

Estimación de caudales máximos en una cuenca urbana de Luanda

Divaldo Domingos da Silva

Departamento de Ingeniería y Tecnología

Instituto Superior Politécnico de Tecnologías y Ciencias (ISPTEC), Luanda, Angola.

email: divaldo.silva@ispotec.co.ao

Yoel Martínez González

Centro de Investigaciones Hidráulicas

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

email: ymarq@cih.cujae.edu.cu

Gerardo Crescencio Jiménez Sáez

Departamento de Ingeniería Vial, Facultad de Ingeniería Civil,

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

RESUMEN

En este trabajo se realiza una estimación de caudales máximos de escurrimiento superficial en la cuenca urbana perteneciente al barrio Marzal, ubicado en la ciudad de Luanda, Angola. Se toma como punto de partida el Plan Director de Saneamiento de la ciudad y el estudio realizado por la Unidad del Gabinete Técnico de Saneamiento de Luanda (UTGSL) para la cuenca Marzal. En la modelación hidrológica se aplicó el modelo de depósito no lineal del bloque RUNOFF del programa SWMM ante diferentes usos de suelo (actual y una proyección al año 2030). Los resultados permiten comprobar de forma preliminar la factibilidad de las soluciones brindadas por UTGSL que reducen los caudales máximos y el tiempo de permanencia de las inundaciones en el barrio de Marzal.

Palabras clave: modelo hidrológico, drenaje urbano, infiltración.

Estimation of peak flows in an urban basin of Luanda

ABSTRACT

In the present work an estimation of peak flows is carried out in the urban basin belonging to the neighborhood Marzal, located in the city of Luanda, Angola. It takes as a starting point the Managing Plan of Sanitation of the city and the study carried out by the Unit of the Technical Cabinet of Sanitation of Luanda (UTGSL) for Marzal basin. For hydrological modeling the nonlinear reservoir model of the RUNOFF block of the software SWMM was applied with different soil uses (current and a projection to year 2030). The results allow checking in a preliminary way the feasibility of the solutions offered by UTGSL which reduce peak flows and the time of permanency of the floods in the neighborhood of Marzal.

Keywords: hydrological model, urban drainage, infiltration.

INTRODUCCIÓN

Los ambientes urbanos tienen como origen el desarrollo. Su crecimiento es significativo, lo cual trae como consecuencia que se generen servicios públicos tales como: abastecimiento de agua potable, fluido eléctrico, sistemas de drenaje pluvial y sanitario, por solo citar algunos. En ocasiones, dicho desarrollo no se efectúa de forma planificada y esto puede repercutir en la calidad de los servicios públicos antes mencionados. En este contexto se encuentra la ciudad de Luanda. Hoy en día existe una conciencia generalizada de que es necesario corregir la evolución urbanística condicionada en las últimas décadas por factores financieros y organizacionales como consecuencia del conflicto armado por el que atravesó Angola, lo cual se tradujo en una marcada escasez de recursos y el aumento de la presión demográfica en la ciudad de Luanda.

El Gobierno Provincial de Luanda con el apoyo del consorcio de consultores de ingeniería y ambiente SOGREA-H-COBA (2007) ha presentado un Plan Director de Saneamiento de dicha ciudad muy abarcador por lo que constituye un gran desafío para los próximos años acompañar el crecimiento poblacional y sanar las patologías existentes entre las que se destacan por su vital importancia:

- Recuperar infraestructuras existentes, localizadas mayoritariamente en el centro de Luanda. Actualmente los sistemas son unitarios y existen serios problemas de obstrucción parcial o total, producto de desechos sólidos.
- Dotar a la zona periférica de Luanda de sistemas de drenaje pluvial. Esta zona se caracteriza por tener pequeños declives y pocas depresiones lo que origina que las aguas pluviales estén estancadas por mucho tiempo.
- Dotar a la zona periférica de Luanda de sistemas separativos, donde se recolecten las aguas residuales domésticas, con el objetivo de alcanzar elevados patrones de calidad de servicios y ambientales.

El creciente desarrollo de los modelos hidrológicos computacionales permite conducir análisis exhaustivos de los problemas antes mencionados. En la actualidad existen diversos modelos, tanto de simulación como de diseño, tomando en cuenta la correspondiente variabilidad de los parámetros que caracterizan los ambientes urbanos representados en cuencas espacialmente concentradas. Entre los modelos que se utilizan y que goza de popularidad entre los especialistas se encuentra el bloque RUNOFF del Storm Water Management Model (SWMM), el cual conceptualiza las cuencas urbanas como depósitos con almacenamiento no lineal.

En la presente contribución, será aplicado el modelo de depósito no lineal (MDNL) a una cuenca urbana de la zona periférica de Luanda, correspondiente al barrio Marzal con el objetivo fundamental obtener una estimación preliminar de los escurrimientos máximos probables a partir de hietogramas sintéticos, ante diferentes escenarios de simulación, donde el uso del suelo cambia, como consecuencia de la intervención concebida en el programa de saneamiento de la ciudad de Luanda.

EL MDNL EN EL PROCESO DE TRANSFORMACIÓN LLUVIA-ESCURRIMIENTO

Un depósito no lineal es aquel cuyo almacenamiento presenta una relación no lineal con su caudal de salida. El MDNL acorde con EPA (2005) se basa en una modificación al modelo de la onda cinemática, dividiendo cada subcuenca en una zona impermeable A_1 sin almacenamiento en depresión (retención superficial), otra impermeable con retención (A_3) y una última permeable con almacenamiento A_2 , tal y como se ilustra en la figura 1. Cada zona especificada

en la figura 1 aporta un escurrimiento partiendo de la conceptualización del funcionamiento de éstas como un depósito no lineal, esquematizado en la figura 2.

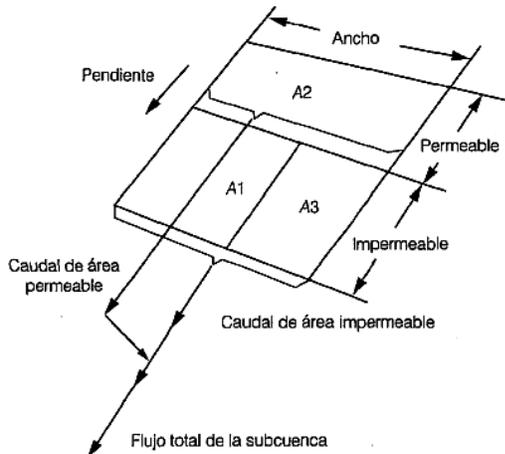


Figura 1. Esquema conceptual de las subcuencas (fuente: Macor 2002)

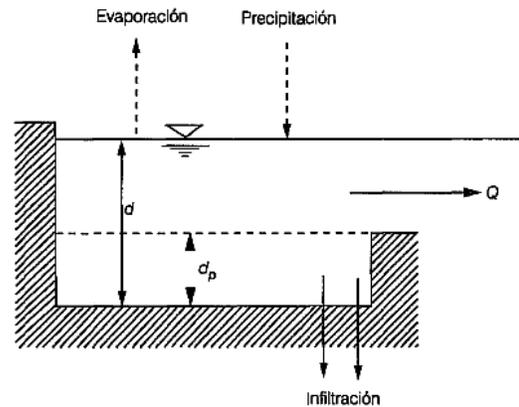


Figura 2. Esquema conceptual del fenómeno de escurrimiento (fuente: Macor 2002)

ECUACIONES GOBERNANTES

El caudal de salida en la figura 2 responde a la expresión siguiente:

$$Q = \frac{W}{n} (d - d_p)^{5/3} S_o^{1/2} \quad (1)$$

donde: Q = caudal de salida de subcuenca (m^3/s); W = ancho de subcuenca (m); n = coeficiente rugosidad de Manning; d = profundidad del agua en depósito (m); d_p = profundidad de almacenamiento en depresión (retención superficial) (m); S_o = pendiente de la subcuenca.

