

Modelación matemática como estrategia para el diseño de redes de drenaje pluvial urbano

Divaldo Domingos da Silva

ISPTEC-Instituto Superior Politecnico de Tecnologias e Ciências, Luanda, Angola.

Email: divaldosilva54@hotmail.com

Yoel Martínez González

Departamento de Meteorología

Instituto Superior de Tecnologías y Ciencias Aplicadas, INSTEC

Email: ymg@instec.cu

Gerardo Crescencio Jiménez Sáez.

Departamento de Ingeniería Vial, Facultad de Ingeniería Civil,

Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría (Cujae), Habana, Cuba.

Email: gjimenez@civil.cujae.edu.cu

RESUMEN

En este artículo se discute el procedimiento para la aplicación de una estrategia para el dimensionamiento de redes de drenaje pluvial urbano aplicando la modelación matemática y se discuten los resultados alcanzados. Se tomó como base el Plan Director de Saneamiento de la ciudad de Luanda, el estudio realizado por la Unidad del Gabinete Técnico de Saneamiento de Luanda (UTGSL) para la cuenca Marzal y datos provenientes de diversas fuentes y escalas, de manera que los requisitos que exigen los modelos de simulación fueran debidamente respetados y adecuados para el estudio de los procesos hidrológicos en un ambiente urbano.

Palabras clave: drenaje pluvial urbano, modelación matemática, redes de drenaje.

Mathematical modeling as a strategy for the design of urban stormwater drainage networks

ABSTRACT

This article describes the procedure for implementing a strategy for the design of urban stormwater drainage networks with use of mathematical modeling and the results achieved are discussed. It is based upon the Sanitation Director Plan of the city of Luanda, the study by the Technical Unit of Luanda Sanitation Office (UTGSL) to the Marzal basin and data from various sources and scales, so that it meets requirements required by simulation models suitable for the study of hydrological processes in an urban environment.

Keywords: urban storm drainage, mathematical modeling, network drainage.

INTRODUCCIÓN

El desarrollo de zonas urbanas debe cumplir especificaciones multidisciplinarias para su efectivo desempeño, respondiendo planificadamente a la existencia de los sistemas integrados de infraestructuras. Para la presente investigación fueron visitadas Instituciones del Gobierno de la Republica de Angola: el Gobierno de la Provincia de Luanda (GPL), la Unidad Técnica de Gestión y Saneamiento de Luanda (UTGSL), el Instituto Nacional de Meteorología de Angola (INAMET), Instituto de Geodesia y Catastro de Angola (IGCA), con el objetivo de obtener datos y se han revisado documentos relacionados con el Plan Director de la ciudad de Luanda, el Proyecto de reanimación de los barrios, documentos de la Protección Civil, Registros de Desastres y Riesgos, documentaciones relacionadas con registros de lluvias y datos de la topografía de la ciudad de Luanda.

Para afrontar las amenazas producidas por intensas lluvias y soluciones insuficientes de drenaje pluvial urbano, se necesitó revisar y acceder a herramientas técnicas computacionales, las cuales son abundantes y diversas, pero no siempre están al alcance de los países en vías de desarrollo. La selección racional de las herramientas de modelación hidráulica e hidrológica, vinculadas con Sistemas de Información Geográfica (SIG), permiten obtener resultados confiables y sostenibles para los ambientes urbanos, así como la combinación del modelo digital del terreno (MDT), los mapas de tipo y uso de suelo, los datos hidrológicos de precipitación, los datos hidráulicos de escurrimiento y algunas herramientas para la modelación matemática, articulados con una estrategia para el diseño de redes de drenaje pluvial, empleando una integración de recursos de modelación, podrá ser usada en las condiciones de los barrios de la ciudad de Luanda y obtenerse resultados racionales (Da Silva 2015).

CONCEPCIÓN DE LA ESTRATEGIA PROPUESTA

De acuerdo con las diferentes etapas de diseño y de revisión de redes de drenaje pluvial, es necesario partir de una base de datos topográfica, edafológica, hidrológica e hidráulica, que permitirá esquematizar el trazado preliminar de la red de drenaje pluvial. Como criterio para establecer la capacidad de infiltración, se supone que las subcuencas definidas en la zona donde se implemente la estrategia, tengan cierta capacidad de infiltración y obedezcan a modelos en función del contenido de humedad precedente de los suelos. Los ensayos de campo geotécnicos son recomendables con adecuado nivel de confianza, para caracterizar la permeabilidad de las diferentes unidades o formaciones geológicas presentes en el área de estudio. Cuando no se cuenta con estudios y datos de permeabilidad de los suelos basados en mediciones de campo, se recomienda su estimación como parámetros de calibración, tal como se expresa en Da Silva et al. (2014). Para la precipitación se tiene como criterio que siempre que la intensidad de la lluvia sea menor que la capacidad de infiltración, se infiltra todo lo que llueve y, en caso contrario, la diferencia se traduce en escurrimiento.

No menos importante es tener en cuenta el análisis espacial preliminar de las relaciones existentes entre el sector objeto de estudio y los sectores vecinos, para esclarecer el comportamiento de los escurrimientos entre los barrios colindantes; de dónde vienen y hacia dónde van. El MDT y la cartografía disponible permitió inferir que la cuenca en análisis no recibía aportes de cuencas vecinas, pero sí tributaba hacia ellas, facilitando el trazado preliminar de la red de drenaje pluvial la que, por razones económicas, se propuso como réplica subterránea del drenaje pluvial superficial natural.

Se recaba para el diagnóstico de la red de drenaje pluvial, la información pluviográfica y/o pluviométrica de estaciones climatológicas situadas próximas a la zona en estudio y en diferentes

formatos. En ocasiones, cuando predomina la escasez de datos, resulta necesario introducir patrones de lluvia adimensionales, aplicando analogía con cuencas vecinas o a partir de estudios reportados en la literatura especializada (Mul 2009). La selección del modelo de infiltración, partiendo del tipo y usos de suelo en la cuenca urbana analizada, permitirá caracterizar los parámetros de infiltración y diagnosticar las vías en términos de velocidad y profundidad de circulación.

De acuerdo con Sánchez (2012), los registros de escurrimiento en la cuenca en forma de hidrogramas o huellas de avenida, son incluidos en el proceso de calibración. Identificadas las vías de mayor peligro en términos de velocidad y profundidad de circulación por el proceso de diagnóstico, se procede a la etapa del diseño de la red de drenaje pluvial para cierto periodo de retorno Tr , el cual es seleccionado acorde con normativas vigentes o a partir de criterios técnico económicos, donde será efectuado el dimensionamiento de conducciones, captaciones y estructuras complementarias.

Los caudales obtenidos dependerán de las condiciones topográficas, del criterio de peligro empleado y de la tormenta de diseño asociada, así como del área a drenar. Se deben dimensionar las estructuras del sistema de drenaje pluvial de acuerdo con criterios particulares de diseño, construcción y operación. Para este nivel de la estrategia, pueden ser empleadas diferentes herramientas de diseño racional de redes de drenaje pluvial. Resultarían muy atractivas aquellas soluciones que pudieran concebirse, si el modelador dispone de herramientas que introduzcan técnicas de optimización, para obtener la red de drenaje pluvial de costo mínimo.

