

COEFICIENTES DE RESISTENCIA HIDRÁULICA EN TRAMOS DE ALCANTARILLADOS EN FUNCIONAMIENTO

ROUGHNESS COEFFICIENT IN OPERATIONAL SECTIONS OF SEWAGE SYSTEMS

ANDRÉS TORRES¹, GUSTAVO ADOLFO ZARRUK SERRANO², JAIME ANDRÉS LARA BORRERO³

RESUMEN

Para el diseño de sistemas de alcantarillado, es común la utilización de valores de coeficientes de resistencia hidráulica obtenidos en laboratorio, en función del material del ducto. Esta estimación puede tener consecuencias importantes, en particular sobre los costos de construcción de grandes sistemas de alcantarillado y su funcionamiento hidráulico a mediano y largo plazo. Debido a la escasez de datos en campo, se desarrolló un estudio para determinar coeficientes de resistencia para tramos de alcantarillados en funcionamiento e identificar y clasificar las diferentes variables que influyen en su estimación. Se realizaron ensayos en laboratorio para perfeccionar el diseño experimental y para comparar con los resultados de campo. Los resultados sugieren que el material del tramo estudiado, así como factores relacionados con la gestión (estado y tiempo de servicio de los tramos) tienen una incidencia muy importante en la variación del coeficiente de resistencia hidráulico y en la incertidumbre de su estimación. Se corrobora que existe una marcada diferencia entre los coeficientes de resistencia hidráulica promedios obtenidos en laboratorio y en campo, para tramos de un mismo material y diámetro diferente.

Palabras clave: Flujo uniforme; Coeficientes de resistencia hidráulica; Alcantarillado; Anova; Incertidumbre.

ABSTRACT

During the design of sewer systems, laboratory values of flow resistance coefficients are usually used for different pipe materials. This estimation can have important consequences, in particular on the building costs of large sewer systems, and their medium and long term hydraulic performances. Due to the scarce field data available, the present study aims to assess the actual resistance coefficients on sewer systems in use, and identify and classify some of the conditions that influence their variation. In addition, laboratory experiments were conducted to define the experimental design and compare to field results. Results suggest that the material of the studied sections, in addition with management related factors (state and time of service of the sewage sections) have an important effect on the variation of the hydraulic resistance coefficient and on its estimation uncertainty. We confirmed that a prominent difference exists between the average resistance coefficients obtained in the laboratory and in the field for sections of the same material and different diameter.

Keywords: Uniform flow; Flow resistance coefficients; Sewer systems; Anova; Uncertainty.

INTRODUCCIÓN

Para el diseño y dimensionamiento de redes de alcantarillado se han utilizado por muchos años ecuaciones semi-empíricas que asumen flujo unifor-

me. Estas ecuaciones, por lo general de fácil implementación, intentan relacionar la velocidad de flujo con otras variables geométricas e hidráulicas. Dentro de esas variables se encuentran los coeficientes

1. Profesor Asociado, Director Grupo de Investigación Hidrociencias, Director Maestría en Hidrosistemas, Departamento de Ingeniería Civil, Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá, Colombia.
e-mail: andres.torres@javeriana.edu.co
2. Investigador, Institutt for Energiteknikk, Kjeller, Noruega. e-mail: gzarruk@gmail.com
3. Profesor Asistente, Jefe de la Sección Hidrotecnología y Ambiental y Director Grupo de Investigación ISAD, Departamento de Ingeniería Civil, Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá, Colombia. e-mail: laraj@javeriana.edu.co

Fecha de recibido: Febrero 27, 2008

Fecha de aprobación: Junio 12, 2008

Tabla 1
Resumen de antecedentes en laboratorio y campo

Autor	Material	D (pg)	Resultado	Tipo de estudio
Straub <i>et al.</i> (1960)	Concreto	24	$n = 0,01094 - 0,0116$	Laboratorio
		36	$n = 0,01083 - 0,01166$	
Tullis, P. (1986)	Concreto	12	$n = 0,0098 - 0,0102$	Laboratorio
		8 y 18	$n = 0,0099 - 0,0103$	
		18	$n = 0,0082 - 0,0090$	
	PVC	9	$n = 0,0097 - 0,0100$	
		10	$n = 0,0098 - 0,0102$	
		18	$n = 0,0097 - 0,0103$	
Bishop y Jeppson (1975)*	PVC	8	$n = 0,0088 \pm 0,0006$	Campo
Gerard R. <i>et al.</i> (1986)	PVC	8	$n = 0,018$	Campo
		10	$n = 0,019$	
		12	$n = 0,017$	
	Concreto	8	$n = 0,018$	
		10	$n = 0,016$	
		12	$n = 0,018$	