La ecuación del depósito no lineal se establece resolviendo el sistema de ecuaciones constituido por la ecuación de continuidad y la ecuación de Manning (ecuación 1). La ecuación de continuidad para cada subcuenca será:

$$\frac{dV}{dt} = A \frac{dd}{dt} = A \cdot i - Q \quad (2)$$

donde V = volumen de agua en la subcuenca ($V = A d$, m^3); t = tiempo (s); A = superficie de la subcuenca (m^2); i = intensidad de la lluvia neta (m/s).

Esta última se obtiene de sustraer a la precipitación las cantidades correspondientes de infiltración y evaporación. Combinando las ecuaciones (1) y (2) resulta una ecuación diferencial ordinaria no lineal para la determinación de la profundidad de agua en el depósito en la forma:

$$\frac{dd}{dt} = i - \frac{W}{n A} (d - d_p)^{5/3} S_o^{1/2} \quad (3)$$

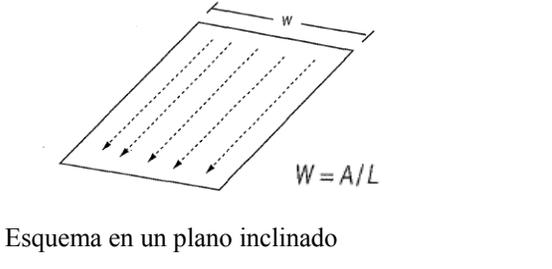
CRITERIO PARA ESTIMAR EL ANCHO DE LAS SUBCUENCAS

Existen diferentes esquemas conceptuales para identificar el ancho de las subcuencas. En efecto, tal y como reportan Macor (2002) y Sánchez (2012) son considerados planos inclinados por donde el flujo superficial escurre y en la tabla 1 se ilustra la conceptualización seleccionada para la presente contribución.

El parámetro W puede servir para ajustar la respuesta de salida del MDNL (Barco et al. 2008). En efecto, para una misma superficie si este parámetro disminuye, el hidrograma se

atenúa lo cual es un indicador de que aumenta el efecto de laminación y del almacenamiento en la subcuenca. En caso contrario, es decir si W aumenta, el hidrograma acorta su duración y consecuentemente aumenta el valor máximo y el flujo entonces alcanza su salida más rápido.

Tabla 1. Esquema conceptual de la subcuenca

Esquema	Observaciones
 <p>Esquema en un plano inclinado</p>	<p>Se considera el flujo superficial escurriendo pendiente abajo de una subcuenca idealizada como un plano rectangular.</p> <p>El ancho W de la subcuenca es el ancho físico del escurrimiento en el plano, determinado como la relación entre el área A de la subcuenca y la longitud de media del flujo L.</p>

ESTIMACIÓN DEL ALMACENAMIENTO EN DEPRESIÓN

El valor de d_p expresa el volumen, en [mm], que debe ser llenado antes de la ocurrencia del escurrimiento. Representa la pérdida o "abstracción inicial" causada por fenómenos como la acumulación de agua superficial, humectación de la superficie, la interceptación y la evaporación. Este parámetro se puede tratar como un parámetro de calibración, en particular para ajustar volúmenes de escurrimiento. Valores independientes de almacenamiento en depresión son necesarios para las zonas permeables e impermeables.

Como se había explicado con anterioridad, el área de la subcuenca se divide en dos partes que representen las partes impermeables y permeables. Las leyes de infiltración conocidas tales como Horton o Green-Ampt sólo se aplican a la porción permeable de la subcuenca. En algunos procedimientos de esorrentía como el módulo RUNOFF del modelo SWMM, el método de la onda cinemática (EPA 2005) y algunos métodos que aplican la teoría del hidrógrafo unitario (Chow et al. 1994) también incluyen la pérdida de almacenamiento de depresión. Ahora bien, el almacenamiento en depresión en la zona impermeable, Kidd (1978) citado por Riccardi (2000) presentó una ecuación basada en datos recopilados de estudios hechos en Holanda, Reino Unido y Estados Unidos, con un coeficiente de correlación de 0,85 con la siguiente estructura:

$$d_p = 0,077 \cdot S_o^{-0,49} \quad (4)$$

En la ecuación anterior la pendiente se introduce en por ciento (%) y la retención superficial se expresa en centímetros (cm). Para el caso de zonas permeables, el valor de d_p está sometido a los fenómenos de infiltración y evaporación. En ese caso, es recomendable representarlo en función del tipo de cobertura, tal y como se muestra en la tabla 2.

Tabla 2. Valores recomendados por EPA (2005)

Tipo de cobertura	Profundidad del almacenamiento en depresión - d_p (mm)-
Césped y hierba	2,50 – 5,0
Pastos y prados	≅ 5,0
Lecho forestal	≅ 7,5

ESTIMACIÓN DE LA INFILTRACIÓN

Tal y como reportan Chow et al. (1994), existen diversos modelos de infiltración, entre los que se encuentran las ecuaciones de Horton, Green-Ampt, Philip y el propio método del Soil Conservation Service (SCS) para el cálculo de las pérdidas iniciales.

Sin embargo, la ecuación de Horton es quizás la más conocida de las ecuaciones de infiltración. Muchos hidrólogos utilizan estimaciones de los valores de los tres parámetros que la caracterizan, a pesar de la falta de información a que se enfrentan en muchos estudios. Esta ecuación expresa un decaimiento exponencial de la infiltración en la forma:

$$f(t) = F + (f_o - F)e^{-kt} \quad (5)$$

donde: t = tiempo desde el inicio de la tormenta (s); f_o = tasa de infiltración máxima (mm/h), este parámetro depende principalmente del tipo de suelo, el contenido inicial de humedad y condiciones de la vegetación; F = tasa de infiltración mínima, equivalente a la conductividad hidráulica o permeabilidad del suelo (mm/h); k = constante de decaimiento (s^{-1}). Este parámetro es independiente del contenido de humedad inicial.

La tabla 3 muestra la tasa de decaimiento de la infiltración para un rango de valores de dicho parámetro.

Tabla 3. Valores del parámetro k

Tasa de decaimiento		Porcentaje de disminución de la capacidad de infiltración después de 1 hora
1/h	(L/s)	
2	0,00056	76
3	0,00083	95
4	0,00115	98
5	0,00139	99
fuente: http://www.xpsoftware.com/webhelp		