La verificación de la estrategia se hace a partir del tránsito de avenidas por la red de drenaje pluvial para periodos de retorno superiores al de diseño, evaluando la posible sobrecarga o no de la red, tanto en el interior de los conductos como en los nodos de la misma, con el objetivo de evaluar si las estructuras de las redes de drenaje pluvial han sido sub-diseñadas o resultan sobre-diseñadas durante la operación del sistema.

En las figuras 1 y 2, se resume el procedimiento de la estrategia (diagnóstico, diseño y verificación de una red de drenaje pluvial) y en las figuras 3 y 4, la estrategia de calibración empleada en la propuesta de diseño.

CONSIDERACIONES SOBRE LAS DIFERENTES ETAPAS PROPUESTAS

La identificación de parámetros en una cuenca urbana con escasez de datos, mediante el proceso de calibración (estrategia de calibración introducida), debe disminuir las elevadas incertidumbres en la respuesta del modelo que se ha empleado. Los esfuerzos deben enfocarse en reducir tales incertidumbres a niveles tolerables para los objetivos que se persiguen. Es razonable en una primera fase del proceso de calibración, construir un modelo conceptual con poco nivel de discretización, con el objetivo de arribar a una primera aproximación en la estimación de los parámetros de interés (Sánchez 2012).

Bajo esa premisa, se aplicó el modelo SWMM, que no cuenta con un algoritmo para la calibración automática de parámetros, empleando una evaluación sistemática y algorítmica de cierta función objetivo, implementada sobre dos modelos conceptuales previamente definidos.

En la Etapa I, se introduce un modelo conceptual simplificado representado como planos que aportan de manera concentrada a un canal de drenaje, sobre el cual se implementará un esquema de solución apoyado en las ecuaciones que rigen el módulo de cálculo hidrológico RUNOFF del SWMM para flujo uniforme. En el proceso de calibración del modelo, se debe estimar el coeficiente de rugosidad, tanto en la zona permeable como en la impermeable de la cuenca.

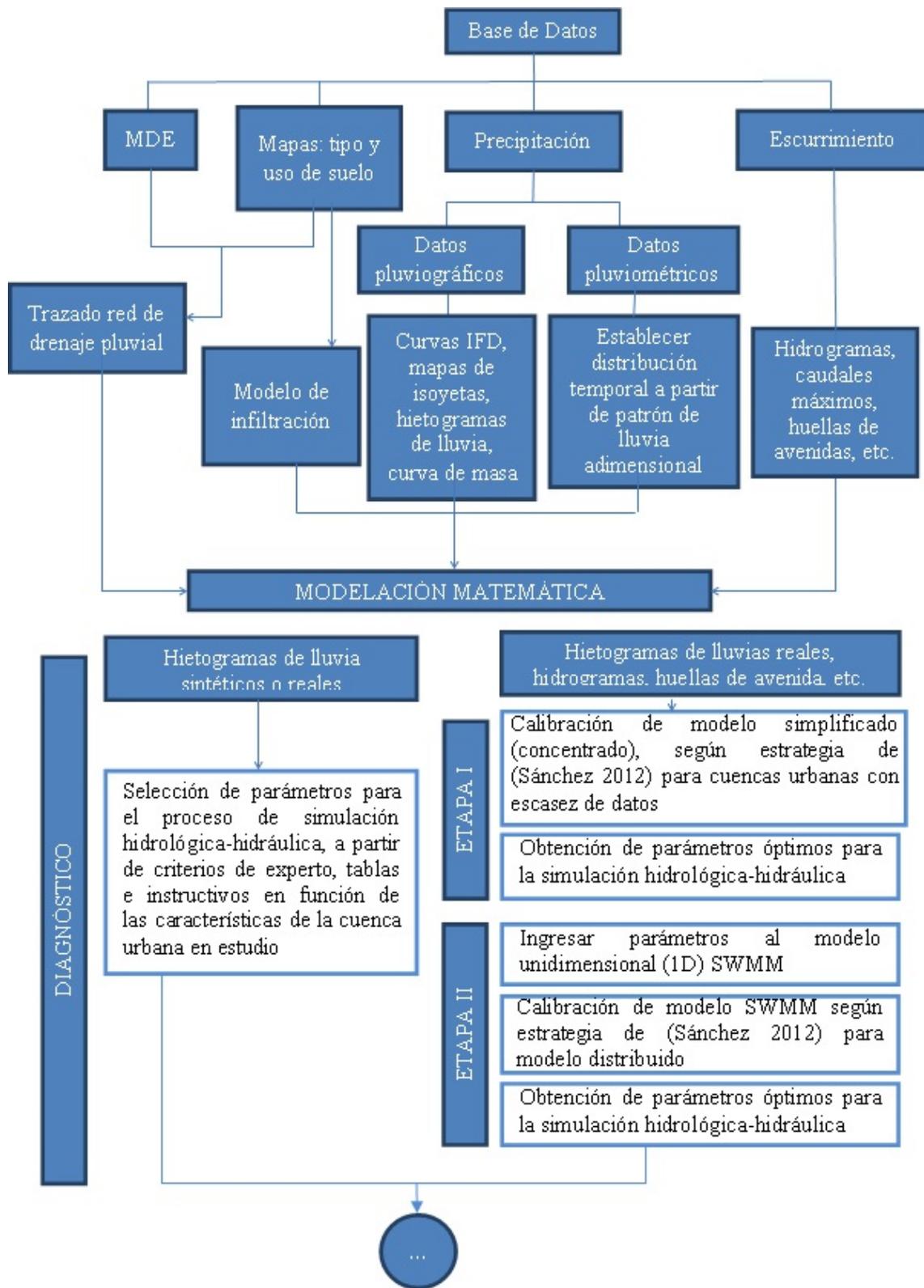


Figura 1. Procedimiento para diagnóstico, diseño y verificación en una red de drenaje pluvial (fuente: Da Silva 2015)

