

**XXV CONGRESO LATINOAMERICANO DE HIDRÁULICA
SAN JOSÉ, COSTA RICA, 9 AL 12 DE SETIEMBRE DE 2012**

CALIBRACIÓN DE MODELOS DE SISTEMAS DE DRENAJE URBANO

Juan G. Saldarriaga, María A. Escovar, Diego A. Páez

*Centro de Investigación en Acueductos y Alcantarillados – Universidad de los Andes - Bogotá, Colombia
<jsaldarr@uniandes.edu.co>, <ma-escov@uniandes.edu.co>, <da.paez27@uniandes.edu.co>*

RESUMEN:

El problema de calibración de un modelo consiste en ajustar el valor de los parámetros de éste a fin de que sus resultados se aproximen, de manera aceptable, a los resultados medidos en el prototipo. En el caso de modelos de redes de alcantarillado se recomienda su uso para el posterior diseño de ampliaciones y/o operación de los elementos de control del sistema. En esta investigación se formula una metodología para realizar la calibración hidráulica de redes de alcantarillado bajo flujo no permanente con el uso de Algoritmos Genéticos (AG) y EPASWMM, un motor de simulación hidráulica. Se realizó la calibración hidráulica en redes de diferente topología, topografía y propiedades hidráulicas, encontrando resultados de alta calidad. El coeficiente de rugosidad relativa se seleccionó como el parámetro a calibrar, evaluando la efectividad de los resultados con el ajuste de los limnigramas medidos en el prototipo y simulados con el modelo calibrado. Se concluye que la calibración hidráulica de redes de alcantarillado con AG es incluso más sencilla que el proceso de calibración de redes de distribución de agua potable (RDAP).

ABSTRACT: (*1^{era} hoja*)

The calibration problem consists in adjusting the value of each model's parameter looking for a good approximation between the measured results and the simulated ones. In the case of sewer networks models the calibration is recommended before starting a study on design of new expansions or about the operation of the control elements on the system. This research sets out a methodology to calibrate hydraulic sewer models under unsteady flow using Genetic Algorithms and EPASWMM, a hydraulic simulation software. Hydraulic calibration was performed on networks with different topology, topography and hydraulic properties, achieving high-quality results. The relative roughness coefficient was the calibration parameter selected, and the limnigrams measured and simulated were the results selected to evaluate the effectiveness of the procedure. It was concluded that the hydraulic calibration of sewerage networks with Genetic Algorithms proves to be even simpler than the calibration of water distribution networks.

PALABRAS CLAVES: Calibración, Redes de Drenaje Urbano, Algoritmos Genéticos.

INTRODUCCIÓN

Dentro de los componentes más importantes de los asentamientos urbanos modernos se encuentran los sistemas de drenaje urbano. Estos sistemas son los encargados de recolectar aguas residuales y lluvias, transportar dichas aguas a puntos de tratamiento donde no representen ningún problema o incomodidad a la población y realizar el tratamiento de las aguas de manera que sus condiciones sean aceptables para que puedan ser finalmente descargadas en cuerpos receptores. Los modelos de estos sistemas tienen como función principal representar algún comportamiento específico de la realidad, a fin de facilitar tareas que involucran la toma de decisiones. Orozco (2005) resume dichas tareas en:

- a) Diseño de planes maestros de alcantarillados municipales.
- b) Diseño de nuevos sistemas semejantes o adicionales al existente.
- c) Operación diaria de la red (parte hidráulica del sistema).
- d) Ejecución de programas o algoritmos de control en tiempo real.
- e) Toma de decisiones de necesidades de rehabilitación de la red.
- f) Evaluación del estado de la red.
- g) Ejecución de proyectos investigativos de calidad de agua, entre otros.

Todos estos posibles usos del modelo requieren que los resultados que éste entregue sean aceptablemente cercanos a los presentados en el prototipo (realidad). Para lograr este objetivo se hace necesario realizar la calibración del modelo. Este proceso ajusta algunos de los parámetros para que los resultados sean más parecidos a los medidos en el prototipo. Si bien existen diferentes planteamientos matemáticos del mencionado problema, la formulación implícita en la que se plantea como un problema de optimización (Savic et al., 2009), ha sido comúnmente utilizada dada la alta disponibilidad de metodologías de optimización. En el planteamiento matemático, la función objetivo seleccionada usualmente relaciona los datos medidos con los datos calculados, de manera que se busca minimizar la diferencia entre estos, tomando como variables de decisión los valores de los parámetros calibrables y teniendo como restricciones las ecuaciones que rigen la hidráulica del sistema así como posibles rangos para el valor de cada parámetro calibrable.

