



PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATOLICA DE CHILE
ESCUELA DE INGENIERIA

EFECTO Y RELEVANCIA DE LA RED ARTIFICIAL DE DRENAJE Y LA DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE IMPERMEABILIDAD EN LOS IMPACTOS HIDROLÓGICOS

MICHELLE THENOUX ACUÑA

Tesis para optar al grado de
Magister en Ciencias de la Ingeniería

Profesor Supervisor:
JORGE GIRONÁS LEÓN

Santiago de Chile, agosto, 2013

© 2013, Michelle Thenoux Acuña



PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATOLICA DE CHILE
ESCUELA DE INGENIERIA

EFFECTO Y RELEVANCIA DE LA RED ARTIFICIAL DE DRENAJE Y LA DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE IMPERMEABILIDAD EN LOS IMPACTOS HIDROLÓGICOS

MICHELLE THENOUX ACUÑA

Tesis presentada a la Comisión integrada por los profesores:

JORGE GIRONÁS LEÓN

BONIFACIO FERNÁNDEZ LARRAÑAGA

ALFONSO MEJÍA

JOSÉ CEMBRANO PERASSO

Para completar las exigencias del grado de
Magister en Ciencias de la Ingeniería

Santiago de Chile, agosto, 2013

A mi familia y a los que siempre nos
están apoyando y guiando desde
arriba.

AGRADECIMIENTOS

Al momento de finalizar esta etapa, larga, quiero agradecer de todo corazón a mis padres por darme siempre la opción de estudiar, con incondicional amor, confianza y entrega durante todo este periodo universitario.

Reconocer también a mis hermanos, Angelita y familia por sus constantes apoyos y ánimos de seguir adelante. A Sebastián por el cariño, confianza y permanente compañía. A mi gran compañera Malú por ese silencio tan acogedor. A todos uds. muchas gracias por siempre estar ahí.

Un especial agradecimiento a Jorge Gironás, profesor supervisor, por ser un gran guía y maestro, por sus sabios consejos y permanente apoyo, por su tiempo y ayuda para lograr los objetivos planteados.

Al Dr. Alfonso Mejía por darme acceso a su modelo de distribución utilizado en este trabajo, por entregarme el tiempo, desde tan lejos, para colaborar en esta investigación y ser parte de la comisión.

A los profesores Bonifacio Fernández y José Cembrano por su participación como miembros de la comisión y por sus valiosos aportes para esta investigación.

Un cariñoso reconocimiento a todos mis amigos y compañeros del departamento de postgrado por acompañarme incondicionalmente, especialmente por esos momentos de alegría y lindas experiencias que hemos vivido juntos.

No puedo dejar de mencionar a Santa Teresita de los Andes y a todos los que nos guían desde arriba, por darme la fuerza y la fe en los momentos de debilidad y dificultad, por acompañarme a lo largo de este camino que termina, pero que a la vez comienza.

Finalmente, agradecer el apoyo de FONDECYT (Proyecto 11090136) y CEDEUS, Centro Conicyt/Fondap/15110020. Al generoso apoyo financiero de la fundación San Carlos de Maipo con la beca Arturo Cousiño Lyon.

INDICE GENERAL

Pág.

DEDICATORIA.....	ii
AGRADECIMIENTOS	iii
INDICE DE TABLAS	v
INDICE DE FIGURAS.....	vi
RESUMEN.....	vii
ABSTRACT.....	ix
1. Introducción.....	1
2. Área de Estudio y procesamiento del terreno.....	6
2.1. Distribución del Área Impermeable.....	8
3. Modelo de Generación de Tuberías.....	9
3.1. Diseño de Diámetros.....	11
4. Modelo Hidrológico.....	13
4.1. Calibración del Modelo.....	14
5. Análisis y Resultados.....	19
5.1. Efecto conjunto de la impermeabilidad y nivel de cobertura de la red	19
5.2. Efecto de la impermeabilidad en la generación de la red de drenaje	21
5.3. Impacto de la red de drenaje artificial en la respuesta hidrológica	22
6. Conclusiones.....	34
BIBLIOGRAFIA.....	37

INDICE DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Eventos de precipitación usados para la calibración.....	15
Tabla 2. Eventos de precipitación usados para la calibración del modelo hidrológico.	17

INDICE DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Escenarios de impermeabilidad con la red de drenaje.....	11
Figura 2. Comparación de los caudales observados y los simulados.....	17
Figura 3. Efecto de la impermeabilidad promedio y nivel de cobertura.....	20
Figura 4. Función de densidad de probabilidad (PDF) del largo de las tuberías.....	22
Figura 5. Respuesta hidrológica para los escenarios de distribución de 10%.....	24
Figura 6. IUH para diferentes intensidades de lluvia para los escenarios.....	26
Figura 7. Función de densidad acumulada (CDF) del tiempo de viaje.....	27
Figura 8. Función de probabilidad acumulada (CDF) de λ	28
Figura 9. Respuesta hidrológica para los escenarios de distribución de 40%.....	30
Figura 10. Efecto de las tuberías en la cuenca urbanizada.....	33

RESUMEN

Las ciudades y el crecimiento urbano causan significativos impactos ambientales y sociales, los cuales eventualmente podrían ser mejorados o reducidos durante el proceso de planificación urbana. Desde el punto de vista de la hidrología, la impermeabilidad y la compactación de los suelos naturales son uno de los principales problemas que trae consigo la urbanización de cuencas. Estudios previos demuestran y cuantifican los efectos de la distribución de la impermeabilidad en una cuenca, tanto en los volúmenes y caudales de escorrentía, como en la calidad e integridad de cauces y cuerpos receptores. Por otra parte, algunos estudios han investigado la distribución óptima de impermeabilidad, basados en la simulación de diferentes escenarios de cambio de uso de suelo y sus efectos sobre la escorrentía, sobre todo en la salida de la cuenca. Sin embargo, estos estudios típicamente no abordan el impacto del sistema artificial de drenaje asociado con los escenarios de impermeabilidad, a pesar de que se sabe que la cobertura de alcantarillado afecta a la acumulación de flujo y en la generación de hidrogramas de escorrentía. Este estudio busca cuantificar el efecto y relevancia del sistema artificial al evaluar los impactos hidrológicos de la distribución espacial de impermeabilidad, así como determinar las características de esta influencia. Con tal objeto, se acopla un modelo existente de distribución de impermeabilidad basado en cambios del uso de suelo, con otro modelo desarrollado para generar automáticamente redes artificiales de drenaje. Estos modelos se aplican a una cuenca natural para generar distintos escenarios de impermeabilidad y alcantarillado, que se evalúan con un modelo morfo-climático de generación de hidrogramas unitarios instantáneos. Primero se prueba la capacidad de este método para representar los efectos conjuntos de la impermeabilidad (nivel y distribución) y cobertura de tuberías. Posteriormente se cuantifican los efectos de estas variables en la respuesta hidrológica, teniendo en cuenta diferentes períodos de retorno con el fin de analizar la variabilidad del régimen de precipitación. En general, se muestra que la distribución y la cobertura espacial del sistema de tuberías afectan la respuesta hidrológica, y que estos efectos dependen del grado de impermeabilidad y las características de la precipitación. Los resultados de esta investigación sirven para mejorar nuestra comprensión de cómo las

decisiones de planificación urbana pueden contribuir a minimizar los impactos hidrológicos y ambientales del desarrollo urbano.

Palabras claves: red de drenaje, impermeabilidad, escorrentía, distribución óptima, tuberías.

ABSTRACT

Cities and urban growth have relevant environmental and social impacts, which could eventually be enhanced or reduced during the urban planning process. From the point of view of hydrology, impermeability and natural soil compaction are some of the main problems that urbanization brings to watershed. Previous studies demonstrate and quantify the impacts of the distribution of imperviousness in a watershed, both on runoff volumes and flow, and the quality and integrity of streams and receiving bodies. Moreover, some studies have investigated the optimal distribution of imperviousness, based on simulating different scenarios of land use change and its effects on runoff, mostly at the outlet of the watershed. However, these studies typically do not address the impact of artificial drainage system associated with the imperviousness scenarios, despite it is known that storm sewer coverage affects the flow accumulation and generation of flow hydrographs. This study seeks to quantify the effects and relevance of the artificial system when it comes to assess the hydrological impacts of the spatial distribution of imperviousness and to determine the characteristics of this influence. For this purpose, an existing model to generate imperviousness distribution scenarios is coupled with a model developed to automatically generate artificial drainage networks. These models are applied to a natural watershed to generate a variety of imperviousness and storm sewer layout scenarios, which are evaluate with a morphoclimatic instantaneous unit hydrograph model. I first tested the ability of this approach to represent the joint effects of imperviousness (i.e. level and distribution) and storm sewer coverage. I then quantified the effects of these variables on the hydrological response, considering also different return period in order to take into account the variability of the precipitation regime. Overall, I show that the layout and spatial coverage of the storm sewer system affect the hydrologic response, and that these effects depend on the degree of imperviousness and the characteristics of the precipitation. Results of this research improve our understanding on how urban planning decisions can contribute to minimize the hydrologic and environmental impacts of urban development.

Keywords: sewer system, imperviousness, runoff, optimal distribution, pipes.

1. INTRODUCCIÓN

La Organización de las Naciones Unidas, señala que a partir del 2008 más gente en el mundo vive en zonas urbanas que en áreas rurales (United Nations, 2009). Esta creciente urbanización ha evidenciado la necesidad de compatibilizar el desarrollo urbano con la sustentabilidad, calidad de los ríos y recursos hídricos. La alteración del suelo sin un adecuado control de aguas lluvias modifica los procesos del ciclo hidrológico, reduciendo los rangos de infiltración e incrementando la escorrentía máxima y su volumen (Leopold, 1968). Estos cambios afectan tanto la cuenca como su cauce (Roesner et al., 1998; Moglen and Kim, 2007), aumentando el volumen y los caudales máximos de escorrentía directa durante el evento de precipitación, disminuyendo los tiempos de respuesta y la evapotranspiración por la remoción vegetal, y aumentando la cantidad y cargas de contaminantes (Carter, 1961; Schueler, 1994; Roesner et al., 1998, Tang et al., 2005; Moglen and Kim, 2007; Mejía and Moglen, 2010; Jacobson, 2011). Los cauces urbanos se erosionan creciendo el transporte de sedimentos en suspensión, degradándose el hábitat y la biodiversidad de éstos (Carter, 1961; Mejía and Moglen, 2010; Jacobson, 2011). Además, aumenta la tasa de eutroficación afectando la calidad del agua (Roesner et al., 1998; Mejía and Moglen, 2010). Finalmente, el crecimiento urbano afecta los asentamientos aguas abajo ya existentes, trayendo cambios en la cantidad y calidad del agua utilizados por ellos (Sivapalan et al., 2012). En general, estos problemas pueden ser mitigados dependiendo de las condiciones de la localidad, la distribución de la urbanización, el manejo de las aguas lluvias, el clima, la geografía y las condiciones de la cuenca (Mejía and Moglen, 2010).

La impermeabilidad es típicamente utilizada para cuantificar el impacto del desarrollo urbano en la hidrología, el hábitat, la calidad del agua y la biodiversidad del sistema acuático (Schueler, 1994; Roesner et al., 1998; Mejía and Moglen, 2010). Con el objeto de prevenir o controlar estos impactos, se ha buscado definir umbrales máximos de impermeabilidad. Varios estudios han establecido que para mantener la estabilidad geomorfológica de los cauces urbanos, sus funciones hidrológicas y diversidad acuática la impermeabilidad no debiese ser mayor al 10% (Booth and Reinelt, 1993; Schueler, 1994; Roesner, 1998; Moglen and Kim, 2007; Wilson, 2011). Sin embargo, el porcentaje de impermeabilidad de una cuenca es un indicador demasiado grueso, haciéndose necesario considerar los patrones espaciales de impermeabilidad, los que combinados con la variabilidad espacio-temporal propia de los procesos hidrológicos pueden afectar la respuestas hidrológicas (Tang et al. 2005; Yeo et al., 2007; Mejía and Moglen, 2010).

Diversos estudios confirman la importancia de la distribución espacial de los distintos tipos de uso de suelo, y sus efectos en la respuesta hidrológica de la cuenca, los tiempos de respuesta y el caudal máximo (Poff et al., 2006; Chormanski et al., 2008; Randhir and Tsvetkova, 2011; Richert et al., 2011; Yang et al., 2011; Colin et al., 2012). Estos no proponen patrones óptimos de impermeabilidad o metodologías para identificarlos, lo que sí es hecho por otras investigaciones. Moglen (2000) demostró la importancia de la distribución y organización del uso de suelo utilizando el método Curva Número, considerando distintos tipos de uso de suelo con su correspondiente capacidad de infiltración. Por otra parte, Yeo et al. (2003) utilizaron un modelo de base física y otro estadístico para definir patrones espaciales de uso de suelo que minimicen la escorrentía y transporte de contaminantes a la salida de la cuenca. Este estudio determinó que las

urbanizaciones deben ubicarse en pequeñas zonas de baja densidad lejos del cauce principal y de la salida de la cuenca. Yeo et al. (2007) exponen un modelo que jerarquiza los distintos usos de suelo en la cuenca integrando la hidrología, aplicando un análisis de regresión para determinar esta distribución. Los resultados obtenidos son similares a su estudio anterior. Mejía y Moglen (2009) desarrollan un modelo que busca una distribución óptima para el crecimiento urbano, minimizando el caudal máximo a lo largo de los cauces de la cuenca. Estos autores encontraron distintos patrones para la distribución de la urbanización: agrupando las zonas impermeables cerca del cauce, expandiéndolo aleatoriamente por la cuenca y agrupando las celdas impermeables aguas arriba. El mejor resultado se obtiene al agrupar asentamientos aguas abajo, cerca de la salida. Mejía y Moglen (2010) analizaron el efecto de la variabilidad temporal y espacial de la precipitación en el estudio de la distribución espacial de impermeabilidad, verificando lo expuesto por los mismos el 2009.

Es conocida la importancia de los elementos de conducción y su configuración en la respuesta hidrológica, tanto en cuencas naturales (Rodríguez-Iturbe and Rinaldo, 1997) como en cuencas urbanas (Lhomme et al., 2004; Rodríguez et al., 2003; Rodríguez et al., 2005; Gironás et al., 2009; Gironás et al., 2010; Meierdiercks et al., 2010; Rodríguez et al., 2013). De hecho, los trabajos pioneros de Leopold (1968) y Rantz (1971) muestran cómo el caudal máximo para un cierto periodo de retorno crece aún más para dos cuencas con la misma impermeabilidad promedio, pero con un mayor porcentaje de cobertura de la red de drenaje pluvial. Luego, Graf (1977) muestra la importancia de evaluar los cambios que trae consigo el aumento de la red de drenaje. En su estudio mostró que al aumentar la urbanización en zonas rurales crece drásticamente la red de drenaje global en relación a la

red de drenaje natural, lo que implica un aumento en la densidad de drenaje, y con esto una recolección de escorrentía subsuperficial más rápida, disminuyendo la escorrentía superficial. Sin embargo, ninguno de los estudios sobre distribución óptima de impermeabilidad previamente mencionados cuantifica el impacto que puedan tener los conductos artificiales, particularmente tuberías, correspondientes a las distintas configuraciones de impermeabilidad. Así entonces, se desconoce la real relevancia de considerar la presencia, y distribución espacial de estos elementos al momento de cuantificar, y optimizar el efecto hidrológico y ambiental del cambio de uso de suelo.

El objetivo de este estudio es entender y cuantificar el efecto de considerar elementos de drenaje artificial, al evaluar el impacto de distintas distribuciones espaciales de impermeabilidad sobre la respuesta hidrológica de la cuenca. Se busca expandir el enfoque de trabajos recientes que sólo evalúan el efecto hidrológico en función de la ubicación de la impermeabilidad, sin considerar los nuevos elementos de drenaje artificial asociados. Para este propósito, se crea un modelo de generación de tuberías de densidad espacial variable, el cual se aplica a una cuenta previamente estudiada. Luego, se implementó y calibró un modelo hidrológico de base morfológica que permitió evaluar las distintas configuraciones de la red de tuberías asociadas a distintos escenarios de impermeabilidad. Este modelo permite cuantificar los efectos de las tuberías sobre la respuesta hidrológica frente a diferentes precipitaciones.

La estructura de este estudio es la siguiente: La primera sección describe el área de estudio y características del terreno, junto con el modelo de distribución de impermeabilidad seleccionado. Luego, se presenta el modelo de generación de tuberías y el

modelo hidrológico. En las últimas secciones se realiza un análisis de resultados, para terminar con las conclusiones de la investigación.

2. ÁREA DE ESTUDIO Y PROCESAMIENTO DEL TERRENO.

En este estudio utilizó la cuenca Cattail Creek, Howard County, Md. Esta fue previamente estudiada por Mejías y Moglen (2009) con su modelo de distribución óptima de impermeabilidad, el cual será implementado en esta investigación. Para la zona analizada se cuenta con un modelo de elevación digital (MED) con una resolución de 27,9 m (USGS, 2011), el que se procesó con ArcGIS para obtener la delimitación de la cuenca y otras propiedades geomorfológica de la cuenca. La cuenca tiene un área contribuyente de 58,1 km² y su punto de salida está en la coordenada 39,259°, -77,055° (latitud, longitud).

Con la cuenca seleccionada, se debe identificar los cursos naturales de agua. Para establecer el nacimiento de los cauces en el DEM se utilizó el método del área contribuyente crítica o *area threshold*, según el cual se requiere un área mínima para iniciar un cauce (Band, 1986, 1989; Zevenbergen and Thorne, 1987; Foufoula–Georgiou and Montgomery, 1993). Para esto se utilizó el método propuesto por Tarboton et al. (1991, 1992), según el cual el área umbral se puede identificar como aquella para la cual se produce un cambio de régimen en el gráfico que relaciona, para cada del celda dentro de la cuenca, la pendiente local y el área drenada.

Los ríos cambian constantemente su geomorfología; el incremento del ancho, profundidad y velocidad promedio aguas abajo están muy relacionados con el aumento del caudal. Para estimar el ancho del cauce B (L) se usó la ley de potencias $B = a Q^b$, donde Q corresponde al caudal anual promedio. Considerando la relación $Q \propto A_d^{0.75}$ propuesta por Leopold et al. (1995) se tiene:

$$B = \alpha A_d^\beta \quad (1)$$

donde A_d (L^2) el área contribuyente, α y β son constantes. Para calcular las constantes se utilizaron los datos de tres estaciones del USGS ubicadas en distintos puntos del cauce principal de la cuenca (i.e. estaciones 01591000, 01591400 y 01591610) y los correspondientes valores de B y A_d en esos puntos. Los valores ajustados correspondieron a $\alpha = 0,0273$ y $\beta = 0,3214$. En este caso $b = 0,3253$, valor que se encuentra en el rango citado por Leopold et al. (1995) para ríos de Estados Unidos, según el cual $b = 0,26 - 0,5$.

Además, para este estudio se requieren datos de precipitación real, impermeabilidad actual y tipos de suelo para la cuenca. Para esto se seleccionan distintas estaciones meteorológicas de MesoWest Data (University of Utah), y con el método de polígonos de Thiessen en GIS se ubican las estaciones influyentes en la cuenca, Woodbine y Dayton (DW0819 y K3CHZ, respectivamente). Además, del USGS se obtiene el mapa de impermeabilidad, donde la impermeabilidad real promedio de la cuenca es 1,2%, y los datos de esorrentía de la cuenca de la estación Cattail Creek near Glenwood, Md (01591400). Para extraer el flujo base de la esorrentía en cada uno de los eventos analizados se utilizó el método descrito por McCuen (1986) según el cual se traza una línea recta desde el inicio de la crecida hasta el punto de inflexión del receso. El mapa de tipos de suelo se adquirió de SSURGO Downloader, y se procesaron con el documento “Soil Survey of Howard County, Maryland” (USDA-NRSC, 2003). En la cuenca real no se considera el uso de tuberías en los datos obtenidos. Para asegurar la producción de esorrentía por parte del modelo hidrológico, para suelos totalmente permeables se asume como impermeabilidad mínima un 1%. Lo anterior es recomendado por el Urban Drainage Flood Control District (2008) para suelos naturales.

2.1.Distribución del Área Impermeable.

La distribución espacial de impermeabilidad se incorpora al modelo a través de tres escenarios o patrones de impermeabilidad. Estos se eligen por ser representativos de distintas posibles formas de urbanizar, lo que permite identificar y cuantificar el efecto de la red artificial de drenaje para distintos patrones claramente diferentes. Un primer patrón corresponde a una distribución aleatoria de impermeabilidad (escenario RD), el cual busca repartir los efectos de la urbanización por toda la cuenca. Los otros dos escenarios se generan utilizando el modelo propuesto por Mejía y Moglen (2009) para localizar la impermeabilidad aguas abajo (escenario DS) y aguas arriba (escenario US) en la cuenca. En su estudio, Mejías y Moglen (2009) muestran como el escenario DS minimiza los aumentos del caudal máximo en todos los cauces de la cuenca, mientras que el escenario US los maximiza.

Para determinar la cantidad de área impermeable a distribuir espacialmente se usó el modelo de cubierta impermeable de Schueler et al. (2009). Se suponen cuatro posibles valores porcentuales de impermeabilidad diferentes en las celdas con impermeabilidad (i.e. 1,0 - 0,75 - 0,5 - 0,25). Finalmente, este escenario RD se reordena generándose los escenarios US y DS con el algoritmo propuesto por Mejías y Moglen (2009). La Figura 1 muestra los tres escenarios de impermeabilidad, siendo los paneles a, b y c los escenarios RD, US y DS respectivamente.

3. MODELO DE GENERACIÓN DE TUBERÍAS

Para la modelación del sistema de tuberías pluviales se desarrolló en Matlab una versión simplificada del modelo estocástico propuesto por Möderl et al. (2009) para generación de tuberías. El nuevo modelo utiliza fuertemente la información morfológica y de uso de suelo de la cuenca. No se considera la creación ni de la red sanitaria ni de una red unitaria de aguas lluvias y aguas servidas. Tampoco se considera la creación de unidades de almacenamiento y vertederos, ni la presencia de calles.

El modelo primeramente crea una matriz con el área acumulada de la superficie impermeable, la que es usada para definir nodos correspondientes a los extremos iniciales y finales de las tuberías a crear. Se asume que estos nodos tienen siempre la misma profundidad con respecto a la superficie local del terreno. Los nodos se generan cuando se alcanza un valor umbral definido de área mínima impermeable acumulada ($\check{A}$). Cuando el modelo encuentra una celda con el valor $\check{A}$, ésta se define como nodo y se resta el área contribuyente a esta locación a toda matriz de área acumulada impermeable. El proceso se repite hasta que no haya ninguna celda cuya área impermeable contribuyente iguale o supere $\check{A}$. Por lo tanto, valores bajos de $\check{A}$ significarán un mayor número de nodos generados, y una mayor densidad de la red de tuberías.

Para crear las tuberías entre los nodos el modelo obedece al siguiente proceso. Primero, se selecciona el nodo inicial y busca el nodo final según su dirección de flujo (criterio 1). Luego, se comprueba si existe algún nodo o un cauce cerca al nodo inicial. Si la distancia entre el nodo inicial y este nodo o cauce vecino es menor que la encontrada con el criterio 1, este nodo o cauce pasa a ser el nodo final (criterio 2). Si ocurre esto último, el modelo

crea una matriz de flujo con la nueva dirección en caso de necesitarse un cambio, teniendo en cuenta de no modificar en forma abrupta la dirección de flujo.

La elección del valor de $\check{A}$ permite generar densidades de tuberías similares a las reportadas en otras cinco cuencas urbanas de impermeabilidad conocida (Gironás et al, 2009; Meierdiercks et al., 2010). Estos estudios reportan valores de densidad de tuberías para el área total de la cuenca entre 4,7 y 9,1 km/km², con porcentajes de impermeabilidad entre 30,8 y 46,7 %. La densidad de tuberías para el área impermeable se calcula como la razón entre el largo total de tuberías y el área impermeable de la cuenca. Por lo tanto, para estas cuencas se obtienen valores entre 10,1 y 29,4 km_{tubería}/km²_{Aimp}, asumiéndose entonces un rango típico de densidad de tuberías entre 10 y 30 km_{tubería}/km²_{Aimp}. Para la aplicación del modelo de tuberías se elige un valor de $\check{A} = 3920 \text{ m}^2$ (i.e. 5 celdas impermeables), tal que la densidad de drenaje es de 21,5 km_{tubería}/km²_{Aimp} para el escenario aleatorio. Este valor de $\check{A}$ significa densidades de 21,8 y 13,9 km_{tubería}/km²_{Aimp} para los escenarios US y DS respectivamente. Finalmente los largos totales de tuberías para los escenarios RD, US y DS son de 125, 126,6 y 80,5 km, lo que demuestra el impacto que puede tener la distribución espacial de impermeabilidad sobre la distribución y densidad de la red de drenaje. Los tres escenarios con la red de tuberías generada con el modelo se representan en la Figura 1.

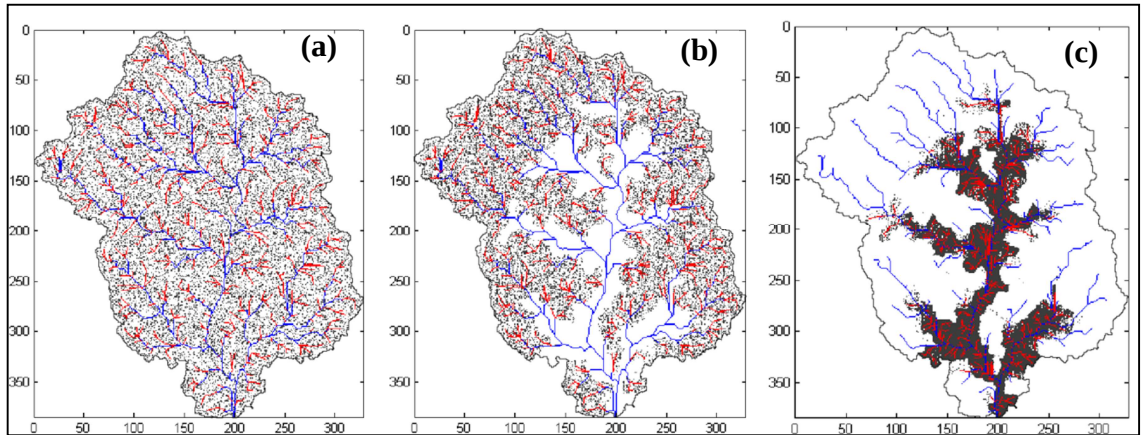


Figura 1. Escenarios de impermeabilidad con la red de drenaje, donde el área impermeable es gris, los ríos azules y las tuberías rojas.

3.1. Diseño de Diámetros

El dimensionamiento de una red de tuberías requiere definir el diámetro de éstas en función de la capacidad de transporte que se quiera proveer. En este análisis no se pretende calcular los diámetros óptimos, sino más bien definir valores de esta variable en los distintos elementos de transporte similares a los que se utilizarían en condiciones reales. Siguiendo lo propuesto por Möderl et al. (2009), el diámetro de las tuberías se diseña a partir de igualar el caudal contribuyente en un cierto punto (Q_r), con el caudal (Q_x) que transportaría la sección llena de una tubería de diámetro D , (2). Para considerar la capacidad de almacenamiento y atenuación asociada a mayores áreas, se le asigna al área impermeable acumulada en la celda, A_{imp} (ha), la relación de área descarga, $Q \propto A_{imp}^{0.75}$ (Leopold et al., 1995). Luego, con las ecuaciones (2) y (3) se puede calcular el diámetro D en mm.

$$Q_r = I_{d(a)} A_{imp} = v \frac{D^2 \pi}{4} = Q_x \quad (2)$$

$$D = 20000 \sqrt{\frac{(I_{d(a)}/360) A_{imp}^{0.75}}{v \cdot \pi}} \quad (3)$$

donde, $I_{d(a)}$ es la intensidad de lluvia (mm/h) en un cierto intervalo de duración, d (min), para un periodo de retorno a (años), y v es la velocidad en la tubería (m/s). El manual de aguas lluvias de Howard County (2010), donde se encuentra la cuenca, recomienda una lluvia de 10 años de periodo de retorno, y velocidades de tuberías entre 0,6 y 7,6 m/s, para el diseño de conductos de drenaje. Se asume entonces una velocidad $v = 2$ m/s y una duración $d = 60$ min, por lo que la intensidad de diseño está dada por $I_{60(10)} = 63,5$ mm/h.

4. MODELO HIDROLÓGICO

Para el cálculo de la respuesta hidrológica en la evaluación de los distintos escenarios propuestos, se utiliza el modelo hidrológico U-McIUH (Urban Morpho – Climatic Instantaneous Hydrograph, Hidrograma Instantáneo Urbano Morfo – Climático), propuesto por Gironás et al. (2009) para cuencas urbanas. Los datos para el modelo son el MED y la clasificación de las distintas celdas de la grilla según los típicos elementos que se observan en sistemas de drenaje urbano (laderas, calles, tuberías y cauces). Además hay archivos raster que identifican celda a celda otras propiedades geométricas de los conductos (i.e. pendiente, largos, rugosidad, geometría de secciones). El modelo considera dos tipos de abstracciones en la generación de escorrentía, por almacenamiento inicial (intercepción y almacenamiento en depresiones) y, por infiltraciones mediante un método de infiltración constante. Esta última abstracción sin embargo se simuló externamente al modelo U-McIUH usando el método de Horton. De esta manera, las precipitaciones ingresadas en el modelo corresponden al exceso de precipitación luego de la infiltración.

U-McIUH es un modelo del tipo SDTT (spatially distributed travel time) que utiliza un enfoque cuasi-lineal para simular el hidrograma de escorrentía. Para pulsos de precipitación efectiva de distinta intensidad el modelo calcula los tiempos de viaje desde cada ubicación dentro de la cuenca hasta la salida, definidos como la suma de tiempos a lo largo de todas las celdas que forman el camino de flujo correspondiente. La función de densidad de probabilidad de estos tiempos de viaje corresponde al hidrograma unitario instantáneo (HUI), el cual corresponde a uno de los resultados del modelo. Adicionalmente el HUI es utilizado para calcular la escorrentía generada por cada pulso. Finalmente, la superposición de estas respuestas da origen al hidrograma de respuesta frente a la tormenta.

El modelo considera el efecto en los tiempos de viaje tanto de la intensidad de precipitación, como de la contribución desde aguas arriba. Esto último se logra incorporando el parámetro λ , dado por la razón entre el área impermeable total contribuyente a cada celda y el área impermeable de ésta. De esta manera el tiempo de viaje asociado a cada celda incorpora implícitamente el caudal proveniente desde aguas arriba (Rodríguez-Iturbe et al., 1992, Rodríguez-Iturbe y Rinaldo, 1997). Este parámetro adimensional se calcula para todas las celdas de la cuenca, ya que la descarga aguas arriba depende del área contribuyente. Finalmente, el modelo considera el parámetro phi (ϕ) dado por la razón entre el largo total de las tuberías de la cuenca según una medición a partir del archivo raster, y el largo total real de las tuberías. Este valor se usa para evitar sobreestimar los largos de los conductos producidos por el modelo de tuberías, ya que ellas corresponden a grupos de celdas y no a archivos vectoriales. Para más detalle sobre el modelo, se recomienda consultar la referencia original correspondiente (Gironás et al. 2009)

4.1. Calibración del Modelo

El modelo hidrológico es primeramente calibrado utilizando eventos de precipitación, $\Delta t = 15$ min, y esorrentía reales de la cuenca, y considerando las condiciones actuales de uso de suelo (i.e. sin la red de tuberías). En estas condiciones se calibra el coeficiente de rugosidad de Manning, los parámetros de infiltración y el almacenamiento inicial de la cuenca. Para esto se tomaron los tres eventos de precipitación presentados en la Tabla 1.

Tabla 1.

Eventos de precipitación usados para la calibración.

Evento	Fecha inicial (d/m/y h:m)	Duración (hh:mm)	Precipitación Total (mm)	Intensidad Máx (mm/h)
1	30/09/2010 18:00	07:15	26,8	7,77
2	16/04/2011 15:15	08:45	24,3	25,09
3	09/07/2012 01:30	07:30	38,9	30,92

Los eventos de precipitación disponibles son usados en una primera instancia en una calibración manual con coeficientes de rugosidad de Manning típicos y constantes para poder determinar los parámetros de infiltración de Horton (i.e. tasa de infiltración inicial f_o , tasa de infiltración final f_c y decaimiento k). La mayor parte del suelo de la cuenca es loam, por lo que inicialmente se adoptaron valores referenciales de $f_c = 1,3$ mm/h y $k = 6$ h⁻¹ (Akan, 1993; Chin, 2006; Rossman, 2010). f_o se calibró para cada tormenta dado que es un parámetro dependiente de las condiciones iniciales, de manera de generar volúmenes de precipitación efectiva similares a los escurridos en cada evento. Finalmente para calibrar el valor del almacenamiento inicial (AI) y los coeficientes de rugosidad de Manning se ocupa el método Shuffled Complex Evolution Method (Duan et al., 1992), modelo efectivo y eficiente para encontrar el mejor resultado según una función objetivo. En este caso se busca maximizar el valor del coeficiente de eficiencia modificada (MCE) para cada evento, definido por (Legates and McCabe, 1999):

$$MCE = 1 - \frac{\sum_u |Q_{obs,u} - Q_{sim,u}|}{\sum_u |Q_{obs,u} - \bar{Q}_{obs,u}|} \quad (4)$$

donde $Q_{obs,u}$ es la escorrentía observada, $Q_{sim,u}$ es la escorrentía simulada, $\bar{Q}_{obs,u}$ es el promedio de las escorrentías observadas, y u indica cada intervalo de tiempo del periodo de simulación. Si el $MCE = 1$, se tendría una coincidencia exacta de lo simulado con lo

observado. Un valor de $MCE = 0$ indica que los valores simulados predicen las descargas observadas con la misma eficiencia que $\bar{Q}_{obs,u}$.

Los rangos de variación para cada uno de los parámetros de calibración se obtuvieron de la literatura. Por el almacenamiento inicial se utilizó el rango de 8 – 11 mm (Marsalek et al., 1996; Mansell, 2003; Butler and Davies, 2011). Para el coeficiente de rugosidad de Manning para zonas impermeables n_{imp} se usó el rango 0,010 – 0,018 (Gupta, 2008; Chin, 2006). Para el coeficiente de rugosidad de Manning para zonas permeables n_{per} , el rango 0,10 – 0,95 (Shen and Julien, 1993; Gupta, 2008; Chin, 2006). Finalmente, para el coeficiente de rugosidad de Manning en cauces n_{chan} se consideró el rango 0,04 – 0,25 (Fread, 1993).

En la tabla 2 se muestra la calibración de los distintos parámetros, incluido f_o según se discutió anteriormente para 3 eventos. También se presentan algunos indicadores de la calidad del ajuste adicionales al MCE, como son la relación entre los caudales máximos simulados y observados ($Q_{max}^{sim}/Q_{max}^{obs}$), y la relación de los volúmenes simulados y observados ($V_{max}^{sim}/V_{max}^{obs}$). Posteriormente esta calibración se validó con los mismos 3 eventos (s.1, s.2 y s.3) utilizando valores promedios de los parámetros ya calibrados. En general se puede observar que los flujos simulados y los observados son bastante similares, de modo que el modelo genera buenos resultados para los distintos eventos (i.e. $\overline{MCE} = 0,79$), sin importar sus magnitudes. A modo de ejemplo, la Figura 2 compara los hidrogramas observados y simulados para los eventos de validación con el peor (a), y mejor (b) MCE.

Tabla 2.

Eventos de precipitación usados para la calibración del modelo hidrológico (eventos 1, 2, 3) y posterior validación usando valores promedios de los parámetros (eventos s.1, s.2, s.3).

Evento	f_o (mm/h)	n_{imp}	n_{perm}	n_{can}	AI (mm)	MCE	$\frac{Q_{max}^{sim}}{Q_{max}^{obs}}$	$\frac{V_{max}^{sim}}{V_{max}^{obs}}$
1	80	0,0138	0,9494	0,2499	8,52	0,77	-	-
2	105	0,0149	0,4273	0,2107	8,86	0,82	-	-
3	135	0,0130	0,8308	0,2098	8,00	0,80	-	-
Mean		0,0139	0,7358	0,2235				
s.1	80	-	-	-	8,67	0,72	1,01	0,80
s.2	120	-	-	-	8,57	0,83	1,08	0,97
s.3	130	-	-	-	9,42	0,79	1,16	0,94

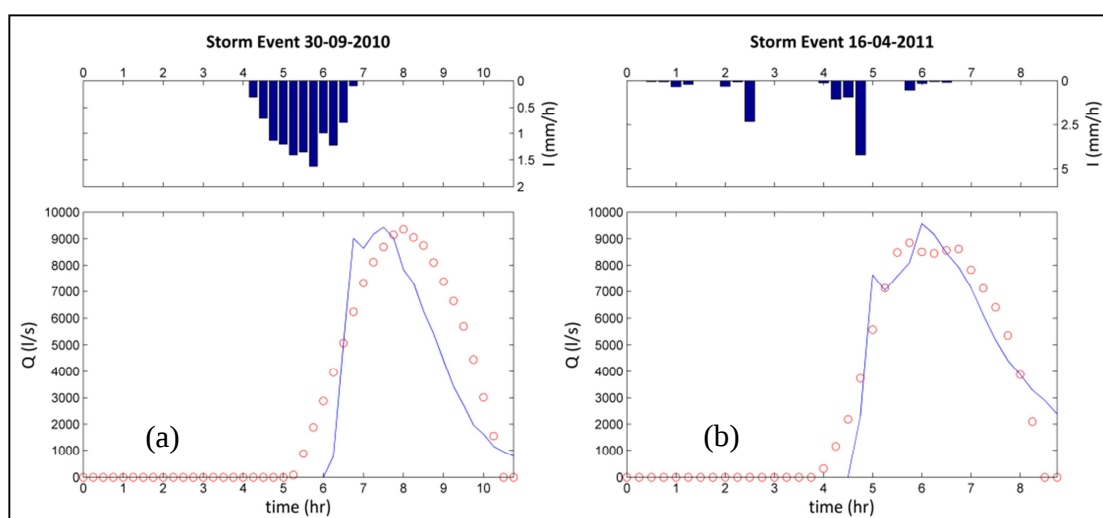


Figura 2. Comparación de los caudales observados (círculos) y los simulados (línea) después de la calibración.

En lo sucesivo se usará un valor de $f_o = 120$ mm/h y los coeficientes de rugosidad de Manning promedios encontrados con la calibración para las zonas impermeables, permeables y cauces. Por otra parte, para las tuberías se usará un coeficiente de Manning de 0,0242 (Gironás et al., 2009). Para el valor del almacenamiento inicial una vez

implementados los escenarios de impermeabilidad se considerará que el 25% del área impermeable de la cuenca no tiene almacenamiento, (i.e. estrategia similar a la adoptada en el modelo SWMM), mientras que el otro 75% tendrá un almacenamiento de 1,9 mm (Marsalek et al., 1996; Mansell, 2003; Butler and Davies, 2011). Para el área permeable se utilizará un almacenamiento inicial de 9,5 mm representativo del rango típico previamente identificado. Por lo tanto para un 10% de impermeabilidad, el almacenamiento inicial promedio de la cuenca corresponde a 8,7 mm.

5. ANÁLISIS Y RESULTADOS

5.1.Efecto conjunto de la impermeabilidad y nivel de cobertura de la red de drenaje

Previo al estudio detallado del caso base de este estudio (i.e. una impermeabilidad global del 10% distribuida espacialmente según 3 escenarios), es necesario validar la capacidad del modelo propuesto de poder incorporar el efecto conjunto de la impermeabilidad y la presencia de tuberías. Para tal propósito, se propone replicar el gráfico desarrollado por Leopold (1968), el cual muestra el efecto de la impermeabilidad promedio y nivel de cobertura de la red de tuberías en los aumentos del caudal máximo en condiciones urbanas. Para generar este gráfico se produjeron distintos escenarios espaciales de impermeabilidad aleatoria entre 0 y 50%, creándose para cada uno de ellos varias configuraciones de redes de tuberías diferentes en su nivel de cobertura. Estas diferencias se logran definiendo distintos valores de $\bar{A}$. Como impermeabilidad máxima se adopta 50%, valor que implica un desarrollo urbano total de la cuenca (Kibler, 1982). Para la generación de los escenarios de impermeabilidad se consideraron dos enfoques. En el primer enfoque (i.e. impermeabilidad homogénea), cada celda impermeable tiene impermeabilidad total de 1 (Figura 3 (a) y (b)). El segundo enfoque (i.e. impermeabilidad heterogénea) implica valores de impermeabilidad variable de [0,25 0,50 0,75 1] para cada celda impermeable (Figura 3 (c) y (d)). El modelo hidrológico permite calcular el caudal máximo a la salida de la cuenca para lluvias de 1 h de duración y periodo de retorno de 2 (Figura 3 (a), (c)) y 10 años (Figura 3 (b), (d)). Se utilizó las curvas IDF del manual de aguas lluvias de Howard County (Howard County Department of Public Works, 2010) para generar lluvias de intensidad constante de 43,2 y 63,5 mm/hr respectivamente.

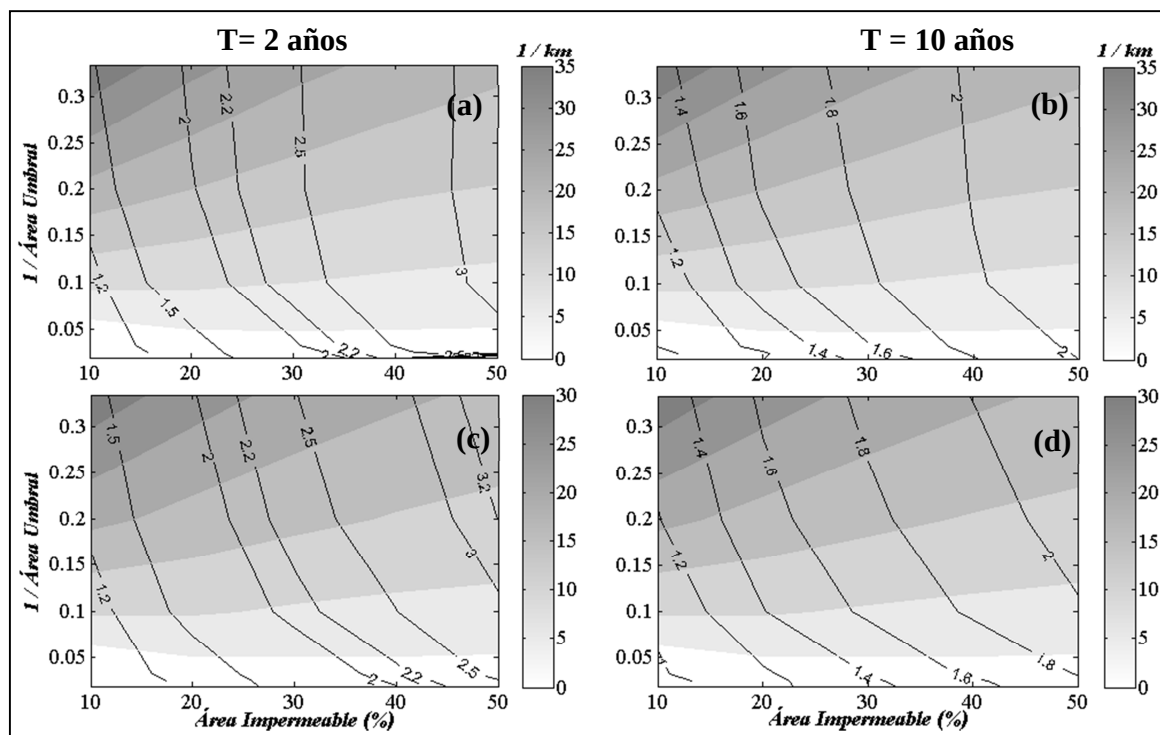


Figura 3. Efecto de la impermeabilidad promedio y nivel de cobertura de la red de tuberías en condiciones urbanas. Para $T = 2$ y 10 años. La escala de grises corresponde a la densidad de tuberías en $\text{km}_{\text{tub}}/\text{km}^2_{\text{AI}}$.

En los gráficos anteriores, el eje x corresponde a impermeabilidad promedio en la cuenca y, el eje y corresponde a una medida de cobertura de la red de tuberías dada por $1/\text{área mínima de servicio}$. Esta área mínima de servicio es el área necesaria para que se origine una tubería. Adicionalmente, el gráfico muestra la densidad de tuberías correspondientes representadas con la variación de colores en escala de grises. Los resultados muestran que la medida de cobertura determinada es razonable, ya que se obtienen valores acordes al rango previamente identificado de $10 - 30 \text{ km}_{\text{tubería}}/\text{km}^2_{\text{Aimp}}$. Como es de esperarse, los caudales aumentan con mayores densidades de tuberías y mayores impermeabilidades. Para bajas impermeabilidades los aumentos de escorrentía

son insensibles a la distribución de impermeabilidad (i.e. los aumentos de caudales para valores bajos de impermeabilidad son muy similares en los paneles a y c, y b y d), siendo entonces estos aumentos controlados por la cobertura de la red de tuberías. Con niveles de cobertura de drenaje bajos, es la impermeabilidad la que domina los aumentos en los caudales urbanos. En este caso además, la distribución y heterogeneidad de la impermeabilidad pasa a ser más relevante, y por lo tanto, se necesita un mayor porcentaje de impermeabilidad heterogénea para igualar los caudales producidos por el escenario con impermeabilidad homogénea. Finalmente, se aprecia que al aumentar el periodo de retorno de las lluvias de 2 a 10 años (i.e. comparando las Figuras 3 (a) y (c) vs. (b) y (d)), la razón entre los caudales máximos en condiciones urbanas y naturales disminuye. Esto ocurre porque con lluvias más grandes el suelo natural tiende a saturarse más rápidamente, y el almacenamiento de la cuenca en condiciones naturales y urbanas se asemeja más.

5.2.Efecto de la impermeabilidad en la generación de la red de drenaje artificial

Previamente se mencionó que el largo total de la red de drenaje depende del patrón de impermeabilidad. Ahora se procede a caracterizar en más detalle el efecto de la distribución de impermeabilidad en la configuración de la red de tuberías resultante. Con tal propósito, se calculó para cada escenario de impermeabilidad la función de densidad de probabilidades de los largos de las tuberías, los largos son tomados desde cada nodo inicial hasta llegar al cauce natural (Figura 4). En general, la distribución de impermeabilidad influye en el largo de tuberías en el sistema. Para el escenario DS se generan más tuberías cortas que van directo al cauce, mientras que los escenarios RD y US generan

distribuciones muy similares con tuberías más largas. Por otra parte, los valores resultantes del parámetro ϕ a ser considerado por el modelo hidrológico son de 1,197; 1,195 y 1,141 para los escenarios RD, US y DS respectivamente. Estos valores son menores a 1,475, valor calculado con varios elementos curvos cuya longitud es bastante sobredimensionada usando una representación tipo raster (Gironás et al., 2009).

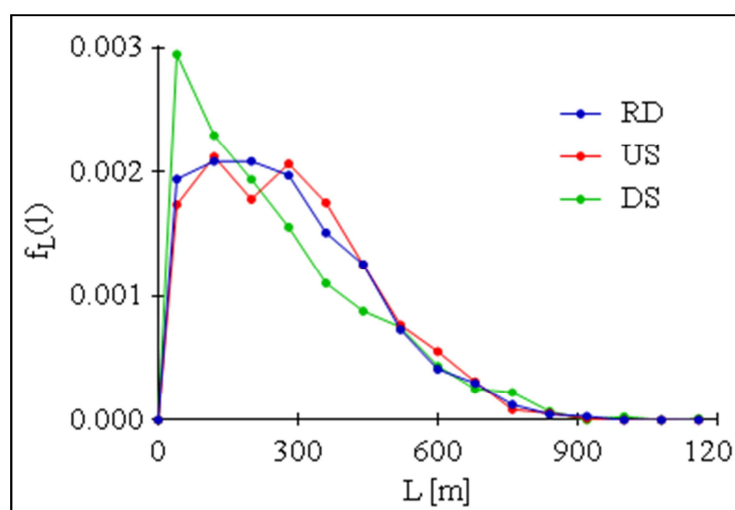


Figura 4. Función de densidad de probabilidad (PDF) del largo de las tuberías, desde cada nodo inicial hasta llegar al cauce, para un 10% de impermeabilidad.

5.3. Impacto de la red de drenaje artificial en la respuesta hidrológica

El impacto hidrológico de los patrones de impermeabilidad y las correspondientes redes de tubería se evaluó simulando el hidrograma a la salida de la cuenca para distintas condiciones. Se consideró lluvias de pulsos constantes para 2, 25 y 100 años de periodo de retorno, y 1 y 24 h de duración. Las tormentas se definieron usando pasos de tiempo de 5 min y 1 h respectivamente, y se generaron según las curvas IDF del manual de aguas lluvias de Howard County, Md (Howard County Department of Public Works, 2010). Para

cada uno de los 6 eventos se calculan los hidrogramas (Figura 5). Para lluvias de 1 h de duración, y para todos los escenarios de impermeabilidad sin tuberías, se observan respuestas más violentas y caudales máximos mayores a los generados en condiciones naturales. Estas diferencias tienden a reducirse a medida que aumenta el periodo de retorno considerado. Las diferencias son más notorias para los escenarios US y RN, los que de hecho generan hidrogramas muy similares. Al agregar las tuberías los hidrogramas se modifican bastante, disminuyendo el caudal máximo con respecto al caso urbano sin tuberías. Para los escenarios US y RD estas disminuciones son del orden de 21% y 15% para $T = 2$ y 25 años. Adicionalmente, se observa un pequeño retardo en la recesión de los hidrogramas, el que se asemeja más al del hidrograma natural que al del mismo escenario sin tuberías. El hidrograma del escenario DS con tuberías es el que sufre los mayores cambios, ya que su máximo disminuye considerablemente (i.e. aproximadamente un 43% para $T = 2$ y 25 años). Es más, sin importar el periodo de retorno, el caudal máximo en estos casos pasa a ser menor que para el caso natural, y la recesión es más lenta que para el mismo escenario sin tuberías, e incluso el caso natural. El hidrograma del escenario DS presenta dos peaks. El primero, más brusco y rápido, se explica por la influencia de las tuberías cortas conectadas al cauce principal. El segundo máximo, más gradual pero mayor, corresponde a la contribución del resto de la cuenca. Entonces, pareciera que, para niveles bajos de urbanización, la localización cerca del cauce principal de la impermeabilidad junto con elementos artificiales podría en su conjunto minimizar los caudales máximos efluentes ya que se proporciona un almacenamiento significativo a la gran mayoría de la cuenca que se mantiene permeable.

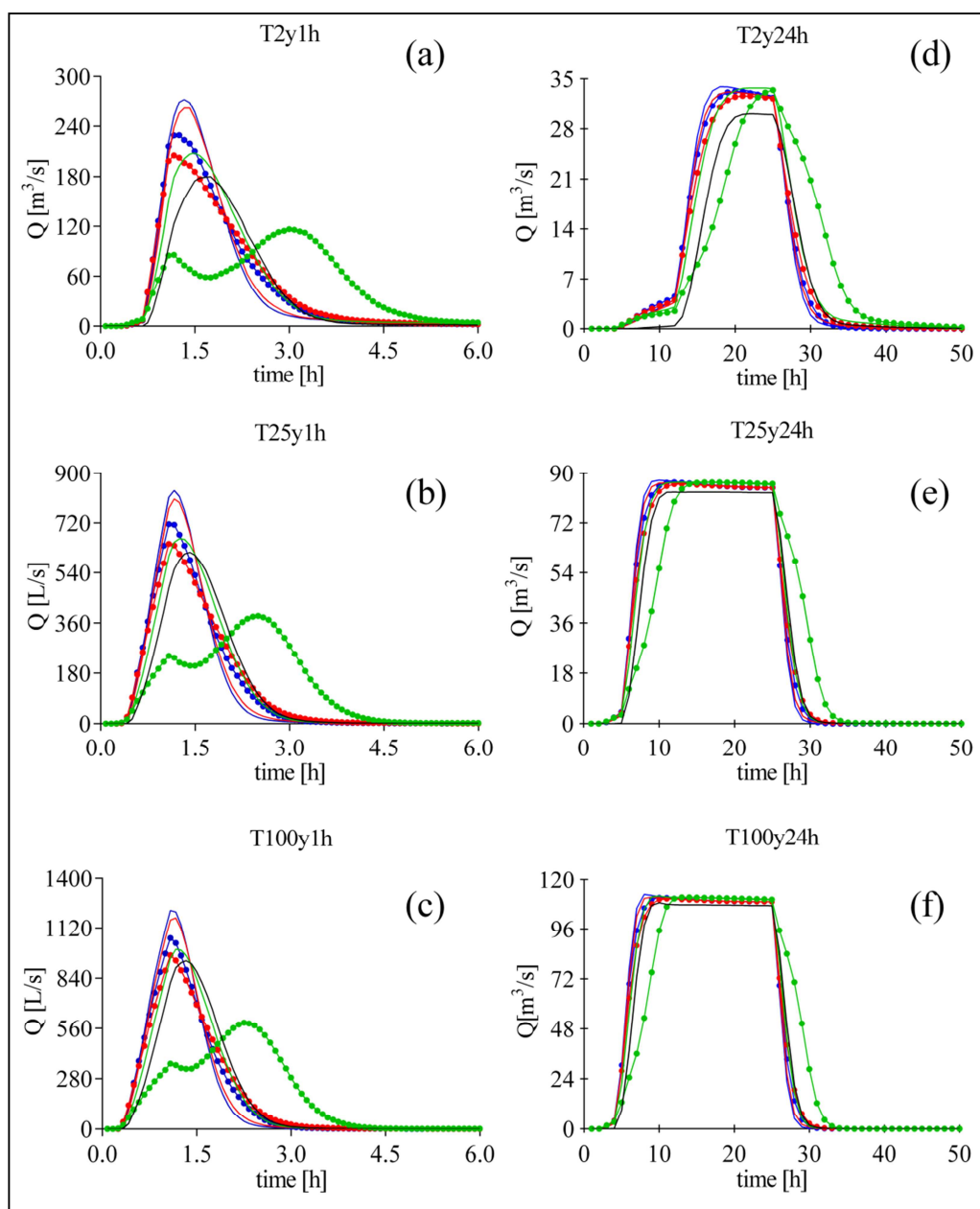


Figura 5. Respuesta hidrológica para los eventos de precipitación de 2, 25 y 100 años de periodo de retorno y 1 y 24 horas de duración. Se comparan los 3 escenarios de distribución del 10% de impermeabilidad (DS verde, US rojo y RD azul) con y sin tuberías (línea con puntos y continua respectivamente), y el escenario natural (negro).

Las diferencias identificadas son menos notorias para las lluvias de 24 h de duración. En todos los casos la cuenca alcanza el equilibrio al tiempo de concentración,

llegándose a caudales máximos constantes hasta el fin de la precipitación. Los tiempos de concentración disminuyen con el periodo de retorno, lo que refleja la dependencia en la intensidad de lluvia de los tiempos de viaje. Por otra parte los caudales máximos en condiciones urbanas sin tuberías superan los obtenidos para la condición natural, pero como es de esperar, igualan los generados por los escenarios con tubería dado que siempre se alcanza el equilibrio. Nuevamente, el escenario DS es el que produce las respuesta es más lentas.

Los hidrogramas de la Figura 5 corresponden a respuestas hidrológicas frente a eventos específicos y arbitrarios de precipitación. Para generalizar los resultados e independizar la respuesta de la duración de la tormenta, se calcularon los hidrogramas unitarios instantáneos (IUHs) para los tres escenarios de impermeabilidad con tuberías. Dado que el modelo U-McIUH es de carácter climático, produce IUH que son dependientes de la intensidad de lluvia. Por lo tanto, se consideró intensidades constantes de 10, 20, 50 y 100 mm/h (Figura 6) para calcular un espectro amplio de IUH's. Al corresponder a la PDF de los tiempos de viajes, el IUH tiene unidades de s^{-1} . Para todos los casos, las mayores intensidades incrementan el caudal máximo y reducen los tiempos de la respuesta. Para todas las intensidades, el escenario DS con tuberías presenta siempre los dos caudales máximos previamente identificados. Al aumentar estas intensidades y disminuir los tiempos de viajes, el tiempo entre estos peaks se acorta, y el segundo caudal máximo se hace más pronunciado. En general, para todas las intensidades, las diferencias o similitudes entre los distintos escenarios se mantienen. Luego, a partir de este resultado y lo presentado en la Figura 5, se concluye que la intensidad de la lluvia es relevante cuando se compara un patrón impermeable con y sin tuberías. Sin embargo esta intensidad no tiene

mayor efecto en aumentar o disminuir las diferencias existentes entre dos escenarios de impermeabilidad distinta que cuentan con una red de tuberías. Se observa que para la intensidad de 100 mm/h el peak de la respuesta se retarda, esto se debe a que para grandes intensidades los tiempos de viaje en las celdas ladera disminuyen a tasas más significativas que los de las celdas tubería.

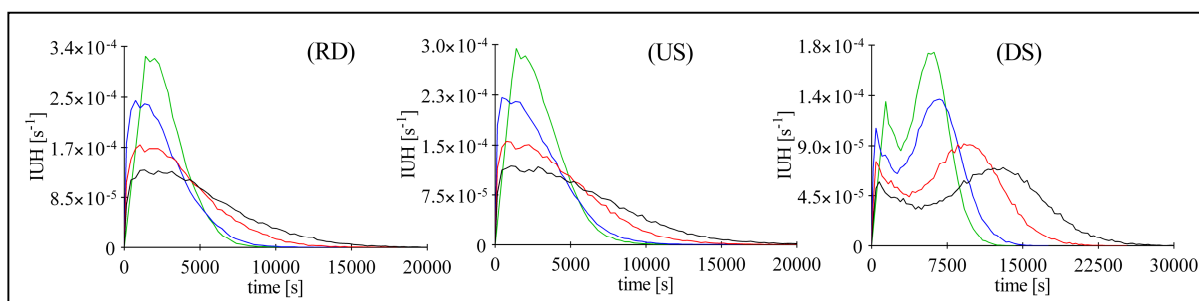


Figura 6. IUH para diferentes intensidades de lluvia para los escenarios RD, US y DS. Se consideran intensidades de 10 mm/h (negro), 20 mm/h (rojo), 50 mm/h (azul) y 100 mm/h (verde).

Dada la estrecha relación entre el hidrograma resultante y los tiempos de viaje de la cuenca, se estudió en detalle el efecto de incorporar las tuberías en el comportamiento de los tiempos de viaje. Así entonces se comparó, para los distintos escenarios de impermeabilidad, la función de probabilidad acumulada (FPA) de los tiempos de viaje considerando sólo las celdas que pasan de ser laderas a celdas tuberías cuando éstas se incorporan en el análisis (Figura 7). En la comparación se evaluó el efecto de la intensidad de precipitación, utilizándose valores de 10 y 100 mm/h. En la figura, las líneas segmentadas corresponden a las FPA para las celdas cuando son laderas, y las líneas continuas cuando se incorporan las tuberías. Los resultados son muy similares para ambas intensidades consideradas. Los escenarios sin tuberías generan tiempos de viaje más

largos, pasando éstos a ser considerablemente menores con tuberías. Se aprecia como las FPA's para los escenarios US y RD sin tuberías son muy similares, pero diferentes a la del escenario DS. Al incorporarse las tuberías, los tiempos de viaje para el escenario DS superan los de los otros dos escenarios, lo que se traduce en la respuesta hidrológica más lenta vista en la Figura 5.

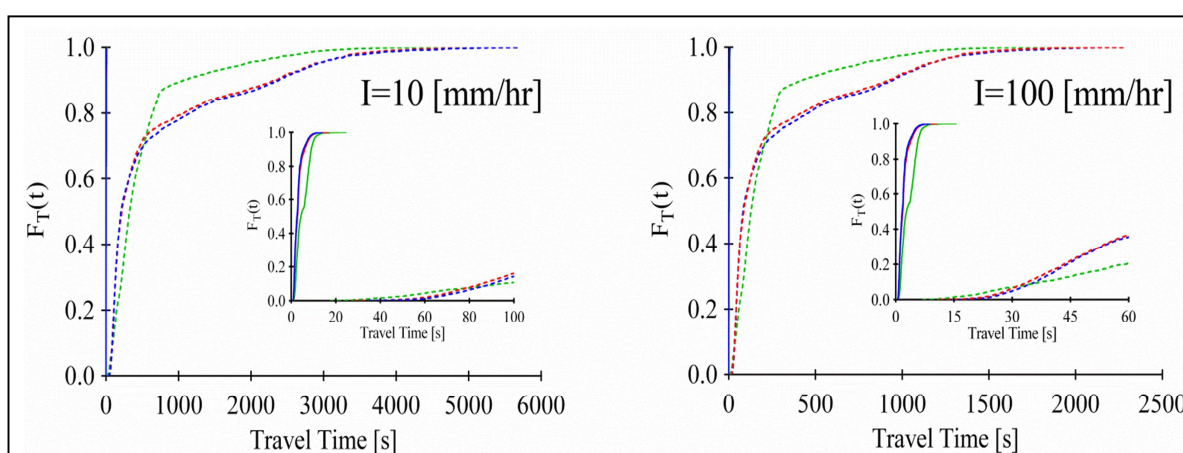


Figura 7. Función de densidad acumulada (CDF) del tiempo de viaje en las celdas para los escenarios de distribución de impermeabilidad (DS verde, US rojo, RD azul). Los subgráficos corresponden a un acercamiento del tiempo de viaje.

Los mayores tiempos de viaje de las celdas con tuberías en el escenario DS se deben al comportamiento de la variable λ correspondiente a la razón entre el caudal entrante desde aguas arriba a una celda con el generado localmente por ésta. Para cuencas urbanas, Gironás et al. (2009) proponen aproximar λ a la razón entre el área impermeable aportante y el área impermeable local. El tiempo de viaje en una celda tanto de ladera como de tubería es muy sensible al valor de λ (i.e. menores tiempos de viaje para mayores valores de λ) (Gironás et al., 2009), por lo que se compara la FPA de esta variable para los distintos escenarios con tuberías (Figura 8). Estos valores pequeños se explican porque en

el escenario DS las celdas impermeables están localizadas aguas abajo, y las áreas contribuyentes a estas tienden a ser muy poco impermeables. El escenario DS presenta valores de λ bastante menores para la mayoría de las celdas en comparación con los otros dos casos, esto significa una respuesta más lenta a nivel de la cuenca. Para λ s mayores a 4000 los cambios en el gráfico son poco significativos.

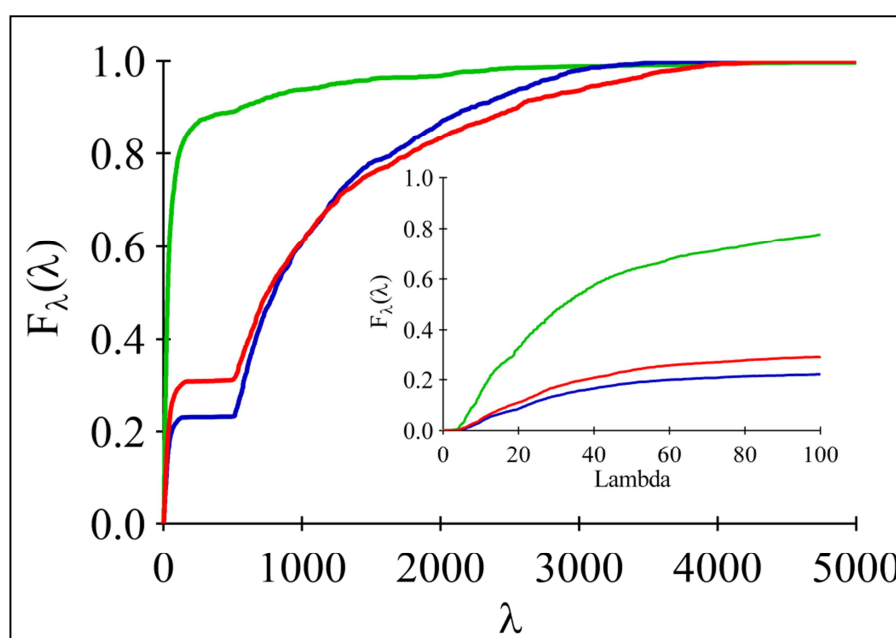


Figura 8. Función de probabilidad acumulada (CDF) de λ para los escenarios de distribución de impermeabilidad con tuberías (DS verde, US rojo, RD azul). El subgráfico es un acercamiento del eje Lambda.

En este trabajo se ha propuesto un caso base de 10% de impermeabilidad distribuida espacialmente según diferentes patrones. A continuación se busca evaluar las diferencias en las respuestas en caso de que el nivel de impermeabilización de la cuenca aumente significativamente (i.e. un 40%). En este caso, la red de tuberías se genera utilizando un valor de $\tilde{A} = 2352 \text{ m}^2$ (i.e. 3 celdas impermeables), tal que la densidad de drenaje es de $21,1 \text{ km}_{\text{tubería}}/\text{km}^2_{\text{Aimp}}$ para el escenario aleatorio. Este valor implica

densidades de 24 y 20,6 $\text{km}_{\text{tubería}}/\text{km}^2_{\text{Aimp}}$ para los escenarios US y DS respectivamente, de modo que la densidad de tuberías, y el sistema de drenaje mismo, se hace más similar para mayores impermeabilidades. Se calculan los hidrogramas sólo para lluvias de 1 h de duración para la cuenca natural, y la cuenca urbana sin tuberías y con tuberías para los escenarios (Figura 9). Nuevamente, la impermeabilización de la cuenca implica caudales máximos mayores y respuestas más rápidas para todos los escenarios urbanos sin tuberías. Adicionalmente, el efecto de las tuberías se traduce en respuestas aún más rápidas y con mayores máximos de descargas. Esto ocurre incluso para el escenario DS, al contrario de lo que pasaba para el caso base de impermeabilidad de 10%, donde la presencia de tuberías retarda y atenúa el hidrograma. Sin embargo, para un 40% de impermeabilidad el escenario DS sigue siendo el que genera los caudales menores. Estos resultados muestran que habría un cierto umbral de impermeabilidad entre el 10% y el 40% a partir del cual la presencia de tuberías, sin importar el patrón de impermeabilidad, significará caudales máximos mayores a los generados sin disponerse de la red.

La excepción al crecimiento en el caudal máximo producto de la inclusión de tuberías ocurre para el escenario US con tormentas de $T = 25$ y 100 años, casos en los que el caudal máximo disminuye en un 3 y 3,4% respectivamente al incorporar tuberías. Es este mismo escenario para el que sistemáticamente hay menos diferencias en los hidrogramas generados sin y con tuberías. En general los hidrogramas resultantes se hacen más similares para todos los escenarios con tubería a medida que aumenta el periodo de retorno. Esto se debe tanto a la similitud de los patrones de impermeabilidad y redes de tuberías, como a las precipitaciones efectivas más similares para grandes tormentas.

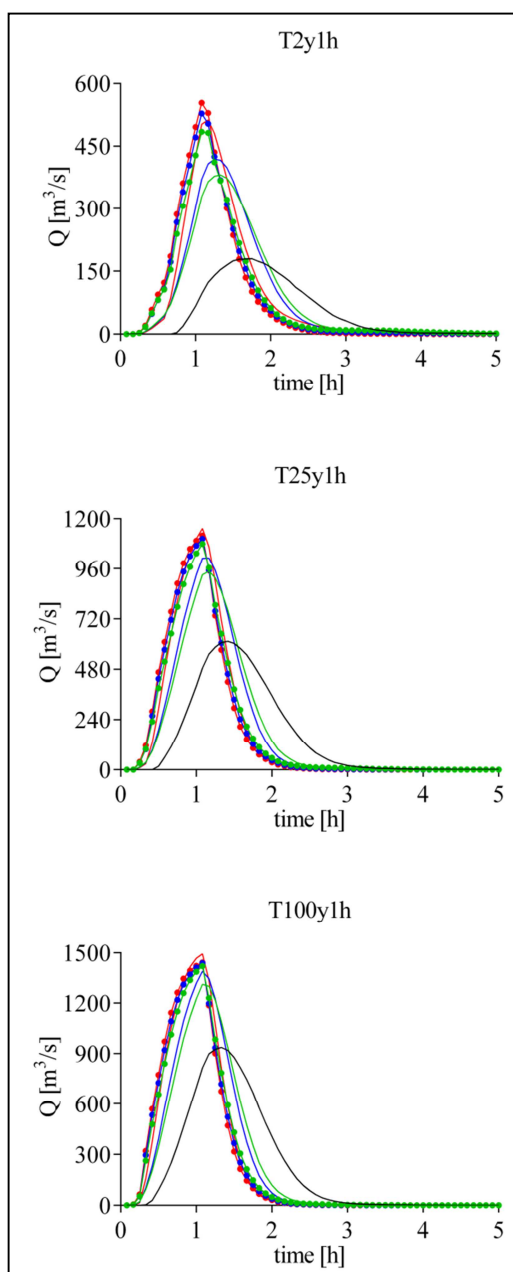


Figura 9. Respuesta hidrológica para los eventos de precipitación de 2, 25 y 100 años de periodo de retorno y 1 hora de duración. Se comparan los 3 escenarios de distribución del 40% de impermeabilidad (DS verde, US rojo y RD azul) con y sin tuberías (línea con puntos y continua respectivamente), y el escenario natural (negro).

Para finalizar, se sintetizó el efecto combinado de la impermeabilidad y la cobertura de la red de drenaje sobre los aumentos de caudal en condiciones urbanas una vez que se

incluyen las tuberías en comparación a cuando éstas no se consideran. Con este propósito se construyó una serie de gráficos análogos a los presentados en la Figura 3, los que se muestran en la Figura 10. Nuevamente se consideran los mismos rangos de impermeabilidad aleatoria y cobertura de drenaje, así como las mismas tormentas y los dos enfoques para asignar impermeabilidad a las celdas.

Sin importar el periodo de retorno de la lluvia o la forma de impermeabilizar, se cumple que para mayores impermeabilidades y niveles de cobertura, los caudales máximos considerando tuberías aumentan. Para impermeabilidades homogéneas, tanto para las lluvias de $T = 2$ y 10 años (Figura 10 (a) v/s (b)), los caudales máximos considerando tuberías son un poco menores a los que se producen sin tuberías. Estas diferencias tienden a reducirse para mayores periodos de retorno. El tener impermeabilidad homogénea implica un mayor número de celdas permeables que ayudan a mantener caudales bajos.

Sin embargo al tener impermeabilidad aleatoria y heterogénea, implica menor porcentaje de celdas permeables (en el caso de 50% nulo), por lo que el tener o no tuberías para ciertos porcentajes de impermeabilidad varía el rol que estas cumplen.

Por otra parte en los casos de impermeabilidad heterogéneas (Figura 10 (c) v/s (d)), más representativos de condiciones reales, se logra identificar una isolínea de razón 1. Ésta delimita aquellas combinaciones de impermeabilidad y cobertura que reducen el caudal de aquellas que lo amplifican, comparados con aquellos producidos sin tener tuberías. Obviamente, a mayor cobertura y porcentaje de impermeabilidad, los caudales tienden a aumentar cada vez más. Es interesante notar que para este caso, el aumento del periodo de retorno implica un comportamiento diferenciado de las regiones de incremento y reducción de caudales máximos (i.e. a la derecha e izquierda de la isolínea de razón 1

respectivamente). Para la región de incremento, un mayor periodo de retorno típicamente significa una reducción en la razón entre los caudales máximos urbano con y sin tuberías para una cierta impermeabilidad y cobertura. Por el contrario, en la región de reducción, caracterizada por un sistema de tuberías que proporciona capacidad de almacenamiento, el aumento del periodo de retorno conlleva un crecimiento en dicha razón producto de que se colma la capacidad de almacenamiento disponible.

Si se considera la Figura 10 (c) como la más representativa de condiciones típicas (i.e., una tormenta relativamente frecuente y distribuciones de impermeabilidad heterogéneas en su densidad), se concluye que en cuencas reales, para un mismo porcentaje de impermeabilidad global, podrían haber rangos de cobertura que eventualmente permitan reducir el caudal máximo. Estos niveles de cobertura son cada vez más bajos al aumentar la impermeabilidad. Según los resultados, un ejemplo de escenario urbano donde se podría producir esta reducción de caudales máximos sería uno que combinara la implementación de cierto número de tuberías con una importante presencia de práctica infiltración (Low Impact Development, LID) que reduzca la impermeabilidad efectiva.

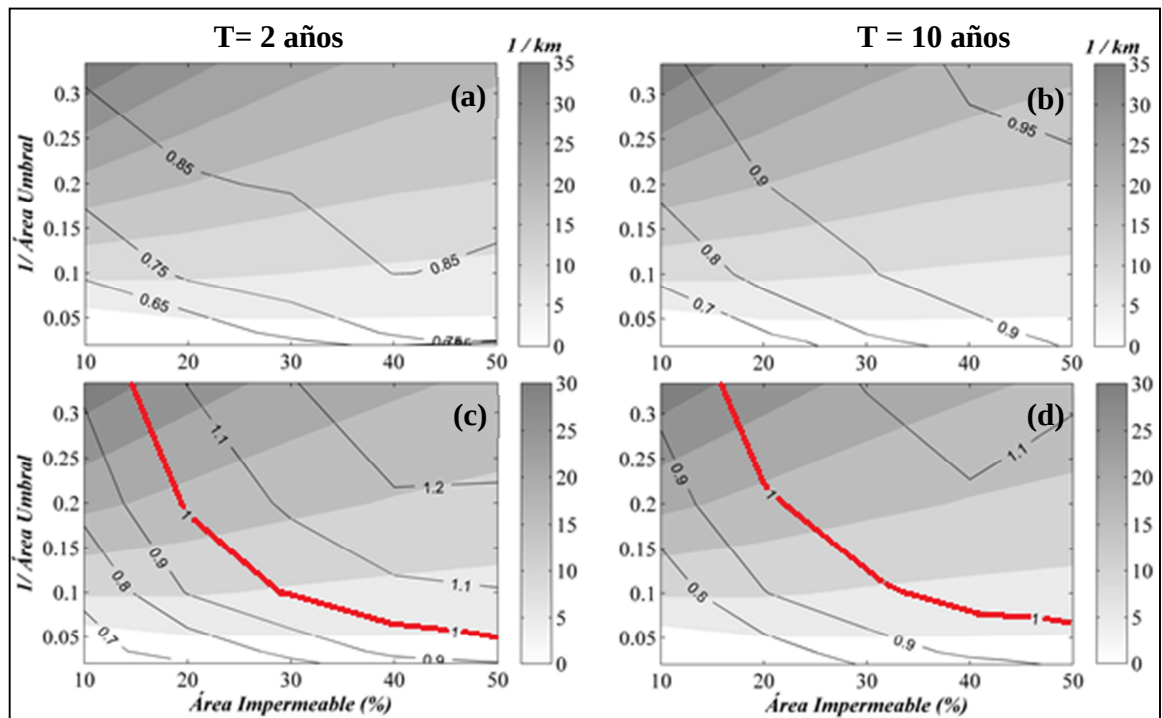


Figura 10. Efecto de las tuberías en la cuenca urbanizada, comparando los caudales con y sin tuberías, para $T = 2$ y 10 años. La escala de grises corresponde a la densidad de tuberías en $\text{km}_{\text{tub}}/\text{km}^2_{\text{AI}}$.

6. CONCLUSIONES

Este estudio muestra cómo influye la red artificial de drenaje en los distintos escenarios de impermeabilidad. Básicamente se representa la cuenca con un archivo raster al que se le incorporan los elementos del sistema de drenaje, mediante un modelo de generación de tuberías. Con estos datos el modelo localiza nodos según un área mínima impermeable acumulada ($\check{A}$), de este parámetro depende la cobertura de la red artificial en la cuenca. Además, para realizar los cálculos hidrológicos se utiliza el modelo U-McIUH (Gironás et al., 2009).

Se realizó un análisis detallado para comparar los resultados obtenidos del comportamiento de las tuberías en la cuenca, con los distintos escenarios de distribución de la impermeabilidad. Basado en el análisis, se concluye:

- El modelo de tuberías generado funciona correctamente y la medida de cobertura determinada es razonable, ya que los rangos de la densidad de tubería observados están dentro de los valores esperados. Además, se demostró que a medida que aumenta la densidad de tuberías aumentan los caudales. Es más, al comparar los caudales máximos de la cuenca urbanizada con tuberías con los de la cuenca natural, se percibe que para niveles de cobertura altos la presencia de tuberías domina respecto a la distribución de la heterogeneidad de las celdas.
- Según el análisis hidrológico para un 10% de impermeabilidad los hidrogramas disminuyen su caudal máximo y la respuesta se alarga para el escenario con tuberías. Para un 40% de impermeabilidad se esperaba que la respuesta con tuberías para el escenario DS fuese más rápida, especialmente al comienzo de la respuesta. Sin embargo, aunque sigue siendo el que genera caudales menores, se comporta igual que

los otros dos escenarios. Esto se puede deber a que el modelo U-McIUH no considera una ecuación de balance de masa de cada celda con la contribución de lo que sucede aguas arriba, sólo toma en cuenta lo que pasa en ella. En otras palabras, la escorrentía directa generada en una celda no puede infiltrar aguas abajo. Y por lo tanto la desconexión de áreas impermeables está dada por reducciones en los tiempos de viajes, pero no por reducciones de escorrentía. Además, puede ser necesario considerar las basadas en áreas permeables cuando se trata de zonas periurbanas.

- Es relevante el tipo de impermeabilidad considerada, que sea homogénea o heterogénea implica un cambio, al comparar los caudales máximos a la salida de la cuenca urbanizada con tuberías con respecto a la misma sin tuberías. El caso homogéneo, menos real, se traduce a un mayor porcentaje de celdas 100% permeables que ayudan en conjunto con las tuberías a mantener caudales bajos. El caso de impermeabilidad heterogénea, más real, implica un menor porcentaje de celdas 100% permeables (en el caso de 50% no presenta celdas completamente permeables), y se observa una isolínea con valor 1 que define el rol que cumplen las tuberías para distintas combinaciones de densidad de tuberías y porcentaje de impermeabilidad.
- Por lo tanto, el agregar tuberías tiene un impacto en la respuesta hidrológica, especialmente en el caso heterogéneo. Para ciertas combinaciones la razón de caudales ya mencionada, es mayor que 1 y en otras es menor. Se concluye que para determinado nivel de impermeabilidad en conjunto con una densidad de tuberías adecuada, se puede disponer de un cierto número de tuberías de modo reducir el caudal máximo. En el ámbito de la planificación urbana, esto puede significar que para menores impermeabilidades, típicamente alcanzables con prácticas LID, se debiese

eventualmente considerar cierto número de tuberías para disminuir el caudal, las que generan un caudal más lento que la superficie urbana típica.

En general, los resultados muestran que hay que considerar tuberías cuando se busca el patrón óptimo de impermeabilidad, puesto que en ciertos casos puede producir beneficios en la respuesta hidrológica. Se pueden generar cambios positivos si se encuentra una combinación adecuada, entre el desarrollo urbano sustentable y las tuberías. Algunas posibles futuras investigaciones relacionadas con este mismo incluyen: (1) un estudio de los efectos de la resolución de las celdas en el funcionamiento del modelo de tuberías, con resoluciones más finas se observaría el comportamiento de las tuberías de forma más detallada; (2) un estudio con series continuas de precipitación, de manera de entender el efecto sobre todo el régimen hidrológico; (3) mejor manera de incorporar prácticas de drenaje urbano para hacerse cargo de la impermeabilidad.

BIBLIOGRAFIA

Akan, A.O., 1993. Urban Stormwater Hydrology: A Guide to Engineering Calculation. Technomic Publishing Company, Inc., Lancaster, Pennsylvania, USA.

Band, L., 1986. Topographic partition of watersheds with digital elevation models. Water Resources Research, 22, 15-24.

Band, L., 1989. A terrain-based watersheds information system. Hydrology Processes, 3, 151-162.

Booth, D., Reinelt, L., 1993. Consequences of Urbanization on Aquatic Systems – Measured Effects, Degradation Thresholds, and Corrective Strategies. Proceedings Watershed'93 a National Conference on Watershed Management, 545-550.

Butler, D., Davies, J., 2011. Urban Drainage. Third Edition, Spon Press, Abingdon, Oxon, UK.

Carter, W., 1961. Magnitude and frequency of floods in suburban areas. U.S. Geological Survey Professional Paper, Washington, D.C, 424, 9-11.

Chin, D.A., 2006. Water – Resources Engineering. Second Edition, Pearson Prentice Hall, UpperSaddle River, New Jersey, USA.

Chormanski, J., Van de Voorde, T., De Roeck, T., Batelaan, O., Canters, F., 2008. Improving distributed runoff prediction in urbanized catchments with remote sensing based estimates of impervious surface cover. Sensors, 8, 910-932.

Colin, F., Moussa, R., Louchart, X., 2012. Impact of the spatial arrangement of land management practices on surface runoff for small catchments. Hydrological Processes, 26 (2), 255-271.

Delleur, J.W. Introduction to Urban Water Hydrology and Stormwater Management. K Kibler, D.F., 1982. Urban Stormwater Hydrology, Chapter 1, Water Resources Monograph Series, American Geophysical Union Washington, D.C.

Duan, Q., Sorooshian, S., Gupta, V., 1992. Effective and efficient global optimization for conceptual rainfall – runoff models. Water Resources Research, v. 28, 1015 – 1031.

Foufoula – Georgiou, E., Montgomery, D. 1993. Channel network source representation using digital elevation models. *Water Resources Research*, 29(12), 2925-2934.

Fread, D.L. Flow Routing. Maidment, D.R., 1993. *Handbook of Hydrology*, Chapter 10, Editor in Chief, McGraw – Hill, Inc., New York.

Gironás, J., Niemann, J. D., Roesner, L.A., Rodríguez, F., Andrieu, H., 2009. A morpho – climatic instantaneous unit hydrograph model for urban catchments based on the kinematic wave approximation. *Journal of Hydrology*, 377, 317-334.

Gironás, J., Niemann, J.D., Roesner, L.A., Rodríguez, F., Andrieu, H., 2010. Evaluation of methods for representing urban terrain in stormwater modeling. *Journal of Hydrologic Engineering* 15, 1-14.

Graf, W., 1977. Network characteristics in suburbanizing streams. *Water Resources Research*, v.13, n.2, 459 – 463.

Gupta, R.S., 2008. *Hydrology and Hydraulic Systems*. Third Edition, Waveland Press, Inc., Long Grove, Illinois, USA.

Howard County Department of Public Works, 2010. *Howard County Design Manual Volume I, Chapter 5, Stormwater Management*. Howard County, Columbia, Maryland.

Jacobson, C., 2011. Identification and quantification of the hydrological impacts of imperviousness in urban catchments: A review. *Journal of Environmental Management*, 92, 1438-1448.

Legates, D.R., McCabe Jr., G.J., 1999. Evaluating the use of “goodness-of-fit” measures in hydrologic and hydroclimatic model validation. *Water Resources Research* 35(1), 233-241.

Leopold, L.B., 1968. *Hydrology for urban land planning - A guidebook on the hydrologic effects of urban land use*. Geological Survey Circular U.S., 554.

Leopold, L., Gordon, M., Miller, J., 1995. *Fluvial processes in geomorphology*. Dover Publications, Inc., New York. USA, 7, 241-248.

Lhomme, J., Bouvier, C., and Perrin, J. L., 2004. Applying a GIS-based geomorphological routing model in urban catchments. *Journal of Hydrology* 299(3-4), 203–216.

- Mansell, M.G., 2003. Rural and Urban Hydrology. Thomas Telford, ASCE Press, Reston, VA, USA.
- Marsalek, J., Maksimovic, C., Zeman, E., Price, R., 1996. Hydroinformatics Tools for Planning, Design, Operation and Rehabilitation of Sewer Systems. NATO ASI Series, Harrachov, Czech Republic.
- McCuen, R.H., 1986. Hydrologic Analysis and Design. Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, USA.
- Meierdiercks, K. L., Smith, J. A., Baeck, M. L., Miller, A. J., 2010. Analyses of urban drainage network structure and its impact on hydrologic response. Journal of the American Water Resources Association, 46(5), 932-943.
- Mejía, A, Moglen, G., 2009. Spatial patterns of urban development from optimization of flood peaks and imperviousness-based measures. Journal of Hydrologic Engineering 14, 416-424.
- Mejía, A., Moglen, G., 2010. Spatial distribution of imperviousness and the space-time variability of rainfall, runoff generation, and routing. Water Resources Research 46. , W07509, doi:10.1029/2009WR008568.
- Mejía, A., Moglen, G., 2010. Impact of the spatial distribution of imperviousness on the hydrologic response of an urbanizing basin. Hydrological Processes, 24, 3359-3373.
- MesoWest Data, Department of Atmospheric Sciences, University of Utah. Revised October 2012, Santiago, Chile. <<http://mesowest.utah.edu/index.html>>.
- Möderl, M., Butler, D., Rauch, W., 2009. A stochastic approach for automatic generation of urban drainage systems. Water Science & Technology, 59(6), 1137-1143.
- Moglen, G., 2000. Effect of orientation of spatially distributed curve numbers in runoff calculations. Journal of the American Water Resources Association, 36 (6) 1391-1400.
- Moglen, G., Kim, S., 2007. Limiting imperviousness: Are threshold-based policies a good idea?. Journal of the American Planning Association, 73(2), 161-171.
- Poff, N., Bledsoe, B., Cuhaciyan, C., 2006. Hydrologic variation with land use across the contiguous united states: Geomorphic and ecological consequences for stream ecosystems. Geomorphology, 79, 264-285.

- Randhir, T., Tsvetkova, O., 2011. Spatiotemporal dynamics of landscape pattern and hydrologic process in watershed systems. *Journal of Hydrology*, 404, 1-12.
- Rantz, S.E., 1971. Suggested criteria for hydrologic design of storm drainage facilities in the San Francisco bay region, California. Geological Survey Open File Report U.S.
- Richert, E., Bianchin, S., Heilmeier, H., Merta, M., Seidler, C., 2011. A method for linking results from an evaluation of land use scenarios from the viewpoint of flood prevention and nature conservation. *Landscape and Urban Planning*, 103, 118-128.
- Rodríguez, F., Andrieu, H., Creutin, J., 2003. Surface runoff in urban catchments: morphological identification of unit hydrographs from urban databanks. *Journal of Hydrology* 283, 146-168.
- Rodríguez, F., Cudennec, C., Andrieu, H., 2005. Application of morphological approaches to determine unit hydrographs of urban catchments. *Hydrological Processes* 19(5), 1021–1035.
- Rodríguez, F., Bocher, E., Chancibault, K., 2013. Terrain representation impact on periurban catchment morphological properties, *Journal of Hydrology* 485, 54–67.
- Rodríguez – Iturbe, I. et al., 1992. Power law distributions of discharge mass and energy in river basins. *Water Resources Research*, 28(4) 1089-1093.
- Rodríguez-Iturbe I., Rinaldo A., 1997. *Fractal River Basins: Chance and Self-Organization*. Cambridge University Press, New York, pp. 547.
- Roesner, L., Aldrich, J., Brosseau, G., Herricks, E., Pisano, W., Snodgrass, WJ., Urbonas B., 1998. *Urban Runoff Quality Management*. Water Environment Federation and American Society of Civil Engineers, library of Congress Cataloging.
- Rossman, L.A., 2010. *Storm Water Management Model: User's Manual*, version 5.0. National Risk Management Research Laboratory, Office of Research and Development, U.S. Environmental Protection Agency, Cincinnati, OH, USA.
- Schueler, T., 1994. The importance of imperviousness. *Watershed Protection Techniques*, 1(3), 100-111.
- Schueler, T., Fraley – McNeal, L., Cappiella, K., (2009). Is impervious cover still important? Review of recent research. *Journal of Hydrologic Engineering*, 14, 309-315.

Sivapalan, M., Savenije, H., Blöschl, G., 2012. Socio – hydrology: A new science of people and water. *Hydrological Processes*, 26, (8), 1270–1276.

Soil Survey Staff, Natural Resources Conservation Service, United States Department of Agriculture. Soil Survey Geographic (SSURGO) Database Downloader. Revised January 2013, Santiago, Chile. <<http://www.arcgis.com/apps/OnePane/basicviewer/index.html?appid=a23eb436f6ec4ad6982000dbaddea5ea>>.

Tang, Z., Engel, B., Lim, K., Pijanowski, B., Harbor, J., 2005. Minimizing the impact of urbanization on long term runoff. *Journal of the American Water Resources Association*, 41(6), 1347-1359.

Tarboton D. G., Bras, R. L., Rodríguez-Iturbe, I., 1991. On the extraction of channel networks from digital elevation data. *Hydrology Processes* 5, 81 – 100.

Tarboton D. G., Bras, R. L., Rodríguez-Iturbe, I., 1992. A physical basis for drainage density. *Geomorphology* 5, 59-76.

United Nations (2009). *World Urbanization Prospects The 2009 Revision, Highlights*. Department of Economic and Social Affairs Population Division, United Nations.

United States Department of Agriculture, Natural Resources Conservation Service (USDA-NRCS, 2003. Soil Survey of Howard County, Maryland. Revised January 2013, Santiago, Chile. <http://soildatamart.nrcs.usda.gov/Manuscripts/MD027/0/MDHoward5_08.pdf>.

Urban Drainage and Flood Control District of Denver, 2008. *Urban Storm Drainage Criteria Manual, Volume 1, Chapter 5*. Revised November 2012, Santiago, Chile. <http://www.udfcd.org/downloads/down_critmanual_volI.htm>.

U.S. Geological Survey (USGS), 2011. Center for Earth Resources Observation and Science, Sioux Falls, S.D. Available online: <http://www.usgs.gov>.

U.S. Geological Survey, National Water Information System. Revised January 2013, Santiago, Chile. Revised October 2012, Santiago, Chile. <<http://waterdata.usgs.gov/usa/nwis/uv?01591400>>.

Shen, H.W., Julien, P.Y. *Erosion and Sediment Transport*. Maidment, D.R., 1993. *Handbook of Hydrology*, Chapter 12, Editor in Chief, McGraw – Hill, Inc., New York.

Wilson, W., 2011. *Constructed Climates, A Primer on Urban Environments*. The University of Chicago Press, USA.

Yang, G., Bowling, L., Cherkauer, K., Pijanowski, B., 2011. The impact of urban development on hydrologic regime from catchment to basin scales. *Landscape and Urban Planning*, 103(2), 237-247.

Yeo, I.Y., Gordon, S., Guldmann, J.M., 2003. Optimizing patterns of land use to reduce peak runoff flow and nonpoint source pollution with an integrated hydrological and land-use model. *Earth Interactions*, 8(6), 1-20.

Yeo, I.Y., Guldmann, J.M., Gordon, S., 2007. A hierarchical optimization approach to watershed land use planning. *Water Resources Research* 43, W11416.

Zevenbergen, L., Thorne, C., 1987. Quantitative analysis of land surface topography. *Earth Surface Processes and Landforms*, 12, 47-56.