

PROYECTO DE GRADO INGENIERÍA CIVIL

**USO DE METODOLOGÍAS DE DISEÑO OPTIMIZADO PARA EL
LEVANTAMIENTO DE CATASTRO DE REDES DE DRENAJE URBANO**

María Ximena Valenzuela Blanco

Asesor: Juan G. Saldarriaga Valderrama



**UNIVERSIDAD DE LOS ANDES
FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL Y AMBIENTAL
BOGOTÁ D.C.
2021**

AGRADECIMIENTOS

A Dios, por ser mi guía para crecer un poco más todos los días y darme la fuerza para cumplir mis objetivos.

A mis padres, de manera especial a mi mamá y a mi tía Alejandra por su apoyo y amor incondicional. Gracias por estar a mi lado en cada paso y motivarme a seguir adelante siempre.

A mis amigos, quienes siempre me han sacado una sonrisa y han sido parte fundamental de mi camino.

A mi novio, por acompañarme, escucharme y darme ánimo siempre.

A mi asesor, Juan Saldarriaga, de quien he aprendido mucho durante toda la carrera. Gracias por su paciencia y guía durante todo este proceso.

A los ingenieros Daniel Rodríguez Amaya, Fredy Angulo Hernández, Iván Paiva y Ligia Zarate por su apoyo durante el desarrollo de las entrevistas.

TABLA DE CONTENIDO

1	Introducción	1
1.1	Objetivos.....	2
1.1.1	Objetivo General.....	2
1.1.2	Objetivos Específicos	2
2	Marco teórico	3
2.1	Sistema de drenaje urbano	3
2.2	Componentes del sistema.....	3
2.3	Etapas de diseño.....	4
2.4	Cálculo de caudales.....	4
2.4.1	Contribución de aguas residuales al caudal de diseño.....	5
2.4.2	Contribución de aguas lluvias al caudal de diseño.....	6
2.5	Supuestos y ecuaciones de diseño	7
2.6	Restricciones hidráulicas	9
3	Metodología.....	11
3.1	Antecedentes	11
3.2	Metodología propuesta	14
3.3	Encuesta realizada.....	16
4	Resultados.....	17
4.1	Casos de estudio.....	17
4.1.1	Red Chicó sur.....	17
4.1.2	Red la Esmeralda	20
4.1.3	Red Cedritos	22
4.2	Encuestas realizadas	25
4.2.1	Encuesta 1.....	25
4.2.2	Encuesta 2.....	26
4.2.3	Encuesta 3.....	26
4.2.4	Encuesta 4.....	27

5	Análisis de resultados	28
5.1	Prácticas de diseño en Colombia.....	28
5.2	Comparación de las redes virtuales	29
5.2.1	Red Chicó sur.....	29
5.2.2	Red La Esmeralda	31
5.2.3	Cedritos	34
6	Conclusiones	36
7	Recomendaciones	38
8	Referencias.....	40

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Interacción población-sistema de drenaje-ambiente.....	3
Figura 2. Sección circular típica.....	8
Figura 3. Posibles variables de decisión para un tramo.....	11
Figura 4. Diagrama de flujo de la metodología para el diseño, propuesta por Duque y adaptado por Zambrano.....	13
Figura 5. Diagrama de flujo de la metodología propuesta para alcantarillado sanitario y alcantarillado de aguas lluvias.....	15
Figura 6. Caso de estudio zona Chicó sur delimitada.....	17
Figura 7. Caso de estudio zona la Esmeralda delimitada.....	20
Figura 8. Caso de estudio zona Cedritos delimitada.....	23
Figura 9. Red alcantarillado sanitario Chicó sur registrada por la Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá.....	30
Figura 10. Red alcantarillado sanitario la Esmeralda registrada por la Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá.....	32
Figura 11. Red alcantarillado sanitario Cedritos registrada por la Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá.....	34
Figura 12. Nuevo diagrama de flujo para levantamiento de catastro para alcantarillado sanitario.....	38

ÍNDICE DE GRÁFICAS

Gráfica 1. Topografía red Chicó sur.....	18
Gráfica 2. Trazado red Chicó sur utilizando criterio 3 de Zambrano.	19
Gráfica 3. Topografía red la Esmeralda.....	20
Gráfica 4. Trazado red la Esmeralda utilizando criterio 5 de Zambrano.	22
Gráfica 5. Topografía red Cedritos.	23
Gráfica 6. Trazado red Cedritos utilizando criterio 8 de Zambrano.	25
Gráfica 7. Aspectos utilizados por diseñadores para definir el trazado de una red.....	28
Gráfica 8. Comparación de tipo de tuberías en redes virtuales vs red alcantarillado sanitario registrado por el Acueducto.	29
Gráfica 9. Diferencias en el trazado de la empresa de Alcantarillado y Acueducto de Bogotá respecto al trazado 3.....	30
Gráfica 10. Comparación diámetros de la red Chicó sur utilizando todos los diámetros comerciales.....	31
Gráfica 11. Comparación diámetros de la red Chicó sur utilizando el catálogo de diámetros modificado.	31
Gráfica 12. Diferencias en el trazado de la empresa de Alcantarillado y Acueducto de Bogotá respecto al trazado 5.....	32
Gráfica 13. Comparación diámetros de la Esmeralda utilizando todos los diámetros registrados.	33
Gráfica 14. Comparación diámetros de la Esmeralda utilizando el catálogo de diámetros modificado.	33
Gráfica 15. Diferencias en el trazado de la empresa de Alcantarillado y Acueducto de Bogotá respecto al trazado 8.....	34
Gráfica 16. Comparación diámetros de Cedritos.	35

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Contribución caudal industrial según complejidad.....	6
Tabla 2. Clasificación del flujo según variaciones espacio-tiempo.....	7
Tabla 3. Cantidad de secciones iniciales/continúas obtenidas con los trazados realizados red Chicó sur.	18
Tabla 4. Resultados del diseño hidráulico para la red de Chicó sur utilizando los criterios de Zambrano.	19
Tabla 5. Cantidad de secciones iniciales/continúas obtenidas con los trazados realizados red la Esmeralda. ...	21
Tabla 6. Resultados del diseño hidráulico para la red de Chicó sur utilizando los criterios de Zambrano.	21
Tabla 7. Cantidad de secciones iniciales/continúas obtenidas con los trazados realizados red Cedritos.	24
Tabla 8. Resultados del diseño hidráulico para la red de Cedritos utilizando los criterios de Zambrano.	24

ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación 2.1. Cálculo del caudal de aguas domésticas mediante la proyección de la demanda de agua potable.	5
Ecuación 2.2. Cálculo del caudal de aguas domésticas mediante la proyección de clientes.	5
Ecuación 2.3. Cálculo del caudal de aguas domésticas mediante la proyección de la población.	5
Ecuación 2.4. Cálculo del caudal institucional.	5
Ecuación 2.5. Cálculo del caudal medio diario.	5
Ecuación 2.6. Cálculo del caudal de diseño.	6
Ecuación 2.7. Ángulo Theta.	8
Ecuación 2.8. Área mojada.	8
Ecuación 2.9. Perímetro mojado.	8
Ecuación 2.10. Radio hidráulico.	8
Ecuación 2.11. Ancho espejo de agua.	9
Ecuación 2.12. Número de Froud.	9
Ecuación 2.13. Número de Reynolds.	9
Ecuación 2.14. Esfuerzo cortante.	9
Ecuación 2.15 Ecuación de Darcy-Weisbach en conjunto con Colebrook-White.	9
Ecuación 3.1. Función objetivo para la definición del trazado inicial.	12
Ecuación 3.2. Ecuación de costo utilizada.	14

1 INTRODUCCIÓN

En Colombia, al diseñar redes de drenaje urbano se cuenta con distintas normativas de diseño, dentro de las cuales se destacan: el Reglamento del Sector Agua Potable y Saneamiento Básico (RAS) y la Norma del Diseño de Sistema de Alcantarillado de EPM (Empresas Públicas de Medellín). Sin embargo, no siempre se cuenta con la información completa de las redes de drenaje urbano en todo el país. Por tal motivo, se generan sobrecostos al momento de diseñar nuevas redes, especialmente en ciudades pequeñas.

Un catastro de redes de drenaje urbano se entiende como un sistema de registro y archivo en el que es posible encontrar información relacionada con los puntos de descarga, tipos de tubería, diámetros de las mismas, entre otras características fundamentales para el entendimiento de la red. Por este motivo el catastro de redes es un instrumento que puede ser utilizado para apoyar la toma de decisiones como son: la elaboración de planes de desarrollo, planes de ordenamiento territorial, evaluación y determinación de la viabilidad de nuevos proyectos, y valoración del estado de proyectos pre-existentes. Según el artículo 42 del RAS, *“se debe contar con un catastro de la red actualizado que incluya un inventario de las tuberías existentes, su localización y el mayor número de anotaciones posibles para cada accesorio estratégico en la operación”* (Ministerio de vivienda, ciudad y territorio, 2016).

Al implementar una nueva red de drenaje, hoy día se evidencian problemas tales como la sobrecarga, debido a que no se conoce la ubicación de las redes existentes y por este motivo se dificulta el cálculo de caudales circulantes. Así mismo, cuando no se cuenta con la información adecuada y se requiere realizar mejoras en el sistema, se desperdician recursos económicos y/o humanos, desaprovechando la posibilidad de obtener soluciones eficientes y perdurables en el tiempo. Lo anterior, constituye un antecedente en cuanto a la visión clásica del diseño de alcantarillados en Colombia.

En años recientes, se han desarrollado investigaciones para la determinación del catastro en redes de agua potable, como las evidenciadas en las tesis de maestría de Laura Martínez y Juliana Robles, en donde se utilizó software que permitía abordar el problema. En la tesis de Natalia Duque se explica el diseño optimizado de redes de drenaje que puede constituir una herramienta para abordar esta problemática. En otras investigaciones, se plantea el tema del diseño optimizado de redes de drenaje urbano; así mismo, se define una metodología para el desarrollo de este.

Durante este proyecto se propone utilizar el software UTOPIA desarrollado por el CIACUA, que junto con otros programas permitirá evaluar los resultados obtenidos, y compararlos con la información existente de redes de drenaje en tres casos de estudio: Chicó, Cedritos y la Esmeralda. A partir de lo anterior se pretende determinar si un diseño optimizado de la red constituye una buena aproximación para la generación de catastro de redes de alcantarillado sanitario.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo General

Desarrollar una metodología con base en diseño optimizado, para ayudar en el levantamiento de catastro de redes de drenaje urbano.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Determinar las características hidráulicas de una red de drenaje óptimamente diseñada.
- Entender cómo han sido las prácticas de diseño de alcantarillado no optimas que se han utilizado en el país.
- Generar redes virtuales de alcantarillado como base para un catastro.

2 MARCO TEÓRICO

2.1 Sistema de drenaje urbano

Los sistemas de drenaje urbano son todas las estructuras físicas que se construyen mediante obras civiles, las cuales tienen la finalidad de disponer adecuadamente de las aguas lluvias y residuales. Permitiendo disminuir los problemas relacionados con una disposición incorrecta de estas aguas, ya que pueden impactar la vida humana o el medio ambiente. Según Butler & Davies, un sistema de drenaje urbano representa la relación entre el medio ambiente y la población como se muestra en el siguiente diagrama (Butler & Davies, 2000).

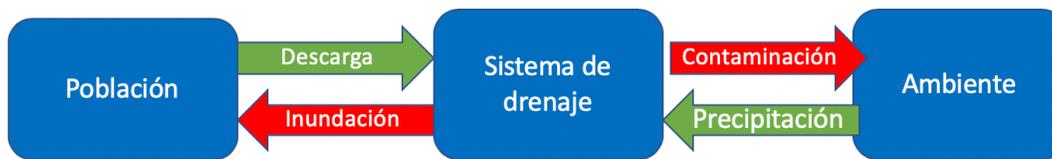


Figura 1. Interacción población-sistema de drenaje-ambiente.

Tomado y adaptado de (Butler & Davies, 2000)

En la figura anterior se puede observar que el sistema de drenaje urbano surge de la necesidad de dar un manejo adecuado tanto al agua que ha sido suministrada y posteriormente utilizada (aguas residuales), como al agua lluvia, que debido a las zonas impermeables se ha convertido en escorrentía superficial. En caso que el manejo de estas aguas no fuese el adecuado, podrían presentarse problemas de contaminación en los cuerpos receptores, generando un riesgo para la salud o inundaciones que se traducirían en daños a la infraestructura, entre otros. Teniendo en cuenta lo anterior, es de suma importancia que los sistemas de drenaje urbano sean integrales, es decir que la red de alcantarillado, las plantas de tratamiento y el cuerpo receptor, sean evaluados como un todo; así, poder evitar que se sobredimensionen componentes y se incurra en sobrecostos o problemas de funcionamiento. Por lo tanto, para cumplir con este objetivo, un sistema de drenaje debe contar con componentes de captación, conducción, inspección y conexión de colectores, regulación/alivio y bombeo (Saldarriaga Valderrama, Sistema integrado de drenaje urbano, 2020).