R_h : Radio hidráulico * Obtenido de Fisher C. (2004)

de resistencia como el de Chézy, C , y el n de Manning. Se considera que el coeficiente de resistencia depende del número de Reynolds, de la rugosidad de la frontera y la forma de la sección transversal del canal y se han descrito varios métodos para estimarlos (French, 1988).

Durante el diseño de alcantarillados se selecciona el coeficiente de resistencia de la tabla propuesta por Chow (1994). Estos valores tienen una gran incertidumbre que ha sido materia de estudio en múltiples investigaciones (Chaudhry, 1993), (Chow, 1994). La Tabla 1 presenta algunos de los resultados obtenidos al determinar el n de Manning.

La diferencia entre los valores de n de Manning obtenidos en laboratorio y los valores utilizados durante el diseño es significativa. Esto ha llevado a proponer para el diseño valores de n de Manning con un incremento de aproximadamente 30% con respecto al valor de laboratorio, en el caso de las tuberías de concreto y de 20% en el caso de tuberías plásticas (Dutruel, 1998).

Este artículo presenta una metodología para la medición de coeficientes de resistencia hidráulica y los resultados de su aplicación sobre tramos de alcantarillados en funcionamiento. Se presenta un análisis de esos resultados con el fin de determinar las principales variables o factores que presentan una mayor influencia sobre la variación de los coeficientes de resistencia y se comparan los resultados obtenidos aplicando la metodología propuesta a tramos de concreto en campo y en laboratorio.

MÉTODO

La primera fase del proyecto consistió en desarrollar una metodología experimental para estimar coeficientes de resistencia hidráulica en tramos de alcantarillado en funcionamiento. Esta metodología incluye el cálculo de la incertidumbre asociada con el resultado obtenido.

Para la estimación de los coeficientes de resistencia promedio, se estableció la medición de las siguien-

tes variables: diámetro promedio, D , pendiente promedio, S , velocidad promedio, u , temperatura del fluido, T , y altura promedio de la lámina de agua, H .

El diámetro promedio se mide con un deflectómetro compuesto por dos tubos PAVCO tipo CPVC de $\frac{1}{2}$ pg y de $\frac{3}{4}$ pg, sellados en sus extremos. El tubo de $\frac{1}{2}$ pg se introduce dentro del tubo de $\frac{3}{4}$ pg y se ajusta con la ayuda de un calibrador de precisión. La medición se realiza introduciendo el aparato en el interior del ducto circular estudiado, y extendiéndolo al máximo para buscar los puntos extremos de la circunferencia.

Para determinar la pendiente del tramo, se realiza la nivelación del terreno entre los pozos de inspección que definen el tramo estudiado. Luego se determina la distancia vertical entre las tapas de los pozos y la cota clave de la tubería. Esta última medición se realiza con la ayuda de un dispositivo en «L» conformado por varios tubos acoplados para llegar a diferentes profundidades, según las condiciones en cada pozo de inspección. La distancia entre los pozos se mide con cinta métrica.

La velocidad y la altura de la lámina de agua se midieron con un medidor de flujo marca American Sigma AV910. Este aparato utiliza una onda ultrásónica de 1 MHz, que por medio del efecto Doppler estima la velocidad promedio de flujo en una sección y la altura de la lámina de agua.