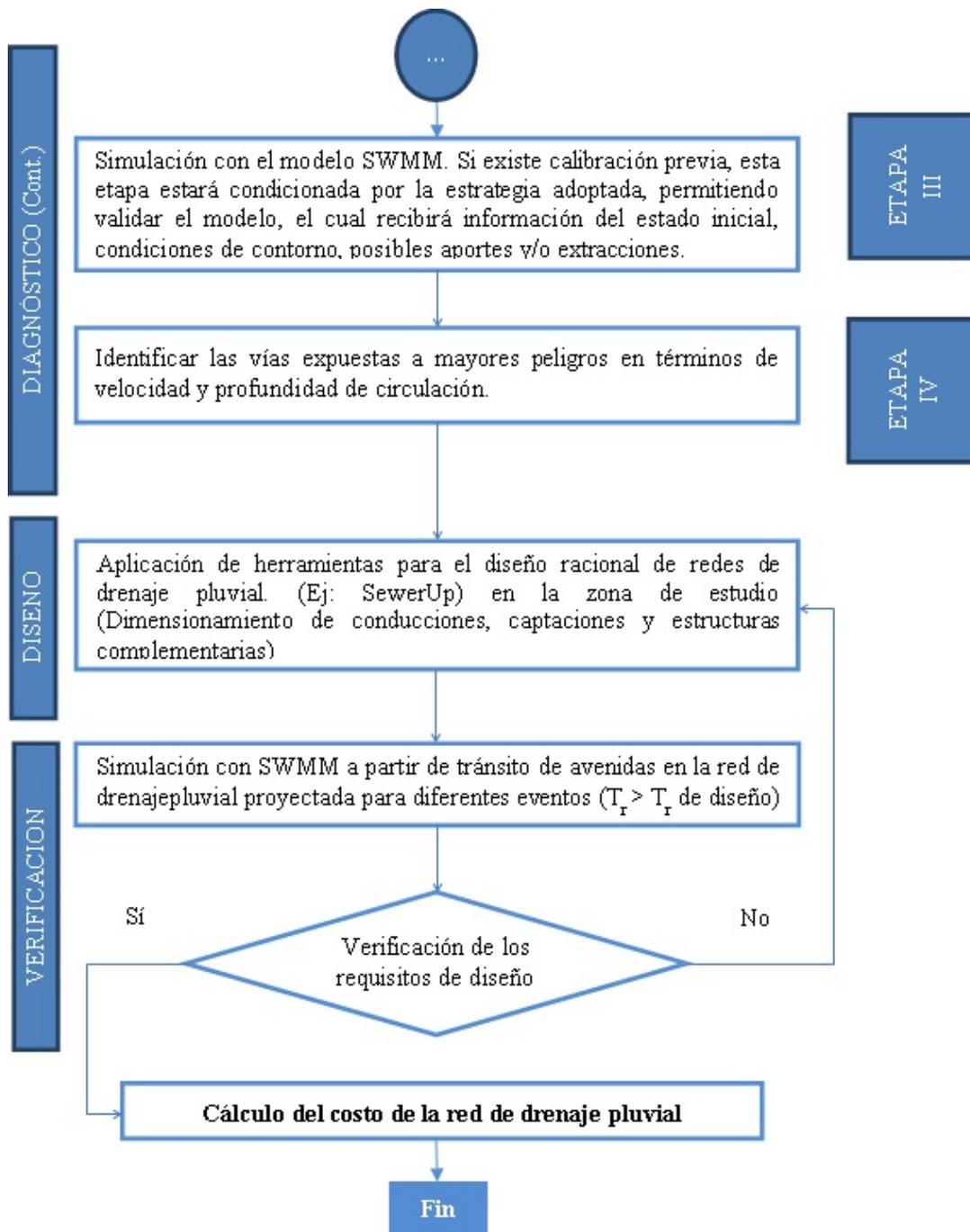


Figura 2. Procedimiento para el diagnóstico, diseño y verificación de una red de drenaje pluvial (fuente: Da Silva 2015)

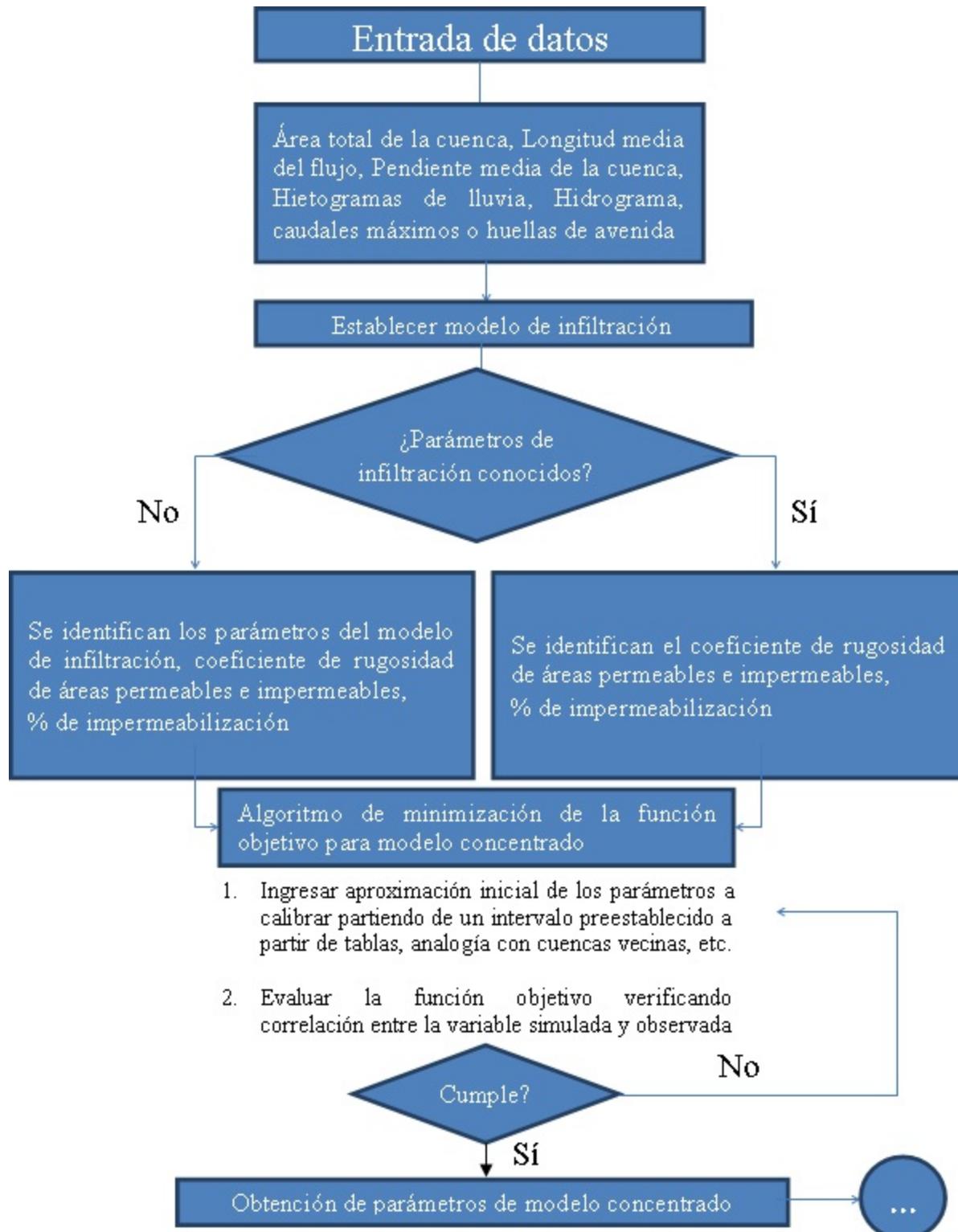


Figura 3. Estrategia de calibración empleada en el diagnóstico diseño y revisión de redes de drenaje pluvial urbano (fuente: adaptado de Sánchez 2012)

