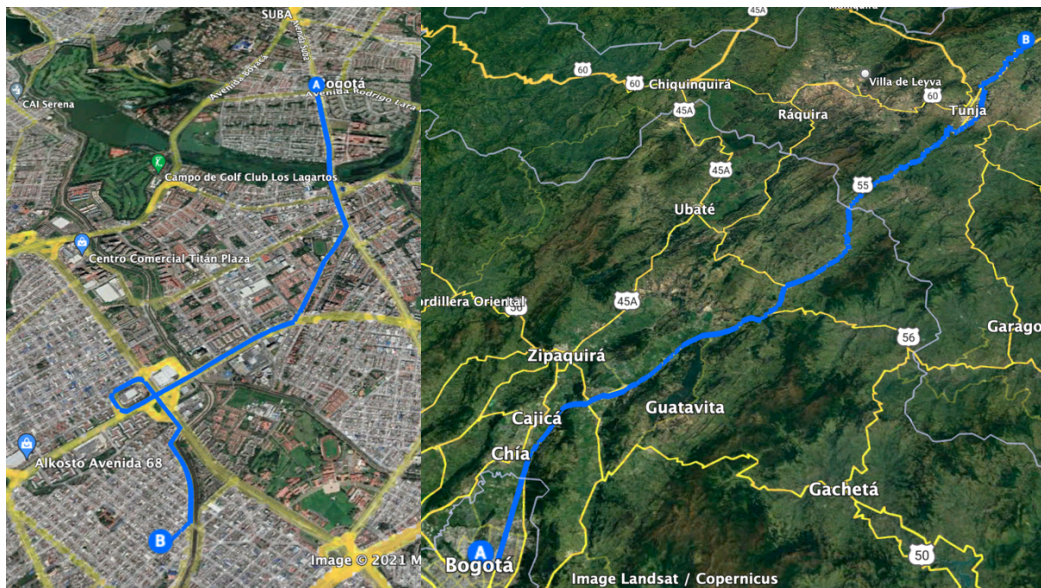


Ilustración 37. Esquemas de transporte de reciclaje – PVC, HDPE y PP (Izquierda) – Acero y DI (Derecha)

7. RESULTADOS Y ANÁLISIS

Toda la información que fue recolectada, consultada y/o calculada en el planteamiento del caso de estudio, a excepción de la etapa de instalación, se agregó a SimaPro para la estimación de la huella de carbono. Dentro del programa, se realizaron configuraciones de cálculo para cada etapa del ciclo de vida de los materiales estudiados, según su diámetro. En este caso, como se busca determinar las emisiones de carbono equivalente, se seleccionó el método IPCC 2013 GWP 100a V1.03. Esta metodología fue desarrollada por el Panel Intergubernamental en Cambio Climático y permite incluir la captura de CO₂ en un periodo de tiempo de 100 años. La interfaz de selección de este método se presenta en el Anexo 4. De esta forma fue posible modelar los escenarios y obtener los resultados que se presentan a continuación.

7.1. Fabricación

En la Tabla 45 se presentan los resultados de emisiones de CO₂ equivalente, obtenidos al realizar la simulación de los escenarios de fabricación para cada uno de los materiales, según el diámetro.

Tabla 45. Resultados de emisiones en la Etapa de Fabricación

Etapa	Material	Diámetro (mm)	Emisiones de CO₂ (Kg)
Fabricación	Acero	250	6110,15
		350	9100,37
		700	18200,75
		900	23399,52
	Concreto	250	1047,10
		350	1781,16
		700	8130,27
		900	12875,81
	DI	250	6499,96
		350	10628,82
		700	36803,03
		900	51647,68
	PVC	250	2958,24
		350	4141,66
		700	8283,11
		900	10649,88
PVC Reciclado	250	1856,00	
	350	2598,38	
	700	5196,75	

Etapa	Material	Diámetro (mm)	Emisiones de CO ₂ (Kg)
	PP	900	6681,53
		250	2283,95
		350	3197,53
		700	6395,07
	HDPE	900	8222,23
		250	2715,09
		350	5477,44
		700	10954,87
		900	14083,58

En las Ilustraciones 38 y 39, se presenta de forma gráfica la distribución de emisiones para cada material según el diámetro de 250 y 350 mm, respectivamente. En estas se puede apreciar que con el cambio de diámetro se mantiene la misma tendencia de emisiones, por lo que este no resulta ser un factor diferencial sobre si un material emite más o menos que otro. A su vez, se evidencia que el DI es el material que mayor cantidad de emisiones genera, a pesar de los vacíos de información existentes para el montaje de este escenario, por lo que se atribuyen a que la fabricación del hierro fundido requerido para la elaboración de los ductos es un proceso altamente contaminante y que requiere un alto consumo energético por el uso de altos hornos. Por otro lado, el acero es el segundo material que más emisiones genera siendo estas cercanas a las del DI.

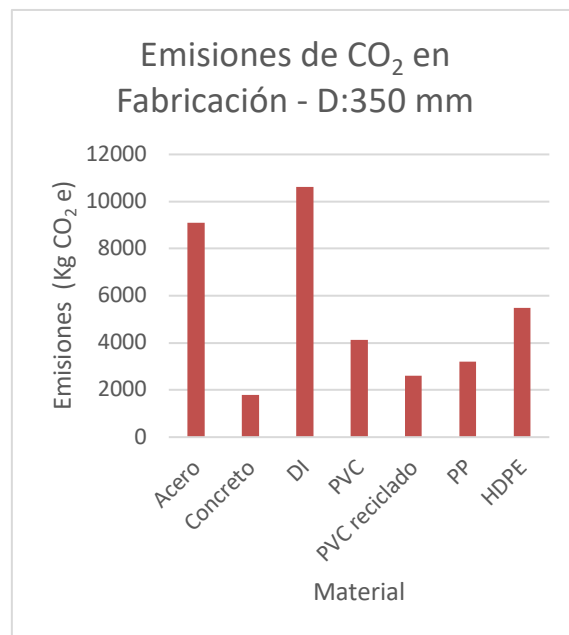
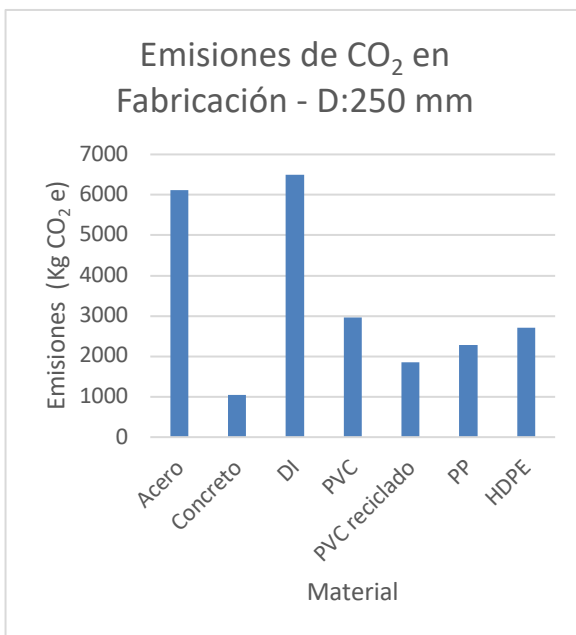


Ilustración 38. Resultados E. Fabricación - D:250 mm

Ilustración 39. Resultados E. Fabricación - D:350 mm

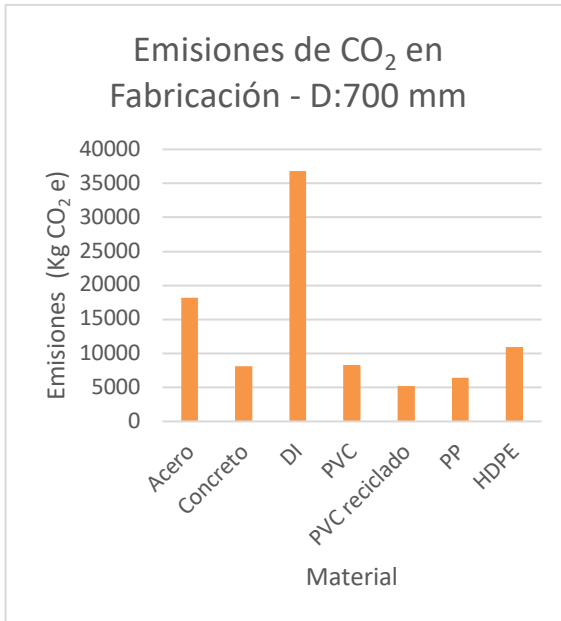


Ilustración 40. Resultados E. Fabricación - D:700 mm

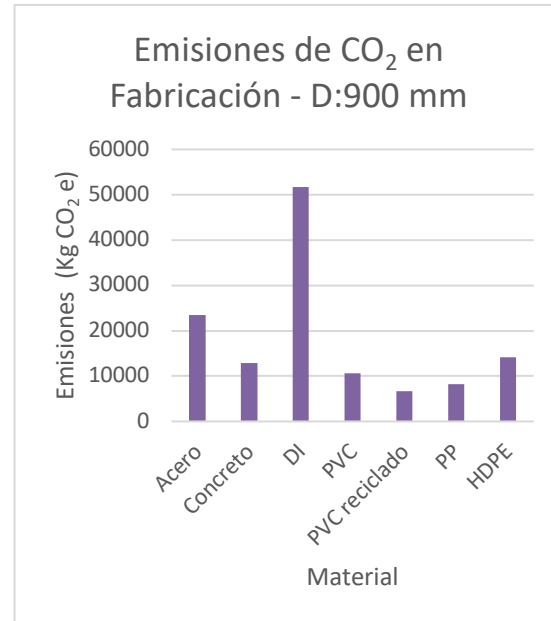


Ilustración 41. Resultados E. Fabricación - D:900 mm

En las Ilustraciones 40 y 41, se presenta de forma gráfica la distribución de emisiones para cada material según el diámetro de 700 y 900 mm, respectivamente. En estas se resalta que el DI, al igual que con los diámetros menores, es el material que genera mayor cantidad de emisiones. Sin embargo, se evidencia que se crea mayor diferencia entre este y el acero dado que según el catálogo del fabricante de tuberías de DI, estas resultan tener un peso mucho mayor cuando el diámetro incrementa, sin necesidad de guardar una proporción, por lo que la diferencia se atribuye a este factor. Por otro lado, materiales como el concreto y los termoplásticos mantienen un nivel de emisiones más cercano. Cabe resaltar que cuando se trata de diámetros pequeños como 250 y 350 mm, el concreto es el material que menos emisiones genera, pero a medida que el diámetro aumenta, este pierde competitividad con termoplásticos como el PP y el PVC, puede que por la cantidad de materiales requeridos en su fabricación y por el peso arraigado a este tipo de ductos de mayor tamaño. En este escenario es imperante resaltar que el PVC con 40% de material reciclado resulta ser altamente competitivo con el resto de termoplásticos, ya que para todos los diámetros este resulta ser el que menor cantidad de emisiones genera y para los diámetros de 700 y 900 mm, llegan a ser menores que las de los ductos de concreto. Lo anterior es de alta importancia ya que, si no se ven afectadas las propiedades técnicas, a medida que se pueda aumentar el porcentaje de materiales reciclados en la fabricación de tuberías esto puede disminuir significativamente las emisiones que se generan y representar una ventaja comercial al ser industrias cada vez más amigables con el medio ambiente. La disminución se cuantifica en cerca de un 37%, en comparación con las tuberías de PVC fabricadas netamente con materias primas vírgenes, por lo que al tratarse de uno de los materiales más utilizados en la actualidad para la instalación de sistemas hidráulicos, puede generar ventajas en términos de aportes de CO₂ y otros gases de efecto invernadero relacionados con el cambio climático.

Por otro lado, a nivel de los termoplásticos, el HDPE es el material que mayor cantidad de emisiones genera y esto se relaciona, como en el caso de otros materiales, con el hecho de que en los catálogos de los fabricantes el peso de los ductos por diámetros es mayor y esto genera el uso de mayor cantidad de materiales y que se genere un consumo energético más alto en el proceso de extrusión.

Otro de los factores relacionados con el peso de los materiales, es la cantidad de emisiones que se generan por el transporte de estos, dado que las tKm varían conforme cambia tal factor, por lo que al haber materiales que se transportan por largas distancias como en los casos marítimos, su magnitud de peso afecta directamente las emisiones comprendidas.

7.2. Transporte

En la Tabla 46 se presentan los resultados de emisiones de CO₂ equivalente, obtenidos al realizar la simulación de los escenarios de transporte para cada uno de los materiales, según el diámetro.

