

**XX SEMINARIO NACIONAL DE HIDRÁULICA E HIDROLOGÍA  
BARRANQUILLA, COLOMBIA, 8 AL 10 DE AGOSTO DE 2012**

**CRITERIOS DE DISEÑO DE TUBERÍAS FLUYENDO PARCIALMENTE  
LLENAS: VELOCIDAD, ESFUERZO CORTANTE Y NÚMERO DE FROUDE**

*Freddy Ovalle, Juan Ossa, Andrés López, Juan Saldarriaga*

*Centro de Investigación en Acueductos y Alcantarillados de la Universidad de Los Andes –CIACUA–, Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental, Bogotá, Colombia, <f-ovalle@uniandes.edu.co><da.lopez47@uniandes.edu.co><jsaldarr@uniandes.edu.co>*

**RESUMEN:**

La metodología tradicional para el diseño de tuberías de alcantarillado se basa en dos requisitos: La hidráulica y los factores ambientales. La hidráulica garantiza que dados ciertos parámetros de entrada (materiales, topografía y propiedades del fluido) se transporte el caudal demandado, evitando ciertas condiciones no deseables como el incumplimiento de la restricción de máxima relación de llenado; por otra parte, los factores ambientales deben ser tenidos en cuenta para evitar la sedimentación de partículas y la formación de barreras que terminen por obstruir total o parcialmente el ducto, razón por la cual es importante diseñar bajo los criterios de velocidad y esfuerzo cortante mínimo, para facilitar la autolimpieza de la tubería. La concepción anterior se basaba en llevar a cabo un diseño con los dos requisitos mencionados anteriormente, de tal manera que se garantizara el transporte del caudal de diseño en la red para los parámetros previamente establecidos, sin implementar métodos de optimización, razón por la cual se pueden obtener diseños sobredimensionados que aumentan innecesariamente el costo de los proyectos. Por lo tanto, es importante plantear un método que permita encontrar el diseño óptimo, garantizando el cumplimiento de las restricciones constructivas e hidráulicas por medio de la selección de la alternativa de costo mínimo. Partiendo de lo anterior, en este trabajo se desarrolló un método de selección basado en una revisión exhaustiva de todas las alternativas posibles para un diseño dado, en el cual se evalúan todos los diseños factibles (cumpliendo con las restricciones constructivas e hidráulicas), y se seleccionan solo aquellas alternativas en las cuales la pendiente genera la máxima relación de llenado posible para un diámetro determinado.

**PALABRAS CLAVES:** Pendientes propias; Diseño de alcantarillados; Optimización.

## INTRODUCCIÓN

En la práctica de la Ingeniería, uno de los factores más importantes para la aprobación y ejecución de un proyecto es la valoración de costos globales de éste, razón por la cual la búsqueda de la alternativa más económica que satisfaga a cabalidad todas las necesidades del proyecto, se convierte en un proceso primordial dentro de su desarrollo.

El diseño de sistemas de drenaje urbano no debe ser la excepción al planteamiento anterior, por el contrario, teniendo en cuenta el crecimiento evidente de las áreas urbanas y el aumento de áreas impermeables que esto conlleva, es vital que estos sistemas sean diseñados de tal manera que cumplan tanto con los requisitos hidráulicos como ambientales, enfocados en evitar problemas de sanidad, inundaciones y contaminación en los cuerpos de agua, mediante la selección de la alternativa de mínimo costo.

Para satisfacer lo anterior, la concepción actual de los sistemas de drenaje urbano contrasta con la que se tenía en el pasado, ya que contempla una visión integral de sus tres componentes: El primero de ellos consiste en la red de drenaje, el segundo corresponde a la planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR) y el tercero se refiere al cuerpo receptor.

En el caso particular de este artículo, se presenta un método exhaustivo que cumple con las restricciones constructivas y los parámetros hidráulicos, garantizando la selección del diseño óptimo global al realizar una comparación de los costos constructivos de todas las alternativas posibles.

