

EVALUACIÓN DEL TRANSPORTE DE SEDIMENTOS EN ALCANTARILLADOS POR MEDIO DE LA HERRAMIENTA EPR-MOGA-XL

Carlos Montes¹, Luigi Berardi², Zoran Kapelan³ y Juan Saldarriaga⁴

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

² Professor, Technical University of Bari, Via E. Orabona 4, Bari, Italia.

³ Professor, Centre for Water Systems, University of Exeter, North Park Road, Exeter, EX4 4QJ, UK.

⁴ Profesor Titular, Centro de Investigaciones en Acueductos y Alcantarillados (CIACUA), Universidad de los Andes, Bogotá, Colombia.

E-mail: cd.montes1256@uniandes.edu.co, luigi.berardi@poliba.it, Z.Kapelan@exeter.ac.uk, jsaldarr@uniandes.edu.co

Introducción

El transporte de sedimentos es uno de los parámetros más importantes en el diseño de sistemas de alcantarillado. Existen distintas ecuaciones que definen una velocidad mínima de autolimpieza para garantizar un transporte óptimo de partículas bajo diferentes condiciones (e.g. carga de lecho, carga en suspensión, sedimentos cohesivos, entre otros). El transporte de sedimentos en estas ecuaciones es función de varios parámetros como el diámetro medio de las partículas, la concentración volumétrica de sedimentos y el peso específico de los mismos, los cuales usualmente no es posible medirlos en campo.

El propósito de este trabajo es determinar un nuevo conjunto de ecuaciones de autolimpieza empleando la herramienta EPR-MOGA-XL, la cual relaciona parámetros hidráulicos con la capacidad de transporte de sedimentos bajo condiciones de carga de lecho. Los resultados obtenidos muestran que los parámetros hidráulicos que mejor correlacionan la velocidad experimental de autolimpieza son el caudal y el radio hidráulico de la tubería. Estas nuevas ecuaciones son validadas con otros datos experimentales encontrados en la literatura y el ajuste de cada una se calcula mediante tres medidas de desempeño: Error Cuadrático Medio (SSE), Coeficiente de Determinación (CoD) y el Error Promedio (AVG). Se obtuvieron altos niveles de ajuste, lo cual indica una alta correlación entre los datos observados (experimentales) y los modelados con las nuevas ecuaciones.

Evolutionary Polynomial Regression (EPR)

La técnica de Regresión Polinomial Evolutiva (EPR, por sus siglas en inglés) es una técnica de minería de datos desarrollada por Giustolisi & Savic (2006), la cual consiste en una regresión evolutiva no lineal por pasos que permite una exploración global de los modelos definidos por el usuario y proporciona ecuaciones simbólicas para ellos (Giustolisi, Berardi & Walski, 2011). Esta técnica tiene dos pasos principales: 1) los exponentes de las ecuaciones simbólicas los determina mediante el uso de un algoritmo genético MOGA (Multi-Objective Genetic Algorithm) y 2) los parámetros de las ecuaciones simbólicas se calculan como un problema de mínimos cuadrados. En esta búsqueda de la mejor estructura del modelo, se asume una estructura pseudo-polinomial generalizada (Berardi et al., 2008). El modelo considera una estructura general (Giustolisi & Savic, 2006):

$$Y = a_0 + \sum_{j=1}^m a_j \cdot (X_1)^{ES(j,1)} \cdot \dots \cdot (X_k)^{ES(j,k)} \cdot f((X_1)^{ES(j,k+1)} \cdot \dots \cdot (X_k)^{ES(j,2k)}) \quad [1]$$

donde X_k es la k -ésima variable explicativa; ES la matriz de exponentes desconocidos; f y g funciones seleccionadas por el usuario; a_j los coeficientes polinomiales desconocidos y m el número de términos del polinomio.

Datos recolectados

En este trabajo se emplean los 221 datos recolectados por Ghani (1993) para la obtención de las ecuaciones de autolimpieza en tuberías de alcantarillado (191 datos de entrenamiento y 30 de validación). Igualmente, se hace uso de los datos experimentales de Vongvisessomjai et al. (2010), Ota (1999) y May et al. (1989) para validar los resultados y desempeño de las ecuaciones obtenidas con EPR. El resumen de los datos se presenta en la Tabla 1, donde d es el diámetro medio de las partículas; y/D la relación de llenado de la tubería; v_l la velocidad de autolimpieza y C_v la concentración de sedimentos.

Tabla 1.- Datos empleados en el análisis.

Fuente	No. Datos	Condiciones
Ghani (1993)	221	$0.46 < d < 8.3$ mm
		$0.153 < y/D < 0.772$
		$0.395 < v_l < 1.115$ m/s
		$0.759 < C_v < 1450$ ppm
Vongvisessomjai et al. (2010)	36	$0.2 < d < 0.43$ mm
		$0.2 < y/D < 0.6$
		$0.237 < v_l < 0.626$ m/s
Ota (1999)	36	$4 < C_v < 90$ ppm
		$0.714 < d < 5.612$ mm
		$0.39 < y/D < 0.84$
		$0.39 < v_l < 0.736$ m/s
May et al. (1989)	38	$4.2 < C_v < 59.4$ ppm
		$d = 0.72$ mm
		$0.38 < y/D < 0.75$
		$0.495 < v_l < 1.498$ m/s
		$0.31 < C_v < 251.22$ ppm

Resultados

El modelo identifica los parámetros que mejor representan la velocidad de autolimpieza de los datos empleados para el entrenamiento. Las ecuaciones obtenidas son las siguientes:

$$\frac{v_l}{\sqrt{gd_{50}(SG-1)}} = 3.35 \frac{C_v^{0.2}}{\left(\frac{d_{50}}{R}\right)^{0.6}} \quad [2]$$

$$\frac{v_l}{\sqrt{gd_{50}(SG-1)}} = 0.83309 \frac{F_r^{0.7} \left(\frac{d_{50}}{A}\right)^{0.1}}{\left(\frac{d_{50}}{R}\right)^{0.6}} \quad [3]$$

$$\frac{v_l}{\sqrt{gd_{50}(SG-1)}} = 3.3414 \frac{S_o^{0.4} R^{0.4}}{d_{50}^{0.6}} \quad [4]$$

$$\frac{v_l}{\sqrt{gd_{50}(SG-1)}} = 8.137 \frac{S_o^{0.3} C_v^{0.1} R^{0.6}}{d_{50}^{0.6}} \quad [5]$$

$$v_l = 2.2968 \frac{Q^{0.3} F_r^{0.7} R^{0.1}}{T^{0.4}} \quad [6]$$

$$v = 3.9607 \frac{Q^{0.3} F_r^{0.7} R^{0.6}}{A^{0.3} T^{0.2}} \quad [7]$$

En las ecuaciones anteriores, F_r es el número de Froude; P el perímetro mojado, T el ancho mojado; Q el caudal y R el radio hidráulico. El grado de ajuste de cada ecuación se mide con base en el SSE (Ecuación 8), CoD (Ecuación 9) y AVG (Ecuación 10).

$$SSE = \frac{\sum_{t=1}^N (y_M(t) - \hat{y}(t|F))^2}{N} \quad [8]$$

$$CoD = \frac{\sum_{t=1}^N (y_M(t) - y_{mean})^2 - \sum_{t=1}^N (y_M(t) - \hat{y}(t|F))^2}{\sum_{t=1}^N (y_M(t) - y_{mean})^2} \quad [9]$$

$$AVG = 100 \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{|y_M(t) - \hat{y}(t|F)|}{y_M(t)} \quad [10]$$

Al aplicar las ecuaciones anteriores a los conjuntos de datos presentados en la Tabla 1 se logran altos grados de ajuste entre los datos observados y calculados, especialmente para las ecuaciones 4, 6 y 7.

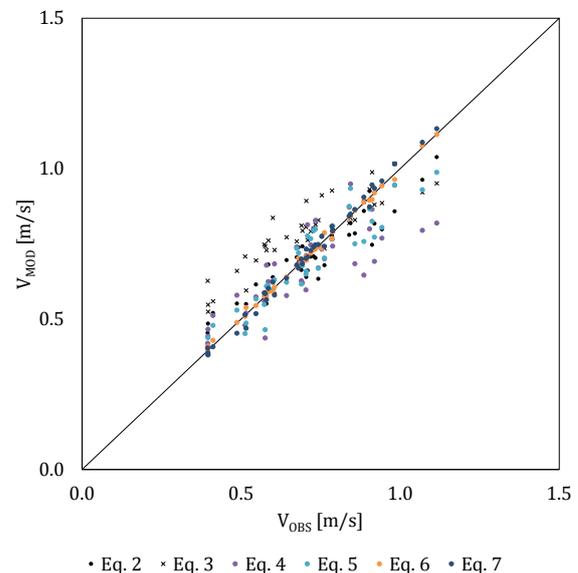
Tabla 2.- Medidas de desempeño para distintos set de datos.

Set de datos	Ecuación	SSE	CoD	AVG
Ghani (1993)	[2]	0.0045	0.77	7.74
	[3]	0.0151	0.11	14.10
	[4]	0.0120	0.76	12.33
	[5]	0.0048	0.81	8.19
	[6]	0.0001	1.00	1.05
	[7]	0.0003	0.99	2.32
Vongvisessomjai et al. (2010)	[2]	0.0007	0.92	5.70
	[3]	0.0192	0.16	26.63
	[4]	0.1011	0.91	45.51
	[5]	0.0100	0.62	19.92
	[6]	0.0003	0.97	4.46
	[7]	0.0003	0.97	4.91
Ota (1999)	[2]	0.0030	0.84	9.21
	[3]	0.0286	0.15	22.82
	[4]	0.0098	0.90	13.11
	[5]	0.0014	0.91	5.18
	[6]	0.0000	1.00	0.04
	[7]	0.0001	0.99	1.30
May et al. (1989)	[2]	0.0583	0.50	30.10
	[3]	0.0303	-0.39	15.78
	[4]	0.4473	0.60	38.25
	[5]	0.1231	-0.10	28.02
	[6]	0.0000	1.00	0.12
	[7]	0.0006	0.99	2.19

Como se puede observar en la Figura 1 y en la Tabla 2, las ecuaciones calculadas mediante la herramienta EPR-MOGA-XL producen buenos ajustes para distintos conjuntos de datos.

Lo anterior es importante, puesto que dichas expresiones tienen la capacidad de representar adecuadamente el transporte de sedimentos como carga de lecho en condiciones diferentes a las cuales fueron derivadas.

Figura 1.- Desempeño de las ecuaciones. Datos de Ghani (1993).



Conclusiones

Las ecuaciones obtenidas mediante la herramienta EPR-MOGA-XL tienen la capacidad de predecir el transporte de sedimentos como carga de lecho en sistemas de alcantarillado. Es importante resaltar que los parámetros hidráulicos son fundamentales para representar adecuadamente la velocidad de autolimpieza. Dado lo anterior, el caudal de diseño tiene mayor importancia que los parámetros de sedimentos (e.g. diámetro de la partícula de diseño y concentración de entrada de sedimentos).

Se recomienda la elaboración de un modelo físico que permita estudiar el transporte de partículas en rangos mayores a los presentados por Ghani (1993).

Referencias bibliográficas

- Berardi, L., Giustolisi, O., Savic, D., and Kapelan, Z. (2008).** "An Effective Multi-Objective Approach to Prioritization of Sewer Pipe Inspection." *11th International Conference on Urban Drainage, Edinburgh, Scotland, UK, 2008*, Vol. 60, No. 4, pp. 841–50.
- Ghani, A. (1993).** "Sediment Transport in Sewers." University of Newcastle Upon Tyne.
- Giustolisi, O., Berardi, L., and Walski, T. (2011).** "Some Explicit Formulations of Colebrook–White Friction Factor Considering Accuracy vs. Computational Speed." *Journal of Hydroinformatics*, Vol. 13, No. 3, pp. 401.
- Giustolisi, O., and Savic, D. (2006).** "A Symbolic Data-Driven Technique Based on Evolutionary Polynomial Regression." *Journal of Hydroinformatics*, Vol. 8, No. 3, pp. 207–22.
- Macke, E. (1982).** "About Sedimentation at Low Concentrations in Partly Filled Pipes". *Mitteilungen, Leichweiss Institut für Wasserbau der Technischen Universität Braunschweig*, Heft 71, 1-151.
- May, R., Brown, P., Hare, R., and Jones, K. (1989).** "Self-Cleansing Conditions for Sewers Carrying Sediment." Wallingford, Oxfordshire.
- Ota, J. (1999).** "Effect of Particle Size and Gradation on Sediment Transport in Storm Sewers."
- 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.