

RELACIÓN LÍMITE ENTRE CRITERIOS DE AUTOLIMPIEZA Y EL DISEÑO OPTIMIZADO DE ALCANTARILLADOS

Sebastián González¹, Carlos Montes² y Juan Saldarriaga³

^{1,2} Investigador, Centro de Investigaciones en Acueductos y Alcantarillados (CIACUA), Universidad de los Andes, Bogotá, Colombia.

³ Profesor Titular, Centro de Investigaciones en Acueductos y Alcantarillados (CIACUA), Universidad de los Andes, Bogotá, Colombia.
E-mail: s.gonzalez142@uniandes.edu.co, cd.montes1256@uniandes.edu.co, jsaldarr@uniandes.edu.co

Introducción

En un principio los sistemas de alcantarillado fueron concebidos como estructuras hidráulicas que permitieran la evacuación rápida de las aguas grises y negras sin tener en cuenta el posible impacto en el cuerpo receptor. Con el paso del tiempo esta idea se fue modificando y hoy en día los alcantarillados se ven de forma integral tomando en cuenta todas las partes involucradas: la red de drenaje urbano (objeto de la investigación), la planta de tratamiento (no siempre necesaria) y el cuerpo receptor. Al estudiar y diseñar el sistema de drenaje como un complemento de las tres partes mencionadas se garantiza el buen funcionamiento y la armonía del sistema integrado permitiendo una evacuación ya no únicamente rápida sino segura tanto para las personas como para el medio ambiente.

El presente trabajo busca encontrar el límite donde la restricción de autolimpieza no afecte el diseño optimizado del alcantarillado, es decir el límite donde sin importar cuál de las restricciones de autolimpieza se escoja el costo final del diseño optimizado es el mismo. Lo anterior se evalúa para diferentes pendientes del terreno teniendo en cuenta restricciones tradicionales y la restricción recomendada por la Sociedad Americana de Ingenieros Civiles (ASCE, por sus siglas en inglés) denominada Tractive Force el cual, por medio de una ecuación, conociendo pocas características de los sedimentos, permite encontrar el esfuerzo cortante mínimo requerido para mover una partícula de arena de un diámetro específico (Enfinger et. al, 2010). Adicional al límite mencionado anteriormente, también se encuentra el mínimo caudal que permite un diseño factible para cada una de las restricciones de autolimpieza al cambiar la pendiente promedio del terreno (límite inferior). Lo anterior permite establecer un rango de pendientes del terreno y caudales a partir de los que cada restricción puede ser utilizada.

Marco teórico

Las restricciones de autolimpieza presentes en la literatura se separan en tres grupos principales, según la clasificación realizada por Vongvisessomjai et al. (2010): No-depósito de sedimentos, Movimiento de sedimentos existentes en el lecho de la tubería y pendiente de energía.

El primer grupo, *no-depósito de sedimentos*, se caracteriza por establecer un valor de esfuerzo cortante o velocidad mínima para evitar el depósito de sedimentos en el lecho de la tubería. Dentro del grupo se establecen tres sub-grupos que comparten la característica descrita anteriormente donde se destaca la ecuación de Macke (1982), la ecuación de May (1993) y las restricciones tradicionales (velocidad mínima y esfuerzo cortante mínimo) presentes en las distintas normativas.

El segundo grupo, *movimiento de sedimentos existentes en el lecho de la tubería*, se caracteriza por establecer restricciones de velocidad o esfuerzo cortante que permitan el movimiento de sedimentos que ya se encuentren depositados en el lecho de la tubería. Este mecanismo puede ser por movimiento incipiente o por transporte de sedimentos. Dentro de este grupo se destaca la ecuación de Ackers (1991).

Por último, dentro del grupo *pendiente de energía*, se destaca el

método Tractive Force recomendado por la ASCE en el cual se emplea la ecuación de Raths-McCauley (1962) para calcular el esfuerzo cortante mínimo requerido para transportar una partícula de arena de un tamaño específico.

Para entender de una mejor forma el efecto de las restricciones de autolimpieza en las redes de drenaje urbano se utiliza el programa desarrollado Duque (2013), el cual analiza el diseño de una serie de alcantarillado por medio de teoría de grafos donde el problema de diseño (elección del diámetro y la pendiente óptima) se aborda como un problema de optimización, conocido como el problema de ruta más corta. Por medio del algoritmo de Bellman-Ford el programa resuelve el problema de optimización encontrando la combinación óptima de diámetro y pendiente en cada tramo de la serie cumpliendo todas las restricciones de diseño al menor costo. El programa de Duque (2013) permite realizar múltiples veces el diseño de una serie de alcantarillado cambiando características topológicas o de diseño (pendiente de los tramos, material, diámetros disponibles, restricciones de diseño, etc.). Una de las entradas más importantes en el programa es la ecuación de costos, la cual resulta ser la función objetivo que se busca minimizar siendo esencial para la búsqueda de los diámetros y las pendientes óptimas.