Tabla 46. Resultados de emisiones en la Etapa de Transporte

Etapa	Material	Diámetro (mm)	Emisiones de CO₂ (Kg)
Transporte	Acero	250	289,00
		350	404,00
		700	808,00
		900	1039,39
	Concreto	250	10,50
		350	17,90
		700	68,70
		900	107,00
	DI	250	611,00
		350	1063,38
		700	3682,04
		900	5459,07
	PVC	250	1,54
		350	2,16
		700	4,33
		900	5,56
	PP	250	1,39
		350	1,95
		700	3,90
		900	5,10
HDPE	250	1,63	

Etapa	Material	Diámetro (mm)	Emisiones de CO ₂ (Kg)
		350	3,3
		700	6,61
		900	8,49

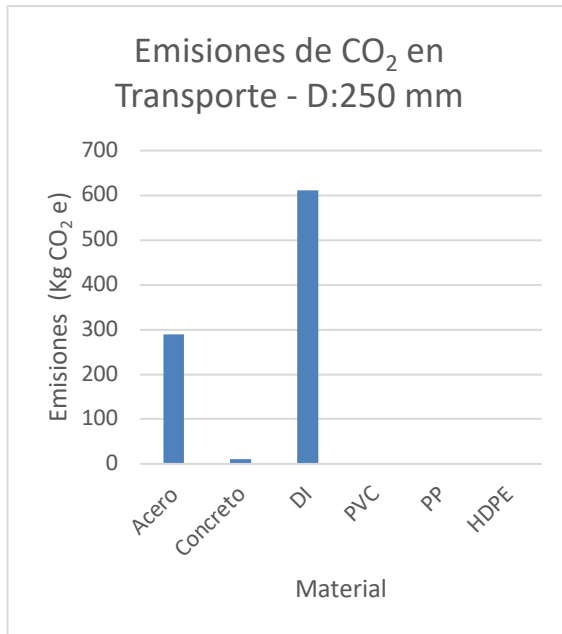


Ilustración 42. Resultados E. Transporte - D:250 mm

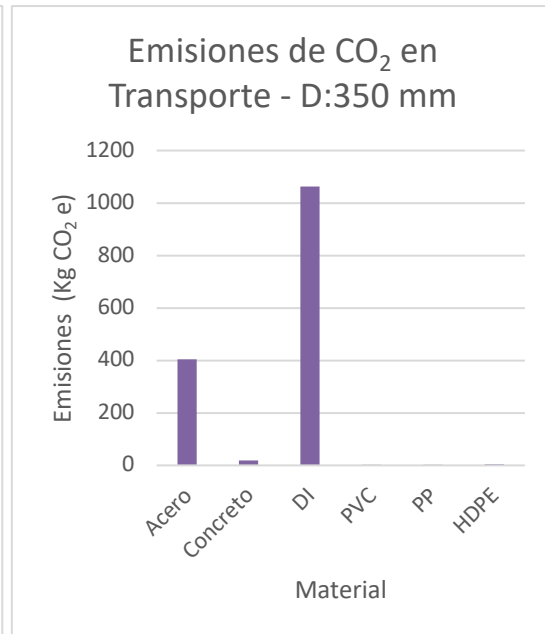


Ilustración 43. Resultados E. Transporte - D:350 mm

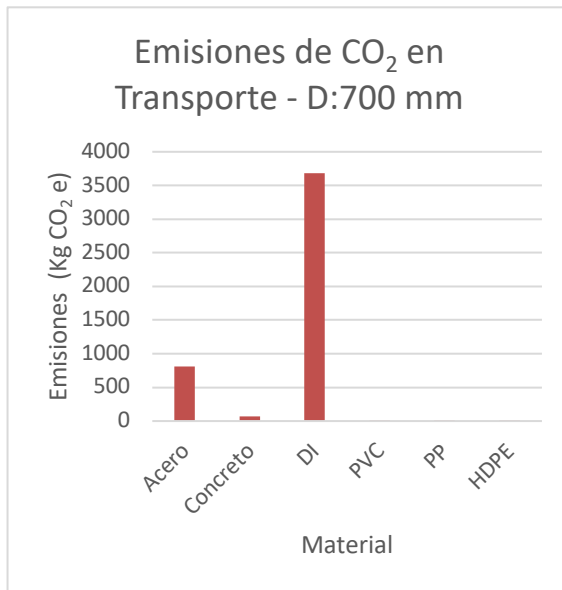


Ilustración 44. Resultados E. Transporte - D:700 mm

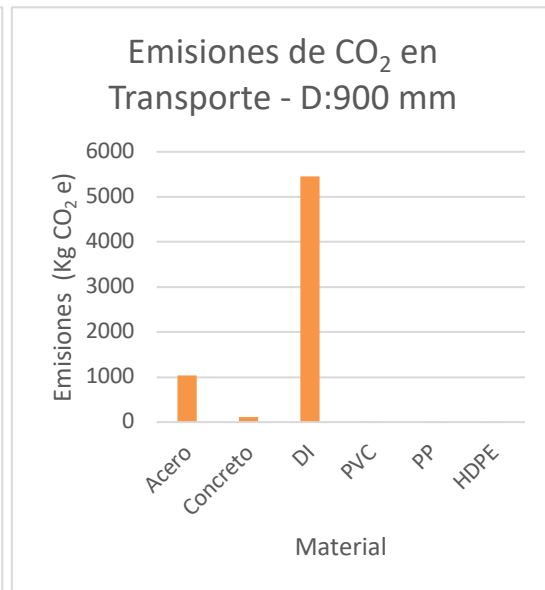


Ilustración 45. Resultados E. Transporte - D:900 mm

En las Ilustraciones 42, 43, 44 y 45, se presentan de forma gráfica los resultados obtenidos en el proceso de modelación del transporte de las tuberías desde el punto de fabricación hasta el punto de instalación. En este caso, los resultados pueden variar según los lugares de localización que se escojan, por lo que estos resultados son particulares para el caso de estudio seleccionado en este trabajo investigativo. Por lo tanto, para todos los diámetros se evidencia que los materiales que menor cantidad de emisiones generan por transporte son los termoplásticos, dado que se asume el mismo lugar de manufactura para todos y la fábrica se localiza en la misma ciudad en donde se ubica el punto de instalación. A su vez, los termoplásticos resultan ser los materiales con menor peso en comparación con el resto, por lo que también es un factor que aporta a las bajas emisiones. Para el caso del concreto, la localización de la fábrica es a las afueras de Bogotá, por lo que su transporte no implica la necesidad de recorrer distancias considerablemente altas.

Por otro lado, en esta etapa el DI es el material que más emisiones genera dado que la fabricación de las tuberías no se realiza en Colombia. Por lo que su movilización desde el punto de manufactura requiere transporte marítimo y terrestre. En cuanto al acero, la fábrica de este tipo de ductos se localiza fuera de la ciudad, específicamente a 1007 Km, por lo que se requiere una alta carga de transporte.

7.3. Instalación

En la Tabla 47 se presentan los resultados de emisiones de CO₂ equivalente, obtenidos al realizar la simulación de los escenarios de instalación, en la calculadora de cálculo, para cada uno de los materiales, según el diámetro.

Tabla 47. Resultados de emisiones en la Etapa de Instalación

Etapa	Material	Diámetro (mm)	Emisiones de CO₂ (Kg)
Instalación (A cielo abierto)	Acero	250	10430
		350	10749
		700	12280
		900	12993
	Concreto	250	10317
		350	10840
		700	12729
		900	13257
	DI	250	10726
		350	10977
		700	12386
		900	12782
PVC	250	10157	
	350	10453	

Etapa	Material	Diámetro (mm)	Emisiones de CO ₂ (Kg)	
		700	11884	
		900	12544	
	PP	250	10385	
		350	10726	
		700	13204	
	HDPE	900	13996	
		250	10385	
		350	10726	
		700	13204	
	Instalación (Pipe bursting)	HDPE	900	13996
			700	13204
			350	10726
250			10385	

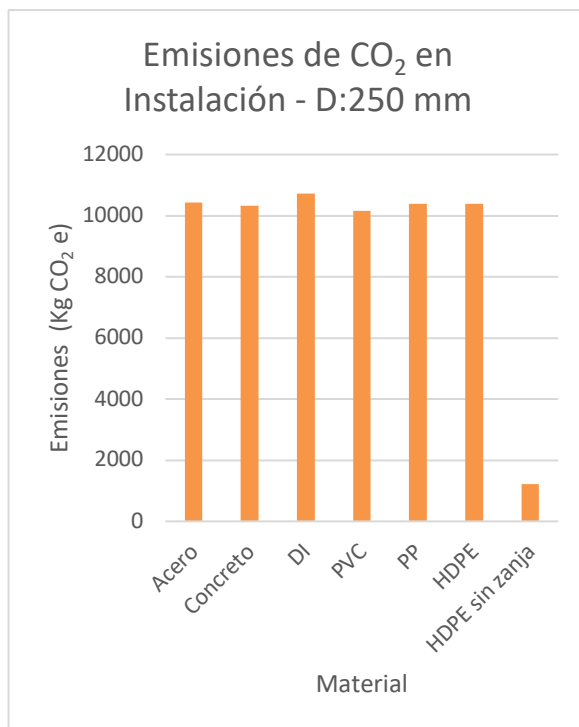


Ilustración 46. Resultados E. Instalación - D:250 mm

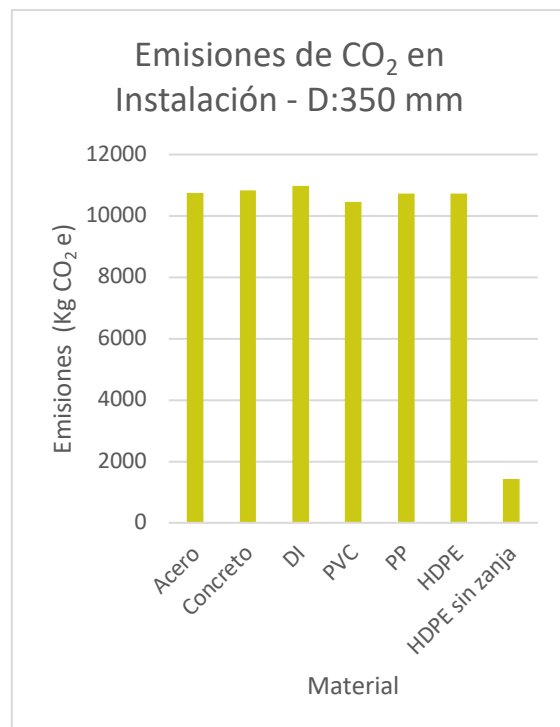
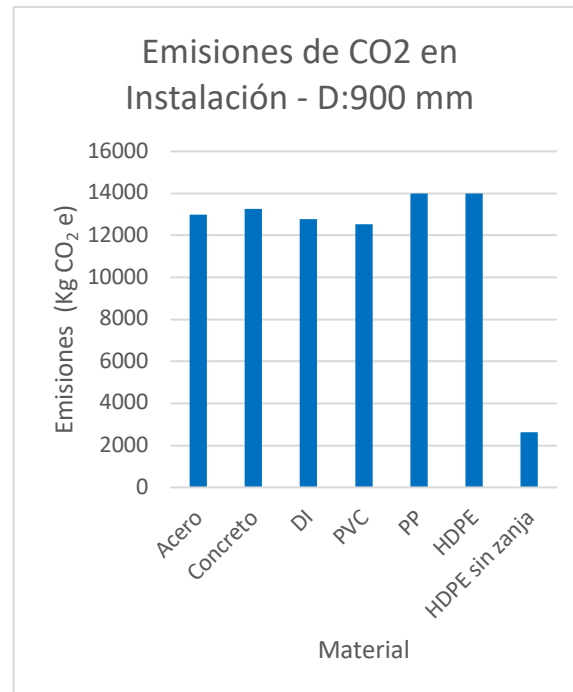
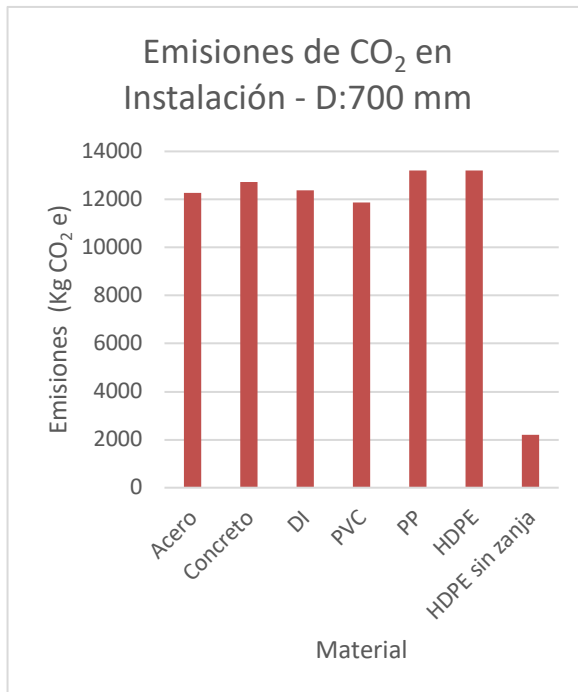


Ilustración 47. Resultados E. Instalación - D:350 mm


Ilustración 48. Resultados E. Instalación - D:700 mm
Ilustración 49. Resultados E. Instalación - D:900 mm

En las Ilustraciones 46, 47, 48 y 49, se presenta de forma gráfica los resultados obtenidos en el proceso de modelación de la instalación de los ductos en el sitio dispuesto. Los cálculos de este proceso no se incluyeron dentro de la información ingresada a SimaPro, dado que el programa de cálculo utilizado (desarrollado por la NASTT) ya arroja resultados de CO₂ equivalente.

De forma general se evidencia que las emisiones, cuando se trata de un proceso de apertura de zanja, no presentan variaciones considerablemente altas como en otros escenarios, dado que el proceso de excavación es similar independiente del material; por lo que las diferencias radican en el ancho requerido para la instalación cada sistema. Sin embargo, en todos los casos evaluados con este tipo de tecnología el material que menor cantidad de emisiones genera es el PVC, dado que las dimensiones de la zanja son menores. Por otro lado, para los diámetros de 250 y 350 mm se evidencia que el DI, el acero y el concreto son los materiales que más emisiones generan, respectivamente. No obstante, para los diámetros de 700 y 900 mm el PP y el HDPE lideran la cantidad de CO₂ emitido. En cuanto a lo anterior es importante tener en cuenta que en el manual de instalación consultado no se reporta el proceso de cálculo u obtención de algunos de los valores de ancho de excavación establecidos, sino que permanecen constantes dependiendo del diámetro, por lo que puede existir cierta incertidumbre en estos datos que hagan que las dimensiones de la zanja varíen entre materiales. En suma, dentro del análisis fue posible establecer un escenario para evaluar la tecnología sin zanja de Pipe bursting o Fraccionamiento de tuberías. Esta se emplea principalmente para el HDPE, por lo que el escenario únicamente se evalúa para este material y hace parte de las metodologías de reemplazo de sistemas existentes. En esta se evidencia que la reducción de emisiones en comparación

con el método a cielo abierto puede ser de cerca del 88.2%, lo que quiere decir que este tipo de tecnologías son bastante eficientes en la reducción de la huella de carbono que comprende esta etapa del ciclo de vida. A su vez, hay ciertas ventajas arraigadas al hecho de que las reducciones se dan porque se requiere menos maquinaria, generan menos perturbaciones superficiales, se demanda menos operarios, los tiempos de operación son menores, entre otras.

7.4. Operación

En la Tabla 48 se presentan los resultados de emisiones de CO₂ equivalente, obtenidos al realizar la simulación de los escenarios de operación para cada uno de los materiales, según el diámetro.

Tabla 48. Resultados de emisiones en la Etapa de Operación

Etapa	Material	Diámetro (mm)	Emisiones de CO₂ (Kg)
Operación	Acero	250	55109,24
		350	133093,20
		700	24,20
		900	39,90
	Concreto	250	52340,00
		350	131246,61
		700	24,20
		900	39,90
	DI	250	51647,68
		350	128168,96
		700	24,20
		900	39,90
	PVC	250	44724,58
		350	109703,07
		700	24,20
		900	39,90
	PP	250	45301,51
		350	114319,54
		700	24,20
		900	39,90
HDPE	250	45301,51	
	350	114319,54	
	700	24,20	
	900	39,90	

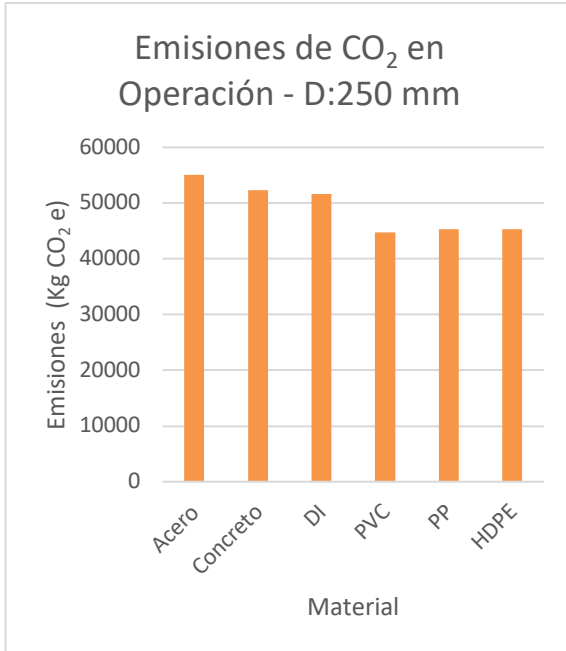


Ilustración 50. Resultados E. Operación - D:250 mm

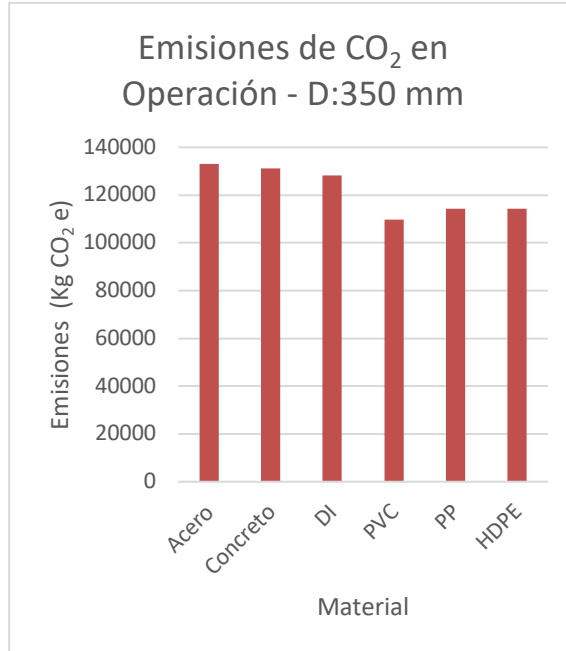


Ilustración 51. Resultados E. Operación - D:350 mm

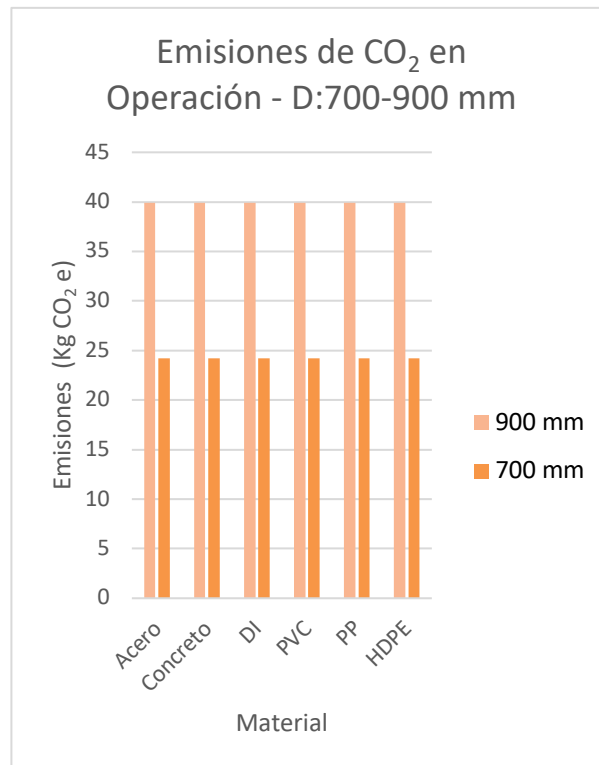


Ilustración 52. Resultados E. Operación - D:700 mm y 900 mm

En las Ilustraciones 50, 51 y 52 se presentan de forma gráfica los resultados obtenidos en el proceso de modelación de la operación de los ductos. Para el caso de las tuberías de 250 y 350 mm se evidencia un mismo comportamiento de los resultados en cuanto a la tendencia de las emisiones generadas por cada material y esto es por la relación directamente proporcional que existe entre la magnitud del coeficiente rugosidad (K_s) y el consumo energético que se requiere para el bombeo de agua. Por lo tanto, se puede afirmar que a mayor K_s mayor energía de bombeo se necesita en el ducto. Lo anterior al ser evaluado para un periodo de tiempo prolongado como lo son 100 años, hace que la cantidad de energía sea bastante elevada en comparación con el resto de las etapas de ciclo de vida, por lo que representa valores de alta importancia al momento de la ponderación de resultados y en la vida real al momento de la escogencia de un material de un sistema hidráulico dado el consumo energético que puede representar a futuro. A partir de esto, se evidencia que el PVC es el material que tiene mayores ventajas operativas en cuanto al bombeo en comparación con el resto, seguido por PP, HDPE, DI, concreto y finalmente el acero.

Por otro lado, el procedimiento de cálculo de mantenimiento de las tuberías permitió tener en cuenta estos factores que son fundamentales dentro del ciclo de vida, pero no resulta ser un factor diferencial entre las emisiones de los materiales ya que permanecen constantes según el diámetro; como se puede apreciar en la Ilustración 52.

7.5. Reciclaje

En la Tabla 48 se presentan los resultados de emisiones de CO_2 equivalente, obtenidos al realizar la simulación de los escenarios en la etapa de reciclaje para cada uno de los materiales, según el diámetro.

Tabla 49. Resultados de emisiones en la Etapa de Reciclaje

Etapas	Materiales	Diámetro (mm)	Emisiones de CO_2 (Kg)
Reciclaje	Acero	250	47,60
		350	66,60
		700	133,00
		900	171,00
	Concreto	250	10,00
		350	17,10
		700	64,60
		900	101,00
	DI	250	54,90
		350	95,50
		700	331,00
		900	481,00

	PVC	250	0,56
		350	0,78
		700	1,57
		900	2,02
	PP	250	0,505
		350	0,707
		700	1,41
		900	1,82
	HDPE	250	0,593
		350	1,2
		700	2,40
		900	3,08

En las Ilustraciones 53, 54, 55 y 56, se presentan de forma gráfica los resultados obtenidos en el proceso de modelación del transporte desde el sitio de desmantelamiento del sistema, hasta el punto de reciclaje de los diferentes materiales de tuberías.

