

## **Herramientas para la implementación de mantenimiento proactivo en alcantarillados urbanos utilizando confiabilidad de inundación y conceptos de entropía de información**

### **Tools for the implementation of proactive maintenance in urban sewer systems by the use of flooding reliability and entropy of information concepts**

*Santiago Sandoval\*<sup>1</sup>, Andrés Torres<sup>1</sup>, Nelson Obregón<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>Facultad de Ingeniería. Pontificia Universidad Javeriana. Carrera 7 N°. 40 - 62, Bogotá. Colombia

(Recibido el 22 de marzo de 2012. Aceptado el 6 de noviembre de 2012)

#### **Resumen**

Las bases de datos de alcantarillados urbanos existentes en ciudades de países en vía de desarrollo presentan deficiencias en los registros de las características físicas de las tuberías, lo cual limita su utilización como soporte para la implementación de herramientas de gestión de dicha infraestructura. El objetivo de este trabajo consistió en proponer y emplear en 13 subcuencas pertenecientes a la cuenca El Salitre de Bogotá, comprendiendo un área de 4515 Ha, con un total de 12842 tuberías pluviales y combinadas, árboles de decisión y entropía de información para identificar tuberías con demanda de actividades de mantenimiento en la red como limpieza, rehabilitación, reemplazo, *etc.*, a partir de confiabilidades de inundación estimadas (para 2337 tuberías con cuyas características físicas se encontraban registradas de manera precisa). El modelo clasificatorio presentó una capacidad predictiva promedio de 62 %. Las tuberías fueron clasificadas mediante 28 reglas, según los valores de confiabilidad, identificando 3383 tuberías (26 % sobre el total) con una priorización alta de mantenimiento proactivo.

----- **Palabras clave:** Gestión de alcantarillados urbanos, árboles de decisión, confiabilidad de inundación, mantenimiento proactivo, entropía de información.

---

\* Autor de correspondencia: telefax: 011 + 57 1 320 83 20, ext. 5259, correo electrónico: sandoval.s@javeriana.edu.co. (S. Sandoval)

## Abstract

Existent databases of urban sewerage networks in developing countries have shown imprecisions in data related to physical characteristics of sewer pipes. This fact limits the appropriateness of databases for being used as a support for asset management tools for sewerage. This paper is aimed at proposing the use of decision trees and information entropy for prioritizing sewer pipes by their cleaning, rehabilitation, replacement activities demand, based on 13 sub basins belonging to El Salitre basin of Bogotá, with a total area of 4515 Ha and 12842 pluvial and combined sewer pipes. The starting point was the flooding reliability estimate of 2337 sewer pipes with well specified physical characteristics. The classificatory model showed a capacity for prediction of roughly 62 %. Sewer pipes were classified by using 28 rules defined as a function of the flooding reliability. As a result, 3383 sewer pipes (26 % of the total) were found to have a high-prioritization proactive maintenance demand.

----- **Keywords:** Urban sewerage management, decision trees, flooding reliability, preventive maintenance, information entropy

## Introducción

[1] reportan herramientas de soporte para la toma de decisiones con diferentes niveles de alcance en la gestión: (i) Herramientas de análisis de desempeño, las cuales se basan en pronósticos de desempeño de la red, utilizando métodos de estadística como Cadenas de Markov [5, 16]; (ii) Herramientas de análisis de decisión [2], las cuales integran las fases de recopilación de información [26], modelación de desempeño [6, 11] y estrategias de gestión [22]; (iii) Herramientas para la gestión integral [23], las cuales involucran todas las fases de gestión, teniendo en cuenta tecnologías apropiadas, su implementación y monitoreo. Aunque el primer tipo de herramientas, en efecto, puede representar una base para la toma de decisiones objetiva e informada en gestión patrimonial, al brindar pronósticos del estado de un sistema de alcantarillado con base en estimaciones de estados anteriores (lo cual constituye una ventaja en términos de la antigüedad de las inspecciones requeridas para su implementación), éste se basa en información inexistente o escasamente reportada en las bases de datos de alcantarillados en nuestro medio (e.g. inspecciones directas, tipo de suelo, exposición a daños). En cuanto a los

modelos mencionados propuestos para niveles más avanzados de gestión (herramientas (ii) y (iii)), los cuales parecen ser más robustos, al tener en cuenta variables operativas e incluso de costos, éstos presentan las mismas desventajas que las indicadas anteriormente en cuanto a la información disponible, siendo aún más crítica la integración de bases de datos, ya que no es necesario únicamente información relacionada con la tubería (incluyendo historial de fallas) sino también datos del entorno (e.g. tipo de suelo y tipo de vía o tráfico) y datos socio-económicos (e.g. presupuesto y costos de rehabilitación).