En la investigación se utilizan dos ecuaciones de costo que permiten estimar el costo final de la construcción de un tramo de alcantarillado en función del diámetro, longitud de la tubería y el volumen de excavación. La primera ecuación es la planteada por Navarro (2009) (Ecuación [1]) y la segunda es la ecuación planteada por Maurer (2013) (Ecuación [2]):

$$C_{TOTAL} = k(9579.31 * d^{0.5737} * l + 1163.77 * V^{1.31}) \quad [1]$$

$$C_{TOTAL} = (\alpha(h) + \beta) * l \quad [2]$$

Metodología

Con el fin de encontrar la relación límite entre las restricciones de autolimpieza y el diseño óptimo de alcantarillados se realiza el diseño óptimo de cuarenta y cuatro series diferentes (una serie se entiende como tuberías de alcantarillado consecutivas conectadas por un pozo de inspección). Las series se dividen en seis diferentes pendientes promedio del terreno: 0.105%, 0.184%, 0.263%, 0.578%, 1.051% y 1.208%.

De las restricciones de autolimpieza presentes en la literatura se escogieron siete para realizar el análisis (Tabla 1). Los valores seleccionados abarcan un rango importante de las restricciones encontradas tanto de esfuerzo cortante como de velocidad mínima.

Tabla 1.- Restricciones de Autolimpieza Seleccionadas.

Restricción	Valor Mínimo	Tipo
Velocidad	0.6 [m/s]	Tradicional (México - USA)
Esfuerzo Cortante	0.87 [Pa]	Pendiente de Energía (ASCE)
Esfuerzo Cortante	1 [Pa]	Tradicional (Nicaragua - Bolivia)
Esfuerzo Cortante	1.5 [Pa]	Tradicional (Bolivia - Colombia)
Esfuerzo Cortante	2 [Pa]	Tradicional (Colombia)

El procedimiento para encontrar la relación límite se divide en cuatro pasos principales:

Primero se diseña cada una de las series con un $\Delta\bar{Q}$ (Ecuación [3]) inicial bajo.

$$\Delta\bar{Q} = \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{nodo\ i+1} - Q_{nodo\ i})}{n} \quad [3]$$

En segundo lugar, se incrementa el $\Delta\bar{Q}$ hasta encontrar un diseño factible para cada una de las restricciones de autolimpieza (límite inferior).

Luego, como tercer paso, se sigue incrementando el $\Delta\bar{Q}$ hasta que la diferencia porcentual del costo entre los diseños con las restricciones y el diseño sin restricción sea muy baja (límite superior), lo que significa que a partir de ese valor $\Delta\bar{Q}$ la restricción de autolimpieza que se escoja no afecta el costo final del diseño.

Por último, se diseña la serie con un $\Delta\bar{Q}$ alto para comprobar el valor $\Delta\bar{Q}$ encontrado para el límite superior, donde se verifica que el costo del diseño al usar cualquiera de las restricciones es similar.

Los anteriores pasos se repiten utilizando la ecuación de costos de Navarro (2009) tanto para diseños en PVC como en concreto y con la ecuación de Maurer (2013) para PVC.

Resultados

Luego de encontrar el límite superior e inferior para cada una de las series se obtiene la tendencia en función del caudal y la pendiente del terreno:

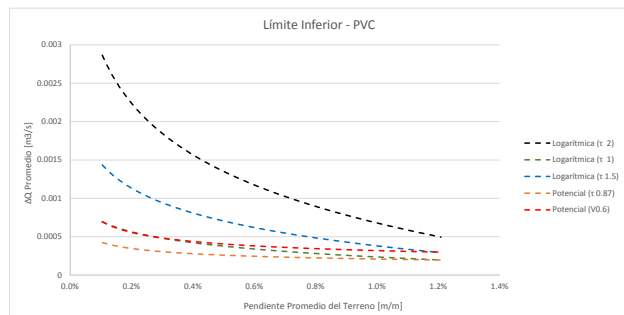


Figura 1.- Tendencia Límite Inferior PVC.

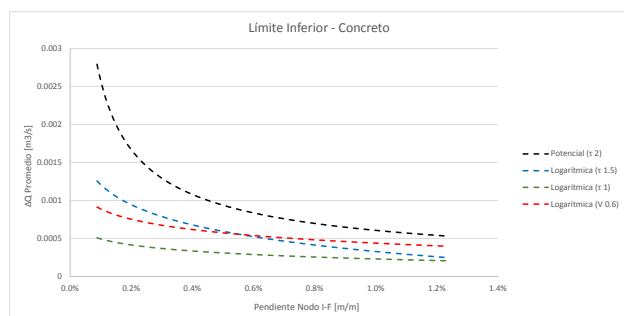


Figura 2.- Tendencia Límite Inferior Concreto.

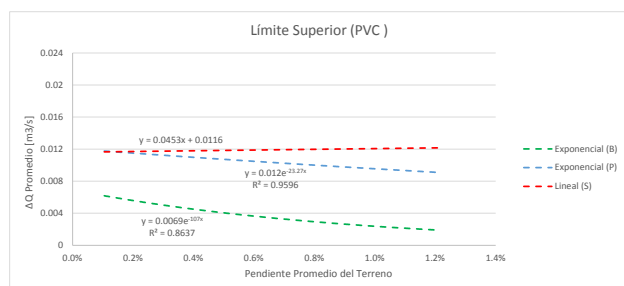


Figura 3.- Tendencia Límite Superior PVC (Ecuación de Navarro).

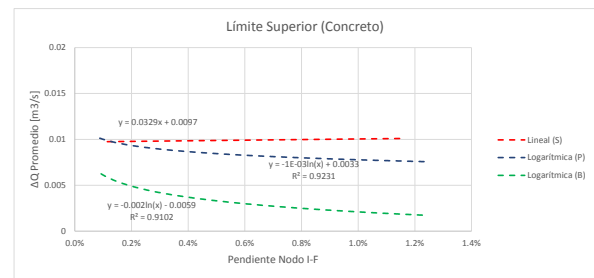


Figura 4.- Tendencia Límite Superior Concreto (Ecuación de Navarro).

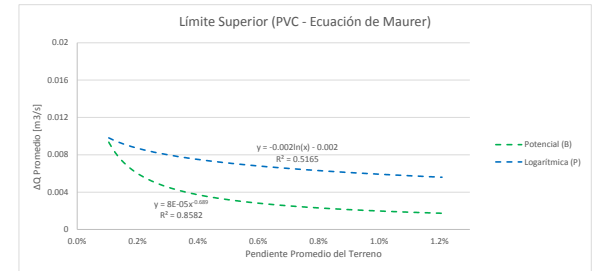


Figura 5.- Tendencia Límite Superior PVC (Ecuación de Maurer).

Conclusiones

Al finalizar los diseños óptimos de las diferentes series se pudo encontrar una tendencia clara tanto para el límite inferior como para el límite superior. El límite superior permite encontrar en una serie de alcantarillado el mínimo $\Delta\bar{Q}$ desde el que se tiene un diseño factible para las diferentes restricciones de autolimpieza (Figura 1-2). Este límite es independiente de la ecuación de costo y depende únicamente de la restricción de excavación máxima.

El límite superior permite encontrar en una serie de alcantarillado el mínimo $\Delta\bar{Q}$ desde el que no importa la restricción de autolimpieza que se considere en el diseño el costo óptimo de la serie será el mismo, este límite sí se ve afectado por la ecuación de costo y su comportamiento cambia dependiendo del inicio del terreno en la serie (Figura 3-5) en subida (rojo en las figuras), plano (azul en las figuras) y en bajada (verde en las figuras).

Referencias

Ackers, P. (1991). *Sediment Aspects of Drainage and Outfall Design*. Proceedings of the International Symposium on Environmental Hydraulics, Balkema, Rotterdam, The Netherlands.

Duque, N. (2013). *Diseño Optimizado de Series de Tuberías en Sistemas de Alcantarillado*. Bogotá: Universidad de los Andes.

Enfinger, K. & Mitchell, P. (2010). *Scattergraph Principles and Practice: Evaluating Self-Cleansing in Existing Sewers Using the Tractive Force Method*. World Environmental and Water Resources Congress, Rhode Island, USA.

Macke, E. (1982). "About Sedimentation at Low Concentrations in Partly Filled Pipes". *Mitteilungen, Leichweiss Institut fur Wasserbau der Technischen Universität Braunschweig*, Heft 71, 1-151.

Maurer, M., Scheidegger, A. & Herlyn, A. (2013). *Quantifying Costs and Lengths of Urban Drainage Systems with a Simple Static Sewer Infrastructure Model*. *Urban Water Journal*, 268-280.

May, R. (1993). *Sediment Transport in Pipes and Sewers with Deposited Beds*. Hydraulic Research Ltd.

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

Raths, C. & McCauley, R. (1962). *Deposition in Sanitary Sewer*. *Water Sewer Works*, 192-197.

Vongvisessomjai, N., Tingsanchali, T. and Babel, S. (2010). "Non-Deposition Design Criteria for Sewers with Part-Full Flow". *Urban Water J.*, Vol. 7, No. 1, pp. 61-77.