APROXIMACIONES NUMÉRICAS

La ecuación del MDNL (ecuación 3) es resuelta con una de las variantes del método de Runge-Kutta, el cual está implementado en *MatLab* a través de la función ODE45. En general, ODE45 es la mejor función para aplicar como “primer intento” en este tipo de problemas. Este es un solucionador diseñado para problemas flexibles en su formulación. Se caracteriza por ser de un solo paso en el cálculo de la profundidad en el depósito $d(t_n)$ y necesita solamente la solución en el punto de tiempo inmediatamente precedente $d(t_{n-1})$. Al ser un problema de valor inicial, como condición para cada zona de la subcuenca se impone que:

$$d(0) = d_p \quad (6)$$

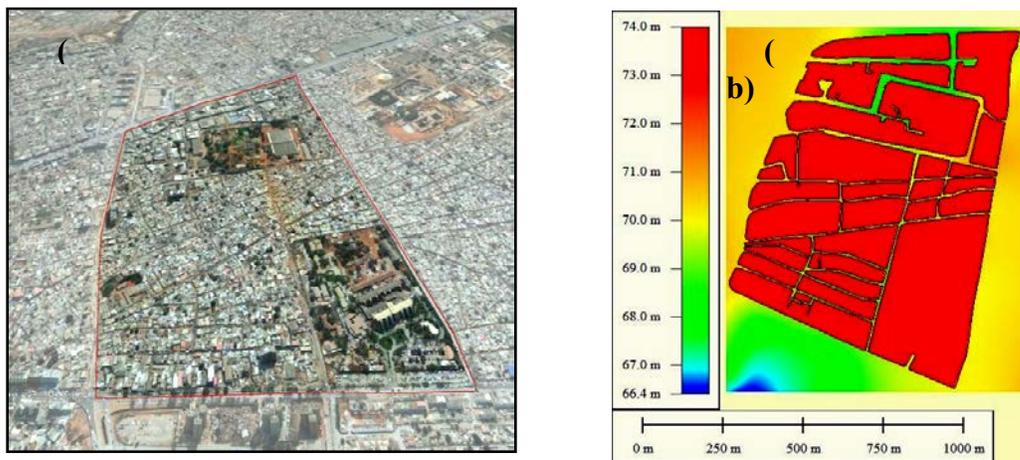
ESTUDIO DE CASO: CUENCA URBANA DEL BARRIO MARZAL, LUANDA

El barrio Marzal cuenta con una población de 38261 habitantes y un área aproximada 76 ha (UTGSL 2012) tal y como se muestra en la figura 3. El barrio con malla urbana presenta un estado de degradación asociado a la presencia de áreas de ocupación irregular, infraestructuras urbanas incompletas y espacio público sin calidad. Las degradaciones de las edificaciones y la

ausencia de calles pavimentadas ilustran las carencias observadas en el área dada su ubicación actual (ver figura 4).

MODELO CONCEPTUAL

La cuenca urbana perteneciente al barrio de Marzal será dividida en dos vertientes (Norte y Sur), tal y como se muestra en la figura 5, ambas concebidas como planos inclinados independientes y con direcciones del flujo superficial y descargas opuestas partiendo de una divisoria común, tomando en cuenta las características topográficas del área en estudio (Domingos da Silva et al. 2013). Las características de las subcuencas de las vertientes Norte y Sur se muestran a continuación en la tabla 4.



**Figura 3. a) Imagen satelital con límites de área de estudio (fuente: <http://www.googlemaps.com>)
b) Modelo digital de elevaciones (MDE) con resolución 2 m, considerando superposición de red vial y áreas construidas (fuente: Domingos da Silva et al. 2013)**

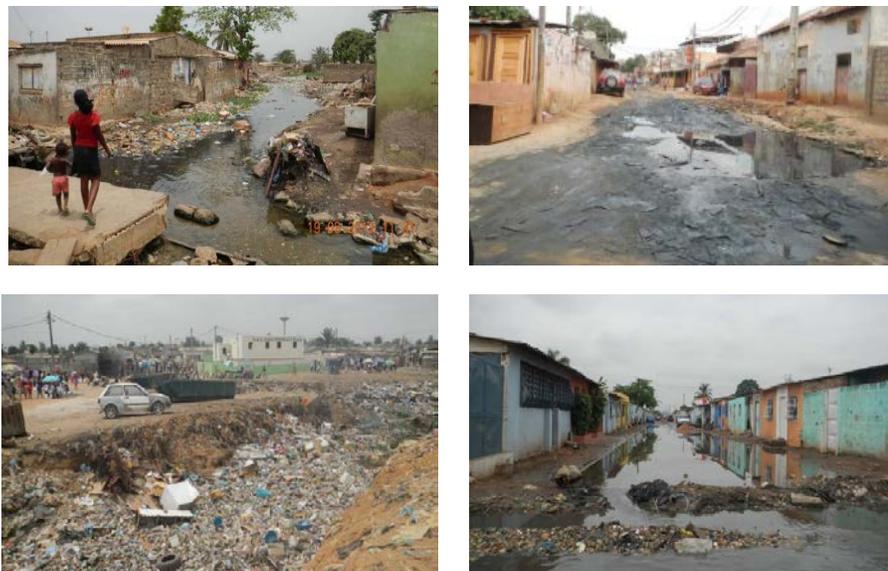


Figura 4. Estado de degradación del barrio Marzal ocasionando graves problemas de drenaje y fuentes de contaminación con alto riesgo en salud (fuente: UTGSL 2012)

Los parámetros que caracterizan la cuenca Marzal han sido estimados a partir de información obtenida de UTGSL (2012), partiendo del grado de urbanización, pues solo el 11,3% de los espacios son públicos. Por el deterioro de la infraestructura vial se ha considerado un coeficiente de rugosidad igual a 0,03, superior al del pavimento rugoso (0,016), acorde con Chow (1959) así como León y Martínez (2013) y para las superficies permeables de la cuenca, la literatura especializada (Macor 2002), (EPA 2005), (Sánchez 2012) sugiere valores entre 0,1 y 0,25, adoptándose el mayor en este caso por las características del barrio Marzal. Se ha considerado que el 50% del área impermeable no presenta almacenamiento en depresión, valor alto para este parámetro por el mal estado de la infraestructura vial, uso del suelo, entre otros factores.

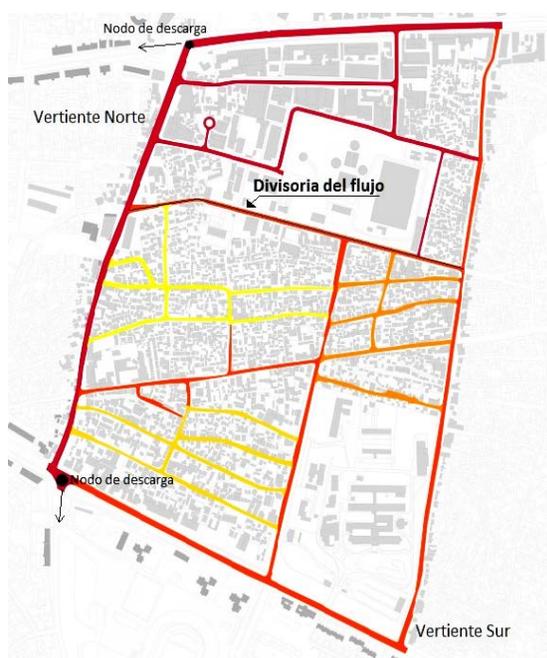


Figura 5. Modelo conceptual del barrio Marzal

Tabla 4. Características de las subcuencas del barrio Marzal

Parámetros hidrológicos	Subcuencas del barrio Marzal	
	Vertiente Norte	Vertiente Sur
Área total (m ²)	224503	535501
Longitud media del flujo (m)	416,67	644,92
Pendiente media (m/m)	0,00302	6,20237e-05
Coefficiente de impermeabilización	0,887	
Fracción del área impermeable sin almacenamiento en depresión	0,5	
Coefficiente rugosidad de la fracción de área impermeable	0,03	
Coefficiente rugosidad de la fracción de área permeable	0,25	

CARACTERIZACIÓN DE LLUVIAS: INTENSIDAD-FRECUENCIA-DURACIÓN (IFD)

El régimen de precipitaciones en Luanda se caracteriza por la ocurrencia de un número reducido de lluvias en el año, algunas de ellas de gran intensidad y de corta duración, entre 2 y 4 horas. Los valores de intensidad de precipitación para diferentes períodos de retorno T_r pueden obtenerse a través de curvas IFD a partir de la estructura potencial, o sea:

$$I = at^{-b} \quad (7)$$

donde: I = intensidad de la precipitación para cada duración (mm/h); t = duración de la lluvia (h); a y b = parámetros que varían con el período de retorno T_r .

En la tabla 5 se muestran los valores correspondientes para T_r entre 2 y 100 años.