2.2 Componentes del sistema

Los componentes de captación, como su nombre lo indica, se encargan de recolectar el agua que entrará al sistema, por este motivo estas estructuras difieren dependiendo de si se trata de aguas residuales o aguas lluvias. Para el caso de aguas lluvias, estas provienen de las áreas impermeables como techos, calles pavimentadas, plazas, entre otros; por lo que es común utilizar canaletas, bajantes o sumideros. Por otra parte, las aguas residuales se captan directamente de los puntos de descarga. Según el RAS estas aguas deben ser clasificadas en: domésticas, comerciales, industriales, de uso especial o de uso oficial para darles una disposición adecuada.

Los componentes de conducción usualmente son las tuberías, que permiten transportar el flujo a lo largo del sistema. Durante la fabricación de estos componentes es posible utilizar distintos materiales como: hierro dúctil, concreto, arcilla vitrificada, acero, entre otros. En los casos de estudio que se mencionan en detalle más adelante, se encontró que el material de los componentes de conducción por lo general es GRES o PVC.

Los componentes de inspección y conexión de colectores normalmente son cámaras de inspección o cámaras de caída. Las cámaras de inspección permiten revisar periódicamente cambios en la dirección del flujo o en la pendiente y el diámetro utilizados en las tuberías. Las cámaras de caída además de ser un componente de conexión permiten disipar la energía del flujo y dirigirlo. Por otra parte, las estructuras de regulación y alivio incluyen aliviaderos, sifones invertidos y sistemas de almacenamiento temporal, que permiten regular la cantidad de flujo que circula el sistema.

Finalmente, los componentes de bombeo son utilizados para evitar excavaciones profundas que aumenten los costos de construcción o cuando la energía en una zona sea muy baja y en consecuencia no sea posible evacuar el flujo por gravedad. Dentro de los componentes de bombeo más utilizados se encuentran las bombas centrífugas, helicoidales y eyectoras.

2.3 Etapas de diseño

Para poder diseñar un sistema de drenaje urbano, el RAS 2016 contempla cuatro etapas de diseño fundamentales (Ministerio de vivienda, ciudad y territorio, 2016).

La primera es la etapa de conceptualización y planificación, en esta se debe definir el nivel de complejidad del sistema y justificar la necesidad del mismo dentro del marco institucional, incluyendo aspectos legales, ambientales y del plan de desarrollo correspondiente. Así mismo, dentro de la primera etapa se debe definir el alcance del proyecto y se deben llevar a cabo los estudios correspondientes, incluyendo un análisis de factibilidad económica de distintas alternativas.

Posteriormente se contempla la etapa de diseño, en la que se deben definir las fases de desarrollo y las especificaciones técnicas de cada alternativa evaluada, incluyendo en el presupuesto las cantidades y los recursos necesarios. Después, se debe llevar a cabo la etapa de construcción o implementación, durante la cual se resalta la importancia del desarrollo de un proceso de interventoría. Finalmente, se considera la etapa de operación y mantenimiento en la cual se debe garantizar el correcto funcionamiento del sistema de drenaje.

2.4 Cálculo de caudales

La norma colombiana establece un periodo de diseño mínimo correspondiente a 25 años o 30 años en caso de que la complejidad del sistema sea alta. A continuación, se detalla el cálculo de las contribuciones de caudal para el caso de aguas residuales y aguas lluvias.

2.4.1 Contribución de aguas residuales al caudal de diseño

En el RAS 2016, se establece que el caudal sanitario correspondiente a las aguas domésticas inicialmente debe calcularse mediante una proyección de la demanda neta de agua potable (D_{NETAP}). Para esto se propone multiplicar la demanda proyectada por el área de servicio (A) y por un coeficiente de retorno (C_R) que oscila entre 0,8 y 0,5 dependiendo del nivel de complejidad del sistema, a continuación, se presenta esta ecuación.

$$Q_D = C_R * A * D_{NETAP}$$

Ecuación 2.1. Cálculo del caudal de aguas domésticas mediante la proyección de la demanda de agua potable.

En caso de no contar con esta información, el RAS 2016 sugiere dos métodos alternativos. La primera alternativa sugiere utilizar una proyección de los clientes (P_C) multiplicada por la demanda neta (D_{NETAC}) como se muestra a continuación.

$$Q_D = \frac{C_R * P_C * D_{NETAC}}{30}$$

Ecuación 2.2. Cálculo del caudal de aguas domésticas mediante la proyección de clientes.

La segunda alternativa debe ser considerada en caso de no contar con la información para realizar el cálculo anterior, esta consiste en utilizar una proyección de la población (P) y multiplicar esta por la demanda neta (D_{NETA}). Sin embargo, es importante recordar que este método proporciona una aproximación menos exacta que los anteriores por lo que en caso de ser posible, se recomienda utilizar los primeros métodos. A continuación, se presenta la ecuación correspondiente al tercer método.

$$Q_D = \frac{C_R * P * D_{NETA}}{86400}$$

Ecuación 2.3. Cálculo del caudal de aguas domésticas mediante la proyección de la población.

Adicionalmente, en el cálculo de caudales sanitarios en caso que la zona lo requiera deben considerarse aportes de caudales industriales, comerciales, oficiales, por conexiones erradas y por infiltración. De la misma manera, el caudal medio diario (el cual incluye aguas domésticas, industriales, comerciales e institucionales) debe ser mayorado por un factor que considera variaciones normales del consumo a lo largo de los días, este puede ser establecido mediante mediciones de campo. A continuación, se presenta la ecuación que define el caudal sanitario total que debe considerarse en el diseño de una red de alcantarillado sanitario.

$$Q_{institucional} = Q_{oficial} + Q_{especial}$$

Ecuación 2.4. Cálculo del caudal institucional.

$$Q_{MedioDiario} = Q_{Domestico} + Q_{Industrial} + Q_{Comercial} + Q_{Institucional}$$

Ecuación 2.5. Cálculo del caudal medio diario.

$$Q_D = (F * Q_{MedioDiario}) + Q_{Infiltración} + Q_{Conexiones erradas}$$

Ecuación 2.6. Cálculo del caudal de diseño.

El caudal industrial mencionado anteriormente, debe calcularse mediante información obtenida de censos, encuestas sobre el tipo de industrias presentes y sus procesos o estimativos de ampliaciones y consumos futuros. El caudal industrial se debe calcular como el máximo entre la condición inicial de operación y la condición final del periodo de diseño. En industrias pequeñas se puede utilizar la siguiente tabla como un estimativo de la contribución según el nivel de complejidad.

Tabla 1. Contribución caudal industrial según complejidad.

Tomado y adaptado de (Ministerio de vivienda, ciudad y territorio, 2016).

Complejidad	Contribución ($\frac{L}{s * Ha * ind}$)
Baja	0,4
Media	0,6
Media-Alta	0,8
Alta	1

El caudal relacionado con aguas comerciales debe determinarse mediante un estudio detallado del consumo actual de los clientes comerciales o del consumo diario por persona y por número de personas en el área. En caso de no contar con registros históricos de consumos comerciales para realizar los estudios correspondientes se debe utilizar coeficientes de retorno mayores a los determinados en el consumo doméstico.

El caudal de uso oficial depende del tipo de instalación y deben realizarse estudios similares a los requeridos para determinar el caudal de aguas comerciales, en general las instalaciones de uso oficial incluyen paneles educativos, hospitales o centros de salud, ancianatos y orfanatos oficiales. De igual forma, el caudal de uso especial se debe determinar mediante estudios detallados del histórico de consumo. Las instalaciones de uso especial incluyen organizaciones sin ánimo de lucro como instituciones de beneficencia, centros culturales e instituciones de servicio social.

El caudal relacionado a conexiones erradas debe calcularse en función de la calidad de las mediadas de control. El caudal por conexiones erradas no debe superar $0,2 \frac{L}{s * Ha}$. Finalmente, el caudal por infiltración se debe determinar mediante aforos realizados en horas de consumo mínimo y deben considerarse factores como la permeabilidad del suelo, topografía, variación del nivel freático, estado de las tuberías, cantidad de uniones o juntas, entre otros.

2.4.2 Contribución de aguas lluvias al caudal de diseño

Para calcular el caudal relacionado con aguas lluvias es recomendable utilizar modelos lluvia escorrentía que consideren el coeficiente de impermeabilidad de la zona, la intensidad de la precipitación, curvas IDH (intensidad, duración, frecuencia) y tiempo de concentración. En general

el cálculo del coeficiente de impermeabilidad debe considerar factores como el tipo de cuenca, el grado de impermeabilidad de la zona, la pendiente del terreno y métodos que determinen qué fracción de la precipitación se convierte en escorrentía. Es importante que estos métodos se estimen al final del periodo de diseño que como se mencionó anteriormente debe ser al menos 25 años.

En caso de que el área de estudio sea pequeña es posible utilizar el método racional, sin embargo, al utilizar este método se debe ser consiente que se asume la ocurrencia del caudal pico cuando toda el área de drenaje contribuye, por lo que puede resultar en un sobredimensionamiento del sistema; por lo anterior, siempre que sea posible se recomienda utilizar modelos lluvia escorrentía.

2.5 Supuestos y ecuaciones de diseño

Al momento de diseñar un sistema de drenaje es necesario suponer un tipo de flujo, con el fin de calcular la hidráulica de manera adecuada. La determinación del tipo de flujo depende de cambios en las condiciones hidráulicas como lo son cambios en la profundidad de la lámina de agua y la velocidad del flujo. Teniendo en cuenta lo anterior, el flujo se clasificará según las variaciones en el espacio y tiempo como se muestra en la siguiente tabla. Es importante mencionar que el *flujo uniforme no permanente* se encuentra sombreado en rojo ya que este no ocurre de forma natural (Saldarriaga Valderrama, Repaso mecánica de fluidos, 2021).

Tabla 2. Clasificación del flujo según variaciones espacio-tiempo.

Tomado y adaptado (Saldarriaga Valderrama, Repaso mecánica de fluidos, 2021).

Espacio / Tiempo	Uniforme	Variado
Permanente	Flujo uniforme permanente	Flujo variado permanente (FGV-FRV)
No permanente	Flujo uniforme no permanente	Flujo variado no permanente

Para el caso de tuberías fluyendo parcialmente llenas (como es el caso de las tuberías de alcantarillado sanitario, de aguas lluvias y mixto), el flujo no es permanente, sin embargo, dado que este flujo tiende a estabilizarse en el espacio, es posible suponer una condición de flujo uniforme, de esta manera los cálculos realizados se simplifican considerablemente. Para que las ecuaciones que se van a utilizar sean válidas, es necesario suponer que el material y la sección transversal utilizada para cada tramo calculado es constante. Adicionalmente para poder suponer que la distribución de presiones es hidrostática, es necesario garantizar que la pendiente en todos los tramos es menor al 10%. A continuación, se presenta un diagrama de la sección circular fluyendo parcialmente llena, ya que es esta la que se utiliza normalmente en Colombia para sistemas de drenaje urbano.

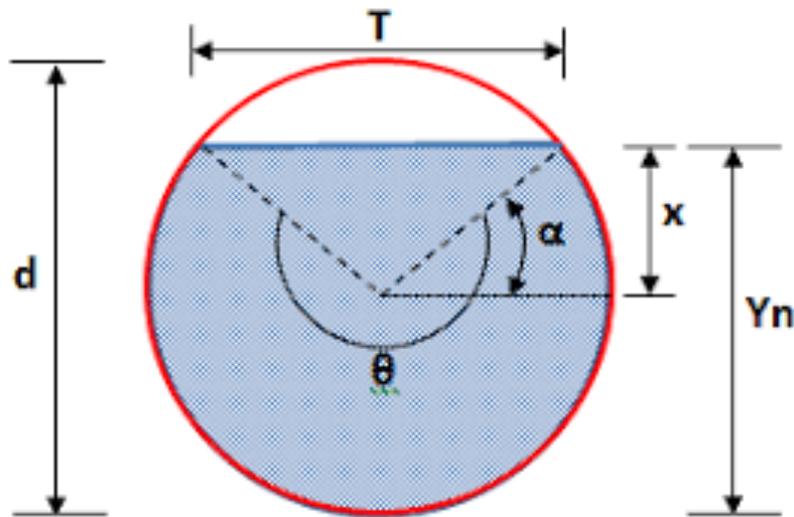


Figura 2. Sección circular típica.

Tomado de (Saldarriaga Valderrama, Vasquez, & Rocha, Estudio en montaje físico del flujo cuasicrítico en tuberías de alcantarillado fluyendo Parcialmente Llenas (Study of the Quasi Critical Flow in Partially-Full Sewer Pipes Using an Experimental Model), 2017)

A continuación, se presentan las ecuaciones asociadas a la geometría de la sección circular que se utilizan durante el diseño.

$$\theta = \pi + 2 * \sin^{-1} \left(\frac{y_n - \frac{d}{2}}{\frac{d}{2}} \right)$$

Ecuación 2.7 Ángulo Theta

$$A = \left(\frac{1}{8} \right) * (\theta - \sin \theta) * d^2$$

Ecuación 2.8. Área mojada.

$$P = \frac{d}{2} * \theta$$

Ecuación 2.9. Perímetro mojado.

$$R = \frac{A}{P}$$

Ecuación 2.10. Radio hidráulico.

$$T = d * \cos \left(\sin^{-1} \left(\frac{y_n - \frac{d}{2}}{\frac{d}{2}} \right) \right)$$

Ecuación 2.11. Ancho espejo de agua.

$$Fr = \frac{v}{\sqrt{gD}}$$

Ecuación 2.12. Número de Froud.

$$Re = \frac{4Rv}{\nu}$$

Ecuación 2.13. Número de Reynolds.

$$\tau_0 = \rho gRS$$

Ecuación 2.14. Esfuerzo cortante.

Para calcular la velocidad es posible utilizar la ecuación de Manning o la ecuación de Darcy, en este caso se decidió utilizar la ecuación de Darcy-Weisbach en conjunto con Colebrook-White la cual se presenta más adelante. Lo anterior se debe a que la ecuación de Darcy es físicamente basada, mientras que la ecuación de Manning es empírica, lo que hace que el n de Manning cambie según la relación de llenado que se utilice.

$$v = -2 * \sqrt{8gRS} * \log \left(\frac{k_s}{14.8R} + \frac{2.51\nu}{4R\sqrt{8gRS}} \right)$$

Ecuación 2.15 Ecuación de Darcy-Weisbach en conjunto con Colebrook-White.

2.6 Restricciones hidráulicas

Al diseñar sistemas de drenaje urbano se deben utilizar las restricciones de diseño propuestas por el RAS 2016, dado que a través de estas es posible garantizar el correcto funcionamiento del sistema. Las restricciones mencionadas a continuación tienen como objetivo garantizar un mínimo de auto limpieza, adicionalmente, estas evitan fallas en el funcionamiento, tales como una sobrecarga del sistema. (Ministerio de vivienda, ciudad y territorio, 2016)

- **Diámetro mínimo:** Con el fin evitar obstrucciones en el sistema, se establece un diámetro mínimo de 170 mm para sistemas de drenaje urbano. Por otra parte, en caso de tratarse de un



sistema de drenaje de aguas lluvias o aguas combinadas se recomienda que el diámetro mínimo sea de 215 mm.

- Esfuerzo cortante mínimo: Para poder garantizar un mínimo de auto limpieza es recomendable tener un esfuerzo cortante mínimo de 1 Pa en sistemas de aguas residuales. En caso de tratarse de un sistema de aguas lluvias se recomienda utilizar un esfuerzo cortante mínimo de 2,5 Pa.
- Velocidad mínima: Este requisito está directamente relacionado con el mencionado anteriormente ya que busca evitar obstrucciones en el sistema. Para el caso de alcantarillado sanitario la velocidad mínima corresponde a 0,45 m/s mientras que para alcantarillados combinados o de agua lluvia la velocidad mínima es de 0,75 m/s.
- Relación máxima de llenado: *“La relación de llenado tiene como objetivo evitar sobrecargas en sistema, así mismo, asegura la aeración del mismo para evitar problemas ambientales”* (Duque Villareal, 2015). A partir de lo anterior, en el caso del alcantarillado sanitario se recomienda que la relación de llenado no supere el 85%. Sin embargo, en caso que el número de Froud sea cuasi-crítico se debe limitar esta relación de llenado al 70%, debido al carácter oleado típico de este flujo.
- Pendiente: En el título D del RAS 2016 se establece que la pendiente debe ser aquella que permita cumplir con los requisitos de velocidad y auto limpieza. Sin embargo, es importante mencionar que dentro las suposiciones de diseño, se estableció que la pendiente no debe ser mayor al 10%, con el fin de mantener la distribución de presiones hidrostática.
- Profundidad de la cota clave: Se establece que para zonas verdes o peatonales la profundidad mínima debe ser de 0,75 m, mientras que para zonas vehiculares la profundidad mínima debe ser de 1,2 m. De igual manera se establece que la profundidad máxima no debe superar los 5 metros.

Cuando no se cumple con las restricciones de diseño, es posible tener fallas de funcionamiento en el sistema tales como la sedimentación o la sobrecarga del sistema. La sedimentación ocurre cuando la velocidad del flujo es baja y en consecuencia las partículas se acumulan en el fondo de la tubería causando que la capacidad hidráulica disminuya. Por otra parte, la sobrecarga puede ocurrir cuando la relación de llenado es superior a la recomendada, ya que en caso de superar una relación de llenado del 94% la capacidad de la tubería disminuye y la tubería se presuriza, lo que se puede traducir en inundaciones.

3 METODOLOGÍA

3.1 Antecedentes

Al investigar el problema del diseño optimizado en redes de drenaje urbano, se encontró que en trabajos pasados se abordaron dos problemas fundamentales: la elección del trazado o árbol y el diseño hidráulico que genera un menor costo a partir del trazado mencionado anteriormente.

Para solucionar el segundo componente del problema, el cual está relacionado con el diseño hidráulico optimizado, se utilizó la metodología propuesta por Natalia Duque en 2015. Esta metodología establece que, al conocer el trazado, el caudal de diseño, el sentido del flujo y el tipo de tubería, se debe seleccionar el tamaño (diámetro) y posición (pendiente) de la tubería a instalar (Duque Villareal, 2015). En otras palabras, es posible decir que esta metodología busca encontrar la relación de tamaño y posición, que además de cumplir con las restricciones de diseño propuestas por el RAS 2016 y detalladas en el marco teórico del presente documento, genere menor costo dada una ecuación de costos. De la misma manera, es importante mencionar que además de conocer el trazado, el sentido del flujo y el tipo de tubería, es importante conocer las propiedades del agua que se transportará por el sistema y las características del material utilizado en las tuberías a instalar, de manera específica se debe contar con la viscosidad cinemática del agua residual (ν), la rugosidad del material (k_s) y el catálogo de diámetros disponibles para el diseño. Esta metodología fue implementada en 2015 en el programa computacional UTOPIA y fue la seleccionada para realizar el diseño hidráulico una vez se cuente con el trazado.

La metodología propuesta por Duque para la selección del trazado inicial, modela la red como un problema de *diseño de redes*, de manera que se modela cada tramo suponiendo que existen cuatro tipos de secciones. De manera resumida estos se pueden entender como la combinación entre los sentidos de flujo y los tipos de tubería posibles (inicial o continua). La combinación de los criterios mencionados anteriormente, conlleva a definir una variable binaria de decisión que es igual a uno si existe determinado tipo de tubería y cero si no existe, como se muestra en la siguiente figura y ecuación.

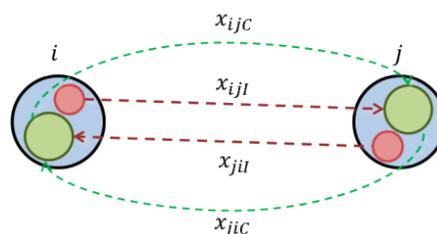


Figura 3. Posibles variables de decisión para un tramo.

Tomado de (Duque Villareal, 2015, pág. 35).

$$\min \sum_{t \in T} \sum_{(i,j,t) \in AL} c_{ij} q_{ijt} + \sum_{t \in T} \sum_{(i,j,t) \in AL} a_{ij} x_{ijt}$$

Ecuación 3.1. Función objetivo para la definición del trazado inicial.

Tomado de (Duque Villareal, 2015, pág. 38).

La anterior ecuación es la función objetivo lineal, en esta el primer termino está relacionado con un costo por unidad de flujo transportado, mientras que, el segundo termino está relacionado con la existencia del nodo. Para calcular los coeficientes a y c en una primera iteración Duque, propone realizar una regresión lineal de los costos de diseño hidráulico con el caudal transportado (Duque Villareal, 2015). Sin embargo, al final de su tesis de maestría, propone implementar mejoras al considerar otros factores además del caudal como el tipo de tubería. Teniendo en cuenta lo anterior, se decidió utilizar la metodología planteada por Jesús Zambrano en 2019 para obtener el trazado de la red. Con el fin de determinar la mejor aproximación al trazado, Zambrano propone la implementación de una variable (m) que permite asignar distintos pesos a los arcos con el fin de utilizar esta variable en la determinación del trazado. La variable m puede ser calculada de maneras distintas, generando un trazado diferente, por lo que Zambrano propone 9 criterios recomendando utilizar los primeros seis criterios cuando la topografía no es plana y los 3 restantes cuando la topografía es plana. Los criterios se explican a continuación.

- El criterio 1 tiene como objetivo principal reducir costos asociados a la excavación, priorizando los tramos con pendiente positiva. Teniendo en cuenta la anterior, este criterio consiste en asignar un valor de -1 para los tramos con pendiente positiva, de manera similar se propone asignar un valor de 1 para los tramos que se encuentran en contra pendiente.
- El criterio 2 tiene como objetivo priorizar los tramos con mayor pendiente. Para calcular m en este caso es necesario multiplicar -1 por la pendiente, de manera que al igual que en el criterio anterior se continúa priorizando los tramos que cuentan con una pendiente positiva.
- El criterio 3, al igual que el criterio 2, busca priorizar los tramos con mayor pendiente, sin embargo, en este caso, se penaliza la cantidad de tuberías iniciales con el fin de maximizar las tuberías continuas presentes.
- El criterio 4, busca priorizar los tramos con mayor pendiente al igual que los criterios anteriores (criterio 2 y 3), sin embargo, en este caso se penaliza la cantidad de tuberías continuas con el fin de maximizar las tuberías iniciales presentes en el trazado.
- El criterio 5 tiene como objetivo maximizar tanto los tramos con mayor pendiente como la cantidad de energía disponible para transportar determinado caudal por lo que m se calcula como la multiplicación de -1 por la pendiente y por la longitud del tramo.
- El criterio 6 puede ser considerado como una combinación de los criterios 3 y 5, ya que busca priorizar la cantidad de energía disponible, así como maximizar las tuberías continuas. Teniendo en cuenta para calcular m en este caso es necesario multiplicar -1 por la pendiente y la longitud, finalmente se penalizan las tuberías iniciales con un coeficiente.

- El criterio 7 tiene como objetivo minimizar la profundidad de excavación, por este motivo se recomienda implementar este criterio cuando la topografía es muy plana. Para minimizar la profundidad de excavación se busca disminuir la longitud de la serie principal, por lo que m se calcula como la distancia entre el pozo aguas abajo y la descarga final.
- El criterio 8 busca minimizar la profundidad de excavación al igual que el criterio 7, por este motivo, m se calcula de la misma manera que en el caso anterior, con la diferencia que en este caso se penalizan las tuberías de inicio mediante un coeficiente.
- El criterio 9 tiene como objetivo minimizar la longitud de los tramos continuos maximizando el número de tuberías de inicio. Teniendo en cuenta lo anterior m es igual a cero para los tramos iniciales y será igual a la longitud del tramo para las tuberías continuas.

A continuación, se presenta el diagrama de flujo del programa UTOPIA, modificado con el fin de implementar los criterios utilizados por Zambrano.

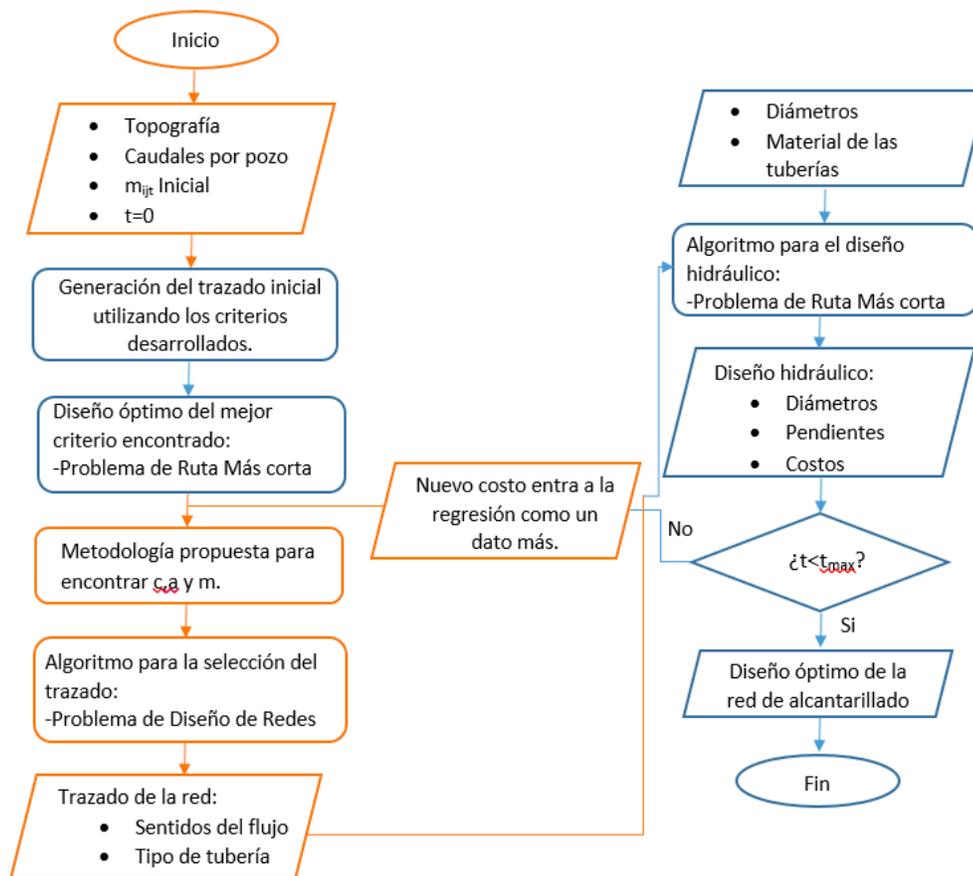


Figura 4. Diagrama de flujo de la metodología para el diseño, propuesta por Duque y adaptado por Zambrano.

Tomado de (Zambrano Briones, 2019, pág. 40).

Dado que el programa utilizado para el diseño optimizado desarrollado por el CIACUA (UTOPIA), requiere una ecuación para calcular el costo de cada uno de los tramos diseñados, se decidió utilizar para la optimización del diseño hidráulico la ecuación propuesta por Maurer, Wolfram & Herlyn en 2010 al realizar un análisis de los costos de construcción de redes alcantarillado combinado. En este estudio se tomaron en cuenta características hidrológicas, datos de la población, entre otros; que permitieron llegar a la ecuación presentada a continuación. En esta ecuación se relacionan la profundidad de excavación y el diámetro de la tubería seleccionada con el fin de determinar el costo asociado al proceso constructivo de cada tramo del sistema (Maurer, Wolfram, & Herlyn, 2010). En la ecuación planteada el término DN corresponde al diámetro nominal de la tubería en metros, mientras que el término D corresponde a la profundidad media de la tubería que también se obtiene durante el diseño hidráulico.

$$\text{Costo (US)} = (0.11 * DN + 127) * D + 1.2 * DN - 35$$

Ecuación 3.2. Ecuación de costo utilizada.

Tomado de (Maurer, Wolfram, & Herlyn, 2010)

En esta ecuación se relaciona la profundidad de excavación y el diámetro de la tubería seleccionada, con el fin de determinar el costo asociado al proceso constructivo de cada tramo del sistema (Maurer, Wolfram, & Herlyn, 2010). En la ecuación planteada el término DN corresponde al diámetro nominal de la tubería en metros, mientras que el término D corresponde a la profundidad media de la tubería que también se obtiene durante el diseño hidráulico.

3.2 Metodología propuesta

Teniendo en cuenta que uno de los objetivos de la presente investigación es entender las prácticas de diseño que se han dado en el país, se decidió aplicar una breve encuesta a distintos diseñadores que cuentan con experiencia en este campo. A partir de los resultados se pretende determinar las prácticas de diseño óptimas y no óptimas que se llevan a cabo en el país.

Otro de los objetivos de la presente investigación consiste en generar redes virtuales como una base para la generación de un catastro. Para cumplir con este objetivo es necesario tener como datos de entrada la ubicación del punto de descarga y un plano de calles/carreras que permita definir la ubicación de las cámaras de unión. Las cámaras de unión se ubicarán en la intersección de las calles y carreras, sin embargo, en caso de tener tramos muy largos es posible colocar una cámara de unión a la mitad del tramo.

Posteriormente, se deben calcular los caudales de entrada al sistema, para esto es necesario conocer las áreas aferentes y el coeficiente de impermeabilidad asociados a cada cámara de unión definida en el punto anterior. En el caso de alcantarillado sanitario se requiere la dotación de agua potable junto con la densidad poblacional, de esta manera utilizando el método propuesto por el RAS 2016 es posible calcular el caudal sanitario correspondiente a cada cámara de unión definida. En el caso de alcantarillado de aguas lluvias, es necesario conocer el aguacero de diseño correspondiente al periodo

de retorno especificado en el RAS 2016. A partir del hietograma que describe el aguacero anterior es posible utilizar un programa hidrológico que permita calcular el caudal máximo correspondiente a cada cámara de unión.

Para conocer el trazado, se proponer utilizar al menos 3 de los criterios de Zambrano detallados en la sección anterior del presente documento. De la misma manera para obtener las pendientes, profundidades y diámetros de cada sección de tubería se recomienda utilizar la metodología propuesta por Duque en el programa UTOPIA. Finalmente, es necesario comparar los resultados obtenidos con las redes que se tienen en campo para determinar qué criterio proporciona una mejor aproximación a un catastro de la zona de estudio. A continuación, se presentan los diagramas de flujo correspondientes al procedimiento que se debe llevar a cabo tanto para alcantarillado sanitario como para alcantarillado de aguas lluvias.

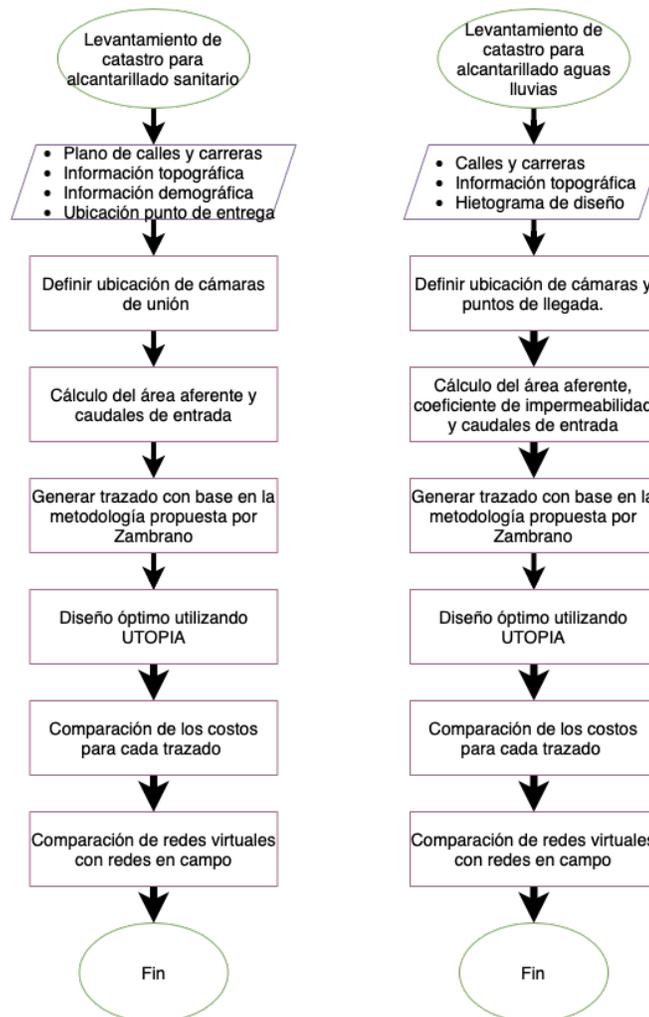


Figura 5. Diagrama de flujo de la metodología propuesta para alcantarillado sanitario y alcantarillado de aguas lluvias.

3.3 Encuesta realizada

Como se mencionó anteriormente, el objetivo de la encuesta es determinar las prácticas de diseño que son utilizadas comúnmente. Por este motivo, se diseñaron las siguientes preguntas abiertas relacionadas con la escogencia del árbol o trazado y posterior diseño de sistemas de drenaje urbano.

1. ¿Cuáles son los aspectos más importantes que le permiten definir el trazado de una red de alcantarillado pluvial?
2. De los aspectos mencionados anteriormente, ¿cuáles aplican para el diseño de alcantarillado combinado o alcantarillado sanitario?
3. Durante el diseño de un sistema nuevo de alcantarillado ¿usted minimiza los puntos de arranque de la red?
4. ¿Qué criterios se utilizan para definir los puntos de arranque de la red?
5. ¿Es la diferencia entre cotas un factor importante en la escogencia del árbol?
6. ¿Utiliza alguna metodología de optimización durante la escogencia del árbol?
7. Si utiliza alguna metodología de optimización en la escogencia del árbol, ¿en qué consiste o qué criterios involucra?
8. ¿Cuántos árboles evalúa al momento de diseñar una red de alcantarillado?
9. ¿Utiliza algún programa para determinar el costo las alternativas de árbol que usted tiene?

4 RESULTADOS

4.1 Casos de estudio

La metodología propuesta anteriormente se utilizó para redes de drenaje urbano en tres casos de estudio. En la siguiente sección del documento se ahondan en algunos detalles tanto de los trazados obtenidos mediante los criterios de Zambrano como de los diseños optimizados obtenidos mediante la utilización del programa UTOPIA.

4.1.1 Red Chicó sur

La red de Chicó sur, se encuentra en la ciudad de Bogotá entre la calle 94, la calle 100, la diagonal 92 y la carrera séptima. En esta zona el punto más alto tiene una elevación de 2576,09 m mientras que el punto más bajo se encuentra a una elevación de 2551,46 m. A continuación, se presenta un plano topográfico junto con un plano de las calles y carreras delimitadas en la zona de estudio propuesta.

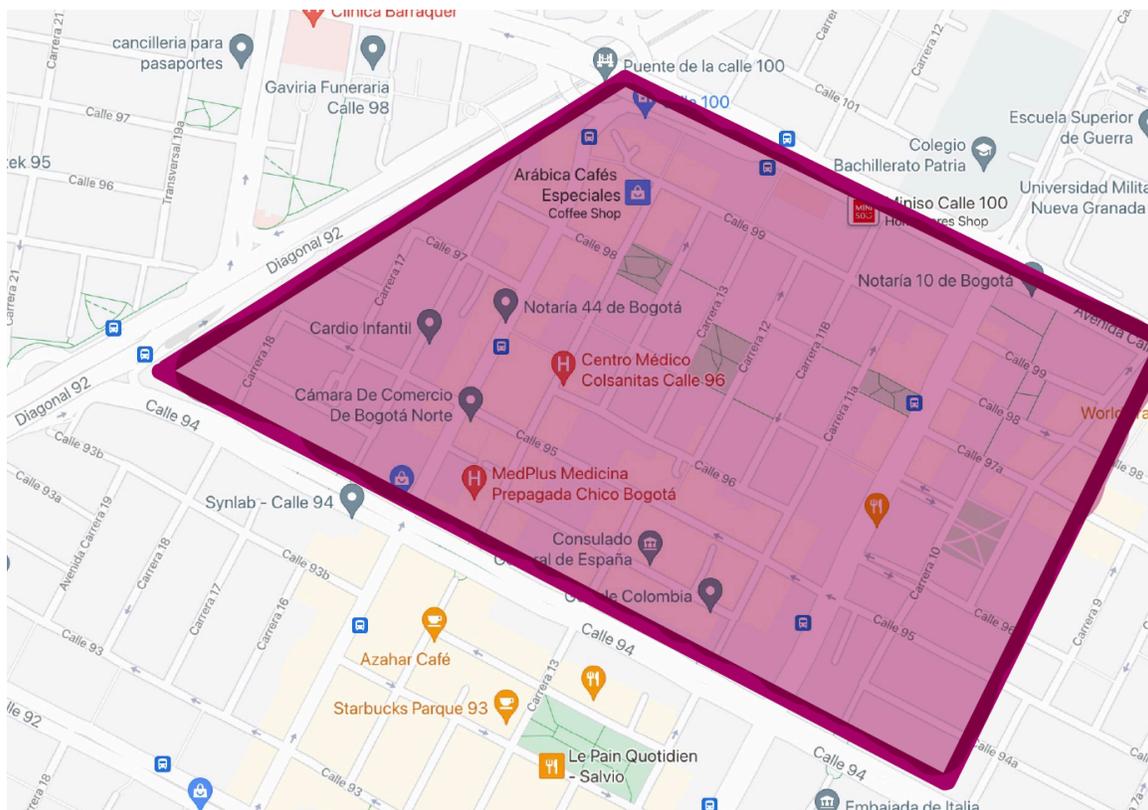
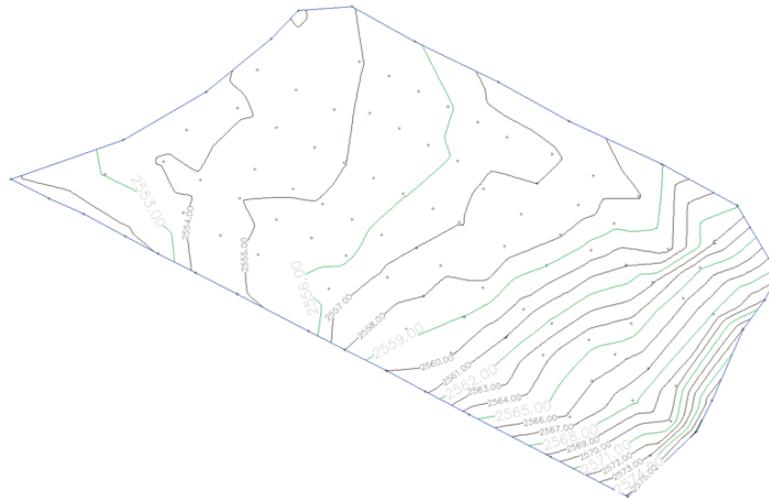


Figura 6. Caso de estudio zona Chicó sur delimitada.



Gráfica 1. Topografía red Chicó sur.

La red de Chicó sur cuenta con 109 pozos, los cuales se conectan a través de 160 secciones de tuberías, adicionalmente, el caudal de descarga de esta red corresponde a 1.525 m³/s. En este caso de estudio se obtuvo el trazado para los criterios 3, 4, 5 y 6. Como resultado de estos trazados se contabilizaron la cantidad de secciones de cada tipo (iniciales o continuas). En la siguiente tabla se puede observar los resultados obtenidos para cada criterio.

Tabla 3. Cantidad de secciones iniciales/continúas obtenidas con los trazados realizados red Chicó sur.

Criterio	Red	Secciones continuas	Secciones iniciales	Tiempo ejecución trazado (segundos)	Función Objetivo
m3	Chicó	103	57	0.5459	-1.639
m4	Chicó	101	59	0.2350	-1.509
m5	Chicó	101	59	0.1560	-183.860
m6	Chicó	104	56	0.1410	-163.868

Posteriormente se procedió a realizar el diseño hidráulico para cada trazado utilizando las restricciones hidráulicas planteadas en la sección de marco teórico. De la misma manera es importante mencionar que se utilizó una precisión en la cota de *manhole* de 10 cm, una profundidad máxima de 5 metros y un catálogo que incluye todos los diámetros comerciales desde el más pequeño hasta el más grande que se identificaron en los registros de la Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá para esta zona. A continuación, se presenta el catálogo de diámetros utilizados.

- Catálogo de diámetros utilizados: {8”,10”,12”,14”,16”,20”,24”,28”,30”,32”}

A continuación, se presentan los costos obtenidos para cada uno de los diseños evaluados utilizando la ecuación de Maurer.

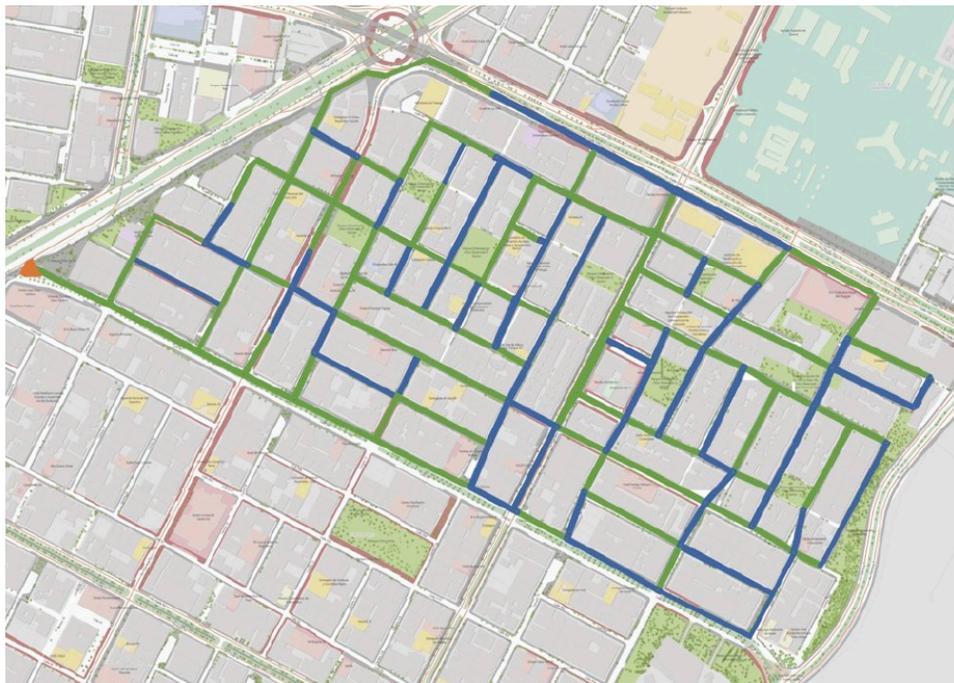
Tabla 4. Resultados del diseño hidráulico para la red de Chicó sur utilizando los criterios de Zambrano.

Criterio	Red	Costo diseño hidráulico (USD)	Tiempo ejecución diseño (segundos)
m3	Chicó	\$ 8,189,708	15.573
m4	Chicó	\$ 8,717,666	17.192
m5	Chicó	\$ 8,737,405	16.496
m6	Chicó	\$ 8,352,344	19.074

En la tabla anterior se puede observar que el criterio 3 generó el diseño hidráulico con un menor costo. Sin embargo, al analizar el catálogo de diámetros utilizado se encontró que no todos los diámetros comerciales se encuentran registrados en la base de datos de la empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá. Teniendo en cuenta lo anterior, se decidió repetir el diseño hidráulico utilizando el catálogo de diámetros registrado por la empresa el cual se presenta a continuación.

- Catálogo de diámetros modificados: {8”,10”,12”,24”,28”,30”,32”}

El nuevo diseño hidráulico se realizó utilizando el criterio 3 ya que fue este el que generó un menor costo anteriormente. Al eliminar algunos diámetros del catálogo utilizado se encontró un aumento en el costo del diseño hidráulico de \$64,039 USD, por lo que el costo final del nuevo diseño es de \$8,253,747 USD. A continuación, se presenta un mapa del trazado que generó un menor costo. En color verde se puede observar las tuberías continuas, mientras que en color azul se pueden observar las tuberías iniciales, de igual manera el punto de descarga se encuentra representado por un triángulo naranja.



Gráfica 2. Trazado red Chicó sur utilizando criterio 3 de Zambrano.

La red de la esmeralda cuenta con 385 pozos y 413 secciones de tubería que transportan un caudal de descarga de 4,399m³/s. Al igual que en el caso anterior se decidió utilizar los criterios 3, 4, 5 y 6 para la realización del trazado. En la siguiente tabla se puede observar la cantidad de secciones iniciales y continuas obtenidas en cada uno de los trazados realizados.

Tabla 5. Cantidad de secciones iniciales/continuas obtenidas con los trazados realizados red la Esmeralda.

Criterio	Red	Secciones continuas	Secciones iniciales	Tiempo ejecución trazado (segundos)	Función Objetivo
m3	Esmeralda	281	132	0.8929	-0.846
m4	Esmeralda	281	132	0.7649	-0.505
m5	Esmeralda	280	133	0.7189	-35.000
m6	Esmeralda	281	132	0.7189	-27.452

Para realizar el diseño hidráulico se utilizaron las restricciones mencionadas en el marco teórico, sin embargo, en este caso fue necesario utilizar una profundidad máxima de 10 metros debido a las características de la red, al igual que en el caso de estudio anterior se utilizó una precisión en la cota de *manhole* de 10 cm. A continuación, se presenta el catálogo de diámetros utilizado.

- Catálogo de diámetros utilizados: {8”,9”,10”,12”,14”,16”,20”,24”,28”,30”,32 ,36”,40”}

En la siguiente tabla se puede observar el costo obtenido para el diseño hidráulico realizado con cada uno de los criterios mencionados anteriormente. En este caso el diseño optimizado corresponde al trazado generado utilizando el criterio 5.

Tabla 6. Resultados del diseño hidráulico para la red de Chicó sur utilizando los criterios de Zambrano.

Criterio	Red	Costo diseño hidráulico (USD)	Tiempo ejecución diseño (segundos)
m3	La Esmeralda	\$ 15,298,568	14.296
m4	La Esmeralda	\$ 15,077,250	13.157
m5	La Esmeralda	\$ 14,843,985	14.469
m6	La Esmeralda	\$ 15,109,304	12.657

Al revisar el catálogo de diámetros utilizados se encontró que solamente 4 secciones tenían un diámetro correspondiente a 9 pulgadas, ya que este diámetro no es utilizado comúnmente en el catálogo de diámetros comerciales se decidió repetir el diseño para el criterio 5 sin considerar este diámetro. A continuación, se presenta el catálogo de diámetros utilizado.

- Catálogo de diámetros modificados: {8”,10”,12”,24”,28”,30”,32”}

El nuevo diseño hidráulico tuvo como resultado un aumento en el costo de \$ 28,989 USD por lo que el costo final de este diseño fue de \$ 14,872,974 USD. A continuación, se presenta el mapa obtenido

correspondiente al trazado utilizando el criterio 5 de la red la Esmeralda. En color verde se puede observar los tramos continuos mientras que en azul se pueden observar los tramos iniciales, de la misma manera, el triangulo naranja corresponde al punto de descarga.



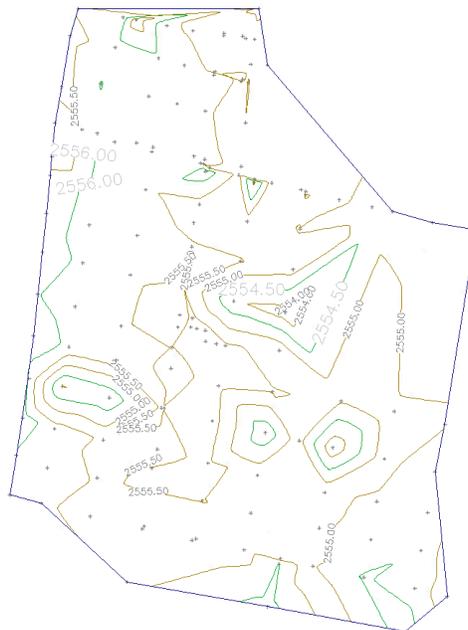
Gráfica 4. Trazado red la Esmeralda utilizando criterio 5 de Zambrano.

4.1.3 Red Cedritos

La red de Cedritos se encuentra entre la calle 164, la autopista norte, la calle 172^a y la carrera 17. En esta zona de estudio el punto más alto se encuentra a 2557 metros mientras que el punto más bajo se encuentra a 2553,73 metros. De manera similar esta red cuenta con 147 pozos y 171 secciones de tubería que transportan un caudal de descarga correspondiente a 0,019 m³/s. Es importante mencionar que esta zona de estudio se caracteriza por tener menos cambios de elevación que la red de Chicó sur o la red de la Esmeralda, por lo que este terreno puede ser considerado más plano en comparación. A continuación, se pueden observar un plano de calles/carreras y se presenta un plano topográfico de la zona de estudio.



Figura 8. Caso de estudio zona Cedritos delimitada.



Gráfica 5. Topografía red Cedritos.

Como se mencionó anteriormente, la topografía indica que esta zona es más plana que las evaluadas anteriormente. Teniendo en cuenta lo anterior se decidió realizar los trazados y los consecuentes diseños hidráulicos utilizando los criterios 6, 7 y 8; ya que como se explica en el marco teórico, Zambrano recomienda utilizar estos cuando la topografía es plana. A continuación, se encuentran la cantidad de tuberías iniciales y continuas obtenidas con los criterios definidos.

Tabla 7. Cantidad de secciones iniciales/continuas obtenidas con los trazados realizados red Cedritos.

Criterio	Red	Secciones continuas	Secciones iniciales	Tiempo ejecución trazado (segundos)	Función Objetivo
m7	Cedritos	122	49	0.1560	96158.997
m8	Cedritos	102	69	0.3120	55525.902
m9	Cedritos	102	69	0.3120	55624.448

Para realizar el diseño hidráulico se utilizaron las restricciones desarrolladas en el marco teórico, sin embargo, fue necesario aumentar la profundidad máxima a 10 metros, y al igual que en los casos de estudio anteriores se utilizó una precisión en la cota de *manhole* de 10 cm. A continuación, se presenta el catálogo de diámetros utilizados para el diseño hidráulico, de la misma manera en la siguiente tabla se presentan los resultados obtenidos del diseño hidráulico.

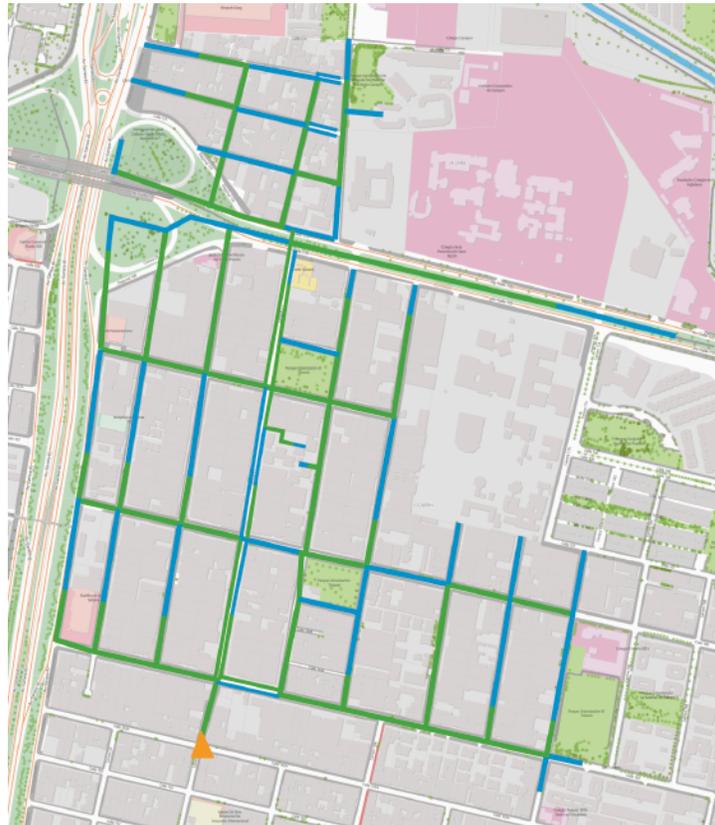
- Catálogo de diámetros utilizados: {8”,10”,12”,14”,16”}

Tabla 8. Resultados del diseño hidráulico para la red de Cedritos utilizando los criterios de Zambrano.

Criterio	Red	Costo diseño hidráulico (USD)	Tiempo ejecución diseño (segundos)
m7	Cedritos	\$ 8,641,260	45.949
m8	Cedritos	\$ 7,800,739	162.378
m9	Cedritos	\$ 7,810,948	44.827

En la tabla anterior se puede observar que el criterio 8 generó un diseño hidráulico menor que los demás criterios evaluados por lo que se considera este como el criterio que generó el diseño óptimo. De manera similar es posible observar que debido al caudal solo se requieren cinco diámetros distintos para realizar el diseño hidráulico por lo que no es necesario repetir el diseño modificando el catálogo de diámetros seleccionado inicialmente.

A continuación, se presenta un mapa en el que se puede observar el trazado que generó este criterio, al igual que en los casos anteriores las secciones azules corresponden a secciones iniciales mientras que las secciones verdes corresponden a tuberías continuas. Finalmente, es posible observar que el punto de descarga se encuentra marcado por un triángulo naranja.



Gráfica 6. Trazado red Cedritos utilizando criterio 8 de Zambrano.

4.2 Encuestas realizadas

A continuación, se presenta un resumen de las repuestas obtenidas al realizar la encuesta a cada uno de los diseñadores seleccionados.

4.2.1 Encuesta 1

Entrevistado: Daniel Rodríguez Amaya

Empresa en la que labora: Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá

El ingeniero Daniel Rodríguez expresó que dentro de los aspectos que toma en cuenta al momento de definir el trazado de una red de alcantarillado pluvial o sanitario incluyen la topografía y en especial el sentido del drenaje natural del terreno, el espacio disponible, las áreas a drenar y los puntos de entrega. De la misma manera, menciona que en cada caso es importante tener en cuenta las condiciones de entrega particulares de cada red.

En cuanto a los puntos de arranque de la red, el ingeniero menciona que, si bien es una buena práctica minimizar los puntos de arranque para garantizar las condiciones de velocidad mínima y

autolimpieza, normalmente no es tan fácil de lograr, por lo que en la práctica utiliza los puntos de arranque necesarios para garantizar el servicio a todos los usuarios en el espacio disponible.

Durante la escogencia del árbol, el ingeniero menciona que la diferencia de cotas es un factor muy importante ya que en caso de altas pendientes se busca disminuir altas diferencias entre las cotas de entrada y salida de los pozos para así disminuir elementos críticos en el sistema de alcantarillado como lo son las cámaras de caída. De la misma manera en casos de baja pendiente se busca disminuir la profundidad de la tubería para reducir los costos de excavación. Finalmente, el ingeniero no utiliza ninguna metodología específica para la escogencia del árbol, aunque, evalúa al menos 3 árboles según la normativa vigente. Los costos de cada alternativa se realizan mediante un análisis de precios unitarios.

4.2.2 Encuesta 2

Entrevistado: Fredy Angulo Hernández

Empresa en la que labora: Aguas de Cartagena (Acuacar)

El ingeniero Fredy Angulo señaló que la topografía, el urbanismo de la zona, la ubicación del punto de descarga y la infraestructura de la red existente son los aspectos más importantes para la definición del árbol tanto en una red de alcantarillado pluvial como en una red de alcantarillado sanitario. En cuanto a los puntos de entrega, señala que no es una prioridad minimizar los puntos de arranque si no que estos dependen de la definición de los colectores principales que a su vez dependen de la topografía de la red. Sin embargo, el ingeniero menciona que la diferencia de cotas si es un factor importante durante la escogencia del árbol o trazado.

Durante la escogencia del árbol o trazado el ingeniero menciona que no utiliza una metodología de optimización en sí, sin embargo, procura disminuir la longitud de los recorridos y minimizar la profundidad en la medida de lo posible para no aumentar los costos del diseño. En cuanto a la cantidad de trazados evaluados el ingeniero refiere que depende del caso específico por lo que en algunos casos evalúa un único trazado mientras que en otros puede escoger tres árboles muy diferentes y mediante la utilización de un programa computacional determina el costo y la alternativa más viable.

4.2.3 Encuesta 3

Entrevistado: Iván Paiva

Empresa en la que labora: IPJ Engenharia LTDA

El ingeniero Iván Paiva estableció que para el caso de alcantarillado pluvial los aspectos más importantes que considera al momento de decidir el trazado de la red incluyen la identificación de calles que pueden tener escorrentía pluvial de forma superficial, la infraestructura preexistente y la existencia de zonas verdes. Por otra parte, en el caso de alcantarillado sanitario los criterios más importantes para definir el trazado incluyen el máximo aprovechamiento de las pendientes naturales

del terreno y la compatibilidad con infraestructura preexistente. Durante sus diseños, el ingeniero utiliza la metodología condominial que reduce los puntos de arranque de una red, ya que los pozos tienen como objetivo recoger los efluentes producidos por cada bloque urbano. Por tal motivo los puntos de arranque se definen con el objetivo de garantizar la conexión de los efluentes sanitarios producidos por cada manzana con la red diseñada. De la misma manera, y teniendo en cuenta la metodología para definir el trazado o árbol utilizada por el ingeniero, la diferencia de cotas es de suma importancia ya que permite privilegiar el recorrido de las pendientes naturales del terreno.

Al momento realizar el diseño de una red de alcantarillado, el ingeniero menciona que normalmente evalúa entre dos y tres opciones de trazado para evaluar de forma adecuada las repercusiones del mismo en el diseño. Para la evaluación de costos realizada con cada trazado seleccionado el ingeniero utiliza el software gratuito SANIBID, que permite identificar la alternativa de menor costo e impacto durante la ejecución de las obras.

4.2.4 Encuesta 4

Entrevistado: Ligia Zarate

Empresa en la que labora: Fondo para el Desarrollo del Plan Todos Somos PAZcífico.

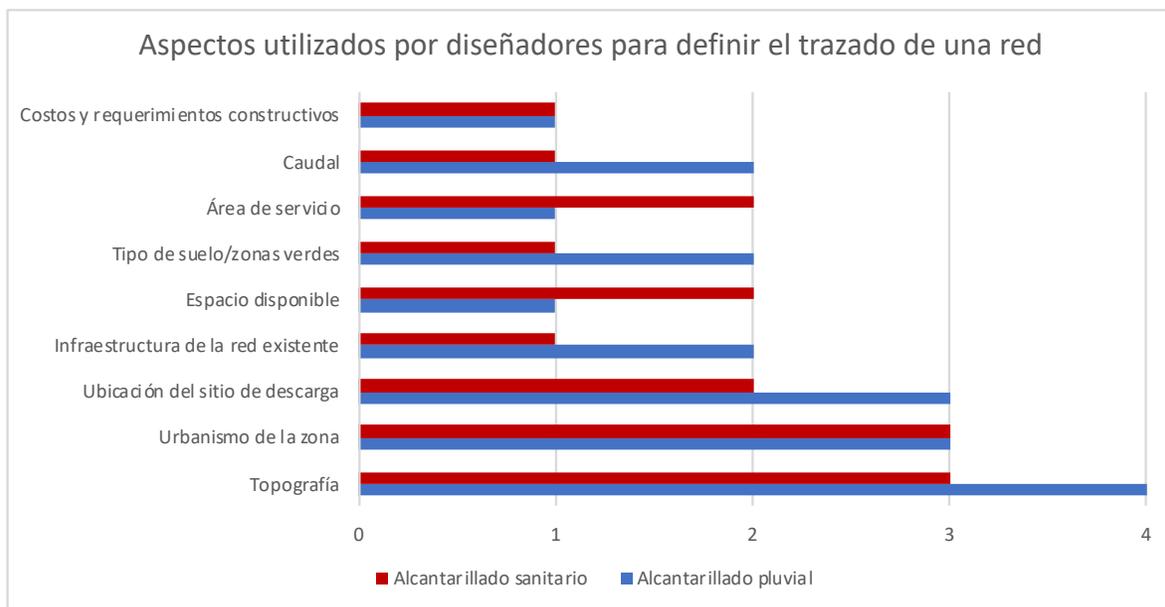
La ingeniera Ligia Zarate señaló que el área de servicio, la topografía del terreno, el caudal, los puntos de descarga, el tipo de suelo los requerimientos constructivos, el ordenamiento territorial y los materiales; son los aspectos más importantes que le permiten definir el trazado o árbol tanto de una red de alcantarillado pluvial como de una red de alcantarillado sanitario. Durante el diseño no disminuye los puntos de arranque de una red, aunque trata de ubicar estos en los puntos altos de la topografía.

Por otra parte, la ingeniera menciona que, a pesar de no evidenciar metodologías de optimización en la escogencia del árbol, en sus diseños utiliza los criterios de Zambrano para la definición del trazado ya que estos involucran coeficientes que reflejan condiciones topográficas, en la sección de antecedentes se puede encontrar la explicación a detalle de cada criterio propuesto por Zambrano. De manera similar menciona que en general, los diseñadores no suelen presentar análisis económicos ya que no evalúan distintas alternativas.

5 ANÁLISIS DE RESULTADOS

5.1 Prácticas de diseño en Colombia

Al analizar los resultados obtenidos en las encuestas realizadas se encontró que durante la definición de un trazado pluvial o sanitario la mayoría de los diseñadores consideran que la topografía es uno de los principales aspectos que deben tenerse en cuenta. En la siguiente gráfica se puede observar que la mayoría de diseñadores consideran que los aspectos para definir el trazado son muy similares en el caso de alcantarillado pluvial y sanitario, dentro de estos se destacan la ubicación del punto de descarga y el urbanismo de la zona.



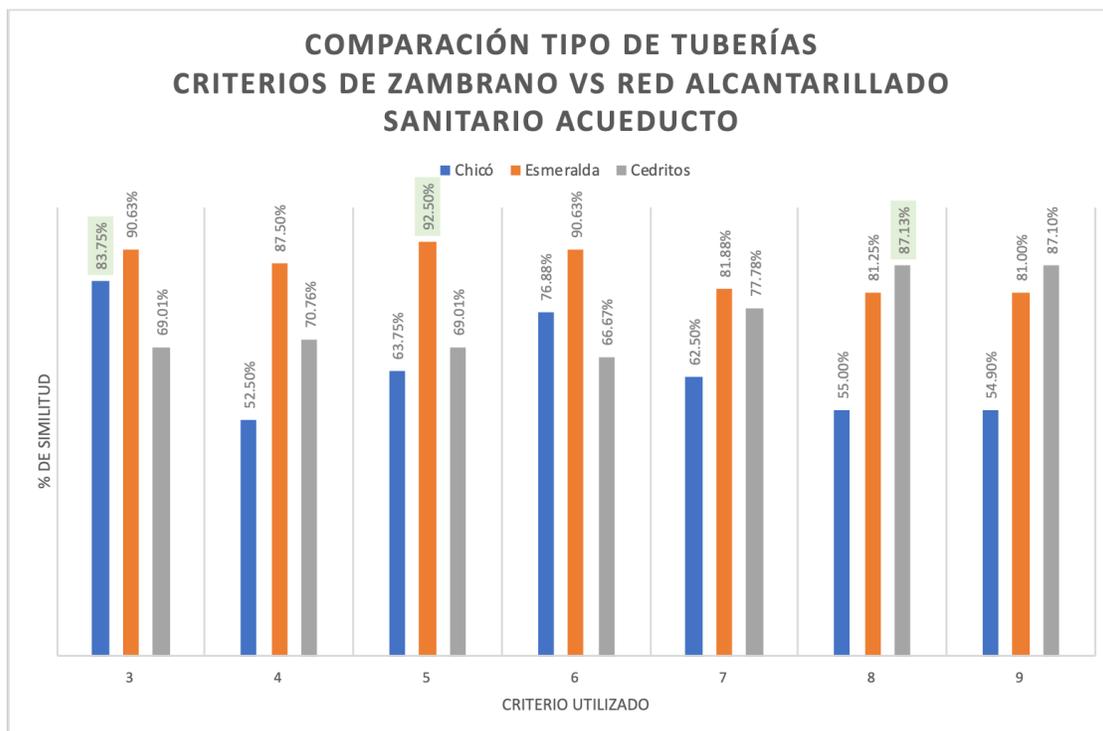
Gráfica 7. Aspectos utilizados por diseñadores para definir el trazado de una red.

De manera similar se encontró que la mitad de los diseñadores entrevistados realizan el trazado de manera manual y no buscan minimizar los puntos de arranque ni utilizan una metodología específica de optimización, sin embargo, todos los entrevistados consideran que la diferencia de cotas es un factor importante durante la escogencia del árbol. Lo anterior está directamente relacionado con el hecho que utilizar la diferencia de cotas en la escogencia del trazado, puede disminuir la profundidad promedio de las tuberías o secciones disminuyendo así los costos asociados a la excavación del terreno.

Teniendo en cuenta que los nueve criterios propuestos por Zambrano en su tesis de maestría utilizan como un factor importante la diferencia de cotas, es posible que los trazados resultantes tengan una alta similitud con los trazados registrados por la Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá. Sin embargo, es importante analizar las diferencias en las características de la red con el fin de determinar si alguno de los criterios estudiados resulta en un trazado más similar.

5.2 Comparación de las redes virtuales

Para verificar si la metodología utilizada en la presente investigación puede ser utilizada como base para el levantamiento de catastro se compararon los árboles obtenidos con los criterios 3, 4, 5, 6, 7, 8 y 9 de Zambrano; con el trazado que se encuentra registrado para la red sanitaria de cada caso de estudio por la Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá. A continuación, se presenta una gráfica con los resultados obtenidos.



Gráfica 8. Comparación de tipo de tuberías en redes virtuales vs red alcantarillado sanitario registrado por el Acueducto.

La gráfica anterior presenta el porcentaje de tuberías que tenían el mismo tipo en las redes virtuales y en la red de alcantarillado sanitario registrada por la Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá. En la gráfica se puede observar que el criterio 3 tiene una mayor similitud con la red de Chicó sur, por otra parte, el criterio 5 tiene una mayor similitud con la red de la Esmeralda, finalmente el criterio 8 tiene una mayor similitud con la red de Cedritos. A partir de lo anterior es posible concluir que el árbol que tiene una mayor similitud es el mismo que generó un diseño de menor costo o diseño optimizado. A continuación, se presenta una comparación más detallada para cada caso de estudio.

5.2.1 Red Chicó sur

En la siguiente figura se presenta el mapa del trazado que se encuentra registrado en la Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá.

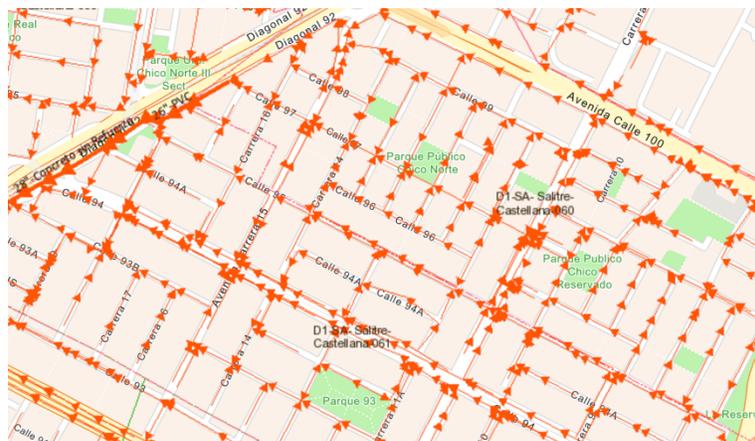


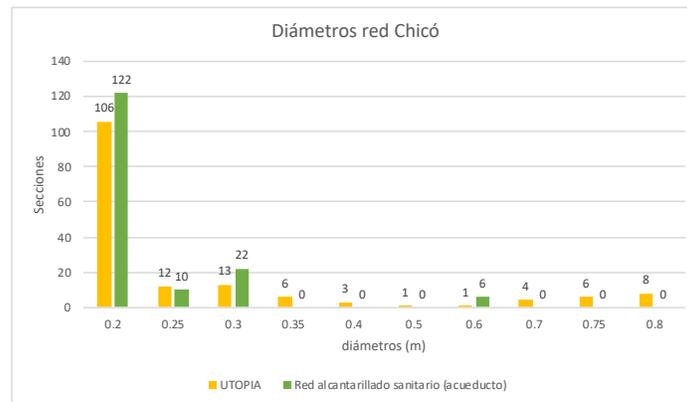
Figura 9. Red alcantarillado sanitario Chicó sur registrada por la Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá.

Al comparar el trazado de la red de Chicó sur se encontró que el trazado generado utilizando el criterio 3 propuesto por Zambrano tenía una similitud de 83,75% respecto al trazado presentado en la figura anterior. Dado que el trazado generado utilizando el criterio 3 generaba el diseño con menores costos y mayor similitud a la red registrada, se realizó un mapa que evidencia los tramos cuyo tipo difiere del registrado, este mapa se muestra a continuación.



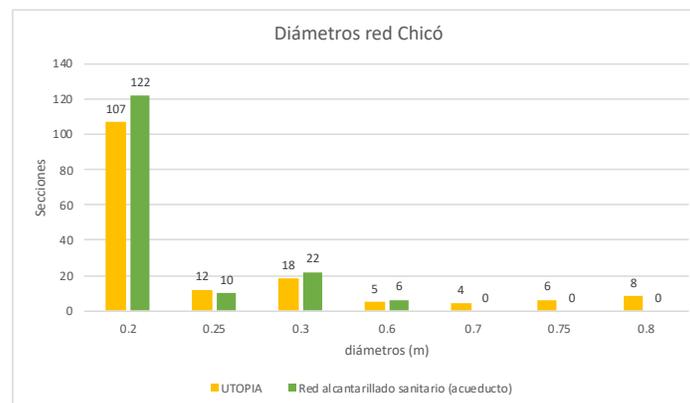
Gráfica 9. Diferencias en el trazado de la empresa de Alcantarillado y Acueducto de Bogotá respecto al trazado 3.

En el mapa anterior se pueden observar en color rojo las secciones cuyo tipo es distinto al registrado. Teniendo en cuenta que este trazado tiene mayor similitud en términos de tipo de tubería respecto al registrado, se decidió analizar el diseño hidráulico correspondiente al trazado generado utilizando el criterio 3. En primer lugar, se determinó la similitud en términos de diámetro al realizar un diseño hidráulico utilizando todos los diámetros comerciales entre 8” y 32”. A continuación, se presenta una gráfica en la que se contabiliza la cantidad de tramos con determinado diámetro.



Gráfica 10. Comparación diámetros de la red Chicó sur utilizando todos los diámetros comerciales.

En la gráfica anterior se puede observar que, tanto en el diseño optimizado como en el diseño registrado, la mayoría de secciones cuentan con un diámetro de 8". En este caso se encontró que el 53,75% de las secciones coinciden en diámetro. Sin embargo, en la gráfica anterior se hace evidente que en el registro de la Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá, no se utilizaron todos los diámetros comerciales, por este motivo se repitió el diseño modificando el catálogo de diámetros como se indica en la sección de resultados. A continuación, se presenta una gráfica con la comparación de diámetros en este nuevo diseño.



Gráfica 11. Comparación diámetros de la red Chicó sur utilizando el catálogo de diámetros modificado.

En esta nueva gráfica se puede observar que al limitar el catálogo de diámetros con los que se realizó el diseño la coincidencia en diámetros aumenta a un 55,63%. Sin embargo, es importante mencionar que al realizar este cambio en algunos casos es necesario profundizar más la sección o aumentar el diámetro evaluado, lo que resulta en un aumento de los costos del diseño inicial.

5.2.2 Red La Esmeralda

En la siguiente figura se puede observar el trazado registrado por la Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá para la red de la Esmeralda.

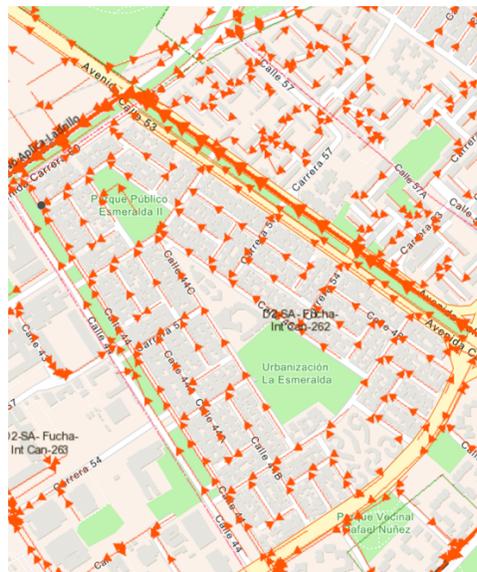


Figura 10. Red alcantarillado sanitario la Esmeralda registrada por la Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá.

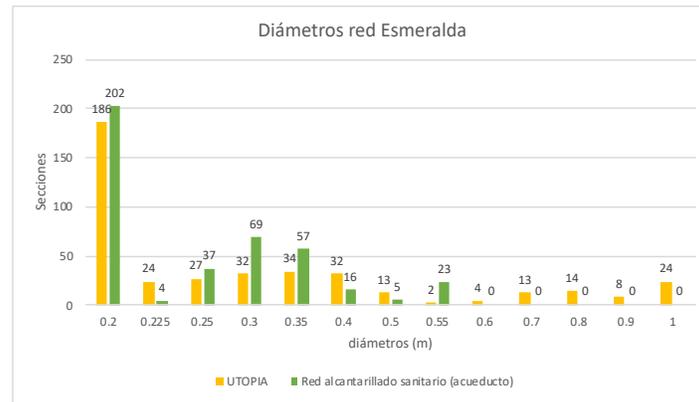
Durante la comparación de tipo de tubería se encontró que el criterio 5 tiene una mayor similitud con el trazado registrado por la Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá. En la Gráfica 8 se puede observar que para el criterio 5 resultó en un porcentaje de 92,5% de similitud. En el siguiente mapa se pueden observar las secciones que presentan un tipo distinto en color rojo.



Gráfica 12. Diferencias en el trazado de la empresa de Alcantarillado y Acueducto de Bogotá respecto al trazado 5.

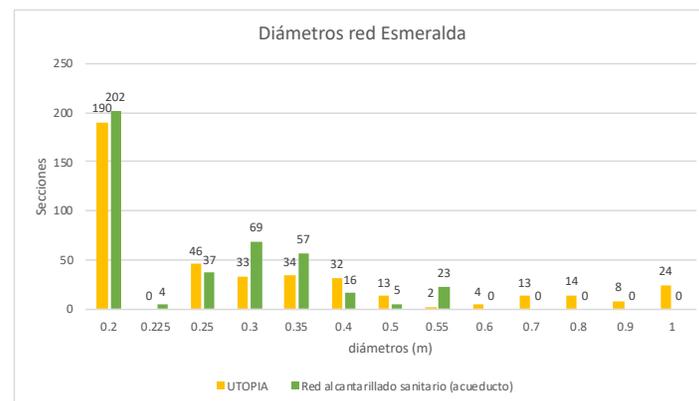
Posteriormente, se procedió a realizar una comparación de los diámetros obtenidos en el diseño realizado utilizando UTOPIA. Como se mencionó anteriormente en la sección de resultados, se utilizaron todos los diámetros registrados para realizar el diseño, posteriormente se realizó una gráfica

para evidenciar la cantidad de secciones correspondientes a determinados diámetros, esta gráfica se presenta a continuación.



Gráfica 13. Comparación diámetros de la Esmeralda utilizando todos los diámetros registrados.

En este diseño se observó que el 35,6% de las secciones diseñadas mediante UTOPIA coincidía con las secciones registradas en la Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá. Sin embargo, dado que el diámetro de 9” no es muy comercial se decidió repetir el diseño sin considerar este diámetro en el catálogo utilizado con el fin de evaluar si ocurre una mejoría. En la siguiente gráfica se presenta la cantidad de secciones del diseño correspondientes a los diámetros del nuevo catálogo.



Gráfica 14. Comparación diámetros de la Esmeralda utilizando el catálogo de diámetros modificado.

Al comparar el nuevo diseño con el trazado registrado por la Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá se encontró que el porcentaje de secciones que coinciden en diámetro aumentaron a un 36,6%. Sin embargo, para reducir el diámetro que se utilizó, fue necesario aumentar la profundidad promedio de algunas secciones lo que se refleja en el aumento de costos presentado en la sección de resultados.

5.2.3 Cedritos

En la siguiente figura se puede observar el trazado registrado por la empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá para la red de Cedritos.

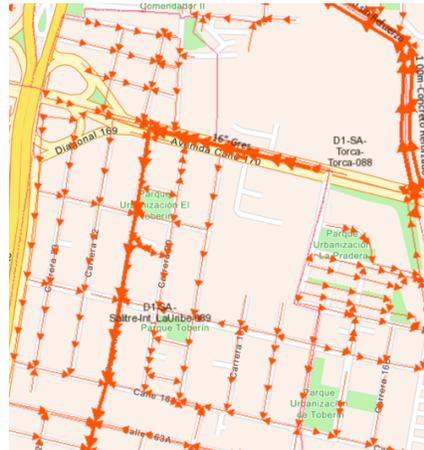


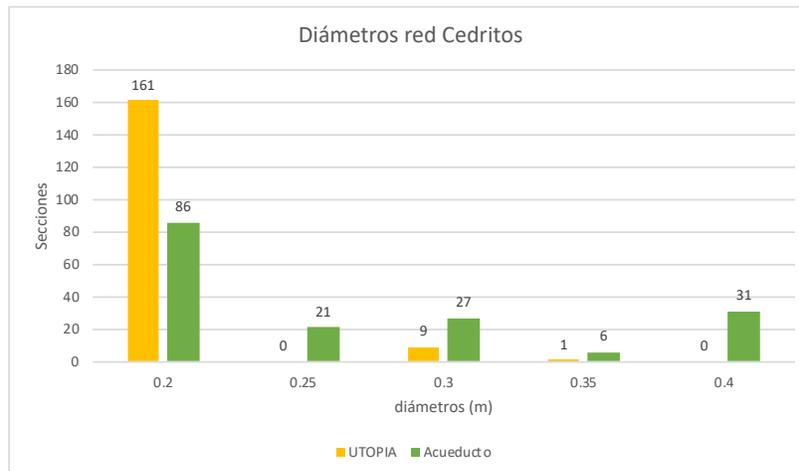
Figura 11. Red alcantarillado sanitario Cedritos registrada por la Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá.

Durante la comparación de tipo de tuberías que se presenta en la Gráfica 8 se encontró que los criterios 7, 8 y 9 de Zambrano tienen una mayor similitud con el trazado registrado en la Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá. Lo anterior puede estar relacionado con el hecho que en teoría estos criterios deben ser utilizados para terrenos planos como lo es el caso de Cedritos. Dado que el criterio 8 dio un mejor resultado al comparar el trazado respecto a la información de la empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá, se resaltaron las secciones de tubería que presentan un tipo distinto al obtenido en este trazado como se muestra en el siguiente mapa.



Gráfica 15. Diferencias en el trazado de la empresa de Alcantarillado y Acueducto de Bogotá respecto al trazado 8.

Como se describe en la sección de resultados, se realizó el diseño optimizado para este criterio utilizando el programa UTOPIA. A continuación, se presenta una comparación de los diámetros obtenidos en el diseño respecto a los registrados.



Gráfica 16. Comparación diámetros de Cedritos.

Al comparar los diámetros de las tuberías obtenidas en el diseño se encontró que el 47,95% de las secciones tenían el mismo diámetro que el registrado por la Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá. Adicionalmente, dado que la red transporta un caudal más pequeño que el caudal transportado en los otros casos de estudio los diámetros resultantes en este diseño eran menores.

6 CONCLUSIONES

En conclusión, es posible decir que la mayoría de los diseñadores en Colombia utilizan aspectos similares al momento de definir el trazado de alcantarillado sanitario y alcantarillado pluvial. Dentro de los aspectos que se destacaron en las respuestas de los entrevistados se encontraba: la topografía, la diferencia de cotas, el urbanismo y la ubicación de los puntos de descarga; estos aspectos fueron implementados en la selección del trazado que se llevó a cabo en esta investigación a través de los criterios de Zambrano. Así mismo, la mayoría de diseñadores manifiesta no utilizar ningún programa de optimización durante la escogencia del árbol y el posterior cálculo de costos de la solución propuesta. Sin embargo, dado que la mayoría busca implementar criterios como la topografía mediante algoritmos mentales en sus diseños, es posible utilizar estos criterios junto con metodologías de diseño optimizado para resolver el problema del levantamiento de redes de drenaje urbano en donde no se cuenta con esta información.

Al analizar los trazados obtenidos con cada uno de los criterios utilizados es posible concluir que la elección de un trazado más similar al registrado por la empresa correspondiente, está relacionada con la diferencia de cotas entre los puntos o topografía de la red a diseñar. Ejemplo de lo anterior son los casos de estudio de la Esmeralda y Cedritos, ya que al tener topografías con menos variaciones de altura o más planas resultan en mayor similitud de los trazados utilizando los criterios 5 y 8 respectivamente. A partir de lo anterior, se concluye que en topografías más planas al momento de realizar el trazado es recomendable utilizar los criterios 5, 6, 7 y 8 propuestos por Zambrano.

Por otra parte, se identificó que las redes de Chicó sur y la Esmeralda contaban con menos nudos que la red de Cedritos. Los casos de Chicó sur y Cedritos tuvieron un trazado más similar al utilizar los criterios 3 y 8 respectivamente, como se menciona en la sección de resultados del presente documento. A partir de lo anterior, es posible concluir que cuando se tiene pocas secciones a evaluar (como lo son el caso de Chicó sur y Cedritos) se obtiene un diseño de menor costo al utilizar criterios que minimicen la cantidad de tramos continuos o la longitud de estos.

A pesar de que la mayoría de los diseñadores no suelen minimizar los puntos de arranque en sus diseños, al comparar los trazados obtenidos para cada caso de estudio se encontró que para el caso de Cedritos y Chicó norte penalizar las tuberías de inicio tuvo un mejor resultado que no hacerlo. En el caso de la Esmeralda, el criterio 5, que no penaliza las tuberías de inicio tuvo un mejor resultado que el criterio 6, el cual si penaliza las tuberías de inicio. Lo anterior puede estar relacionado con el hecho de que el criterio 5 resulta en un diseño menos costoso que el obtenido al utilizar el criterio 6. Sin embargo, es importante mencionar que como se puede ver en la Gráfica 8, la diferencia de similitud entre los criterios 5 y 6 es inferior al 2,5%.

Finalmente, es posible concluir que la metodología propuesta no lleva a redes virtuales que tengan suficiente similitud con las redes registradas por la Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá, sin embargo, dado que varios de los criterios involucran aspectos considerados por diseñadores al momento de realizar el trazado y posterior diseño hidráulico de una red, se recomienda

realizar modificaciones a la presente metodología para así lograr una mejor aproximación al levantamiento de catastro de alcantarillado pluvial y sanitario.

7 RECOMENDACIONES

Durante la presente investigación se utilizaron los criterios de Zambrano como una primera aproximación para obtener el trazado de la red, estos criterios involucran aspectos como la topografía y la diferencia de cotas. Sin embargo, durante las entrevistas a los diseñadores se encontró que el caudal es otro de los factores que ayudan a definir el trazado, por este motivo, es recomendable involucrar este elemento en trabajos futuros; para verificar si de esta manera se obtiene mayor similitud entre las redes virtuales y las registradas por la Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá.

De manera similar, como una posible mejora a la metodología utilizada en la presente investigación, se encontró que normalmente las secciones iniciales coinciden tanto en diámetro como en el trazado de la Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá. Teniendo en cuenta lo anterior, se propone modificar la metodología utilizada en esta investigación definiendo el tipo de las tuberías continuas del ramal principal. A continuación, se presenta el nuevo diagrama de flujo, en este se puede observar sombreado en rojo el paso adicional que debería seguirse.

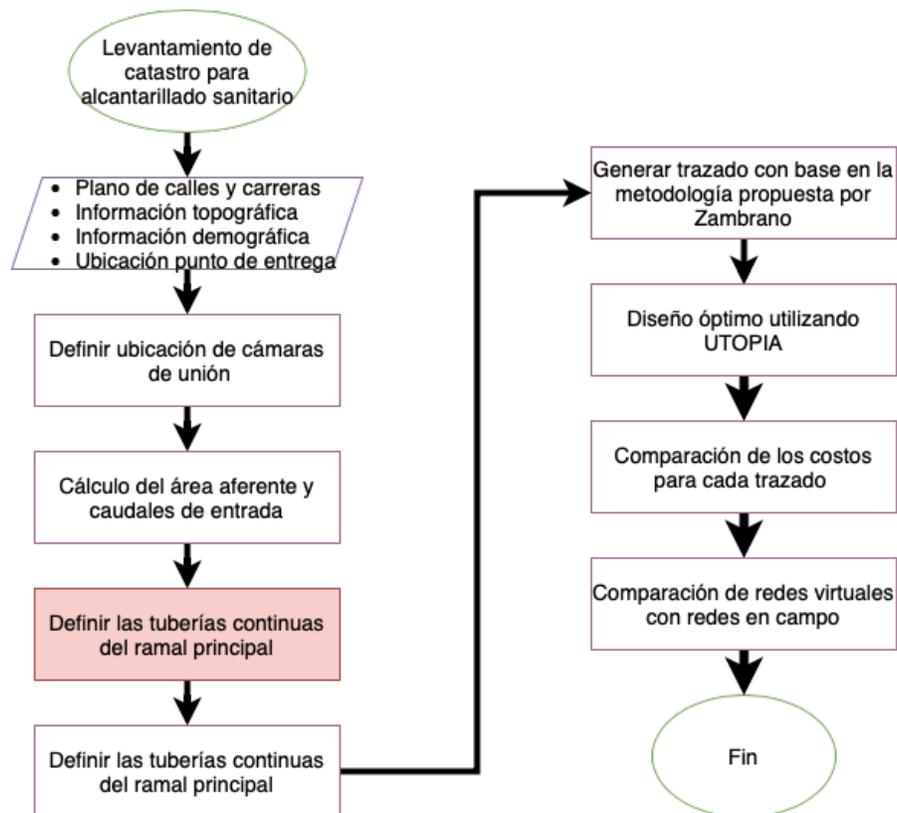


Figura 12. Nuevo diagrama de flujo para levantamiento de catastro para alcantarillado sanitario.

Al llevar a cabo esta nueva metodología sería necesario comparar los resultados con los trazados registrados por la Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá para validar los resultados obtenidos.

Finalmente, se recomienda utilizar algoritmos relacionados con técnicas de inteligencia artificial como *minería de datos* en redes de alcantarillado pluvial y sanitario ya existentes, con el fin de identificar si es posible involucrar otros aspectos junto con los criterios propuestos por Zambrano durante el proceso de selección del trazado.

8 REFERENCIAS

- Butler, D., & Davies, J. W. (2000). *Urban Drainage*. Londres: E & FN Spon.
- Duque Villareal, N. (2015). *Metodología para el diseño optimizado de redes de alcantarillado*. Bogotá: Tesis Maestría Universidad de los Andes.
- Empresa de acueducto y alcantarillado de Bogotá. (Mayo de 2020). *Geoportal*. Obtenido de Mapas de alcantarillado: https://www.acueducto.com.co/wassigue6/MapasGeoportal/MapaAlcantarillado_Sanitario_EAAB/
- Macias Farias, B. (2018). *Actualización del módulo de diseño dentro del programa ALCANTARILLADOS*. Bogotá: Universidad de los Andes.
- Maurer, M., Wolfram, M., & Herlyn, A. (2010). *Factors affecting economies of scale in combined sewer systems*. IWA Publishing.
- Ministerio de vivienda, ciudad y territorio. (2016). Título D. *Reglamento técnico de sector de agua potable y saneamiento básico*. Bogotá, Colombia.
- Saldarriaga Valderrama, J. G. (Agosto de 2020). Sistema integrado de drenaje urbano. *SUDS*. Bogotá, Colombia: Universidad de los Andes.
- Saldarriaga Valderrama, J. G. (Enero de 2021). Repaso mecánica de fluidos. *Diseño en ingeniería hidráulica*. Bogotá, Colombia: Universidad de los Andes.
- Saldarriaga Valderrama, J. G., Vasquez, C., & Rocha, J. S. (2017). *Estudio en montaje físico del flujo cuasicrítico en tuberías de alcantarillado fluyendo Parcialmente Llenas (Study of the Quasi Critical Flow in Partially-Full Sewer Pipes Using an Experimental Model)*. Bogotá: SSRN papers.
- Zambrano Briones, J. D. (2019). *Diseño optimizado de redes de drenaje urbano. Casos de estudio variando la topografía de terreno, la densidad de viviendas, los coeficientes de impermeabilidad y la densidad de tuberías*. Bogotá: Tesis Maestría Universidad de los Andes.