Por otra parte, se han identificado como escasas las experiencias en cuanto a la formulación de estrategias proactivas de gestión de alcantarillados mediante indicadores de operación en la red que puedan reflejar fenómenos locales de inundación en las ciudades por un funcionamiento inadecuado de las tuberías, específicamente desde el concepto de confiabilidad de inundación. Este tipo de indicadores puede permitir la planeación de actividades proactivas de limpieza en la red, que a su vez, representan soluciones de bajo costo a los problemas de inundación en las ciudades [8].

En el ámbito internacional, diferentes autores han puesto en evidencia la relación entre el

deterioro del nivel de servicio del alcantarillado y la probabilidad de inundación de un casco urbano [3, 8, 30] desarrollaron una metodología para medir, con base en registros históricos de inundaciones, el nivel de servicio brindado por la empresa gestora del alcantarillado en una cuenca urbana en términos de protección contra el riesgo de inundación pluvial, proponiendo estrategias de gestión. Este enfoque puede en cierto sentido omitir las causas físicas particulares de cada inundación, al no incorporar en el análisis variables hidrológicas detalladas. Por otro lado, metodologías basadas en registros históricos de reportes de fallas necesitan de información generalmente inexistente en cuencas urbanas en países en vía de desarrollo [28]. Adicionalmente, la implementación de modelos matemáticos que permitan representar comportamientos altamente no-lineales (*e.g.* árboles de decisión, redes neuronales artificiales, métodos *Kernel*, *SVM*, *Machine Learning*) se ha detectado como escasa en investigaciones relacionadas con la gestión patrimonial de alcantarillados [4, 18, 31] y más aún en el contexto de la utilización de indicadores de desempeño como herramientas para la implementación de mantenimiento proactivo (*e.g.* confiabilidad de inundación).

A pesar de que, como se mostró anteriormente, en el ámbito internacional existe una diversidad de modelos como soporte para realizar mantenimiento proactivo de las redes de alcantarillado, y que a su vez, algunos de éstos utilizan específicamente indicadores de desempeño hidrológico e hidráulico [7, 27], la mayoría se basan en información completa y oportuna para ciudades (*e.g.* por medio de diferentes métodos de inspección: [15]). Debido a lo anterior, la utilización de dichos modelos en nuestro contexto resulta limitada en términos de: (i) la escasez y baja calidad de información, baja cobertura de inspecciones en la red, *etc.* y (ii) la capacidad de los modelos descritos para representar comportamientos altamente no-lineales, que permitan incorporar la variabilidad y complejidad en sistemas de drenaje urbano de ciudades en crecimiento constante con una