En el presente artículo se presentan los resultados de una investigación donde se desarrolló una metodología de calibración de redes de alcantarillado, las cuales son parte fundamental de los sistemas de drenaje urbano, utilizando Algoritmos Genéticos (AG) para solucionar el problema de optimización descrito anteriormente. Para ello se procedió a realizar un análisis de sensibilidad de la respuesta hidráulica del sistema a modificaciones en algunas características de las tuberías. Después se hizo uso del programa GANetXL (Centre for Water Systems, 2006) para estimar los valores de parámetros calibrables encontrados en el primer paso, determinando en el proceso la manera recomendada de utilizar los AG.

METODOLOGÍA

El proceso de calibración se lleva a cabo mediante la variación de unos parámetros desconocidos hasta llegar a una representación lo más cercana posible a la realidad (prototipo). La selección de la metodología a usar depende del uso final del modelo y del grado de certidumbre objetivo. Sin embargo, usualmente los pasos seguidos para realizar la calibración son (Orozco 2005):

1. Identificar la estructura adecuada que describa el sistema de interés.
2. Identificar los parámetros asociados con el modelo.
3. Analizar el comportamiento matemático del modelo.
4. Evaluar la calidad del modelo.
5. Analizar y estimar la incertidumbre en los resultados del modelo.

6. Evaluar escenarios de operación. Aplicar a casos de estudio.

Para seleccionar el modelo más adecuado para la representación de la realidad, se pueden escoger modelos determinísticos, estocásticos o conceptuales (Mays, 2001, Orozco, 2005). En el caso de sistemas de drenaje urbano, los modelos determinísticos son los más comúnmente utilizados facilitando así el proceso de calibración. De esta manera se deben seleccionar los parámetros calibrables, que corresponden a parámetros del modelo seleccionado que se consideren desconocidos en el prototipo y que resulten convenientes a la hora de ajustar los resultados del modelo con los resultados medidos.

Dentro de los parámetros que definen una tubería de una red de alcantarillado, se encuentran: el diámetro, la rugosidad y la pendiente. Para determinar cuáles de estos son suficientemente trascendentales para la hidráulica de la red y en qué medida, se requiere hacer un análisis de sensibilidad que evalúe los cambios en la respuesta hidráulica producidos por cambios en alguno de estos parámetros. Una vez seleccionados los parámetros a calibrar, se procede a ejecutar el programa de calibración que hace uso de AG para estimar los parámetros calibrables definidos a partir de dicho análisis. En este procedimiento se definen grupos de tuberías de manera que el número de parámetros calibrables en una red dada, será:

$$N_{PC} = N_G \cdot N_{PCPG} \quad [1]$$

donde, N_{PC} es el número de parámetros calibrables del modelo, N_G es el número de grupos de tuberías en que se divide la red y N_{PCPG} es el número de parámetros calibrables por grupo, el cuál debe corresponder con el número de parámetros calibrables de una tubería.

Una vez se conocen los parámetros a calibrar, se debe seleccionar la configuración de la metodología de solución con AG. Es decir que se deben definir: a) El tamaño de la población (número de redes en cada generación de los AG) , b) El número de generaciones, c) El método de selección, d) El método de combinación, e) El método de mutación y f) La función objetivo. Para ello se recomienda revisar diferentes estudios y realizar diferentes ejecuciones cambiando dichos valores para determinar una configuración recomendable. Finalmente se ejecuta el procedimiento y se comparan los resultados tanto para los mismos datos utilizados en el proceso de calibración, como para otros resultados que permitirán cuantificar de mejor manera el error final del modelo calibrado.

Análisis de sensibilidad

Teniendo en cuenta que las variables de decisión a la hora de hacer el análisis de sensibilidad para un parámetro dado incluyen, el número de tuberías a modificar, y la magnitud de dicha modificación, se realizaron pruebas que incluyeron los siguientes valores:

- Diámetro: Modificaciones en una, dos, tres y todas las tuberías de la red. Magnitudes de variación entre -30% y +30% del diámetro del modelo, o variaciones correspondientes a asignar a la tubería el siguiente (o el anterior) diámetro disponible en el mercado.
- Rugosidad: Modificaciones en una, dos, tres y todas las tuberías de la red. Magnitudes de variación entre -60% y +60% de la rugosidad del modelo.
- Pendiente: Modificaciones en todas las tuberías de la red. Magnitudes de variación de -50%, -80% y +100%.