Siendo la incertidumbre un parámetro relevante para la presentación de los resultados, se utilizó el método RSS (Root-Sum-Square) propuesto por Kline y McClintock (1953) que relaciona la incertidumbre de cada una de las variables medidas en campo con el resultado final. Para esto se expresaron los coeficientes de resistencia (n y C) en función de las variables medidas en campo. Manipulando las fórmulas propuestas para velocidad en canales abiertos se obtuvieron las Ecuaciones 1 y 2, que representan el n de Manning y el C de Chézy (Bueno, 2004) para una sección circular, respectivamente.

$$n = \frac{1}{u} \cdot \left(\frac{1}{4} \cdot \left(1 - \frac{\sqrt{1 - \left(1 - \frac{2 \cdot H}{D} \right)^2} \cdot \left(1 - \frac{2 \cdot H}{D} \right)}{a \cos \left[1 - \frac{2 \cdot H}{D} \right]} \right) \cdot D \right)^{\frac{2}{3}} \cdot S^{1/2},$$

$$C = \frac{v}{\sqrt{\left[\frac{1}{4} \left(1 - \frac{2 \sqrt{1 - \left(1 - \frac{2H}{D} \right)^2} \cdot \left(1 - \frac{2H}{D} \right)}{2A \cos \left(1 - \frac{2H}{D} \right)} \right] D \cdot S \right]}}.$$

Ecuaciones 1 y 2

Previo a la toma de datos en campo, se realizaron ensayos de laboratorio para determinar la desviación estándar, s , de cada variable y su margen de error (sistémico y aleatorio) (Holman, 1999), (Coleman, 1999). Se realizó un análisis de sensibilidad para estimar el margen de error o la tolerancia (d) necesaria en el diseño experimental. Este análisis consistió en determinar qué tanto puede oscilar cada variable sin que el coeficiente de Manning considerado inicialmente (0.013) presente una variación significativa ($>\pm 0.001$). Se concluyó que para la campañas de medición en campo eran necesarias 20 mediciones de velocidad y altura de la lámina de agua, 4 mediciones del diámetro de la tubería y 2 mediciones de la pendiente para obtener una confiabilidad de 95% como mínimo en el resultado final (Bueno, 2004).

Se realizaron pruebas en el Laboratorio de Pruebas y Ensayos de Ingeniería Civil de la Pontificia Universidad Javeriana. Se instalaron dos tramos de 3 m de tubería en concreto de 10 pg y 14 pg de diámetro nominal, con una pendiente de 2%. Los resultados de seis ensayos realizados (tres ensayos para cada tramo). Como se observa en la Tabla 2, para el tramo de diámetro nominal 10 pg se obtuvieron coeficientes de resistencia hidráulica poco variables ($n=0.0094$ a 0.0095 y $C=43$ a 44), con incertidumbres de 5%. Para el tramo de 14 pg, los resultados son más variables ($=0.0089$ a 0.0093 y $C=45$ a 47), con incertidumbres entre 4% y 8%.

Tabla 2
Resultados del cálculo de los coeficientes de rugosidad en laboratorio

D (m)	Variables promedio		Coeficientes (incertidumbre %)		
	V (m/s)	H (m)	S (%)	n	C
0.253	0.879	0.030	2.24	0.0095 (5%)	43 (5%)
	0.929	0.031	2.24	0.0094 (5%)	44 (5%)
	0.925	0.031	2.24	0.0094 (5%)	44 (5%)
0.348	0.991	0.031	2.22	0.0089 (8%)	47 (7%)
	0.980	0.033	2.22	0.0093 (5%)	45 (4%)
	0.986	0.033	2.22	0.0092 (5%)	46 (4%)

Dentro del diseño experimental se consideraron todas las posibles combinaciones de tramos a ser monitoreados en campo a partir de una amplia gama de características. El tipo de alcantarillado que se propuso estudiar comprende tubería sanitaria, pluvial y combinada, en PVC, GRP y concreto. Las pendientes se clasificaron en baja ($<0,5\%$), media (0,5 a 2%) y alta ($>2\%$) y el diámetro en bajo ($<0,5\text{ m}$), medio (0,5 m a 1,2 m) y alto ($>1,2\text{ m}$). Al determinar todas las posibles combinaciones de las características propuestas para cada tramo de alcantarillado se obtuvieron 81 combinaciones. De estos tramos sólo fue posible monitorear 30.

Para sintetizar y analizar la totalidad de los resultados obtenidos durante la investigación, se introdujeron factores con diferentes niveles que describen las diferentes situaciones estudiadas. Los factores presentados en la Tabla 3, se relacionaron con los coeficientes de resistencia de Manning y de Chézy para realizar un análisis de varianza (anova). El objetivo de dicho análisis es encontrar la influencia de la variación de los factores presentados en la variabilidad del coeficiente de resistencia y su respectiva incertidumbre, a través de un modelo lineal generalizado. Para este análisis se utilizó el programa estadístico R (R Development Core Team, 2006), pues se trata de un sistema no balanceado (diferente número de mediciones repetidas por factor).

RESULTADOS

La Tabla 4 presenta un resumen de los resultados obtenidos durante la investigación. Sin embargo, una generalización a partir de estos resultados parece difícil de hacer. En efecto, es necesario tener en cuenta que el número de tramos estudiados es diferente para cada material (7 para PVC, 3 para GRP y 20 para concreto) y que para la mayor parte de los tramos estudiados, aquellos con mayor tiempo de funcionamiento son los de concreto, seguidos por los de PVC; esta es una posible causa al origen de la diferencia de los cuartiles obtenidos para cada material, tanto para los valores de los coeficientes como para sus incertidumbres. Es posible que los elevados niveles de incertidumbre obtenidos en algunos casos sean generados por condiciones de funcionamiento como obstrucciones o variaciones rápidas de flujo, de manera que no se cumpla con la suposición inicial de flujo uniforme que se utilizó para calcular los coeficientes de resistencia hidráulica (Ecuaciones 1 y 2).

Del análisis de varianza se observa que el único factor estadísticamente irrelevante sobre la variabilidad del coeficiente de resistencia n es el «tipo» ($p>5\%$). Sin embargo, el mismo análisis realizado para el coeficiente de resistencia C muestra que todos los factores considerados son estadísticamente signifi-

Tabla 3
Factores considerados y número de tramos monitoreados por nivel

Factor	Nivel	Nº tramos (% sobre el total)	Explicación
Localización	Laboratorio	2 (7)	Medición realizada en laboratorio (condiciones controladas de operación) o en campo (condiciones reales de operación)
	Campo	28 (93)	
Material	Pvc	7 (23)	Material del tramo estudiado
	GRP	3 (10)	
	Concreto	20 (67)	
Estado	Libre	19 (63)	Estado del tramo estudiado, según inspección visual
	Obstruido	11 (37)	
Edad	Menor	15 (50)	Tiempo de servicio del tramo estudiado menor a 7 años
	Mayor	15 (50)	
Tipo	Pluvial	13 (43)	Tipo de alcantarillado al que pertenece el tramo estudiado
	Sanitario	17 (57)	
Régimen	Subcrítico	14 (47)	Importancia de la velocidad de flujo medida (subrítico: número de froude <1; supercrítico: número de froude >1)
	Supercrítico	16 (53)	
Altura	Baja	23 (77)	Importancia de la altura de agua medida según la relación altura/diámetro (h/d) (baja: h/d <0.25; media: 0.25<h/d <0.60; alta: h/d >0.60)
	Media	7 (23)	
	Alta	-	
Diámetro	Bajo	18 (60)	Diámetro del tramo estudiado <0.5 m
	Medio	3 (10)	Diámetro del tramo estudiado entre 0.5 y 1.2 m
	Alto	9 (30)	Diámetro del tramo estudiado >1.2 m
Pendiente	Baja	13 (43)	Pendiente del tramo estudiado <0.5%
	Media	10 (33)	Pendiente del tramo estudiado entre 0.5 y 2%
	Alta	7 (23)	Pendiente del tramo estudiado >2%

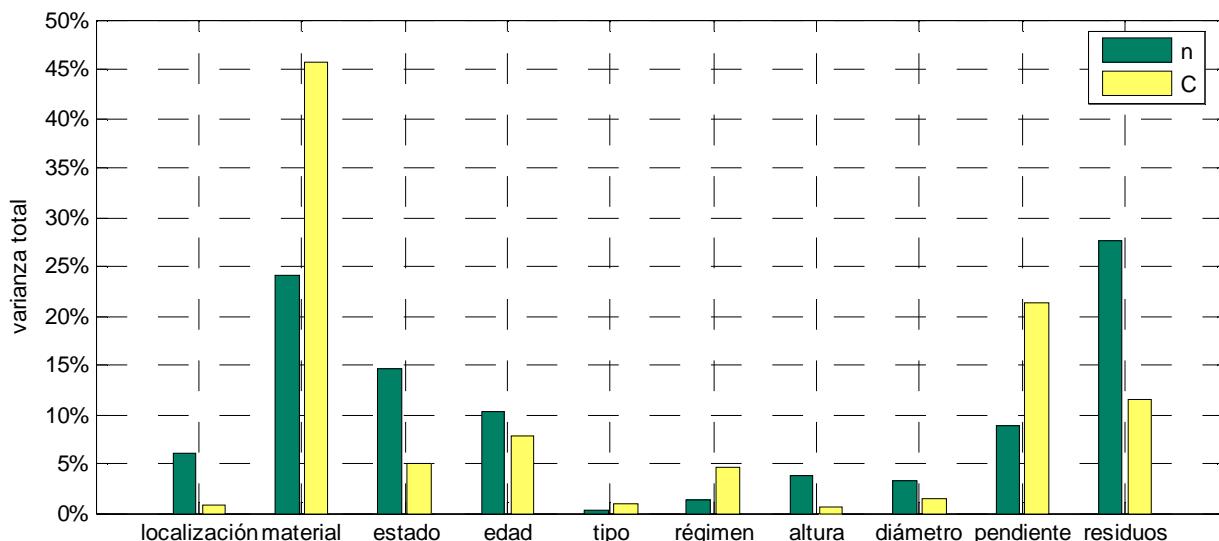
cativos ($p<0.1\%$). La Gráfica 1 muestra la importancia de la variabilidad de cada factor en la variación del coeficiente de resistencia. En ella se observa que el factor de mayor incidencia sobre la variación del coeficiente de resistencia es el material (24% de la varianza total para n y 46% de la varianza total para C). Sin embargo, a parte del factor «material», otros factores son bastante relevantes en la variación del coeficiente de resistencia: para el coeficiente de resistencia n , se destacan los factores «estado» (15% de la varianza total) y «edad» (10% de la varianza total); para el coeficiente de resistencia C , se destaca

el factor «pendiente» (21% de la varianza total). El análisis de varianza sobre las incertidumbres de los coeficientes de resistencia hidráulica determinó que únicamente los factores «material», «régimen», «diámetro» y «pendiente» son estadísticamente significativos ($p<0.5\%$). De éstos, los que más influyen sobre la variación de la incertidumbre de los coeficientes de resistencia son el factor «material» (20% y 24% para la incertidumbre de n y de C respectivamente) y el factor «diámetro» (20% y 19% para la incertidumbre de n y de C respectivamente). La Gráfica 2 muestra, a manera de ejemplo,

Tabla 4
Resumen de los resultados obtenidos de los coeficientes de resistencia hidráulicos

Coeficientes de incertidumbres	Estadísticos	PVC (N=7)	GRP (N=3)	Concreto (N=20)
<i>n</i> (incertidumbre %)	Mín	0.0053 (3%)	0.0058 (3%)	0.0075 (3%)
	1 ^{er} Cuartil	0.0061 (5%)	0.0080 (4%)	0.0093 (5%)
	Media	0.0078 (5%)	0.0101 (4%)	0.0152 (6%)
	Promedio	0.0090 (7%)	0.0095 (4%)	0.0198 (8%)
	3 ^{er} Cuartil	0.0101 (8%)	0.0114 (4%)	0.0229 (8%)
	Máx	0.0172 (11%)	0.0127 (4%)	0.0707 (27%)
<i>C</i> (incertidumbre %)	Mín	31 (3%)	42 (3%)	7 (3%)
	1 ^{er} Cuartil	44 (4%)	47 (3%)	21 (4%)
	Media	61 (4%)	51 (3%)	29 (5%)
	Promedio	60 (5%)	61 (4%)	33 (8%)
	3 ^{er} Cuartil	74 (7%)	70 (4%)	45 (8%)
	Máx	90 (10%)	90 (4%)	70 (26%)

N: Número de observaciones

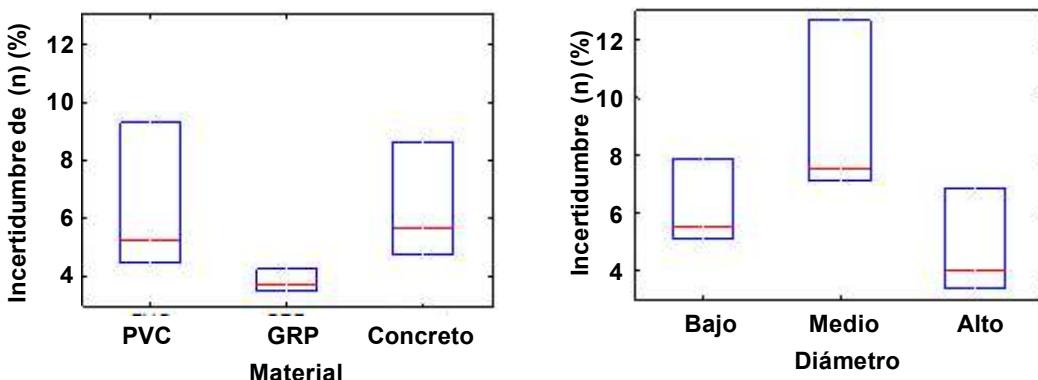


Gráfica 1. Resultados sintéticos del análisis de varianza realizado para las mediciones de los coeficientes de resistencia de Manning (*n*) y de Chézy (*C*)

cómo varía la incertidumbre de *n* con respecto al cambio de material y de diámetro. Se puede apreciar que el material GRP es en promedio el material asociado con la menor incertidumbre sobre el coeficiente *n*, así como que la incertidumbre tiene tendencia a disminuir a medida que el diámetro del ducto aumenta. Estas tendencias, similares para el coeficiente de resistencia *C*, son susceptibles de ser ve-

rificadas en estudios posteriores, porque se basan en un número de observaciones limitado y diferente para cada nivel del factor considerado.

La Tabla 5 presenta una comparación entre los resultados de laboratorio y de campo. Se puede observar una resistencia hidráulica más elevada para las mediciones realizadas en campo con respecto a



Gráfica 2. Variación de la incertidumbre de n con respecto al cambio de material (izquierda) y de diámetro (derecha). Representación de los cuartiles inferior, medio (en rojo) y superior calculados para todos los resultados obtenidos

Tabla 5
Comparación de los resultados obtenidos en laboratorio y en campo

Coeficientes e incertidumbres promedio	Concreto 10"			Concreto 14"		
	Lab	Campo	Dif	Lab	Campo	Dif
\bar{n} (incertidumbre %)	0,0094 (5)	0,0167 (5)	78%	0,0091 (6)	0,0286 (5)	214%
\bar{C} (incertidumbre %)	44 (5)	27 (5)	-39%	46 (5)	16 (5)	-65%

las realizadas en laboratorio. En efecto, un análisis de varianza muestra que la influencia del factor «localización» es significativa ($p<0.5\%$), es decir que el resultado del coeficiente de resistencia hidráulica es estadísticamente diferente (con una confiabilidad de 95%) si las mediciones se hacen en campo o en laboratorio. Este resultado es recurrente para los coeficientes de resistencia n y C , y para las tuberías de concreto de 10 y 14 pg de diámetro nominal. Sin embargo, el análisis muestra que el factor «localización» es estadísticamente no significativo ($p>10\%$) en la variación de la incertidumbre de los coeficientes de resistencia hidráulica.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Se implementó una metodología para estimar coeficientes de resistencia hidráulica en alcantarillados existentes, así como una metodología para la determinación de las incertidumbres asociadas. Los resultados obtenidos al aplicar dichas metodologías a tramos de alcantarillado en funcionamiento sugieren una alta variabilidad de los cuantiles de los coefi-

cientes de resistencia hidráulica estimados y sus incertidumbres en función del material del tramo estudiado. Esto fue comprobado utilizando un análisis de varianza, a partir del cual se obtiene que el factor «material» es el factor que más incidencia tiene en la variación del coeficiente de resistencia (24% de la varianza total para n y 46% de la varianza total para C). Sin embargo, esta conclusión es válida únicamente para la muestra estudiada y parece difícilmente extrapolable por su naturaleza (número de tramos estudiados y tiempos de funcionamiento diferentes para cada material). Por otra parte, el cálculo de incertidumbre puede estar afectado por condiciones de funcionamiento como obstrucciones o variaciones rápidas de flujo, de manera que no se cumpla con la suposición inicial de flujo uniforme que se utilizó para calcular los coeficientes de resistencia hidráulica.

El estudio muestra que factores relacionados con la gestión de los tramos («estado» y «edad») tienen una marcada influencia en los coeficientes de resistencia hidráulica. Lo anterior sugiere que un mante-

nimiento deficiente puede modificar de manera importante las condiciones hidráulicas de diseño.

Los hallazgos presentados ponen en evidencia la diferencia entre los valores promedios de los coeficientes de resistencia medidos en campo y en laboratorio para un mismo tipo de ducto (material y diámetro) y sugieren la necesidad de estudiar y ampliar la metodología propuesta para condiciones de flujo no uniforme y revisar el diseño experimental de manera a realizar un número más importante de mediciones en campo para situaciones más variables (e.g., mayor número de mediciones en tuberías de PVC y GRP, mediciones en un sólo tramo sometido a diferentes solicitudes hidráulicas).

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo se realizó gracias al apoyo de la Pontificia Universidad Javeriana, TITAN, Manufacturas de Cemento S.A. y la Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá ESP. Los autores agradecen especialmente la colaboración y asistencia de Fabián Agudelo, Shirley Mejía y Santiago Villanueva.

LITERATURA CITADA

Bueno, D., Duran, S. 2004. *Determinación de coeficientes de resistencia asociados a algunos tramos de alcantarillado existentes en la ciudad de Bogotá D.C.* Trabajo de grado. Bogotá: Pontificia Universidad Javeriana.

- Chaudhry, M. H.** 1993. *Open-channel flow.* Englewood Cliffs: Prentice-Hall, Inc.
- Chow, V.T.** 1994. *Hidráulica de canales abiertos.* Bogotá: McGraw-Hill Interamericana SA.
- Coleman, H. W.,** Steel, W, G, Jr. 1999. *Experimentation and uncertainty analysis for engineers.* New York: Wiley.
- Development Core Team R.** 2006. *A language and environment for statistical computing.* Vienna: R Foundation for Statistical Computing. Disponible en: <http://www.R-project.org>
- Dutrue, F.,** Grisot, D. 1998. *Hydraulic performances of drainage pipes.* Technical publication PT 119. Epernon: Centre d'Etudes et de Recherches de l'Industrie du Béton (CERIB).
- Fisher, C.** Is slime the great hydraulic equalizer? *PVC Pipe News.* 2004; 27(2): 11-4.
- French, R.H.** 1988. *Hidráulica de canales abiertos.* Bogotá: McGraw-Hill.
- Gerard, R.,** Bouthillier, P. H., Besmehn, J. 1986. *Field measurements of sanitary sewer flow resistance coefficients.* Water Resources Engineering Report N° 86-2. Alberta: Department of Civil Engineering, University of Alberta.
- Holman, J. P.** 1977. *Métodos experimentales para ingenieros.* México, DF: McGraw-Hill.
- Kline, S. J.,** McClintock, F. A. Describing uncertainties in single-sample experiments. *Mech Eng.* 1953; 67: 299-337.
- Straub, L. G.,** Bowers, C. E., Pilch, M. 1960. *Resistance to flow in two types of concrete pipe.* Technical Paper N° 22. Series B. Minneapolis: St. Anthony Falls Hydraulic Laboratory, University of Minnesota.
- Tullis, J.P.** 1986. *Friction factor tests on concrete pipe.* Virginia: Utah State University.