

***HERRAMIENTA COSTO-BENEFICIO DE TOMA DE DECISIONES PARA LA SELECCIÓN DE  
TÉCNICAS DE REHABILITACIÓN DE FALLAS ESTRUCTURALES PARA EL  
ALCANTARILLADO DE BOGOTÁ.***

*Ing. Luisa Fernanda Castro Peña*  
*Ing. Paula Andrea Rivera Gutiérrez*

Pontificia Universidad Javeriana  
Facultad de Ingeniería  
Departamento de ingeniería civil  
Bogotá, Colombia  
2021



***HERRAMIENTA COSTO-BENEFICIO DE TOMA DE DECISIONES PARA LA SELECCIÓN DE  
TÉCNICAS DE REHABILITACIÓN DE FALLAS ESTRUCTURALES PARA EL  
ALCANTARILLADO DE BOGOTÁ.***

Trabajo de grado para optar al título de:  
Magister en ingeniería civil

*Ing. Luisa Fernanda Castro Peña*  
*Ing. Paula Andrea Rivera Gutiérrez*

*Directores:*

Ing. Andrés Eduardo Torres Abello (MSc, PhD)

*Codirector:*

Ing. Holmes Julián Páez Martínez (PhD)

Pontificia Universidad Javeriana

Facultad de Ingeniería

Departamento de ingeniería civil

Bogotá, Colombia

2021

## Contenido

1. Introducción .....	4
2. Problemática.....	4
3. Hipótesis.....	5
4. Pregunta de Investigación.....	5
5. Objetivos .....	5
6. Artículo de investigación.....	6

## **1. Introducción**

A continuación, se presentará el trabajo de investigación enfocado en la creación de una herramienta que muestre el costo-beneficio de toma de decisiones, para la selección de técnicas de rehabilitación de fallas estructurales para el alcantarillado de Bogotá. Esta herramienta, va a desarrollar teniendo como base en los trabajos previos de la Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá y sus contratistas, los cuales se presentaron a través de una base de datos de los años 2007 a 2017 y diversos reportes de inspecciones mediante circuito cerrado de televisión en los años 2018 y 2019. Se incluyen también las normas existentes para el manejo de rehabilitación, usando las nuevas tecnologías sin zanja y la forma convencional, es decir, en zanja o cielo abierto. Además, se usaron los costos directos para el desarrollo de estas actividades en la EAAB, el Instituto de desarrollo Urbano y los contratistas de estas entidades, con el fin de poder trabajar sobre los mismos, evaluarlos y llegar al objetivo planteado.

De igual forma se realizó una investigación sobre las fallas estructurales que se presentan en los alcantarillados y las técnicas aplicables para su correspondiente rehabilitación, incluyendo de esta manera los costos con las que estas trabajan, y así poder hallar la relación beneficio-costos, que existe en todas las posibilidades de atención al daño presentado.

## **2. Problemática**

Las primeras redes de alcantarillado se crearon básicamente para la evacuación de las aguas lluvias de tal manera que estas no se estancasen y no generara inundaciones en las poblaciones. De acuerdo con el crecimiento de la población se evidenció la necesidad de deshacerse también de las aguas residuales, domésticas y/o industriales. Con el paso del tiempo, la implementación de sistemas de alcantarillado se volvió completamente necesario, ya que las aguas residuales generaban diversos problemas que afectaban a la población. En el caso de Bogotá, el sistema de alcantarillado se empezó a implementar debido a la urgencia de construir una nueva infraestructura como un requerimiento aplicado a la transformación y ampliación para dar a sus habitantes buenas condiciones de vida.

El crecimiento poblacional de la ciudad de Bogotá fue aumentando la demanda de diversos factores tales como vivienda, automóviles, vías, entre otros, y en muchas ocasiones tanto las edificaciones, como las cargas de los transportes sobre las vías y la misma vegetación afectaban los sistemas de alcantarillado generando colapsos, infiltraciones y rupturas en los tubos, por las cuales se conducían las aguas a los canales. Así mismo, es importante tener en cuenta que, con el paso del tiempo, es común que los sistemas de alcantarillado entren en su proceso de deterioro y por ende la tubería ya haya cumplido su vida útil, lo que hace necesaria una permanente rehabilitación de los sistemas de alcantarillado, de no tenerse en cuenta este aspecto, se pueden presentar problemas mayores con graves consecuencias.

Estas consecuencias pueden ser colapsos, daños, incluyendo el hundimiento de carreteras, destrucción de viviendas, inundaciones, entre otros. De esta manera, la mejor forma de hacer prevención para evitar los problemas graves es realizar inspecciones frecuentes y conocer si el tramo se encuentra dentro de los rangos de atención inmediata, y de esta manera se proceder a realizar las actividades correspondientes; una vez rehabilitados los tramos necesarios, estos sistemas tendrán menos probabilidad de presentar daños a futuro, cumpliendo el rango de vida útil.

Por lo anteriormente descrito, se realizará el desarrollo de una herramienta que pueda ayudar a la entidad responsable de este tipo de situaciones a poder llevar el control eficaz de la rehabilitación y el

trabajo que está realizando el contratista seleccionado y/o encargado de la obra, así mismo, se puede atraer y retener el talento en la empresa, reconociendo cuales de las empresas y/o contratistas presenten las mejores calidades de productos, trabajo y los precios acordes a la rehabilitación a realizar.

### **3. Hipótesis**

La relación costo-beneficio como indicador para las técnicas de rehabilitación de los sistemas de alcantarillado proporciona resultados los cuales fortalecen la elección de la mejor técnica de rehabilitación de alcantarillados bajo diferentes escenarios de falla estructural.

### **4. Pregunta de Investigación**

¿La relación costo-beneficio puede utilizarse como indicador para tomar decisiones en cuanto a técnicas de rehabilitación de fallas estructurales en el alcantarillado de Bogotá?

### **5. Objetivos**

#### **5.1. Objetivo General**

Desarrollar una herramienta que muestre la relación costo - beneficio en la toma de decisiones para la selección de técnicas de rehabilitación por falla estructural para los alcantarillados de Bogotá

#### **5.2. Objetivos Específicos**

- Determinar las técnicas recomendadas de rehabilitación presentes por fallas estructurales para el alcantarillado de Bogotá.
- Determinar la relación costo - beneficio para diferentes escenarios y/o casos de técnicas de rehabilitación de las fallas estructurales para el alcantarillado de Bogotá.
- Elaborar un método de toma de decisiones aplicable a la rehabilitación de diversas fallas estructurales para el alcantarillado de Bogotá

## 6. Artículo de investigación

### HERRAMIENTA COSTO-BENEFICIO DE TOMA DE DECISIONES PARA LA SELECCIÓN DE TÉCNICAS DE REHABILITACIÓN DE FALLAS ESTRUCTURALES PARA EL ALCANTARILLADO DE BOGOTÁ

Luisa Castro<sup>1</sup>, Paula Rivera<sup>2</sup>, Holmes Páez<sup>a</sup>, Andrés Torres<sup>a</sup>

<sup>a</sup>Department of Civil Engineering, School of Engineering, Pontificia Universidad Javeriana Bogotá, Colombia

E-mail Addresses: <sup>1</sup> [castro-luisa@javeriana.edu.co](mailto:castro-luisa@javeriana.edu.co), <sup>2</sup> [riverap@javeriana.edu.co](mailto:riverap@javeriana.edu.co),  
[paez.holmes@javeriana.edu.co](mailto:paez.holmes@javeriana.edu.co), [andres.torres@javeriana.edu.co](mailto:andres.torres@javeriana.edu.co)

<sup>1</sup> & <sup>2</sup> Authors

#### Resumen

El uso de las nuevas técnicas que se implementan para la rehabilitación de alcantarillados busca disminuir las posibles afectaciones que se puedan presentar de manera social, económica y ambiental, además de tener múltiples beneficios. La rehabilitación de un caso específico se puede realizar por medio del uso cualquiera de las técnicas de rehabilitación, pero es la compañía responsable de estas actividades la que busca conocer cuál de ellas sería la más favorable tanto en costos como en beneficio. Dado lo anterior, el presente documento muestra el proceso para el desarrollo de una herramienta beneficio - costo sobre las tecnologías con y sin zanja más comunes en la rehabilitación de las fallas únicamente estructurales que se presentan en el alcantarillado de Bogotá. Para el desarrollo de esta se usó una base de datos con la información primordial sobre las tuberías. reportes resultantes de investigaciones de circuito cerrado de televisión (CCTV), el costo de aplicación de las tecnologías de esta manera se halló las variables más representativas que contribuyen directamente sobre el valor de aplicación tales como: el diámetro, material de la tubería y profundidad. Con esta información se crearon escenarios de falla y de esta manera, se determinó el beneficio que obtiene la empresa prestadora del servicio al realizar trabajos de rehabilitación frente al posible evento de colapso el sistema, teniendo en cuenta los costos de aplicación para las técnicas propuestas y de reparación total en una longitud determinada. Así mismo, se determina la relación B/C y como resultado se obtendrá un ranking del beneficio – costo como indicador de todas las técnicas de rehabilitación, organizadas de tal manera en que, a mayor relación mejor será el beneficio obtenido. Adicionalmente, la herramienta proporciona el costo aproximado de la aplicación de las técnicas seleccionadas junto con el ranking propuesto. Los resultados encontrados demuestran la variación del ranking de las tecnologías para los diferentes casos evaluados ayudan a la toma de decisiones para la selección de la técnica de rehabilitación. Se destaca que entre las técnicas recomendadas se encuentran principalmente el Sliplining, Close-fit, y con zanja para un caso de análisis específico propuesto en la investigación, sin embargo, bajo el planteamiento de otros supuestos se puede determinar otras recomendaciones de tecnologías de rehabilitación como Spiral Wound Lining y CIPP.

## **Palabras Clave**

Inspección de alcantarillado, aguas residuales, tecnologías de rehabilitación, gestión de datos de alcantarillado, costo-beneficio, técnicas de rehabilitación, rehabilitación de alcantarillado, sistema de alcantarillado, estimación de costos.

## **Abstract**

The use of new techniques that are implemented for the rehabilitation of sewers seeks to reduce the possible affectations that may occur in a social, economic, and environmental way, in addition to having multiple benefits. The rehabilitation of a specific case can be carried out using any of the rehabilitation techniques, but it is the company responsible for these activities that seeks to know which of them would be the most favourable in terms of costs and benefits. Given the above, this document shows the process for the development of a cost-benefit tool on the most common trenchless and trenchless technologies for the rehabilitation of the only structural failures that occur in the sewer system of Bogota. For the development of this tool, a database was used with primary information about the pipes, reports resulting from closed-circuit television (CCTV) investigations, the cost of application of the technologies, and the most representative variables that directly contribute to the application value, such as: diameter, pipe material and depth. With this information, failure scenarios were created, and, in this way, the benefit obtained by the company providing the service when carrying out rehabilitation works versus letting the system collapse was determined, considering the application costs for the proposed techniques and the total repair in each length. Likewise, the B/C ratio is determined and as a result a ranking of the benefit - cost will be obtained as an indicator of all the rehabilitation techniques, organized in such a way that the higher the ratio, the better the benefit obtained. Additionally, the tool provides the approximate cost of the application of the selected techniques together with the proposed ranking. The results obtained show that the variation in the ranking of the technologies for the different cases evaluated helps in the decision-making process for the selection of the rehabilitation technique. It is highlighted that among the recommended techniques are mainly Sliplining, Close-fit, and with trench for a specific analysis case proposed in the research, however, under the approach of other assumptions other recommendations of rehabilitation technologies such as Spiral Wound and CIPP can be determined.

### **1. Introducción**

Con el paso del tiempo, los sistemas de alcantarillado entran en un proceso de deterioro, y, en consecuencia, se presentan diversos problemas que afectan tanto a la población como al sistema. En efecto, estos deben cumplir con el desafío de ser funcionales de acuerdo con las necesidades de drenaje y del entorno cambiante de las ciudades. Es necesario entonces realizar actividades de mantenimiento y rehabilitación, incurriendo en inversiones importantes para las empresas prestadores del servicio. Por consiguiente, la gestión de activos de alcantarillado ha cobrado importancia en los últimos años (Tscheikner-Gratl, 2019). En Estados Unidos, por ejemplo, a los sistemas de alcantarillado se les asignó como “severamente deteriorados” y se estima que requieren aproximadamente \$500 mil millones de dólares de inversión para llegar a una condición aceptable en los próximos 20 años. Sin embargo, el gobierno otorgó la suma de \$41 mil millones de dólares para la rehabilitación y mantenimiento de los sistemas en las ciudades, lo que implica que se hace necesario optimizar

financieramente estos recursos (Tariq Shehab, 2013) (Delgado, 2020).

La toma de decisiones para la gestión de activos de alcantarillado es intrínsecamente complicada, porque está integrada en un sistema sociotécnico complejo (Van Riel, 2014). Debido a esta complejidad, en muchos casos, las empresas prestadoras de servicios se ven obligadas a tomar decisiones intuitivas, que se ajusten a la situación actual, disminuyendo la transparencia del proceso de decisión (Van Riel et al., 2014). A partir de las etapas para la gestión de activos de infraestructura presentadas por (Hernandez Rodríguez y Torres, 2020), se observa que la identificación y comparación de escenarios de rehabilitación considerando las consecuencias financieras y las recomendaciones de técnicas y tecnologías de rehabilitación podrían estar soportadas por métodos beneficio-costos para el análisis de decisiones (Diogo, 2018). Sin embargo, la literatura que describe la gestión de activos de alcantarillado desde una perspectiva de toma de decisiones organizacionales, mediante un enfoque racional y objetivo, como la presentada por Oomens (1992), es limitada (Van Riel, 2014) Por consiguiente, hoy en día se reconoce que faltan por desarrollar métodos de valoración de costos y beneficios (tanto directos como indirectos) considerando la organización encargada de la prestación del servicio (Tscheikner-Gratl, 2019).