Los modelos utilizados para realizar el análisis de sensibilidad fueron modelos hidráulicos utilizados y/o desarrollados en el Centro de Investigaciones en Acueductos y Alcantarillados (CIACUA) de la Universidad de Los Andes, Bogotá, Colombia. Estos modelos incluyen la red de Girardot-Acacias que tiene un área cercana a las 96 ha y le presta el servicio de recolección de aguas residuales y lluvias a 11,000 habitantes. La subcuenca no tiene canales abiertos ni aliviaderos

de agua lluvia y cuenta con una sola descarga, que conduce el agua captada hacia el río Bogotá. En la Figura 1 se muestra el esquema de la Red Acacias.

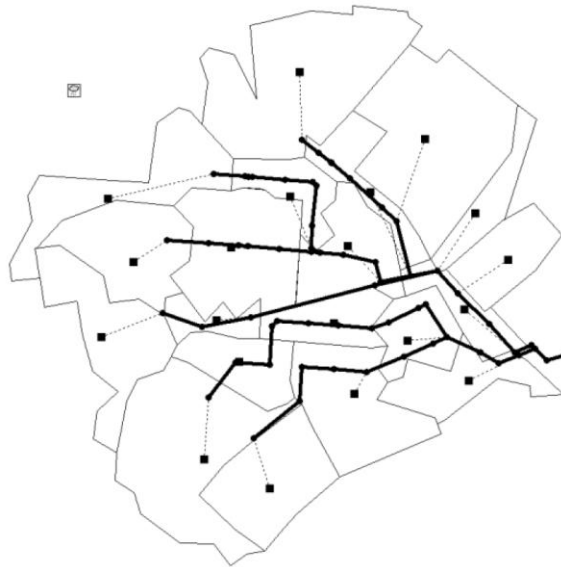


Figura 1.- Esquema de la red Girardot-Acacias.

También se dispuso de la red Medellín-Prado, ubicada en el departamento de Antioquia-Colombia compuesta por 50 nudos de captación y 43 subcuencas (vera Figura 2). Para el análisis de sensibilidad se hizo uso de otros dos modelos no descritos en este documento.

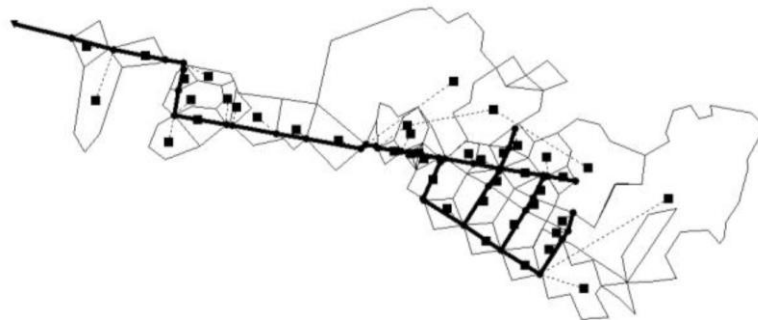


Figura 2.- Esquema de la red Medellín-Prado.

Calibración con AG

Para realizar la calibración de las redes de alcantarillado utilizando AG, se hizo uso del programa GANetXL (Centre for Water Systems, 2006) desarrollado por la Universidad de Exeter – UK (Savic, 2010). Este programa es un complemento de Excel que permite resolver problemas de optimización mediante el uso de AG de forma rápida y sencilla. Adicionalmente, se decidió utilizar EPASWMM (U.S. EPA, 2010) como programa de simulación hidráulica, dada su facilidad de acceso y la posibilidad de acoplar su motor de cálculo a programas como MS-EXCEL con VBA para aplicaciones.

De esta manera se acopló GANetXL con EPASWMM a través de EXCEL, permitiendo una automatización del procedimiento de optimización. Este procedimiento consiste tomar cada individuo (una posible configuración de valores de los parámetros calibrables) de la generación actual, mediante el uso de las funciones disponibles en GANetXL de manera que se modifica el archivo de entrada del modelo en EPASWMM a fin de que pueda ejecutarse la hidráulica del individuo generado y se pueda proceder a evaluar la función objetivo, y así almacenarla en GANetXL para que genere las correspondientes mutaciones de la siguiente generación.

Haciendo uso del programa desarrollado, se realizaron diferentes procedimientos de calibración bajo diferentes escenarios buscando recomendaciones para futuras calibraciones. Este procedimiento se realizó para las dos redes de alcantarillado descritas anteriormente (Girardot-Acacias y Medellín-Prado).

RESULTADOS

Los resultados de la aplicación de la metodología se muestran en dos secciones; primero se presenta el análisis de sensibilidad del comportamiento hidráulico de redes de alcantarillado con cambios en las propiedades físicas de las tuberías y con base en los resultados del análisis de las redes estudiadas, se propone la metodología de calibración de las redes de alcantarillado y se presentan algunos resultados alcanzados en los casos de estudio.

Análisis de sensibilidad

Los resultados de la sensibilidad de la respuesta hidráulica de los sistemas de drenaje urbano se resumen en la Tabla 1. De la sensibilidad respecto a la rugosidad, se encontró que los hidrogramas no presentan una sensibilidad suficiente para permitir el proceso de calibración mediante mediciones de caudal. Sin embargo los limnigramas presentan una sensibilidad considerable que se acentúa en los máximos y mínimos locales de dichas series de tiempo, indicando así que la rugosidad puede ser un buen parámetro calibrable del sistema (ver Figura 3).

Tabla 1.- Resultados cualitativos del análisis de sensibilidad.

	Rugosidad “n” [s/m ^{1/3}]	Diámetro [m]	Pendiente [m/m]
Hidrogramas	Baja	Muy baja	Media
Limnigramas	Alta	Muy baja	Alta

Con relación a los resultados referentes al diámetro, se observó que ni los hidrogramas ni los limnigramas son significativamente sensibles a variaciones del diámetro siempre que se asegure que la tubería no se presuriza en ningún instante de tiempo (ver Figura 3). En el momento en que se presuriza la tubería, el modelo presenta una sensibilidad de los hidrogramas bastante alta durante el periodo de presurización así como una sensibilidad media en los limnigramas en los periodos de tiempo siguientes a la presurización de la tubería. Sin embargo, del fenómeno de sobrecarga de tuberías de alcantarillado no se tiene suficiente información para suponer que dichos resultados corresponden acertadamente con la realidad, y por lo tanto el diámetro no constituye un buen parámetro calibrable de los sistemas de alcantarillado.

Finalmente, se encontró que variaciones en la pendiente, pueden generar algunas variaciones considerables en los hidrogramas así como variaciones importantes en los limnigramas. Sin embargo el resultado más importante respecto a la pendiente, fue la conclusión de que la sensibilidad de la respuesta hidráulica aumenta para flujos con números de Froude inferiores a 0.7 (flujos subcríticos), mientras que para flujos con números de Froude mayores a 1.0 (flujos críticos y supercríticos) la sensibilidad decrece.

En la Figura 3 se muestra un ejemplo de los resultados encontrados en el análisis de sensibilidad para modificaciones en el diámetro y en la rugosidad. En dicha figura, la notación seleccionada asigna a cada escenario una combinación de tres caracteres (A, B, C) donde A corresponde con la modificación hecha a la pendiente, B, con la modificación hecha al diámetro y C, con la modificación hecha a la rugosidad. El valor de A, B y C es entonces: 1 si se dejó el valor original del parámetro, 2 si se aumentó en un cierto porcentaje y 3 si se aminoró. A partir de los resultados mostrados en dicha figura, y en otras similares no mostradas en este documento, es claro que la rugosidad de la tubería genera cambios en la respuesta hidráulica más considerables que el diámetro y por lo tanto es más recomendable como parámetro calibrable (si bien la modificación

relativa en el parámetro de rugosidad fue mayor que la modificación relativa en el diámetro, se considera más probable una mala estimación a priori en el valor de la rugosidad de una tubería que una mala estimación a priori en el valor del diámetro de la misma; y similarmente, se espera que el error en dicha estimación de la rugosidad sea mayor que el error en la estimación del diámetro).

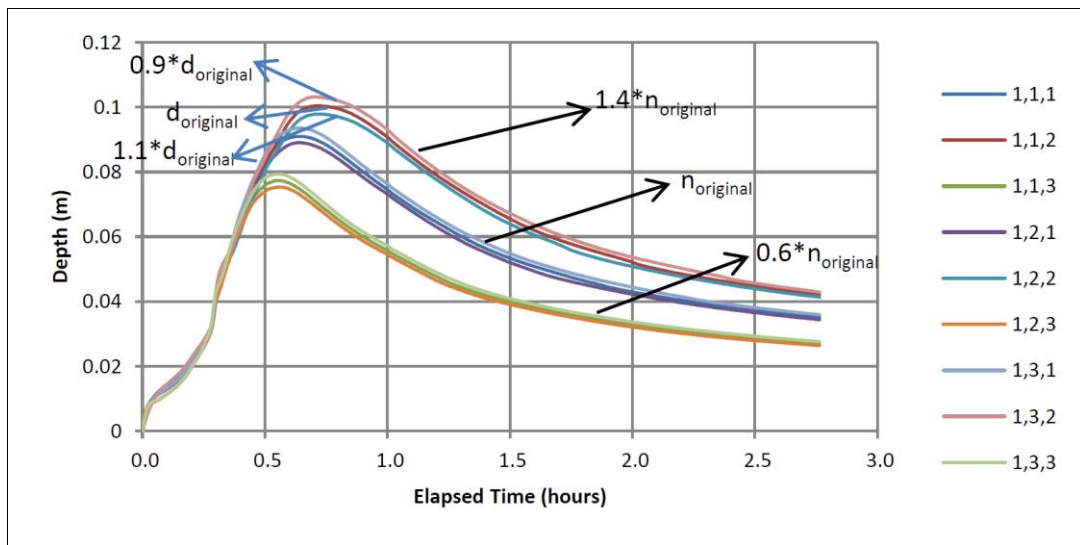


Figura 3.- Ejemplo de los resultados obtenidos en el análisis de sensibilidad.

Por otro lado, el análisis de sensibilidad permitió identificar que las variaciones en pocas tuberías (una, dos o tres) sólo generan cambios en la respuesta hidráulica de nodos relativamente cercanos a dichas tuberías. Esto indica que la calibración de sistemas de alcantarillado debe agrupar tuberías para que el ajuste de los parámetros calibrables realizado en el procedimiento, genere variaciones considerables en la respuesta hidráulica, y de esta manera se ajusten los resultados del modelo con las mediciones hechas en el prototipo.

Del análisis de sensibilidad se encontró, además, que la medición de los limnigramas es considerablemente más eficiente que la medición de los hidrogramas, dado que los niveles de la lámina de agua son mucho más sensibles a modificaciones en el diámetro, la rugosidad y/o la pendiente (como se puede ver en la Tabla 1).

Calibración con AG

De acuerdo con los resultados del Análisis de Sensibilidad, se definió como parámetro calibrable, la rugosidad únicamente, teniendo en cuenta que cambios importantes en la pendiente son menos probables en un sistema de alcantarillado, y que modificaciones en el diámetro, no generan cambios importantes en los hidrogramas o limnigramas de la red. Además se definió como respuesta hidráulica a comparar los limnigramas en los nodos, teniendo en cuenta que los hidrogramas no presentan una sensibilidad suficiente. Finalmente, se decidió agrupar las tuberías de acuerdo con su diámetro, para tener en cuenta que la respuesta hidráulica sólo varía significativamente cuando varias tuberías son modificadas.

Utilizando la anterior información se encontró que la configuración del método de AG que optimiza el uso del tiempo y que presenta resultados aceptables para el proceso de calibración es de 50 individuos y 100 generaciones, obtenido mediante un procedimiento de ejecuciones del algoritmo para diferentes redes y con diferentes valores de dichas variables.

Para las ejecuciones iniciales del procedimiento de calibración, se tomaron los siguientes valores iniciales de las demás variables del procedimiento de AG: a) Método de selección: Torneo, b) Método de combinación: Uniforme, c) Método de mutación: Simple por gen y d) Función objetivo (F.O.): Error cuadrático medio de la serie de tiempo de un punto seleccionado para ello.

El algoritmo fue implementado en un total de 5 redes de alcantarillado, dos de las cuales son las redes reales descritas anteriormente (Red Girardot-Acacias y Red Medellín-Prado), otras dos

redes son basadas en redes reales, pero modificadas a fin de tener características hidráulicas diferentes a las redes ya analizadas (Red Medellín-Prado Muy Pendiente y Red Medellín-Prado Plano) y finalmente una red ficticia (Sistema colector).

La Tabla 2 muestra un ejemplo de los resultados alcanzados con el anterior procedimiento para la red Girardot-Acacias. Se debe notar que cada fila de la tabla corresponde a un modelo calibrado diferente. Ello debido a que esta metodología permite calcular diferentes configuraciones de parámetros (una para cada punto de medición que es seleccionado para evaluar la función objetivo), y por lo tanto se tiene una matriz de errores alcanzados. Como ventaja de la metodología se tiene que ésta permite estimar intervalos de confianza para cada parámetro calibrable, dado que se dispone de tantos valores de cada uno, como puntos de medición hayan sido utilizados en la función objetivo.

Tabla 2.- Error Cuadrático Medio (ECM) entre las series de tiempo de nivel medidas y simuladas para cada modelo generado después de la calibración de la red Girardot-Acacias utilizando diferente F.O.

Punto de evaluación de la F.O.	ECM – Nivel (mm)					Punto de vertimiento (outfall o salida)
	T17	T30	T32	T73	T174	
T17	4.17	7.75	4.25	5.40	4.47	20.08
T30	17.25	4.28	18.85	13.22	11.86	17.32
T32	39.29	36.69	6.07	11.37	28.09	18.65
T73	32.40	60.58	23.77	6.17	47.70	3.33
T174	31.95	36.04	12.87	5.84	3.92	6.53
Punto de vertimiento (outfall o salida)	37.29	34.79	5.77	10.74	26.63	17.64

Los resultados de la metodología con los anteriores valores de configuración de los AG y las anteriores redes, presentaron ajustes bastante buenos para la mayoría de los limnigramas del nudo seleccionado para evaluar la función objetivo (valores en la diagonal resaltada de la Tabla 2), pero con errores significativos en otros nudos de medición (e.g. para el caso en donde la F.O. fue evaluada con el nudo T73 de la red Girardot-Acacias, el error cuadrático medio en la serie del nudo T30 fue un orden de magnitud mayor que el del nudo T73). Así, se consideró conveniente, ajustar la función objetivo, para que incluyera todas las mediciones en todos los nudos de medición en un único valor. Para ello se definió la nueva función objetivo como:

$$F. O. = \sum_{n \in \text{Puntos de medición}} \left[\frac{\left[\sum_{t \in ST_n} [\hat{y}_{(n,t)} - y_{Medido(n,t)}]^2 \right]}{|ST_n|} \right]^{0.5} / NPM \quad [2]$$

donde, $\hat{y}_{(n,t)}$ es la estimación del nivel del flujo en el punto n en el tiempo t hecha con la ejecución del modelo, $y_{Medido(n,t)}$ es la medición hecha en el prototipo del nivel del flujo en el punto n en el tiempo t , ST_n es la serie de tiempo de medición de la profundidad en el punto n , $|ST_n|$ es la cardinalidad de dicha serie, es decir el número de instantes incluidos en la serie de tiempo, y NPM es el número de puntos de medición con que se dispone. Así la nueva función objetivo es el promedio del error cuadrático medio de la serie de tiempo de cada punto de medición, y ésta logra incluir todas las diferencias entre lo medido y lo simulado.

En la Figura 4 se muestran los resultados alcanzados utilizando la F.O. de la Ecuación 2 para la red Girardot-Acacias con los mismos puntos de medición descritos en la Tabla 2 y la Tabla 3. Los resultados numéricos para este caso de estudio pueden ser comparados observando la Tabla 2 con la función objetivo de un único nudo y la Tabla 3 con la función objetivo que promedia los ECM de las series de los puntos de medición. Al realizar la comparación se nota una reducción en

el máximo ECM de las series, indicando así que la nueva F.O. genera resultados que se ajustan mejor a todos los puntos de medición pero sacrificando la posibilidad de generar varios modelos en los cuales comparar los valores finales de los parámetros calibrables.

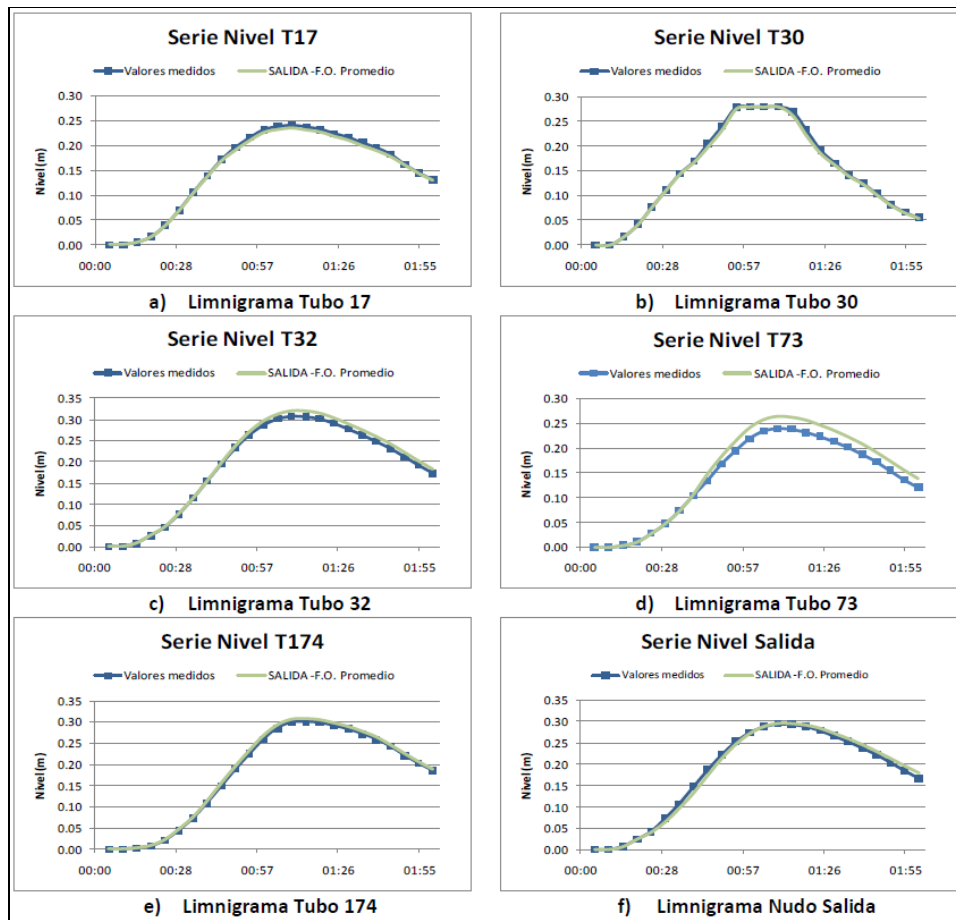


Figura 4.- Ejemplo de los resultados obtenidos en el proceso de calibración con la F.O. de la Ecuación 2.

Tabla 3.- Error Cuadrático Medio (ECM) entre las series de tiempo de nivel medidas y simuladas para el modelo generado después de la calibración de la red Girardot-Acacias utilizando la F.O. de la Ecuación 2.

F.O.	ECM – Nivel (mm)					Punto de vertimiento (outfall o salida)
	T17	T30	T32	T73	T174	
Ecuación [2]	4.18	3.70	8.22	16.56	5.08	4.35

Es importante anotar que, dado que la calibración no se hizo con base en mediciones en el prototipo, sino en un modelo de la red con rugosidades afectadas ($M_{prototipo}$), es posible comparar las rugosidades encontradas por el proceso de calibración con las del modelo $M_{prototipo}$ a fin de encontrar el error real en el que se está incurriendo al tomar ese resultado de la calibración como resultado final. Como resultado de dicha comparación se encontró que los resultados de la calibración con la F.O. de la Ecuación 2 tuvieron, para la red Girardot-Acacias, un error máximo en el valor de la rugosidad (n de Gauckler-Manning) de 0.0027, lo que en su caso representa un error relativo de 16% respecto a la rugosidad de $M_{prototipo}$. Si bien dicho valor puede parecer un poco alto, el error relativo promedio para todas las tuberías fue inferior a 12%, lo cual se considera aceptable para este tipo de modelos.

Los resultados finales del proceso de calibración para todas las redes analizadas, con la F.O. de la Ecuación 2, se muestran en la Tabla 4. Al analizar los resultados se notan los pequeños errores alcanzados para las redes basadas en la geometría de Medellín-Prado. Ello puede deberse precisamente a la geometría de la red, que en el caso de Medellín-Prado es considerablemente más lineal que en Girardot-Acacias, (y que Sistema Colector), y por lo tanto ajustes en tubos aguas arriba modifican la hidráulica de casi toda la red, y no sólo de una pequeña porción de ella como en el caso de una red muy ramificada.

Tabla 4.- Error Cuadrático Medio (ECM) entre las series de tiempo de nivel medidas y simuladas para ellos modelos generados después de la calibración de cada red utilizando la F.O. de la Ecuación 2.

Red	ECM – Nivel (mm)					
	Punto de medición 1	Punto de medición 2	Punto de medición 3	Punto de medición 4	Punto de medición 5	Punto de vertimiento (outfall o salida)
Girardot-Acacias	4.18	3.70	8.22	16.56	5.08	4.35
Medellín-Prado (Muy pendiente)	0.41	0.14	0.29	0.15	0.04	0.11
Medellín-Prado (Pendiente)	0.06	0.40	0.01	0.03	0.02	0.58
Medellín-Prado (Plano)	0.18	0.77	0.55	0.69	0.53	0.27
Sistema Colector	5.72	0.63	0.11	2.82	0.15	5.85

Finalmente se realizó un análisis del efecto de la ubicación de los puntos de medición en los resultados finales del proceso de calibración (problema comúnmente conocido como *sampling design*) y se llegó a la conclusión de que la ubicación de los puntos de medición no afecta considerablemente los resultados del proceso de calibración, aunque para representar la hidráulica de toda la red de manera ajustada sí se recomienda una distribución espacialmente homogénea de los puntos de medición.