OBTENCIÓN DE HIETOGRAMAS A PARTIR DE LAS CURVAS IFD

A partir de la información de las curvas IFD para Luanda, y considerando que en la zona de estudio no existen registros de lluvias horarias y que además tampoco se cuenta con catálogos que faciliten la forma del aguacero que es posible adaptar a una cierta cantidad de precipitación,

se hace necesario elaborar un hietograma sintético el cual ha de reflejar 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 razonablemente se encuentra en correspondencia con la duración máxima de las lluvias en Luanda. Para obtener los hietogramas sintéticos fue aplicado el método de los bloque alternos (*alternating block method*), citado por Chow et al. (1994). Los incrementos de tiempo fueron de 30 minutos, tratándose por tanto de 270 min repartidos en 9 intervalos de 30 minutos. Los resultados han sido obtenidos bajo la hipótesis que la máxima precipitación tiene lugar en el centro de duración de la tormenta (ver figura 6).

Tabla 5. Parámetros curva IFD para Luanda (fuente: SOGREAH-COBA 2007)

T_r (años)	a	b
2	43,493	0,440
5	64,875	0,440
10	79,096	0,440
15	87,083	0,427
20	95,073	0,416
25	99,833	0,408
50	114,830	0,399
100	129,680	0,389

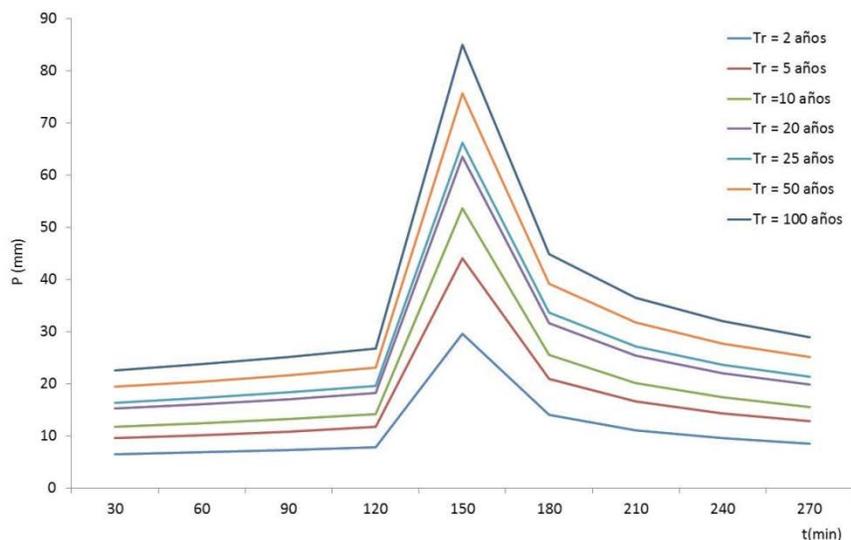


Figura 6. Hietogramas sintéticos para diferentes períodos de retorno

CARACTERIZACIÓN DE LOS SUELOS SUPERFICIALES

De forma general en Angola, y particularmente en Luanda, existe un conocimiento geológico relativamente consolidado como consecuencia de las campañas de caracterización de las compañías petroleras (SOGREAH-COBA 2007). Sin embargo, no fueron encontrados estudios con referencia a datos de permeabilidad de los suelos, sobre todo basados en mediciones de campo, por lo que resulta indispensable para el presente trabajo su estimación. Bajo estas condiciones SOGREAH-COBA (2007) realizó una campaña de ensayos de campo con un nivel

de confianza adecuado con el objetivo de caracterizar la permeabilidad de las diferentes unidades o formaciones geológicas de Luanda, entre las que se encuentran:

- Formación Luanda, Formación Quelo, Arenas rojizas de Muceque, Arcillas negras,
- Formación Quifangondo, Formación Cacuaco, Depósitos recientes.

Como se indica en las figuras 7 y 8, los ensayos conducidos por SOGREAH-COBA (2007) fueron realizados en calas con láminas cortantes, con 50 cm de diámetro exterior, habiéndose alcanzado la profundidad aproximada de 1,0 metro, en cada ensayo. Con el objetivo de caracterizar la capacidad de infiltración, se procedió a la introducción de un tubo de PVC con el mismo diámetro, enterrado cerca de 10 cm debajo de la cota inferior del orificio realizado, con el objetivo de impedir infiltraciones laterales, si se toma en cuenta que la permeabilidad vertical es más relevante para el caso en análisis.

En la figura 9 se muestra la variación de los niveles de agua en los ensayos realizados, tomando como referencia el extremo superior del tubo, para cada uno de los puntos de muestreo. Los valores indican claramente que en los suelos de las formaciones Quelo y Luanda (Puntos 1 y 2 respectivamente), presentan las tasas de infiltración relativamente más bajas. Nótese además que en el intervalo de tiempo en que fueron efectuadas las mediciones, en los puntos 1 y 2 existe una tendencia a la estabilización de los niveles de agua, no ocurriendo así en los puntos 3 y 4 (formaciones Arenas Rojas de Muceque y Quifangondo respectivamente) que sin lugar a dudas necesitaron un mayor tiempo para alcanzar dicha estabilización en los niveles de agua.



Figura 7. Puntos de ensayo identificados (fuente: SOGREAH-COBA 2007)

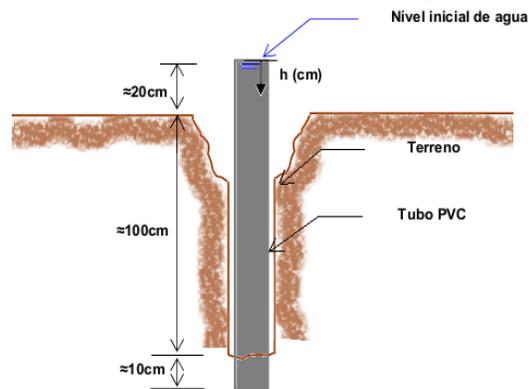


Figura 8. Esquema de ensayos realizados (fuente: SOGREAH-COBA 2007)

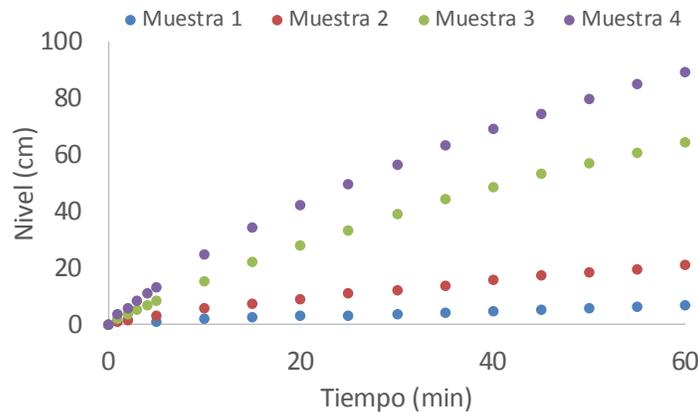


Figura 9. Resultados de los ensayos (fuente: SOGREAH-COBA 2007)

OBTENCIÓN DE LOS PARÁMETROS DEL MODELO DE INFILTRACIÓN

Antes de proceder a la obtención de los parámetros de infiltración que caracterizan a los suelos estudiados, fue necesario realizar algunas modificaciones a la información de los ensayos realizados por SOGREA-H-COBA (2007). En efecto, el sistema de referencia para la medición de los niveles fue colocado en el extremo inferior del tubo de PVC que se encuentra verticalmente enterrado y la velocidad de infiltración fue calculada como $f(t)=dh/dt$, siendo h = nivel de agua con respecto al nuevo sistema de referencia (cm), t = tiempo (min). Los resultados se muestran en la figura 10.

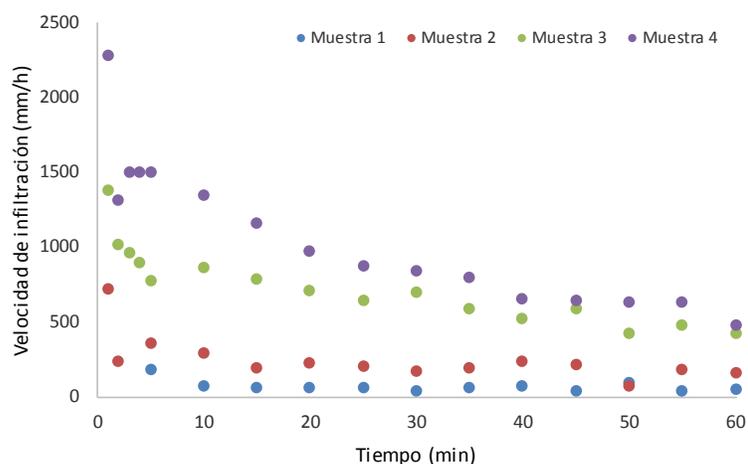


Figura 10. Velocidades de infiltración instantáneas para cada punto de muestreo

Los parámetros de infiltración fueron obtenidos a partir de ajuste de curvas, según modelo de Horton (ecuación 4), aplicando método de mínimos cuadrados. En la tabla 6, se presentan los valores obtenidos de los parámetros del modelo de infiltración de Horton, el error estándar, los límites de confianza del 95%, así como el correspondiente coeficiente de determinación R^2 y el error estándar del ajuste. El suelo existente en el área que ocupa el barrio de Marzal pertenece a la formación Quelo. En la figura 11 se ilustra que para esta formación se ha obtenido muy buena correlación.

Tabla 6. Parámetros de infiltración y resultados estadísticos asociados

Parámetros	Valor	Error estándar	Límites de confianza 95 %		R^2	Error estándar de ajuste
Suelo Formación Quelo						
F (mm/h)	53,79141096	2,951332001	46,81261975	60,77020217	0,9662041880	7,7101683146
f_0 (mm/h)	498,4851824	151,5958938	140,0178561	856,9525087		
1/k (s)	205,4923224	41,19669067	108,0776287	302,9070161		
Suelo Formación Luanda						
F (mm/h)	183,1343128	273,4817580	168,0589949	198,2096307	0,9822442397	21,284120019
f_0 (mm/h)	661,0134693	32,90896321	588,5813296	733,4456090		
1/k (s)	273,4817580	26,47259721	215,2159644	331,7475516		
Suelo Arenas Rojas de Muceque						
F (mm/h)	440,5136728	30,74434183	372,8458326	508,1815129	0,9719177650	42,030120080
f_0 (mm/h)	919,5249502	47,12688750	815,7993701	1023,250530		
1/k (s)	1041,663401	126,3567385	763,5540948	1319,772708		
Suelo Formación Quifangondo						
F (mm/h)	603,1871717	36,91684358	523,4331799	682,9411635	0,9783836464	71,032352729
f_0 (mm/h)	1628,619147	69,99158888	1477,411512	1779,826782		
1/k (s)	793,3912887	80,85533950	618,7139474	968,0686301		

Para esta formación, la velocidad de infiltración o permeabilidad se ha estimado de 53,79 mm/h, valor que acorde con SOGREA-COBA (2007) es representativo de este tipo de formación.

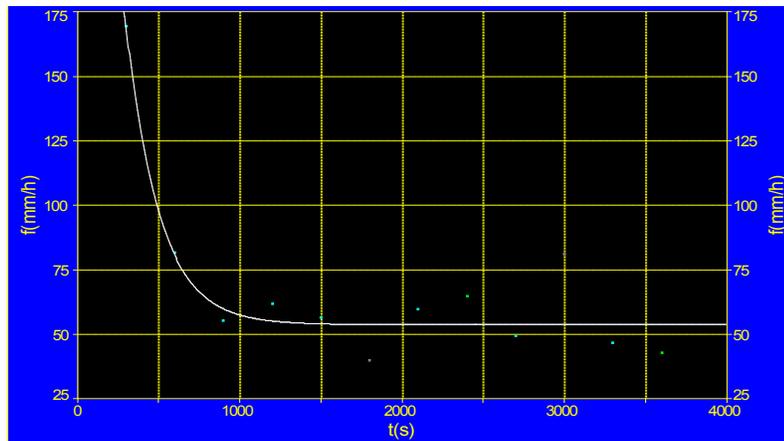


Figura 11. Aplicación del modelo de Horton para la determinación de las velocidades de infiltración instantáneas en la formación geológica Quelo

OBTENCIÓN DE LOS HIDROGRAMAS A PARTIR DE LAS SIMULACIONES

Una vez obtenido los parámetros de infiltración que caracterizan la formación geológica del área en estudio, se procede a realizar las simulaciones correspondientes para los períodos de retorno $T_r = 2,5, 10, 20, 25, 50$ y 100 años respectivamente con el objetivo de obtener los caudales de avenida instantáneos y por tanto sus valores máximos en cada vertiente de la subcuenca correspondiente al barrio Marzal. Tal y como se puede apreciar en la figura 12, (a) y (b), existen diferencias en la variación del escurrimiento ya sea durante la duración de los eventos de lluvia asociados a cada periodo de retorno (4.5 horas) y después de finalizado éstos.

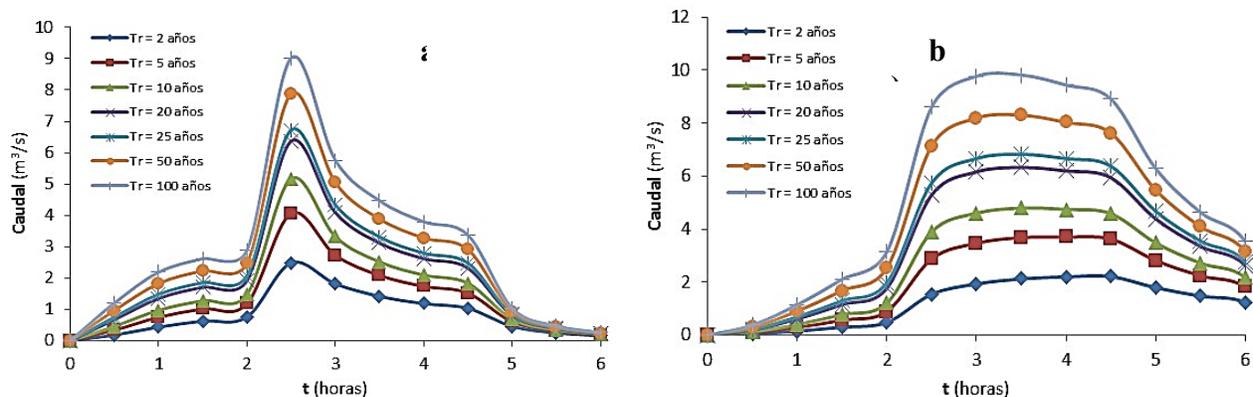


Figura 12. Comportamiento del escurrimiento:
a) en la vertiente Norte b) en la vertiente Sur del barrio Marzal

Este patrón está fundamentalmente asociado a la pendiente media de cada vertiente ya que en la Norte, se alcanza con relativa rapidez los caudales máximos (a las 2,5 horas de comenzado el evento lluvioso) y en las horas subsiguientes (hasta las 6 horas transcurridas) tiene lugar la recesión de los hidrógrafos hasta que el escurrimiento desaparece. Sin embargo, la pendiente

media de la vertiente Sur es muy pequeña ($6,2 \cdot 10^{-3} \%$) lo que ocasiona un efecto de laminación del flujo y una vez alcanzado su valor máximo (a las 3 horas de comenzado el evento lluvioso), existe una retención del flujo que oscila entre 1,5 y 2,0 horas aproximadamente. Sin lugar a dudas este es uno de los problemas más preocupantes para los residentes del barrio Marzal ya que el espacio público existente es insalubre y la retención del flujo pone en peligro la salud de la población que allí reside (ver figura 4). Además de eso, las zonas inundadas interrumpen el tráfico interno del barrio, haciendo que estas calles no sean transitables por vehículos por lo que es imprescindible a corto plazo el establecimiento de una red de drenaje superficial en funcionamiento para mejorar los problemas existentes de forma sustancial, tanto de salud como de movilidad en el barrio, además de los posibles beneficios estéticos.

CARACTERIZACIÓN DE LOS ESCURRIMIENTOS MÁXIMOS PROBABLES

Los escurrimientos máximos probables Q_{max} de cada vertiente (Norte y Sur), en función del período de retorno T_r , se ajustan con altos niveles de correlación (ver figura 13) a una distribución LogNormal de tres parámetros en la forma:

$$Q_{max}(T_r) = a \exp \left\{ -\frac{1}{2} \left[\frac{\ln(1/(b T_r))}{c} \right]^2 \right\} \quad (8)$$

donde a = amplitud; b = abscisa correspondiente al valor máximo de la distribución ($b \neq 0$); c = parámetro de ajuste ($c > 0$). La estimación de estos parámetros es conducida a partir del método de los mínimos cuadrados y en la tabla 7 se presentan los resultados.

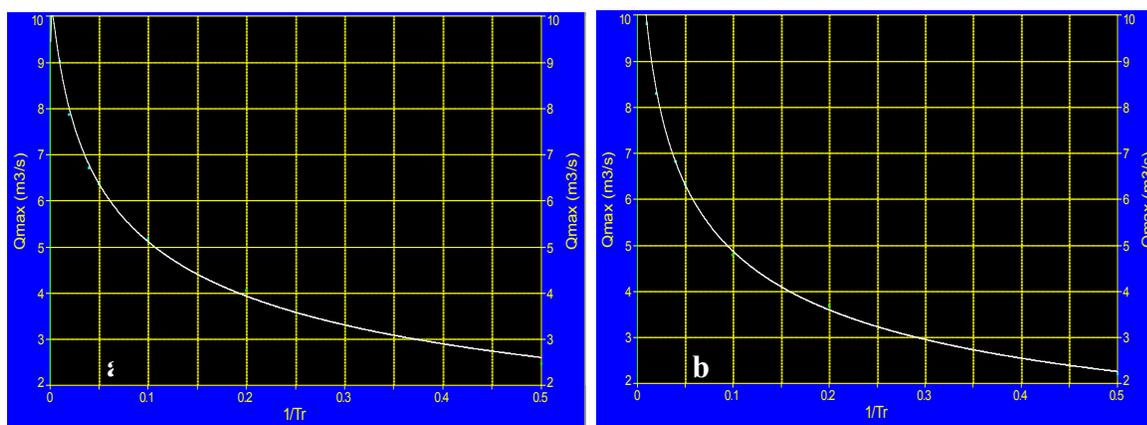


Figura 13. Distribución LogNormal para caracterizar los caudales máximos:
a) vertiente Norte b) vertiente Sur del barrio Marzal.

UNA PROYECCIÓN HACIA EL AÑO 2030

Uno de los problemas fundamentales en el barrio de Marzal es la falta de espacios públicos. Actualmente el uso de espacios públicos representa el 11,3 % de total de la superficie (8,59 ha de un total de 76,04 ha). Las calles tienen un nivel de pavimentación deficiente o nula en algunos casos, sobre todo en aquellas que pertenecen a zonas residenciales, sumándose además la poca capacidad vehicular que presentan (ver figura 4). En este sentido, en los proyectos de rehabilitación y reconstrucción de los barrios de Luanda se ha llevado a cabo una estrategia de intervención hacia los espacios públicos (UTGSL 2012):

- Introducción de redes urbanas que cubran las necesidades de la población
- Pavimentación firme del espacio público
- Introducción de elementos que mejoren la funcionalidad y estética del espacio público, entiéndase: mobiliario urbano y áreas recreativas, vegetación y árboles en particular, puntos de recogida de desechos urbanos, puntos de recolección de agua potable, aguas residuales, etc.

Tabla 7. Parámetros de la distribución de probabilidad que caracteriza los caudales máximos en el barrio de Marzal (escenario actual)

Parámetros	Valor	Error estándar	Límites de confianza 95 %		R ²	Error estándar de ajuste
Vertiente Norte						
a	10,03176134	0,490191568	8,670771358	11,39275132	0,9984242924	0,1088634998
b	0,002040888	0,000781430	-0,00012871	0,004210486		
c	3,353092133	0,205952553	2,781276176	3,924908090		
Vertiente Sur						
a	12,41929243	0,635266232	10,65551061	14,18307424	0,9994864780	0,0732366984
b	0,000980083	0,000322512	8,46466e-05	0,001875519		
c	3,380073961	0,148196058	2,968615743	3,791532179		

En la figura 14 se muestra una visión del barrio Marzal para el año 2030, donde se pone en evidencia el incremento de áreas verdes, tanto en zonas públicas como privadas. Se han considerado aquellas áreas verdes a conservar y el sembrado de nuevas palmeras y vegetación de forma alineada que permita crear una red continua y estructurada de interés ecológico, definiendo espacios compartidos creando una componente estética. En ese contexto visionario, al ser modificado el uso del suelo los espacios públicos se incrementarán a un 25,6 %, representando un poco más del doble del existente en la actualidad, favoreciendo de esta manera el proceso de infiltración y de almacenamiento en las dos vertientes identificadas correspondientes al área permeable de la cuenca urbana de Marzal.

En el área impermeable se debe tomar en cuenta que las calles estarán pavimentadas en su totalidad por lo que, la reducción de la rugosidad en relación con la inicialmente seleccionada (ver tabla 4) traerá como consecuencia una tendencia al incremento del escurrimiento superficial. Sin embargo, la existencia de redes de alcantarillado acopladas a estructuras de desagüe o sumideros contribuirá significativamente a mitigar los problemas de drenaje en el barrio de Marzal, tal y como está previsto en el programa de rehabilitación de los barrios de Luanda (UTGSL 2012). Por esta razón y para el escenario que se prevé, las características de las subcuencas de las vertientes Norte y Sur se muestran en la tabla 8. Nótese que en este caso, existe una variabilidad del coeficiente de impermeabilización, donde se pone en evidencia que en la vertiente Sur, mayor en extensión superficial, disminuye aproximadamente un 20% su nivel de impermeabilización a partir del incremento de espacios públicos.

A partir de un diseño de las redes de alcantarillado basado en el método racional para una probabilidad del 10 %, acorde con las normativas angolanas, la UTGSL (2012) realizó una propuesta de proyecto para la rehabilitación del barrio de Marzal. En la figura 15 se muestra el diseño de la red de drenaje con sus respectivos sumideros, contemplado en la propuesta de proyecto antes mencionada.



Tabla 8. Estimación de las características de las subcuencas para el año 2030

Parámetros hidrológicos	Subcuencas del barrio Marzal	
	Vertiente Norte	Vertiente Sur
Coefficiente de impermeabilización	0,847	0,7
Coefficiente de rugosidad de la fracción de área impermeable	0,017	
Coefficiente de rugosidad de la fracción de área permeable	0,10	

Figura 14. Una visión del barrio Marzal en el año 2030 (fuente: UTGSL 2012)

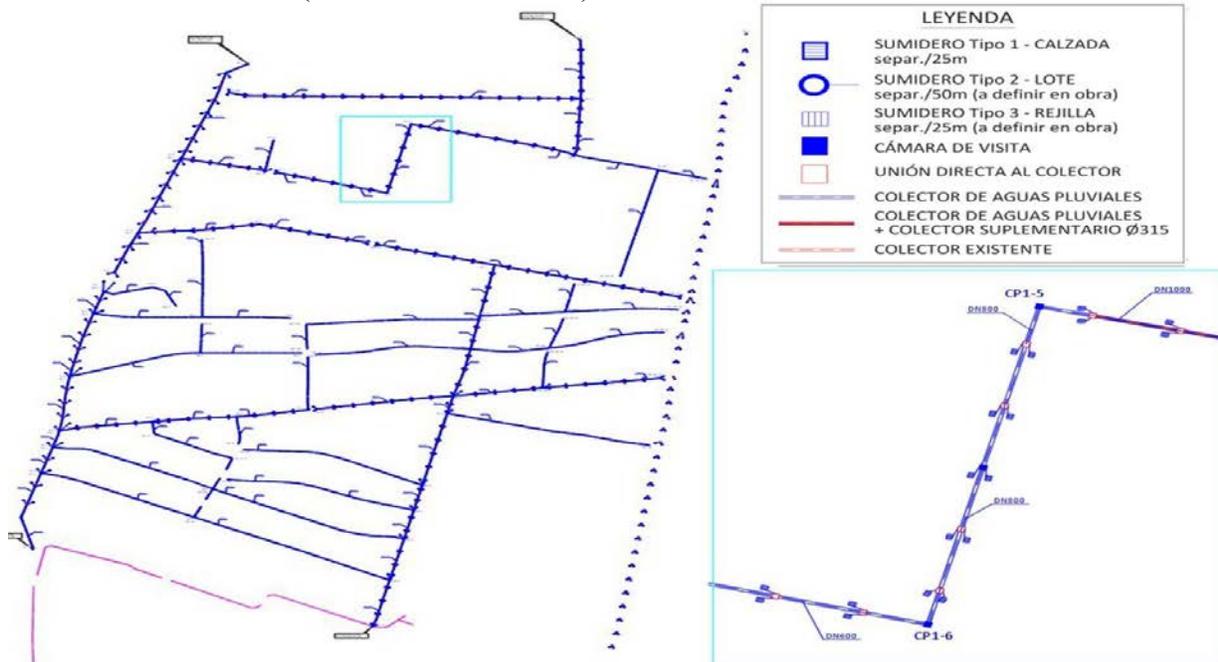


Figura 15. Red de drenaje proyectada por UTGSL (2012): vista en planta y detalle de trazado

Al analizar la propuesta, se pudo detectar que no incluyó una simulación que complementara las soluciones presentadas, por lo que es de interés del presente estudio valorar su eficiencia desde el punto de vista hidrológico e hidráulico. Para ello será necesario realizar modificaciones a la ecuación (3) donde deben ser incorporadas las descargas de la totalidad de los sumideros que forman parte de la red de alcantarillado. Es decir, partiendo de los hietogramas sintéticos obtenidos con anterioridad para los periodos de retorno $T_r = 2, 5, \dots, 100$ años respectivamente, se

procederá a recalculer los hidrogramas de drenaje superficial para cada vertiente considerando las descargas de los sumideros Q_w , los cuales serán considerados de tipo vertedero y con poca pendiente, según la ecuación:

$$Q_w = C L_o \sqrt{2gh}^{3/2} \tag{9}$$

donde: C = coeficiente de descarga, L_o = longitud del sumidero (tipo vertedero) y h = carga sobre el sumidero, en este caso ha sido considerada como $h = d - d_p$. Al sustituir la ecuación (9) en (3) tomando en cuenta que se analizarán todos los sumideros existentes en la cuenca urbana de Marzal con sus respectivas dimensiones (M = total de sumideros), resulta la siguiente ecuación diferencial:

$$\frac{dd}{dt} = i - \frac{1}{A} \sum_{j=1}^M C_j L_{oj} \sqrt{2g} (d - d_p)^{3/2} - \frac{W}{n A} (d - d_p)^{5/3} S_o^{1/2} \tag{10}$$

Acorde con la propuesta de UTGSL (2012), los sumideros tendrán una longitud $L_o = 2,0$ m ubicados en las calles cada 25 metros aproximadamente. Éstos se han incluido en el área impermeable de la cuenca de Marzal, como una superficie aportante. En la vertiente Norte, se han ubicado 185 sumideros, mientras que en la Sur se contabilizan 152 para un total de 337 (UTGSL 2012). En las figuras 16 a) y b) se contrastan los caudales máximos probables entre los escenarios actuales y el previsto para el año 2030 en cada una de las vertientes. Tal y como era de esperar, el patrón de drenaje superficial se modifica. En la vertiente Norte, los caudales máximos se reducen como promedio en un 30 % y de forma análoga en la vertiente Sur, el porcentaje de reducción es de un 45 %, manteniendo un ajuste de elevada correlación a una distribución LogNormal de tres parámetros (ver tabla 9).

Tabla 9. Parámetros de la distribución de probabilidad que caracteriza los caudales máximos en el barrio de Marzal (escenario para el año 2030)

Parámetros	Valor	Error estándar	Límites de confianza 95 %		R ²	Error estándar de ajuste
Vertiente Norte						
a	6,949950960	0,352553534	5,971105427	7,928796494	0,9980822341	0,0844653261
b	0,002248847	0,000895864	-0,00023847	0,004736164		
c	3,295861638	0,217500352	2,691983851	3,899739424		
Vertiente Sur						
a	6,067912769	0,32855465	5,15569882	6,98012672	0,9988855	0,0568231007
b	0,001604955	0,000596991	-5,26E-05	0,00326247		
c	3,242164577	0,183473223	2,73276125	3,75156791		

Otra reducción importante acontece en el tiempo de duración de la inundación ya que en ambas vertientes se han obtenido reducciones del 30 %, lo cual pone de manifiesto el impacto de las estructuras de drenaje en la cuenca analizada. En la figura 17, a) y b), se contrastan los escurrimientos instantáneos de cada vertiente para $T_r = 10$ años. La capacidad de la cuenca urbana de Marzal para recuperarse de un evento con cierta probabilidad de ocurrencia es mayor que en las condiciones actuales. En la tabla 10 se muestra una comparación de los volúmenes escurridos para este evento se ilustra en la tabla 7, donde es posible comprobar que las reducciones en los volúmenes escurridos son del orden de 45 % y 70 % para las vertientes Norte y Sur respectivamente.

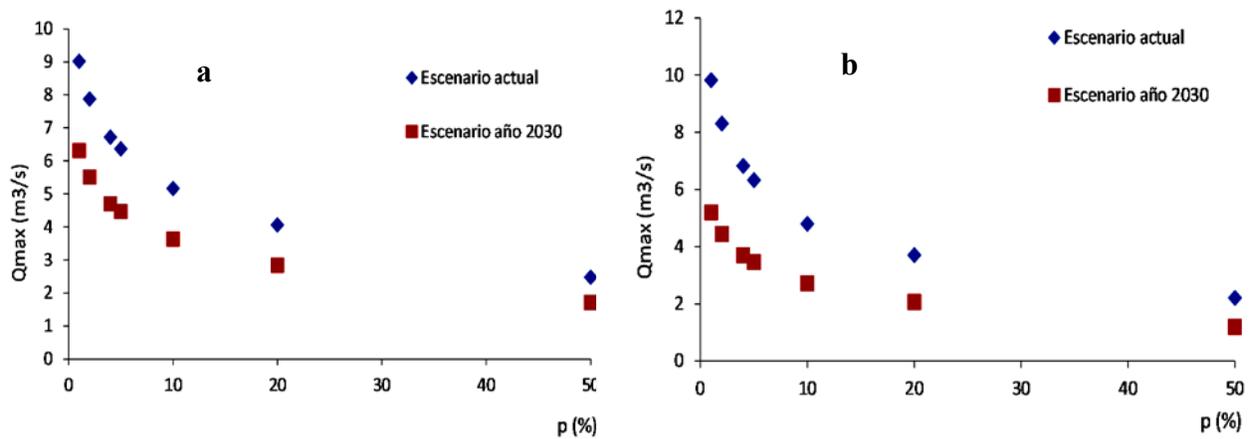


Figura 16. Comparación de los caudales máximos simulados para los escenarios actual y con respecto al año 2030 en las vertientes: a) Norte y b) Sur del barrio Marzal

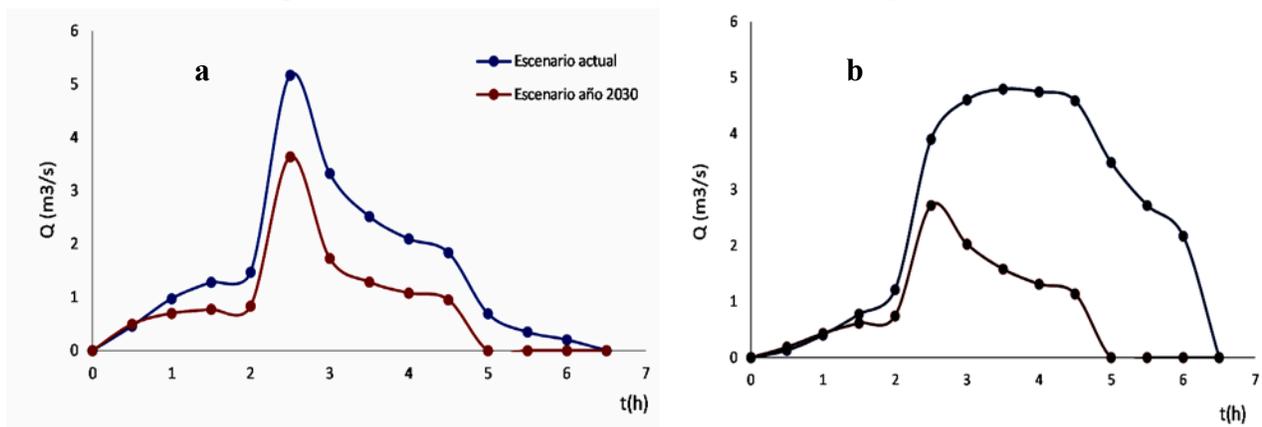


Figura 17. Comparación de los caudales instantáneos simulados en las vertientes: a) Norte y b) Sur del barrio Marzal relativo a un período de retorno $T_r = 10$ años

Tabla 10. Volúmenes escurridos para un evento lluvioso con $T_r = 10$ años en Marzal

Vertiente	Volúmenes escurridos $T_r = 10$ años (m^3)		$\Delta V = V - V^*$ (m^3)	$\Delta(\%) = 100 \left(\frac{\Delta V}{V} \right)$
	Escenario actual (V)	Escenario año 2030 (V^*)		
Norte	36669.6	20676.28	15993.32	43.6
Sur	60242.97	19346.64	40896.33	67.9

CONCLUSIONES

La experiencia llevada a cabo con el MDNL para el pronóstico preliminar de caudales máximos en la cuenca urbana correspondiente en el barrio Marzal a partir de hietogramas sintéticos ha resultado satisfactoria en esta etapa de trabajo, al constituir la antesala para la aplicación inmediata de modelos hidrológico-hidráulicos de mayor robustez. Se considera que los resultados obtenidos son representativos para el escenario actual y para futuro hasta el 2030.

Resulta de vital importancia la estimación de los parámetros de infiltración necesarios para cada una de las formaciones geológicas existentes en la cuenca urbana analizada al no existir referencias con base en datos de permeabilidad de los suelos. El empleo de las mediciones de campo efectuadas por SOGREA-H-COBA (2007) permitió aplicar el modelo de Horton el cual encontró elevados niveles de correlación.

La aplicación del MDNL arrojó diferentes comportamientos de los hidrogramas de respuesta de cada una de las vertientes de la cuenca urbana de Marzal, donde se pudo comprobar que en la vertiente Sur por presentar una pendiente muy suave, provoca un efecto de laminación del flujo y por tanto mayor retención que en la vertiente Norte. Al evaluar las soluciones de diseño aportadas por UTGSL (2012) para un periodo de retorno $T_r = 10$ años, se pudo comprobar que existe una disminución significativa de los volúmenes escurridos (entre 44 y 68 % aproximadamente) para cada una de las vertientes de la cuenca de Marzal, existiendo además una reducción de 1,5 horas en relación con la duración de la avenida para dicho periodo de retorno, lo que permite evaluar el beneficio de contar en dicho barrio con sistemas de drenaje que en la actualidad no funcionan adecuadamente o han colapsado en su totalidad.

RECONOCIMIENTO

Los autores desean agradecer al personal de la Unidad Técnica de Saneamiento de Luanda (UTGSL) por toda la información brindada para el desarrollo de la investigación en curso.

REFERENCIAS

- Barco J.; Wong K.M and Stenstrom M.K.** (2008). "Automatic Calibration of the U.S. EPA SWMM Model for a Large Urban Catchment". Journal of Hydraulic Engineering. Vol. 134, No. 4, April, pp. 466-474. ISSN 0733-9429/2008/4-466-474.
- Chow, V. T.** (1959). "Open Channel Hydraulics". McGraw-Hill Book, New York.
- Chow V. T.; Maidment D. R. and Mays L. W.** (1994). "Hidrología Aplicada". McGraw -Hill Interamericana S.A., Santafé de Bogotá, Colombia.
- Domingos da Silva, D; Escartín E. y Jiménez G. C.** (2013). "Creación del modelo digital de elevaciones de una zona urbana para la simulación de inundaciones". (Trabajo inédito).
- EPA** (2005). "User's Manual, SWMM 5.0". Environmental Protection Agency, EPA, USA.
- León A. J. F. y Martínez Y.** (2013). "Hidráulica de las Conducciones Libres". Editorial Félix Varela. La Habana. ISBN 978-959-07-1867-0.
- Macor J. L.** (2002). "Análisis comparativo del parámetro ancho de cuenca del modelo RUNOFF-SWMM". Ing. Hidráulica en México. Vol. XVII, No. 2, pp. 17-26, abril-junio.
- Riccardi G.** (2000). "Modelación de escurrimiento en cuenca urbana con interacción entre sistemas mayor y menor". Centro Universitario Rosario de Investigaciones Hidroambientales. FCEIA- CIUNR-UNR. Rosario. Argentina.
- Sánchez L.A** (2012). "Modelación integrada de sistemas de drenaje pluvial urbano en zonas predominantemente llanas". Tesis de Doctorado. Centro de Investigaciones Hidráulicas, Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría (Cujae). La Habana. Cuba.
- SOGREA-H-COBA** (2007). "Revisao do Plano Director de Saneamento de Luanda. Relatório Final". Gobierno Provincial de Luanda. Empresa de Limpeza y Saneamento de Luanda, ELISAL. República de Angola.
- UTGSL** (2012). "Proyecto Ejecutivo. Programa de Requalificasao de Bairros de Luanda: Bairro do Marzal". Unidad Técnica de Saneamiento de Luanda. Angola.