Con base en lo anterior, este trabajo propone desarrollar una herramienta que permita la evaluación de diferentes escenarios en función del diámetro, la profundidad y el material de la tubería, considerando las técnicas de rehabilitación para fallas estructurales más utilizadas en la práctica en Bogotá (con zanja, CIPP, Sliplining, Close-fit pipe y Spiral Wound). Esta herramienta se basa en un análisis Beneficio-Costo (B/C) para soportar la selección de la técnica de rehabilitación más favorable desde una perspectiva organizacional y que apoye la toma de decisiones por parte de las empresas de servicios públicos.

## 2. Materiales y métodos

### 2.1. Sistema de drenaje y sistema alcantarillado de Bogotá

La ciudad de Bogotá tiene una superficie de 1775 km<sup>2</sup> y aproximadamente 8 millones de habitantes. Está ubicada en el centro de Colombia en la cordillera oriental, dentro de la zona de confluencia intertropical, produciendo dos épocas de lluvia; en la primera mitad del año en los meses de marzo, abril y mayo, mientras que para la segunda mitad del año en los meses de septiembre, octubre y noviembre. Dentro del sistema de drenaje de la ciudad, está el río Bogotá, el cual cuenta con tres principales afluentes en su cuenca media: los ríos Juan Amarillo o Salitre, Fucha y Tunjuelo; estos ríos transitan el distrito desde los Cerros Orientales hacia el costado occidental antes de llegar al río Bogotá. El sistema de alcantarillado está conformado actualmente por su parte sanitaria, pluvial y combinada (Tabla 1).

<b>Redes de Alcantarillado Año 2020 (Corte febrero de 2021)</b>		
<b>Municipio</b>	<b>Tipo de Alcantarillado</b>	<b>Longitud (Km)</b>
Bogotá	Combinado Local	1.604,144

<b>Redes de Alcantarillado Año 2020 (Corte febrero de 2021)</b>		
<b>Municipio</b>	<b>Tipo de Alcantarillado</b>	<b>Longitud (Km)</b>
Soacha	Sanitario Local	4.501,891
	Pluvial Local	2.503,269
	Combinado	3,171
	Sanitario	169,118
	Pluvial	77,319
	<b>Total General</b>	<b>9.792,8247</b>

*Tabla 1. Sistema de alcantarillado Bogotá y Soacha - Fuente: EAAB 2020*

## 2.2. Norma Técnica NS-058

La norma NS-058 hace referencia a los aspectos técnicos para la investigación y calificación de redes de alcantarillado por medio de la inspección con equipos CCTV. La investigación de circuito cerrado de televisión (CCTV), hace referencia a video inspecciones realizadas utilizando equipos especiales, controlados y dirigidos de manera remota. La norma NS-061 define falla estructural como el estado límite de servicio por encima del cual las deformaciones existentes o la capacidad de estructuras del sistema han sido superadas. Esto puede ser generado por problemas en el diseño, en la construcción o en los materiales y puede desencadenarse debido a un evento puntual (EAAB, NS-058, 2020). Dentro de esta norma se especifican cada una de las condiciones para la realización de la inspección en campo y las especificaciones necesarias para la presentación de los reportes de inspección.

## 2.3. Reportes de Videos CCTV y Base de Datos

Para el estudio, se cuenta con la siguiente información suministrada por la Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá (EAAB): (i) ochenta reportes de inspecciones CCTV realizados en la ciudad de Bogotá en el año 2018; (ii) una base de datos de inspecciones realizadas entre los años 2007 y 2017. Los reportes CCTV contienen la siguiente información: tipo de sistema, identificación de las tuberías y los pozos, longitud, diámetro, dirección de flujo, longitud inspeccionada, cada una de las fallas y/o problemas encontrados, resumen del estado operacional y estructural de la tubería, grado en que se encuentra la tubería de acuerdo con la *Tabla 2*. La base de datos 2007-2017 cuenta con información correspondiente a diámetros, profundidad, material y edad de servicio de la tubería, además de las fallas de tipo estructural y operacional y el puntaje de grado estructural para las tuberías inspeccionadas

Esta información sirvió para: (i) el cálculo de las frecuencias de las diferentes fallas estructurales observadas en el sistema de alcantarillado de la ciudad de Bogotá según los códigos mostrados en *Tabla 3*; (ii) la caracterización de los tramos con grados estructurales 4 o 5 (ver *Tabla 2*) en cuanto a su tiempo de vida útil; (iii) la caracterización del sistema de alcantarillado de la ciudad en cuanto a los diámetros, las profundidades y los materiales de tubería.

<b>Grado Estructural</b>	<b>Recomendación</b>
5	Atención Inmediata
4	

<i>Grado Estructural</i>	<i>Recomendación</i>
3	Atención Programable a Corto Plazo
2	Atención Programable a Largo Plazo
1	

Tabla 2. Grado estructural - Fuente: EAAB NS-058

<i>Defecto</i>	<i>Descripción</i>
Deformación - Deflexión	Variación en la dimensión vertical u horizontal del tubo. La sección transversal de la tubería se ha deformado.
Fisura/Grieta/Fractura	Fisura: Separación superficial menor o igual al 50%. Grieta: Separación superficial entre el 50% y 100% Fractura: Rotura del 100%
Rotura - Colapso	Hueco, Abertura o partes ausentes.
Material introducido en la tubería	Todo o parte del material usado para sellar una junta entre dos tubos está en la tubería. Basuras en la tubería.
Junta desplazada	Las tuberías adyacentes se desplazan de su posición prevista. Los desplazamientos longitudinales de menos de 10 mm no se registran.
Daños Superficiales	La superficie de la tubería se ha dañado por acción química o mecánica

Tabla 3. Códigos y descripción fallas estructurales. Fuente: (Vega, 2008)

#### 2.4. Técnicas de Rehabilitación Estructural

La rehabilitación de redes de alcantarillado está definida como la recuperación de los sistemas que presentan fallas hidráulicas, estructurales y/o colmatación que impidan el flujo normal de las aguas, para conservar las condiciones originales (EAAB, NS - 166, 2020). Es así como la rehabilitación de las redes está ligada a la implementación de acciones correctivas que restablezcan el estado de la tubería para cumplir adecuadamente su función original, sin representar el cambio del elemento (Delgado, 2020). La investigación contempla la rehabilitación por daños estructurales presentados, por lo cual se utilizaron aquellas técnicas que responden a las fallas planteadas en la Tabla 3. Dentro de ellas se contempló la excavación en zanja y técnicas de rehabilitación sin zanja presentadas en la Tabla 4. La excavación en zanja (método convencional) se utiliza para las redes que presentan diversos problemas y cuando no sea posible rehabilitar con alguna de las tecnologías sin zanja por la complejidad con la que se encuentra. Se considera la rehabilitación de la totalidad del tramo cuando el costo de rehabilitación es al menos un 80% de la renovación total del tramo. La Tabla 4 presenta la descripción y algunas características clave de las técnicas de rehabilitación sin zanja.

<i>Técnica</i>	<i>Descripción</i>	<i>Diámetro</i>	<i>Vida Útil</i>
CIPP - Tubería Curada en sitio	Conocida como tubería curada en sitio, hace referencia al material compuesto	4" - 108"	> 50 años

<i>Técnica</i>	<i>Descripción</i>	<i>Diámetro</i>	<i>Vida Útil</i>
	por una manga tejida o no tejida, la cual está impregnada por una resina termo endurecible. Puede incluir películas de protección interna o externa para su fabricación, manipulación e instalación		
Sliplining (SL) - Revestimiento deslizante	Conocido como revestimiento deslizante, este procedimiento de rehabilitación se utiliza usando una tubería de menor diámetro dentro de la ya existente. El procedimiento es por medio de halado y/o empuje de la misma, se puede presentar por secciones o de forma continua por medio de una lingada preensamblada sobre la rasante	12” – 102”	50 años
Spiral Wound Lining - Revestimiento deslizante modificado	Es una tecnología de rehabilitación sin zanja, que provee una solución a nivel estructural, enfocándose en reestablecer las propiedades de la tubería afectada por medio de la instalación de una tira de material termoplástico en forma de espiral dentro de la tubería	4” – 100”	50 años
Close Fit – Tubería Ajustada	En muchas ocasiones se busca que la tubería que se va a insertar tenga un ajuste perfecto, por lo cual se deforma parcialmente el nuevo material antes de colocarlo. Una vez insertado, este recupera su forma inicial. Entre las formas con las cuales se trabaja son en U, C y/o H. En la gran mayoría de casos se usa el calor o presión para restaurar la circulación del flujo (Najafi, 2010)	4” – 63”	> 50 años

*Tabla 4. Tecnologías sin zanja - Fuente: (Najafi, 2010) (Calderón, 2020 )*

### *2.5. Teoría del Beneficio-Costo*

En la evaluación de los costos, se propone utilizar únicamente los costos directos de aplicación que incluyen la mano de obra, materiales y equipos directamente involucrados en la actividad. La excavación, relleno, compactación, suministro de material y los costos de los equipos de construcción son factores importantes para la estimación de los costos directos (Najafi, 2010). El costo unitario de rehabilitación no representa el costo total del proyecto. Es importante que las empresas que prestan el servicio tomen una decisión correcta sobre el método a elegir, con el fin de minimizar problemas en cuanto a costos que puedan ocurrir durante la aplicación de las técnicas de rehabilitación (Wu, 2020).

El beneficio está dirigido únicamente a las empresas prestadoras del servicio de rehabilitación de alcantarillado en vista de que la gestión de activos de infraestructura sirve principalmente como medio

para priorizar las inversiones de estas y el uso eficiente de los recursos disponibles (Delgado, 2020). La investigación determina el beneficio de aplicar una técnica de rehabilitación de manera preventiva a un tramo de tubería en comparación a esperar que este colapse. El beneficio se presenta en la Ecuación 1.

*Ecuación 1. Beneficio aplicación técnica de rehabilitación. Fuente: Elaboración Propia*

$$B = CRL_P N_r - CTL_R N_t$$

Donde:

B beneficio obtenido

CR costo total de reparación donde no se rehabilite el tramo

L<sub>P</sub> Longitud pozo a pozo

N<sub>r</sub> número de veces necesarias para reparar totalmente de acuerdo con la vida útil

CT costo de aplicación de la técnica de rehabilitación

L<sub>R</sub> Longitud a rehabilitar

N<sub>t</sub> número de veces necesarias para rehabilitar el tramo de acuerdo con de la vida útil de las técnicas

El análisis B/C sirve como herramienta para la toma de decisiones que se utiliza para desarrollar de manera sistemática información útil acerca de los efectos deseables e indeseables de los proyectos públicos (Park, 2009). El indicador B/C se calculó previa identificación de los costos y beneficios más relevantes, de manera independiente. Este análisis de B/C es un proceso que consiste en la comparación de los costos en valor presente de inversión de un proyecto con sus potenciales beneficios. Para este caso se presenta en la rehabilitación de alcantarillados en la ciudad de Bogotá, con su respectiva cuantificación en términos monetarios con el fin de comparar los diferentes beneficios obtenidos con sus respectivos costos (Park, 2009). Con el indicador B/C como el resultado de un método financiero se puede comprobar que al ser implementado llega a presentar un análisis de las variables para el proceso de toma de decisiones, y de esta manera contribuir e ir a la par con el avance tecnológico en la aplicación de las tecnologías sin zanja en la rehabilitación de alcantarillados y poder reconocer los beneficios en los costos y en las múltiples ventajas que estas generan así como la posible reducción de reparaciones a futuras por el ciclo de vida con la que estos cuentan, lo anterior es apoyado en las investigaciones realizadas por (Najafi, 2010).

### 3. Metodología

Para esta investigación, la metodología se propone en dos partes: En la primera parte se describe cómo se obtuvieron los costos por metro lineal de las técnicas de rehabilitación con su respectivo análisis y a partir de estas observaciones cómo se plantea la elaboración de los escenarios aplicables a las técnicas de rehabilitación. La segunda parte se enfoca en el cálculo del beneficio, la relación B/C y la elaboración de la herramienta para la toma de decisiones.

La primera parte se inicia con la caracterización del sistema de alcantarillado de la ciudad con la información de los reportes CCTV y la base de datos. Con ayuda del Software R se determinaron las siguientes variables más comunes del sistema y con mayor frecuencia tanto en la base de datos y los reportes CCTV<sup>1</sup>: (i) diámetros entre 8” y 40”, (ii) profundidades entre 0 a más de 3.5 m (iii) materiales de tubería como concreto y PVC. De acuerdo con lo mencionado anteriormente se determinaron los

---

<sup>1</sup> Para el caso del material de tubería se trabajó solo con concreto y PVC ya que dentro de la base de datos y los reportes CCTV, eran los materiales con mayor representación. Otros materiales no figuraban en la recopilación y análisis de datos.

costos de aplicación por metro lineal de las técnicas de rehabilitación estructural (ver Tabla 4) para (i), (ii), (iii). Los costos se obtuvieron por diferentes fuentes de referencia tales como el “Sistema Integrado de Licitaciones, Contratación y Compras (SIL)” de la Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá (EAAB), la “Base de Precios Unitarios” del Instituto de desarrollo Urbano (IDU) y la tesis de maestría de la universidad de los Andes de Bogotá “Factibilidad Económica de la Renovación de sistemas de alcantarillado”.

Se debe tener en cuenta que algunos de los costos fueron hallados de investigaciones pasadas, por lo que se utilizó el método de valor presente; para traer esos valores a tiempo actual de acuerdo con el indicador de precios al consumidor (IPC) del DANE. Los costos de aplicación de cada técnica de rehabilitación se graficaron para cada uno de los diámetros (i), profundidades (ii) y materiales (iii), como se muestra a continuación:

Los costos para la Figura 1 se obtuvieron del documento “Factibilidad Económica de la Renovación de sistemas de alcantarillado”.

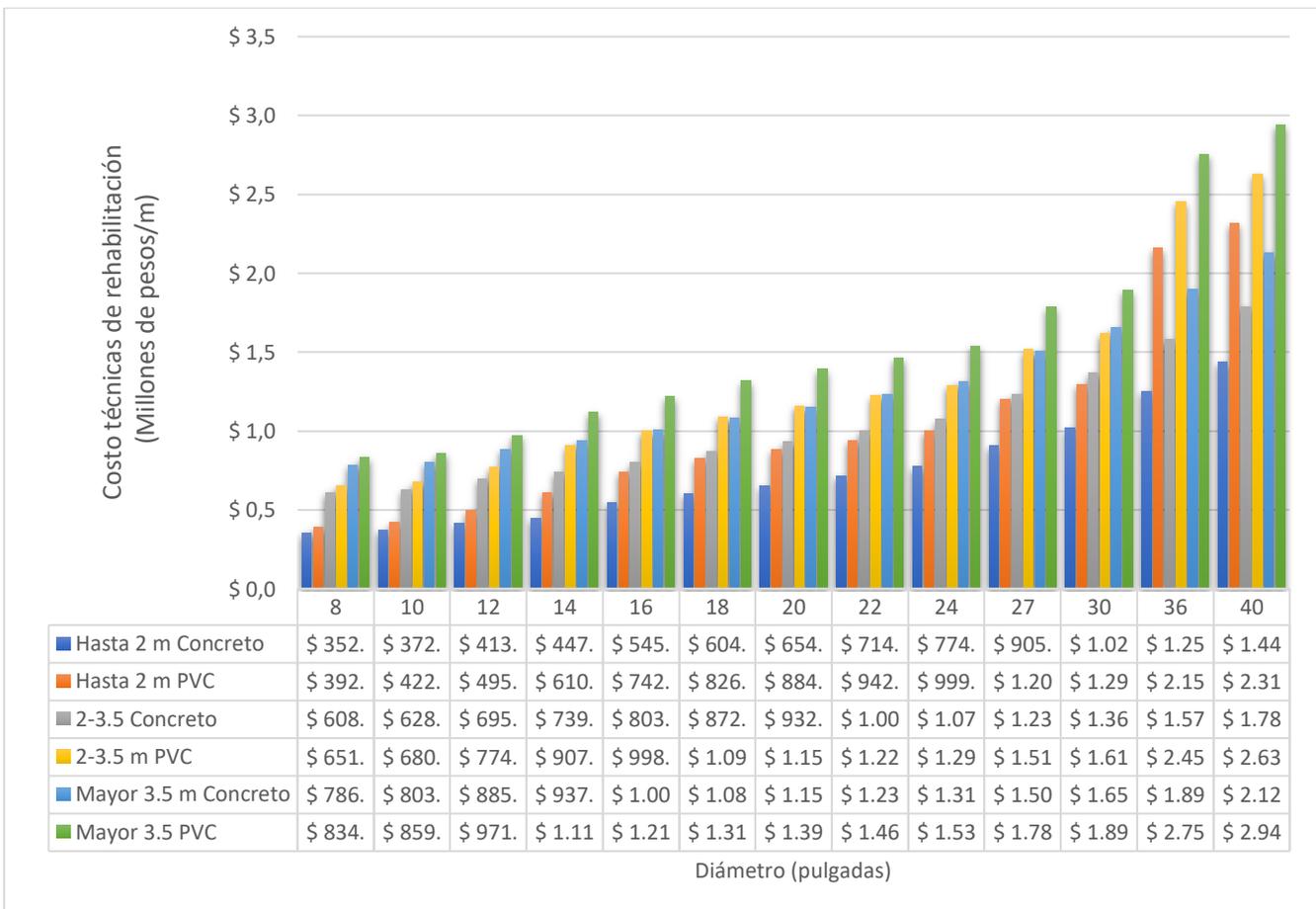


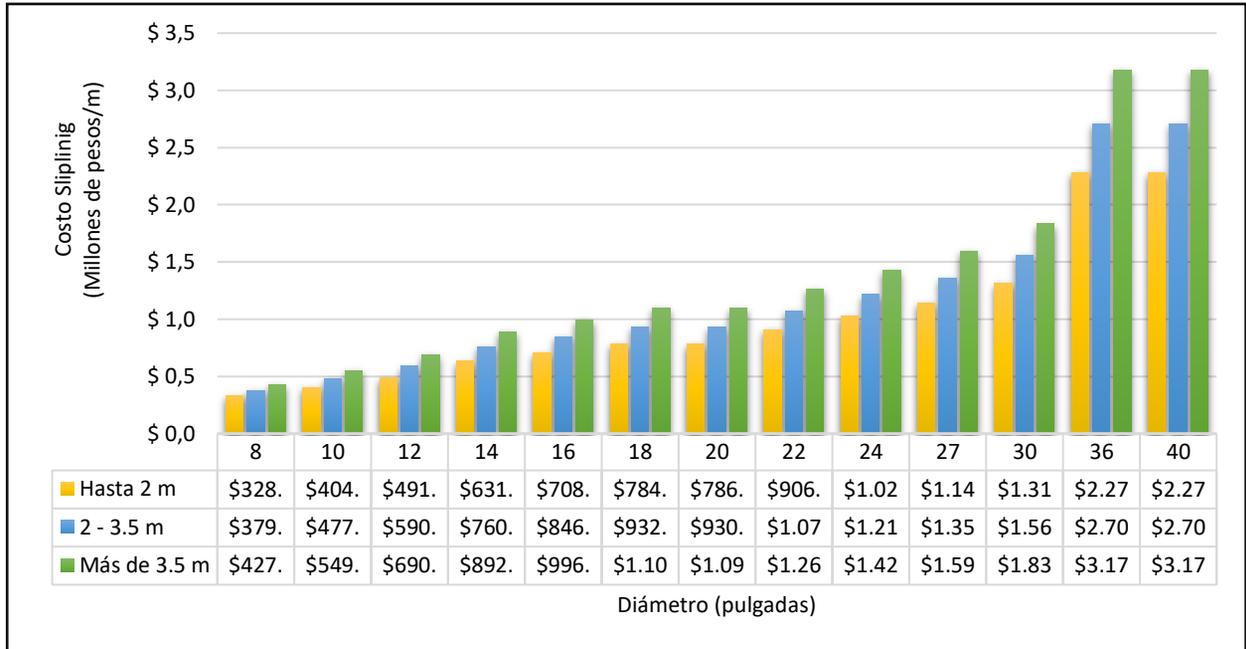
Figura 1. Costo por metro lineal zanja abierta vs diámetro Fuente: Elaboración propia modificado de fuentes de información

El costo para la técnica de zanja abierta aumenta de acuerdo con el incremento de los diámetros y las profundidades. Sin embargo, se observa en la Figura 1 que el costo para los diámetros de 8”, 10” y 12” para una tubería en concreto con profundidad entre hasta 2 m no tienen una diferencia importante entre sí, sin superar los \$100.000 COP, con un valor promedio de \$380.000 COP aproximadamente. Para una tubería de PVC con los mismos diámetros (8”, 10” y 12”) y con la misma profundidad, se observa que los costos tampoco tienen una diferencia significativa, con un valor promedio de \$645.000

COP. Para los diámetros de 14" y 16" se guarda una similitud en sus valores con un rango de variación entre \$100.000 COP y \$150.000 COP de acuerdo con las profundidades y el material de la tubería. Entre los diámetros de 18", 20", 22" y 24" la diferencia máxima entre el costo de aplicación de la técnica es de 170.000 COP para una profundidad de 0 a 2 m para los dos materiales. Para estos mismos diámetros (18", 20", 22" y 24") y con profundidades de 2 - 3.5 m y mayor a 3.5 m, su valor tiende a no tener una variación en el costo importante, obteniendo diferencias muy bajas de alrededor de \$30.000 COP. Se puede observar que los diámetros de las tuberías de 27", 30" y 36" no hay una diferencia en el costo en especial para las tuberías en concreto. Para las tuberías de 30" y 36" en PVC se logra identificar variaciones en el costo cercanas a \$1.000.000 COP. Se hace evidente, como los costos de la tubería en concreto para profundidades de más de 3.5 metros son muy similares con la tubería en PVC para profundidades de entre los 2 y 3.5 metros, exceptuando los diámetros de 36 y 40 pulgadas. La aplicación más costosa es la instalación en material PVC con mayores profundidades.

La Figura 2 muestra los costos de las técnicas: (a) Sliplining y (b) Close-fit. Los costos se obtuvieron de acuerdo con el trabajo preliminares "*Factibilidad Económica de la Renovación de sistemas de alcantarillado*". Se puede observar en (a) que los costos de aplicación de la técnica de rehabilitación incrementan a medida que el diámetro y la profundidad también aumentan. El rango de diferencia de los costos para los diámetros de 8", 10" y 12" es aproximadamente de 150.000 COP, para las tres profundidades propuestas. Así mismo para los diámetros de 14" y 16" para las tres profundidades la diferencia en el costo de aplicación no supera los 150.000 COP. Los costos de aplicación entre los diámetros de 18" a 26" tienen una variación no muy representativa, como, por ejemplo: los diámetros de 18" y 20" tienen casi el mismo costo para las profundidades. Finalmente, a partir de del diámetro de 27" en adelante se observan diferencias en el costo que superan 1.000.000.000 COP para el caso de la comparación entre 30" y 36" para una profundidad mayor a 3.5 m.

Para (b) las variables que influyen de manera directa en el costo de aplicación es igual que para (a) (diámetro de la tubería y la profundidad). Al observar los diámetros más pequeños de 8", 10" y 12" se observa que para la profundidad de hasta 2 m no hay una variación importante en el costo. Sin embargo, para las otras profundidades hay una variación representativa de \$200.000 COP. Los diámetros de 14", 16" y 18" guardan relación entre sí y su costo de aplicación al no superar una diferencia de \$150.000 COP. Para los diámetros entre 20" y 27" el rango de variación entre los costos no supera los \$200.000 COP aproximadamente de acuerdo con las profundidades establecidas. Al igual que en (a) a partir de los diámetros mayores a 27" el costo aumenta con diferencias significativas entre sí. Para este caso la máxima diferencia de aproximadamente \$300.000 COP entre los diámetros de 36" y 40" para una profundidad mayor a 3.5 m.



(a) Costo Sliplining por metro lineal vs diámetro – Fuente: Elaboración propia modificado de fuentes de información



(b) Costo Close Fit por metro lineal vs diámetro – Fuente: Elaboración propia modificado de fuentes de información

Figura 2. Costos por metro lineal para Sliplining (a) y Close Fit (b)

En la a Figura 3, se observa que el costo de aplicación de las técnicas se encuentra relacionada con el diámetro, es decir, al aumentar el diámetro de la tubería a rehabilitar, el costo de implementación de las técnicas CIPP y Spiral Wound también aumentará. Los costos se obtuvieron del análisis de precios unitarios del IDU y del sistema de contrataciones de la empresa de acueducto y alcantarillado de Bogotá.

Se destaca que entre los diámetros de 8", 10", 12" el costo de aplicación no varía drásticamente por lo que se mantienen en un mismo rango. También es claro que para los diámetros de 14" y 16" la diferencia en promedio entre el costo no supera los \$100.00 COP, tanto para el Spiral Wound Lining y el CIPP. Los diámetros de 18", 20", 24", 27" y 30" para el CIPP presentan variaciones en su costo de aplicación con un incremento moderado aproximado de \$300.000 COP entre sus diámetros. Se observa una variación en el costo de aplicación importante del CIPP entre los diámetros de 36" y 40" con una diferencia de \$1.000.000 COP. Por parte del Spiral Wound las diferencias de costos significativas, presentándose a partir de las tuberías de 16" hasta de 40".

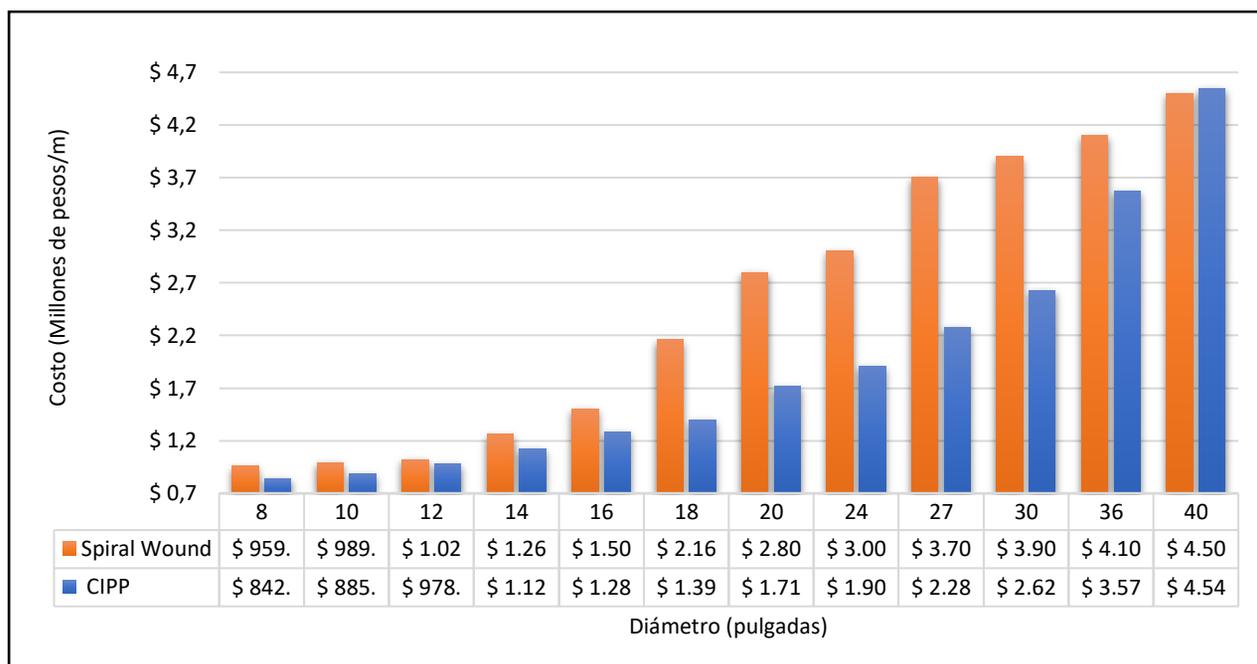


Figura 3. Costo CIPP & Spiral Wound VS Diámetro. Fuente: Elaboración propia modificado de fuentes de información

La Figura 4, muestra el comparativo general del promedio de los costos para cada diámetro por técnica de rehabilitación a partir de las Figura 1, Figura 2 y Figura 3. Se observa que los costos de las técnicas para diámetros de 8", 10" y 12" se encuentran en un mismo rango. Por ejemplo, el costo para 8", 10" y 12" en el Sliplining y el Close Fit tienden a estar en un intervalo de valor de \$400.000 COP y \$500.000 COP. Para las técnicas con zanja, CIPP y Spiral Wound el costo entre los diámetros de 8", 10" y 12" son muy cercanos entre ellos. Para los diámetros de 14" y 16" en cada técnica de rehabilitación se observa que el costo de aplicación también tiene valores cercanos entre sí. La técnica Close Fit muestra que el costo entre los diámetros no presenta una diferencia importante: para 14" es de \$817.000 COP y para 16" es de \$907.000 COP. Para el Sliplining, técnica con zanja, CIPP y Spiral Wound se repite la anterior situación entre los diámetros de 14" y 16" con una diferencia media entre diámetros de \$130.000. Los diámetros entre 18" y 24" también muestran unos costos de aplicación con valores muy similares entre ellos, con una diferencia promedio de \$140.000 COP aproximadamente. Para los diámetros de 27", 30", 36" y 40" se observa que el costo entre ellos presenta una diferencia importante en especial para la el CIPP y el Spiral Wound Lining. Por lo tanto, se observa que estos diámetros no se pueden unificar entre ellas en cuanto al costo de aplicación para algunas tecnologías.



Figura 4. Costos promedio por diámetro de las técnicas de rehabilitación. Fuente: elaboración propia modificado de fuentes de información

A partir de la estimación de los costos de aplicación por metro lineal de las técnicas; se propone plantear diferentes escenarios para las técnicas de rehabilitación de fallas estructurales. Los escenarios son el resultado de: (i) agrupar en intervalos los diámetros cuyos costos no varían de manera significativa entre sí, (ii) combinar los intervalos de los diámetros con las profundidades y materiales de la tubería propuestas. Uno de los objetivos de la elaboración de los escenarios es reducir o simplificar el número casos posibles que se puedan presentar por la caracterización del sistema de alcantarillado.

De acuerdo con la Figura 4 se observó que los costos de aplicación de las técnicas de rehabilitación entre algunos de los diámetros no representan una variación significativa. Por lo tanto, los diámetros de 8", 10" y 12" se pueden agrupar en un solo intervalo de 8"-12" con un costo promedio para este rango de \$700.000 COP. Así mismo se unificaron de 14"-16" y los de 18", 20", 22" y 24" a un intervalo de 18"-24", estableciendo el respectivo costo medio aproximado para cada intervalo de \$1.000.000 COP y \$1.500.000 COP aproximadamente. En cambio, los costos de aplicación entre 27", 30", 36" y 40" son muy variables entre ellos con grandes diferencias en el precio. Por esta razón estos diámetros no se juntarán en un solo intervalo, y se trabajarán de manera independiente, cada uno de ellos con su costo de aplicación único ya determinado para estos. La Figura 5 muestra los costos promedios por metro lineal para cada intervalo de diámetros establecidos de acuerdo con cada técnica de rehabilitación:

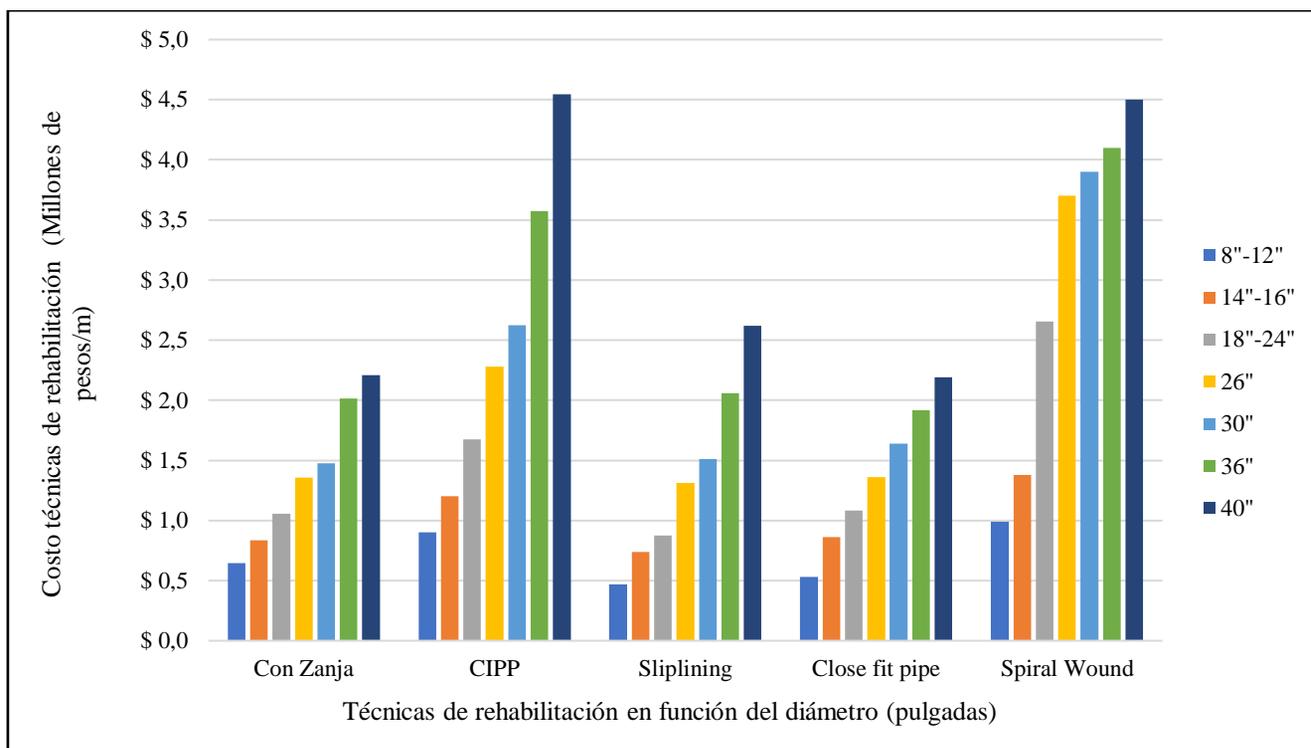


Figura 5. Costo intervalo de diámetros para las técnicas de rehabilitación estructural. Fuente: elaboración propia

De la caracterización del sistema de alcantarillado de Bogotá se establecieron tres intervalos de profundidades: de hasta 2 m, 2 - 3.5 m y más de 3.5m, también se obtuvieron materiales de tubería representativos en concreto y en PVC. Así mismo algunos costos de aplicación obtenidos de las técnicas de rehabilitación están en función de la profundidad y el material. Los intervalos y diámetros únicos propuestos se combinan con los diferentes rangos de profundidad y tipo de material obteniendo diversos escenarios que responden a las diferentes técnicas de rehabilitación. Otro objetivo de los escenarios es ofrecer un abanico de posibilidades que sirvan como eje fundamental para la elaboración en la herramienta de toma de decisiones. En la Tabla 5 se muestra los 42 escenarios que se determinaron a partir de (i) y (ii).

Escenario	Material	Profundidad (m)	Diámetro (pulgadas)
1	Concreto	Hasta 2	8 - 12
2			14 - 16
3			18 - 24
4			27
5			30
6			36
7			40
8		2 - 3.5	8 - 12
9			14 - 16
10			18 - 24
11			27
12			30
13			36
14			40

Escenario	Material	Profundidad (m)	Diámetro (pulgadas)
15		Mayores a 3.5	8 - 12
16			14 - 16
17			18 - 24
18			27
19			30
20			36
21			40
22	PVC	Hasta 2	8 - 12
23			14 - 16
24			18 - 24
25			27
26			30
27			36
28			40
29		2 - 3.5	8 - 12
30			14 - 16
31			18 - 24
32			27
33			30
34			36
35			40
36	Mayores a 3.5	8 - 12	
37		14 - 16	
38		18 - 24	
39		27	
40		30	
41		36	
42	40		

Tabla 5. Escenarios aplicables a las técnicas de rehabilitación

La segunda parte de la metodología de la investigación es el planteamiento y la elaboración de la herramienta B/C de toma de decisiones; la cual está fuertemente ligada con la primera parte en cuanto a la implementación de los escenarios y sus respectivos costos de aplicación para las diferentes técnicas de rehabilitación. El propósito de la herramienta es proporcionar al usuario según sus requerimientos un indicador B/C, que le ayude a tomar una decisión sobre la selección entre las diferentes técnicas de rehabilitación propuestas. La Figura 6 propone un diagrama con las secciones importantes para la articulación de la herramienta: (i) datos de entrada, (ii) determinación de la relación B/C y (iii) datos de salida.

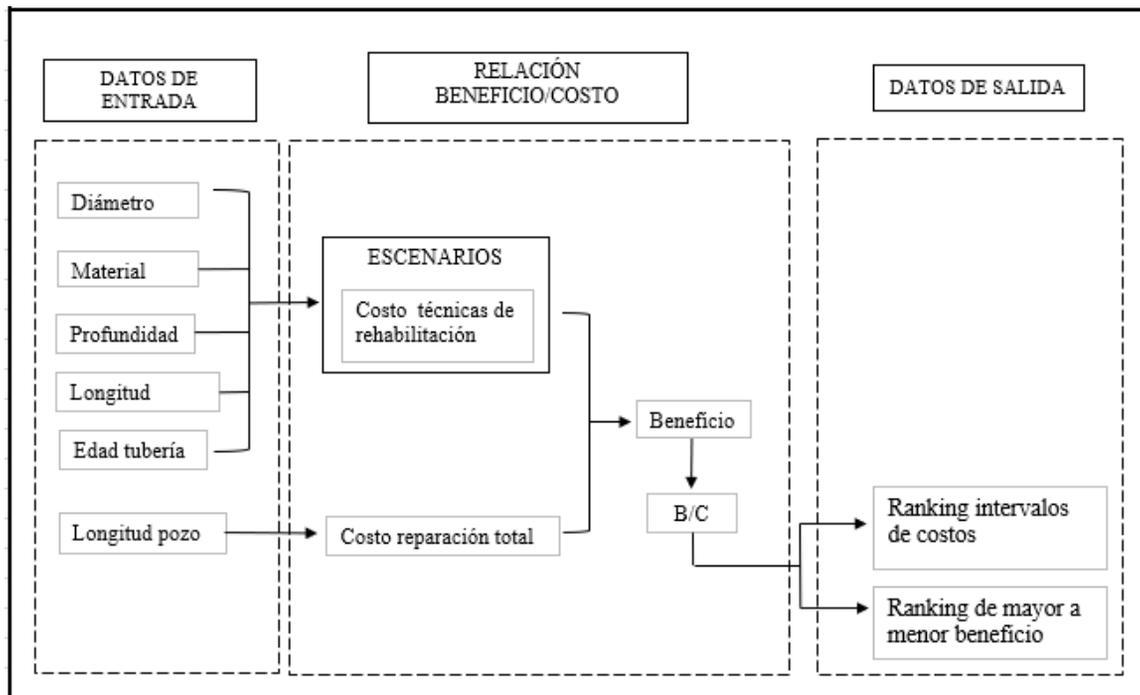


Figura 6. Articulación de la herramienta B/C

La sección de **“DATOS DE ENTRADA”** hace referencia a los datos obligatorios con los que debe contar el usuario, con el objetivo poner en marcha la herramienta. Los datos necesarios son: diámetro de la tubería en pulgadas, material de la tubería, profundidad en metros, longitud a rehabilitar y edad de la tubería. De acuerdo con de los requerimientos por parte del usuario, un selecciona un único escenario dentro del abanico de las 42 propuestas descritas que obedezca a las características solicitadas por el usuario. El diagrama de flujo de la Figura 7 muestra en detalle el funcionamiento de la sección (ii) de la herramienta que corresponde a **“RELACIÓN BENEFICIO/COSTO”**.

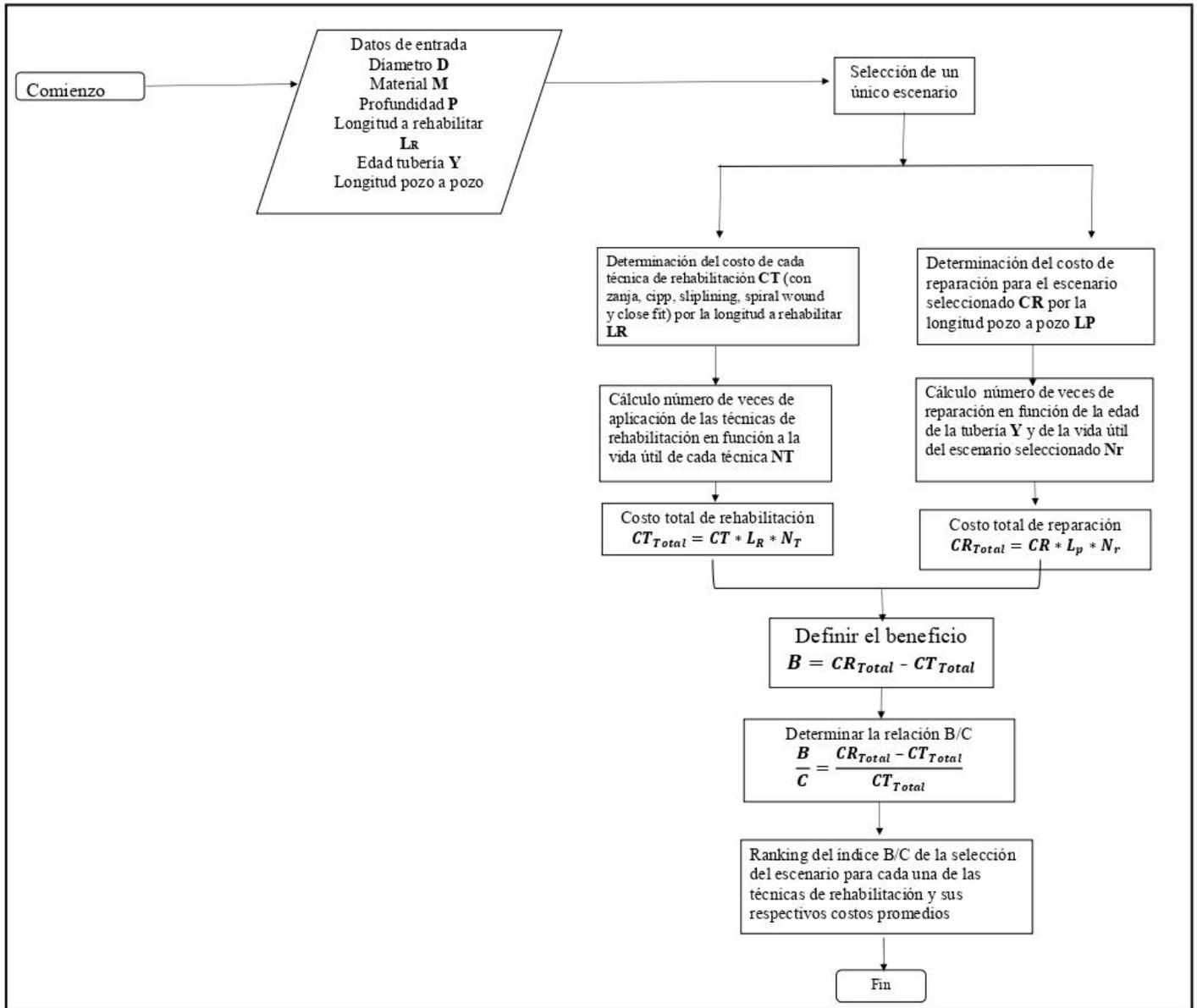


Figura 7. Diagrama de flujo para la relación Costo - Beneficio.

A partir de la selección del escenario, la herramienta determina el costo total de rehabilitación para las diferentes técnicas ( $CT_{Total}$ ). Este costo depende de (i) el costo de aplicación por metro lineal de la técnica (CT), (ii) la longitud a rehabilitar ( $L_R$ ) ingresada por el usuario y (iii) el número de veces necesarias de aplicación de las técnicas de rehabilitación en función a la vida útil de cada técnica (NT); en la Tabla 4 se puede observar que la vida útil de las tecnologías sin zanja en su mayoría es de 50 años. Para una tubería de 8" a la que se le realice trabajos de rehabilitación con diferentes técnicas necesitará máximo de dos aplicaciones; la primera en el momento en el que se rehabilite y la segunda dentro de 50 años, cuando se estima que la vida útil de las técnicas de rehabilitación se cumplió.

En materiales y métodos, el beneficio económico para la empresa prestadora del servicio de rehabilitación es el que se obtiene al aplicar alguna técnica de rehabilitación de manera preventiva, evitando un futuro colapso en un tramo del sistema de alcantarillado. Por lo que el beneficio se calcula

de acuerdo con el  $CT_{Total}$  de las técnicas de rehabilitación y el costo total de reparación  $CR_{Total}$ . Se estableció que para determinar  $CR_{Total}$ : (i) la longitud de reparación ( $L_p$ ) será de 80 metros teniendo en cuenta las recomendaciones de diseño de alcantarillado de una longitud de pozo a pozo (Flores, 2011), (ii) el costo de reparación ( $CR$ ) será el mismo de la técnica de rehabilitación a zanja abierta y (iii) el número de veces necesarias para reparar totalmente ( $N_r$ ) se determina de acuerdo con la vida útil y la edad de la tubería ( $Y$ ). En la primera parte de la metodología se hace la caracterización de los tramos únicamente con grados estructurales 4 o 5. Aparte de obtener los tramos que necesitan atención inmediata también se cuenta con información acerca del tiempo de vida útil y sus respectivos diámetros. De acuerdo con esta información se determina un promedio de años de vida útil para los intervalos de diámetros que ya fueron definidos.

<b>Diámetros [Pulgadas]</b>	<b>Vida Útil [años]</b>
8-12	50
14-16	40
18-24	50
26	70
30	70
36	80
40	76

*Tabla 6. Vida útil en función al diámetro*

Para el mismo caso de una tubería con un diámetro de 8” con una edad ( $Y$ ) de 20 años, se estima que el colapso podría ocurrir en 30 años de acuerdo con la vida útil planteada en Tabla 6. Si no realiza un trabajo preventivo de rehabilitación, la tubería se repararía una vez ( $N_r$ ) dentro de 30 años. De acuerdo con la Ecuación 1 la herramienta para la toma de decisiones calcula el beneficio teniendo en cuenta las diferentes variables que influyen en la determinación del  $CT_{Total}$  y  $CR_{Total}$ . La relación B/C se determina después de obtener el beneficio y el costo de aplicación para cada una de las técnicas de rehabilitación. Es un indicador que muestra la técnica más beneficiosa como aquella que tenga un valor mayor a uno en la relación B/C dentro de las otras técnicas propuestas.

Finalmente, en la sección “**SALIDA DE DATOS**” de la Figura 6 , se le presenta al usuario los resultados a manera de Ranking o clasificación de las técnicas de rehabilitación de mayor a menor indicador B/C. La Figura 8 muestra en el costado izquierdo el ranking con la técnica recomendada de mayor hasta el menor indicador B/C, acompañado adicionalmente por los costos aproximados para cada técnica de rehabilitación. Lo que se busca principalmente es que el usuario maneje e interprete cifras familiares y fáciles de reconocer con el fin de que la toma de decisión para la selección de técnicas de rehabilitación sea un proceso sencillo de acuerdo con los resultados y a su consulta inicial ejecutada en los datos de entrada, como se muestra en Figura 8.

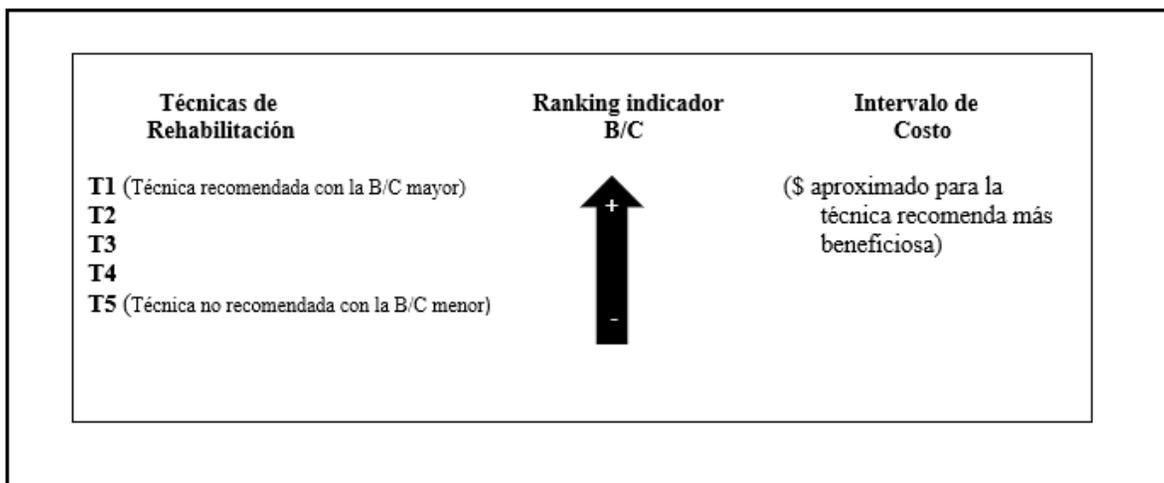


Figura 8. Datos de salida.

#### 4. Resultados y discusión

Para los reportes de CCTV se analizaron 160 fallas reportadas en estado crítico, es decir, con calificación 4 o 5. Con el software R, se encuentra que la falla de fisuras, grietas y fracturas es la más frecuente con un 58% del total de las fallas, seguida de la deformación y rotura o colapso con un 11% y finalmente las juntas desplazadas 10% (ver Figura 9). También se encontró que entre los diámetros típicos están entre 8” y 40” con materiales mayoritariamente entre polietileno (PVC) y concreto.

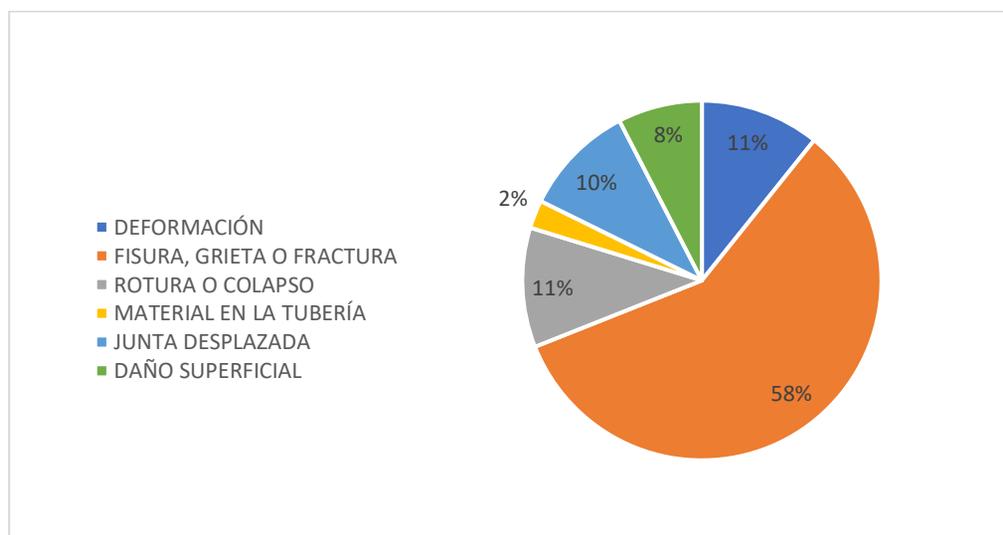


Figura 9. Resultado de fallas de CCTV. Fuente: Elaboración propia

Dentro de la base de datos 2007-2017 evaluada se encuentran 1373 fallas reportadas en estado crítico, teniendo un 47% las fisuras, grietas y fracturas, seguido de las juntas desplazadas con 24% y por último el daño superficial con un 12%, la rotura o colapso, el material en la tubería y el defecto en la mampostería cuentan con un porcentaje bajo (ver Figura 10). Entre los diámetros que contiene la base

de datos se frecuentan entre 8” y 40”, profundidades y materiales característicos de PVC y concreto.

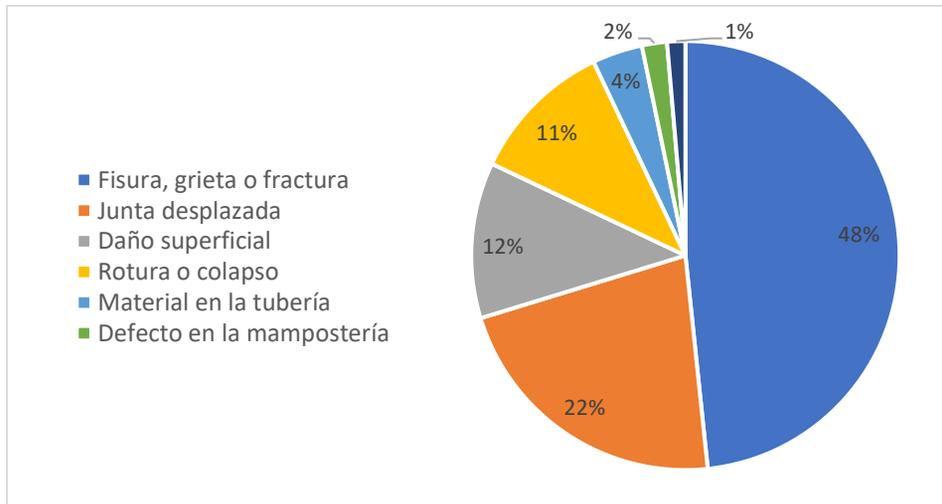


Figura 10. Resultado de fallas base de datos. Fuente: Elaboración propia

Dentro de la evaluación de las técnicas de rehabilitación, la base de datos y los reportes CCTV se estable que en efecto los diámetros más frecuentes son de 8” a 40” en el alcantarillado de Bogotá, se podrían trabajar y validar con las tecnologías planteadas. Así mismo, se ratifica que, para las fallas estructurales observadas en el sistema, las diferentes tecnologías consideradas son capaces de solucionar la acción a corregir, por sus condiciones de trabajo (ver Tabla 4). Con base a lo anterior, se plantea trabajar con diámetros de 8”, 10”, 12”, 14”, 16”, 18”, 20”, 22”, 24”, 26”, 30”, 36” y 40”, profundidades de 0 a más de 3.5 m y tuberías en concreto y PVC al ser los más usuales

Para la evaluación de los costos, se resalta, que a esta investigación contribuyeron dos tesis de maestría realizadas en años anteriores en la Universidad de los Andes, con una de ellas, se hallan algunos costos de tecnologías (Vega, 2008), se complementa la información de las fallas estructurales existentes (García C. F., 2008). Estas investigaciones y durante el desarrollo de la herramienta de esta investigación, nos confirman, que en efecto tanto los diámetros, como las profundidades están destacadas como variables principales para la aplicación de las técnicas de rehabilitación y varían dependiendo el precio (ver Figura 1, Figura 2 y Figura 3).

Por otro lado, un artículo elaborado por el ingeniero (Calderón, 2020 ) el cual fue presentado durante una conferencia magistral a la EAAB nos ayuda en la profundización sobre las tecnologías de rehabilitación y las características que cada una de estas presentan. De igual manera de la EAAB y de aquellos que participaron en las investigaciones para la alimentación de la base de datos junto con la empresa Chafik Ingeniería SAS, la cual suministró los reportes CCTV, se destaca su colaboración y contribución para la investigación que se realiza dentro del desarrollo de la herramienta, ya que sirvieron como apoyo para la evaluación de la frecuencia de las fallas, el material de tubería involucrado, los diámetros y las profundidades y de esta manera poder llegar a realizar la valoración junto con los costos y de esta manera llegar a la creación de cada uno de los escenarios de falla estructural presentes en la Tabla 5.

A partir del análisis de los costos de las técnicas de rehabilitación, y de la identificación las variables relevantes y examinadas las tecnologías con las cuales se hace la rehabilitación estructural, se presentan dos hallazgos importantes para el posterior desarrollo de los escenarios de falla, (i) las tecnologías

CIPP y Spiral Wound solo dependen del diámetro, además de ser las dos técnicas más costosas, mientras que la zanja abierta, Close-fit y Sliplining dependen tanto del diámetro como de la profundidad y sus costos se encuentran en el mismo rango sin marcar diferencias importantes entre los precios. (ii) Se agruparon algunos diámetros por intervalos los cuales no presentaban una diferencia en el costo de aplicación, para aquellos diámetros que si mostraron grandes diferencias se dejaron independientes. De acuerdo con lo anterior, se establecieron así los diámetros: 8"-12", 14"-16", 18"-24", 26", 30", 36" y 40". Se crearon 42 escenarios de falla para las técnicas de rehabilitación, combinando los diámetros establecidos por el análisis de costos de las técnicas con las profundidades y material de la tubería. Los escenarios servirían como un abanico de posibilidades en la elaboración de la herramienta.

Se realiza un ejemplo del uso de esta herramienta beneficio – costo para la toma de decisiones, en donde se selecciona aleatoriamente uno de los reportes CCTV, esto con el fin de poder trabajar con información verídica y real. La herramienta inicia solicitando al usuario los datos del diámetro, profundidad y material, en esta parte el usuario tendrá una lista desplegable para seleccionar los aquellos valores que necesita evaluar, posteriormente se le solicita digitar la longitud a rehabilitar y la edad de la tubería, de esta manera en la Tabla 7, se trabaja con los datos seleccionados de uno de los reportes y continuar con el análisis, los cuales son:

<i>Datos de Entrada</i>	
<b>Diámetro de la tubería (in)</b>	8-12
<b>Profundidad (m)</b>	0-2 m
<b>Material</b>	Concreto
<b>Longitud rehabilitar</b>	15
<b>Edad tubería</b>	18
<b>Longitud pozo a pozo</b>	80

*Tabla 7. Ingreso de datos de inicio. Fuente: Elaboración propia*

La Tabla 8 muestra como la herramienta presenta el costo de aplicación de cada una de las tecnologías para una longitud a rehabilitar de 15 metros, para el escenario específico de un diámetro en un rango de 8" a 12", en concreto con una profundidad entre 0 -2 m. También se observa el costo de reparación de un tramo de pozo a pozo en una longitud de reparación de 80 metros. Se evidencia que al no realizar actividades preventivas de rehabilitación de una longitud menor de 15 metros, el costo de reparación total es mucho mayor al de cualquier técnica de rehabilitación. Lo anterior se debe, que al permitir el colapso la longitud a reparar se va a afectar más y es mucho mayor a la longitud inicial de rehabilitación establecida para la falla a solucionar.

<i>Técnicas de Rehabilitación</i>	<i>Costo</i>
<b>Con Zanja</b>	\$ 5.648.719
<b>CIPP</b>	\$ 13.531.755
<b>Sliplining</b>	\$ 6.120.821
<b>Close fit</b>	\$ 6.736.344
<b>Spiral Wound</b>	\$ 14.849.183
<b>Costo Reparación Total (CR)</b>	\$ 30.126.503

*Tabla 8. Costos del escenario en evaluación. Fuente: Elaboración propia*

Para este caso la empresa prestadora del servicio quiera saber el beneficio económico que obtendría; este se interpretaría como lo que se gana al realizar labores de rehabilitación con alguna técnica en una longitud menor según los requerimientos dados en comparación a esperar que el tramo colapse para repararlo en una longitud con mayor afectación. La Ecuación 1 determina el beneficio como la diferencia entre  $CR_{Total}$  y  $CT_{Total}$ . Como mencionó en la metodología estos costos se ven afectados por el número de veces necesarias de aplicación tanto de labores de rehabilitación como de reparación. De acuerdo con lo anterior se establece a partir de los datos de entrada del caso de estudio con un diámetro entre 8” y 12” y edad de la tubería es de 15 años que: (i) la vida útil para este intervalo de diámetros es de 50 años (ver Tabla 6), (ii) de acuerdo a la edad de 15 años se estima que en 35 años sí no se realiza ninguna labor de rehabilitación, el tramo se tendrá que reparar una vez -  $N_r$ , (iii) sí se ejecuta la rehabilitación en el tramo de tubería y las veces necesarias para la aplicación de las técnicas de rehabilitación son dos -  $N_t$ : una en el momento de la rehabilitación y la segunda 50 años después al término de la vida útil (ver Tabla 4).

La técnica que nos representa un mayor beneficio es el método con zanja, con un ahorro de \$18.829.965 sí se realiza tareas de rehabilitación antes del colapso. El Sliplining es la segunda técnica que le representa un mayor ahorro de \$ 17.884.862, seguido del Close-Fit con \$ 16.653.815. Las técnicas con menor beneficio para el usuario son el CIPP con \$ 3.062.993 y el Spiral Wound de \$ 428.138. El costo de aplicación de las técnicas CIPP y Spiral Wound puede ser muy alto de tal manera que se aproximaría al costo de la reparación total; lo que indica que sí se decide usar alguna de estas técnicas preventivamente a la empresa le estaría costando lo mismo que esperar a que el tramo colapse, de tal modo no se estaría obteniendo una ganancia representativa.

<i>Técnicas de Rehabilitación</i>	<i>Beneficio</i> $B = CRL_P N_r - CTL_R N_t$	<i>Beneficio (B)</i>
Con Zanja	=( \$ 30.126.503*1) – ( \$ 5.648.719*2)	\$ 18.829.065
CIPP	=( \$ 30.126.503*1) – ( \$ 13.531.755*2)	\$ 3.062.993
Sliplining	=( \$ 30.126.503*1) – ( \$ 6.120.821*2)	\$ 17.884.862
Close-fit	=( \$ 30.126.503*1) – ( \$ 6.736.344*2)	\$ 16.653.815
Spiral Wound	=( \$ 30.126.503*1) – ( \$ 14.849.183*2)	\$ 428.138

*Tabla 9. Beneficio del escenario en evaluación. Fuente: Elaboración propia*

La Tabla 10 muestra que el indicador B/C se encuentra clasificado en un ranking para el usuario. Sugiere la técnica más recomendada como aquella que tienen una mayor relación B/C con respecto a las demás. Por otro lado, el indicador B/C ayuda en la toma de decisiones para definir que técnica de rehabilitación deja un mejor beneficio al usuario. El indicador B/C le arrojó al usuario un valor de 3 tanto para el método con zanja y sliplining, que representa que cualquiera de las dos tecnologías escogidas me representa una buena relación B/C dejándome beneficios económicos importantes. Se descarta por completo las técnicas de CIPP y Spiral Wound ya que su indicador marca una relación B/C muy pequeña, cercana a cero. De acuerdo con los resultados el usuario cuenta con la libertad de escoger la tecnología que más se ajuste a sus necesidades contando con la herramienta y el indicador B/C como una ayuda de toma de decisiones.

<i>Tecnología</i>	<i>B/C</i>	<i>Rango de costo</i>
Con Zanja	3	\$ 6.120.821

<i>Tecnología</i>	<i>B/C</i>	<i>Rango de costo</i>
Sliplining	3	\$ 5.648.719
Close-fit	2	\$ 6.736.344
CIPP	0	\$ 14.849.183
Spiral Wound	0	\$ 13.531.755

Tabla 10. Relación B/C del escenario en evaluación. - Fuente: elaboración propia

Finalmente, se puede evidenciar que el indicador de B/C se relaciona de forma directa con la teoría de la decisión, en donde se desea determinar la selección de una única técnica de rehabilitación a partir de los costos y beneficios. Esta relación se debe de expresar preferiblemente en términos monetarios.

Adicionalmente, se realizó la comparación entre todos los escenarios (ver Tabla 5) para la verificación de la herramienta con el fin de conocer cuál de las tecnologías puede ser la más interesante de acuerdo al planteamiento de las siguientes premisas: (i) 42 escenarios usando una longitud de rehabilitación corta y (ii) 42 escenarios usando una longitud de rehabilitación larga, (iii) se establecen en los datos de entrada variables fijas como la edad de la tubería, la longitud a reparar, el intervalo para el diámetro, profundidad y material de la tubería.<sup>2</sup> De acuerdo con el resultado del ranking del indicador B/C de cada uno de los casos propuestos (i) y (ii) se estableció un porcentaje de las tecnologías más recomendadas y menos recomendadas según el caso de análisis. La recomendación de la técnica de rehabilitación a usar se basa en el porcentaje equivalente a los mejores indicadores B/C para los escenarios propuestos. Y el porcentaje de las técnicas menos recomendadas en la relación B/C menor.

De acuerdo con la Tabla 11 y de manera general para los materiales de concreto y PVC, se evidencia que para las longitudes (i) y diámetros pequeños (estos tomados de 2 a 24 pulgada), la tecnología que más veces aparece en primer lugar dentro del ranking es Sliplining con un 36%, en segundo lugar, se encuentra el Close-fit con un 31%. Para los diámetros grandes (de 26 a 40 pulgadas) las tecnologías con zanja y Close-fit son igualmente atractivas con un 19%. Al contrario de las tecnologías que se encuentran en las últimas posiciones del ranking con longitudes de rehabilitación pequeñas son el Spiral Wound con un 19% y CIPP en los diámetros pequeños con un 12% y para los diámetros grandes CIPP con un 21% y Spiral Wound con un 17%.

<i>Longitudes cortas</i>					
	<b>Preferencia</b>	<b>Diámetros pequeños</b>	<b>Porcentaje</b>	<b>Diámetros grandes</b>	<b>Porcentaje</b>
Más recomendada	Primer lugar	Sliplining	36%	Con Zanja	19%
	Segundo Lugar	Close-fit	31%	Close-fit	19%
Menos recomendada	Primer lugar	Spiral Wound	19%	CIPP	21%
	Segundo Lugar	CIPP	12%	Spiral Wound	17%

Tabla 11. Resultados herramienta longitudes cortas. Fuente: Elaboración propia

Para conocer los porcentajes de tendencia por material (ver Tabla 12) en la cual se evidencia que las dos tecnologías de mayor porcentaje dentro de la evaluación de todos los escenarios de longitudes cortas y material de concreto, está Sliplining con 29% en diámetros pequeños (de 8 a 24 pulgadas) y a zanja abierta con 29% para diámetros grandes (de 26 a 40 pulgadas). Aquellas tecnologías de menor

<sup>2</sup> Al mencionar que se va a comparar todos los escenarios de la Tabla 5 las variables de los diámetros, profundidades y material de la tubería serán fijas. Los cambios en los intervalos de las variables ya vienen inmersos en el momento de establecer el escenario.

puntaje son Spiral Wound y el CIPP en ambos casos.

<b>Longitudes cortas - Concreto</b>					
	<b>Preferencia</b>	<b>Diámetros pequeños</b>	<b>Porcentaje</b>	<b>Diámetros grandes</b>	<b>Porcentaje</b>
Más recomendada	Primer lugar	Sliplining	29%	Con Zanja	29%
	Segundo Lugar	Close-fit	8%	Close-fit	8%
Menos recomendada	Primer lugar	Spiral Wound	17%	CIPP	21%
	Segundo Lugar	CIPP	17%	Spiral Wound	21%

Tabla 12. Resultados herramienta longitudes cortas - concreto. Fuente: Elaboración propia

En la Tabla 13, se evidencia que para longitudes costas y con material en PVC, la tecnología que más se repetía en primer lugar dentro del ranking es Sliplining (38%) en diámetros pequeños y Close-fit (29%) en diámetros grandes. Dentro de las tecnologías que se encontraban en las últimas posiciones en el ranking están para diámetros grandes Spiral Wound y CIPP con el mismo porcentaje (25%) y para diámetros pequeños CIPP y la rehabilitación con zanja.

<b>Longitudes cortas - PVC</b>					
	<b>Preferencia</b>	<b>Diámetros pequeños</b>	<b>Porcentaje</b>	<b>Diámetros grandes</b>	<b>Porcentaje</b>
Más recomendada	Primer lugar	Sliplining	38%	Close-fit	29%
	Segundo Lugar	Close-fit	8%	Con Zanja	8%
Menos recomendada	Primer lugar	Spiral Wound	17%	CIPP	25%
	Segundo Lugar	CIPP - Con zanja	13%		

Tabla 13. Resultados herramienta longitudes cortas - PVC. Fuente: Elaboración propia.

En el segundo caso de estudio, la única variable que se modificó fue la longitud (ii), esta vez se usarán 50 metros de rehabilitación, una vez analizando los escenarios se encuentran los siguientes resultados. En la Tabla 14, se puede observar que la tecnología Close-fit resalta con 38% para diámetros pequeños y para diámetros grandes con un 19%. Para longitudes mayores o iguales a 50 metros el Close – Fit marca una tendencia favorable de aplicación. Las tecnologías que se encuentran con menor ranking son CIPP y Spiral Wound tanto para diámetros pequeños y grandes.

<b>Longitudes largas</b>					
	<b>Preferencia</b>	<b>Diámetros pequeños</b>	<b>Porcentaje</b>	<b>Diámetros grandes</b>	<b>Porcentaje</b>
Más recomendada	Primer lugar	Close-fit	38%	Close-fit	19%
	Segundo Lugar	Sliplining - Con Zanja	26%	Con Zanja	19%
Menos recomendada	Primer lugar	CIPP	17%	CIPP	20%
	Segundo Lugar	Spiral Wound	14%	Spiral Wound	14%

Tabla 14. Resultados herramienta longitudes largas. Fuente: Elaboración propia

Evaluando (ii) con concreto como material de la tubería (ver Tabla 15), se evidencia la inclinación por la rehabilitación con la técnica de Close-fit con un 29% en ambos casos y un 8% para Spiral Wound para diámetros pequeños y la utilización de zanja a cielo abierto para diámetros grandes. Para ambos casos se establece que el CIPP es la tecnología de menos recomendada 17%. En el caso de la evaluación utilizando únicamente PVC (ver Tabla 16) se ratifica que, para este material sin importar su diámetro, la tecnología de preferencia es Close-fit y la menos predilecta se encuentra una vez más entre CIPP y Spiral Wound

<b>Longitudes largas - Concreto</b>					
	<b>Preferencia</b>	<b>Diámetros pequeños</b>	<b>Porcentaje</b>	<b>Diámetros grandes</b>	<b>Porcentaje</b>
Más recomendada	Primer lugar	Close-fit	29%	Close-fit	29%
	Segundo Lugar	Spiral Wound - Con Zanja	8%	Con Zanja	8%
Menos recomendada	Primer lugar	CIPP	17%	CIPP	17%

Tabla 15. Resultados herramienta longitudes largas - concreto. Fuente: Elaboración propia

<b>Longitudes largas - PVC</b>					
	<b>Preferencia</b>	<b>Diámetros pequeños</b>	<b>Porcentaje</b>	<b>Diámetros grandes</b>	<b>Porcentaje</b>
Más recomendada	Primer lugar	Close-fit	33%	Close-fit	29%
	Segundo Lugar	Sliplining	8%	Sliplining - Con Zanja	8%
Menos recomendada	Primer lugar	Spiral Wound	17%	CIPP	42%
	Segundo Lugar	Con zanja	4%		

Tabla 16. Resultados herramienta longitudes largas - PVC. Fuente: Elaboración propia.

Una vez analizados los 42 escenarios referentes a las longitudes cortas (15 m) y largas (50 m) propuestas se puede observar (ver Tabla 17) que: (i) las técnicas más recomendadas son: Sliplining, Close-fit y con zanja (ii) El Sliplining es la tecnología más característica para los diámetros pequeños: en las longitudes cortas para el concreto y PVC, mientras que, para las longitudes largas únicamente para el concreto, (iii) el Close – fit y la técnica con zanja son recomendadas en especial para los diámetros grandes tanto para longitudes cortas y largas, sin embargo, se pueden sugerir en diámetros pequeños para longitudes largas, (iv) La técnica con zanja para una tubería en concreto de gran diámetro para las dos caracterizaciones de longitudes es la más recomendada, mientras que (v) el PVC responde mejor a la técnica de Close – Fit para las mismas condiciones planteadas en el resultado anterior.

<b>Longitudes</b>	<b>Material</b>	<b>Diámetros Pequeños</b>	<b>Diámetros grandes</b>
<b>Longitudes cortas</b>	CONCRETO PVC	Sliplining	Con Zanja & Close-fit
		Sliplining	Con Zanja
		Sliplining	Close-fit
<b>Longitudes Largas</b>	CONCRETO PVC	Close-fit & Sliplining	Con Zanja & Close-fit
		Con Zanja & Sliplining	Con Zanja
		Close-fit	Close-fit

Tabla 17. Resultados generales de tecnologías recomendadas. Fuente: Elaboración propia

Por otra parte, se sumó un análisis donde: (i) se definió un valor fijo de 80 metros para la longitud de rehabilitación ( $L_R$ ) de pozo a pozo (Flores, 2011) (ii) la longitud de reparación ( $L_p$ ) variando cada 10 m entre un intervalo de 30 metros hasta una longitud máxima de 150 metros para cada uno de los 42 escenarios propuestos. De acuerdo con el ejercicio planteado se busca observar el comportamiento de las técnicas de rehabilitación conforme con las variables establecidas en los “Datos de entrada”. De la

misma manera se pretende notar si existen diferencias significativas entre los valores de la relación B/C de las técnicas para la rehabilitación de alcantarillados.

De acuerdo con los resultados obtenidos de la relación B/C de la herramienta y de acuerdo con el nuevo análisis propuesto, se estableció con la prueba de P-Value en el software RStudio, que existen diferencias significativas entre la relación B/C de las técnicas de rehabilitación para los intervalos de diámetros, profundidades (hasta 2 metros, de 2 a 3,5 metros y más de 3,5 metros), materiales de tubería (hormigón y PVC) y longitudes de reparación variables. Las técnicas con un valor p inferior a 0,05 con un 95% de confianza de que existe una diferencia significativa entre los valores de la relación B/C, pueden agruparse en el mismo nivel de "recomendación".

A continuación, se muestra la tendencia de las técnicas sugeridas:

CONCRETO							PVC						
diámetro (pulgadas)	S W	CIP P	C Z	C F	S L	Prof (m)	diámetro (Pulgadas)	S W	CIP P	C Z	C F	S L	Prof (m)
8"-12"	Dark Blue	Dark Blue	Light Blue	Light Blue	Light Blue	Hasta 2 m	8"-12"	Dark Blue	Dark Blue	Light Blue	Light Blue	Light Blue	Hasta 2 m
14-16	Dark Blue	Dark Blue	Light Blue	Light Blue	Light Blue		8"-12"	Dark Blue	Dark Blue	Light Blue	Light Blue	Light Blue	
18-24	Dark Blue	Dark Blue	Light Blue	Light Blue	Light Blue		14-16	Dark Blue	Dark Blue	Light Blue	Light Blue	Light Blue	
26	Dark Blue	Dark Blue	Light Blue	Light Blue	Light Blue		18-24	Dark Blue	Dark Blue	Light Blue	Light Blue	Light Blue	
30	Dark Blue	Dark Blue	Light Blue	Light Blue	Light Blue		26	Dark Blue	Dark Blue	Light Blue	Light Blue	Light Blue	
36	Dark Blue	Dark Blue	Light Blue	Light Blue	Light Blue		30	Dark Blue	Dark Blue	Light Blue	Light Blue	Light Blue	
8"-12"	Dark Blue	Dark Blue	Light Blue	Light Blue	Light Blue	2 - 3.5 m	8"-12"	Dark Blue	Dark Blue	Dark Blue	Dark Blue	Dark Blue	2 - 3.5 m
14-16	Dark Blue	Dark Blue	Light Blue	Light Blue	Light Blue		14-16	Dark Blue	Dark Blue	Dark Blue	Dark Blue	Dark Blue	
18-24	Dark Blue	Light Blue	Light Blue	Light Blue	Light Blue		18-24	Dark Blue	Dark Blue	Dark Blue	Dark Blue	Dark Blue	
26	Dark Blue	Light Blue	Light Blue	Light Blue	Light Blue		26	Dark Blue	Dark Blue	Dark Blue	Dark Blue	Dark Blue	
30	Dark Blue	Light Blue	Light Blue	Light Blue	Light Blue		30	Dark Blue	Dark Blue	Dark Blue	Dark Blue	Dark Blue	
36	Dark Blue	Light Blue	Light Blue	Light Blue	Light Blue		36	Dark Blue	Dark Blue	Dark Blue	Dark Blue	Dark Blue	
8"-12"	Dark Blue	Dark Blue	Light Blue	Light Blue	Light Blue	Mayores de 3.5 m	8"-12"	Dark Blue	Dark Blue	Dark Blue	Dark Blue	Dark Blue	Mayores de 3.5 m
14-16	Dark Blue	Dark Blue	Light Blue	Light Blue	Light Blue		14-16	Dark Blue	Dark Blue	Dark Blue	Dark Blue	Dark Blue	
18-24	Dark Blue	Light Blue	Light Blue	Light Blue	Light Blue		18-24	Dark Blue	Dark Blue	Dark Blue	Dark Blue	Dark Blue	
26	Dark Blue	Light Blue	Light Blue	Light Blue	Light Blue		26	Dark Blue	Dark Blue	Dark Blue	Dark Blue	Dark Blue	
30	Dark Blue	Light Blue	Light Blue	Light Blue	Light Blue		30	Dark Blue	Dark Blue	Dark Blue	Dark Blue	Dark Blue	
36	Dark Blue	Light Blue	Light Blue	Light Blue	Light Blue		36	Dark Blue	Dark Blue	Dark Blue	Dark Blue	Dark Blue	

Tabla 18. Resultados técnicos de la rehabilitación para el hormigón y el PVC

La tabla 18 identifica las técnicas de rehabilitación con la siguiente denominación Spiral Wound Lining (SW), Cured in Place Pipe (CIPP), Sliplining (SL), Close Fit Pipe (CF), Con Zanja (CZ). El color azul representa aquellas técnicas que se agrupan en el primer lugar de recomendación, para un segundo y tercer lugar de ocupación las técnicas aparecen con colores azules más claros, respectivamente.

En el caso de las tuberías, es evidente que Spiral Wound y CIPP comparten un valor muy similar en su relación B/C, compartiendo en la mayoría de los casos un primer lugar de recomendación. Para profundidades de hasta 2 metros, se evidencian valores de B/C entre 1,25 y 1,91.

Para las profundidades de 2 a 3,5 metros y para los diámetros de 18" a 24", 26" y 30" el primer lugar lo ocupa únicamente el Spiral Wound, sin embargo, es evidente que el CIPP también está presente ocupando el primer lugar para los diámetros de 8" a 12", 14" a 16" y 36", con valores de B/C entre 1,29 y 1,95. Para el caso de los diámetros de 18" a 24", 26" y 30", el segundo lugar de recomendación lo ocupa el CIPP, compartiendo lugar con el Close Fit Pipe, el Sliplining y con la zanja con valores de B/C entre 0,58 y 1,89. Para esta profundidad, los diámetros de 8" a 12", 14" a 16" y 36" muestran un tercer lugar de recomendación. Las técnicas de rehabilitación frecuentes para este caso son: Close Fit Pipe, Sliplining y con zanja. La relación B/C varía entre 0,61 y 1,81.

En el caso de profundidades superiores a 3,5 m, el primer lugar de la técnica de rehabilitación recomendada es compartido por CIPP, Spiral Wound, con zanja y Close Fit para los intervalos de diámetro de 8" a 12" y de 14" a 16", sin que exista una diferencia significativa entre la relación B/C. Para los diámetros de 18" a 24", 26" y 30", Spiral Wound es la única tecnología que ocupa el primer lugar de recomendación. Y para 36" es evidente que tanto CIPP como Spiral Wound ocupan el mismo lugar de técnica recomendada. Los valores B/C están entre 0,95 y 1,98. El deslizamiento ocupa el segundo lugar de recomendación para los diámetros de 8" a 12" y de 14" a 16", para el intervalo de 18" a 24" esta recomendación es para la técnica CIPP. Para los siguientes diámetros de 26" y 30" las segundas técnicas más recomendadas son CIPP y Close Fit Pipe. Y para 36" las técnicas que se evidencian son Close Fit Pipe, Sliplining y zanja. Los valores B/C para este caso oscilan entre 0,84 y 1,93. Para esta profundidad también se observa un tercer y último lugar de recomendación, para los diámetros de 18" a 24", 26" y 30", donde las técnicas características son Close Fit Pipe, Sliplining y con zanja, con valores de B/C entre 0,95 y 1,88.

Por último, en el caso de las tuberías de PVC, se observa que para profundidades de hasta 2 m, todas las técnicas de rehabilitación propuestas (Spiral Wound, CIPP, Close Fit Pipe y Sliplining) se recomiendan para la rehabilitación del alcantarillado para los diámetros de 8" a 12". Para los diámetros de 14" a 16" y 36" las únicas técnicas que ocupan el primer lugar de recomendación son Spiral Wound y CIPP, mientras que para los diámetros intermedios de 18" a 24", 26" y 30" la única técnica recomendada es Spiral Wound. Los valores de la relación B/C oscilan entre 0,03 y 2,2. En segundo lugar, para los diámetros de 14" a 16" y 36" las técnicas recomendadas son Close Fit Pipe, Sliplining y a zanja abierta. Por otro lado, para los diámetros de 18" a 24", 26" y 30" la segunda técnica más recomendada es el CIPP. Los valores de la relación B/C están entre 0,04 y 1,87. Para este material y profundidad, se evidencia un tercer lugar para las técnicas recomendadas para los diámetros de 18" a 24", 26" y 30" con valores de B/C entre 0,05 y 1,75. Para profundidades de 2 a 3,5 m, todas las técnicas (Spiral Wound, CIPP, Close Fit Pipe y Sliplining) se recomiendan para la rehabilitación del alcantarillado con valores de relación B/C entre 0,13 y 1,7. Del mismo modo, para todos los diámetros para profundidades superiores a 3,5 m, los valores de la relación B/C se sitúan entre 0,13 y 1,73.

## **5. Conclusiones**

En este trabajo se desarrolló una herramienta basada en la relación beneficio-costos (B/C) para la selección de técnicas de rehabilitación de fallas estructurales para el sistema de alcantarillado de Bogotá. A partir de la información de los reportes de CCTV y de la base de datos, se determinaron las fallas estructurales, los diámetros, las profundidades y los materiales de las tuberías presentes en el sistema de alcantarillado de Bogotá. A partir de la caracterización de las variables mencionadas, se obtuvo el costo de aplicación de las diferentes técnicas de rehabilitación a través de la información encontrada en la "Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá (EAAB)", el "Instituto de

Desarrollo Urbano (IDU)", trabajos anteriores relacionados con la comparación de los costos de las técnicas de rehabilitación con zanja y sin zanja. Los escenarios, que se resumen en 42 en total, se propusieron en función de las importantes variaciones de costes entre los diámetros, las profundidades y el material de las tuberías definidas. Para cada escenario, se determinó un coste de aplicación por metro lineal para las diferentes técnicas de rehabilitación propuestas. Además, se estableció el beneficio obtenido por la realización de tareas de rehabilitación preventiva frente a la espera del colapso de la sección para su reparación. Con base en lo anterior, se determinó la relación B/C; donde se demostró que esta relación sirve como indicador para la herramienta de toma de decisiones para la selección de las técnicas de rehabilitación, por lo que se establece un ranking, que muestra el indicador B/C de mayor a menor, lo que ayuda a simplificar la elección de la técnica de rehabilitación. Se recomienda, de acuerdo con los intereses del prestador del servicio de rehabilitación de alcantarillado, optar por la técnica con mayor B/C.

Para la elaboración de los escenarios, se encontró que el tipo de falla estructural no condiciona en gran medida la selección de la técnica, por lo tanto, estas fueron ignoradas de tal manera que no se establecieron los escenarios de acuerdo con las fallas para la aplicación y selección de las técnicas de rehabilitación de alcantarillas. Sin embargo, se recomienda que las fallas a rehabilitar sean únicamente estructurales, para cumplir con los requerimientos de las técnicas de rehabilitación en cuanto a la aplicación en fallas estructurales establecidas en el trabajo.

Por otro lado, se ha comprobado que el diámetro de las tuberías es el principal condicionante en la relación B/C para la selección de una técnica de rehabilitación, por lo que el diámetro debe incluirse en la herramienta de toma de decisiones para la rehabilitación de alcantarillado, ya que es una variable que incide directamente en el coste y beneficio de la realización de las obras de rehabilitación. Se recomienda que el proveedor de servicios de rehabilitación de alcantarillado disponga de información suficiente sobre los diámetros de las tuberías a rehabilitar.

Las longitudes de los tramos a rehabilitar y reparar son fundamentales para determinar el beneficio de la aplicación de las técnicas de rehabilitación, por lo que estas variables deben incluirse en el cálculo del coste de la rehabilitación. La diferencia entre el beneficio obtenido por la rehabilitación de un tramo más corto se establece en base a estas variables. Asimismo, la vida útil de las técnicas de rehabilitación y la edad de servicio de la tubería son variables importantes para definir el beneficio porque (i) se establecen los tiempos necesarios para reparar y el número de veces de aplicación de las técnicas de rehabilitación, (ii) se estima el coste total de realizar las tareas de rehabilitación preventiva en función de los tiempos convenientes de aplicación de las técnicas. Para determinar el beneficio, es imprescindible contar con la información descrita en (i) y (ii), por lo que se recomienda que los prestadores de servicios cuenten con los datos necesarios para evaluar el beneficio.

Según el análisis de los 42 escenarios, considerando las longitudes de rehabilitación cortas y largas como condiciones fundamentales para el análisis, se encontró que las técnicas más recomendadas son el Sliplining, el Close-Fit y la zanja entre las cinco técnicas de rehabilitación propuestas. Esto sugiere que CIPP y Spiral Wound en el análisis no obtuvieron porcentajes representativos de recomendación para la selección de técnicas de rehabilitación específicamente para esta propuesta. Se recomienda proponer otros contextos que puedan ser analizados por la herramienta donde se pueda observar en qué casos tanto CIPP como Spiral Wound son las técnicas de rehabilitación recomendadas.

A partir del análisis general propuesto para todos los escenarios, la técnica de Close-Fit y la de zanja se recomiendan principalmente para diámetros grandes de tubería y longitudes largas. Por otro lado,

para diámetros pequeños con longitudes cortas y en el caso del hormigón para una longitud larga, el Sliplining es la técnica de rehabilitación de elección. Esto implica que en función del diámetro se puede obtener una preselección de técnicas de rehabilitación para fallos estructurales. Se sugiere considerar situaciones específicas en la herramienta, por ejemplo: el análisis particular de escenarios en el rango de 8"-12" para diámetros pequeños y 40" para diámetros grandes. Esto para observar si se presentan las mismas recomendaciones de las técnicas de rehabilitación propuestas para los 42 escenarios y así proponer una tendencia de preselección de una técnica para la rehabilitación del alcantarillado.

En el caso del informe de CCTV evaluado, y de acuerdo con los datos ingresados en la Tabla 7, el análisis realizado inicialmente por la herramienta muestra el costo que tendría cada una de las tecnologías de rehabilitación, incluyendo el costo de tener que realizar el mantenimiento completo debido a los daños causados por el colapso total del sistema. Posteriormente, con estos valores y considerando la vida útil de las tecnologías, se halla el beneficio en valor monetario, finalmente se halla la relación B/C, y se presenta el ranking de este caso, donde para un diámetro pequeño, longitud corta, profundidad entre 0 a 2 metros y utilizando hormigón, la tecnología preferida es la zanja abierta y la de menor puntuación es la Espiral.

Según el planteamiento en el que se definió un valor fijo de 80 metros para la longitud de rehabilitación (RL) de pozo a pozo y una longitud de reparación (RL) variable cada 10 m para cada uno de los 42 escenarios, las técnicas de rehabilitación ganadoras son CIPP y Spiral Wound. En consecuencia, y comparando con los ejercicios presentados anteriormente, se observa que las técnicas menos ganadoras para este ejemplo son las más recomendadas. Esto implica y reitera que la longitud de reparación es una variable importante para el cálculo de la relación B/C. Por lo tanto, se recomienda disponer de datos sobre la longitud de reparación para una eventual reparación.

Al variar únicamente, las longitudes de reparación ( $L_p$ ), se observó que no había diferencia entre algunas técnicas de rehabilitación de alcantarillado, por lo que se podían agrupar varias técnicas como ganadoras o recomendadas. Por lo tanto, se observó que más de una técnica, especialmente CIPP y Spiral Wound, podía tener hasta el doble de beneficios si se utilizaba tanto para materiales de hormigón como de PVC. Y que, en el peor de los casos, la relación B/C tiende a un valor cercano a 0,03, lo que representaría un beneficio de realizar tareas de rehabilitación, aunque no sea un valor muy representativo. También se evidenció que a medida que aumentan los diámetros y las profundidades a rehabilitar, el beneficio es mayor.

Según los autores, este estudio presenta un primer intento de crear una herramienta para evaluar la relación B/C de las técnicas de rehabilitación estructural de alcantarillas con el uso de un escenario específico. Actualmente está diseñado para evaluar los costos en Bogotá, pero es posible que haciendo algunos ajustes en la relación de manejo de fallas en otras ciudades y/o países y actualizando los precios, pueda ser utilizado en otros lugares.

## 6. Referencias

- Calderón, D. (2020). *Introducción a las tecnologías sin zanja para la inspección, rehabilitación, reposición y construcción de redes de acueducto y alcantarillado. Encuentros Magistrales de la Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá E.S.P. Septiembre 4. Bogotá.*

- Delgado, C. M. (2020). Evaluación de herramientas de gestión de activos de infraestructura para redes de distribución de agua potable en el contexto de empresas de agua en Colombia. Bogotá, Colombia: Departamento de Ingeniería Civil. Universidad Nacional.
- Diogo, A. F. (2018). An effective and comprehensive model for optimal rehabilitation of separate sanitary sewer systems. *Science of the Total Environment*, 612, 1042-1057.
- EAAB. (2020). Norma NT-009. *Terminología Acueducto*. Bogotá, Colombia: Normas EAAB.
- EAAB. (2020). NS - 166. *Drenaje urbano de desarrollo sostenible*. Bogotá, Colombia: Normas EAAB.
- EAAB. (2020). NS-058. *Aspectos técnicos para la investigación y calificación de redes de alcantarillado con equipos CCTV*. Bogotá, Colombia : Normas EAAB.
- Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá. (2021). *SIL*. Obtenido de Sistema de información de licitaciones: [www.acueducto.com.co](http://www.acueducto.com.co)
- Flores, S. A. (Enero de 2011). Diseño del Alcantarillado Sanitario y Pluvial. Bogotá, Colombia: Uniandes .
- Garcia, C. A. (2002). Rehabilitation alternatives for concrete and brick sewers. *Practice Periodical on Structural Design and Construction*, 164-173.
- Garcia, C. F. (Julio de 2008). Factibilidad Económica de la Renovación de Sistemas de Alcantarillado. Bogotá, Colombia: Universidad de Los Andes.
- Hernandez Rodríguez y Torres . (2020). *Gestión Patrimonial de Alcantarillados*. Bogotá: Editorial Pontificia Universidad Javeriana.
- IDU. (Enero de 2021). *Base de datos de precios*. Obtenido de Instituto de desarrollo urbano: [www.idu.gov.co/](http://www.idu.gov.co/)
- M, Shehab T & Farooq M. (February de 2013). Neural network cost estimating model for utility rehabilitation projects. San Diego, California, USA: Engineering, Construction and Architectural Management.
- McDonald, S. &. (June de 2001). Condition assessment and rehabilitation of large sewer. *In Proceedings of International Conference on Underground Infrastructure Research*. (pp. 361-369), (pp. 361-369). . Canada: University of Waterloo.
- Najafi, M. (2010). *Tubería con tecnología sin zanja: instalación e inspección*. USA: The McGraw-Hill Companies.
- Oomens, A. (1992). Rioleringsbeheer: het structureren van het beheerproces aan de hand van de voorwaarden voor effectieve besturing. . *Thesis (PhD)*. Delft University of Technology.
- Park, C. S. (2009). *Fundamentos de Ingeniería Económica*. Pearson, No. 338.476 P3 .
- Sterling, R. A. (2016). Studying the life-cycle performance of gravity sewer rehabilitation liners in North America. *Procedia Engineering*. Elsevier, 165, 251-258.
- Tscheikner-Gratl, F. N. (2019). Sewer asset management—state of the art and research needs. *Urban Water Journal*, 16(9), 662-675.
- Van Riel, W. L. (2014). Intuition and information in decision-making for sewer asset management. *Urban Water Journal*, 11(6), 506-518.

Vega, J. C. (Julio de 2008). Criterios de Selección de Alternativas de Rehabilitación de Alcantarillados en Colombia. Bogotá, Colombia: Universidad de los Andes.

Wu, Y. C. (2020). CANADIAN MUNICIPALITY WATER MAIN CONDITION ASSESSMENT AND PIPE RENEWAL METHODS. *A thesis submitted in partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science* . Alberta, Canada : University of Alberta.