COLCUSIONES Y RECOMENDACIONES

En la presente investigación, se formuló y validó una metodología útil para la calibración hidráulica de redes de alcantarillado, haciendo uso de la optimización con técnicas metaheurísticas como lo son los AG. Este objetivo se alcanzó mediante el análisis del comportamiento hidráulico de las redes de alcantarillado y sus cambios en la respuesta hidráulica a cambios en las propiedades físicas de las redes.

También se logró desarrollar una herramienta sencilla y fácil de usar, que permite realizar la calibración hidráulica de redes de alcantarillado, independientemente de sus características topológicas, topográficas e hidráulicas. Esta herramienta hace uso del software EPASWMM en conjunto con GANetXL (de la Universidad de Exeter) todo vinculado en un libro de EXCEL.

A partir de los resultados del análisis de sensibilidad, se concluye que el parámetro más importante en la calibración hidráulica de las redes de alcantarillado es la rugosidad de las tuberías. La rugosidad, en este estudio analizada como el valor de n de Gauckler-Manning, tiene un mayor efecto en la respuesta hidráulica de la red, con un mayor efecto en las variaciones en el pico de nivel alcanzado dentro de las tuberías. La variación de diámetros se espera que sea más importante en la calibración de parámetros hidrológicos de la red, como el coeficiente de escorrentía, por lo que también se esperan mayores variaciones en los picos y amplitudes de los hidrogramas.

Así mismo las mediciones en el prototipo deben incluir limnigramas en diferentes nudos de la red, dado que este dato de salida es el más sensible a las modificaciones que se le hagan al modelo. Con estas series se recomienda medir el error del modelo con respecto al prototipo

Por otro lado, el proceso de calibración probó ser muy sencillo y flexible. El calibrador, siguiendo su criterio, puede variar desde la función objetivo de los AG hasta el parámetro que se

desea calibrar. En esta investigación se utiliza una función objetivo que evalúa de forma simultánea los errores cuadráticos medios de los diferentes puntos de muestreo. Este tipo de funciones objetivo se recomienda para realizar la calibración, ya que en la optimización con AG se selecciona la mejor configuración de parámetros calibrables para todos los grupos de tuberías, y no la mejor para un solo grupo de tuberías.

En cuanto a la selección de la ubicación de los puntos de medición, se concluye que los puntos de muestreo se pueden ubicar prácticamente en cualquier sitio de la red, y los resultados que evalúan el desempeño de la metodología de calibración no se verán afectados significativamente. Por supuesto, es recomendable, dentro de lo posible, ubicar estos puntos de muestreo distribuidos en toda la extensión de la red para minimizar la incertidumbre de los resultados.

Finalmente, se observó que con un total de 50 generaciones y 100 individuos en el uso de los AG se alcanzan resultados de calidad muy similar a los alcanzados para un total de 100 generaciones y 200 individuos. Con esto se puede afirmar que no se requiere de un número muy alto de iteraciones para lograr resultados de muy alta calidad, lo que hace más eficiente, por tiempo y esfuerzo computacional, el proceso de la calibración hidráulica de las redes de alcantarillado.

REFERENCIAS

Centre for Water Systems – University of Exeter (2006). GANetXL Versión 1.0.4.0.

Mays, L. (2001). “Stormwater collection systems design handbook.” McGraw Hill.

Orozco, A.M. (2005). “Metodología para la calibración de modelos hidráulicos de alcantarillado”. Magíster Tesis, Universidad de los Andes.

Savic, D. A. (2010). “GANetXL: A DSS Generator for Multiobjective Optimization of Spreadsheet-Based Models.” Environmental Modelling and Software .

Savic, D. A., Kapelan, Z. & Jonkergouw, M.R. (2009) “Quo vadis water distribution model calibration?” Urban Water Journal, Vol 6. No 1, 3-22.

U.S. Environmental Protection Agency. (3 de Octubre de 2010). “Storm Water Management Model.” Recuperado el Diciembre de 2010, de Urban Watershed Management Research: <http://www.epa.gov/ednrmrl/models/swmm/>