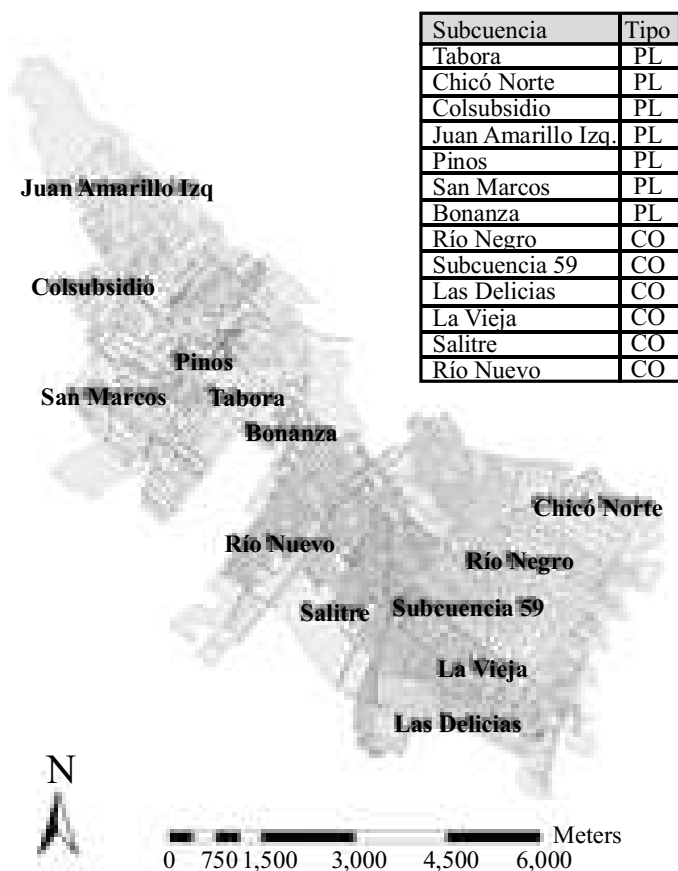
influencia directa, en muchos casos desapercibida, sobre el sistema de alcantarillado [20]. Por lo tanto es necesario continuar investigando en este tema y generar herramientas propias, adaptadas a las necesidades, calidad y cantidad de información disponible.

Los primeros acercamientos en nuestro país hacia la búsqueda de este tipo de herramientas han sido abordados acudiendo a modelos matemáticos y probabilísticos que pretenden representar qué tan confiable es el funcionamiento del sistema bajo varios enfoques [19, 29]. [28], siguiendo el lineamiento de [29], realizaron un estimativo de la confiabilidad de inundación aplicado a una zona específica de Bogotá para más de 12000 tuberías de alcantarillado pluvial y combinado, apoyándose en herramientas computacionales (*R Development Core Team*, 2011) y en métodos de generación aleatoria (simulación de Montecarlo). Este trabajo tuvo como limitante el no poder reportar resultados de confiabilidad de inundación para la mayor parte de las tuberías estudiadas. Lo anterior, debido a que algunos valores asociados a las características físicas de un conjunto de tuberías (diámetros, materiales, pendientes), necesarios para estimar los valores de confiabilidad de inundación (concepto definido en la siguiente sección de este documento), no se reportaban en las bases de datos. Esta particularidad de las bases de datos existentes es un factor limitante a la hora de utilizar la confiabilidad de inundación como indicador de gestión de la red de alcantarillado. Teniendo en cuenta lo anterior, surge como iniciativa para la realización de este trabajo, el proponer y emplear en una zona de estudio, una herramienta que permita inferir estimativos de confiabilidad de inundación en tuberías donde no es posible realizar su cálculo directo, debido a potenciales deficiencias en la información disponible sobre las características de la red de alcantarillado en un sistema de drenaje urbano (13 subcuencas pertenecientes a la cuenca El Salitre de Bogotá, comprendiendo un área de 4515 Ha, con un total de 12842 tuberías pluviales y combinadas).

## Materiales y métodos

La zona de estudio seleccionada para este trabajo (también seleccionada en los trabajos [28] comprende 13 subcuencas pertenecientes a la cuenca El Salitre en la ciudad de Bogotá: Bonanza, Chicó Norte, Colsubsidio, Juan Amarillo Izquierda, Las Delicias, La Vieja, Pinos, Río Negro, Río Nuevo, Salitre, San Marcos, Subcuenca 59 y Tabora. Esta zona abarca una superficie de 4515 Ha, y trabaja con 12842 tuberías pluviales y combinadas. La información utilizada para el cálculo de la confiabilidad de inundación fue proporcionada por la Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá (EAAB),

incluyendo la ubicación georreferenciada (utilizando el Software *ARCGIS*) de cada tubería, con sus características como diámetros, materiales, longitud, pendientes, cotas claves iniciales y finales, cotas rasantes iniciales y finales entre otras, además de las curvas IDF para cada sector de Bogotá. Cabe recalcar que dicha información en muchos casos (cerca del 80 % del total de la zona de estudio) se reportaba como inexistente “NA” (dato no reportado) para varias características de las tuberías, principal motivación del presente trabajo. A continuación se muestra un mapa de la zona de estudio con la descripción de cada Subcuenca (pluvial o combinada):



