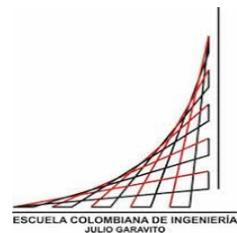


**Maestría en Ingeniería Civil**

**Aplicativo para el Diseño Optimizado de Redes de Alcantarillado Sanitario**

**Johanna Michella Sánchez Guarquín**

**Bogotá, D.C., 24 de mayo de 2023**



# **Aplicativo para el Diseño Optimizado de Redes de Alcantarillado Sanitario**

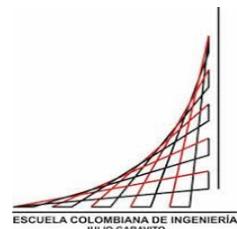
**Trabajo de grado para optar al título de magíster en Ingeniería Civil con énfasis en Recursos Hidráulicos y Medio Ambiente**

**PH.D. Germán Ricardo Santos Granados  
Director**

**Ing. Germán Eduardo Acero Riveros  
Jurado**

**Ing. Andrés Humberto Otálora Carmona  
Jurado**

**Bogotá, D.C., 24 de mayo de 2023**



## **NOTA DE ACEPTACIÓN**

El trabajo de grado de maestría titulado “Aplicativo para el Diseño Optimizado de Redes de Alcantarillado Sanitario”, presentada por Johanna Michella Sánchez Guarquín, cumple con los requisitos establecidos para optar al título de Magister en Ingeniería Civil con Énfasis en Recursos Hidráulicos y Medio Ambiente.

---

**Germán Ricardo Santos Granados**  
Director de Tesis

---

**Germán Eduardo Acero Riveros**  
Jurado 1

---

**Andrés Humberto Otálora Carmona**  
Jurado 2

**Bogotá D.C, 24 de mayo de 2023**

## **DEDICATORIA**

A Dios por permitirme concluir con éxito esta etapa, a mi mamá que con su esfuerzo y dedicación me acompañó y guio en cada instante de este proceso de formación, a mi hija por ser mi motor de vida, a mi abuelita, que, aunque no esté presente de cuerpo, siempre fue una motivación para no desfallecer, a mi pareja por brindarme apoyo y fortaleza en todo el proceso y a mi familia y seres queridos por su apoyo incondicional para el logro de mis metas.

## **AGRADECIMIENTOS**

De manera especial brindo agradecimientos:

A la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito por permitirme afianzar el conocimiento a través de sus herramientas metodológicas y académicas que serán el reflejo de las buenas prácticas profesionales en el desempeño de la labor.

Al Dr. German Ricardo Santos Granados, por la entereza y colaboración dada en el desarrollo del presente trabajo de grado, el cual reúne los conocimientos aprendidos de su parte en el transcurso del Postgrado.

A la empresa de consultoría INGENIERÍA Y CONSULTORÍA AMBIENTAL Y SANITARIA, INCOLSAM S.A.S., por el suministro de la información para la fase comparativa del proyecto.

A mi familia, por el apoyo brindado en cada etapa de este proceso, ya que, sin su colaboración y amor, no hubiese sido posible la obtención de este logro.

## RESUMEN

Los tiempos requeridos entre la planificación, el desarrollo y la ejecución de obras de saneamiento básico en el país, han traído consigo la pérdida de recursos económicos para las entidades territoriales, evidenciando ausencia de cobertura de los servicios de acueducto y alcantarillado, especialmente en zonas en donde por sus condiciones topográficas y económicas no es viable, en una relación costo beneficio, su accesibilidad al servicio.

De acuerdo con el comunicado del 31 de agosto de 2018, por parte de la Contraloría General de la Republica “...Solo se han ejecutado \$ 3.8 billones de \$5.7 billones de los recursos para agua potable y saneamiento básico que administra el Consorcio FIA...”, indicando que no se ha logrado la regionalización de la prestación del servicio de agua potable y saneamiento básico, ni se ha optado por un modelo empresarial moderno y sostenible. Este mismo informe revela que una de las causas de la baja la cobertura de estos servicios, se debe a que los Planes Departamentales de Agua del país, no cuentan con una estructura de planeación y ejecución de proyectos eficiente.

Dada la ausencia de instrumentos técnicos para el fortalecimiento de capacidades, que permita a los Planes Departamentales de Agua o en general entidades del estado que abordan componentes de agua y saneamiento desarrollar estudios de infraestructura de alcantarillado sanitario o revisar en detalle la información presentada por sus contratistas, resultan proyectos insuficientes e ineficientes, abandonando en gran parte, las inversiones y discontinuidad en la prestación del servicio.

De acuerdo con la necesidad citada, en este proyecto se desarrolló una herramienta de apoyo que permite realizar el diseño al menor costo de una red de alcantarillado sanitario a partir de un conjunto de datos de entrada, teniendo en cuenta las restricciones hidráulicas de acuerdo con las disposiciones de la normatividad vigente. La herramienta está enfocada a las entidades territoriales o en los entes encargados de la priorización de las inversiones para facilitar la planificación y ejecución de proyectos de pequeña escala, para satisfacer sus necesidades de saneamiento básico.

El presente documento presenta un marco teórico, en donde se describen los componentes de un sistema de alcantarillado y se definen conceptos relacionados con la hidráulica de redes. Así mismo se describen uno a uno, los componentes del aplicativo, y su funcionamiento. Posteriormente se presentan los resultados para tres (3) escenarios de aplicación, involucrando el análisis respecto a costos constructivos y tiempos computacionales. Cabe mencionar que el aplicativo, permite la optimización del trazado en perfil más no en planta, es decir, el usuario deberá tener preestablecido el alineamiento de la red, para posteriormente con ayuda del aplicativo, definir las profundidades,

diámetros y pendientes que arrojen el menor costo, cumpliendo las restricciones hidráulicas que se definan a partir los rangos dispuestos en la normatividad.

Con este aplicativo, es posible que aquellos proyectos de alcantarillado prioritarios para determinada zona puedan ser revisados y rediseñados, de manera ágil y sistematizada, y a menor costo, permitiendo aproximar a los montos reales de ejecución, evitando exhaustivos procesos de planificación, contratación, ejecución, viabilización y puesta en funcionamiento.

## ÍNDICE GENERAL

<b>1</b>	<b>INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>12</b>
<b>2</b>	<b>OBJETIVOS .....</b>	<b>13</b>
2.1	Objetivo General.....	13
2.2	Objetivos Específicos .....	13
<b>3</b>	<b>ESTADO DEL ARTE.....</b>	<b>14</b>
<b>4</b>	<b>MARCO TEÓRICO.....</b>	<b>16</b>
4.1.1	Criterios de diseño de una red de alcantarillado sanitario .....	16
4.1.2	Software disponible para el diseño de sistemas de alcantarillado.....	18
<b>5</b>	<b>METODOLOGÍA .....</b>	<b>23</b>
5.1	Recopilación de la información existente .....	24
5.2	Definición de variables de entrada .....	25
5.2.1	Información General .....	25
5.2.2	Pozos de Inspección .....	27
5.2.3	Tramos.....	28
5.3	Definición de factores condicionantes .....	35
5.4	Ecuaciones de costos.....	36
5.5	Revisión y selección de interfaces .....	39
5.5.1	Visual Basic .....	39
5.5.2	Visual Basic Net .....	40
5.5.3	Java .....	40
5.5.4	Power Builder .....	40
5.5.5	Python.....	40
5.6	Selección de métodos de optimización .....	41
5.6.1	Programación dinámica.....	41
5.6.2	Programación Lineal.....	42
5.6.3	Algoritmo de Optimización de Dijkstra .....	42
5.6.4	Algoritmo de Bellman-Ford.....	42
5.7	Desarrollo del aplicativo .....	43
5.7.1	Bases de Datos .....	44
5.7.2	Elementos matemáticos de una red de alcantarillado .....	48
5.8	Caso de estudio.....	62
<b>6</b>	<b>RESULTADOS .....</b>	<b>68</b>
<b>7</b>	<b>ANÁLISIS DE RESULTADOS.....</b>	<b>73</b>
<b>8</b>	<b>CONCLUSIONES.....</b>	<b>77</b>
<b>9</b>	<b>RECOMENDACIONES .....</b>	<b>78</b>
<b>10</b>	<b>BIBLIOGRAFÍA.....</b>	<b>79</b>

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.	Comparativo de Software Disponible para el Diseño de Alcantarillados .....	18
Tabla 2.	Información Recopilada – PDA ‘S.....	24
Tabla 3.	Datos Requeridos – Caracterización del Sector .....	26
Tabla 4.	Información de Pozos de Inspección Requerida.....	27
Tabla 5.	Información de Pozos de Inspección Calculada .....	28
Tabla 6.	Información de Tramos Requerida.....	28
Tabla 7.	Información de Tramos Calculada .....	31
Tabla 8.	Criterios de Diseño.....	35
Tabla 9.	Cálculo de Cantidades de Obra para Tramos.....	36
Tabla 10.	Cálculo de Cantidades de Obra para Pozos de Inspección .....	39
Tabla 11.	Información Pozos de Inspección – Diseño original .....	63
Tabla 12.	Información Topológica de Tramos – Diseño original.....	63
Tabla 13.	Cantidades de Obra de Tramos – Diseño original .....	64
Tabla 14.	Cantidades de Obra de Pozos – Diseño original .....	65
Tabla 15.	Resultados Topológicos INCOLSAM S.A.S – Diseño original.....	68
Tabla 16.	Resultados cantidades de obra INCOLSAM S.A.S – Diseño original.....	69
Tabla 17.	Resultados Topológicos Aplicativo Delta 0.60 m – Caso de Estudio .....	70
Tabla 18.	Resultados de las principales cantidades de obra delta 0.60 m – Caso de Estudio ....	70
Tabla 19.	Resultados Topológicos Aplicativo Delta 0.40 m – Caso de Estudio .....	71
Tabla 20.	Resultados de las principales cantidades de obra delta 0.40 m – Caso de Estudio ....	72
Tabla 21.	Comparativo cantidades de obra .....	75

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Diagrama General de la Metodología Propuesta. Fuente: Elaboración Propia, 2022 .....	23
Figura 2. Estructuración del aplicativo. Fuente: Elaboración Propia, 2022. ....	44
Figura 3. Base de datos de población. Fuente: Elaboración Propia, 2022.....	45
Figura 4. Base de datos de topografía. Fuente: Elaboración Propia, 2022.....	45
Figura 5. Base de datos costos generales. Fuente: Elaboración Propia, 2022.....	47
Figura 6. Base de costos de tubería. Fuente: Elaboración Propia, 2022. ....	47
Figura 7. Base de datos cálculo de cantidades. Fuente: Elaboración Propia, 2022. ....	48
Figura 8. Planteamiento de la Red. Fuente: Elaboración Propia, 2022.....	49
Figura 9. Conjunto de nodos para un mismo pozo. Fuente: Elaboración Propia, 2022. ....	50
Figura 10. Representación de un arco. Fuente: Elaboración Propia, 2022.....	51
Figura 11. Representación de tramo de alcantarillado. Fuente: Elaboración Propia, 2022. ....	51
Figura 12. Representación de dos tramos de una tubería. Fuente: Elaboración Propia, 2022.....	52
Figura 13. Solución del grafo. Fuente: Elaboración Propia, 2022. ....	53
Figura 14. Características Específicas del proyecto. Fuente: Elaboración Propia, 2022. ....	54
Figura 15. Definición de Restricciones Hidráulicas. Fuente: Elaboración Propia, 2022.....	54
Figura 16. Botón “Reiniciar proceso”, registro de información. Fuente: Elaboración Propia, 2022..	55
Figura 17. Botón “Crear tramo”, traslado de información. Fuente: Elaboración Propia, 2022. ....	55
Figura 18. Generación de rutas óptimas. Fuente: Elaboración Propia, 2022.....	56
Figura 19. Representación gráfica generación de rutas aguas arriba hacia aguas abajo. Fuente: Elaboración Propia, 2022.....	57
Figura 20. Resultado gráfico – Soluciones más económicas. Fuente: Elaboración Propia, 2022. ..	58
Figura 21. Representación gráfica generación de rutas aguas abajo hacia aguas arriba. Fuente: Elaboración Propia, 2022.....	59
Figura 22. Representación Aplicativo SWMM. Fuente: Elaboración Propia, 2022.....	60
Figura 23. Vista en Planta Cargue Aplicativo SWMM. Fuente: Elaboración Propia, 2022.....	61
Figura 24. Vista en Perfil Cargue Aplicativo SWMM. Fuente: Elaboración Propia, 2022.....	61
Figura 25. Colector de estudio. Fuente: Tomado de INCOLSAM S.A.S., 2019 .....	62
Figura 26. Esquema Topológico Tramos 0 – 1 y 1 – 2. Fuente: Elaboración Propia, 2022. ....	67
Figura 27. Comportamiento topológico. Fuente: Elaboración Propia, 2022. ....	73
Figura 28. Variación de pendientes. Fuente: Elaboración Propia, 2022. ....	74
Figura 29. Variación de diámetros. Fuente: Elaboración Propia, 2022. ....	74
Figura 30. Valoración cantidades de obra. Fuente: Elaboración Propia, 2022. ....	75

## **ANEXOS**

- Anexo 1.      Aplicativo Diseño Optimizado (Excel)
- Anexo 2.      Caso de Estudio Delta 0.6m (Excel)
- Anexo 3.      Caso de Estudio Delta 0.4m (Excel)
- Anexo 4.      Calculo Tasas de Crecimiento Demográfico (Excel)

## 1 INTRODUCCIÓN

El diseño de sistemas de alcantarillado tanto sanitarios como pluviales, se basa en dos principios fundamentales, la topología de la red y el cumplimiento de los criterios hidráulicos establecidos en la normatividad vigente.

El primer componente corresponde a la topología del sistema, es decir, la definición del trazado de la red hasta su descarga o conexión a un colector y/o emisario. El segundo componente, una vez esté definida la red corresponde al diseño hidráulico como tal, es decir la definición de parámetros físicos como longitud, diámetro y material que permitan el cumplimiento de los parámetros hidráulicos tales como velocidad, fuerza tractiva, capacidad y régimen de flujo, cuyos rangos se encuentran definidos en la Resolución 0330 de 2017, que actualmente rige a nivel nacional.

Los sistemas de alcantarillado son esenciales para la calidad de vida de las personas, traducido en salud y bienestar. Según lo establecido por el Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio, para el año 2017 se tuvo una cobertura del 92.40% de servicio público de alcantarillado en zona urbana, mientras que 70.70% en zona rural. No obstante, la cobertura podría ser mayor, teniendo en cuenta que, en el presupuesto nacional destinado para las obras de agua potable y saneamiento básico, para ese año, un total de \$5.7 billones estaban disponibles para ejecución de obras de esta índole, se tenían viabilizados aproximadamente \$4.6 billones, y los entes territoriales realizaron contratos solamente por \$3.8 billones. Es decir que del total de recursos disponibles se comprometieron realmente solo el 67%, situación ocasionada por deficiencias técnicas en los diseños, en la gestión ambiental, en la presentación y en la formulación de los proyectos. Esto obliga a la reformulación y por ende demoras en la iniciación y ejecución de los proyectos, según lo revela la Contraloría General de la República. Se sabe, además, que la diferencia en costos de construcción de una red de alcantarillado, entre dos posibles trazados puede llegar a ser de hasta un 85% (Saldarriaga, et al.,2014).

De acuerdo con lo anterior, es relevante que los entes territoriales cuenten con mecanismos que les permita de una manera ágil y confiable estimar el presupuesto para la ejecución de obras de alcantarillado, para lograr una reducción de tiempos para su contratación y en la accesibilidad de este tipo de servicios a la comunidad en general.

## **2 OBJETIVOS**

### **2.1 OBJETIVO GENERAL**

Desarrollar un aplicativo para el diseño de redes de alcantarillado sanitario, que permita la optimización de tiempo y recursos para la evaluación y diseño de proyectos de saneamiento básico.

### **2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Definir las restricciones hidráulicas y constructivas requeridas en un diseño optimizado de redes de alcantarillado sanitario.
- Desarrollar una herramienta de apoyo que permita realizar el diseño óptimo de una red de alcantarillado sanitario a partir de un conjunto de datos de entrada, y las restricciones definidas a partir de la normatividad vigente.
- Comparar los costos obtenidos, con los costos reales de un caso de estudio.

### 3 ESTADO DEL ARTE

Para el desarrollo del presente proyecto, se realizó la búsqueda de estudios relacionados con el tema de investigación, generando una base de datos de cincuenta (50) artículos y/o proyectos de grado, de los cuales fueron seleccionados cinco (05), como los más relevantes dada la estrecha relación existente con el objeto del proyecto.

Dentro de los estudios seleccionados se tiene el elaborado por Domingos Da Silva, 2015, titulado “Estrategia para el diseño de redes de drenaje pluvial, empleando la modelación matemática, para su aplicación en la ciudad de Luanda”. En este estudio, el autor desarrolla el diseño y verificación de redes de alcantarillado pluvial, empleando diferentes técnicas de modelación matemática, articuladas en una estrategia adaptada a condiciones de la Ciudad de Luanda. El insumo principal en el proyecto es un modelo digital de terreno, el cual, con la escala adecuada, permitió la definición del comportamiento de drenaje en el sector. Este artículo, genera un acercamiento hacia la definición de las metodologías de análisis para el sistema de alcantarillado, incluyendo la evaluación espacial de los datos, facilitando el manejo e interpretación de la información.

Así mismo, fue analizado el estudio elaborado por Ramiro Marbello, 2018, titulado “Programa Python, para calcular la pendiente crítica límite en canales abiertos, aplicado al cálculo de perfiles de FGV”. En éste, se presenta un Programa de Cálculo de la Pendiente Crítica Límite, en lenguaje de programación Python, aplicable a canales prismáticos de las secciones transversales más usuales, tales como: rectangular, triangular, trapecial, circular y parabólica. La aplicabilidad de este proyecto se basó en la metodología empleada por el autor para la modelación en lenguaje de programación Python, teniendo en cuenta que, durante la fase de selección de la interfaz del presente estudio, dicho lenguaje fue uno de los involucrados.

Igualmente, fue consultado el proyecto elaborado por Peinado Carlos David, 2014, titulado “Uso del programa CIE-AGUA para el diseño optimizado de redes de drenaje urbano. Redes patrón para Colombia.”. En este estudio, el autor establece la relación entre un diseño existente para determinado sector, y su optimización a través del programa CIE-AGUA desarrollado en la Universidad de los Andes. Este proyecto fue de gran ayuda, teniendo en cuenta el enfoque dado, aun cuando se trata de alcantarillado pluvial, el patrón de funcionamiento fue el mismo, ya que las restricciones a definir se basaron en la normatividad vigente para diseños de alcantarillado sanitario en el caso específico.

En esta misma línea, se encuentra el estudio realizado por Duque Natalia, 2015, titulado “Metodología para el diseño optimizado de redes de alcantarillado”. Este trabajo aborda una

metodología de diseño de redes de alcantarillado, en la cual el trazado de la red se basa en un modelo de optimización entera mixto conocido como Network Design Problem (NDP). Su aplicabilidad para el presente proyecto se basó en conocer la metodología empleada, los resultados obtenidos, y su eficiencia con respecto al costo mínimo para un sistema dado.

Finalmente, de los cinco estudios más relevantes seleccionados para el apoyo en el desarrollo del presente proyecto, se tiene el elaborado por R. Moeini, 2012, titulado “Layout and size optimization of sanitary sewer network using intelligent ants (Disposición y optimización del tamaño de la red de alcantarillado sanitario utilizando hormigas inteligentes)”. La capacidad de creación de soluciones incrementales del algoritmo ant (algoritmo de la colonia de hormigas, algoritmo hormiga u optimización por colonia de hormigas) se explora en este documento para la eficiencia, disposición y optimización del tamaño de la tubería de la red de alcantarillado sanitario. El algoritmo de optimización de la colonia de hormigas (ACOA) está equipado con un algoritmo de crecimiento de árboles (TGA) para resolver de manera eficiente la red de alcantarillado. El problema de optimización de diseño, tamaño y rendimiento se compara con la aplicación convencional de la ACOA. El método se basa en el supuesto de que un diseño base que incluya todos los enlaces posibles de la red está disponible. El TGA se utiliza para construir diseños factibles en forma de árbol a partir del diseño base definido para la red de alcantarillado, mientras que el ACOA se utiliza para determinar óptimamente los diámetros de tubería. Su aplicabilidad para el presente proyecto se basó en conocer el manejo del algoritmo ant, en relación con el objeto del estudio, teniendo en cuenta que permitirá agilizar el diseño de la red de alcantarillado y su configuración.

De las fuentes consultadas y citadas previamente, la metodología más completa y de mayor aplicabilidad para el presente proyecto debido a que reúne los componentes principales para el logro del objetivo general, está planteada en el proyecto de grado titulado “Metodología para el diseño optimizado de redes de alcantarillado”, ya que en él se analizan alternativas detalladas para el diseño optimizado por costo mínimo para redes de alcantarillado, y describe una serie de ecuaciones de optimización enfocadas en costos de instalación de tubería, excavación, relleno, entibado y cámaras de inspección que permiten en gran medida apoyar y soportar los mecanismos y resultados del aplicativo desarrollado en el presente proyecto. Adicionalmente se tomó como guía el libro “Hydrosystems engineering and management” de Larry W. Mays, en donde, en el capítulo 4 se describen elementos de programación dinámica, siendo finalmente el método de optimización empleado en el presente estudio.

## 4 MARCO TEÓRICO

A continuación, se presentan los conceptos más relevantes sobre los cuales se encuentra fundamentado el presente trabajo de grado y que permitirán comprender la problemática actual y la importancia del diseño optimizado de redes de alcantarillado sanitario.

### 4.1.1 CRITERIOS DE DISEÑO DE UNA RED DE ALCANTARILLADO SANITARIO

La Resolución 0330 de 2017<sup>1</sup> siendo la normatividad nacional vigente para el desarrollo de proyectos de agua y saneamiento básico establece los siguientes criterios generales para el diseño de redes de alcantarillado sanitario:

- **CAUDAL DE AGUAS RESIDUALES:** Los aportes de aguas residuales se deben determinar a partir de la información de consumos y/o mediciones registradas en la localidad de estudio, considerando las densidades previstas para el periodo de diseño con base en los planes y programas definidos en la misma. Cabe mencionar que la estimación de los caudales se debe desarrollar para las condiciones iniciales y finales del periodo de diseño en cada tramo de la red.

Los caudales que se requieren calcular son: Caudal de aguas residuales domésticas, caudal de aguas residuales no domésticas, caudal medio diario, caudal máximo horario, caudal de conexiones erradas y caudal de infiltración, la sumatoria de estos tres últimos será el caudal de diseño con el cual se dimensionará la red y a partir del cual se evaluará el comportamiento hidráulico del sistema.

- **LOCALIZACIÓN DE REDES:** La resolución 0330 de 2017, define una serie de consideraciones a tener en cuenta para la ubicación de redes tanto en horizontal como en vertical. A continuación, se citan las principales para redes de alcantarillado en zonas urbanas, no obstante, en casos especiales como cruces aéreos, subfluviales, en vías férreas entre otros, se hace necesario consultar el artículo 138 de la norma citada:
  - Para sistemas nuevos, las redes de alcantarillado pluvial y combinado deben localizarse cerca del eje de la calzada, mientras que las redes de alcantarillado sanitario deben ubicarse hacia uno de los costados, a una distancia aproximada de un cuarto del ancho de la calzada, respetando la distancia libre con respecto a otras redes.

---

<sup>1</sup> Resolución 0330 de 2017<sup>1</sup> “Por la cual se adopta el Reglamento Técnico para el Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico – RAS y se derogan las resoluciones 1096 de 2000, 0424 de 2001, 0668 de 2003, 1459 de 2005, 1447 de 2005 y 2320 de 2009”

- Las tuberías de alcantarillado deben estar a una distancia mínima de 0.50 m de la acera y 1.50 m del paramento, media entre las superficies externas del conducto, y del sardinel y el paramento, según corresponda.
  - Las tuberías de alcantarillado no pueden estar ubicadas en la misma zanja de una tubería de acueducto, y su cota clave siempre debe estar por debajo de la cota batea de la tubería de acueducto.
  - En aquellos casos en los cuales existan vías con separador central se deben diseñar redes independientes en cada calzada. Cuando por el costado de una vía se vaya a construir un alcantarillado sanitario y por otro costado uno de aguas lluvias, este último deberá estar más cerca al centro de la vía.
  - Las distancias mínimas libres entre los colectores que conforman la red del sistema de recolección y evacuación de aguas residuales y/o lluvias, y las tuberías de otras redes de servicios públicos deben ser 1.0 m en la dirección horizontal y 0.30 m en la dirección vertical, medidas entre las superficies externas de los dos conductos.
  - Los cruces de redes deben analizarse de manera individual, para establecer la necesidad de diseños especiales, en particular aquellos casos donde sea imposible cumplir la distancia mínima vertical definida.
- **PROFUNDIDAD DE INSTALACIÓN DE LA TUBERÍA:** La profundidad de instalación de las redes ubicadas en vías peatonales o zonas verdes, no podrá ser inferior a 0.75 m a cota clave, mientras que las ubicadas en vías vehiculares, no podrán ubicarse a una profundidad menor a 1.20 m a clave. Si por las condiciones del terreno no es posible cumplir esta condición, se deben diseñar protecciones a la tubería de acuerdo con los requerimientos del fabricante.
  - **DIÁMETRO INTERNO REAL MÍNIMO:** El diámetro real mínimo permitido en redes de alcantarillado sanitario es 170 mm. Para poblaciones menores de 2500 habitantes el diámetro interno real permitido es 140 mm.
  - **CRITERIOS DE AUTO LIMPIEZA:** La velocidad mínima real permitida en el colector de alcantarillado sanitario es aquella que genere un esfuerzo cortante en la pared de la tubería mínimo de 1.0 Pa.
  - **VELOCIDAD MÁXIMA:** La velocidad máxima real en un colector por gravedad no debe sobrepasar 5.00 m/s, determinada para el caudal de diseño.
  - **RELACIÓN MÁXIMA ENTRE PROFUNDIDAD DE FLUJO Y DIÁMETRO DE LA TUBERÍA:** Para permitir la aireación adecuada del flujo de aguas residuales, el valor máximo permisible de la

profundidad del flujo para el caudal de diseño en un colector es de 85% del diámetro interno real de éste.

Los criterios anteriormente descritos, serán los empleados como restricciones para el diseño optimizado de redes a nivel hidráulico.

#### 4.1.2 SOFTWARE DISPONIBLE PARA EL DISEÑO DE SISTEMAS DE ALCANTARILLADO

Teniendo en cuenta la necesidad de drenar tanto las aguas residuales como pluviales, existen softwares para el diseño de redes los cuales han facilitado la toma de decisiones desde el área de la ingeniería y a los entes territoriales encargados de su construcción y puesta en funcionamiento. De esta manera, se realizó una revisión de los softwares disponibles en el mercado, como base para el desarrollo del presente trabajo.

A continuación, se sintetizan con su respectiva descripción, requerimientos de uso, vinculación a otros programas, beneficios y desventajas.

*Tabla 1. Comparativo de Software Disponible para el Diseño de Alcantarillados*

NOMBRE	DESCRIPCIÓN	VINCULACIÓN A OTROS PROGRAMAS	TIPO DE LICENCIA	BENEFICIOS	DESVENTAJAS Y/O LIMITACIONES
Alcantarillados	Es un programa desarrollado para el manejo integrado de sistemas de Alcantarillado, desarrollado por el Centro de Investigaciones en Acueductos y Alcantarillados - CIACUA de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de los Andes	Se pueden importar datos desde el programa Excel, con los datos delimitados por tabulaciones	N.A.	Permite la entrada de datos desde el formato del "bloc de notas" y mediante hojas de Excel, que tengan los datos de ingreso separados por las columnas	Esta versión del programa solo permite un total de cincuenta (50) conductos o tuberías
		Se pueden importar datos desde el programa bloc de notas, con los datos delimitados por tabulaciones		Permite asignar diferentes materiales a las tuberías Es capaz de evaluar y diseñar todos los trazados posibles para cualquier condición de topografía, topología y aporte de caudal	Aún hace falta la búsqueda de un criterio que permita encontrar de forma directa la combinación de diámetros y pendientes de diseño de una serie de alcantarillado.

NOMBRE	DESCRIPCIÓN	VINCULACIÓN A OTROS PROGRAMAS	TIPO DE LICENCIA	BENEFICIOS	DESVENTAJAS Y/O LIMITACIONES
Hydra	Software diseñado para modelación hidráulica de alcantarillado a nivel urbano y rural.	Permite la importación de objetos contenidos en un archivo de dibujo en formato DXF o DWG		Permite la modelación de aguas residuales, aguas lluvias, infiltración y aguas subterráneas, en forma real.	La versión de hydra 6.4.083., solo permite un máximo de doscientas (200) tuberías como limite
	Contribuye a la estimación de las contribuciones de aguas residuales generados por diversas fuentes, y calcula la hidráulica del sistema de tuberías, con el fin de determinar las deficiencias actuales y/o futuras en un sistema de alcantarillado	El reporte de los resultados se da en un archivo .txt; este puede ser abierto en un sistema de gestión de bases de datos o en una hoja de cálculo como Excel	Permite la importación de objetos contenidos en un archivo de dibujo en formato GIS	Requiere licencia; no obstante, puede descargar se un demo, desde la página oficial	Permite definir los parámetros de diseños de acuerdo con la localidad donde se esté realizando el diseño
HidroSIG	Es una extensión del Sistema de Información Geográfico MAPWINDOW, gratis, de libre distribución bajo licencia MPL (Mozilla Public License), desarrollado por el Posgrado en Aprovechamiento en Recursos Hidráulico (PARH) de la Escuela de Geociencias y Medio Ambiente.	Ráster: Dentro de los formatos compatibles con HydroSIG para el manejo de información tipo ráster se encuentran: ascii, bgd, aux, tif, grd, img. El más comúnmente usado es el ESRI ascii.	Es gratuito. No requiere de licencia. Puede descargar se directamente desde la página oficial de la Universidad Nacional de Medellín en el departamento de geociencias y medioambiente: <a href="https://minas.medellin.unal.edu.co/departamentos/g">https://minas.medellin.unal.edu.co/departamentos/g</a>	Permite el procesamiento de mapas en formato ráster/vector por medio de los siguientes módulos: <b>Hidrología:</b> En esta categoría es posible realizar tareas propias de un balance hidrológico, tales como el trazado automático de cuencas y redes de drenaje, la estimación de caudales extremos y la determinación de la disponibilidad hídrica en una cuenca hidrológica. <b>Herramientas operativas:</b> Permiten la	HidroSIG es muy sensible al cambio de tamaño en los mapas formato ráster, así como al número de celdas (columnas y filas)
	Es un conjunto de aplicativos, que permiten realizar estimaciones y análisis de variables hidrológicas, climáticas y geomorfológicas para la	Vectorial: La información de tipo vectorial está disponible principalmente en formato .shp de ESRI			

NOMBRE	DESCRIPCIÓN	VINCULACIÓN A OTROS PROGRAMAS	TIPO DE LICENCIA	BENEFICIOS	DESVENTAJAS Y/O LIMITACIONES
	<p>planificación y cuantificación del recurso hídrico.</p> <p>HidroSIG utiliza la Librería VisAD de Java para la generación y el manejo de los objetos gráficos, esta librería consiste en un conjunto de clases que le brindan al usuario la posibilidad de visualizar datos numéricos en forma interactiva y colaborativamente.</p>		<p>eficiencias y medioambiente/hidrología/es/de scargas.html</p>	<p>transformación de mapas de flujo (importante en el trazado de una cuenca) en formatos GRASS, HidroSIG y ArcGIS. Ajusta puntos de captación de agua, a una red de drenaje. En general, permite la realización de diferentes operaciones con un mapa ráster.</p> <p><b>Bases de datos:</b> Permite la creación, edición y administración de bases de datos y series de tiempo de variables hidrológicas.</p>	
Sedal Plus	<p>Un sistema experto para el diseño de todos los tipos de alcantarillado (sanitarios, pluviales y combinado) basados en flujo uniforme, método racional o en los hidrogramas de la Environmental Protection Agency - EPA (Modelo SWMM). Con capacidad de diseñar automáticamente desde la topología del sistema hasta el diseño definitivo.</p>	<p>Permite la importación desde formato ASCII de ArcView; SRTM, HSJ 1.8, IDRIDI, DXF</p>	<p>No requiere licencia. El uso del programa se ofrece gratuitamente a los Ingenieros Sanitarios y solo exige una conexión a internet</p>	<p>Para poder usarlo solo es necesario contar con conexión a internet, ya que su uso es gratuito</p> <p>Permite el diseño de alcantarillados sanitarios, pluviales y combinados</p>	<p>Estructuras como sifones, estaciones de bombeo y canales abiertos no pueden diseñarse por medio de este software.</p> <p>Diseña tuberías circulares hasta el diámetro en que se fabriquen. De ahí en adelante utiliza ductos cuadrados (Box Culvert) cuyas dimensiones varían de 20 en 20 centímetros</p>
EPA SWMM	<p>El Stormwater Management Model de la EPA - SWMM, es un modelo dinámico de simulación de</p>	<p>Sus resultados pueden ser importados desde SewerGEMS y así mismo exportados</p>	<p>No requiere licencia. El programa puede ser descargado</p>	<p>Evalúa el funcionamiento y la eficacia de las Técnicas de Drenaje Urbano Sostenible</p>	<p>Inexistencia de vínculos GIS</p>

NOMBRE	DESCRIPCIÓN	VINCULACIÓN A OTROS PROGRAMAS	TIPO DE LICENCIA	BENEFICIOS	DESVENTAJAS Y/O LIMITACIONES
SewerGEMS	<p>precipitaciones, que se puede utilizar para un único acontecimiento o para realizar una simulación continua en un periodo extendido. El programa permite simular tanto la cantidad como la calidad del agua evacuada, especialmente en alcantarillado urbano.</p>	<p>Permite el análisis de importe y exporte desde y hacia el programa SWMM</p>	<p>o desde la página oficial de la Environmental Protection Agency - EPA: <a href="https://www.epa.gov/water-research/swmm">https://www.epa.gov/water-research/swmm</a></p>	<p>Diseño y dimensionamiento de estructuras de retención y demás componentes</p>	<p>Inestabilidad numérica, el motor de cálculo hidráulico de SWMM es ligeramente más inestable, y asimismo su velocidad de simulación</p> <p>En el modelo de calidad no contempla la influencia de los procesos de sedimentación, re-suspensión y transporte de sólidos y contaminantes asociados, dentro de los conductos de alcantarillado</p>
				<p>Al tener un código abierto, la comunidad puede contribuir en la mejora del programa y crear e incorporar características adicionales</p>	<p>Es una herramienta de análisis, no una herramienta automática de diseño.</p>
				<p>Permite simular tanto la cantidad como la calidad del agua</p>	
	<p>Desde la planificación de sistemas de alcantarillado urbano hasta el análisis de resolución de flujos e inundaciones y la optimización de diseños, SewerGEMS ofrece un entorno fácil de utilizar para que los ingenieros puedan analizar, diseñar y operar sistemas de conducción de aguas residuales, sanitarios o combinados, a</p>	<p>Permite el análisis de importe y exporte desde y hacia el programa SWMM</p>	<p>Requiere licencia.</p>	<p>Único programa del mercado que ofrece total libertad de interfaz, con soporte para cuatro plataformas Stand Alone, AutoCAD, MicroStation y ArcGIS</p> <p>Capacidad completa para el análisis de estructuras de control (orificios, vertederos, risers, etc), lo que permite la simulación de complejas estructuras de</p>	<p>Solo se encuentran manuales en inglés que se descargan sin ningún costo</p>

NOMBRE	DESCRIPCIÓN	VINCULACIÓN A OTROS PROGRAMAS	TIPO DE LICENCIA	BENEFICIOS	DESVENTAJAS Y/O LIMITACIONES
	través de herramientas hidráulicas e hidrológicas integradas y de diversos métodos de calibración de modelos de lluvia-escorrentía.	Permite el importe desde documentos como .xls, DXF y .shp		almacenamiento/detención.	
				Análisis matemático robusto para resolver cualquier tipo de transición hidráulica	
				Algoritmo de cálculo para análisis de red superficial de cunetas y sumideros para simular la interacción de la red superficial con la red de colectores de alcantarillado	

Fuente: *Elaboración Propia, 2022.*

## 5 METODOLOGÍA

Para dar cumplimiento a los objetivos planteados en el presente proyecto, se implementaron ciertas fases teniendo como precedente que se trata del desarrollo de un aplicativo procesado por métodos cuantitativos en su mayoría.

A continuación, se ilustran gráficamente las fases que componen la metodología empleada para el desarrollo del proyecto.

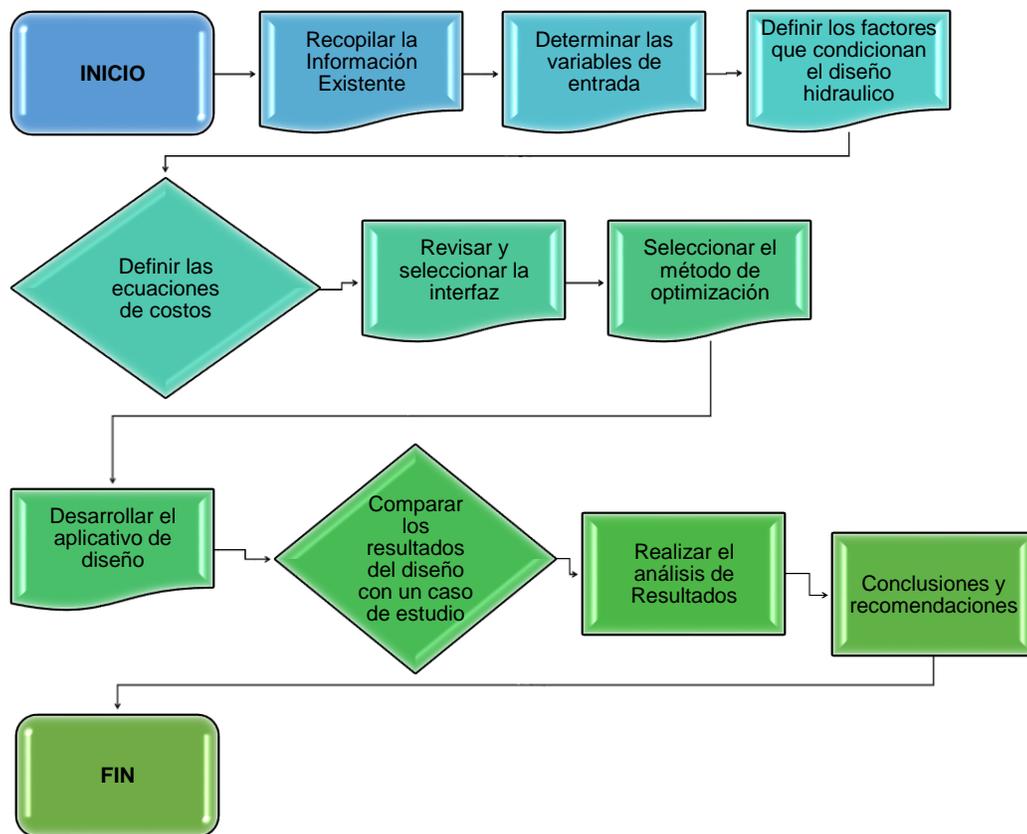


Figura 1. Diagrama General de la Metodología Propuesta. Fuente. Elaboración Propia, 2022

## 5.1 RECOPIACIÓN DE LA INFORMACIÓN EXISTENTE

En primera instancia se realizó la consulta a las diferentes entidades encargadas de la viabilización de proyectos de agua y saneamiento básico. Se indagó sobre los tiempos promedio desde la contratación de una consultoría hasta la ejecución de las obras en los treinta y dos (32) Planes Departamentales de Agua (PDA) del país, con el fin de determinar en qué etapas o fases transcurren los mayores tiempos y cómo el uso del aplicativo desarrollado en el presente estudio, los reduciría en proyectos de pequeña escala.

A continuación, se relaciona la respuesta dada por las entidades que allegaron la información.

*Tabla 2. Información Recopilada – PDA 'S*

ENTIDAD	PROYECTOS VIABILIZADOS	TOTAL INVERSIÓN	POBLACIÓN BENEFICIADA (Hab)	TIEMPO ESTIMADO
Empresa Departamental de Servicios Públicos de Casanare – ACUATODOS S.A. E.S.P	29 2014 - 2020	\$269.937.769.832.55	295,221	6 a 7 meses entre la fase de estudios y diseños y la fase de contratación
Empresa de Servicios Públicos del Guainía S.A. E.S.P – ESCALAR S.A. E.S.P	9	\$ 25.202.195.474	2,303	2 meses y medio hasta 3 años dependiendo de la fuente de financiación
Sociedad de Acueductos, Alcantarillados y Aseo - AGUAS DEL HUIILA S.A. E.S.P	14 (Regalías) 2009 - 2020	\$65.428.927.193	213,735	Depende de la gestión predial, el cierre financiero, situación de emergencias, situaciones particulares de los consultores, autorizaciones, etc.
Gobernación del Putumayo – Mecanismo Departamental de	6	\$8.706.032.863.79	19,666	6 a 20 meses.

ENTIDAD	PROYECTOS VIABILIZADOS	TOTAL INVERSIÓN	POBLACIÓN BENEFICIADA (Hab)	TIEMPO ESTIMADO
Viabilización de Proyectos de APSB				Depende de la fuente de financiación
Aguas y Aseo de Risaralda S.A. E.S.P	7	\$4.442.906.667	59,485	6 meses
Plan Departamental de Aguas del Departamento de Vaupés				12 meses
Aguas del Magdalena				3 a 6 meses la fase de viabilización
Empresa de Servicios Públicos de Santander S.A. E.S.P	62 2013 - 2020	\$108.174.761.877	379,585	10 meses

*Fuente. Elaboración Propia, 2022*

De acuerdo con lo citado, se evidencia que el tiempo promedio desde el ingreso de un proyecto hasta el mecanismo de financiación regional, está entre 6 meses y un año aproximadamente, que es extenso para un municipio y/o entidad que busca realizar mejoras cortas a sus sistemas y que conociendo la vigencia de una administración, se ocuparía alrededor del 25% del tiempo únicamente en formulación, adicional al tiempo requerido para la contratación de la obra y su construcción, dificultando que las metas estipuladas en un plan de desarrollo se puedan cumplir con éxito. Para casos en donde la inversión es significativa, y se planifica abordar infraestructura nueva en gran parte del sistema, la financiación con recursos de la nación puede ser de gran utilidad, mientras que para obras menores se podría manejar con recursos propios a partir de un análisis técnico y financiero que se logre desarrollar desde la entidad.

## 5.2 DEFINICIÓN DE VARIABLES DE ENTRADA

### 5.2.1 INFORMACIÓN GENERAL

Como producto principal del presente trabajo de grado, se construyó un aplicativo en formato Excel con programación en Visual Basic, conformado por 6 libros los cuales corresponden a:

1. **Base de datos:** Contiene las bases de datos que se emplean para el cálculo de población, caudales, topografía, costos generales, costos de tuberías y cantidades de obra.
2. **Datos de entrada:** Corresponde a los campos que debe diligenciar el usuario para proceder con los respectivos cálculos hidráulicos y económicos.
3. **Registros:** Contiene la base consolidada de la información diligenciada por el usuario en la hoja “Datos de Entrada” para los tramos a analizar.
4. **Cálculos:** Contiene la base de cálculo hidráulico y económico para los tramos a analizar.
5. **Soluciones:** Contiene la síntesis de información para las diez (10) soluciones más viables, junto con su respectiva representación gráfica.
6. **SWMM:** Contiene el esquema general para el cargue de la información en SWMM para la alternativa más viable a nivel hidráulico y económico.

En el presente numeral, se describen los parámetros a ingresar por el usuario para el diseño de los tramos en estudio. Esta información corresponde a la mínima requerida para el cálculo de población y caudales. Es importante mencionar que esta información es iterativa, es decir, se ingresa para el cálculo de un tramo, en caso de que el usuario desee diseñar otro tramo aguas abajo se deberá seleccionar la opción “Crear Tramo”, en esta oportunidad el usuario deberá ingresar la información específica para el mismo.

*Tabla 3. Datos Requeridos – Caracterización del Sector*

PARÁMETRO	SÍMBOLO	UNIDAD	OBSERVACIÓN
Departamento	---	---	Hace referencia al departamento en donde se ubica el municipio en el cual se desarrollará el diseño. El aplicativo cuenta con un desplegable en donde se relacionan los 32 departamentos del país para que el usuario seleccione el correspondiente.
Municipio	---	---	Hace referencia al municipio en el cual se desarrollará el diseño. El aplicativo cuenta con un desplegable en donde se relacionan los 1122 municipios del país para que el usuario seleccione el correspondiente.
Sector de Estudio	---	---	Corresponde a la zona en la cual se desarrollará el estudio, bien sea zona rural o cabecera municipal. El aplicativo cuenta con un desplegable con estas dos opciones para que el usuario seleccione lo correspondiente.
Método de proyección	---	---	Hace referencia a los diferentes métodos definidos en el reglamento técnico del sector de agua potable y saneamiento básico para la proyección de población. En esta casilla, y según el conocimiento general de la zona el usuario podrá seleccionar el método aritmético, exponencial o geométrico.
Altura media del sector	---	m.s.n.m	Corresponde a la cota media en la cual se desarrollará el diseño.

PARÁMETRO	SÍMBOLO	UNIDAD	OBSERVACIÓN
Barrio	---	---	Hace referencia al barrio en el cual se desarrollará el diseño. Esto para tener información particular de la zona.
Dirección			Corresponde a la dirección de la vivienda del usuario
Nombre del Usuario	---	---	Corresponde al nombre del usuario que está haciendo uso del aplicativo.
Año actual	AA	Año	Hace referencia al año en el cual se realiza el estudio o análisis de información.
Año de Diseño	AD	Año	Hace referencia al año horizonte al cual se busca proyectar el sistema
Distancia a escombrera	De	Km	Hace referencia a la distancia entre el sitio en el que se realizará el diseño, y la escombrera certificada más cercana, para la disposición de los residuos en la fase constructiva.

*Fuente. Elaboración Propia, 2022*

## 5.2.2 POZOS DE INSPECCIÓN

Los pozos de inspección son estructuras construidas para unión de uno o más tramos de redes de alcantarillado, con el fin de permitir cambios de alineamiento horizontal y vertical en el sistema, y en muchos casos la inspección y limpieza de la red. Para el óptimo funcionamiento del aplicativo el usuario deberá ingresar la información relacionada a continuación.

### ➤ INFORMACIÓN A INGRESAR POR EL USUARIO

La información a ingresar por el usuario corresponde a la identificación de la estructura que se desee localizar o en su defecto si ya existe, junto con sus coordenadas este y norte, y la cota del terreno. Es importante mencionar que esta información es de fácil acceso para el usuario ya sea por medio de un navegador, o por medio de aplicaciones del celular que tienen esta finalidad.

*Tabla 4. Información de Pozos de Inspección Requerida*

PARÁMETRO	SÍMBOLO	UNIDAD	OBSERVACIÓN
*Pozo Inicial	Pi	---	Nombre y/o identificación única que se le asigna al primer elemento tipo punto.
*Pozo Final	Pf	---	Nombre y/o identificación única que se le asigna al segundo elemento tipo punto.
Coordenada Este	Coord. Este	m	Hace referencia a la coordenada este o coordenada en X de un elemento tipo punto.
Coordenada Norte	Coord. Norte	m	Hace referencia a la coordenada norte o coordenada en Y de un elemento tipo punto.
Cota Terreno	CT	m.s.n.m	Hace referencia a la altitud a nivel de terreno del elemento.

*Fuente. Elaboración Propia, 2022*

\*Nota. El pozo inicial objeto del diseño del primer tramo, se deberá denominar con el número cero “0”, mientras que el pozo final con el número uno “1”, y así sucesivamente para los tramos siguientes, dada la configuración del aplicativo.

### ➤ DATOS CALCULADOS

Una vez ingresada la ubicación espacial de los pozos de inspección o estructuras de interconexión, el aplicativo retorna su valor de profundidad total y cota batea, junto con los cálculos hidráulicos realizados para el tramo. Cabe mencionar que la información presentada para estas estructuras corresponderá al diseño optimizado del tramo.

*Tabla 5. Información de Pozos de Inspección Calculada*

PARÁMETRO	SÍMBOLO	UNIDAD	ECUACIÓN	OBSERVACIÓN
Profundidad Total	Prof	m	$Prof = CT - CB$	La profundidad total del pozo de inspección se calcula teniendo en cuenta la diferencia entre la cota terreno del elemento, y la cota batea de este.
Cota Batea	CB	m.s.n.m	$CB = CC - Diam$	En el caso específico del aplicativo objeto del presente estudio, corresponde a la diferencia entre la cota clave del tramo y el diámetro del mismo.

*Fuente. Elaboración Propia, 2022*

### 5.2.3 TRAMOS

#### ➤ INFORMACIÓN A INGRESAR POR EL USUARIO

La información a ingresar por el usuario corresponde a la topología del tramo, es decir el elemento tipo línea que une dos pozos y/o estructuras de conexión. Así mismo el usuario debe ingresar el tipo de vía en donde se ubicará el tramo objeto del diseño.

*Tabla 6. Información de Tramos Requerida*

PARÁMETRO	SÍMBOLO	UNIDAD	OBSERVACIÓN
Densidad Habitacional	Dviv	Hab/Viv	Se define como producto de la división de la población actual por vivienda. Esta información se puede obtener del perfil del DANE para la zona de estudio, o en su defecto por estudios desarrollados en el área del proyecto.
Dotación Neta	D <sub>NETA</sub>	L/ Hab * Día	Corresponde a la cantidad mínima de agua requerida para satisfacer las necesidades básicas de un suscriptor o de un habitante, dependiendo de la forma de proyección de la

PARÁMETRO	SÍMBOLO	UNIDAD	OBSERVACIÓN
			demanda de agua, sin considerar las pérdidas que ocurran en el sistema de acueducto. La dotación neta está directamente relacionada con la altura sobre el nivel del mar de la zona de estudio.
Cantidad de Viviendas Aferentes	Viv	Und	Hace referencia a la cantidad de viviendas aferentes al tramo de estudio.
Cantidad de Industrias Aferentes	Ind	Und	Hace referencia a la cantidad de industrias aferentes al tramo de estudio.
Cantidad de Locales Comerciales Aferentes	Com	Und	Hace referencia a la cantidad de locales comerciales aferentes al tramo de estudio.
Cantidad de Instituciones Aferentes	Inst	Und	Hace referencia a la cantidad de instituciones aferentes al tramo de estudio.
			De acuerdo con el numeral 1 del artículo 134 de la Resolución 0330 de 2017, el coeficiente de retorno ( $C_R$ ) debe estimarse a partir del análisis de información existente en la localidad y/o de mediciones de campo realizadas por la persona prestadora del servicio.
* Coeficiente de Retorno	$C_R$	Adimensional	Este parámetro hace referencia a la relación que existe entre el caudal medio de aguas residuales y el caudal medio de agua que consume la población.
			De no contar con datos de campo, se debe tomar un valor de referencia según la literatura y las características de la zona de estudio.
*Coeficiente de Aporte Comercial	$C_{ACOM}$	L/s*Ha	Se define según las consideraciones contempladas en el literal D.3.2.2.3. Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico RAS 2000.
*Coeficiente de Aporte Institucional	$C_{AINS}$	L/s*Ha	Se define según las consideraciones contempladas en el literal D.3.2.2.4. Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico RAS 2000.
*Coeficiente de Aporte Industrial	$C_{AIND}$	L/s*Ha	Se define según las consideraciones contempladas en el literal D3.2.2.2 del Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico RAS 2000.
			Hace referencia a: <i>"Todo empalme de una acometida de aguas residuales sobre la red de alcantarillado pluvial o todo empalme de una acometida de aguas lluvias sobre la red de alcantarillado sanitario."</i>
*Coeficiente de Conexiones Erradas	$C_{CE}$	L/s*Ha	De acuerdo con el numeral 5 del artículo 134 de la Resolución 0330 de 2017, los aportes por conexiones erradas deben estimarse a partir de la información existente en la localidad.
			En ausencia de esta información deberá utilizar un valor máximo de 0.2 L/s *Ha.
*Coeficiente de Infiltración	$C_{INF}$	L/s*Ha	De acuerdo con el numeral 6 del artículo 134 de la Resolución 0330 de 2017: <i>"El caudal de infiltración debe estimarse a partir de aforos en el sistema y de consideraciones sobre la naturaleza y permeabilidad"</i>

PARÁMETRO	SÍMBOLO	UNIDAD	OBSERVACIÓN
			Este parámetro hace referencia a: " <i>Proceso por el cual el agua penetra en el suelo y/o en las estructuras que hacen parte de un sistema de alcantarillado</i> ".
*Factor de mayoración	Fm	Adimensional	Corresponde a la mayoración dada por las variaciones en el consumo de agua por parte de la población, para realizar el cálculo del caudal máximo, utilizando como base el caudal medio diario. Según el título D del RAS 2000, <i>El factor de mayoración debe calcularse, hasta donde sea posible, haciendo uso de mediciones de campo, en donde se tengan en cuenta los patrones de consumo de la población y la medición de los caudales en las horas de mayor consumo</i> . Para esto, existen ecuaciones como función del número de habitantes las cuales corresponden a la ecuación de Harmon, Babbit, Flores, los Ángeles, y Tchobanoglous.
Área Promedio por Predio	Ap	Ha	Corresponde al área promedio de los predios presentes en la zona de estudio.
Tipo de Vía	Tv	Adimensional	<p>Hace referencia al tipo de vía en donde se localizará el tramo a diseñar. Con un desplegable, el usuario podrá seleccionar las siguientes opciones: vía en afirmado, flexible, rígido, articulado o zona verde siendo:</p> <p>Afirmado: Capa compacta de material granular o procesada, con gradación que soporta las cargas y esfuerzos del tránsito.</p> <p>Flexible: Compuesto por una capa o carpeta asfáltica. Se emplea una mezcla de agregado grueso o fino (piedra machacada, grava y arena).</p> <p>Rígido: Formado por una losa de concreto sobre una base, o directamente sobre la subrasante.</p> <p>Articulado: Compuesto por una capa de rodadura de adoquines de concreto; la capa base y la de subbase.</p> <p>Zona verde: Espacio libre generalmente cubierto por pasto o rastrojo.</p>
Longitud	L	m	<p>Hace referencia a la longitud del tramo analizado, y definido previamente por dos elementos punto, denominados con su respectivo ID.</p> <p>Según el artículo 145 de la resolución 0330 de 2017 la distancia máxima entre dos cámaras o registros de inspección deberá ser de 120 metros.</p>
Material	---	---	Hace referencia al tipo de material con el cual se busca diseñar la tubería. A través de un desplegable, el usuario tiene la posibilidad de seleccionar entre las siguientes opciones: PVC, GRP, Concreto Simple, Concreto Reforzado y PEAD.

Fuente. *Elaboración Propia, 2022*

\*Nota. Si bien los parámetros prescritos con asterisco “\*” son ingresados por el usuario a partir de las condiciones propias de la zona, el aplicativo presenta valores de referencia según la normatividad vigente, para que sean empleados en caso de que el usuario no tenga certeza de dicha información.

## ➤ DATOS CALCULADOS

Una vez ingresada la información topológica del tramo, y la información de los pozos de inspección o estructuras de interconexión, el aplicativo realizará el cálculo de los parámetros presentados en la siguiente tabla.

Tabla 7. Información de Tramos Calculada

PARÁMETRO	SÍMBOLO	UNIDAD	ECUACIÓN	OBSERVACIÓN
Población Actual	P <sub>A</sub>	Hab	Dviv x Viv	Corresponde a la población de partida, definida a partir de la densidad habitacional y el número de viviendas del tramo de estudio.
Población Futura	P <sub>F</sub>	Hab	Método Aritmético: $P_f = P_{ac} + \%T_c * (\text{Año dis} - \text{Año act})$ Método Geométrico: $P_f = P_{ac} * (1 - \%T_c)^{(\text{Año dis} - \text{Año act})}$ Método Exponencial: $P_f = P_{ac} * \text{Exp } \%T_c * (\text{Año dis} - \text{Año act})$	Dependiendo del método de proyección seleccionado por el usuario en los datos de ingreso, se procede a realizar el cálculo de la población aferente.
Tramo	T-	N/A	N/A	De acuerdo con el artículo 256 de la Resorción 0330 de 2017, se define como: “Colector comprendido entre dos (2) estructuras de conexión”
Cota Clave Inicial	C <sub>ci</sub>	m.s.n.m	$C_{ci} = CT_{ini} - P_{ci}$	De acuerdo con el artículo 256 de la resolución 0330 de 2017 se define como: “Nivel del punto más alto de la sección transversal externa de una tubería o colector”, desde el punto inicial del tramo analizado.
Cota Clave Final	C <sub>cf</sub>	m.s.n.m	$C_{cf} = CT_{fin} - P_{cf}$	De acuerdo con el artículo 256 de la resolución 0330 de 2017 se define como: “Nivel del punto más alto de la sección transversal externa de una tubería o colector”, desde el punto final del tramo analizado.
Profundidad a Clave Inicial	P <sub>ci</sub>	m	$P_{ci} = (CT_{ini} - C_{bi}) - \emptyset$	De acuerdo con el artículo 256 de la Resolución 0330 de 2017 hace referencia a: “Diferencia de nivel entre la superficie del terreno o la rasante de la calle y la cota clave

PARÁMETRO	SÍMBOLO	UNIDAD	ECUACIÓN	OBSERVACIÓN
				<i>del colector</i> ", en el punto inicial del tramo analizado.
Profundidad a Clave Final	P <sub>cf</sub>	m	$P_{cf} = (CT_{inf} - C_{bf}) - \emptyset$	De acuerdo con el artículo 256 de la Resolución 0330 de 2017 hace referencia a: " <i>Diferencia de nivel entre la superficie del terreno o la rasante de la calle y la cota clave del colector</i> ", en el punto final del tramo analizado
Pendiente	S	adm	$S = * \frac{C_{ci} - C_{cf}}{\text{Longitud}}$	Hace referencia a la inclinación longitudinal de una tubería, canal o conducto
Diámetro Interno	D <sub>int</sub>	m	$D_{in} = 1.548 * (n * \frac{Q}{S^{1/2}})^{3/8}$	El diámetro interno de la tubería hace referencia a la sección de tubería por la cual fluirá el agua residual, considerando flujo a tubería llena.
Cota Batea Inicial	C <sub>bi</sub>	m.s.n.m	$C_{bi} = (CT_{ini} - P_{ci}) - \emptyset$	De acuerdo con el artículo 256 de la resolución 0330 de 2017 se define como: " <i>Nivel del punto más bajo de la sección transversal externa de una tubería o colector</i> ", desde el punto inicial del tramo analizado.
Cota Batea Final	C <sub>bf</sub>	m.s.n.m	$C_{bf} = (CT_{fin} - P_{cf}) - \emptyset$	De acuerdo con el artículo 256 de la resolución 0330 de 2017 se define como: " <i>Nivel del punto más bajo de la sección transversal externa de una tubería o colector</i> ", desde el punto final del tramo analizado.
Número de Manning	n	Adm	---	Coefficiente de rugosidad de manning
Caudal Doméstico	QD	L/s	$QD = \frac{C_R * D_{NETA} * P_F}{86400}$	Hace referencia al caudal que se aporta al sistema de alcantarillado desde las viviendas de uso netamente residencial
Caudal Institucional	Q <sub>inst</sub>	L/s	$Q_{inst} = \# \text{Instituciones} * \text{Área prom} * \text{Coef de aporte institucional}$	Hace referencia al caudal que se aporta al sistema de alcantarillado desde instituciones oficiales como son los colegios, jardines, hospitales, ancianatos y bibliotecas.
Caudal Comercial	Q <sub>com</sub>	L/s	$Q_{com} = \# \text{locales com} * \text{Área prom} * \text{Coef de aporte comercial}$	Hace referencia al caudal que se aporta al sistema de alcantarillado desde locales de tipo netamente comercial
Caudal Industrial	Q <sub>ind</sub>	L/s	$Q_{ind} = \# \text{industrias} * \text{Área prom} * \text{Coef de aporte industrial}$	Hace referencia al caudal que se aporta al sistema de alcantarillado desde las industrias
Caudal Medio	Q <sub>md</sub>	L/s	$Q_{md} = Q_{dom} + Q_{ins} + Q_{com} + Q_{ind}$	De acuerdo con el artículo 256 de la Resolución de 0330 de 2017, se define como: " <i>Consumo medio durante veinticuatro (24) horas, obtenido como el promedio de los consumos diarios en un periodo de un año</i> "

PARÁMETRO	SÍMBOLO	UNIDAD	ECUACIÓN	OBSERVACIÓN
Factor de Mayoración	FM	L/s	$FM_{HARMON}=1+\left(\frac{14}{(4+P^{0.5})}\right)$ $FM_{BABBIT}=5/P^{0.2}$ $FM_{FLORES}=3.5/P^{0.1}$ $FM_{ANGELES}=\frac{3.53}{Q_{md}^{0.0914}}$ $FM_{TCHOBANOGLOUS}=\frac{3.70}{Q_{md}^{0.0733}}$	<p>De acuerdo con el artículo 256 de la Resolución de 0330 de 2017 se define como: "Factor <i>que tiene en cuenta las variaciones en el consumo de agua por parte de la población.</i>"</p> <p>Para su determinación se puede hacer uso de alguna de las ecuaciones planteadas en el numeral D.3.2.4. Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico RAS 2000</p>
Caudal Máximo Horario	Q <sub>MH</sub>	L/s	$Q_{MH}=Q_{md} * FM$	De acuerdo con el artículo 256 de la Resolución de 0330 de 2017 se define como: "Consumo <i>máximo durante una hora, observado en un periodo de un año, sin tener en cuenta las demandas contra incendio que se hayan presentado</i> "
Caudal Conexiones Erradas	Q <sub>CE</sub>	L/s	$Q_{CE}=A_{porte_{CE}} * A$	Se obtiene del producto entre los aportes por conexiones erradas y el área total de proyecto
Caudal de Infiltración	Q <sub>INF</sub>	L/s	$Q_{INF}=A_{porte_{INF}} * A$	Se obtiene del producto entre los aportes por infiltraciones y el área total de proyecto
Caudal de Diseño	Q <sub>DIS</sub>	L/s	$Q_{DIS}=Q_{MH}+Q_{INF}+Q_{CE}$	<p>De acuerdo con el artículo 256 de la Resolución de 0330 de 2017 se define como: "Caudal <i>estimado al final del periodo de diseño con el cual se diseñan los equipos, dispositivos y estructuras de un sistema determinado.</i>"</p> <p>*Si el caudal calculado es inferior a 1.5 L/s se emplea como mínimo este valor para los tramos iniciales, caso contrario se emplea el valor calculado.</p>
Profundidad Normal	Y	m	<p>Función objetivo</p> $\Omega R h^{\frac{2}{3}} - \frac{Q_{Dis}}{C_o * S^2} = 0$	Función que determina la profundidad normal en un canal circular. Esta dada por la ecuación de manning.
Ángulo	θ	grados	$\theta = 2\cos^{-1}\left(1 - \frac{2Y}{D_{int}}\right)$	El ángulo medido desde el centro de la sección transversal y los puntos de contacto entre la superficie libre y la circunferencia de la tubería
Área Mojada	Ω	m <sup>2</sup>	$\Omega = \frac{D^2}{8} (\theta - \text{sen } \theta)$	Hace referencia al área encerrada al recorrer los puntos en contacto entre el agua y la tubería
Perímetro Mojado	χ	m	$X = \frac{D * \theta}{2}$	Hace referencia al perímetro de la tubería que está en contacto directo con el liquido
Radio Hidráulico	Rh	m	$R = \frac{\Omega}{\chi}$	Corresponde a la relación entre el área mojada y el perímetro

PARÁMETRO	SÍMBOLO	UNIDAD	ECUACIÓN	OBSERVACIÓN
				mojado de la sección transversal de la tubería. Para el cálculo del Radio Hidráulico se utiliza la tabla de relaciones hidráulicas de acuerdo al Q/QØ y multiplicado por el diámetro de la tubería sobre 4
Caudal a Tubo Lleno	Q <sub>TLL</sub>	L/s	$Q_{TLL} = 0.312 * \frac{D^{\frac{8}{3}} * \left(\frac{S}{100}\right)^{0.5}}{\eta}$	Hace referencia al caudal que pasaría a través de un conducto con cierto diámetro, de cierto material y con una pendiente determinada.
Velocidad a Tubo Lleno	V <sub>TLL</sub>	m/s	$V_{TLL} = \frac{1}{\eta} * \left(\frac{D}{4}\right)^{\frac{2}{3}} * S^{\frac{1}{2}}$	Hace referencia a la velocidad que alcanzaría el agua en un conducto con cierto diámetro, de cierto material y con una pendiente determinada. Está calculada por la ecuación de continuidad.
Velocidad de Diseño	V <sub>DIS</sub>	m/s	$V = \frac{1}{\eta} * Rh^{\frac{2}{3}} * S^{\frac{1}{2}}$	Hace referencia a la velocidad real que existe en el tramo analizado, dependiendo de la relación Caudal del Tramo/Caudal a Tubo Lleno
Fuerza Tractiva	FT	Pa	$\tau = \delta * Rh * S$	Hace referencia al esfuerzo tangencial unitario ejercido por el líquido sobre el colector y, en consecuencia, sobre el material depositado. δ corresponde al peso específico del agua
Caudal de Diseño/Capacidad a Tubo Lleno	Q <sub>DIS</sub> / Q <sub>TLL</sub>	Adm	$Q_{DIS} / Q_{TLL}$	Hace referencia al porcentaje máximo de la tubería que puede llevar aguas residuales, o anterior con el fin de que el 1% restante permita el libre flujo de los gases propias de los alcantarillados.
Régimen de flujo (Número de Froude)	Nf	Adm	$Fr = \frac{0.319 * V_{dis}}{h^{1/2}}$	Hace referencia a la relación entre las fuerzas inerciales y las fuerzas gravitacionales, que representa el efecto de la gravedad sobre el estado de flujo.  El flujo uniforme en una tubería o ducto de un sistema de alcantarillado puede ser:  Fr = 1.0 → Flujo Crítico Fr < 1.0 → Flujo Subcrítico Fr > 1.0 → Flujo Supercrítico

Fuente. Elaboración Propia, 2022

### 5.3 DEFINICIÓN DE FACTORES CONDICIONANTES

Teniendo en cuenta que el alcance del presente aplicativo es la optimización de un sistema de alcantarillado sujeta a restricciones hidráulicas, las alternativas preseleccionadas deben cumplir los rangos descritos en la siguiente tabla y definidos en la normatividad vigente para tal fin.

Tabla 8. Criterios de Diseño

PARÁMETRO	SÍMBOLO	UNIDAD	ECUACIÓN	VALOR	OBSERVACIÓN
Diámetro Mínimo	$\varnothing_{min}$	"	N/A	8 o 6	Según el artículo 140 de la Resolución 0330 de 2017, el diámetro interno real mínimo permitido en redes de alcantarillado sanitario es 170 mm (8"). Para poblaciones menores a 2500 habitantes el diámetro interno real permitido es 140 mm (6").
Relación de Llenado Máxima	Y/D	%	Y/D	85	De acuerdo con el artículo 143 de la Resolución 0330 de 2017, "para permitir la aireación adecuada del flujo de aguas residuales, el valor máximo permisible de la profundidad del flujo para el caudal de diseño en un colector es de 85% del diámetro interno real de este."
Profundidad Mínima de Clave - Zona Verde	$P_{minZV}$	m	---	0.75	De acuerdo con el artículo 256 de la Resolución 0330 de 2017 hace referencia a: "Diferencia de nivel entre la superficie del terreno o la rasante de la calle y la cota clave del colector"
Profundidad Mínima de Clave - Vía Vehicular	$P_{minV}$	m	---	1.20	
Profundidad Máxima a Clave	$P_{máx}$	m	---	5.00	
Pendiente Mínima	$S_{min}$	%	$S = \frac{((C_{bi} - C_{bf})/L) * 100}{100}$	0.12	De acuerdo con el artículo 256 de la Resolución 0330 de 2017 la pendiente hace referencia a: "Inclinación longitudinal de una tubería, canal o conducto"
Pendiente Máxima	$S_{max}$	%	$S = \frac{((C_{bi} - C_{bf})/L) * 100}{100}$	3.00	
Fuerza Tractiva Mínima	$FT_{min}$	kg/m <sup>2</sup>	$\tau = \delta * Rh * S$	0.10	Hace referencia al esfuerzo tangencial unitario ejercido por el líquido sobre el colector y, en consecuencia, sobre el material depositado. $\delta$ corresponde al peso específico del agua
Velocidad mínima	$V_{min}$	m/s	$V = \frac{1}{n} * Rh^{\frac{2}{3}} * S^{\frac{1}{2}}$	0.45	Hace referencia a la velocidad real que existe en el tramo analizado, dependiendo de la relación Caudal del Tramo/Caudal a Tubo Lleno
Velocidad máxima	$V_{max}$			5.00	
Caída Mínima	$C_m$	m	---	0.02	Hace referencia a la diferencia entre las cotas batea del tramo de ingreso a un pozo de inspección y el de salida. Esta

PARÁMETRO	SÍMBOLO	UNIDAD	ECUACIÓN	VALOR	OBSERVACIÓN
					diferencia permite disipar la energía del flujo.
Material	m	adm	---	---	Hace referencia al material en el cual se desea diseñar el tramo. El usuario deberá seleccionarlo a partir de un desplegable cuyas opciones corresponden a: PEAD, PVC, GRP, Concreto Simple y Concreto Reforzado.

Fuente. Elaboración Propia, 2022

Estas restricciones o factores condicionantes a nivel hidráulico, son definidos por el usuario en el aplicativo, previo al cálculo. Se sugiere emplear los relacionados en la tabla anterior, teniendo en cuenta que fueron extraídos del Reglamento del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico.

#### 5.4 ECUACIONES DE COSTOS

Para la estimación presupuestal del tramo a diseñar, se hace necesario el cálculo de cantidades de obra requeridas para la instalación de la tubería y la construcción de las cámaras y/o pozos de inspección, razón por la cual se presentan a continuación las ecuaciones tanto para el cálculo de las mismas, como el cálculo de costos por ítem.

Tabla 9. Cálculo de Cantidades de Obra para Tramos

PARÁMETRO	SÍMBOLO	UNIDAD	ECUACIÓN	OBSERVACIÓN
Domiciliarias	Dom	UND	$\sum \text{Viv} + \text{Ind} + \text{Com} + \text{Inst}$	Derivación que parte de la caja de inspección domiciliaria y llega hasta la red pública de alcantarillado. La cantidad de domiciliarias se encuentra asociada a la sumatoria de la cantidad de viviendas, instituciones, locales comerciales e industrias aferentes al tramo a diseñar
Profundidad Media de Excavación	Hm	m	$Hm = \frac{\sum \text{Cotas Terreno} - \text{Cotas Batea}}{\text{Espesor de cimentación}}$	La profundidad media de excavación hace referencia al promedio entre las cotas iniciales y finales de cada tubería y un valor de espesor de cimentación.
Longitud de Zanja	Lz	m	$Lz = \text{Longitud del tramo} + \text{Factor de seguridad que depende del } \varnothing_{int}$	La longitud de zanja se calcula teniendo en cuenta la longitud del tramo menos el diámetro de cada pozo (el cual depende del diámetro de la tubería)

PARÁMETRO	SÍMBOLO	UNIDAD	ECUACIÓN	OBSERVACIÓN
Ancho de Zanja	Bz	m	$Bz = \emptyset Int + 0.4m$	Se calcula teniendo en cuenta el diámetro de la tubería más 0.4m
Demolición de Pavimento Flexible	Df	m <sup>2</sup>	$Df = Lz * Bz * 0.20$	Se obtiene del producto del ancho de la zanja de tramo por la longitud de la misma y el espesor de la capa asfáltica.
Demolición de Pavimento Rígido	Dr	m <sup>2</sup>	$Dr = Lz * Bz * 0.20$	Se obtiene del producto del ancho de la zanja de tramo por la longitud de la misma y el espesor del pavimento rígido
Demolición de Pavimento Articulado	Da	m <sup>2</sup>	$Da = Lz * Bz * 0.20$	Se obtiene del producto del ancho de la zanja de tramo por la longitud de la misma y el espesor del pavimento articulado.
Superficies de Afectación Pavimento Rígido	Sr	m <sup>2</sup>	$Sr = (Lz * Bz) + (Long Domiciliarias * 6m * Bz)$	Se obtiene de la relación de longitud y ancho de la zanja que se encuentra en pavimento rígido, sumado a la relación entre el largo y el ancho de las domiciliarias
Superficies de Afectación Pavimento Flexible	Sf	m <sup>2</sup>	$Sf = (Lz * Bz) + (Long Domiciliarias * 6m * Bz)$	Se obtiene de la relación de longitud y ancho de la zanja que se encuentra en pavimento flexible, sumado a la relación entre el largo y el ancho de las domiciliarias
Superficies de Afectación Afirmado	Sa	m <sup>2</sup>	$Sa = (Lz * Bz) + (Long Domiciliarias * 6m * Bz)$	Se obtiene de la relación de longitud y ancho de la zanja que se encuentra en afirmado sumado a la relación entre el largo y el ancho de las domiciliarias.
Superficies de Afectación Articulado	St	m <sup>2</sup>	$St = (Lz * Bz) + (Long Domiciliarias * 6m * Bz)$	Se obtiene de la relación de longitud y ancho de la zanja que se encuentra en articulado, sumado a la relación entre el largo y el ancho de las domiciliarias.
Superficies de Afectación zona Verde	Sv	m <sup>2</sup>	$Sv = (Lz * Bz) + (Long Domiciliarias * 6m * Bz)$	Se obtiene de la relación de longitud y ancho de la zanja que se encuentra en zona verde sumado a la relación entre el largo y el ancho de las domiciliarias.
Volumen De Excavación Manual	Ve	m <sup>3</sup>	$Ve = (Lz * Bz) - (Sr * 0.20) - (Sf * 0.20)$	Se obtiene de la relación entre la longitud y el ancho de la zanja y la resta de las superficies afectadas.
Volumen de Excavación Mecánica	Vm	m <sup>3</sup>	$Vm = (Lz * Hm * Bz) - (St + Sv + Sa + Sf + Sr) + Bz * Ancho Domiciliaria * Long Domiciliaria$	Se obtiene a partir de la relación entre la longitud y ancho de zanja, sumado a la relación entre la longitud y ancho de las domiciliarias
Entibado Tipo 1 1.5 m < H < 3 m	E1	m <sup>2</sup>	$E1 = Lz * Hm * 2$	Se obtiene a partir de la relación entre la profundidad

PARÁMETRO	SÍMBOLO	UNIDAD	ECUACIÓN	OBSERVACIÓN
				media de excavación requerida y la longitud de zanja y se magnifica con un factor de 2
Entibado Tipo 2 H > 3 m	E2	m <sup>2</sup>	$E2 = Lz * Hm$	Se obtiene a partir de la relación entre la profundidad media de excavación requerida y la longitud de zanja.
Retiro de Material Sobrante	Rm	m <sup>3</sup>	$Rm = (Ve + Vm) - (Ma * 0.20 * 1.65) + (Dr * 0.20 * 0.20 * 1$	Se obtiene a partir de las sumas de los volúmenes de excavaciones tanto manuales como mecánicas, sumado a los volúmenes de demolición requeridos.
Cimentación de Arena de Peña	Ca	m <sup>3</sup>	$Ca = Lz * Bz * 0.05m$	Se obtiene de la relación entre ancho y largo de la zanja requerida y el espesor de la cimentación
Volumen de Atraque (Arena de Peña)	Va	m <sup>3</sup>	$Va = (0.05 + \emptyset_{int}) * Lz * Bz - \left(\frac{\pi * \emptyset_{int}^2}{4}\right) * Long \ Tramo \ (m)$	Se obtiene a partir del área de excavación para la zanja, menos el área que ocupará la tubería, incluyendo 5 cm de cama para el tubo.
Sub Base Granular	Sg	m <sup>3</sup>	$Sg = Lz * Bz * 0.2$	Se obtiene a partir del área requerida para la zanja por una cama de subbase granular de 20 cm.
Base Granular	Bg	m <sup>3</sup>	$Bg = Lz * Bz * 0.2$	Se obtiene a partir del área requerida para la zanja por una cama de base granular de 20 cm.
Material de Afirmado Tipo INVIAS	Ma	m <sup>3</sup>	$Ma = (Ve + Vm) - (Va + Ca + Sg + Bg)$	Se obtiene a partir de los volúmenes de excavación menos los volúmenes de la cimentación de la tubería.
Reposición de Pavimento Mezcla Asfáltica	Ra	m <sup>3</sup>	$Ra = Lz * Bz * Espesor \ Pav \ Rigido$	Se obtiene de la relación entre el ancho y la longitud de la zanja y el espesor del pavimento rígido.
Reposición de Pavimento Concreto Hidráulico	Rp	m <sup>3</sup>	$Rp = Lz * Bz * Espesor \ Pav \ Rigido$	Se obtiene de la relación entre el ancho y la longitud de la zanja y el espesor del pavimento rígido, de los tramos que se localicen sobre concreto hidráulico.
Reposición de Pavimento Adoquín	Rd	m <sup>3</sup>	$Rd = Lz * Bz * Espesor \ Pav \ Rigido$	Se obtiene de la relación entre el ancho y la longitud de la zanja y el espesor del pavimento rígido, de los tramos que se localicen sobre pavimento adoquín

Fuente. Elaboración Propia, 2022

Tabla 10. Cálculo de Cantidades de Obra para Pozos de Inspección

PARÁMETRO	SÍMBOLO	UNIDAD	ECUACIÓN	OBSERVACIÓN
Cilindro Pozo de Inspección	CP	m	CP = Longitud cilindro Pz 1+ Longitud Cilindro Pz 2	Esta cantidad se obtiene a partir de las profundidades requeridas para cada uno de los pozos de inspección.
Tapa para Pozo de Inspección	TP	Und	TP = Cilindro Pz 1+ Cilindro Pz 2	Se obtiene a partir de la cantidad de pozos de inspección requeridos para el proyecto.
Placa Fondo y Cañuela	PFC	Und	PFC = Cilindro Pz 1+ Cilindro Pz 2	Se obtiene a partir de la cantidad de pozos de inspección requeridos para el proyecto.
Pasos en Acero $\frac{3}{4}$ "	PA	Und	PA = Longitud cilindros Pzs/0.30m	Se obtiene a partir de la profundidad total de cada pozo, y se requiere cada 30 cm.

Fuente. Elaboración Propia, 2022

## 5.5 REVISIÓN Y SELECCIÓN DE INTERFACES

A partir de lo presentado previamente, y el alcance del presente aplicativo, se procedió a revisar una gama de interfaces que se ajustaran mejor a las condiciones de procesamiento de datos y visualización gráfica. A continuación, se presenta una breve descripción de las características de las interfaces analizadas.

### 5.5.1 VISUAL BASIC

Visual Basic es un lenguaje de programación diseñado para el desarrollo de aplicaciones en un entorno gráfico (Gui-Graphical User Interface) Como Windows 98, Windows NT o superior. El término "Visual" hace referencia a que nos movemos en un entorno gráfico, por su parte "Basic" alude al conocido lenguaje BASIC (Beginners All – Purpose Symbolic Instruction Code) del que se conservan diversas palabras claves e instrucciones.

La programación gráfica se puede llevar a cabo directamente ya que el Visual Basic no requerirá de los usuarios la escritura de los códigos de programación. El Visual Basic trabaja a partir de lenguajes RAD, en inglés Rapid Application Development, o desarrollo rápido de aplicaciones específicas para cada necesidad y función. Al mismo tiempo, el Visual Basic, gracias a su simple lenguaje, es adaptable a las plataformas de los sistemas Windows y es fácilmente transformable a otros lenguajes más complejos.

### **5.5.2 VISUAL BASIC NET**

Visual Basic NET es un lenguaje de programación orientado a objetos que cuenta con los beneficios que le brinda .NET Framework, el modelo de programación diseñado para simplificar la programación de aplicaciones en un entorno distribuido: internet. Este lenguaje permite crear aplicaciones de escritorio, Web y móviles, igualmente favorece el desarrollo en multiplataforma, como por ejemplo el que una misma aplicación pueda correr indistintamente en los diferentes sistemas operativos móviles como IOS y Android garantizando la comunicación entre los diferentes dispositivos.

### **5.5.3 JAVA**

Java sirve para crear aplicaciones y procesos en una gran diversidad de dispositivos. Se basa en programación orientada a objetos, permite ejecutar un mismo programa en diversos sistemas operativos y ejecutar el código en sistemas remotos de manera segura.

Su ámbito de aplicación es tan amplio que Java se utiliza tanto en móviles como en electrodomésticos.

### **5.5.4 POWER BUILDER**

Power Builder es un entorno para desarrollar aplicaciones de gestión de bases de datos. Puede trabajar con las bases de datos más utilizadas (Oracle, MySQL, MS SQL Server). Se pueden desarrollar aplicaciones cliente/servidor, aplicaciones distribuidas, y aplicaciones para internet.

Power Builder incluye, dentro de su ambiente integrado de desarrollo, herramientas para crear la interfaz de usuario, generar reportes y tener acceso al contenido de una base de datos.

### **5.5.5 PYTHON**

Es un lenguaje de programación orientado a objetos, con una semántica dinámica integrada al desarrollo web y de aplicaciones informáticas. Es un lenguaje interpretado, lo que indica que no requiere la compilación del código fuente para ejecutarlo, ofreciendo ventajas como la rapidez de desarrollo e inconvenientes como una menor velocidad.

Teniendo en cuenta lo descrito, y dado el alcance académico del presente aplicativo, se seleccionó como interfaz de trabajo, la correspondiente a Visual Basic para aplicaciones a través de macros en Excel.

## **5.6 SELECCIÓN DE MÉTODOS DE OPTIMIZACIÓN**

Los procesos de optimización buscan encontrar la mejor solución para un problema dado. Para el caso puntual del diseño de una red de alcantarillado, un diseño óptimo es aquel que cumpla con todos los parámetros hidráulicos y cuyo costo de construcción sea mínimo. De esta manera, se presentan a continuación, los métodos de optimización que podrían aplicar para la ejecución del aplicativo.

### **5.6.1 PROGRAMACIÓN DINÁMICA**

La programación dinámica es un enfoque que divide el problema de optimización original, con todas sus variables, en un conjunto de problemas de optimización más pequeños, cada uno de los cuales debe resolverse antes de poder identificar la solución óptima general del problema original.

Una red de nodos y enlaces puede representar cada problema de programación dinámica discreto. Los métodos de programación dinámica encuentran la mejor manera de llegar o salir de cualquier nodo de esa red. Los nodos representan posibles estados discretos del sistema que pueden existir y los enlaces representan las decisiones que uno podría tomar para pasar de un estado (nodo) a otro.

Los modelos de programación dinámica involucran estados, etapas y decisiones. Las relaciones entre estados, etapas y decisiones están representadas por redes. Los estados del sistema son nodos y los valores de los estados son los números en los nodos.

Las etapas del sistema son los diferentes componentes o periodos de tiempo. Los vínculos entre los estados inicial y final representan decisiones.

Cada enlace conecta dos nodos, el valor del nodo izquierdo indica el estado de un sistema antes de tomar una decisión y el valor del nodo derecho indica el estado de un sistema después de que se toma una decisión.

### **5.6.2 PROGRAMACIÓN LINEAL**

La programación lineal hace referencia a un método mediante el cual se optimiza, por maximización o minimización, una función objetivo, en donde las variables están elevadas a la potencia 1.

En este caso, las variables de la función están sujetas a una serie de restricciones expresadas a través de un sistema de ecuaciones o inecuaciones lineales.

### **5.6.3 ALGORITMO DE OPTIMIZACIÓN DE DIJKSTRA**

El algoritmo de Dijkstra, también denominado Algoritmo de caminos mínimos, tiene como objetivo determinar la ruta más corta, desde el nodo origen, hasta cualquier nodo de la red. Su metodología se basa en iteraciones, de manera tal que, en la práctica, su desarrollo se dificulta a medida que el tamaño de la red aumenta, dejándolo en clara desventaja, frente a métodos de optimización basados en programación matemática.

Este algoritmo tiene la capacidad de resolver el problema de la ruta más corta, tanto para redes cíclicas, como para redes acíclicas. De manera tal que los bucles que presente una red, no restringen el uso del algoritmo. Así mismo, define etiquetas a partir del nodo origen y para cada uno de los nodos subsiguientes. Estas etiquetas contienen información relacionada con un valor acumulado del tamaño de los arcos y con la procedencia más próxima de la ruta. En el algoritmo de Dijkstra, estas etiquetas son temporales y permanentes. Las etiquetas temporales son aquellas que son susceptibles de modificarse mientras exista la posibilidad de hallar para sí, una ruta más corta; de lo contrario, dicha etiqueta pasa a ser permanente.

### **5.6.4 ALGORITMO DE BELLMAN-FORD**

El algoritmo de Bellman-Ford genera los caminos mínimos desde un nodo de origen de un grafo ponderado al resto de nodos del mismo. Soluciona el problema de la ruta más corta o camino mínimo desde un nodo de origen, de un modo más general que el algoritmo de Dijkstra, ya que permite valores negativos en los arcos. Este algoritmo devuelve un valor booleano (dicotómico), si

encuentra un circuito o lazo de peso negativo. En caso contrario calcula y devuelve el camino mínimo con su coste.

El algoritmo de Dijkstra logra esta misma tarea con un coste de tiempo menor, pero requiere que los pesos de las aristas no sean negativos. Es por esto por lo que el algoritmo de Bellman-Ford se utiliza únicamente cuando hay aristas negativas en el grafo.

A partir de las características descritas anteriormente y dada la complejidad del aplicativo que se busca desarrollar, el método que mejor se ajusta es la "optimización dinámica", teniendo en cuenta que si bien, se desea encontrar una solución óptima global, primero se deberán realizar optimizaciones cortas descartando aquellas que no den cumplimiento a las restricciones establecidas, para de esta manera no saturar las bases de información que se vayan generando con el desarrollo del proceso.

## **5.7 DESARROLLO DEL APLICATIVO**

Conociendo el punto de partida y de llegada, para unas condiciones topográficas y trazado en planta de una red de alcantarillado, pueden existir un número significativo de alternativas de solución respecto a la profundidad y la pendiente de cada tubería. A partir de ello, el problema de diseño optimizado de la red consiste en encontrar el diámetro y las cotas de cada tramo que permitan el cumplimiento de los condicionantes estipulados en la normatividad, que aseguren un costo mínimo respecto a criterios de excavación, rellenos, tuberías, reposición entre otros.

En términos matemáticos se trata de un problema de optimización dinámica discreta de gran escala con restricciones. El análisis de este aplicativo permite planificar las direcciones que cada arco y en conjunto la red deberá tener para el buen desempeño a la vez que se minimicen los costos. El problema de diseño hidráulico se modela como un problema de ruta más corta, en el cual cada grafo considera una combinación factible de diámetro y pendiente de cada red de la serie.

Para facilitar la visualización gráfica de la información contenida en el aplicativo, se presenta a continuación la estructuración, contenido y alcance para cada hoja de cálculo que lo conforma.

Aplicativo para el Diseño Optimizado de Redes de Alcantarillado Sanitario

## EASY PIPE

Trabajo de grado para optar por el título de magíster en Ingeniería Civil con énfasis en Recursos Hidráulicos y Medio Ambiente

PH.D. Germán Ricardo Santos Granados  
Director

**LIMITACIONES**

- Los precios de referencia corresponden al periodo 2022-1.
- El aplicativo incluye los siguientes materiales: GRP, PVC, CONCRETO Y PEAD
- El aplicativo calcula un valor aproximado

Versión 2022.12\_00

ID	NOMBRE	CONTENIDO	VINCULO
1	Base de Datos	Contiene las bases de datos que se emplean para el cálculo de población, caudales, topografía, costos generales y costos de tuberías y cantidades de obra	<a href="#">Base de Datos</a>
2	Datos de Entrada	Corresponde a los campos que debe diligenciar el usuario para proceder con los respectivos cálculos hidráulicos y económicos	<a href="#">Datos de Entrada</a>
3	Registros	Contiene la base consolidada de la información diligenciada por el usuario en la hoja "Datos de Entrada" para los tramos a analizar	<a href="#">Registros</a>
4	Cálculos	Contiene la base de cálculo hidráulico y económico para los tramos a analizar	<a href="#">Cálculos</a>
5	Soluciones	Contiene la síntesis de información para las diez "10" soluciones más viables, junto con su respectiva representación gráfica	<a href="#">Soluciones</a>
6	SWMM	Contiene el esquema general para el cargue de la información en SWMM para la alternativa más viable a nivel hidráulico y económico	<a href="#">SWMM</a>

*Figura 2. Estructuración del aplicativo. Fuente: Elaboración Propia, 2022.*

### 5.7.1 BASES DE DATOS

Para el presente aplicativo, se construyó una base de datos para: Población y topografía, costos generales, costos de tubería y cantidades de obra, cada una de las cuales se describe a continuación:

## Base de datos población y topografía

En esta base de datos, se almacena la información referente a las tasas de crecimiento poblacional para cada uno de los municipios del país, para los métodos aritmético, geométrico y exponencial. Esta información fue construida a partir del análisis de los censos 1993 a 2005 disponibles en el DANE. De esta manera, se permitirá el dimensionamiento del sistema para cualquier localidad del país.

Se establece como salvedad, que teniendo en cuenta el comportamiento demográfico de algunos municipios en donde se evidencia un desplazamiento bien sea de zona rural hacia zona urbana, o en su defecto entre municipios, existen algunos cuya tasa es decreciente, razón por la cual, para estos casos, se definió un condicional para los métodos geométrico y exponencial de 1% y para el método aritmético de 5 personas. Cabe mencionar que la base de datos contiene la información de los 1122 municipios del país. En el Anexo 4. Calculo Tasas de Crecimiento Demográfico se presenta el cálculo de la tasa de crecimiento de cada municipio, mientras que en el aplicativo se presenta el consolidado nacional.

DEPARTAMENTO	MUNICIPIO	TOTAL			CABECERA			RURAL		
		ARITMÉTICO	GEOMÉTRICO	EXPONENCIAL	ARITMÉTICO	GEOMÉTRICO	EXPONENCIAL	ARITMÉTICO	GEOMÉTRICO	EXPONENCIAL
Antioquia	Medellín	30669.10	1.574%	1.561%	31539.07	1.629%	1.616%	-869.97	-1.966%	-2.090%
Antioquia	Abejorral	-226.15	-1.001%	-1.007%	-16.97	-0.318%	-0.319%	-209.18	-1.341%	-1.351%
Antioquia	Abriaquí	-31.12	-1.220%	-1.235%	-1.25	-0.308%	-0.310%	-29.87	-1.671%	-1.694%
Antioquia	Alejandro	-48.13	-1.158%	-1.166%	-5.97	-0.404%	-0.404%	-42.17	-1.898%	-1.919%
Antioquia	Amagá	250.43	0.983%	0.978%	262.30	2.183%	2.159%	-11.87	-0.089%	-0.091%
Antioquia	Amalfi	152.08	0.773%	0.770%	159.62	1.388%	1.378%	-9.04	-0.091%	-0.091%
Antioquia	Andes	236.50	0.561%	0.559%	244.07	1.649%	1.635%	-7.57	-0.032%	-0.033%
Antioquia	Angelópolis	95.93	1.292%	1.282%	115.60	3.565%	3.501%	-19.67	-0.490%	-0.497%
Antioquia	Angostura	-43.30	-0.362%	-0.364%	-20.08	-1.367%	-1.376%	-23.22	-0.236%	-0.238%
Antioquia	Anorí	160.42	1.103%	1.095%	118.57	2.805%	2.767%	41.85	0.430%	0.429%

Figura 3. Base de datos de población. Fuente: Elaboración Propia, 2022.

Para el componente topográfico, se creó una red de triángulos irregulares (TIN), con el fin de representar la morfometría de la superficie, extrayendo la pendiente mínima, máxima y media de cada municipio, de esta manera, el usuario podrá definir previo a la ejecución del diseño, la pendiente de trabajo y/o analizar a partir de los resultados obtenidos, la concordancia de pendientes para la zona de trabajo.

DEPARTAMENTO	MUNICIPIO	PENDIENTE MÍNIMA	PENDIENTE MÁXIMA	PENDIENTE MEDIA
Antioquia	Medellín	0.000%	485.379%	33.151%
Antioquia	Abejorral	0.000%	427.946%	43.293%
Antioquia	Abriaquí	0.000%	409.064%	50.299%
Antioquia	Alejandro	0.000%	122.785%	28.204%
Antioquia	Amagá	0.000%	313.150%	44.607%
Antioquia	Amalfi	0.000%	309.320%	34.538%
Antioquia	Andes	0.000%	512.122%	52.825%
Antioquia	Angelópolis	0.000%	388.459%	53.377%
Antioquia	Angostura	0.000%	166.748%	28.742%
Antioquia	Anorí	0.000%	364.750%	35.370%

Figura 4. Base de datos de topografía. Fuente: Elaboración Propia, 2022.

➤ **Base de datos costos generales**

En esta base de datos, se almacena la información para algunos de los ítems más relevantes tenidos en cuenta para la instalación de tuberías de alcantarillado, a partir de las listas de precios disponibles en las gobernaciones de cada departamento del país, estos ítems corresponden a: localización y replanteo (ml), domiciliarias (Und), demolición de pavimento flexible (m<sup>3</sup>), demolición pavimento rígido (m<sup>3</sup>), demolición pavimento articulado (m<sup>3</sup>), excavación manual (m<sup>3</sup>), excavación mecánica (m<sup>3</sup>), entibado discontinuo 1.5 a 3.5 (m<sup>2</sup>), entibado metálico (m<sup>2</sup>), relleno material sitio compactado, base compactado material triturado (m<sup>3</sup>), sub-base compactado material seleccionado (m<sup>3</sup>), material afirmado tipo INVIAS, retiro de saldos en sitio (m<sup>3</sup> – km), disposición de material (m<sup>3</sup>), reposición de pavimento mezcla asfáltica (m<sup>3</sup>), reposición pavimento concreto hidráulica (m<sup>3</sup>), reposición de pavimento adoquín (m<sup>3</sup>), cilindro pozo de inspección (ml), tapa para pozo de inspección (Und), placa fondo y cañuela (Und) y pasos en acero ¾" (Und).

La estimación de los precios de referencia se realizó a partir de un factor, que relaciona la distancia desde las capitales del país hacia cada uno de sus municipios, teniendo en cuenta que el listado de precios disponible, en su mayoría, corresponde expresamente a las capitales. En este orden de ideas, para el municipio más cercano a cada capital, se le asignó un factor de 0.2, a medida en que el municipio se localiza a mayor distancia, se va incrementando este factor. De esta forma, cada valor para los ítems descritos se multiplica por el factor.

DEPARTAMENTO	MUNICIPIO	LOCALIZACIÓN Y REPLANTEO (ML)	DOMICILIARIAS	DEMOLICIÓN PAVIMENTO FLEXIBLE (M3)	DEMOLICIÓN PAVIMENTO RÍGIDO (M3)	DEMOLICIÓN PAVIMENTO ARTICULADO (M3)	EXCAVACIÓN MANUAL (M3)	EXCAVACIÓN MECÁNICA (M3)
Antioquia	Medellín	\$ 1,988.00	\$ 280,900.00	\$ 131,202.00	\$ 109,335.00	\$ 19,705.15	\$ 16,906.00	\$ 4,904.91
Antioquia	Abejorral	\$ 4,794.59	\$ 677,464.71	\$ 316,428.35	\$ 263,690.29	\$ 47,524.19	\$ 40,773.29	\$ 11,829.49
Antioquia	Abriaquí	\$ 6,548.71	\$ 925,317.65	\$ 432,194.82	\$ 360,162.35	\$ 64,911.08	\$ 55,690.35	\$ 16,157.35
Antioquia	Alejandro	\$ 4,650.92	\$ 657,164.37	\$ 306,946.53	\$ 255,788.77	\$ 46,100.12	\$ 39,551.52	\$ 11,475.02
Antioquia	Amagá	\$ 3,271.01	\$ 462,186.72	\$ 215,876.90	\$ 179,897.42	\$ 32,422.42	\$ 27,816.76	\$ 8,070.43
Antioquia	Amalfi	\$ 6,936.28	\$ 980,081.34	\$ 457,773.70	\$ 381,478.08	\$ 68,752.76	\$ 58,986.31	\$ 17,113.60
Antioquia	Andes	\$ 7,668.00	\$ 1,083,471.43	\$ 506,064.86	\$ 421,720.71	\$ 76,005.58	\$ 65,208.86	\$ 18,918.94
Antioquia	Angelópolis	\$ 3,267.67	\$ 461,714.62	\$ 215,656.40	\$ 179,713.66	\$ 32,389.31	\$ 27,788.35	\$ 8,062.19
Antioquia	Angostura	\$ 6,080.94	\$ 859,223.53	\$ 401,323.76	\$ 334,436.47	\$ 60,274.58	\$ 51,712.47	\$ 15,003.25
Antioquia	Anorí	\$ 7,808.33	\$ 1,103,299.66	\$ 515,326.17	\$ 429,438.48	\$ 77,396.53	\$ 66,402.22	\$ 19,265.17

DEPARTAMENTO	MUNICIPIO	ENTIBADO DISCONTINUO 1.5 A 3.5 (M2)	ENTIBADO METÁLICO (M2)	RELLENO MATERIAL SITIO COMPACTADO 90%	BASE COMACTADO MATERIAL TRITURADO (M3)	SUB-BASE COMPACTADO MATERIAL SELECCIONADO (M3)	MATERIAL DE AFIRMADO TIPO INVIAS	RETIRO DE SALDOS EN SITIO (M3-KM)
Antioquia	Medellín	\$ 26,901.00	\$ 42,658.00	\$ 60,694.14	\$ 131,095.52	\$ 113,965.78	\$ 70,677.21	\$ 2,225.58
Antioquia	Abejorral	\$ 64,878.88	\$ 102,881.06	\$ 146,379.98	\$ 316,171.55	\$ 274,858.65	\$ 170,456.80	\$ 5,367.58
Antioquia	Abriaquí	\$ 88,615.06	\$ 140,520.47	\$ 199,933.64	\$ 431,844.07	\$ 375,416.69	\$ 232,819.04	\$ 7,331.32
Antioquia	Alejandro	\$ 62,934.78	\$ 99,798.21	\$ 141,993.69	\$ 306,697.42	\$ 266,622.46	\$ 165,349.04	\$ 5,206.74
Antioquia	Amagá	\$ 44,262.32	\$ 70,188.54	\$ 99,864.81	\$ 215,701.70	\$ 187,516.80	\$ 116,290.74	\$ 3,661.92
Antioquia	Amalfi	\$ 93,859.62	\$ 148,836.99	\$ 211,766.44	\$ 457,402.18	\$ 397,635.23	\$ 246,598.13	\$ 7,765.22
Antioquia	Andes	\$ 103,761.00	\$ 164,538.00	\$ 234,105.97	\$ 505,654.15	\$ 439,582.29	\$ 272,612.10	\$ 8,584.38
Antioquia	Angelópolis	\$ 44,217.11	\$ 70,116.85	\$ 99,762.80	\$ 215,481.38	\$ 187,325.27	\$ 116,171.95	\$ 3,658.18
Antioquia	Angostura	\$ 82,285.41	\$ 130,483.29	\$ 185,652.66	\$ 400,998.06	\$ 348,601.21	\$ 216,189.11	\$ 6,807.66
Antioquia	Anorí	\$ 105,659.89	\$ 167,549.15	\$ 238,390.26	\$ 514,907.95	\$ 447,626.94	\$ 277,601.08	\$ 8,741.48

DEPARTAMENTO	MUNICIPIO	DISPOSICIÓN DE MATERIAL (M3)	REPOSICIÓN DE PAVIMENTO MEZCLA ASFÁLTICA (m3)	REPOSICIÓN DE PAVIMENTO CONCRETO HIDRÁULICO (m3)	REPOSICIÓN DE PAVIMENTO ADOQUIN (m3)	CILINDRO POZO DE INSPECCIÓN (ML)	TAPA PATA POZO DE INSPECCIÓN (UND)	PLACA FONDO Y CAÑUELA (UND)	PASOS EN ACERO 3/4" (UND)
Antioquia	Medellín	\$ 5,250.00	\$ 879,747.00	\$ 877,816.00	\$ 112,539.00	\$ 1,097,577.00	\$ 501,858.00	\$ 876,516.00	\$ 205,389.00
Antioquia	Abejorral	\$ 12,661.76	\$ 2,121,742.76	\$ 2,117,085.65	\$ 271,417.59	\$ 2,647,097.47	\$ 1,210,363.41	\$ 2,113,950.35	\$ 495,349.94
Antioquia	Abriaquí	\$ 17,294.12	\$ 2,897,990.12	\$ 2,891,629.18	\$ 370,716.71	\$ 3,615,547.76	\$ 1,653,179.29	\$ 2,887,346.82	\$ 676,575.53
Antioquia	Alejandro	\$ 12,282.35	\$ 2,058,164.41	\$ 2,053,646.84	\$ 263,284.52	\$ 2,567,776.78	\$ 1,174,094.68	\$ 2,050,605.50	\$ 480,506.70
Antioquia	Amagá	\$ 8,638.24	\$ 1,447,516.49	\$ 1,444,339.27	\$ 185,169.21	\$ 1,805,929.22	\$ 825,746.19	\$ 1,442,200.28	\$ 337,942.57
Antioquia	Amalfi	\$ 18,317.65	\$ 3,069,503.82	\$ 3,062,766.41	\$ 392,657.08	\$ 3,829,529.16	\$ 1,751,020.52	\$ 3,058,230.62	\$ 716,617.75
Antioquia	Andes	\$ 20,250.00	\$ 3,393,309.86	\$ 3,385,861.71	\$ 434,079.00	\$ 4,233,511.29	\$ 1,935,738.00	\$ 3,380,847.43	\$ 792,214.71
Antioquia	Angelópolis	\$ 8,629.41	\$ 1,446,037.93	\$ 1,442,863.95	\$ 184,980.07	\$ 1,804,084.55	\$ 824,902.73	\$ 1,440,727.14	\$ 337,597.38
Antioquia	Angostura	\$ 14,058.82	\$ 2,690,990.82	\$ 2,685,084.24	\$ 344,236.94	\$ 3,357,294.35	\$ 1,535,095.06	\$ 2,681,107.76	\$ 628,248.71
Antioquia	Anorí	\$ 20,620.59	\$ 3,455,409.65	\$ 3,447,825.20	\$ 442,022.93	\$ 4,310,987.31	\$ 1,971,163.27	\$ 3,442,719.15	\$ 806,712.76

Figura 5. Base de datos costos generales. Fuente: Elaboración Propia, 2022.

### ➤ Base de costos de tubería

En esta base de datos, se almacena la información de tubería para diferentes materiales (PVC, GRP, Concreto Simple, Concreto Reforzado y PEAD), la cual corresponde a diámetro, espesor, manning, longitud comercial, peso y precio. Esta información es empleada tanto para el componente hidráulico como para el económico, en donde a partir del tipo de material preseleccionado por el usuario, se calcula el diámetro de tubería y por ende los costos asociados a su suministro.

MATERIAL	DIÁMETRO	DIÁMETRO INTERNO (m)	ESPESOR (m)	DIÁMETRO EXTERNO (m)	MANNING	LONGITUD TUBO (m)	PESO TUBO (kg/Un)	PESO TUBO (kg/m)	PRECIO POR TUBO
PVC	4	0.099	0.01	0.11	0.010	6.00	5.76	0.96	\$ 16.287
PVC	6	0.145	0.01	0.16	0.010	6.00	11.04	1.84	\$ 31.812
PVC	8	0.182	0.01	0.20	0.010	6.00	15.96	2.66	\$ 43.445
PVC	10	0.227	0.01	0.25	0.01	6.00	23.22	3.87	\$ 63.454
PVC	12	0.284	0.02	0.32	0.01	6.00	34.14	5.69	\$ 93.819
PVC	14	0.327	0.01	0.36	0.010	6.00	41.46	6.91	\$ 134.434
PVC	16	0.362	0.02	0.40	0.010	6.00	52.92	8.82	\$ 164.428
PVC	18	0.407	0.02	0.45	0.010	6.00	70.92	11.82	\$ 212.358
PVC	20	0.452	0.02	0.50	0.010	6.00	85.62	14.27	\$ 276.853

Figura 6. Base de costos de tubería. Fuente: Elaboración Propia, 2022.

### ➤ Base de datos cálculo de cantidades

En esta base de datos, se almacena la información para el cálculo de cantidades tipo para sistemas de alcantarillado, las cuales permitirán cuantificar las cantidades de obra asociadas a cada tramo. Estos parámetros corresponden a: espesor de cimentación, atraque por encima de tubo, subbase granular, base granular, espesor de carpeta asfáltica, espesor pavimento rígido, profundidad mínima, coeficiente de expansión del concreto, coeficiente de expansión del asfalto, porcentaje de aprovechamiento de excavación, ancho de excavación, diámetro de pozos, longitud media domiciliarias y ancho de zanja de acometidas.

PARÁMETROS	VALOR	UNIDAD
Espesor de Cimentación	0.05	m
Atraque por encima de tubo	0.05	m
Sub Base Granular	0.20	m
Base Granular	0.20	m
Espesor Carpeta Asfáltica	0.05	
Espesor Pavimento Rígido	0.20	m
Profundidad Mínima	1.00	m
Coef. Expansión del suelo	1.20	
Coef. Expansión del concreto	1.65	
Coef. Expansión del asfalto	1.60	
% aprovechamiento excavación	0.80	
Ancho de excavación	0.50	m
Diámetro de pozos	1.20	m
Longitud medida domiciliarias	6.00	m
Ancho zanja acometidas	0.90	m

Figura 7. Base de datos cálculo de cantidades. Fuente: Elaboración Propia, 2022.

A partir de las bases de datos descritas, el aplicativo a través de macros, relaciona la información para cada una de las condiciones particulares de los pozos y tramos según el número de opciones y/o alternativas de alineamiento calculado.

En el Anexo 1. Aplicativo Diseño Optimizado, hoja “1. Base de Datos”, se pueden apreciar las bases de datos presentadas anteriormente.

### 5.7.2 ELEMENTOS MATEMÁTICOS DE UNA RED DE ALCANTARILLADO

En esta sección se describen los principales elementos para la modelación de redes de alcantarillado. Se representarán las redes de alcantarillado mediante un modelo matemático llamado grafo dirigido (dígrafo) planar, este se define como un par  $G = (N,A)$  en el que N es el conjunto de nodos, y A representan las tuberías. El conjunto N son las intersecciones que representan las cámaras de inspección, intermedio o de llegada al punto de descarga

El planteamiento de este aplicativo se dará en tres etapas:

➤ **FASE 1: PLANTEAMIENTO DE LA RED**

Según lo descrito por Larry W. Mays y Yeou – Kong Tung, los nodos representan posibles estados discretos del sistema que pueden existir y los enlaces representan las decisiones que se podrían tomar para llegar de un estado (nodo) a otro. Los modelos de programación dinámica incluyen estados, etapas y decisiones. Las relaciones entre estas tres, se representa mediante redes, tal como se muestra en la siguiente imagen.

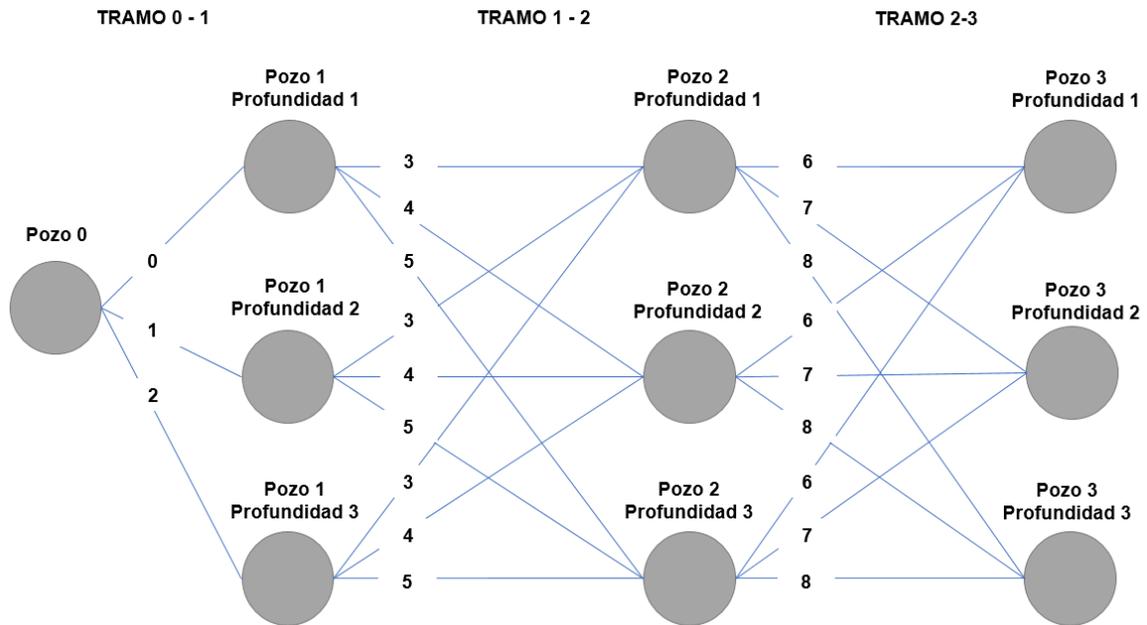


Figura 8. Planteamiento de la Red. Fuente: Elaboración Propia, 2022.

Los nodos representan profundidad a las cuales se podría instalar la tubería a partir del delta de diferencia calculado. Los arcos representan las tuberías, desde un nodo en un primer pozo de inspección hasta un nodo en el pozo de inspección sucesivo.

Para el presente proyecto, los pozos de inspección serán representados imaginariamente como un grupo de nodos. Cada nodo representa una cota calculada a partir del “delta” o incremento en la profundidad, definido de la siguiente manera:

$$dy = P_{max} - P_{min}$$

En donde:

dy: “Delta” o incremento en la profundidad (m)

P<sub>max</sub>. Profundidad máxima de instalación de la tubería (m)

Pmin: Profundidad mínima de instalación de la tubería (0.75 m zonas verdes, 1.20 m zonas vehiculares).

De esta misma forma, se calculará el número de alternativas posibles teóricas para cada tramo así:

$$T = \frac{P_{\max} \cdot P_{\min}}{dy} + 1$$

En donde:

T: Número de alternativas por tramo

Finalmente, el número de caminos (soluciones globales) posibles del sistema se calculará como:

$$S = T^t$$

En donde:

S: Número de caminos posibles del sistema

T: Número de alternativas por tramo

t: Número de tramos hidráulicamente viables del sistema

La notación empleada para los nodos corresponde a:

- ✓ N: Conjunto de nodos  
 $N = \{k_0, k_1, k_2, k_3, \dots, k_n\}$
- ✓ Nx: Conjunto de nodos que pertenece al pozo x  
 $N_x = \{k_1^x, k_2^x, k_3^x, \dots, k_n^x\}$

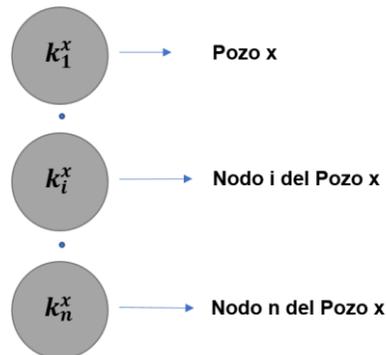


Figura 9. Conjunto de nodos para un mismo pozo. Fuente: Elaboración Propia, 2022.

Para efectos del aplicativo, cada nodo va a tener un atributo de partida que corresponde a la cota clave calculada a partir del delta de profundidad descrito anteriormente, de esta manera, el

primer pozo de la red tendrá una única cota de partida, mientras que el siguiente pozo, tendrá  $n$  cotas según el número de soluciones calculadas.

El grafo también está conformado por arcos  $(k_i^x, k_j^{x+1})$ , que se definen entre dos nodos  $k_i^x \in N_x$  y  $k_j^{x+1} \in N_{x+1}$ , donde  $k_i^x$  es el  $i$ -ésimo nodo del pozo  $x$  y  $k_j^{x+1}$  es el  $j$ -ésimo nodo del pozo siguiente  $x+1$ . Cada arco tendrá sus características hidráulicas y costo asociado que representa el costo total de construcción, definido esto como la suma entre el costo de la tubería a partir del diámetro y pendiente calculado y las cantidades de obra civil presentadas en las tablas 9 y 10.

La notación empleada para los arcos corresponde a:

- ✓  $\gamma$ : Conjunto de arcos
- $\gamma: \{(k_i^x, k_j^{x+1}) \mid k_i^x \in N_x, k_j^{x+1} \in N_{x+1}\}$
- $c(k_i^x, k_j^{x+1})$ : Costo del arco  $(k_i^x, k_j^{x+1}) \in \gamma$

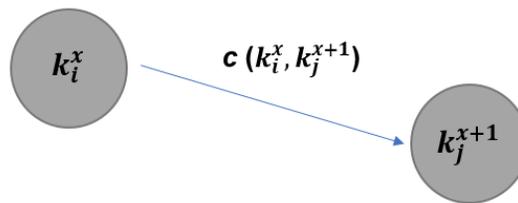


Figura 10. Representación de un arco. Fuente: Elaboración Propia, 2022.

Tal como se mencionó previamente, quien carga la información base es el nodo, por tanto, para cada arco se calculará el diámetro y pendiente y a partir de ellos, los parámetros hidráulicos descritos en la *Tabla 8. Criterios de Diseño*.

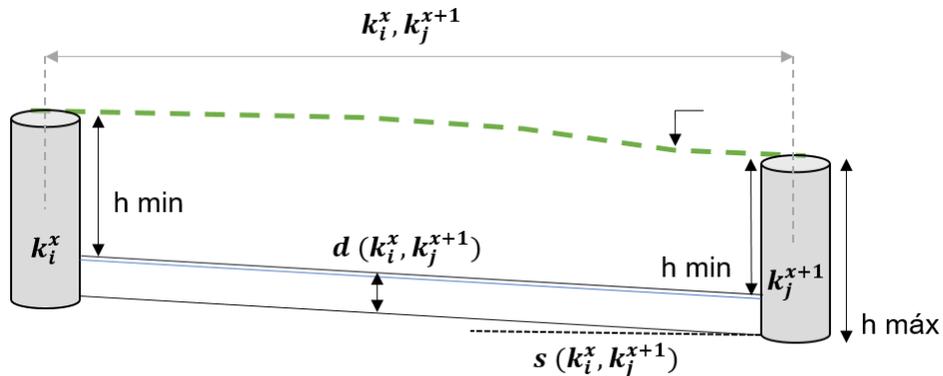


Figura 11. Representación de tramo de alcantarillado. Fuente: Elaboración Propia, 2022.

Las funciones objetivo-planteadas para el aplicativo buscarán eliminar los arcos que no cumplan con las restricciones hidráulicas definidas, así como aquellos, en donde la sumatoria de costo total sea superior para cada tramo, con el fin de reducir el almacenamiento de información.

A continuación, se representa la modelación de dos tramos, para cuatro (4) alternativas de solución. Los cuatro arcos del primer tramo salen del mismo nodo, pero cada uno llega a un nodo diferente, debido a que cada uno representa una cota distinta definida a partir del delta de profundidad definido. Como se puede observar, cada arco (flecha) representa una tubería, con una pendiente específica y posiblemente, según el caudal que transporta, un diámetro diferente. Con base en esto, se calculan los parámetros hidráulicos y costos asociados para cada arco.

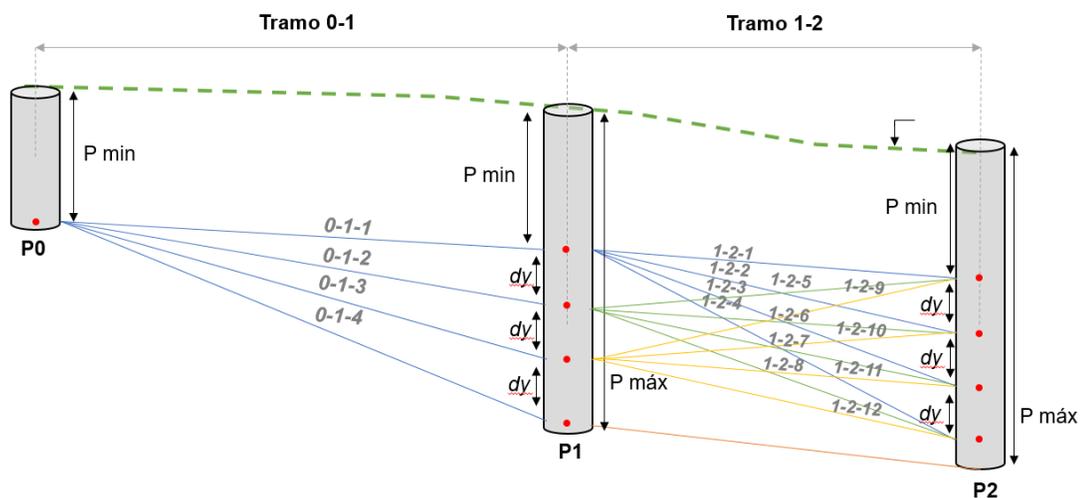


Figura 12. Representación de dos tramos de una tubería. Fuente: Elaboración Propia, 2022.

A medida que se amplía la cantidad de tramos a analizar, se va complejizando el problema dado el aumento de alternativas de diseño. Para encontrar la alternativa óptima, se hace necesario conocer el costo total de cada una y buscar la más económica. El costo total de una alternativa es la suma del costo de cada una de las tuberías que componen la serie. A cada nodo se le atribuye un nuevo valor que corresponde a un costo acumulado. De esta manera, la solución se encuentra cuando el nodo cuyo costo acumulado es el mínimo. Una vez se encuentra el nodo de mínimo costo, para el primer tramo, se emplean los resultados obtenidos para el cálculo del siguiente pozo con sus respectivos nodos, de esta manera se van descartando aquellos que implican costos mayores. El proceso se continua hasta llegar al último pozo. De esta forma se traza un camino en el grafo que es el que representa la ruta más corta y por tanto el diseño óptimo.

En la siguiente figura, se presenta la solución del grafo donde la suma acumulada de los costos fue mínima para el nodo 2 del pozo 1, el cual se encuentra ubicado en la segunda profundidad posible. Seguidamente, se busca el nodo posterior, que según las restricciones debe tener una

profundidad mayor para permitir el cálculo de pendiente y por ende de diámetro. Para el ejemplo, el nodo que llevó al camino de la ruta más corta fue el nodo 4 del pozo 2, que está ubicado en la cuarta profundidad.

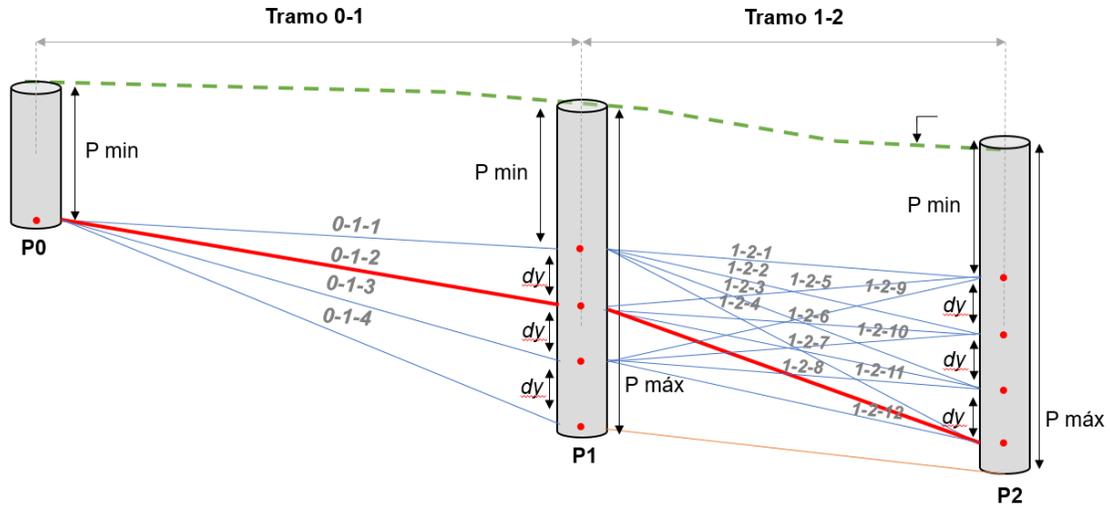


Figura 13. Solución del grafo. Fuente: Elaboración Propia, 2022.

Para la ejecución de esta primera fase, el usuario deberá ingresar la información topográfica de los pozos de inspección, así como una serie de datos relativos a la zona de estudio, los cuales incluyen información sobre conexiones domiciliarias, centros educativos, centros de salud, actividad económica de la distribución social, entre otros, los cuales se emplean para estimar el caudal que se asignará a la red.

La información se ingresa en la pestaña denominada “2. Datos de Entrada”. A medida que se registra un tramo, se va oprimiendo el botón “Crear Tramo”, de esta manera la información ingresada se va almacenando en la hoja de base de datos. Cuando se desee adicionar un nuevo tramo, se deberá oprimir el botón “Reiniciar Proceso”, una vez se oprime, se limpian los campos que se deberán diligenciar para el siguiente tramo. Este procedimiento se realiza para cada uno de los tramos que se deseen analizar.

UBICACIÓN DEL PROYECTO	
PARÁMETRO	VALOR
Departamento	Huila
Municipio	La Plata
Sector de Estudio	Cabecera
Pendiente Media del Sector	35.57%
Método de Proyección	Geométrico
Tasa de Crecimiento DANE	0.02
	2.153
Altura Media del Sector (m.s.n.m)	1200
Barrio	
Dirección	
Nombre Usuario	

CARACTERÍSTICAS ESPECÍFICAS DEL PROYECTO			
PARÁMETRO	UNIDAD	SÍMBOLO	VALOR
Año Actual	Año	AA	2020
Población Actual	Hab	PA	2500
Año de Diseño	Año	AD	<b>2045</b>
Población Futura	Hab	PF	4258
Dotación Neta	L/ Hab * Día	Dneta	130
Densidad Habitacional	Hab/Viv	Dviv	5.00
Cantidad de Viviendas Aferentes al Tramo	Und	Viv	500.000
Cantidad de Industrias Aferentes al Tramo	Und	Ind	20.000
Cantidad de Locales Comerciales Aferentes al Tramo	Und	Com	8.000
Cantidad de Instituciones Aferentes al Tramo	Und	Inst	5.000
Área Promedio por Predio	Ha	Ap	0.012
Coefficiente de Retorno	adm	R	0.85
Coefficiente de Aporte Comercial	L/s*Ha	Cc	0.50
Coefficiente de Aporte Institucional	L/s*Ha	Cin	0.50
Coefficiente de Aporte Industrial	L/s*Ha	Cid	0.50
Coefficiente de Conexiones Erradas	L/s*Ha	Ce	0.20
Coefficiente de Infiltración	L/s*Ha	Ci	0.20
Factor de Mayoración	Adm	Fm	Harmon
Tipo de Vía	Adm	Tv	Zona Verde
Distancia a Escombrera	Km	De	2
Pozo Inicial	---	Pi	2
Pozo Final	---	Pf	3
Cota Terreno Inicial	m.s.n.m	Cti	2573.70
Cota Terreno Final	m.s.n.m	Ctf	2572.00
Longitud	m	L	100.00
Coordenada Este Pozo Inicial	m	C.E.I	948286.51
Coordenada Norte Pozo Inicial	m	C.N.I	994789.70
Coordenada Este Pozo Final	m	C.E.F	948308.39
Coordenada Norte Pozo Final	m	C.N.F	994767.31

Figura 14. Características Específicas del proyecto. Fuente: Elaboración Propia, 2022.

En esta misma hoja, se definen los criterios de diseño, los cuales hacen referencia a las restricciones que se tendrán en cuenta para el análisis hidráulico de nodos y arcos.

CRITERIOS DE DISEÑO	
Diámetro Mínimo	8
Relación de Llenado Máxima (Y/D)	85%
Profundidad Mínima de Clave (m) - Zona Verde	0.75
Profundidad Mínima de Clave (m) - Vía Vehicular	1.20
Profundidad Máxima a Clave (m)	5.00
Pendiente Mínima (%)	0.50%
Pendiente Máxima (%)	2.00%
Fuerza Tractiva Mínima (kg/m <sup>2</sup> )	0.102
Velocidad Mínima (m/s)	0.45
Velocidad Máxima (m/s)	5
Caida Mínima (m)	0
Diferencia de Profundida (m)	4.25
Delta de altura (m)	0.60
Número de Opciones	8.08
Material	PEAD

Figura 15. Definición de Restricciones Hidráulicas. Fuente: Elaboración Propia, 2022.

CARACTERÍSTICAS ESPECÍFICAS DEL PROYECTO			
PARÁMETRO	UNIDAD	SÍMBOLO	VALOR
Año Actual	Año	AA	2020
Población Actual	Hab	PA	0
Año de Diseño	Año	AD	2045
Población Futura	Hab	PF	0
Dofación Neta	L/ Hab * Día	Dneta	130
Densidad Habitacional	Hab/Viv	Dviv	5.00
Cantidad de Viviendas Aferentes al Tramo	Und	Viv	
Cantidad de Industrias Aferentes al Tramo	Und	Ind	
Cantidad de Locales Comerciales Aferentes al Tramo	Und	Com	
Cantidad de Instituciones Aferentes al Tramo	Und	Inst	
Área Promedio por Predio	Ha	Ap	0.012
Coefficiente de Retorno	adm	R	0.85
Coefficiente de Aporte Comercial	L/s*Ha	Cc	0.50
Coefficiente de Aporte Institucional	L/s*Ha	Cin	0.50
Coefficiente de Aporte Industrial	L/s*Ha	Cid	0.50
Coefficiente de Conexiones Erradas	L/s*Ha	Ce	0.20
Coefficiente de Infiltración	L/s*Ha	Ci	0.20
Factor de Mayoración	Adm	Fm	Harmon
Tipo de Vía	Adm	Tv	
Distancia a Escombrera	Km	De	2
Pozo Inicial	---	Pi	
Pozo Final	---	Pf	
Cota Terreno Inicial	m.s.n.m	Cti	
Cota Terreno Final	m.s.n.m	Ctf	
Longitud	m	L	
Coordenada Este Pozo Inicial	m	C.E.I	
Coordenada Norte Pozo Inicial	m	C.N.I	
Coordenada Este Pozo Final	m	C.E. F	
Coordenada Norte Pozo Final	m	C.N. F	

Reiniciar proceso

Este botón, limpia los campos, para que el usuario pueda ingresar la información particular del tramo que desea analizar

Figura 16. Botón “Reiniciar proceso”, registro de información. Fuente: Elaboración Propia, 2022.

Una vez ingresada la información, el usuario oprimirá el botón “Crear Tramo” para ir almacenando en la base de datos central.

CARACTERÍSTICAS ESPECÍFICAS DEL PROYECTO			
PARÁMETRO	UNIDAD	SÍMBOLO	VALOR
Año Actual	Año	AA	2020
Población Actual	Hab	PA	2500
Año de Diseño	Año	AD	2045
Población Futura	Hab	PF	4258
Dofación Neta	L/ Hab * Día	Dneta	130
Densidad Habitacional	Hab/Viv	Dviv	5.00
Cantidad de Viviendas Aferentes al Tramo	Und	Viv	500.000
Cantidad de Industrias Aferentes al Tramo	Und	Ind	20.000
Cantidad de Locales Comerciales Aferentes al Tramo	Und	Com	8.000
Cantidad de Instituciones Aferentes al Tramo	Und	Inst	5.000
Área Promedio por Predio	Ha	Ap	0.012
Coefficiente de Retorno	adm	R	0.85
Coefficiente de Aporte Comercial	L/s*Ha	Cc	0.50
Coefficiente de Aporte Institucional	L/s*Ha	Cin	0.50
Coefficiente de Aporte Industrial	L/s*Ha	Cid	0.50
Coefficiente de Conexiones Erradas	L/s*Ha	Ce	0.20
Coefficiente de Infiltración	L/s*Ha	Ci	0.20
Factor de Mayoración	Adm	Fm	Harmon
Tipo de Vía	Adm	Tv	Zona Verde
Distancia a Escombrera	Km	De	2
Pozo Inicial	---	Pi	2
Pozo Final	---	Pf	3
Cota Terreno Inicial	m.s.n.m	Cti	2573.70
Cota Terreno Final	m.s.n.m	Ctf	2572.00
Longitud	m	L	100.00
Coordenada Este Pozo Inicial	m	C.E.I	948286.51
Coordenada Norte Pozo Inicial	m	C.N.I	994789.70
Coordenada Este Pozo Final	m	C.E. F	948308.39
Coordenada Norte Pozo Final	m	C.N. F	994767.31

Crear Tramo

Este botón, traslada la información del tramo de análisis, a la base de datos central

Figura 17. Botón “Crear tramo”, traslado de información. Fuente: Elaboración Propia, 2022.

➤ **FASE 2: GENERACIÓN DE RUTAS ÓPTIMAS**

Finalizado el ingreso de información para los tramos de análisis, se oprime el botón "Iniciar Calculo", de esta manera, se inicia el proceso de creación de alternativas para cada uno de los tramos a analizar. Cada una de las opciones se va almacenando en la pestaña "4. Cálculos". En la misma, a partir del algoritmo construido, se analiza la procedencia de cada tramo a nivel hidráulico según las restricciones dispuestas en la hoja de datos de entrada.

Los tramos inviables a nivel hidráulico se van iluminando de color rojo, descartándolos de esta manera del análisis del tramo siguiente.

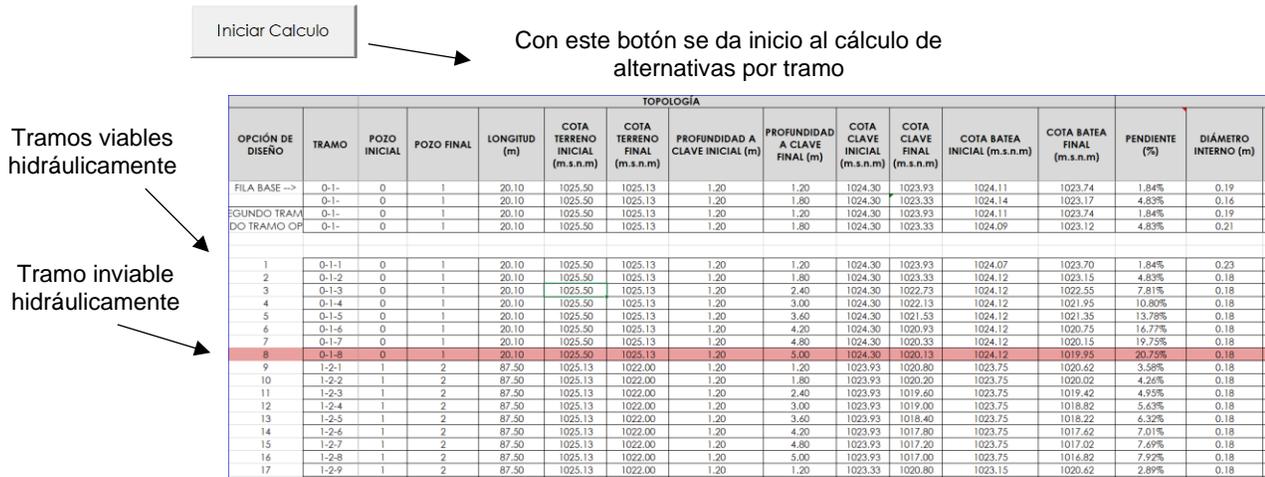


Figura 18. Generación de rutas óptimas. Fuente: Elaboración Propia, 2022.

Con el fin de ir depurando y reduciendo el número de posibilidades, el algoritmo realiza la búsqueda de la opción de menor costo para el primer tramo, con el fin de que dicha alternativa, sea empleada en el análisis del segundo tramo, este mismo procedimiento se realiza para los tramos siguientes, permitiendo de esta manera reducir el almacenamiento de información innecesaria.

Gráficamente el proceso se puede describir de la siguiente manera:

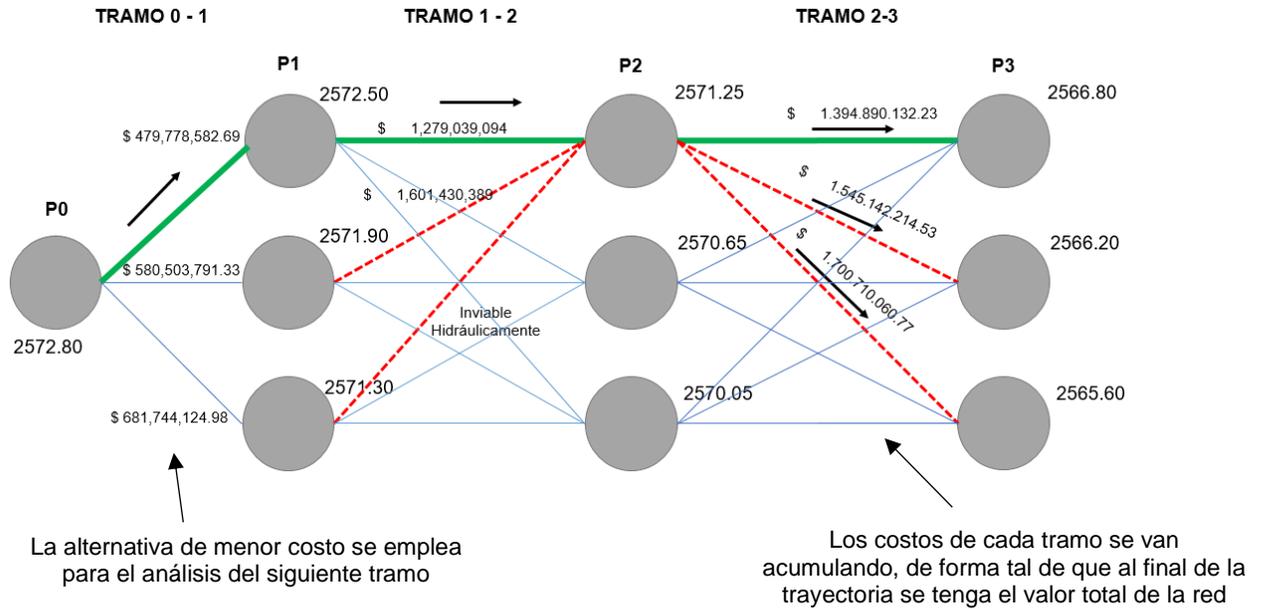


Figura 19. Representación gráfica generación de rutas aguas arriba hacia aguas abajo. Fuente: Elaboración Propia, 2022.

Esta etapa de la formulación del modelo matemático tiene que ver con la determinación del conjunto de arcos (tuberías) que configuren la red de menor costo, en el que cada arista tiene solo una dirección.

El número de opciones para cada tramo dependerá del tipo de vía definido previamente por el usuario, y el delta de profundidad a la cual se desea realizar la variación. Para el presente estudio, y según las disposiciones de la normatividad vigente, se tomó como profundidad máxima a clave un valor de 5.00 metros, y como valores mínimos a clave para vía en zona verde 0.75 m y vía vehicular 1.20 m.

A partir de esta información, el usuario selecciona el delta de altura a la cual desea hacer la variación para la definición de ruta óptima. Entre menor sea el delta, mayor cantidad de opciones obtendrá por tramo y por tanto una mayor precisión en la selección de la opción más viable.

### ➤ FASE 3: OPTIMIZACIÓN DE PERFILES

Una vez obtenido el conjunto de rutas, se busca determinar los diámetros y cotas de entrada y salida de las tuberías a diseñar, así como las alturas de los pozos de inspección que proporcionan un costo mínimo para la construcción, lo anterior cumpliendo con los parámetros hidráulicos y recubrimientos mínimos establecidos en la Resolución 0330 de 2017. Se plantea el problema anteriormente descrito a través de cálculos recursivos mediante programación dinámica.

En la hoja “5. Soluciones” del Anexo 1. Aplicativo Diseño Optimizado, se presenta el resultado gráfico de la búsqueda exhaustiva de las diez (10) soluciones más económicas para los tramos analizados, de igual manera se relacionan los resultados hidráulicos obtenidos para la solución global resultante. Cabe mencionar que la búsqueda se realiza a partir de las posibles combinaciones de los nodos y arcos conformados a partir del número de alternativas por tramo.

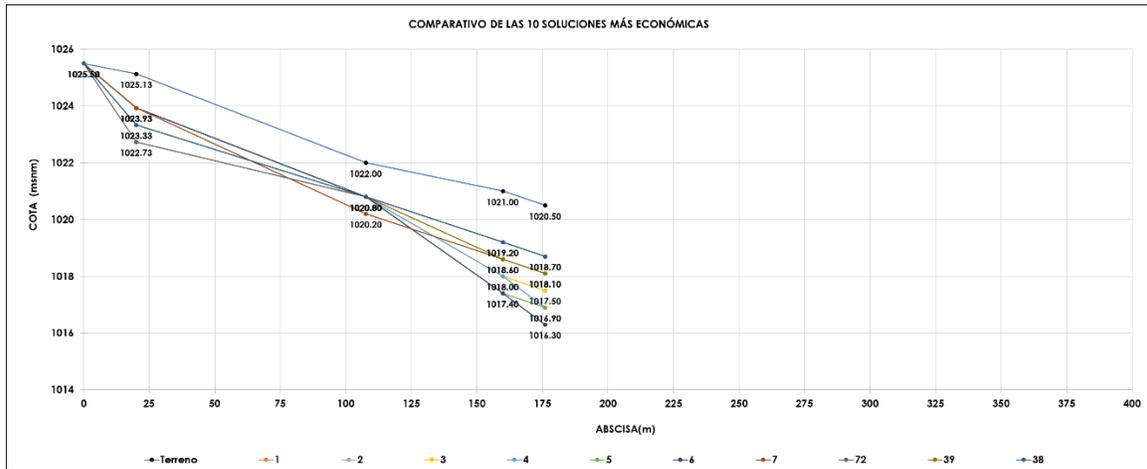


Figura 20. Resultado gráfico – Soluciones más económicas. Fuente: Elaboración Propia, 2022.

Posterior a la obtención de las soluciones más económicas para los tramos analizados, el aplicativo realiza la validación en el sentido aguas abajo hacia aguas arriba de forma tal que se permita corroborar que la más económica corresponda a la óptima global.

Para ejecutar este proceso, el aplicativo analiza el valor mínimo acumulado del último tramo, y verifica las cotas a las que corresponde esta alternativa. A partir de las mismas, se retorna al tramo anterior, validando el valor mínimo para la cota clave de inicio y evaluando las restricciones dispuestas a nivel hidráulico. En caso de que no se cumpla alguno de los parámetros, el aplicativo realiza la búsqueda del siguiente económico y realiza el mismo procedimiento hasta llegar al primer tramo. Esta validación permite corroborar la solución óptima global en los sentidos aguas arriba hacia aguas abajo y viceversa.

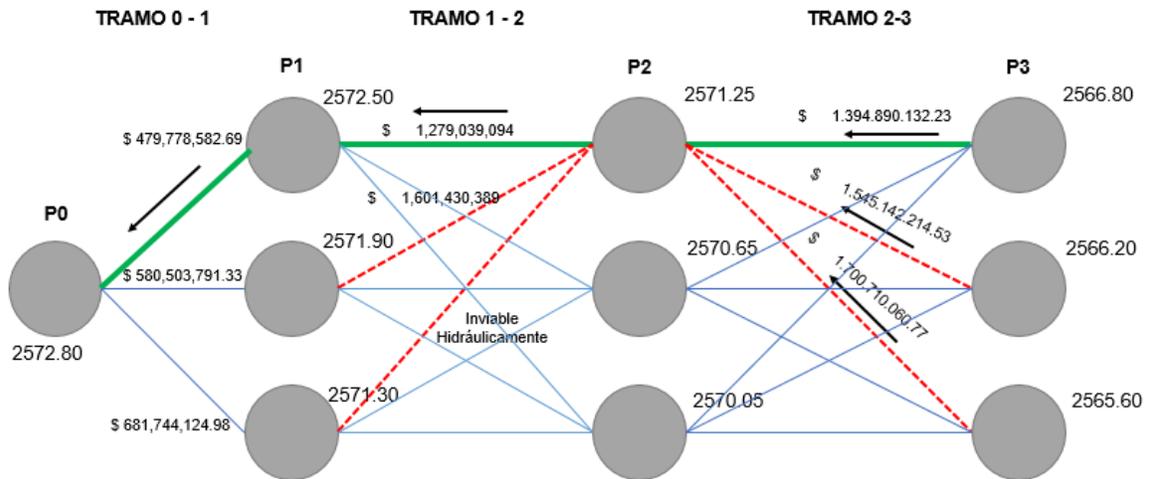


Figura 21. Representación gráfica generación de rutas aguas abajo hacia aguas arriba. Fuente: Elaboración Propia, 2022.

Adicionalmente, el aplicativo cuenta con la hoja denominada “6. SWMM” en la cual se traslada la información de la solución global para ser modelada en el Software libre SWMM, con el fin de conocer el comportamiento de la red en flujo no uniforme y de esta manera corroborar la viabilidad hidráulica del diseño.

Para este caso, el usuario deberá copiar la información contenida en la hoja “6. SWMM” en un block de notas y guardarlo, para posteriormente abrirlo en el software en mención. Es importante mencionar que, si el usuario desea reiniciar el proceso y presiona nuevamente el botón “Iniciar Calculo” de la hoja “2. Datos de Entrada”, primero se deberán eliminar manualmente las filas que se presentan en la siguiente imagen, de esta manera se garantiza una corrida óptima para el traslado de la información al software, de lo contrario se duplicará la información y se generaran conflictos para su ejecución.



Una vez el usuario ejecuta el diseño, podrá visualizar tanto en planta como en perfil los resultados topológicos e hidráulicos del mismo, tal como se presenta en las siguientes imágenes.

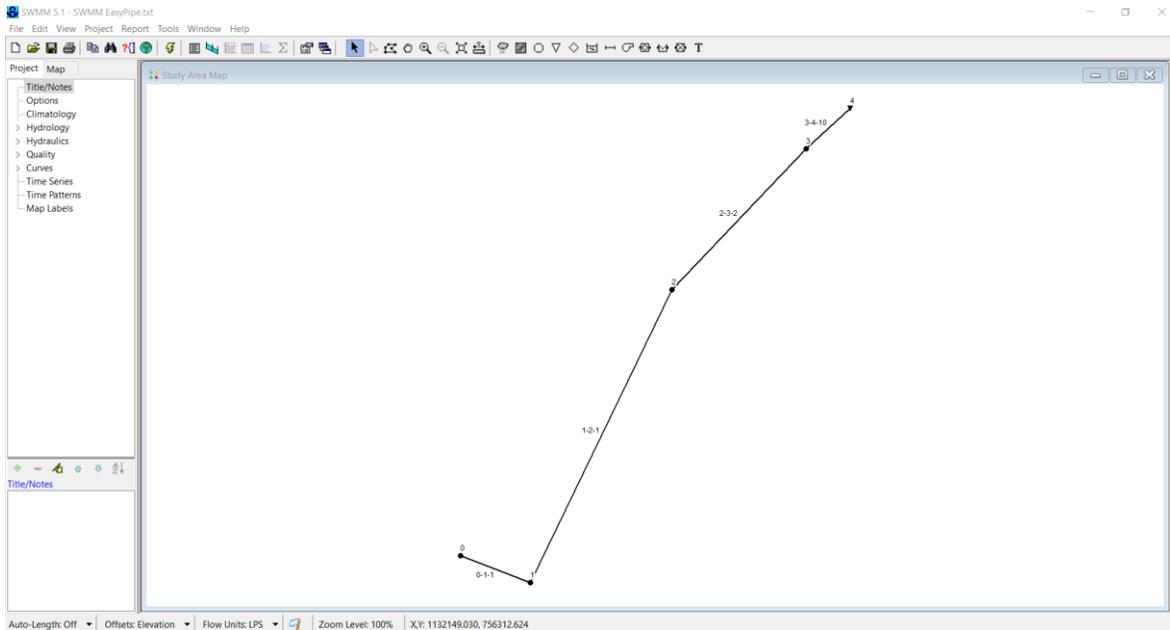


Figura 23. Vista en Planta Cargue Aplicativo SWMM. Fuente: Elaboración Propia, 2022.

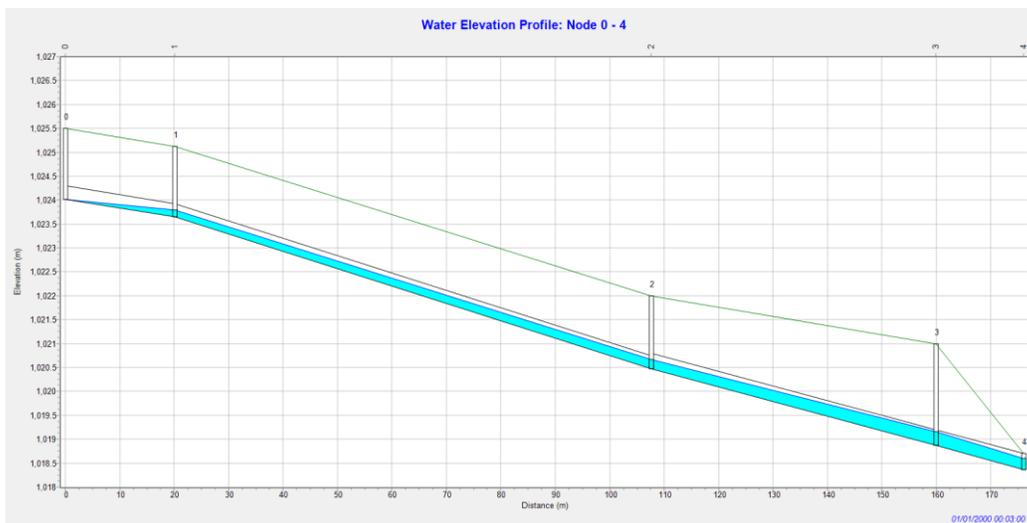


Figura 24. Vista en Perfil Cargue Aplicativo SWMM. Fuente: Elaboración Propia, 2022.

## 5.8 CASO DE ESTUDIO

Como caso de estudio, se empleará la información del diseño de un colector de alcantarillado diseñado por la firma INGENIERÍA Y CONSULTORÍA AMBIENTAL Y SANITARIA S.A.S, en el Municipio de la Plata Huila.

Este colector fue diseñado para un aproximado de 400 tramos, en donde se incluían obras de optimización hidráulica a tuberías ya existentes y proyección de redes. Para el caso del presente estudio, se analizarán únicamente 10 tramos correspondientes a la etapa final del colector previo al punto de la PTAR, teniendo en cuenta que los mismos, contemplan un caudal importante que podrán generar una mayor influencia en el aplicativo construido.

A continuación, se presenta la ubicación espacial del colector de estudio, así como la topología principal tanto de pozos de inspección como de tuberías.



Figura 25. Colector de estudio. Fuente: Tomado de INCOLSAM S.A.S., 2019

A continuación, se presenta la información topológica del diseño original. Cabe mencionar que tal como se aprecia en la imagen, fueron seleccionados los diez (10) últimos tramos del colector, teniendo en cuenta que, dado su recorrido, habría un mayor caudal que permitirá apreciar un cambio de diámetros en la red y por tanto una variación de costos para evidenciar el funcionamiento del aplicativo.

Tabla 11. Información Pozos de Inspección – Diseño original

ID POZO	COORD. ESTE (m)	COORD. NORTE (m)	COTA TERRENO (m.s.n.m.)	COTA BATEA (m.s.n.m.)
0	1132216.95	756275.13	1025.50	1021.31
1	1132235.63	756267.79	1025.13	1023.00
2	1132273.62	756346.56	1022.00	1020.10
3	1132309.67	756384.42	1021.00	1019.10
4	1132321.52	756395.33	1020.50	1018.25
5	1132357.98	756446.15	1019.00	1018.00
6	1132375.71	756500.20	1017.91	1016.01
7	1132378.92	756528.95	1017.06	1015.41
8	1132378.56	756554.57	1016.00	1014.57
9	1132391.58	756602.68	1015.00	1013.55
10	1132398.48	756612.98	1013.98	1013.40

Fuente. Elaboración Propia, 2022. Tomado de INCOLSAM S.A.S, 2019

Tabla 12. Información Topológica de Tramos – Diseño original

POZO INICIAL	POZO FINAL	CAUDAL DE DISEÑO (L/S)	LONGITUD (m)	PENDIENTE (%)	MATERIAL	DIÁMETRO (")
0	1	106.00	20.10	0.50	PVC	16
1	2	196.36	87.50	1.14	PVC	16
2	3	233.50	52.30	1.91	PVC	16
3	4	233.84	16.10	5.28	PVC	16
4	5	257.07	62.50	1.20	PVC	18
5	6	257.07	56.90	2.62	PVC	18
6	7	257.07	28.90	2.08	PVC	18
7	8	257.07	25.60	1.21	PVC	18
8	9	257.07	49.80	0.80	PVC	20
9	10	259.47	12.40	10.48	PVC	20

COTA TERRENO INICIAL (m)	COTA TERRENO FINAL (m)	PROFUNDIDAD A CLAVE INICIAL (m)	PROFUNDIDAD A CLAVE FINAL (m)	COTA CLAVE INICIAL (m)	COTA CLAVE FINAL (m)	COTA BATEA INICIAL (m)	COTA BATEA FINAL (m)
1025.50	1025.13	3.78	3.51	1021.72	1021.62	1021.31	1021.21
1025.13	1022.00	3.62	1.49	1021.51	1020.51	1021.10	1020.10
1022.00	1021.00	1.49	1.49	1020.51	1019.51	1020.10	1019.10
1021.00	1020.50	1.49	1.84	1019.51	1018.66	1019.10	1018.25
1020.50	1019.00	1.79	1.04	1018.71	1017.96	1018.25	1017.50
1019.00	1017.91	1.04	1.44	1017.96	1016.47	1017.50	1016.01
1017.91	1017.06	1.44	1.19	1016.47	1015.87	1016.01	1015.41
1017.06	1016.00	1.19	0.44	1015.87	1015.56	1015.41	1015.10
1016.00	1015.00	0.39	-0.21	1015.61	1015.21	1015.10	1014.70
1015.00	1013.98	-0.21	0.07	1015.21	1013.91	1014.70	1013.40

Fuente. Elaboración Propia, 2022. Tomado de INCOLSAM S.A.S, 2019

A continuación, se relacionan las cantidades de obra para tramos calculadas para el proyecto por la firma consultora.

*Tabla 13. Cantidades de Obra de Tramos – Diseño original*

POZO INICIAL	POZO FINAL	LONGITUD ZANJA (m)	PROFUNDIDAD PROMEDIO EXCAVACIÓN (m)	ANCHURA EXCAVACIÓN (m)	LONGITUD REAL DE TUBERÍA (m)	TIPO DE VÍA
0	1	18.15	4.30	1.00	18.90	Afirmado
1	2	85.55	2.20	1.00	86.30	Afirmado
2	3	50.35	2.10	1.00	51.10	Afirmado
3	4	14.15	2.30	1.00	14.90	Afirmado
4	5	59.55	1.80	1.00	61.30	Afirmado
5	6	53.95	1.60	1.00	55.70	Afirmado
6	7	25.95	2.00	1.00	27.70	Afirmado
7	8	22.65	1.70	1.00	24.40	Afirmado
8	9	46.85	1.60	1.00	48.60	Afirmado
9	10	9.45	1.20	1.00	11.20	Afirmado

SUPERFICIE DE AFECTACIÓN (m <sup>2</sup> )	VOLUMEN DE EXCAVACIÓN (m <sup>3</sup> )	RELLENOS			
		ENCAMADO EN ARENA (m <sup>3</sup> )	ATRAQUE EN TRITURADO (m <sup>3</sup> )	RELLENO INICIAL EN RECEBO (m <sup>3</sup> )	MATERIAL SELECCIONADO (m <sup>3</sup> )
48.15	248.45	2.84	2.61	5.23	237.77
181.55	479.29	12.95	11.94	24.67	429.74
56.35	142.00	7.67	7.07	14.52	112.75
20.15	55.61	2.24	2.06	4.08	47.24
65.55	141.59	9.20	8.98	17.66	105.75
71.95	138.14	8.36	8.16	16.00	105.63
43.95	105.48	4.16	4.06	7.69	89.57
22.65	46.21	3.66	3.57	6.72	32.26
46.85	89.95	7.29	7.42	14.18	61.06
15.45	22.25	1.68	1.71	2.86	16.00

DISPOSICIÓN DE RESIDUOS (m <sup>3</sup> )	ENTIBADOS			DOMICILIARIAS (Und)
	DISCONTINUO DE MADERA 1.5<H<3.5 (m <sup>2</sup> )	CONTINUO LÁMINAS METÁLICAS H>4.0 (m <sup>2</sup> )		
10.68	0.00	0.00		5.00
49.55	376.42	0.00		16.00
29.25	211.47	0.00		1.00
8.38	65.09	0.00		1.00
35.83	214.38	0.00		1.00
32.51	172.64	0.00		3.00

DISPOSICIÓN DE RESIDUOS (m <sup>3</sup> )	ENTIBADOS		DOMICILIARIAS (Und)
	DISCONTINUO DE MADERA 1.5<H<3.5 (m <sup>2</sup> )	CONTINUO LÁMINAS METÁLICAS H>4.0 (m <sup>2</sup> )	
15.91	103.80	0.00	3.00
13.95	77.01	0.00	0.00
28.89	149.92	0.00	0.00
6.25	0.00	0.00	1.00

Fuente. Elaboración Propia, 2022. Tomado de INCOLSAM S.A.S, 2019

Tabla 14. Cantidades de Obra de Pozos – Diseño original

No. POZO	PROFUNDIDAD POZO (m)	PROFUNDIDAD EXCAVACIÓN (m)	VOLUMEN TOTAL (mecánico) (m <sup>3</sup> )	SUPERFICIE DE AFECTACIÓN (m <sup>2</sup> )	DISPOSICIÓN DE RESIDUOS (m <sup>3</sup> )
0	3.69	4.20	26.25	6.25	10.40
1	2.13	2.70	16.88	6.25	7.96
2	1.90	2.40	15.00	6.25	7.47
3	1.90	2.40	15.00	6.25	7.47
4	3.41	4.00	25.00	6.25	10.08
5	2.13	2.70	16.88	6.25	7.96
6	1.90	2.40	15.00	6.25	7.47
7	2.19	2.70	16.88	6.25	7.96
8	2.49	3.00	18.75	6.25	8.45
9	0.58	1.10	6.88	6.25	5.35
10	0.58	1.10	6.88	6.25	5.35

RELLENOS				ENTIBADOS		
RECEBO COMPACTADO (m <sup>3</sup> )	MATERIAL SELECCIONADO (m <sup>3</sup> )	SUB - BASE GRANULAR (m <sup>3</sup> )	BASE GRANULAR (m <sup>3</sup> )	DISCONTINUO DE MADERA 1.0<H<2.5 (m <sup>2</sup> )	CONTINUO DE MADERA 2.5<H<4.0 (m <sup>2</sup> )	CONTINUO O LÁMINAS METÁLICAS H>4.0 (m <sup>2</sup> )
1.25	15.85	1.39	0.92	0.00	0.00	21.00
1.25	8.92	1.39	0.92	0.00	13.50	0.00
1.25	7.53	1.39	0.92	12.00	0.00	0.00
1.25	7.53	1.39	0.92	12.00	0.00	0.00
1.25	14.92	1.39	0.92	0.00	0.00	0.00
1.25	8.92	1.39	0.92	0.00	13.50	0.00
1.25	7.53	1.39	0.92	12.00	0.00	0.00
1.25	8.92	1.39	0.92	0.00	13.50	0.00
1.25	10.30	1.39	0.92	0.00	15.00	0.00
1.25	1.52	1.39	0.92	5.50	0.00	0.00
1.25	1.52	1.39	0.92	5.50	0.00	0.00

CILINDRO POZO Di=1.2m (m)	CONJUNTO PLACA DE FONDO Y CUBIERTA	CONO REDUCTOR 1.20M - 0.60M	CARGUE Di=1.70m	GEOTEXTIL DE RECUBRIMIENTO (m2)
3.48	1	SIN CONO	1	15.74
1.92	1	SIN CONO	1	8.69
1.69	1	SIN CONO	1	7.65
1.69	1	SIN CONO	1	7.65
3.2	1	SIN CONO	1	14.48
1.92	1	SIN CONO	1	8.69
1.69	1	SIN CONO	1	7.65
1.98	1	SIN CONO	1	8.96
2.28	1	SIN CONO	1	10.31
0.37	1	SIN CONO	1	1.67
0.37	1	SIN CONO	1	1.67

*Fuente. Elaboración Propia, 2022. Tomado de INCOLSAM S.A.S, 2019*

Una vez dispuesta la información topológica del diseño original, se procedió con la ejecución del aplicativo, ingresando los datos dispuestos anteriormente. Para el ejercicio se empleó un delta de profundidad de 0.60 m, para un análisis total de ocho (8) alternativas posibles para cada tramo tal como se presenta a continuación:

$$T = \frac{P_{\max} - P_{\min}}{dy} + 1$$

$$T = \frac{5.00 \text{ m} - 1.20 \text{ m}}{0.60 \text{ m}} + 1 = 7.33, \text{ aproximándolo a 8 opciones}$$

Cabe mencionar que se tomó como profundidad mínima un valor de 1.20 m teniendo en cuenta que todo el tramo de análisis se encuentra en pavimento, siendo este el condicional establecido por la normatividad para este tipo de suelo. La profundidad máxima de 5.00 m se adopta a partir de la capacidad máxima que puede soportar la tubería de PVC, antes de someterla a algún tipo de cubrimiento especial.

El esquema topológico del funcionamiento del aplicativo para los tramos 0 – 1 y 1 – 2 se presenta a continuación.

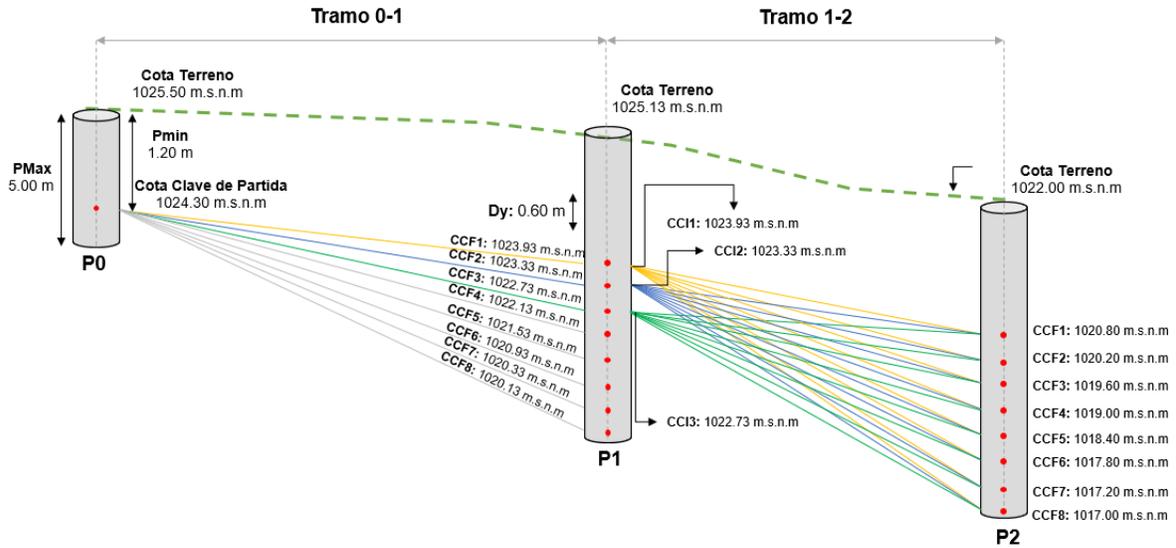


Figura 26. Esquema Topológico Tramos 0 – 1 y 1 – 2. Fuente: Elaboración Propia, 2022.

Tal como se aprecia, el pozo inicial (P0) tiene una única posición posible, que va a ser la profundidad mínima a clave en la que se puede colocar la tubería. Es decir que los nodos de los primeros pozos tendrán siempre una cota fija correspondiente a la diferencia entre la cota terreno de dicho pozo y la mínima profundidad de excavación según las disposiciones de la Resolución 0330 de 2017 que corresponde a 1.20 m para pavimentos.

Para los demás pozos, el número de profundidades disponibles variará 0.60 m según lo descrito anteriormente, en un rango de 3.80 m, siendo éste el límite de excavación para la construcción de la red de alcantarillado. En este orden de ideas se tienen ocho (8) cotas clave de llegada para el tramo 0 – 1, para las cuales, cada una de ellas se analiza para las ocho (8) cotas clave de llegada definidas para el tramo 1 – 2 y así sucesivamente hasta finalizar los tramos de estudio, de esta manera, cada tramo a partir del 1 – 2 tendrá sesenta y cuatro (64) arcos de análisis. Tal como se indicó previamente, aquellos arcos que no cumplan para algún parámetro hidráulico serán descartados de análisis futuros para evitar el almacenamiento de información innecesaria, igualmente se va realizando optimización por costos, es decir, aquellos arcos con los valores por encima del mínimo de cada opción serán descartados para el análisis del tramo siguiente.

De la evaluación realizada, se ejecutaron en total para los diez (10) tramos, 584 arcos, de los cuales fueron descartados 290 por incumplimiento de restricciones hidráulicas. Con los tramos hidráulicamente viables, se procedió con el análisis de combinaciones para encontrar la solución global de menor costo. El tiempo computacional para la generación de las opciones descritas, fue de aproximadamente 6 minutos, en un equipo con sistema operativo de 64 bits, Windows 10 Pro.

## 6 RESULTADOS

En el presente numeral, se describen los resultados obtenidos tanto topológicos como de costos para el diseño original realizado por la firma consultora INCOLSAM S.A.S, y para dos escenarios ejecutados con el aplicativo, uno empleando un delta de profundidad de 0.60 m y otro de 0.40 m, con el fin de analizar el impacto del cambio de esta variable y la procedencia o no de minimizarlo para obtener mejores resultados.

Cabe mencionar que, para los escenarios realizados, el caudal y cotas terreno son iguales, por tanto, no se relacionan en las siguientes tablas. Se presenta únicamente la información que permite evidenciar las diferencias entre los resultados obtenidos para los tres casos. Igualmente se aclara que tanto para el diseño original como para los escenarios de aplicación se cumplen todas las restricciones hidráulicas definidos previamente en la tabla 7. Sus resultados se pueden apreciar con mayor detalle en el Anexo 1. Aplicativo Diseño Optimizado.

*Tabla 15. Resultados Topológicos INCOLSAM S.A.S – Diseño original*

<b>POZO INICIAL</b>	<b>POZO FINAL</b>	<b>PENDIENTE (%)</b>	<b>DIÁMETRO (")</b>	<b>PROFUNDIDAD A CLAVE INICIAL (m)</b>	<b>PROFUNDIDAD A CLAVE FINAL (m)</b>
0	1	0.50	16	3.78	3.51
1	2	1.14	16	3.62	1.49
2	3	1.91	16	1.49	1.49
3	4	5.28	16	1.49	1.84
4	5	1.20	18	1.79	1.04
5	6	2.62	18	1.04	1.44
6	7	2.08	18	1.44	1.19
7	8	1.21	18	1.19	0.44
8	9	0.80	20	0.39	-0.21
9	10	10.48	20	-0.21	0.07

<b>COTA CLAVE INICIAL (m.s.n.m)</b>	<b>COTA CLAVE FINAL (m.s.n.m)</b>	<b>COTA BATEA INICIAL (m.s.n.m)</b>	<b>COTA BATEA FINAL (m.s.n.m)</b>
1021.72	1021.62	1021.31	1021.21
1021.51	1020.51	1021.10	1020.10
1020.51	1019.51	1020.10	1019.10
1019.51	1018.66	1019.10	1018.25
1018.71	1017.96	1018.25	1017.50
1017.96	1016.47	1017.50	1016.01
1016.47	1015.87	1016.01	1015.41
1015.87	1015.56	1015.41	1015.10
1015.61	1015.21	1015.10	1014.70
1015.21	1013.91	1014.70	1013.40

*Fuente. Elaboración Propia, 2022. Tomado de INCOLSAM S.A.S, 2019*

Tal como se aprecia, para el diseño original, los diámetros del colector oscilaron entre 16 y 18 pulgadas, con pendientes desde 0.50 % hasta 5.28%, teniendo una particular de 10.48 % para el último tramo. En este caso, las profundidades medias a cota clave, siendo uno de los factores condicionantes para el aplicativo, oscilan entre 0.39 m y 3.78 m. Cabe resaltar que el tramo inicial tiene la mayor profundidad a clave, con respecto a los demás tramos. A partir de estos datos se definen las cotas claves y bateas del colector.

A continuación, se presentan los resultados de las principales cantidades de obra que mayor impacto tienen respecto a costos unitarios para el cálculo del presupuesto del tramo analizado. Para mayor detalle, las cantidades de obra consolidadas se presentan en las tablas 13 y 14 del presente documento.

*Tabla 16. Resultados cantidades de obra INCOLSAM S.A.S – Diseño original*

POZO INICIAL	POZO FINAL	PROFUNDIDAD PROMEDIO EXCAVACIÓN (m)	SUPERFICIE DE AFECTACIÓN (m <sup>2</sup> )	VOLUMEN DE EXCAVACIÓN (m <sup>3</sup> )	ENTIBADO DISCONTINUO DE MADERA 1.5<H<3.5 (m <sup>2</sup> )
0	1	4.30	48.15	248.45	0.00
1	2	2.20	181.55	479.29	376.42
2	3	2.10	56.35	142.00	211.47
3	4	2.30	20.15	55.61	65.09
4	5	1.80	65.55	141.59	214.38
5	6	1.60	71.95	138.14	172.64
6	7	2.00	43.95	105.48	103.80
7	8	1.70	22.65	46.21	77.01
8	9	1.60	46.85	89.95	149.92
9	10	1.20	15.45	22.25	0.00

*Fuente. Elaboración Propia, 2022. Tomado de INCOLSAM S.A.S, 2019*

Cabe mencionar que, los valores unitarios para los ítems dispuestos en el presente escenario de aplicación fueron los mismos empleados por la firma consultora con el fin de obtener resultados congruentes y comparables.

Para este caso, el valor total de la obra civil fue de **\$ 424.820.186.**

#### ➤ Escenario de aplicación, delta 0.60 m

A continuación, se relacionan los resultados obtenidos al ejecutar el aplicativo con un delta de profundidad de 0.60 m, obteniendo en este caso un total de ocho (8) nodos y sesenta y cuatro (64) posibles arcos por cada tramo a partir del 1 – 2. Tal como se indicó en el numeral anterior, de la evaluación realizada, para los diez (10) tramos, se tienen 584 arcos, de los cuales fueron descartados 290 por incumplimiento de restricciones hidráulicas.

*Tabla 17. Resultados Topológicos Aplicativo Delta 0.60 m – Caso de Estudio*

<b>POZO INICIAL</b>	<b>POZO FINAL</b>	<b>PENDIENTE (%)</b>	<b>DIÁMETRO NOMINAL (")</b>	<b>PROFUNDIDAD A CLAVE INICIAL (m)</b>	<b>PROFUNDIDAD A CLAVE FINAL (m)</b>
0	1	1.84	12	1.20	1.20
1	2	3.58	12	1.20	1.20
2	3	3.06	14	1.20	1.80
3	4	3.11	14	1.20	1.80
4	5	3.36	14	1.20	2.40
5	6	2.97	14	1.20	3.00
6	7	2.94	14	1.20	3.00
7	8	4.14	14	1.20	3.00
8	9	3.21	14	1.20	3.60
9	10	3.39	14	1.20	3.00

<b>COTA CLAVE INICIAL (m.s.n.m)</b>	<b>COTA CLAVE FINAL (m.s.n.m)</b>	<b>COTA BATEA INICIAL (m.s.n.m)</b>	<b>COTA BATEA FINAL (m.s.n.m)</b>
1024.30	1023.93	1024.02	1023.65
1023.93	1020.80	1023.65	1020.52
1020.80	1019.20	1020.47	1018.87
1019.20	1018.70	1018.87	1018.37
1018.70	1016.60	1018.37	1016.27
1016.60	1014.91	1016.27	1014.58
1014.91	1014.06	1014.58	1013.73
1014.06	1013.00	1013.73	1012.67
1013.00	1011.40	1012.67	1011.07
1011.40	1010.98	1011.07	1010.65

*Fuente. Elaboración Propia, 2022.*

Tal como se aprecia, ejecutando el aplicativo, con un delta de 0.60 m, los diámetros del colector oscilaron entre las 12 y 14 pulgadas, con pendientes desde 1.84% y 4.14%. En este caso, las profundidades medias a cota clave, oscilan entre 1.20 m y 3.60 m apreciando particularmente, que según los condicionantes establecidos, todas las profundidades a cota clave inicial fueron de 1.20 m, mientras que las cotas clave final, fueron definidas a partir del comportamiento hidráulico para la solución global.

Con respecto a las principales cantidades de obra, se tiene:

*Tabla 18. Resultados de las principales cantidades de obra delta 0.60 m – Caso de Estudio*

<b>POZO INICIAL</b>	<b>POZO FINAL</b>	<b>PROFUNDIDAD PROMEDIO EXCAVACIÓN (m)</b>	<b>SUPERFICIE DE AFECTACIÓN (m<sup>2</sup>)</b>	<b>VOLUMEN DE EXCAVACIÓN (m<sup>3</sup>)</b>	<b>ENTIBADO TIPO 1 Y TIPO 2 (m<sup>2</sup>)</b>
0	1	1.53	61.35	87.67	59.37
1	2	1.53	122.75	182.78	266.15
2	3	1.88	87.55	157.57	193.52

POZO INICIAL	POZO FINAL	PROFUNDIDAD PROMEDIO EXCAVACIÓN (m)	SUPERFICIE DE AFECTACIÓN (m <sup>2</sup> )	VOLUMEN DE EXCAVACIÓN (m <sup>3</sup> )	ENTIBADO TIPO 1 Y TIPO 2 (m <sup>2</sup> )
3	4	2.18	33.35	68.68	66.83
4	5	2.48	91.75	219.83	305.91
5	6	3.08	56.15	172.77	172.77
6	7	3.38	28.15	95.06	95.06
7	8	3.38	24.85	83.92	83.92
8	9	3.68	49.05	180.36	180.36
9	10	3.68	35.65	122.26	42.84

*Fuente. Elaboración Propia, 2022.*

Es importante mencionar que, en el aplicativo, el condicional de excavación mecánica se estipuló a partir de los 3.40 m de la profundidad promedio, mientras que, para el diseño original, el mismo fue definido a partir de un porcentaje del 10% del total de volumen de excavación requerida para el tramo. Así mismo, el uso de entibado en madera, para el aplicativo fue dispuesto hasta los 3.00 m de profundidad y el entibado metálico a partir de este valor. Para el diseño original la variación en el uso del entibado está a los 3.50 m. Estas variaciones en el cálculo de cantidades pueden generar la diferencia del valor total, no obstante, se consideran dentro de los análisis como un porcentaje de error ajustado a las particularidades del caso.

Para este caso, el valor total de la obra civil fue de **\$ 343.079.787**, con un tiempo computacional de **6 minutos aproximadamente**.

#### ➤ Escenario de aplicación, delta 0.40 m

A continuación, se relacionan los resultados obtenidos al ejecutar el aplicativo con un delta de profundidad de 0.40 m, obteniendo en este caso un total de once (11) nodos y ciento veintinueve (121) posibles arcos por cada tramo a partir del 1 – 2. De la evaluación realizada, se ejecutaron para los diez (10) tramos, 1100 arcos, de los cuales fueron descartados 534 por incumplimiento de restricciones hidráulicas.

*Tabla 19. Resultados Topológicos Aplicativo Delta 0.40 m – Caso de Estudio*

POZO INICIAL	POZO FINAL	PENDIENTE (%)	DIÁMETRO NOMINAL (")	PROFUNDIDAD A CLAVE INICIAL (m)	PROFUNDIDAD A CLAVE FINAL (m)
0	1	1.84	12	1.20	1.20
1	2	3.58	12	1.20	1.20
2	3	2.68	14	1.20	1.60
3	4	3.11	14	1.20	1.60
4	5	3.04	14	1.20	2.00
5	6	3.32	14	1.20	2.80
6	7	1.56	16	1.20	2.40

POZO INICIAL	POZO FINAL	PENDIENTE (%)	DIÁMETRO NOMINAL (")	PROFUNDIDAD A CLAVE INICIAL (m)	PROFUNDIDAD A CLAVE FINAL (m)
7	8	2.58	16	1.20	2.00
8	9	2.01	16	1.20	2.00
9	10	1.77	16	1.20	1.20

COTA CLAVE INICIAL (m.s.n.m)	COTA CLAVE FINAL (m.s.n.m)	COTA BATEA INICIAL (m.s.n.m)	COTA BATEA FINAL (m.s.n.m)
1024.30	1023.93	1024.02	1023.65
1023.93	1020.80	1023.65	1020.52
1020.80	1019.40	1020.47	1019.07
1019.40	1018.90	1019.07	1018.57
1018.90	1017.00	1018.57	1016.67
1017.00	1015.11	1016.67	1014.78
1015.11	1014.66	1014.75	1014.30
1014.66	1014.00	1014.30	1013.64
1014.00	1013.00	1013.64	1012.64
1013.00	1012.78	1012.64	1012.42

*Fuente. Elaboración Propia, 2022.*

Tal como se aprecia, ejecutando el aplicativo, con un delta de 0.40 m, los diámetros del colector oscilaron entre las 12 y 16 pulgadas, con pendientes desde 1.84% y 3.58%. En este caso, las profundidades medias a cota clave, oscilan entre 1.20 m y 2.80 m.

Con respecto a las principales cantidades de obra, se tiene:

*Tabla 20. Resultados de las principales cantidades de obra delta 0.40 m – Caso de Estudio*

POZO INICIAL	POZO FINAL	PROFUNDIDAD PROMEDIO EXCAVACIÓN (m)	SUPERFICIE DE AFECTACIÓN (m <sup>2</sup> )	VOLUMEN DE EXCAVACIÓN (m <sup>3</sup> )	ENTIBADO TIPO 1 Y TIPO 2 (m <sup>2</sup> )
0	1	1.53	61.35	87.67	59.37
1	2	1.53	122.75	182.78	266.15
2	3	1.78	87.55	149.18	183.21
3	4	1.98	33.35	62.37	60.69
4	5	2.18	91.75	193.21	268.86
5	6	2.78	56.15	155.93	311.86
6	7	3.01	28.15	84.79	84.79
7	8	2.61	24.85	64.91	129.82
8	9	2.41	49.05	118.31	236.62
9	10	2.01	35.65	66.90	46.88

*Fuente. Elaboración Propia, 2022.*

Para este caso, el valor total de la obra civil fue de **\$ 310.564.342**, con un tiempo computacional de **90 minutos aproximadamente**.

## 7 ANÁLISIS DE RESULTADOS

A nivel topológico es posible evidenciar que, para el diseño original, el colector inicia a una profundidad superior que las calculadas con el aplicativo y finaliza a una profundidad mínima, estando sobre el terreno. Esta situación se puede asociar a las posibles restricciones del consultor tanto para el cruce con otras redes (acueducto, telefonía, gas, etc) como para la entrega, en este caso, al sistema de tratamiento de aguas residuales. Para el caso del aplicativo, al tener restricciones de profundidad inicial y final de los tramos, asociadas al tipo de vía, no es posible contemplar las particularidades propias del sector de estudio. En este caso se recomienda al usuario variar la restricción de profundidad mínima y máxima a clave de la hoja "2. Datos de Entrada", según las condiciones propias de inicio y llegada que se deban cumplir en terreno, no obstante, esta situación puede llegar a afectar el rango permitido establecido por la normatividad para cada tipo de vía, en donde para las que se encuentran en afirmado el mínimo corresponde a 0.75 m a clave y pavimentadas corresponde a 1.20 m.

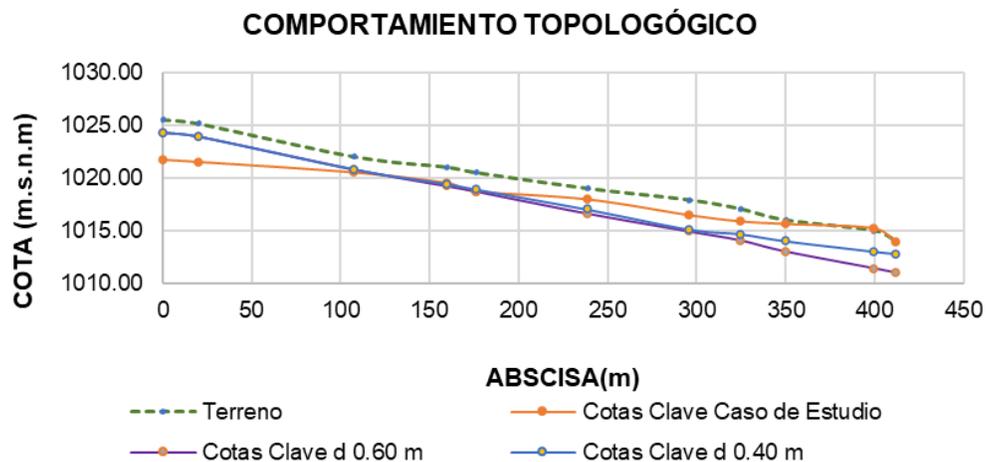


Figura 27. Comportamiento topológico. Fuente: Elaboración Propia, 2022.

Con respecto al comportamiento de las pendientes, el diseño original presenta variaciones mayores, especialmente al final del colector, en donde la misma, supera el 10.00%, esta situación se puede asociar, tal como se ha descrito previamente, a las condicionantes de inicio y llegada propias de las particularidades del territorio. Para los escenarios de aplicación, las pendientes se mantienen estables, relacionado directamente con las restricciones de profundidad inicial y final descritas.

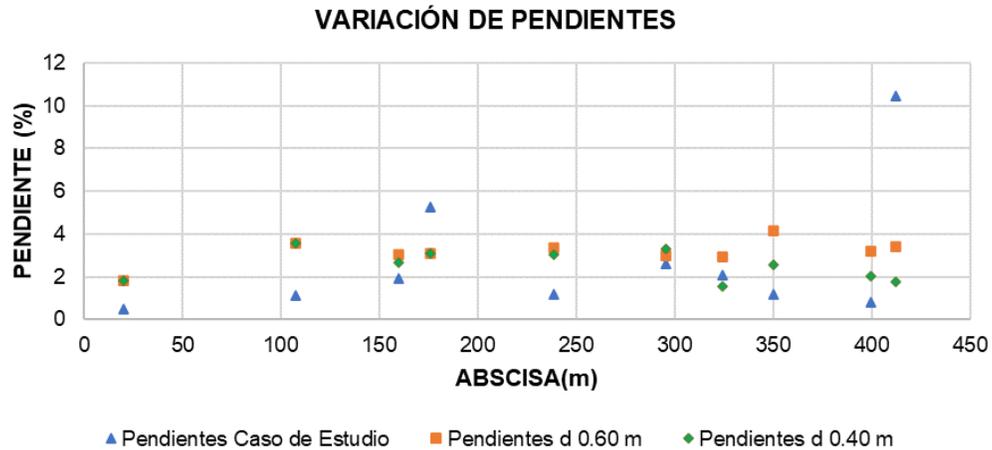


Figura 28. Variación de pendientes. Fuente: Elaboración Propia, 2022.

Con respecto a los diámetros, tal como se presentó en el numeral anterior, en el diseño original oscilan entre 16 y 18 pulgadas, mientras que, para la ejecución del aplicativo en los dos escenarios de profundidad analizados, se inicia en 12 pulgadas, y termina en 14 pulgadas para el delta de 0.60 m y en 16 pulgadas para el delta de 0.40 m. A partir de este resultado es posible evidenciar que, en efecto, para los caudales de cada tramo, el diámetro óptimo inicial corresponde al colector en 12 pulgadas, representando un menor costo por instalación de tubería. Para el diseño original la condición de inicio de 16 pulgadas puede estar asociada a las características topológicas aguas arriba, que restringen continuar con este diámetro, ya que, cabe recordar, que el tramo aquí analizado corresponde a un segmento de un colector principal de aproximadamente 60 tramos. Para los tres casos, se cumplen las restricciones hidráulicas definidas.

Aun cuando el escenario con delta de 0.60 m arroja menores diámetros con respecto al escenario de delta 0.40 m, los costos asociados a la tubería son menos representativos que los correspondientes a excavación.

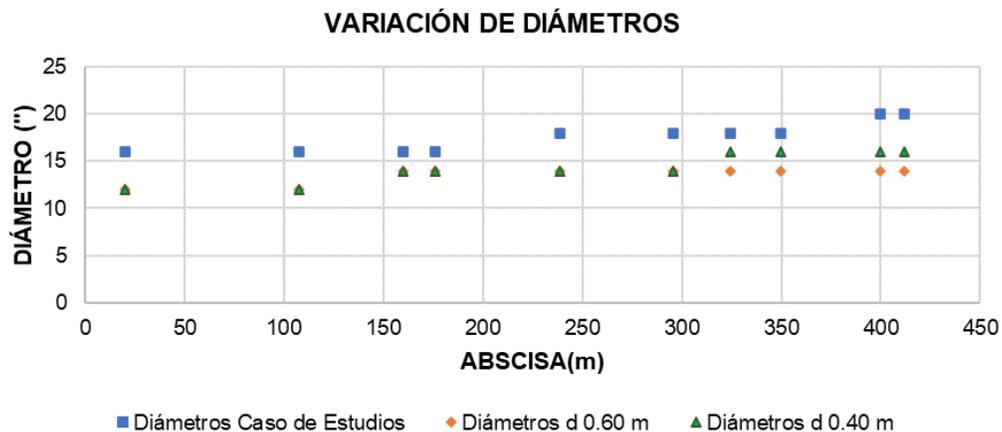


Figura 29. Variación de diámetros. Fuente: Elaboración Propia, 2022.

Con respecto a los resultados obtenidos para las cantidades de obra de “Superficie de afectación”, “Volumen de excavación” y “Entibados”, se tiene que, para el primer ítem, el diseño original presenta una menor superficie de afectación, pues los diámetros del colector son mayores, y por tanto la longitud de zanja se condiciona a la afectación por el espacio requerido para el pozo de inspección. Por su parte, para el ítem de “Volumen de Excavación”, el escenario con un delta de 0.40 m presenta el menor valor, teniendo en cuenta la optimización realizada en donde las profundidades medias oscilan entre 1.20 m y 2.80 m Finalmente, para el ítem de “Entibados”, el menor requerimiento se asocia al diseño original, en el entendido de las profundidades que presenta el colector para dar cumplimiento a la cota de llegada al sistema de tratamiento.

Tabla 21. Comparativo cantidades de obra

ESCENARIO DE ANÁLISIS	CANTIDADES DE OBRA			VALORACIÓN		
	SUPERFICIE DE AFECTACIÓN (m <sup>2</sup> )	VOLUMEN DE EXCAVACIÓN (m <sup>3</sup> )	ENTIBADOS (m <sup>2</sup> )	SUPERFICIE DE AFECTACIÓN	VOLUMEN DE EXCAVACIÓN	ENTIBADOS
Diseño original	572.6	1468.97	1370.73	100.00	79.38	100.00
delta 0.60 m	590.6	1370.9	1466.73	96.95	85.06	93.45
delta 0.40 m	590.6	1166.05	1648.25	96.95	100.00	83.16
Mínimo	572.6	1166.05	1370.73			

Fuente. Elaboración Propia, 2022.

Gráficamente el comportamiento de los ítems descritos previamente se puede visualizar de la siguiente manera:

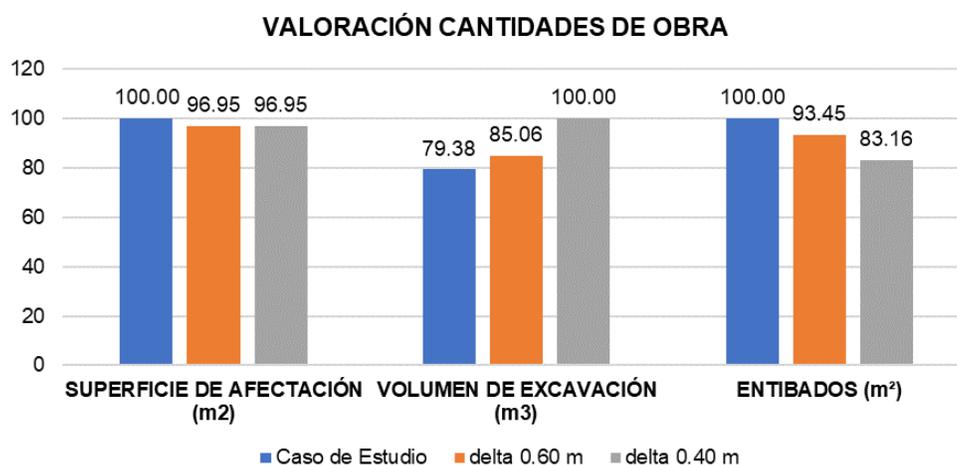


Figura 30. Valoración cantidades de obra. Fuente: Elaboración Propia, 2022.

El costo total de obra civil del diseño original es de \$ 424.820.186, para el escenario con un delta de 0.60 m es costo total es de \$ 343.079.787 y para el escenario con un delta de 0.40 m es de

\$ 310.564.342. La variación con respecto al diseño original se puede explicar por el cálculo de volumen de excavación y entibados, ya que tal como se indicó anteriormente, las profundidades de variación entre los métodos manual y mecánico difieren. No obstante, no se considera un cambio significativo en el costo total del colector en el ejercicio práctico.

Por su parte, la diferencia para los resultados obtenidos en los escenarios para los deltas de 0.60 m y 0.40 m fue de \$ 32.515.445. El tiempo computacional para el primer caso fue de 6 minutos, mientras que para el segundo fue de 90 minutos. Si bien se optimiza la solución global, se considera que no se justifica el mayor tiempo computacional empleado. Es posible obtener un valor aproximado, en un tiempo de ejecución menor, lo que permitirá una toma de decisiones más rápida.

## 8 CONCLUSIONES

- Se construyeron bases de datos con información poblacional, topográfica y de costos a nivel nacional, con el fin de que el diseño se aproxime a las condiciones reales de la localidad de estudio.
- Se desarrolló una herramienta de apoyo que permite realizar el diseño óptimo de una red de alcantarillado sanitario a partir de un conjunto de datos de entrada y el establecimiento de restricciones. Cabe mencionar que el aplicativo, funciona para una red en serie, sin tramos aferentes a la misma. Esta es una mejora que se contempla más adelante.
- La definición de las restricciones hidráulicas y constructivas empleadas en el aplicativo garantizan que el diseño optimizado para la solución global cumple con las disposiciones de la normatividad vigente del sector.
- Se ejecutó el aplicativo y se compararon los costos obtenidos para un caso de estudio real, en donde las variaciones de los costos son menores, y se pueden asociar a condiciones de cálculo de cantidades de obra, no obstante, representa una aproximación detallada que facilita la toma de decisión respecto a la inversión de recursos.
- El tiempo computacional se incrementa considerablemente según el delta de profundidad que se asigne, sin representar cambios significativos en los resultados de costos globales de la ruta óptima.
- Teniendo en cuenta los tiempos requeridos por una entidad territorial bien sea Plan Departamental de Agua o alcaldías municipales, para la emisión de procesos para la construcción de infraestructura en agua y saneamiento básico, con rubros, en algunos casos, alejados de la realidad, se considera viable el uso del aplicativo para tener una aproximación a lo requerido para la zona de estudio y de esta manera poder ejecutar la obra con recursos propios y/o emitir procesos cercanos en cantidades y rubros.

## 9 RECOMENDACIONES

- Se puede implementar el aplicativo a interfaces que permitan un mayor almacenamiento de datos y reduzca los tiempos computacionales. Para efectos del presente proyecto y su alcance, se obtuvieron resultados favorables para los escenarios analizados.
- La base de precios del aplicativo se construyó a partir de información secundaria del INVIAS y listados de precios propios de cada departamento, con periodos 2022-1, en este orden de ideas, si se desea emplear en años futuros, se deberá actualizar la información propiamente para las capitales del país, teniendo en cuenta que la información para los demás municipios se calcula a partir de un factor distancia dispuesto en la hoja "1. Base de Datos".
- El aplicativo no contempla análisis de interferencias con otras redes (acueducto, gas, telefonía, etc), por tanto, el usuario deberá tener en cuenta las particularidades propias del terreno y modificar las restricciones de profundidad inicial y final y clave, para aproximarlos a la realidad del sector de estudio.
- El aplicativo contempla el análisis de tramos en serie, en caso de que se tengan afluentes, se deberán diseñar en hojas de cálculo diferentes, y los caudales aferentes se deberán considerar dentro de los datos de entrada con el fin de lograr un análisis congruente de los tramos a analizar.
- El aplicativo realiza el análisis de información únicamente en vertical, razón por la cual, el usuario deberá tener preestablecido el alineamiento que desea diseñar.
- Si bien el aplicativo presenta el diseño optimizado para una información dada, se requiere validar en campo la pertinencia de los resultados generados, a partir de las condiciones particulares de la zona de estudio.

## 10 BIBLIOGRAFÍA

DOMINGOS DA SILVA, Divaldo. “Estrategia para el diseño de redes de drenaje pluvial, empleando la modelación matemática, para su aplicación en la ciudad de Luanda” [En línea]. Tesis Doctoral. Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría, La Habana, 2015. [Consultado 13 octubre 2021]. Disponible en: <http://blogdelagua.com/wp-content/uploads/2015/05/Tesis-Completa-Ultima.pdf>.

PÉREZ, Ramiro. “Programa Python, para calcular la pendiente crítica límite en canales abiertos, aplicado al cálculo de perfiles de FGV” [En línea]. Artículo Científico. Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín, Colombia, 2018. [Consultado 10 noviembre 2021]. Disponible en: [https://www.ina.gob.ar/congreso\\_hidraulica/resumenes/LADHI\\_2018\\_RE\\_499.pdf](https://www.ina.gob.ar/congreso_hidraulica/resumenes/LADHI_2018_RE_499.pdf).

PEINADO VALDERRAMA, Carlos David. “Uso del programa cie-agua para el diseño optimizado de redes de drenaje urbano. Redes patrón para Colombia.” [En línea]. Tesis de Especialización. Universidad de los Andes, Bogotá, 2014. [Consultado 11 agosto de 2022]. Disponible en: [https://documentodegrado.uniandes.edu.co/documentos/201310726\\_fecha\\_2014\\_03\\_02\\_hora\\_21\\_04\\_10\\_parte\\_1.pdf](https://documentodegrado.uniandes.edu.co/documentos/201310726_fecha_2014_03_02_hora_21_04_10_parte_1.pdf).

IZQUIERDO, Joaquín, y otros. “Diseño óptimo de redes de evacuación de aguas residuales” [En línea]. Artículo Científico. Centro Multidisciplinar de Modelación de Fluidos. Universidad Politécnica de Valencia, España, 2008. [Consultado 25 agosto de 2021]. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0898122108000722>.

DUQUE VALDERRAMA Natalia. “Metodología para la optimización del diseño de tuberías en serie en sistemas de alcantarillado” [En línea]. Tesis de Pregrado. Universidad de los Andes, Bogotá, 2013. [Consultado 11 agosto de 2022]. Disponible en: <https://repositorio.uniandes.edu.co/handle/1992/20095>

R. Moeini, M.H. Afshar. “Layout and size optimization of sanitary sewer network using intelligent ants” [En línea]. Artículo Científico. Iran University of Science and Technology, Iran, 2012. [Consultado 10 noviembre de 2021]. Disponible en: <ftp://ftp.ecn.purdue.edu/cklinkha/MMA%20Networks%20Brasil/Literature/complex%20systems%20literature/round%201-s2.0-S0965997812000737-main.pdf>.

Larry W. Mays y Yeou-Koung Tung (1992) *Hydrosystems Engineering and Management*. McGraw-Hill, Inc.

Resolución 0330 de 2017 “Por la cual se adopta el Reglamento Técnico para el Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico – RAS y se derogan las resoluciones 1096 de 2000, 0424 de 2001, 0668 de 2003, 1459 de 2005, 1447 de 2005 y 2320 de 2009” [En línea].