## ANTECEDENTES

A finales del siglo XIX, las ecuaciones de Bazin y de Ganguillet y Kutter eran las más utilizadas para el cálculo de la velocidad en canales abiertos bajo la suposición de flujo uniforme; no obstante, ésta última empleaba métodos tediosos para su solución y presentaba problemas dimensionales. Debido a esto Robert Manning, partiendo de un ajuste realizado a 7 ecuaciones aproximadas para la velocidad en canales abiertos bajo la suposición de flujo uniforme (ecuaciones de Du Buat (1786), Eytelwein (1814), Weisbach (1845), St. Venant (1851), Neville (1860), Darcy y Bazin (1865) y Ganguillet y Kutter (1869)) llevó a cabo un cálculo de la velocidad para cada fórmula con un rango del radio hidráulico entre 0.35 y 30 m para una pendiente dada. Con los resultados obtenidos, concluyó que la velocidad era proporcional a la pendiente elevada a la 1/2 y al radio hidráulico elevado a la 4/7. Sin embargo, con el objetivo de obtener una ecuación más general, Manning analizó los resultados de algunos experimentos seleccionados de Bazin en canales semicirculares revestidos de cemento y con una mezcla de arena y cemento, a partir de los cuales concluyó que el exponente para el radio hidráulico en ambos casos era muy cercano a 2/3, dando lugar a la siguiente ecuación (Chie, 1991):

$$v = C_1 R^{2/3} S^{1/2} \quad [1]$$

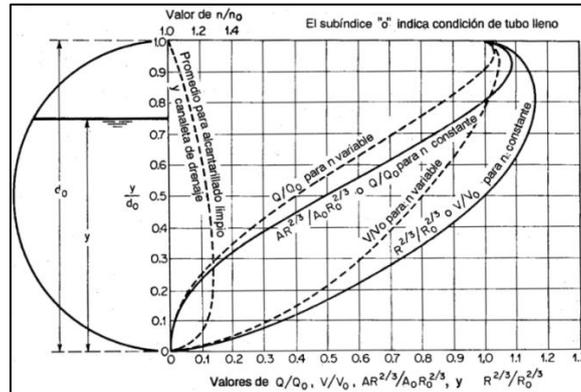
Es importante aclarar que el  $C_1$  mostrado en la Ecuación [1] se refiere a un coeficiente propuesto por Manning, el cual difiere del coeficiente propuesto por Chezy. Adicionalmente, el exponente del radio hidráulico (2/3) fue sugerido en primera instancia por el Ingeniero Francés Gauckler en 1867, el cual, al igual que Manning, basó su estudio en los experimentos desarrollados por Darcy y por Bazin. Por esta razón la fórmula de Manning también es conocida como la fórmula de Gauckler Manning.

Finalmente, Alfred Flamant sugirió que el  $C_1$  propuesto por Manning podría expresarse como el recíproco del  $n$  de Kutter en unidades simétricas, afirmación que fue presentada en textos subsecuentes y en 1918 el hidráulico americano King denominó éste coeficiente como el  $n$  de Manning; resultando la ecuación que se conoce hoy en día como tal.

$$v = \frac{K_n}{n} R^{2/3} S^{1/2} \quad [2]$$

donde  $K_n$  es igual a 1 en el Sistema Internacional y 1.49 para el Sistema Inglés.

A pesar de que la ecuación de Manning ha sido ampliamente utilizada en el diseño de tuberías fluyendo parcialmente llenas, diferentes estudios demuestran que debido a que es una formulación empírica, ésta ecuación pierde validez para el diseño de alcantarillados que usan materiales modernos, los cuales, debido a su baja rugosidad, presentan Flujo Turbulento Hidráulicamente Liso (FTHL), y la ecuación de Manning solo funciona para Flujo Turbulento Hidráulicamente Rugoso (FTHR). Por lo tanto, usar la ecuación de Manning con régimen de FTHL genera el sobredimensionamiento de la tubería en un 20% aproximadamente, lo cual incurre en un aumento de los costos del diseño.



**Figura 1.-** Características del flujo para una sección circular con n de Manning constante y variable. (T.R. Camp, s.f.)

En la Figura 1, se observa que para los diseños generados con valores del coeficiente de n de Manning variable, el caudal máximo se encuentra para una profundidad ligeramente superior al 90% del diámetro interno y tiene una magnitud total de 1.07 veces el caudal a tubería llena. Mientras que al utilizar el n de Manning constante el caudal máximo se encuentra a la misma profundidad, pero su magnitud es de 1.18 veces el caudal de la tubería llena.

Por esta razón, la Sociedad Americana de Ingenieros Civiles (ASCE – American Society of Civil Engineers) planteó una tabla en la cual, dependiendo del diámetro de la tubería, adopta un rango válido para el coeficiente de Manning (mostrando 3 valores por cada diámetro, para diseños conservadores, diseños menos conservadores, y los valores típicos).

**Tabla 1. –** Valores recomendados del n de Manning para cálculos en el diseño de alcantarillados (ASCE , 2007)

TABLE 5-2 Suggested Values of Manning for sewer Design Calculations											
Condition	Pipe Diameters in inches										
	6	8	10	12	15	18	24	30	36	48	60
Extra Care	0.0092	0.0093	0.0095	0.0096	0.0097	0.0098	0.0100	0.0102	0.0103	0.0105	0.0107
Typical	0.0106	0.0107	0.0109	0.0110	0.0112	0.0113	0.0115	0.0117	0.0118	0.0121	0.0123
Substandard	0.0120	0.0121	0.0123	0.0125	0.0126	0.0127	0.0130	0.0133	0.0134	0.0137	0.0139

Note: Extra care values are calculated from the Darcy-Weisbach equation for 60 °F, 2 fps velocity,  $\epsilon = 0.001$  ft.  
 Typical values are 15% higher than Extra Care values; Substandard values are 30% higher than Extra Care values.  
 After Haestad, M. et al. (2004). Wastewater collection system modeling and design, Haestad Press, Waterbury, Conn, with permission

## BASE TEÓRICA

Las redes de drenaje urbano que están compuestas principalmente por tuberías, cámaras, sistemas de almacenamiento temporal, aliviaderos y estructuras de disipación de energía. Son las encargadas de recolectar el agua residual y las aguas lluvias desde los sitios donde se generan hasta el sitio final de disposición, que dependiendo de la capacidad de depuración del cuerpo receptor puede ser éste o la PTAR.

El proceso de diseño de la red de drenaje urbano está obligado a cumplir con unas restricciones de diseño y unos parámetros determinados por las características de la zona.

## Restricciones de diseño

La normatividad está regulada por normas nacionales, en el caso de Colombia estas están dadas por el Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico – RAS. Las restricciones se muestran en la Tabla 2.

**Tabla 2.-** Restricciones de diseño (Ministerio de Ambiente, vivienda y desarrollo, 2010)

Restricción	Valor		unidad
	Drenaje Sanitario	Drenaje Pluvial	
Diámetro mínimo	200	250	mm
Velocidad mínima	0.45	0.75	m/s
Velocidad máxima (Concreto-PVC)	5-10	5-10	m/s
Esfuerzo cortante mínimo	0.5	0.5	Pa
Relación de llenado máxima	70%-85%	70%-85%	-
Número de Froude cuasicrítico	0.75-1.5	0.75-1.5	-
Profundidad mínima cota clave (Vías peatonales o zonas verdes)	0.7	0.7	m
Profundidad mínima cota clave (Vías vehiculares)	1.2	1.2	m
Profundidad máxima cota clave	5	5	m

El porcentaje de llenado se elige dependiendo del tipo de flujo, para flujos cuasicríticos en los que el Número de Froude está entre 0.75 a 1.5 el porcentaje no puede exceder el 70%.

## Diseño Hidráulico de redes de drenaje urbano

El proceso de diseño consiste en determinar cuáles son los diámetros de las tuberías que transportan el caudal de diseño al igual que las pendientes más apropiadas para minimizar los costos. Para esto es necesario variar el diámetro de diseño al igual que la pendiente hasta que se cumpla con el caudal de diseño, como se explicará en la metodología. Para esto es importante hacer uso de la ecuación de conservación de la masa (ver Ecuación [6]).

$$Q = v \cdot A \quad [6]$$

donde Q es el caudal de diseño, v es la velocidad de flujo y A es el área mojada, la cual está determinada geoméricamente según el diámetro y el porcentaje de llenado. Existen diferentes formas de calcular la velocidad de flujo; en este trabajo se utiliza la ecuación que resulta del cálculo de las pérdidas por fricción haciendo uso de la ecuación de Darcy-Weisbach (Ecuación [7]) y la ecuación de Colebrook-White (Ecuación [8]) para el cálculo del factor de fricción.

$$h_f = f \frac{l}{d} \cdot \frac{v^2}{2} \quad [7]$$

$$f = -2 \log_{10} \left( \frac{k_s}{14.8 \cdot R} + \frac{2.51}{Re \cdot \sqrt{f}} \right) \quad [8]$$

Obteniendo así una expresión de la velocidad que se cumple para todo tipo de flujo (ver Ecuación [9]).

$$v = -2 \sqrt{8 \cdot g \cdot R \cdot S} \cdot \log_{10} \left( \frac{k_s}{14.8 \cdot R} + \frac{2.51 \cdot v}{4 \cdot R \cdot \sqrt{8 \cdot g \cdot R \cdot S}} \right) \quad [9]$$

donde,  $h_f$  es la pérdida de altura por fricción,  $f$  es el factor de fricción,  $l$  es la longitud del tubo,  $d$  es el diámetro de la tubería,  $v$  es la velocidad de flujo,  $R$  es el radio hidráulico,  $k_s$  es la rugosidad y  $Re$  es el número de Reynolds.

## METODOLOGÍA

Diseñar un tramo de un sistema de alcantarillado, entendido como la serie de tuberías que conectan dos cámaras de inspección, consiste en encontrar un diámetro y una pendiente que permitan el flujo de un caudal de diseño, a través de tuberías de un material determinado. Con el fin de simplificar los cálculos y enmarcar el problema dentro de un contexto realista, se estableció una metodología en la que la pendiente es una variable discreta, comprendida en el intervalo  $[0.001; 0.1]$  con pasos de  $1/1000$ , con el objetivo de no violar restricciones de velocidades mínimas y máximas. Las pendientes candidatas para el diseño se denominan Pendientes Propias, concepto que se explica en el siguiente apartado. Luego de esto, se expone una metodología para evaluar la viabilidad de disponer una serie de tramos de alcantarillado, y encontrar de manera exhaustiva el conjunto que implica los menores costos constructivos. Éstos se calculan haciendo uso de la expresión (Navarro, 2009):

$$C = k(9579.31 \cdot d^{0.5737} + 1163.77 \cdot V^{1.31}) \quad [10]$$

donde  $C$  es el costo en pesos colombianos al año 2011,  $k$  es un factor de conversión que depende de la inflación desde el año 2007,  $d$  es el diámetro de la tubería en metros y  $V$  es el volumen de tierra excavado, en metros cúbicos. Nótese que sólo se incluyen los costos asociados a la compra de la tubería, y a la excavación necesaria para su instalación, en donde entran a jugar la pendiente y la longitud de ésta. Hay que tener en cuenta que este análisis no contempla los costos de las cámaras de inspección, ni diseños que usen estaciones de bombeo. Todo el análisis se desarrolla suponiendo que la pendiente del terreno es cero.

### Pendiente Propia

La idea de pensar en la pendiente como una variable discreta tiene sentido si se observa el problema desde la perspectiva del topógrafo. En el momento de instalar la tubería, éste va a tener serias dificultades si la pendiente propuesta por el diseñador tiene una precisión mayor o igual a  $3/1000$ . Es por esto que se limita la pendiente a los valores anteriormente descritos.

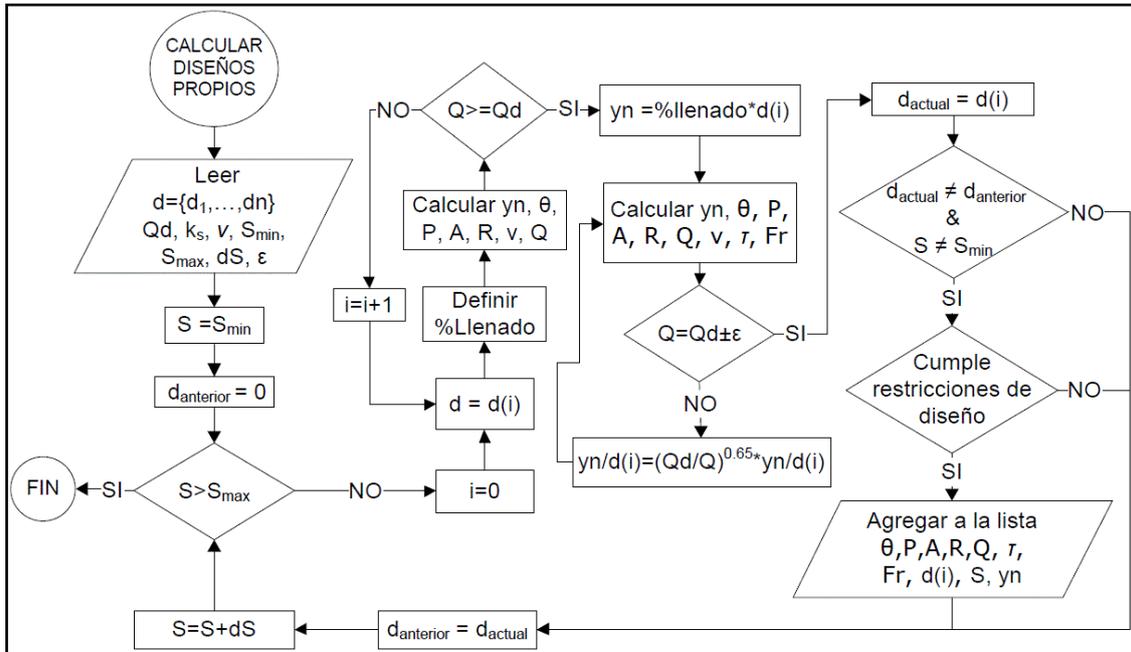
Es posible encontrar diseños que sean válidos para cualquier pendiente del intervalo  $[0.001; 0.1]$ . Sin embargo, no todos son apropiados ya que algunas de las pendientes harán que la profundidad de agua sea más baja que el límite permitido, desaprovechando parte de la capacidad de la tubería para dicho diámetro. Por lo tanto, la pendiente discreta que hace que por un diámetro determinado pase el caudal de diseño con la máxima relación de llenado posible, se denomina Pendiente Propia.