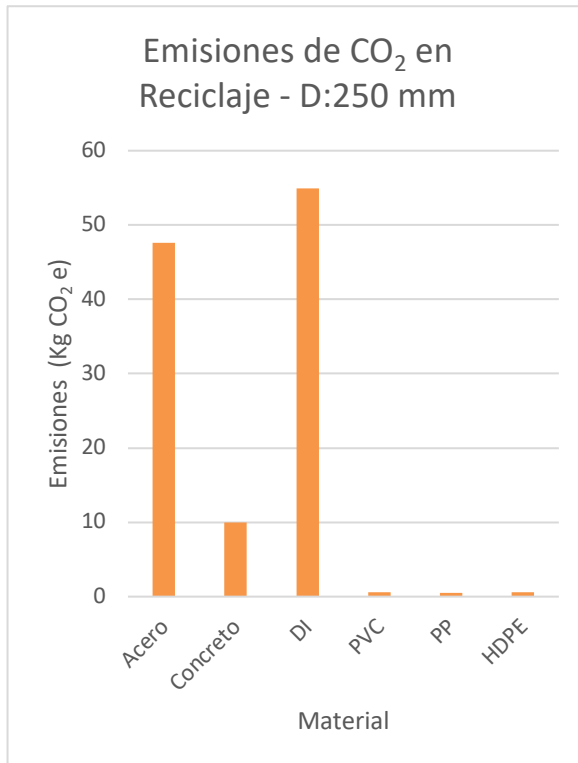


Ilustración 53. Resultados E. Reciclaje - D:250 mm

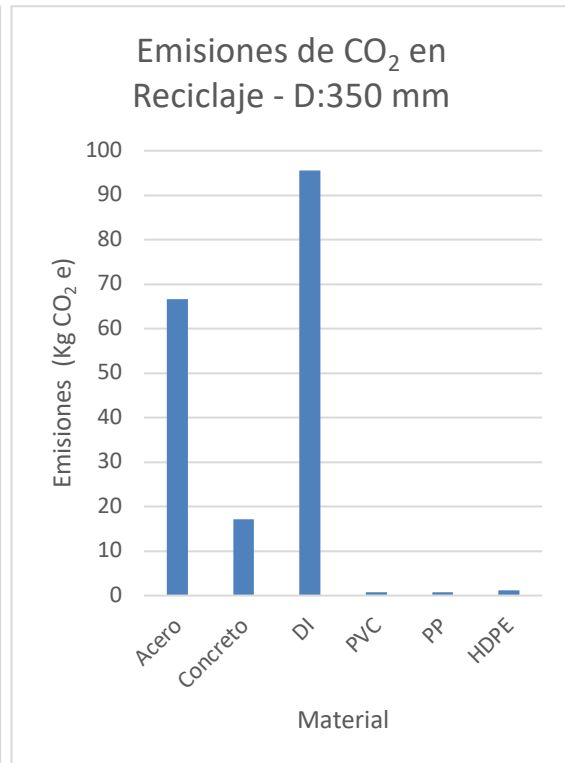


Ilustración 54. Resultados E. Reciclaje - D:350 mm

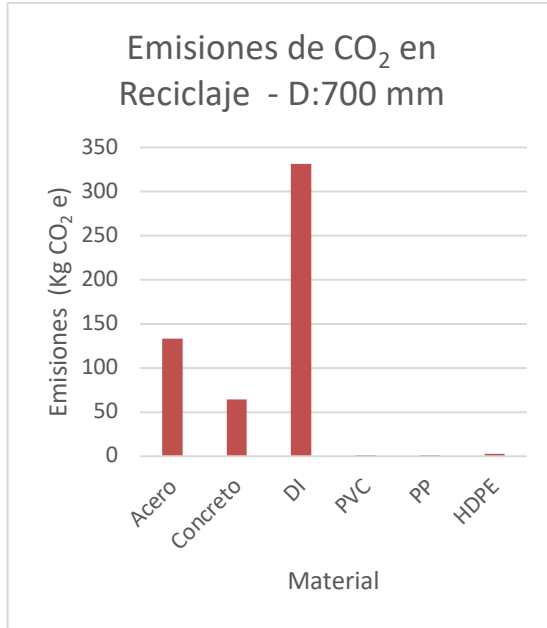


Ilustración 55. Resultados E. Reciclaje - D:700 mm

Ilustración 56. Resultados E. Reciclaje - D:900 mm

La etapa de reciclaje representa la finalización del ciclo de vida de los materiales, es decir que se cierra la etapa cuando son entregados a la empresa que se encarga de darles algún tipo de aprovechamiento o de disponer ciertos componentes en caso de ser necesario. Por lo cual, al tratarse de una etapa en la que netamente se relaciona el transporte, depende de la ubicación de los puntos de movilización y del peso de los materiales. Teniendo en cuenta lo anterior, se evidencia que los materiales que más emisiones generan son el DI y el acero, dado que su transporte se realiza hasta otro departamento. A su vez, para el caso de los diámetros de 700 y 900 mm, las emisiones del DI son ciertamente más elevadas por el alto peso que representa este material en esos escenarios. En cuanto a los otros materiales, el transporte se realiza en la misma ciudad de Bogotá o en sus afueras, por lo que las emisiones se sitúan en una menor escala. Específicamente para los termoplásticos son casi imperceptibles en comparación con los otros materiales, dado el peso de estos materiales.

7.6. Resultados generales

En la Tabla 50 se presentan los resultados de emisiones de CO₂ equivalente acumuladas, para todo el ciclo de vida de cada uno de los materiales, según el diámetro.

Tabla 50. Resultados de totales de emisiones

Etapa	Material	Diámetro (mm)	Emisiones de CO ₂ (Kg)
Total	Acero	250	72375,80
		350	153413,17
		700	31445,95

Etapa	Material	Diámetro (mm)	Emisiones de CO ₂ (Kg)
	Concreto	900	37642,81
		250	63724,60
		350	143902,77
		700	21016,77
		900	26380,71
	DI	250	69149,73
		350	150933,66
		700	53226,27
		900	70409,65
	PVC	250	57841,92
		350	124300,67
		700	20197,21
		900	23241,36
	PP	250	57972,36
		350	128245,73
		700	19628,58
		900	22265,05
	HDPE	250	58403,82
		350	130527,48
		700	24192,08
900		28131,05	

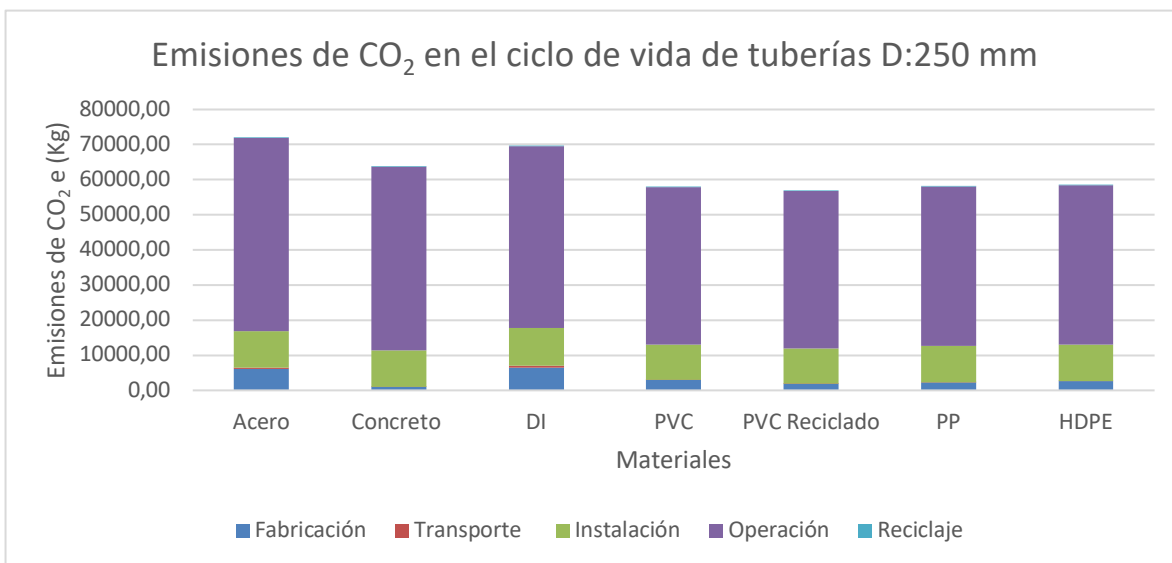


Ilustración 57. Resultados de emisiones totales de tuberías de 250 mm

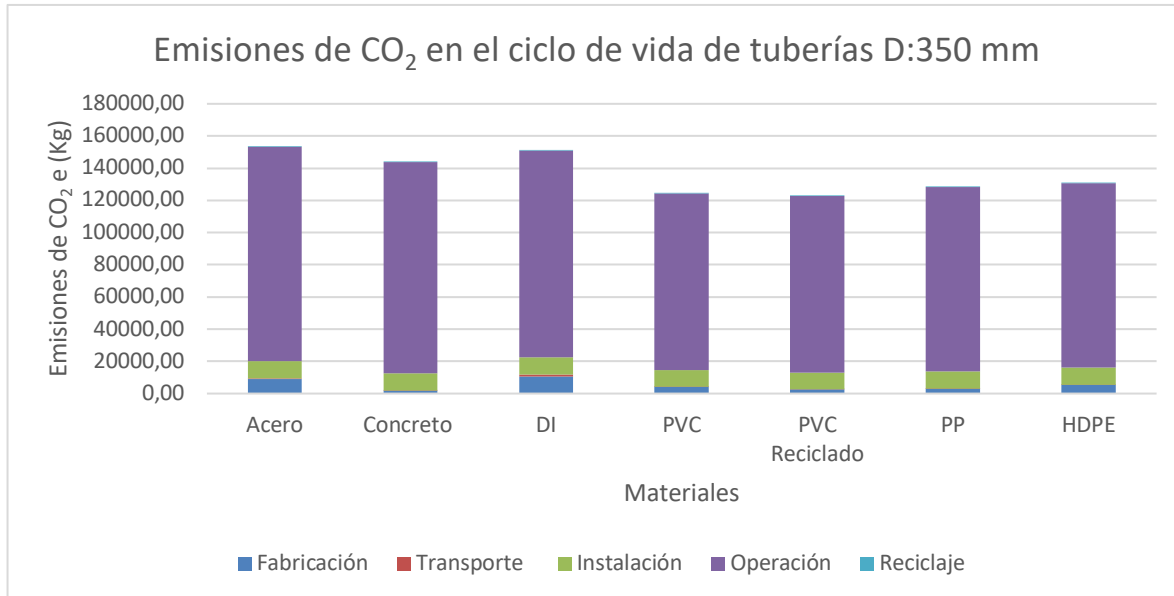


Ilustración 58. Resultados de emisiones totales de tuberías de 350 mm

En las Ilustraciones 57 y 58, se presentan de forma gráfica los resultados obtenidos para el acumulado de todo el ciclo de vida de los escenarios, con los diámetros de 250 y 350 mm. En estos se evidencia que la etapa que más emisiones genera en todos los casos es la de operación, dado que en esta se comprende la energía de bombeo y mantenimiento de los sistemas por el tiempo total de 100 años. A su vez, es importante resaltar que, al tratarse de una operación continua por un periodo de 8 horas diarias sin intermitencia, estos valores son bastante elevados. Esta consideración es importante para casos en donde se requiera bombeo continuo en los sistemas, y a pesar de que las condiciones topográficas de Bogotá facilitan el transporte a gravedad, esta consideración es valiosa para comprender mejor el ciclo de vida de los materiales.

Por otro lado, la instalación a cielo abierto resulta ser la segunda etapa que más emisiones genera para todos los materiales, por lo cual constituye consideraciones de importancia a nivel ambiental que se deben ponderar al momento de la escogencia de una tecnología con o sin zanja.

En algunos casos se evidencia que la fabricación es una etapa con alta cantidad de emisiones, como por ejemplo para el DI y el acero, donde las emisiones son cercanas a las de la fase de instalación. Por lo cual, son materiales que actualmente siguen teniendo una alta huella de carbono al momento de su propia manufactura y la de sus componentes. No obstante, para las tuberías de concreto se evidencia que en esta etapa las emisiones son las más bajas en comparación con el resto de los materiales. Esto se puede deber a una hipótesis relacionada con los esfuerzos de reducción y/o compensación que está implementando esta industria, específicamente en la fabricación de cemento. Sin embargo, es necesario un análisis específico o comparativo para poder establecer causalidad directa de lo anterior.

Para los termoplásticos el escenario es muy similar entre sí ya que comparten variables similares en algunas de las etapas de ciclo de vida. Sin embargo, se evidencia que la fabricación del PVC al comprender materiales reciclados si genera un impacto general en todo el ciclo de vida ya que sus emisiones permiten que este sea el material con menor huella de carbono, en comparación con el resto. A su vez, se resalta el escenario para el PP ya que este resulta ser muy competitivo en cuanto a las emisiones acumuladas que genera y por sus características cada vez más emergentes en el mercado de tuberías.

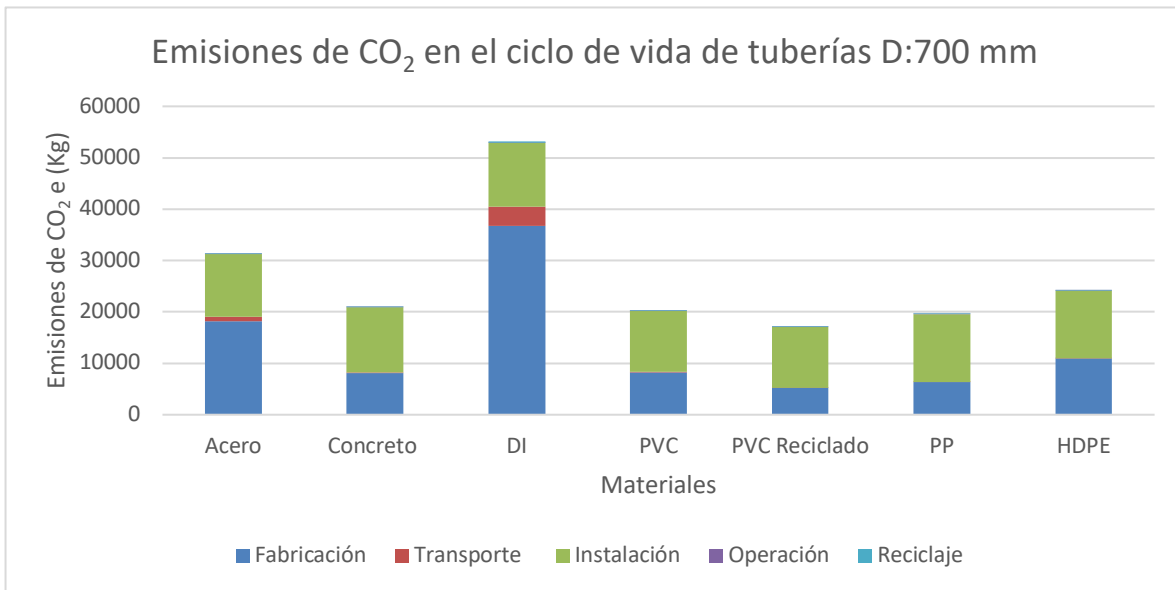


Ilustración 59. Resultados de emisiones totales de tuberías de 700 mm

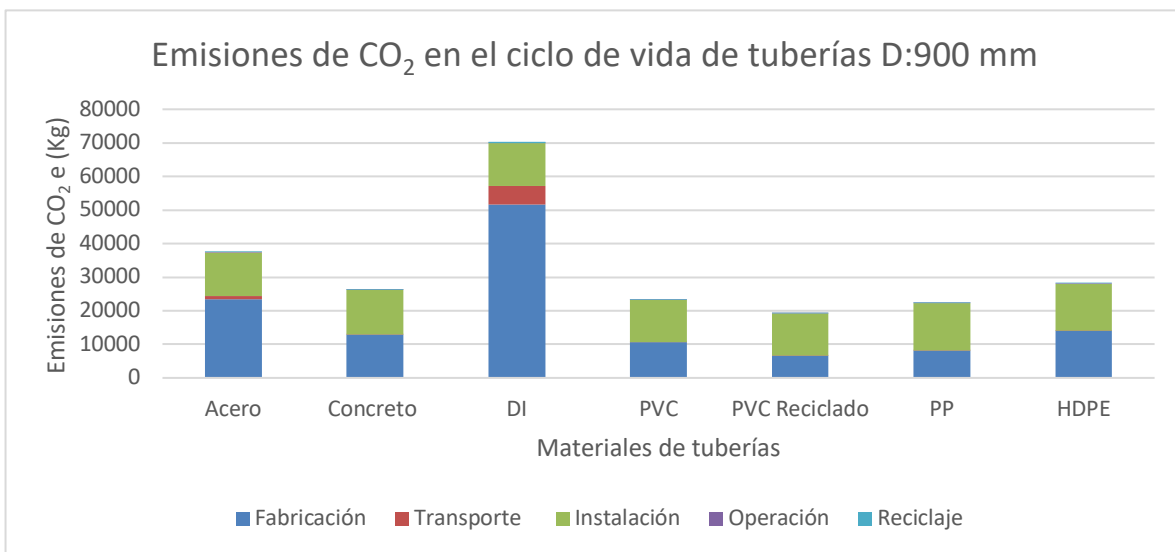


Ilustración 60. Resultados de emisiones totales de tuberías de 900 mm

En las Ilustraciones 57 y 58, se presentan de forma gráfica los resultados obtenidos para el acumulado de todo el ciclo de vida de los escenarios para los diámetros de 700 y 900 mm. En estos es importante tener en cuenta que no se considera bombeo dentro del sistema de tuberías, sino que el transporte del agua se da por gravedad a superficie libre, es decir que para la etapa de operación únicamente se contempla el mantenimiento. En las gráficas se evidencia que existen diferencias más marcadas en las emisiones de los diferentes materiales, en comparación con diámetros menores. Por ejemplo, las altas emisiones relacionadas con el DI que resultan ser cerca del doble que otros materiales como el concreto y los termoplásticos. Lo anterior dado que la fabricación de las tuberías de DI en estos diámetros resulta ser la fase determinante de las emisiones por su alta magnitud. Teniendo en cuenta lo anterior, las fases que más emisiones aportan son la de fabricación para el DI, el acero y el HDPE. Sin embargo, la instalación es la etapa dominante para materiales como el concreto, el PVC, el PVC reciclado y el PP.

El transporte en el caso del DI resulta tener una mayor incidencia en las Ilustraciones 57 y 58, en comparación con este material, pero en diámetros menores, lo cual puede deberse al elevado peso de estas tuberías en los escenarios de mayor tamaño.

De forma general se evidencia que el escenario con 40% de PVC reciclado sigue representando el material con menor huella de carbono. Así como que los termoplásticos erigen menor cantidad de emisiones acumuladas, que por ejemplo las tuberías de concreto, a excepción de las de HDPE. A su vez, se determinó que las etapas de operación y reciclaje no tienen gran incidencia en las emisiones totales, pero aportan al proceso de determinación de puntos clave que deben ser estudiados cada día más para la disminución de estas de forma multilateral.

7.7. Compensación

Actualmente para mitigar el efecto de las emisiones de CO₂ por procesos antropogénicos en el medio ambiente, se realizan compensaciones que cumplen la función de ser un abono monetario que se reinvierte en proyectos para mejorar el entorno natural y el desarrollo social. Bajo lo anterior, en Colombia se desarrolló en la Ley 1819 de 2016 un impuesto nacional al carbono, en donde se aplica un gravamen para “desincentivar el uso de combustibles fósiles y promover mejoras tecnológicas que conduzcan a su uso eficiente” (DNP. 2021). Este impuesto para el año 2021 se encontraba en \$ 15.500 COP por cada tonelada de CO₂ generada por la quema de combustibles.

A su vez, es importante establecer puntos comparativos de cómo se realizan estos procesos a nivel internacional y para el caso de la Unión Europea el valor de compensación por tonelada de carbono en el mes de julio del 2021 se encontraba en € 53.39 EUR (Martos, A. 2021). Por otro lado, para finales del 2020 el precio medio mundial del carbono en varios regímenes se situó en \$ 22 USD por tonelada de CO₂ (Roca, J. 2021).

Lo anterior, permite establecer un punto comparativo sobre el costo real que puede tener compensar las emisiones generadas por cada sistema de tuberías a lo largo de su ciclo de vida. Por lo cual, en la Tabla 51 se presentan los resultados obtenidos tanto para el caso colombiano como para los costos que son aplicados a nivel internacional.

Tabla 51. Resultados comparativos de costos de compensación

Diámetro: 250 mm				
Material	Emisiones de CO₂ (Kg)	Compensación de Carbono (\$ COP)	Compensación de Carbono (€ EUR)	Compensación de Carbono (\$ USD)
Acero	72375,80	\$1.121.825	3.864 €	\$1.592
Concreto	63724,60	\$987.731	3.402 €	\$1.402
DI	69149,73	\$1.071.821	3.692 €	\$1.521
PVC	57841,92	\$896.550	3.088 €	\$1.273
PP	57972,36	\$898.572	3.095 €	\$1.275
HDPE	58403,82	\$905.259	3.118 €	\$1.285
Diámetro: 350 mm				
Material	Emisiones de CO₂ (Kg)	Compensación de Carbono (\$ COP)	Compensación de Carbono (€ EUR)	Compensación de Carbono (\$ USD)
Acero	153413,17	\$2.377.904	8.191 €	\$3.375
Concreto	143902,77	\$2.230.493	7.683 €	\$3.166
DI	150933,66	\$2.339.472	8.058 €	\$3.321
PVC	124300,67	\$1.926.660	6.636 €	\$2.735
PP	128245,73	\$1.987.809	6.847 €	\$2.821
HDPE	130527,48	\$2.023.176	6.969 €	\$2.872
Diámetro: 700 mm				
Material	Emisiones de CO₂ (Kg)	Compensación de Carbono (\$ COP)	Compensación de Carbono (€ EUR)	Compensación de Carbono (\$ USD)
Acero	31445,95	\$487.412	1.679 €	\$692
Concreto	21016,77	\$325.760	1.122 €	\$462
DI	53226,27	\$825.007	2.842 €	\$1.171
PVC	20197,21	\$313.057	1.078 €	\$444
PP	19628,58	\$304.243	1.048 €	\$432
HDPE	24192,08	\$374.977	1.292 €	\$532
Diámetro: 900 mm				
Material	Emisiones de CO₂ (Kg)	Compensación de Carbono (\$ COP)	Compensación de Carbono (€ EUR)	Compensación de Carbono (\$ USD)
Acero	37642,81	\$583.464	2.010 €	\$828
Concreto	26380,71	\$408.901	1.408 €	\$580
DI	70409,65	\$1.091.350	3.759 €	\$1.549
PVC	23241,36	\$360.241	1.241 €	\$511
PP	22265,05	\$345.108	1.189 €	\$490
HDPE	28131,05	\$436.031	1.502 €	\$619

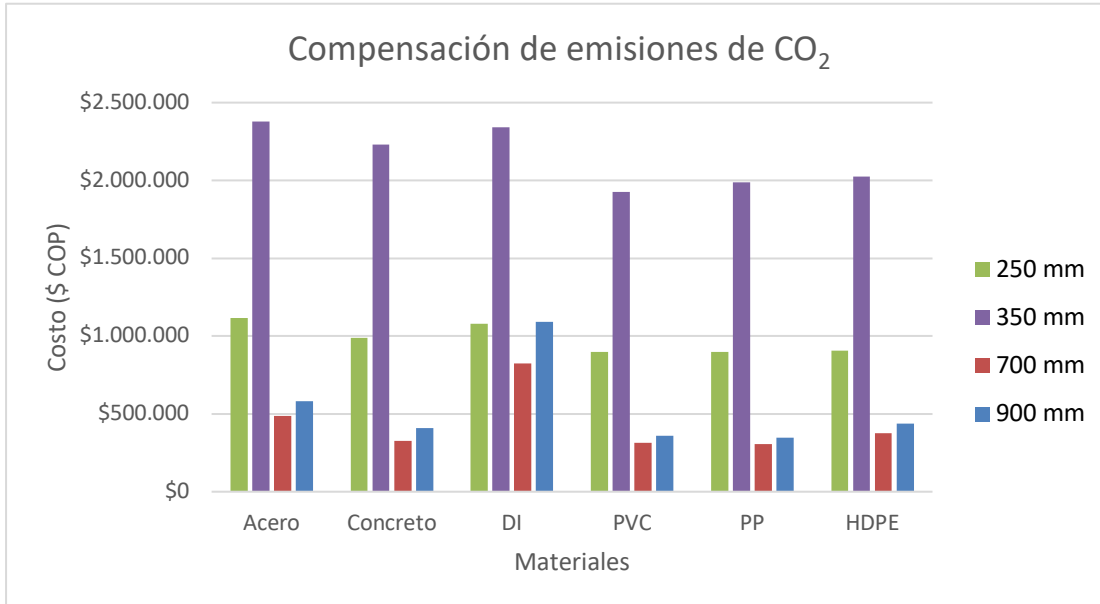


Ilustración 61. Compensación de huella de carbono según norma colombiana

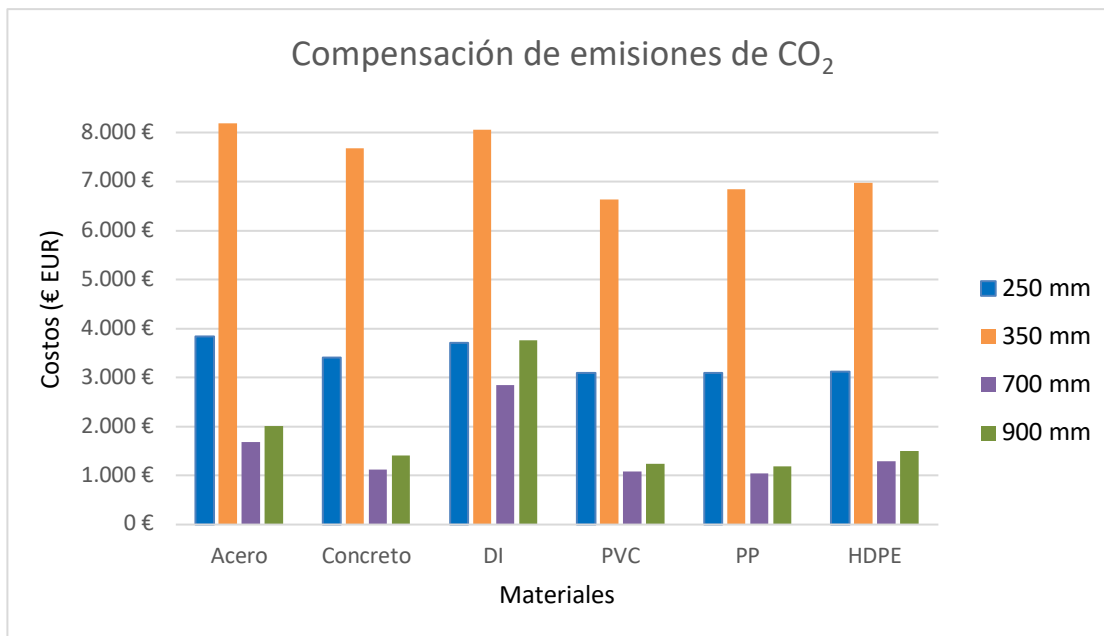


Ilustración 62. Compensación de huella de carbono según norma europea

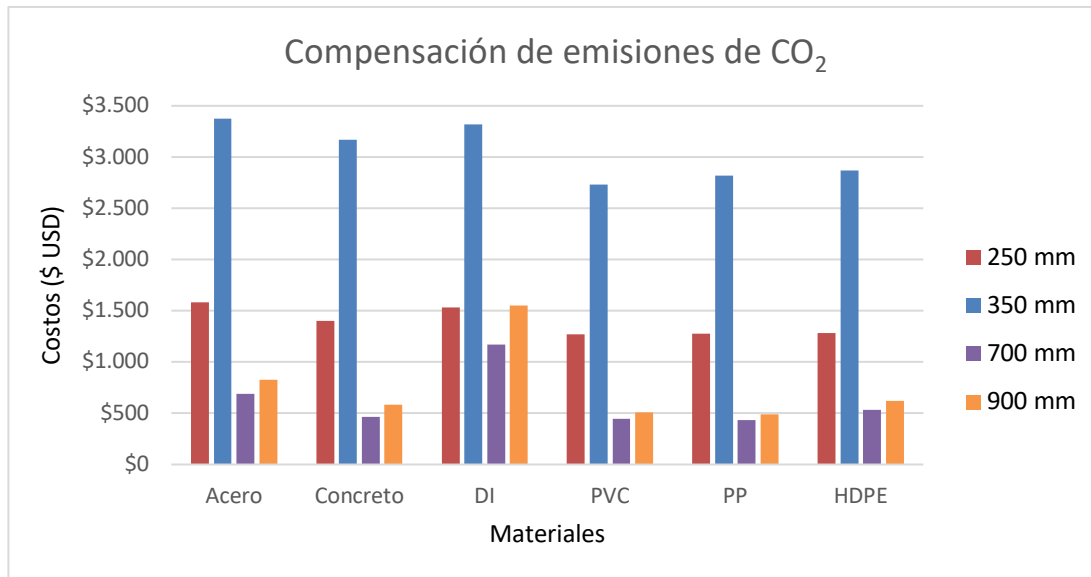


Ilustración 63. Compensación de huella de carbono según promedio mundial

En las Ilustraciones 61, 62 y 63, se presentan de forma gráfica los resultados obtenidos para la estimación económica de los costos de compensación por toneladas de CO₂ emitidas en cada escenario planteado en el presente trabajo de investigación. En estas se evidencia que para los diámetros menores (250 y 350 mm) los costos son mayores dado que se contemplan mayores emisiones en la etapa de operación. Por lo cual, al tener sistemas sin bombeo continuo, las emisiones y por ende los costos de compensación se reducen en gran magnitud.

Por otro lado, se evidencia que a nivel internacional los costos de compensación son mucho más elevados que los que se encuentran estandarizados en Colombia. Lo anterior ya que, por ejemplo, en el caso de Europa y del promedio mundial se paga cerca de 15 y 5 veces más por la compensación de emisiones, respectivamente. Esto representa un problema de subestimación de los costos por afectaciones medioambientales en el territorio colombiano y constituye un alto costo de oportunidad en inversión de proyectos que pueden ayudar a mitigar las problemáticas ambientales y las afectaciones directas sobre el cambio climático. En suma, puede implicar un problema al momento de la toma de decisión por parte del emisor y es sobre si es más costoso evitar la generación de CO₂ o pagar el impuesto establecido, lo cual reduce los esfuerzos dirigidos por parte de este tipo de políticas públicas para cumplir objetivos tangibles que estén alineados con la reducción de la huella de carbono.

A su vez, se evidencia que hay una relación directamente proporcional entre los costos de compensación y las emisiones de cada material, por lo que el utilizar materiales que generen una menor huella de carbono puede representar un ahorro por pagos en compensación a futuro, en caso de que se llegase a reglamentar en algún momento una medida de este tipo.

8. CONCLUSIONES

En el presente trabajo de investigación se llevó a cabo una revisión bibliográfica para establecer el estado del arte del análisis de ciclo de vida de materiales de tuberías comúnmente utilizados en sistemas hidráulicos urbanos, para de tal forma instituir el *statu quo* de este tipo de estudios a nivel nacional e internacional. A su vez, se pudo realizar la modelación de un caso de estudio teórico, en el cual se evaluó la huella de carbono del ciclo de vida de diferentes materiales de tuberías a partir de la variación de los diámetros y de clasificar su uso hidráulico entre sistemas de suministro y sanitarios. De acuerdo con lo anterior se pudo concluir que:

- A nivel internacional se cuenta con múltiples estudios que se enfocan en el análisis de ciclo de vida de materiales de tuberías, en diferentes países. Estos trabajos en su mayoría cubren las etapas de fabricación, transporte e instalación de los ductos; dada la complejidad y gran cantidad de información que se requiere en estas. No obstante, se evidencia que las etapas de operación y disposición y/o reciclaje son las que menos enfoque han tenido, por lo que son limitados los estudios en los cuales se cubre la verdadera totalidad del ciclo de vida de los materiales. Sin embargo, en Colombia no se cuenta con antecedentes de este tipo de estudios que sean de acceso público y que evalúen bajo condiciones locales la huella de carbono y/o impacto medioambiental de utilizar ciertos materiales de tuberías en proyectos hidráulicos urbanos.
- En el estado del arte se evidencia que la mayoría de los estudios basan sus cálculos en la estimación de energía incorporada, que resulta ser la cantidad de energía requerida por todas las actividades relacionadas con un proceso productivo. Sin embargo, este tipo de valores son estandarizados con información específica de ciertos países en los cuales se llevó a cabo la recolección de datos y pueden crear cierta incertidumbre al ser aplicados en otros contextos productivos, tecnológicos y sociales alrededor del mundo. Por lo cual, el trabajar con datos e información local se puede aportar exactitud en la elaboración de un análisis de ciclo de vida de este tipo.
- En la revisión bibliográfica se pudo apreciar que hay gran cantidad de estudios enfocados netamente en la evaluación de la huella de carbono de sistemas de instalación de tuberías. Esto al tratarse de una de las etapas con mayor cantidad de emisiones de CO₂ y en la que se cuenta con mayor cantidad de avances tecnológicos hoy en día. Dentro de estos se resaltan las ventajas operativas de las metodologías sin zanja. Lo anterior se pudo evaluar en el caso de estudio por medio del planteamiento de un escenario en el cual se utilizó fraccionamiento de tuberías. De lo anterior se obtuvo una reducción de cerca del 88% de las emisiones de carbono utilizando esta tecnología en comparación con el método convencional a cielo abierto. Por lo que se concluye que este tipo de métodos aportan importantes reducciones a las afectaciones medioambientales generadas en la instalación de estos sistemas y se pueden

resaltar otras propiedades como la reducción del ruido, afectaciones superficiales y tiempo de operación.

- Dentro del caso de estudio, de forma general se evidenció que el peso de los materiales es una de las principales consideraciones al momento de incrementar la estimación de la huella de carbono, ya que en la mayoría de las etapas es un factor que se incluye dentro de los cálculos. Por lo cual, hay una relación directamente proporcional entre el peso de las tuberías y la cantidad de CO₂ generado por cada material. En este orden de ideas, materiales como el DI, el acero y el concreto presentan pesos considerables, en comparación con los termoplásticos, y resultan ser en su mayoría los materiales con mayor huella de carbono.
- En los escenarios planteados para los diámetros de 250 y 350 mm, se evidencia que la etapa de operación es la más determinante al momento de la comparación acumulativa de las emisiones de CO₂. Esto dado que en esta se contempla el bombeo continuo de agua por un periodo extendido de 100 años, lo cual implica un consumo energético constante y prolongado. Por lo cual, el factor determinante dentro de la estimación de estos cálculos fue el coeficiente de rugosidad de los materiales (Ks), ya que se presenta una relación inversamente proporcional entre este y la huella de carbono. Dado esto, se obtuvo que los termoplásticos, en especial el PVC, presentan ventajas operativas en comparación con el resto al tratarse de materiales menos rugosos y por ende su consumo energético en un periodo de funcionamiento es menor que otros de uso convencional.
- En los escenarios planteados para los diámetros de 700 y 900 mm en los cuales el agua se transporta a superficie libre, se evidencia que las etapas que comprenden la mayor cantidad de emisiones son las de fabricación e instalación de las tuberías. En este caso se pudo evaluar los diferentes procesos que se llevan a cabo en la fabricación de los ductos y se concluyó que los termoplásticos y el concreto son materiales bastante competitivos en cuanto a las emisiones que generan en esta etapa ya que no presentan altas variaciones en comparación con el DI y el acero. Por otra parte, es evidente el alto impacto ambiental que genera la instalación de este tipo de sistemas con el método convencional a cielo abierto, independiente del material que se utilice, ya que las variables de dimensionamiento de las zanjas pueden depender de los criterios de diseño que se requieran para el proyecto en específico.
- A partir del escenario propuesto en el cual se utiliza un 40% de PVC reciclado, se pudo evidenciar que las emisiones de este se mantienen por debajo en comparación con el resto de los materiales incluidos en este estudio. Por lo cual, reciclar este tipo de sistemas resulta ser una alternativa factible al tener en cuenta que este material puede ser reutilizado múltiples veces sin perder sus propiedades funcionales y de resistencia. Lo anterior, también requiere de la realización de diferentes estudios de mercado en los cuales se evalúe la factibilidad de incluir este tipo de ductos dentro de la oferta disponible para clientes y así conocer la respuesta de estos últimos a alternativas más amigables con el medio ambiente.

- Se concluye que el escenario de fabricación de tuberías de PVC reciclado representa una oportunidad de evaluación de este tipo de alternativas para otros termoplásticos como el HDPE y el PP, que pueden resultar en escenarios similares de reducción de emisiones.
- Por medio del proceso de búsqueda de información bibliográfica y de la recolección de datos con empresas del sector, se pudo conocer el esfuerzo de las diferentes industrias por reducir emisiones en las diferentes fases del ciclo de vida de los materiales. Esto ya que actualmente se cuenta con procesos emergentes para compensar las emisiones generadas, por ejemplo en la fabricación, e incluir procesos con mejores rendimientos energéticos. A su vez, hoy en día se cuenta con cada vez más técnicas de reciclaje de materiales que permiten que se les de un nuevo uso y no se contemple únicamente las alternativas de abandono o disposición final.
- De forma general se pudo evidenciar que los materiales que menor huella de carbono tienen a lo largo de su ciclo de vida son el PVC y el PP. Por lo cual, al momento de ponderar variables de escogencia de un material para ser utilizado en un proyecto hidráulico urbano, estos pueden tener ventajas en comparación con el resto al incluir menores emisiones de CO₂. A su vez, permite desarrollar la importancia de tener en cuenta los costos de toneladas de carbono dentro de los aspectos regulatorios al momento de permitir o no la ejecución de proyectos.
- Por medio del ejercicio de comparación de costos de compensación de CO₂, se pudo evidenciar que en Colombia el precio pagado por la emisión de gases de efecto invernadero resulta ser mucho menor que lo exigido en otros lugares del mundo. Lo cual permite evaluar los vacíos de rigor regulatorio impartidos por el gobierno al intentar incentivar la reducción en el uso de combustibles fósiles y de las emisiones generadas por procesos industriales. Por lo que es necesario replantear este tipo de costos y hacer que sean acordes con las afectaciones medioambientales y sociales que se generan en el país, lo cual puede requerir dejar de lado únicamente la ponderación económica.

9. RECOMENDACIONES

A continuación, se describen algunas recomendaciones surgidas a partir de la realización de este trabajo de investigación y que pueden ser tenidas en cuenta para trabajos futuros:

- El proceso de obtención de información primaria para el caso de estudio se vio obstaculizado en algunos casos por la falta de datos para ser incluidos en el análisis de ciclo de vida. Por lo cual, una recomendación inicial para la ejecución de este tipo de ejercicios es la recopilación previa de información que se ajusten a los objetivos planteados inicialmente y que de esta forma se asegure menor incertidumbre en los procesos de modelación computación e interpretación de resultados.
- Por otro lado, este ejercicio de evaluación de ciclo de vida para diferentes materiales de tubería se puede realizar teniendo en cuenta una evaluación previa de la vida útil de cada uno de los materiales, ya que en este caso se asumió que todos funcionarían de forma óptima en todo el periodo de evaluación planteado de 100 años. Pero en la vida real, se puede requerir el reemplazo de sistemas en este mismo lapso y por ende se verían alterados los resultados de consumo de materiales y también las emisiones de CO₂ generadas.
- Este estudio es un punto de partida para incentivar este tipo de investigaciones sobre la huella de carbono de materiales al momento de ser evaluados en un contexto como el colombiano. Por lo cual surge la necesidad de que se realicen cada vez más estudios en diferentes contextos como el académico y el industrial, para incentivar así la generación de conocimiento local que pueda ser compartido y comparado con el que ya está disponible a nivel internacional.
- Dentro del proceso de modelación, se recomienda el evaluar escenarios de reciclaje para otros materiales y de esa forma valorar si se generan reducciones en la huella de carbono. Lo anterior para determinar cuál se puede ver más beneficiado en el manejo de materiales reutilizados dentro de su cadena de producción.
- Se pudo evidenciar el amplio desarrollo y evaluación del uso de tecnologías sin zanja alrededor del mundo y como estas generan gran cantidad de beneficios operacionales, sociales y ambientales. Sin embargo, surge un vacío sobre como estas pueden llegar a ser más aplicables a múltiples materiales disponibles hoy en día en el mercado. Lo cual genera la necesidad de estudiar lo anterior para de tal forma plantear su uso extensivo en diferentes escenarios. A su vez, en Colombia surge la necesidad de generar investigaciones locales que comparen los beneficios que pueden traer estas tecnologías en un caso de estudio local.

10. REFERENCIAS

- ACNUR, (2018). Las consecuencias del calentamiento global más graves. La Agencia de la ONU para los Refugiados, Comité Español. Obtenido de: https://eacnur.org/blog/las-consecuencias-del-calentamiento-global-mas-graves-tc_alt45664n_o_pstn_o_pst/
- Accesorios de Bridas. (2019). Tubería de Acero al Carbón. Obtenido de: <https://www.acero-bridas-accesorios.com/proveedor-de-tuberia-de-acero-al-carbono.html>
- Aguas Residuales. (2016). El proceso de fabricación de los tubos de fundición dúctil de Saint-Gobain PAM. Obtenido de: <https://www.aguasresiduales.info/revista/noticias/el-proceso-de-fabricacion-de-los-tubos-de-fundicion-ductil-de-saint-gobain-pam-4Znu9>
- Aguas Residuales. (2017). Tecnología Molecor para la fabricación de tuberías de PVC-O. Obtenido de: <https://www.aguasresiduales.info/revista/reportajes/tecnologia-molecor-para-la-fabricacion-de-tuberias-de-pvc-o>
- Aguilar, A. (2019). Modelo de optimización multiobjetivo para el diseño de redes de drenaje urbano. Universidad de los Andes. Centro de Investigación en Acueductos y Alcantarillados – CIACUA. Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental. Bogotá D.C.
- Alarcón, J., & Pacheco, J. (2014). Comparación tecnológica y costos del método de instalación de tuberías sin zanja (trenchless) más eficiente para los suelos encontrados en un proyecto de Bogotá. Facultad de Ingeniería. Pontificia Universidad Javeriana.
- Alsadi, A., Matthews, J. C., & Matthews, E. (2020a). Environmental Impact Assessment of the Fabrication of Pipe Rehabilitation Materials. *Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice*, 11(1), 05019004. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)ps.1949-1204.0000395](https://doi.org/10.1061/(asce)ps.1949-1204.0000395)
- Alsadi, A., & Matthews, J. C. (2020b). Evaluation of Carbon Footprint of Pipeline Materials during Installation, Operation, and Disposal Phases. *Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice*, 11(2), 04020005. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)ps.1949-1204.0000422](https://doi.org/10.1061/(asce)ps.1949-1204.0000422)
- Ambrose, M.D., Burn, S., Desilva, D., and Rahilly, M. 2008. Life cycle analysis of water networks, XIV Plastics Pipes Conferences, 22–24 September, Budapest, Hungary.
- Aquaterm. (2015). Manual técnico. Sistema de tuberías de Polipropileno (PP-R). Aquaterm Green Pipe.
- Ariaratnam, S. T., Piratla, K., Cohen, A., & Olson, M. (2013). Quantification of Sustainability Index for Underground Utility Infrastructure Projects. *Journal of Construction Engineering and Management*, 139(12), 1–9. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)co.1943-7862.0000763](https://doi.org/10.1061/(asce)co.1943-7862.0000763)
- Argos. (2020). Tuberías de concreto prefabricado en el interceptor del norte del río Medellín. 360 en concreto. Obtenido de: <https://www.360enconcreto.com/blog/detalle/tuberias-concreto-prefabricado-rio-medellin>
- Brightway. (2018). Typical Horizontal Directional Drilling Method. Obtenido de: <https://ligastroygroup.ru/es/polypropylene-pipes-manufacturer-stages-of-production-of-polypropylene-pipes-raw-materials-and-technologies-used/>

- Camacho, L. (2020). La Paradoja De La Disponibilidad De Agua De Mala Calidad En El Sector Rural Colombiano. *Revista de Ingeniería*, 49, 38–51.
- Castillo, L. (2007). Optimización de las variables de presión y temperatura en el proceso de moldeo por inyección de polipropileno en la fabricación de tapas para mejorar los índices de calidad. Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala.
- Chilana, L., Bhatt, A. H., Najafi, M., & Sattler, M. (2016). Comparison of carbon footprints of steel versus concrete pipelines for water transmission. *Journal of the Air and Waste Management Association*, 66(5), 518–527. <https://doi.org/10.1080/10962247.2016.1154487>
- CONAGUA. (2012). *Manual de Instalación de Tubería para Drenaje Sanitario*. <http://www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/Publicaciones/Publicaciones/SGAPDS-44-12.pdf>
- Cosmos. (S,f). Tubería de Fibra de Vidrio (FRP y PRFV). Obtenido de: <https://tuberiadefibradevidrio.com/>
- Cosur. (2021). Tuberías de acero: Tipos, características y aplicaciones. Obtenido de: <https://www.cosur.es/tuberias-de-acero-tipos-caracteristicas-y-aplicaciones/>
- 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)
- DNP. (2021). Instrumentos económicos para el cambio climático. Departamento Nacional de Planeación. Obtenido de: <https://www.dnp.gov.co/programas/ambiente/CambioClimatico/Paginas/Instrumentos-economicos-para-el-cambio-climatico.aspx>
- EI Ecoinvent. (2021). Ecoinvent Database. Obtenido de: <https://ecoinvent.org>
- EPA. (2020). Calculadora de equivalencias de gases de efecto invernadero - Cálculos y referencias. Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos. Obtenido de: <https://espanol.epa.gov/la-energia-y-el-medioambiente/calculadora-de-equivalencias-de-gases-de-efecto-invernadero-calculos-y>
- FRP Systems. (2020). Tuberías de fibra de vidrio. FRP Systems México. Obtenido de: <https://frpmexico.com/tuberia-fibra-de-vidrio/>
- GHC Protocol. (2021). What is GHG Protocol? Greenhouse Gas Protocol. Obtenido de: <https://ghgprotocol.org/about-us>
- Green Solution. (2016). Todo Tiene Una Huella ¿Cual Es La Tuya? *Huella de Carbono*, Santiago de Chile, 14.
- Grupo IGC. (2019). Conoce el proceso de fabricación de tubos de HDPE. IGC, Innovación en geosintéticos y construcción. Obtenido de: <https://igc.com.pe/proceso-fabricacion-tubos-de-hdpe/>
- Grupo Jannone. (S,f). Tubos de gres vitrificado. Obtenido de: <https://www.jannone.net/es/tubos/tubo-gres-vitrificado/>
- Grupo Traber. (2018). Tubos de concreto. Obtenido de: <https://www.grupotraber.com/tubos-concreto/>

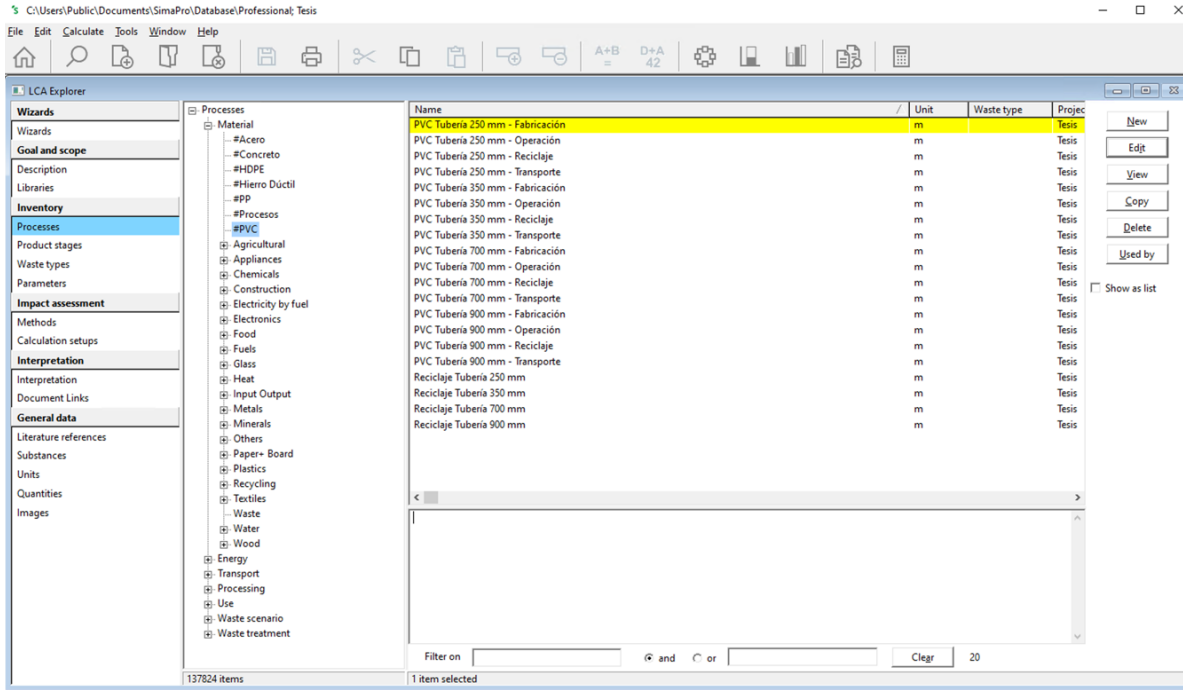
- Hajibabaei, M., Nazif, S., & Tavanaei Sereshgi, F. (2018). Life cycle assessment of pipes and piping process in drinking water distribution networks to reduce environmental impact. *Sustainable Cities and Society*, 43(March 2019), 538–549. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2018.09.014>
- Hammond, G.P., and Jones, C.I. 2008. Inventory of carbon and energy (ICE), University of Bath, UK.
- Hidrotec. (2016). Sistema de curado mediante vapor. Hidrotec. Obtenido de: <https://www.hidrotec.com/sistema/sistema-de-curado-mediante-vapor/>
- Holcim. (2021). Proceso de fabricación del cemento. Holcim Colombia. Obtenido de: <https://www.holcim.com.co/productos-y-servicios/cemento/proceso-de-fabricacion-del-cemento>
- IDEAM. (2014). Estudio Nacional del Agua 2014. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales – IDEAM.
- IDEAM. (2007). Información técnica sobre gases de efecto invernadero y el cambio climático. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales – IDEAM. Subdirección de meteorología.
- ICONTEC. (2007). Norma Técnica Colombiana NTC-ISO 14040. Gestión Ambiental. Análisis de Ciclo de Vida. Principios y Marco de Referencia. Segunda actualización. I.C.S.: 13.020.10; 13.020.60.
- ISO. (2018). ISO 14064-1:2018(es). ISO Online Browsing Platform. Obtenido de: <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:14064:-1:ed-2:vl:es:term:3.1.2>
- Jiménez, J. (2013). Manual para el diseño de sistemas de agua potable y alcantarillado sanitario. Facultad de Ingeniería, Universidad de Veracruz.
- Joshi, A. (2012). *A Carbon Dioxide Comparison of Open Cut and Pipe Bursting*. College of Technology, Architecture and Applied Engineering. Graduate Projects. Bowling Green State University.
- Kaushal, V., Najafi, M., & Serajiantehrani, R. (2020). Environmental Impacts of Conventional Open-Cut Pipeline Installation and Trenchless Technology Methods: State-of-the-Art Review. *Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice*, 11(2), 03120001. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)ps.1949-1204.0000459](https://doi.org/10.1061/(asce)ps.1949-1204.0000459)
- Khan, L. R., & Tee, K. F. (2015). Quantification and comparison of carbon emissions for flexible underground pipelines. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 42(10), 728–736. <https://doi.org/10.1139/cjce-2015-0156>
- La obra. (2020). Tubos de gres. Productos y servicios La obra. Madrid, España. Obtenido de: <https://www.laobraproductos.com/contacto/>
- Loss, A., Toniolo, S., Mazzi, A., Manzardo, A., & Scipioni, A. (2018). LCA comparison of traditional open cut and pipe bursting systems for relining water pipelines. *Resources, Conservation and Recycling*, 128, 458–469. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2016.08.001>
- Martínez, S. (2010). *Limpieza de Equipos de Proceso y Tuberías*. 1–213.
- Manzini, N., & Torres, C. (2015). Criterios para la toma de decisión de rehabilitar o renovar la infraestructura hidráulica con evaluación económica de las alternativas para el sistema de

- Alcantarillado Sanitario del sector “Urdesa”, en la ciudad de Guayaquil. Universidad Católica de Santiago de Guayaquil.
- Marcilla, A., & Beltrán, M. (2012). Tecnología de Polímeros. *Tecnología de Polímeros*, 281. Universidad de Alicante.
- Martos, A. (2021). La meteórica subida de los precios del CO2 pone en jaque a los electrointensivos. El País – Economía. Obtenido de: https://cincodias.elpais.com/cincodias/2021/07/08/companias/1625756473_682268.html
- McWane. (2009). Tubería de Hierro Dúctil. Catalogo McWane International. DN80 mm hasta DN2600 mm.
- Ministerio de Ambiente. (2020). Gases Efecto Invernadero. Ministerio de Ambiente de Colombia. Obtenido de: <https://www.minambiente.gov.co/index.php/component/content/article/462-plantilla-cambio-climatico-18>
- Ministerio de Ambiente. (2010). Guía Ambiental para sistemas de acueducto: 6. Aducción y Conducción. *Guía Ambiental Para Sistemas de Acueducto, 1*(sistema de acueducto), 101. http://www.minambiente.gov.co/documentos/Sistemas_de_Gestión.pdf
- Mohit, S., M. A. N. Monfared, C. Kang, and A. Bayat. 2017. “Comparative study of greenhouse gas emissions from hand tunneling and pilot tube method underground construction methods.” *J. Green Building* 12 (4): 54–69. <https://doi.org/10.3992/1943-4618.12.4.54>.
- Monfared, M. (2018). Comparison of Trenchless Technologies and Open Cut Methods in New Residential Land Development. Graduate Projects. Department of Civil and Environmental Engineering. University of Alberta.
- Nandyala, V., Korkey, S., & Najafi, M. (2019). Comparison of Life Cycle Carbon Footprints of Steel and Concrete Pressure Pipes. *Pipelines 2019 – ASCE*.
- Oak Ridge National Laboratory. (2000). National Transportation Research Center, Oak Ridge, TN. Gross vehicle weight category definitions from 49CFR565.6
- PAM. (2021). Tuberías y accesorios de fundición dúctil. Pam Saint-Gobain. Obtenido de: <https://www.pamline.es/tuberia-fundicion-ductil>
- PNUD. (2020). Objetivos de Desarrollo Sostenible. Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo. Obtenido de: <https://www.undp.org/content/undp/es/home/sustainable-development-goals.html>
- PAVCO. (2019). Manual técnico. Tubosistemas para alcantarillado. Novafort - Novaloc. Grupo Orbia.
- PAVCO. (2019). Manual técnico. Tubosistemas Biaxial. Grupo Orbia.
- Perforaciones e Ingeniería. (2015). Auger Boring. Perforaciones e Ingeniería S.A.S. Obtenido de: <https://perforacioneseingenieria.com/auger-boring.html>
- Petit-Boix, A., Roigé, N., de la Fuente, A., Pujadas, P., Gabarrell, X., Rieradevall, J., & Josa, A. (2016). 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>

- Piecsa. (2020). Proceso de fabricación de tubería de acero. Blog, fabricación de tubería de acero, maquinaria para fabricación de tubería. Piecsa México. Obtenido de: <https://piecsa.mx/proceso-de-fabricacion-de-tuberia-de-acero/>
- Pinzón, J. (2011). Evaluación y perspectivas de la utilización de tecnologías sin zanja en redes de alcantarillado de Bogotá. Facultad de Ingeniería. Pontificia Universidad Javeriana.
- Piratla, K. R., Ariaratnam, S. T., & Cohen, A. (2012). Estimation of CO2 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)
- Preconal. (2009). Proceso de fabricación del tubo. Prefabricados de concreto el alto. Preconal Bolivia. Obtenido de: <http://www.preconalbolivia.com/1/fabricacion-de-los-tubos.html>
- Puig, R., Mila, L., Domenech, X., & Fullana-i-Palmer, P. (1999). El análisis de ciclo de vida (ACV) y su utilización en el ecoetiquetado de productos: aplicación al sector curtidos. *XLVIII Congreso de AQEIC, May 2014*, 240–245.
- Pupo, C (2014). Metodología para la selección de obras de ingeniería para la rehabilitación de redes troncales de alcantarillado. Maestría en Ingeniería Civil. Escuela Colombiana de Ingenierías Julio Garavito.
- Rehan, R., & Knight, M. (2007). Do Trenchless Pipeline Construction Methods Reduce Greenhouse Gas Emissions? for North American Society for Trenchless Technology – British Columbia Chapter (NASTT-BC). September 19. <http://www.pwtrenchless.com/assets/preliminaryco2report-sept-07.pdf>
- Roca, J. (2021). Los precios del carbono deberán alcanzar los 160 dólares por tonelada para un mundo de 1,5 grados. El periódico de la energía. Obtenido de: <https://elperiodicodelaenergia.com/los-precios-del-carbono-deberan-alcanzar-los-160-dolares-por-tonelada-para-un-mundo-de-15-grados/>
- Roca I. (2005). Estudio de las propiedades y aplicaciones industriales del polietileno de alta densidad (PEAD). Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala.
- Saldarriaga, J. (2019). Hidráulica de tuberías (Cuarta Edición.). Alfaomega.
- Saldarriaga, J., Páez, D., Salcedo, C., Cuero, P., López, L. L., León, N., & Celeita, D. (2020). A Direct approach for the near-optimal design of water distribution networks based on power use. *Water (Switzerland)*, 12(4). <https://doi.org/10.3390/W12041037>
- Sihabuddin, S., & Ariaratnam, S. T. (2009a). Methodology for estimating emissions in underground utility construction operations. *Journal of Engineering, Design and Technology*, 7(1), 37–64. <https://doi.org/10.1108/17260530910947259>
- Sihabuddin, S., Ariaratnam, S. (2009b). Quantification of carbon footprint on underground utility projects. *Copyright ASCE 2009. 2009 Construction Research Congress. Construction Research Congress*. 618–627.
- Simapro. (2021). Ecoinvent LCI database. Simapro web page. Obtenido de: <https://simapro.com/databases/ecoinvent/>
- SCI. (2019). Avances de la ingeniería en Colombia. Sociedad Colombia de Ingeniería. SCI Medios. Obtenido de: <https://sci.org.co/avances-de-la-ingenieria-en-colombia/>

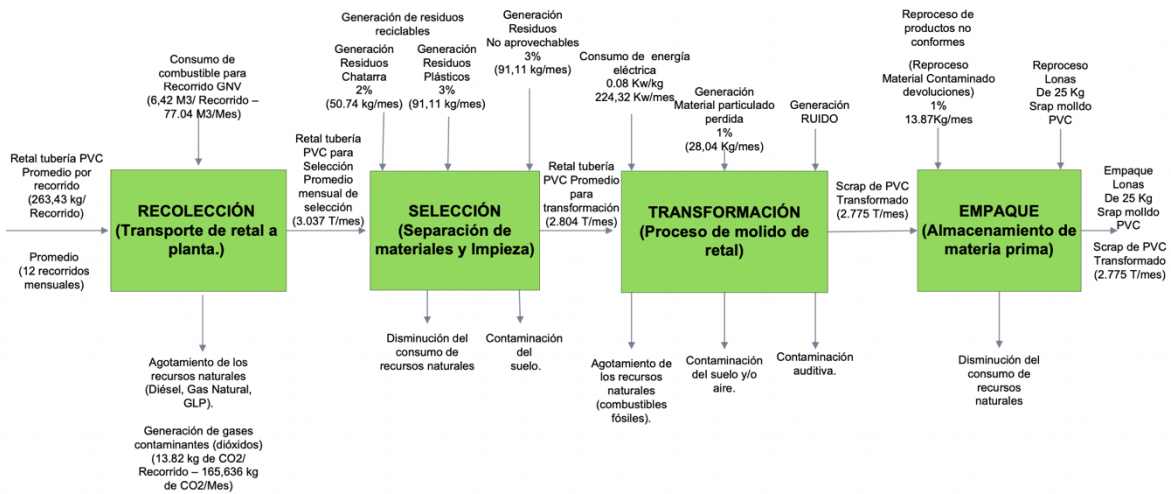
- Todo Ferretería. (2019). Instalación y normatividad del PPR. Obtenido de: <http://todoferreteria.com.mx/instalacion-y-normatividad-del-ppr/>
- Treloar, G. J. (1994). “Energy analysis of the construction of office buildings.” M.Arch. thesis, Deakin Univ., Geelong, Australia.
- Vahidi, E., Jin, E., Das, M., Singh, M., & Zhao, F. (2015). Comparative Life Cycle Analysis of Materials in Wastewater Piping Systems. *Procedia Engineering*, 118(813), 1177–1188. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.08.461>
- Velasco, R. (2019). Clase: Procesos industriales. Tutorial para sesión 2. Universidad de Ítaca, México.
- Viana, F. (2004). Técnicas de construcción fundamentadas en la tecnología sin zanjas. Facultad de Ingeniería. Universidad de San Carlos de Guatemala
- WBCSD, & WRI. (2012). A Corporate Accounting and Reporting Standard. *Greenhouse Gas Protocol*, 116.
- WBCSD, & WRI. (2014). Global Protocol for Community-Scale Greenhouse Gas Emission Inventories: An Accounting and Reporting Standard for Cities. *World Resources Institute*., 1–176. http://ghgprotocol.org/files/ghgp/GHGP_GPC.pdf
- XM. (2021). ¿Quiénes somos? Obtenido de: <https://www.xm.com.co/nuestra-empresa/nosotros/quienes-somos>
- Yepes, V. (2015). Microtunelado e hincas de tuberías. Universidad Politécnica de Valencia. Obtenido de: <https://victoryepes.blogs.upv.es/2015/12/10/microtuneles-e-hinca-de-tuberias/>

11. ANEXOS

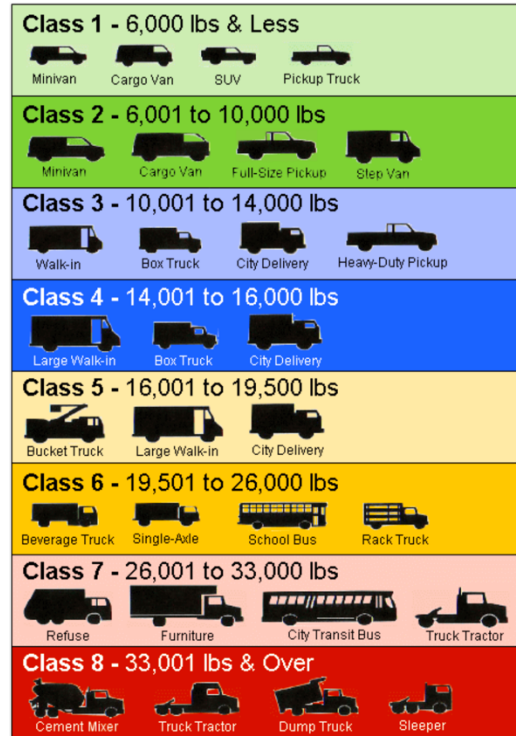


Anexo 1. Interfaz de procesos en SimaPro

PROCESO PRODUCTIVO RECUPERACIÓN DE PVC



Anexo 2. Proceso productivo de recuperación de PVC. Fuente: Empresa del sector



Anexo 3. Clasificación del tipo de vehículo según su carrocería y capacidad de transporte. Fuente: Oak Ridge National Laboratory (2000)

Seleccionar un método y un conjunto de normalización-ponderación

Métodos	Nombre	Versión	Proyecto
European	Cumulative Energy Demand	1.11	Methods
Global	Cumulative Energy Demand (LHV)	1.00	Methods
North American	Cumulative Exergy Demand	1.05	Methods
Otros	Ecosystem Damage Potential	1.00	Methods
Single issue	IPCC 2013 GWP 100a	1.03	Methods
Superseded	IPCC 2013 GWP 100a (incl. CO2 uptake)	1.00	Methods
Water footprint	IPCC 2013 GWP 20a	1.03	Methods
	Selected LCI results	1.04	Methods
	Selected LCI results, additional	1.04	Methods
	USFtox ? (recommended + interim)	1.00	Methods

Normalización/Cor /

IPCC 2013 is the successor of the IPCC 2007 method, which was developed by the Intergovernmental Panel on Climate Change. It contains the climate change factors of IPCC with a timeframe of 100 years, excluding the uptake of CO2.

Contact info: <http://www.ipcc.ch/contact/contact.htm>

Anexo 4. Interfaz de selección de método de configuración de cálculo en SimaPro