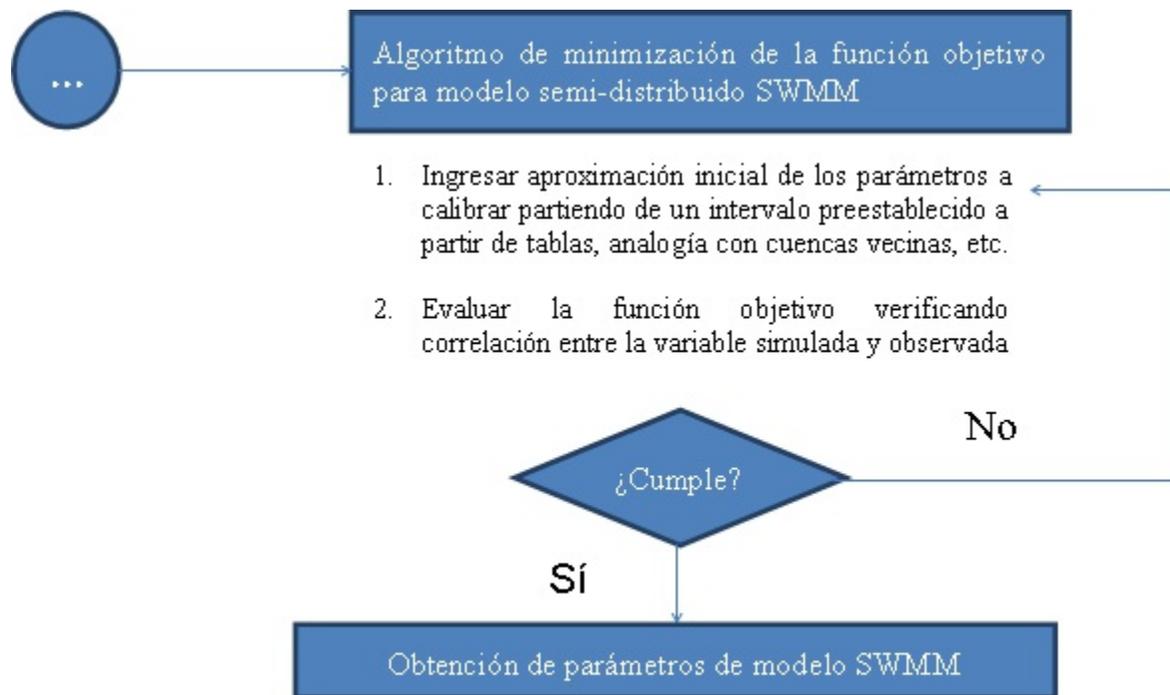


Figura 4. Estrategia de calibración empleada en el diagnóstico diseño y revisión de redes de drenaje pluvial urbano (fuente: adaptado de Sánchez 2012)

Esta etapa permite acotar y reducir el intervalo en que se mueven los parámetros hidráulicos y sirve como punto de partida para el ajuste del modelo conceptual semi-distribuido (Etapa II), de ser necesario, y en función de la correlación, se deben ir haciendo modificaciones adecuadas, hasta alcanzar el ajuste deseado, que consecuentemente es el objetivo perseguido para la Etapa I (Da Silva 2015). Por esta razón resulta indispensable estructurar una función objetivo, articulada con algún algoritmo o estrategia de calibración, orientado a reducir la discrepancia entre los caudales de escurrimiento modelados y los medidos, ya sea directa o indirectamente.

Como consideración sobre el diseño hidráulico de la red de drenaje pluvial y su verificación, el método adecuado para diseñar obras de protección contra inundaciones depende, en principio, del tipo de problema por resolver, magnitud de la obra, precisión requerida, características de la cuenca y de la información disponible, de manera que el esfuerzo que se realice en el estudio debe corresponder con los beneficios que se esperan de la precisión en los resultados.

Existen factores de tipo subjetivo, como es la experiencia del diseñador en la aplicación de un método particular, que influyen en la decisión adoptada. Una vez definida la zona en estudio, se procede a dividir en áreas de aportación, donde se encontrará la red de sumideros, la que deberá reconocer el subcolector que se localizará en la parte baja de dichas áreas. Los subcolectores aportarán el caudal que conducen a los colectores y éstos finalmente al emisor que descargará el gasto en el sitio de vertido.

Finalmente, la verificación del diseño hidráulico permite identificar que cuando la red de drenaje pluvial se diseña para una lluvia que tiene un T_r menor que aquel que puede llegar a presentarse en el momento dado, los caudales en la red no pueden ser conducidos en su totalidad, produciendo desbordamientos, los cuales pueden dar lugar a encharcamientos e inundaciones no deseadas en las vías. En esta etapa, partiendo de una simulación a partir de un tránsito hidráulico en el sistema de drenaje, se contempla la posibilidad de prever esta situación, introduciendo modificaciones en el diseño original hasta el cumplimiento de dichas condiciones, para así evitar daños a las vías asociados con la ocurrencia de este fenómeno (Da Silva 2015).

DATOS INICIALES

Se implementó la estrategia a un caso de estudio, la cuenca urbana del barrio de Marzal (ver figura 5), ubicado en la ciudad de Luanda, partiendo de un MDT (construido a partir de datos de diferentes fuentes), con la calidad exigida para reflejar la tendencia general del relieve y con resolución espacial de 2,0 m, pudiendo cumplir con los criterios de validación de la calidad establecidos (compatibilidad del modelo con la cartografía base, validación recíproca, evaluación de residuos y criterios cualitativos) y presentar la superposición del ambiente construido encima del relieve natural.

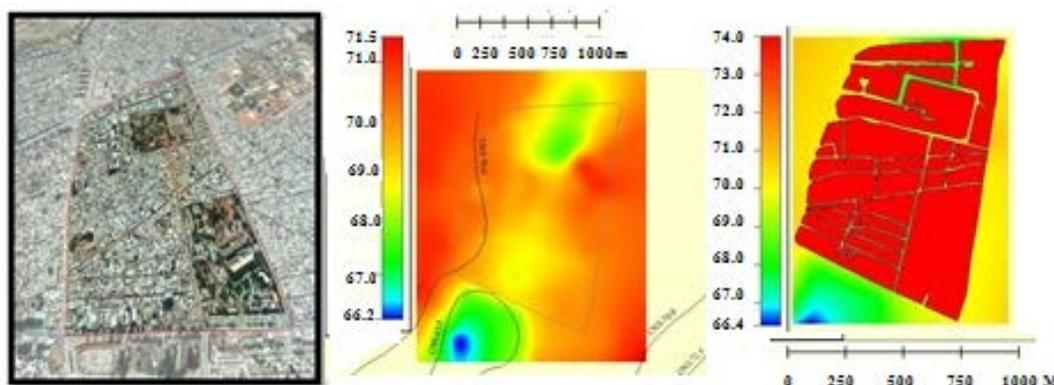


Figura 5. Barrio Marzal, su representación gráfica en un MDT y áreas construidas (fuente: Da Silva et al. 2014)

CALIBRACIÓN DEL MODELO

Dada la importancia que reviste el proceso de calibración en la propuesta de diseño de sistemas de drenaje pluvial, han sido seleccionados y procesados dos eventos lluviosos ocurridos en Luanda con repercusión en Marzal, acontecidos los días 03/04/2002 (a) y 11/04/2010 (b) y que presentan intensidades máximas de 40,0 mm/h y 35,8 mm/h respectivamente. Las respectivas duraciones fueron de 8 y 5 horas. En la figura 6 se muestran cartas pluviográficas y hietogramas de lluvia obtenidos a partir del procesamiento digital según método de León et al. (2013).

Acorde con la propuesta de diseño presentada, será establecida la información hidrológica de partida para la calibración del modelo empleado, en este caso el SWMM. Esta información se soporta sobre el evento lluvioso registrado el día 3 de abril de 2002 con una intensidad máxima

de 40,0 mm/h y una duración de 8 horas, acorde con el procesamiento digital de cartas pluviográficas desarrollado por León et al. (2013).

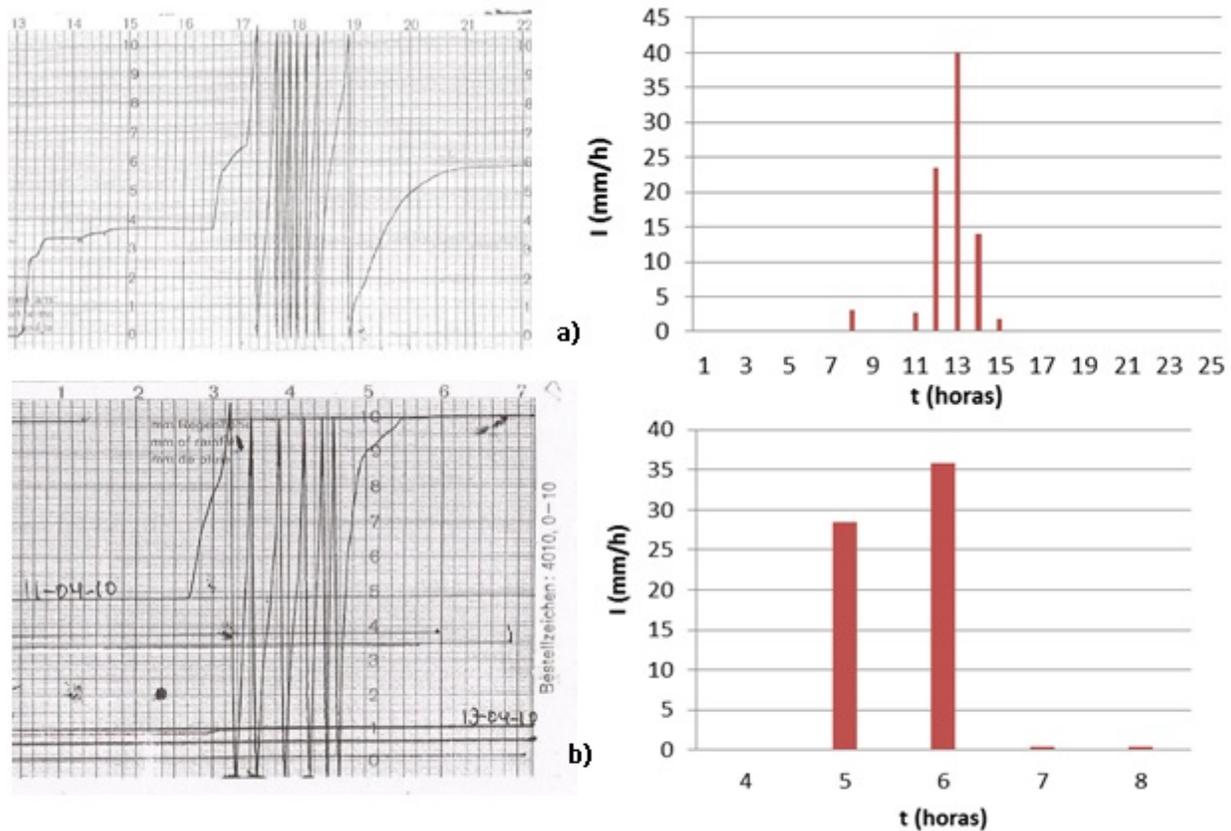


Figura 6. Fragmento de carta pluviográfica y hietograma procesado digitalmente
(fuente: Da Silva 2015)

Una vez establecida la distribución temporal de la precipitación para el evento en estudio, considerando la escasez de datos existentes en la cuenca de Marzal, una alternativa viable puede ser efectuada a través de la fórmula racional (Chow et al. 1994) con el objetivo de estimar el caudal máximo para el evento en estudio. La principal dificultad de esta alternativa es la correcta selección del coeficiente de escurrimiento C , el cual no solo depende de las características de la cuenca (uso del suelo, textura), sino además de la pendiente y de la intensidad de la precipitación para determinada probabilidad de ocurrencia (Chow et al. 1994). Para la vertiente Norte, tomando en cuenta la magnitud de su pendiente media, y considerando que es una zona urbana, se ha adoptado un coeficiente de escurrimiento $C = 0,55$. En el caso de la vertiente Sur, donde las bajas pendientes (menores que las de la vertiente Norte) producen un efecto de laminación del flujo y se favorece entonces la infiltración, se selecciona un valor de $C = 0,3$. A partir de esta selección, para el evento lluvioso en estudio los caudales máximos estimados por la fórmula racional son: Vertiente Norte con $Q_{\max} = 2,997 \text{ m}^3/\text{s}$ y Vertiente Sur con $Q_{\max} = 3,667 \text{ m}^3/\text{s}$.

Siendo consecuente con la estrategia propuesta, estos caudales máximos serán considerados como “observados” al no existir registros directamente medidos en la zona de estudio por lo que la calibración que se presenta en este trabajo estará orientada a minimizar las diferencias entre

las simulaciones efectuadas y los caudales máximos estimados para cada vertiente. Se han seleccionado aquellos parámetros que forman parte del proceso de calibración y los respectivos intervalos que permiten acotar el espacio de búsqueda. En la tabla 1 se observan los límites inferior y superior de los parámetros a calibrar.

En la figura 7 se observa el patrón de escurrimiento tanto para la vertiente Norte (a) como para la vertiente Sur (b). En la tabla 2 obsérvese el buen ajuste alcanzado en la minimización de los errores entre los gastos máximos para el evento en estudio.

Tabla 1. Límites inferior y superior de los parámetros a calibrar

Parámetros	Intervalos	
	Límite inferior	Límite superior
Coefficiente de rugosidad en la fracción de área impermeable, n_{imp}	0,01	0,05
Coefficiente de rugosidad en la fracción de área permeable, n_{perm}	0,05	0,25
Porcentaje de impermeabilización (% Imp)	5	95

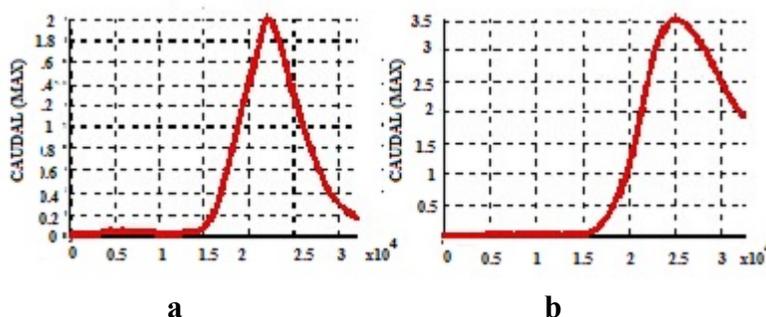


Figura 7. Hidrogramas Vertiente Norte y Vertiente Sur
(fuente: Da Silva 2015)

Tabla 2. Parámetros estimados a partir del modelo concentrado

Sub cuencas	Parámetros			F. Obj. $(Q_{m\acute{a}x}^{sim} - Q_{m\acute{a}x}^{obs})^2$
	n_{imp}	n_{perm}	% Imp	
Vertiente Norte	0,0435	0,1356	35,12	0,006113994
Vertiente Sur	0,0469	0,0694	47,20	0,00161288

Los parámetros obtenidos en esta etapa caracterizan preliminarmente ambas vertientes a partir del empleo de un modelo de tipo concentrado, con características muy similares en cuanto a impermeabilización, lo cual se refleja básicamente en los valores obtenidos del coeficiente de rugosidad en la zona impermeable de la cuenca y su correspondencia con el porcentaje de impermeabilización de la misma.

En una segunda etapa se ingresan, como aproximación inicial en el modelo semi-distribuido en SWMM, los valores de los parámetros obtenidos en el análisis del modelo concentrado de la cuenca urbana de Marzal. En la figura 8 se muestra el modelo conceptual de la cuenca Marzal

con 134 subcuencas, 162 nudos y 186 conductos. Pueden observarse diferentes mapas que caracterizan las subcuencas existentes dentro y fuera de los límites del área de interés. En la misma se puede observar la interacción con subcuencas adyacentes, el mapa de áreas (a), mapa de pendiente (b) y el mapa de impermeabilización (c).

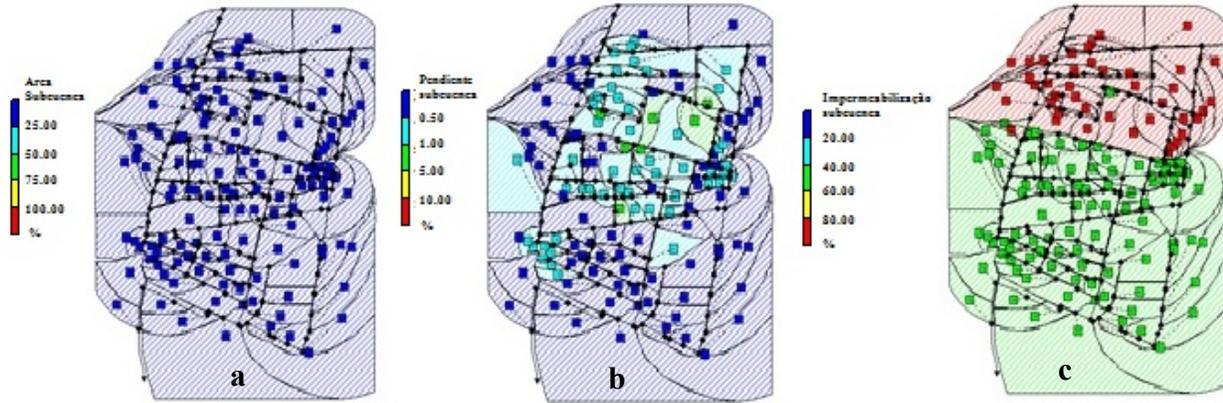


Figura 8. Modelo conceptual establecido para el barrio Marzal
(fuente: Da Silva 2015)

En el proceso de ajuste o calibración del modelo semi-distribuido de Marzal en SWMM, al no contar con hidrogramas observados, de forma análoga a la etapa anterior, se establece como función objetivo minimizar el error cuadrático con respecto al gasto máximo. Al introducir los parámetros obtenidos se puede comprobar que, para la vertiente Sur, existe un ajuste satisfactorio en relación con los parámetros obtenidos en la primera etapa (ver tabla 3). Sin embargo, en el caso de la vertiente Norte, fue necesario efectuar un reajuste en el porcentaje de impermeabilización (% Imp) para minimizar los errores con respecto al caudal máximo. Los caudales máximos estimados por SWMM para las vertientes Norte y Sur son 2,581 m³/s y 3,879 m³/s respectivamente.

Tabla 3. Ajuste final de los parámetros estimados a partir de modelo SWMM

Sub-cuencas	Parámetros			F. Obj. ($Q_{m\acute{a}x}^{sim} - Q_{m\acute{a}x}^{obs}$) ²
	n _{imp}	n _{perm}	% Imp	
Vertiente Norte	0,0435	0,1356	87,61	0,025963
Vertiente Sur	0,0469	0,0694	47,20	0,003039

VALIDACIÓN DEL MODELO

La validación del modelo es llevada a cabo con el evento registrado el 11 de abril de 2010, con una intensidad máxima de 35,81 mm/h y duración de 5 horas. Los caudales máximos se estiman a partir de la fórmula racional. Se observa que para la vertiente Norte (a), el valor de $Q_{max} = 2,683 \text{ m}^3/\text{s}$ y para la vertiente Sur (b) el $Q_{max} = 3,281 \text{ m}^3/\text{s}$ como se muestra en la figura 9.

Con los parámetros obtenidos en el proceso de calibración (ver tabla 3), mediante una simulación con SWMM, son estimados los caudales máximos en los nodos de vertido del modelo conceptual establecido. En la tabla 4 se muestra una comparación que permite constatar el buen desempeño de la estrategia adoptada donde los errores relativos obtenidos son

considerados como aceptables, si se toma en cuenta la escasez de datos existente en este proceso, al no estar instrumentada la cuenca en estudio.

Tabla 4. Resultados de la validación para el evento del 11 de abril de 2010

Vertiente	Q_{\max} simulado (l/s)	Q_{\max} "observado" (l/s)	Error relativo (%)
Norte	2384,19	2683,93	11,20
Sur	3423,18	3281,60	4,30

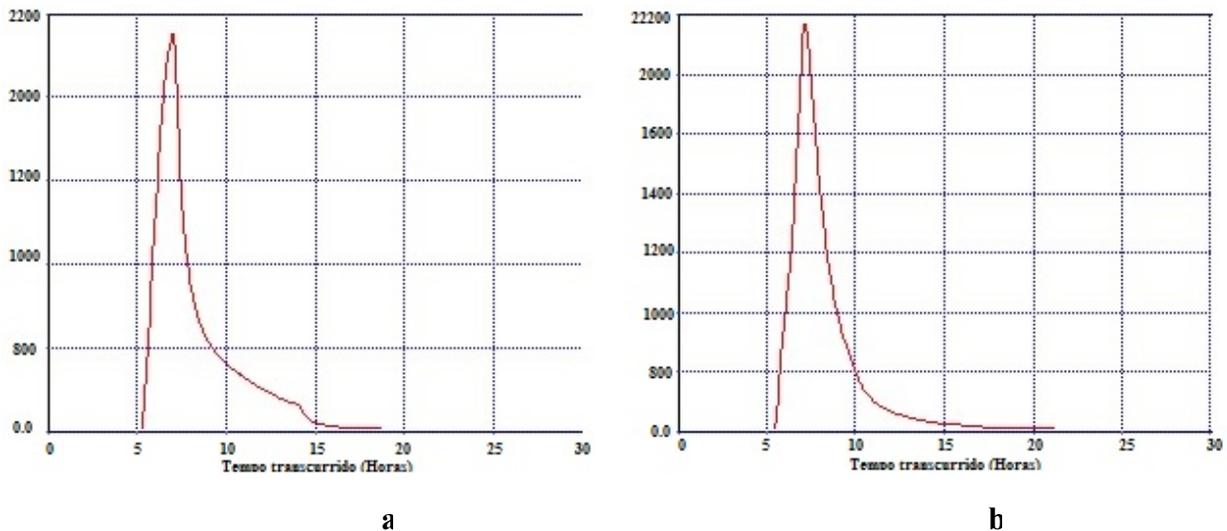


Figura 9. Hidrogramas: Vertiente Norte y Vertiente Sur (fuente: Da Silva 2015)

RESULTADOS DEL DISEÑO

En la ejecución del diseño fue empleada la herramienta SewerUp. A partir de la información de las curvas Intensidad-Frecuencia-Duración (IFD) para Luanda, considerando que en la zona del objeto de estudio existe una marcada escasez de registros de lluvias horarias y tampoco se disponía de catálogos que facilitaran la forma del aguacero que es posible adaptar a una cierta cantidad de precipitación, fue necesario elaborar un conjunto de hietogramas sintéticos, los cuales reflejaron el comportamiento de las precipitaciones a lo largo de la duración del evento, para diferentes periodos de retorno. En este sentido, fue escogida una duración de 4,5 horas que se encuentra razonablemente en correspondencia con la duración máxima de las lluvias en Luanda. Para obtener los hietogramas sintéticos fue aplicado el método de los bloques alternos (*alternating block method*), citado por Chow et al. (1994). En la figura 10 se muestra la estructura del hietograma, en este caso para $T_r = 10$ años.

En la herramienta SewerUp se introducirán la variabilidad espacial del coeficiente de escurrimiento por vertientes en Marzal, siendo adoptados para ambas vertientes los valores seleccionados en la etapa de calibración, o sea $C = 0,55$ para la vertiente Norte mientras que para la vertiente Sur, $C = 0,30$ (Da Silva 2015). Las condiciones establecidas por UTGSL (2012) en su propuesta original fueron estrictamente respetadas (ver figura 11), partiendo de la importación del plano con el trazado de la red.

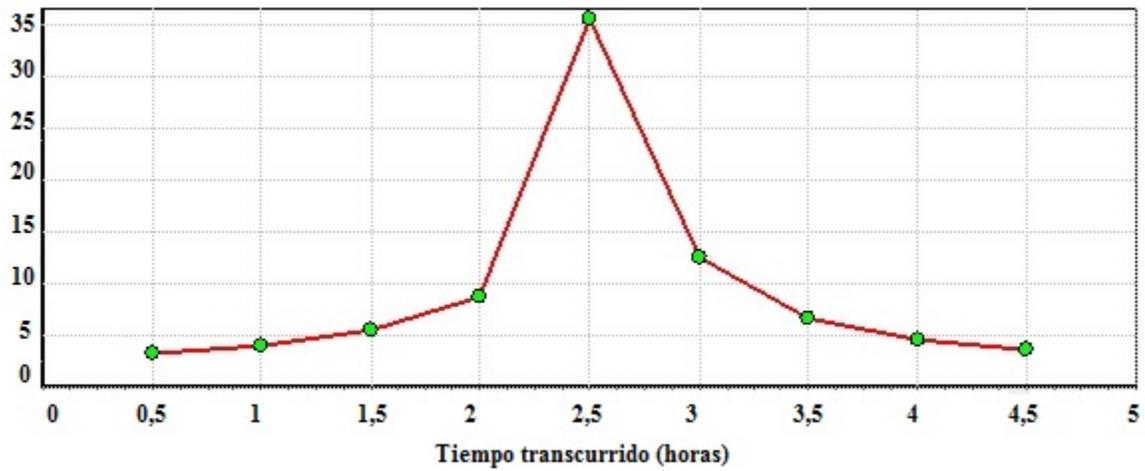


Figura 10. Hietograma obtenido para $T_r = 10$ años y duración 4,5 horas
(fuente: Da Silva 2015)

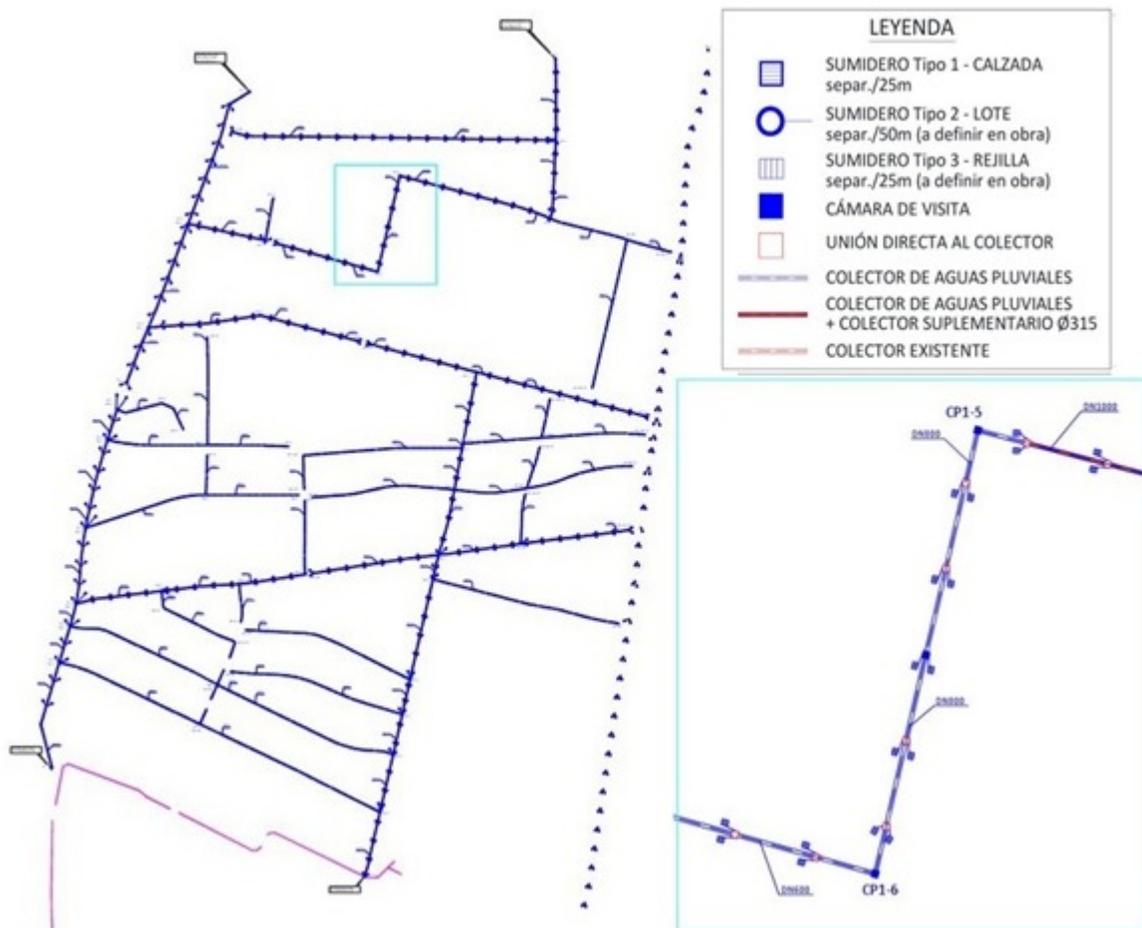


Figura 11. Red de drenaje pluvial urbano del barrio Marzal
(fuente: adaptado de UTGSL 2012)

El resultado del diseño se presenta resumido en la figura 12, donde se observa la reducción de 65 diámetros en conductos de varios tramos de la red de drenaje pluvial, es decir el 74 % del total (88). Además, se hizo una comparación en relación con la propuesta de la UTGSL, donde se reportó un incremento en diámetros en solamente 7 conductos, mientras que en otros 16 se mantuvieron las especificaciones establecidas.

En la tabla 5 se establece una comparación por concepto de costos totales asociados con las tuberías de drenaje pluvial, tomando en cuenta que la longitud de conductos a colocar es la misma (longitud total 9200,54 m). Nótese una reducción en los costos de casi un 21 % en relación con la propuesta de la Unidad del Gabinete Técnico de Saneamiento de Luanda (UTGSL) para la cuenca Marzal.

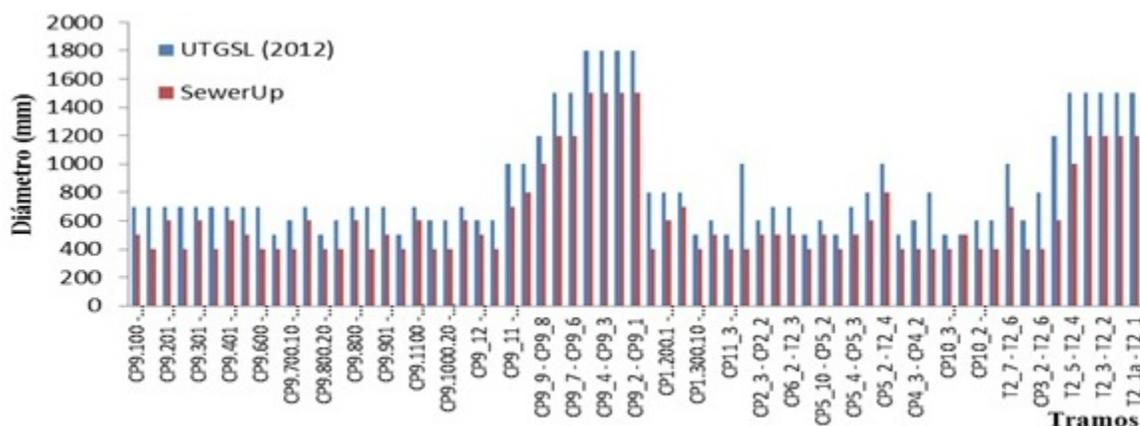


Figura 12. Reducción de diámetros en el diseño de la red de drenaje pluvial urbano del barrio Marzal (fuente: Da Silva 2015)

Tabla 5. Comparación de los costos totales asociados con las tuberías de la red de drenaje pluvial Urbano del barrio Marzal en la ciudad de Luanda (fuente: Da Silva 2015)

Moneda	UTGSL (2012)	Estrategia propuesta	Diferencia	%
AKZ	452 699 101,50	358 300 069,60	94 399 032,00	20,85
USD	4 526 991,00	3583 001,70	943 990,32	

CONCLUSIONES

La aplicación de la estrategia en la zona de estudio, permitió establecer criterios sobre los peligros de inundación ante intensas lluvias, como resultado de la etapa de diagnóstico de la situación actual del barrio.

Se adoptó la estrategia de calibración basada en los caudales máximos para las dos vertientes de la cuenca correspondiente. El uso integrado del modelo digital del terreno, conjuntamente con las herramientas de modelación espacial y temporal, permitió simular los escurrimientos en la cuenca urbana de Marzal.

La aplicación de la estrategia de calibración condujo a resultados razonables ante la escasez de datos existente en la cuenca en estudio. La aplicación de la estrategia propuesta permitió la reducción de los costos comparando con la aplicación de métodos de diseño tradicionales.

REFERENCIAS

- Chow V. T., Maidment D. R. y Mays L.** (1994). "Hidrología Aplicada". McGraw-Hill Interamericana S.A., 584 p., ISBN/ISSN/DL: 978-958-600-171-7. Santafé de Bogotá, Colombia.
- Da Silva D. D.** (2015). "Estrategia para el diseño de redes de drenaje pluvial, empleando la modelación matemática, para su aplicación en la ciudad de Luanda". Tesis Doctoral. Facultad de Ingeniería Civil. Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría (Cujae). La Habana, Cuba,
- Da Silva D. D., Martínez, Y. y Jiménez G. C.** (2014). "Estimación de caudales máximos en una cuenca urbana de Luanda". Ingeniería Hidráulica y Ambiental, 35(3): 3-19. ISSN 1815-591X. CIH, Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría (Cujae). La Habana.
- Mul M. L.** (2009). "Understanding hydrological processes in an ungauged catchment in sub-Saharan Africa". Doctorate Dissertation, 146 p., Board for Doctorates of Delft University of Technology, Academic Board of the UNESCO-IHE Institute for Water Education. Delft, Netherlands.
- León A. J., Hernández A., Garrido M. y Andalia A. I.** (2013). "Captación de lluvia con pluviógrafos de cubeta y su postprocesamiento". Ingeniería Hidráulica y Ambiental, 34(2): 73-87. ISSN 1815-591X. CIH, Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría (Cujae). La Habana.
- Sánchez L. A.** (2012). "Modelación integrada de sistemas de drenaje pluvial urbano en zonas predominantemente llanas". Tesis Doctoral. Centro de Investigaciones Hidráulicas. Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría (Cujae). La Habana, Cuba.
- UTGSL** (2012). "Projecto de requalificação de bairros de Luanda. Anexo 2. Rede de drenagem de águas residuais pluviais". Bairro do Marçal. Unidade Técnica de Gestão e Saneamento de Luanda, Luanda, Angola.