### Algoritmo de Diseño de Tuberías de Alcantarillado

Los datos que se conocen para realizar cada diseño son: material del tubo, una pendiente que pertenece al conjunto anteriormente definido y el caudal de diseño. El proceso que se sigue para encontrar el diámetro comienza por tomar el menor valor de una lista de diámetros discretos dada por los fabricantes. Para cada diámetro interno se establece el máximo porcentaje de llenado posible según su valor, como se estipula en una versión preliminar del nuevo RAS: 70% si es menor a 0.5 metros; 85% si es mayor a 1 metro y 80% en los demás casos. Con esta relación de llenado es posible calcular la profundidad de flujo y el radio hidráulico resultante. Haciendo uso de las ecuaciones [9] y [6] se encuentra el máximo caudal que puede transportar una tubería del material establecido con el diámetro escogido y disponiendo la tubería con la pendiente que se conoce. En caso de que

este caudal máximo no sea mayor al caudal de diseño, se escoge un diámetro mas grande, recorriendo la lista ordenada de diámetros de menor a mayor, y se repite el proceso hasta encontrar un diámetro que tenga capacidad suficiente para transportar el caudal de diseño.

Habiendo encontrado el diámetro, se procede a calcular la profundidad normal de flujo que se genera cuando, por esa tubería fluye el caudal de diseño. Ya que las ecuaciones son implícitas no es posible hallar el valor de forma directa, razón por la cual se deben usar métodos numéricos. Se ha diseñado un método basado en las ecuaciones hidráulicas, que mostró menor tiempo de convergencia frente a los métodos numéricos de búsqueda de raíces tradicionales (ver Figura 2).



**Figura 2.-** Diagrama de flujo seguido para el proceso de diseño.

Si se observa con detenimiento el algoritmo, para encontrar los diseños propios (que corresponden a aquellos diámetros calculados usando pendientes propias) basta con recorrer el intervalo de pendientes de menor a mayor haciendo un diseño para cada valor. En el momento en el que el diámetro resultante del diseño se vea disminuido con respecto al diseño anterior, se tiene una relación de llenado máxima para ese diámetro y, por lo tanto, un diseño propio. El diseño será tenido en cuenta siempre y cuando cumpla con las restricciones hidráulicas establecidas en la norma.

### Diseño de Sistemas de Alcantarillado

Cuando se diseña la línea principal de una red de alcantarillado, según la norma colombiana, el diseñador tiene la responsabilidad de seleccionar la alternativa que implique los costos más bajos. Para abordar el problema hay que pensar en la línea principal de una red de alcantarillado como la serie de tramos más larga que recibe todos los flujos de una cuenca, llevándolos hasta el cuerpo receptor. Se sabe que cada tramo tiene un conjunto de diseños propios posibles, que cumplen con las restricciones hidráulicas. Una alternativa es aquella combinación de diseños propios hecha en los tramos que conforman la línea principal de una red de alcantarillado. De esta manera se tiene que el número total de alternativas es:

$$Alternativas = \prod_{i=1}^n NPP_i \quad [11]$$

donde n es el número de tramos y  $NPP_i$  es el número de pendientes propias del tramo i-ésimo.

Dos de las restricciones adicionales que se establecen a la hora de diseñar sistemas de alcantarillado corresponden a los límites de profundidad en los que deben disponerse los colectores; y el

hecho de que una tubería aguas abajo no puede tener un diámetro inferior al que tienen las tuberías de aguas arriba. Buscando que el diseñador sea capaz de encontrar la alternativa de menor costo, se propone una metodología de evaluación de alternativas de carácter exhaustivo, que verifica el cumplimiento de las restricciones establecidas para una línea de tramos de alcantarillado dispuestos en serie. Esto se logró haciendo uso de herramientas computacionales, en las que se construyeron estructuras de datos en forma de árbol, con tantas ramificaciones como alternativas se desprenden de cada tramo. Al final de cada rama, se obtienen la misma cantidad de hojas como alternativas existan en el problema, por lo que la ecuación [11] también es útil para calcular el número de rutas posibles en la estructura de datos.

La evaluación de alternativas se lleva a cabo recorriendo la estructura de datos una única vez, con el fin de optimizar el tiempo de ejecución. A medida que se encuentran alternativas válidas, se construye otra estructura de datos, que contiene diseños enlazados linealmente. Al final de la ejecución, la estructura de datos contiene una lista de alternativas que cumplen con las restricciones. En este punto, se calculan los costos de cada alternativa, con el fin de encontrar aquella que corresponde a la de costo constructivo menor, garantizando un mínimo global, puesto que el proceso se desarrolla de manera exhaustiva.

## RESULTADOS

### Diseño de Tuberías de Alcantarillado

En el presente apartado se muestran los resultados de la ejecución del algoritmo que se muestra en la Figura 2, y la forma como son identificadas las restricciones hidráulicas y las pendientes propias de un tramo particular. Para un caudal de diseño de 82 L/s y un tramo de tuberías de PVC de 75 metros de longitud, se obtienen los siguientes diseños.

**Tabla 3.-** Diseños obtenidos con sus respectivas restricciones para el ejemplo.

Diseño [ - ]	S [ - ]	d [pulg]	d interno [m]	yn [m]	yn/d [ - ]	Velocidad [m/s]	Caudal [m <sup>3</sup> /s]	T [Pa]	Fr [ - ]
1	0.001	27	0.6858	0.5212	76.0%	0.996	0.3000	2.03	0.44
2	0.002	24	0.6096	0.4457	73.1%	1.312	0.3000	3.59	0.64
3	0.003	24	0.6096	0.3822	62.7%	1.558	0.3000	5.09	0.87
4	0.004	24	0.6096	0.3470	56.9%	1.749	0.3000	6.46	1.05
5	0.005	20	0.508	0.3752	73.9%	1.869	0.3000	7.49	1.00
6	0.006	20	0.508	0.3486	68.6%	2.023	0.3000	8.80	1.15
7	0.007	20	0.508	0.3293	64.8%	2.158	0.3000	10.04	1.29
8	0.008	20	0.508	0.3143	61.9%	2.278	0.3000	11.24	1.41
9	0.009	20	0.508	0.3020	59.4%	2.389	0.3000	12.39	1.52
10	0.01	18	0.4572	0.3180	69.6%	2.461	0.3000	13.26	1.46
11	0.011	18	0.4572	0.3067	67.1%	2.562	0.3000	14.40	1.57
12	0.012	18	0.4572	0.2971	65.0%	2.656	0.3000	15.51	1.67
13	0.013	18	0.4572	0.2888	63.2%	2.745	0.3000	16.59	1.76
14	0.014	18	0.4572	0.2815	61.6%	2.828	0.3000	17.66	1.85
15	0.015	18	0.4572	0.2750	60.2%	2.908	0.3000	18.70	1.93
16	0.016	18	0.4572	0.2692	58.9%	2.984	0.3000	19.73	2.01
17	0.017	18	0.4572	0.2639	57.7%	3.056	0.3000	20.75	2.09
18	0.018	18	0.4572	0.2591	56.7%	3.126	0.3000	21.75	2.17
19	0.019	16	0.4064	0.2794	68.7%	3.156	0.3000	22.30	2.01

donde  corresponde a los diseños que incumplen con la restricción de esfuerzo cortante mínimo;  corresponde a los diseños que presentan un número de Froude entre 0.7 y 1.5, pero que no incumplen con ninguna restricción; y  corresponde a los diseños con número de Froude entre 0.7 y 1.5 pero con una relación de llenado mayor al 70%. Los diseños propios son aquellos en los que para un mismo diámetro se consigue la máxima relación de llenado. En la Tabla 3, los diseños propios son: 2, 5, 10, 19.

El método numérico usado para encontrar la profundidad de flujo (yn) que se genera cuando por una tubería conocida fluye el caudal de diseño, resultó ser muy eficiente. Esto se debe a que el

método está basado en un análisis hidráulico del problema a diferencia de otros métodos numéricos tradicionales que mostraron un desempeño más bajo, como se muestra en la Tabla 4.

**Tabla 4.-** Iteraciones promedio para la convergencia de  $\gamma$  por diferentes métodos numéricos.

Método	Iteraciones Promedio
Hidráulico	3.07
Secante	3.45
Falsa posición	3.57
Bisección	8.20

Las iteraciones promedio se calcularon a partir de las iteraciones que presentaban cada uno de los métodos cuando se usaban diferentes datos de entrada. Los datos de entrada que se usaron fueron los mismos para todos los métodos y se probaron diferentes materiales. La precisión ( $\epsilon$ ) usada en todos los métodos fue la misma.

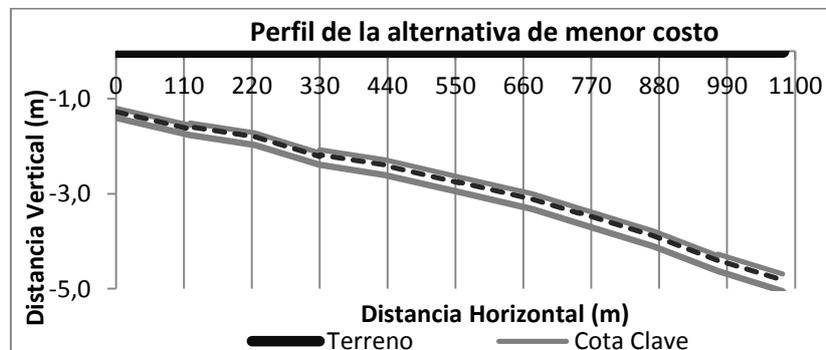
### Diseño de la rama principal de Alcantarillado

Se muestra el diseño de una línea principal de alcantarillado que consta de 10 tramos en serie, hechos en PVC, con los datos que se muestran en la Tabla 5.

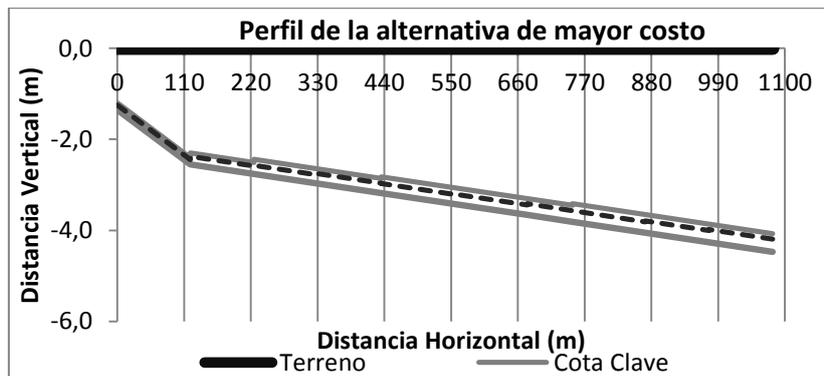
**Tabla 5.-** Datos usados para el diseño de una línea principal de alcantarillado.

Tramo [ - ]	N° Diseños Propios [ - ]	Caudal [ m <sup>3</sup> /s ]	Longitud [ m ]
1	2	0.020	120
2	3	0.032	105
3	4	0.048	105
4	4	0.058	105
5	5	0.064	120
6	5	0.070	120
7	4	0.082	75
8	5	0.090	120
9	5	0.100	105
10	5	0.110	105

Se tiene que hay 1'200 000 alternativas posibles de combinar los diseños de los tramos. Luego de ejecutar la evaluación exhaustiva, se llegó a que únicamente 152 alternativas cumplían con las restricciones, y se estableció que la profundidad mínima de cota clave correspondía a la de una vía vehicular. Finalmente, los perfiles que forman los diseños de mayor y menor costo se muestran en las Figuras 3 y 4 respectivamente.



**Figura 3.-** Perfil de la alternativa válida de costo mínimo.



**Figura 4.-** Perfil de la alternativa válida de mayor costo.

La rutina que realizó la evaluación de 1'200 000 alternativas de forma exhaustiva, tardó 18 segundos en finalizar de manera exitosa la tarea. Esto se consiguió a través del uso de estructuras de datos adecuadas para la búsqueda de caminos que cumplan con restricciones específicas.

## ANÁLISIS DE RESULTADOS

El diseño de tuberías de alcantarillado es un problema especial, ya que involucra el cálculo de dos variables que son discretas. La evaluación de un conjunto discreto de pendientes es una simplificación realista del problema, ya que se ajusta a las restricciones de diseño que están establecidas en las normas. En el momento en el que se escogen pendientes propias para definir alternativas de diseño para los tramos, se garantiza que al alcanzar el período de diseño, las tuberías van a ser utilizadas en su capacidad apropiada. Esta capacidad corresponde a la máxima posible que cumple con todas las restricciones de diseño.

El uso de un método hidráulico para la convergencia de la profundidad normal de flujo permite hacer diseños de una manera más eficiente, en comparación con el uso de otros métodos numéricos. Esto ocurre ya que el método está basado en un análisis hidráulico del problema, la cual corresponde a la filosofía que hay detrás de los métodos modernos de optimización en hidráulica, pues hacen uso de funciones objetivo y restricciones que obedecen principios netamente hidráulicos.

El problema de diseño de líneas principales de alcantarillado se simplifica enormemente al establecer la pendiente como una variable discreta. Este planteamiento permite evaluar alternativas finitas de diseño, lo que abre la posibilidad de hacer análisis exhaustivos en la evaluación de alternativas. A partir de los resultados de este proceso, es posible encontrar un costo mínimo global que resulta ser un diseño que cumple con todas las restricciones. El uso de estructuras de datos que permitan evaluar el cumplimiento de restricciones a través de múltiples caminos, resulta fundamental a la hora de establecer metodologías eficientes para realizar cálculos exhaustivos.

Se observa que de manera consistente, los diseños de menor costo tienen pendientes pequeñas en los primeros tramos, y éstas van aumentando a medida que se avanza en la línea principal de alcantarillado. De manera inversa ocurre con los diseños de mayor costo, pues estos presentan las pendientes más altas en los primeros tramos las cuales van disminuyendo hacia el final de la línea principal. Esto último es lo que ocurre generalmente en el drenaje natural, puesto que en una cuenca el agua fluye en la dirección que presenta mayor gradiente de elevación. Esto hace que los perfiles de elevación de los cursos de agua tengan, generalmente, pendientes empinadas al inicio y pendientes bajas en su desembocadura.

## CONCLUSIONES

- La idea de realizar diseños exhaustivos cobra gran validez a través del uso de herramientas y técnicas computacionales modernas, que al ser implementadas de manera adecuada, reducen notoriamente los tiempos de cálculo.

- En hidráulica, siempre que se planteen problemas de optimización, las restricciones, las funciones objetivo y los métodos numéricos usados, deben partir de análisis físicos e hidráulicos que se enfoquen en el comportamiento de las variables en situaciones reales. De esta manera se garantiza que la búsqueda de valores óptimos sea lo más eficiente posible.
- Los procesos de optimización son muy importantes ya que por medio de éstos se puede realizar una valoración exhaustiva de alternativas en un tiempo corto, lo que se ve reflejado en una reducción tanto de tiempos operacionales como de costos constructivos.
- La metodología de diseño seleccionada es efectiva, ya que garantiza la valoración de todas las alternativas posibles para un proyecto dado; de tal manera que después de realizar una comparación entre éstas, se seleccione la mejor alternativa global.
- El uso de estructuras de datos para llevar a cabo la evaluación de las alternativas a partir de restricciones de diseño, alcanza niveles de eficiencia satisfactorios, teniendo en cuenta que el problema de optimización se está solucionando de manera exhaustiva.
- La pendiente es un parámetro fundamental a la hora de diseñar alcantarillados. Por tal motivo, es importante discretizarla para poder hacer uso de ésta en la metodología de diseño.
- Al hacer uso únicamente de pendientes propias para el diseño se logra aprovechar al máximo el diámetro de la tubería.
- Las combinaciones de tramos que conforman una línea principal de alcantarillado, alcanzan los menores costos cuando sus perfiles describen un aumento progresivo de la pendiente (y un aumento progresivo en los cambios de ésta) a medida que se avanza en la serie.

## REFERENCIAS

**ASCE.** (2007). *Gravity Sanitary Sewer Design and Construction*. Reston: American Society of Civil Engineers.

**Chie Yen, Ben.** (1991). *Channel Flow Resistance: Centennial of Manning's Formula*. Water Resources Publications, LLC, 5-8. Colorado.

**Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial.** (2010). *Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico-RAS (versión preliminar)*. Bogotá.

**Navarro, I.** (2009). *Diseño Optimizado de Redes de Drenaje Urbano*. Bogotá: Universidad de los Andes.