**Figura 1** Zona de estudio con la descripción de cada subcuenca (tipo de alcantarillado pluvial (PL) o combinado (CO)). Fuente: [28]

La confiabilidad de inundación (*CI*) puede ser definida como la probabilidad de excedencia de la capacidad hidráulica de cada tubería sometida

a una carga hidrológica de diseño. Al comparar los dos caudales en cada uno de los tramos, se puede obtener el margen de seguridad (*MS*) de

una tubería como la resta entre la capacidad hidráulica y la carga hidrológica. En ese sentido puede plantearse *CI* como la probabilidad de que *MS* sea superior a cero [25].

Para el presente estudio se contó con los resultados de confiabilidad de inundación obtenidos por [28], para periodos de retorno de 3, 5 y 10 años, resultados que reportaban un estimativo numérico de confiabilidad para 2337 tuberías pertenecientes a la zona de estudio; para las 10505 tuberías restantes (valor de confiabilidad etiquetado como NA) no fue posible calcular de manera directa la confiabilidad de inundación [28] (figura 2 a).

Puede apreciarse que hacia la parte occidental son muy pocas las tuberías donde se logró estimar la confiabilidad de inundación, pero en las Subcuencas de Las Delicias, La Vieja, Subcuenca 59, Chicó Norte y Río Negro en su parte alta existe una cantidad de tuberías importante en donde sí fue posible ser definido este valor (aproximadamente 1800 tuberías).

Con el propósito de estimar la confiabilidad de inundación en elementos de la red con información topológica inexistente, se utilizaron las diferentes características de cada una de las tuberías tanto físicas como hidrológicas, así como su respectivo valor de confiabilidad como variable de salida del sistema (Tabla 1).

**Tabla 1** Variables de estudio para la confiabilidad de inundación

| <b>Variables de entrada</b>                              |                                  | <b>Variable de Salida</b>   |
|----------------------------------------------------------|----------------------------------|-----------------------------|
| Tipo: combinado (CO) o pluvial (PL)                      | Longitud (m)                     | Confiabilidad de inundación |
| Pendiente tubería (%)                                    | Cota rasante inicial (msnm)      |                             |
| Profundidad a clave inicial (m)                          | Profundidad a clave final (m)    |                             |
| Densidad de tuberías en la Subcuenca (m/m <sup>2</sup> ) | Fecha de Instalación (años)      |                             |
| Área propia de drenaje (m <sup>2</sup> )                 | Intensidad lluvia** (mm/h)       |                             |
| Cota clave Inicial (msnm)                                | Cota clave final (msnm)          |                             |
| Cota rasante final (msnm)                                | Pendiente terreno (%)            |                             |
| Diámetro (m)                                             | Área Subcuenca (m <sup>2</sup> ) |                             |
| Coefficiente de Rugosidad                                | Número de daños (#)              |                             |

\*La variable "Densidad de tuberías en la Subcuenca" se calculó como la longitud de tuberías de la red por m<sup>2</sup>.

\*\*La intensidad de la lluvia fue calculada tomando una duración típica de 15 minutos.

Con el fin de explotar los resultados de dichas tuberías donde sí pudo ser calculada la confiabilidad de inundación de manera directa, se implementó un modelo basado en árboles de decisión [21] utilizando la librería J48 [17] de *The WEKA Data Mining Software* [14]. La iniciativa de utilizar árboles de decisión en el presente estudio radica en la flexibilidad proporcionada por esta herramienta en términos de detectar reglas ocultas en bases de datos, aplicables para

características tanto numéricas como cualitativas de cada tubería de alcantarillado.

Otro concepto relevante en el presente estudio fue el estadístico *AMI* (*Average Mutual Information*), el cual corresponde a la información mutua promedio  $I(X;Y)$  entre dos variables aleatorias  $X$  y  $Y$ , el cual se define como la cantidad de información promedio que se obtendría de  $X$  a partir de conocer el valor de  $Y$ . Matemáticamente, puede expresarse como [10]: