

SENSIBILIDAD Y REGIONALIZACIÓN DEL PARÁMETRO DE IMPERMEABILIDAD EN UNA CUENCA URBANA

• Luis Alejandro-Sánchez •

Universidad Nacional Experimental Francisco de Miranda, Venezuela

• Yoel Martínez-González •

Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría, Cuba

Resumen

La complejidad en la determinación inicial del parámetro hidrológico de impermeabilidad, comúnmente abreviado como (% imp.), se debe, entre otras razones, a la alta variabilidad espacial que caracteriza el medio urbano, en el cual se presentan varias coberturas de suelo en pequeñas porciones de terreno, que en ocasiones llegan a ser menores de una hectárea. Con este artículo se busca hacer una contribución metodológica para la estimación indirecta de tal parámetro, a partir de la cantidad de habitantes por unidad de área y de la relación domicilios por área, tomando como caso de estudio dos subcuencas localizadas dentro del sector oeste de la ciudad de Coro, Venezuela. Primero se realizaron pruebas de sensibilidad del parámetro y después se probó la técnica de interpretación digital automática de imágenes de satélite con clasificadores tradicionales para determinar su cuantificación, revelando incoherencias predominantes en las zonas de transición con usos mezclados. Se optó por la extracción manual de zonas impermeables y se construyeron curvas regionalizadas. Desde el punto de vista metodológico, el procedimiento resulta eficaz, ya que las curvas regionalizadas permiten ahorrar tiempo importante en la estimación inicial de este parámetro.

Palabras clave: parámetro de impermeabilidad, hidrología urbana, imágenes de satélite, regionalización, SWMM.

Introducción

Los algoritmos numéricos utilizados por modelos de simulación ampliamente conocidos, como el modelo *HEC-HMS* y el *EPA-SWMM*, requieren de la cuantificación de la fracción impermeable de la cuenca urbana como dato de entrada para la resolución de las ecuaciones que rigen los procesos hidrológicos. Los módulos de superficie del suelo incluidos en estos programas reciben la precipitación como variable de entrada y en función de la permeabilidad del suelo generan flujos de salida en forma de escorrentía superficial. En la modelación hidrológica de cuencas urbanas, los procesos dominantes se conceptualizan dividiendo una

determinada área de estudio en áreas de captación más pequeñas y homogéneas denominadas subcuencas o segmentos; cada una de estas áreas contiene a su vez fracciones o subáreas que pueden ser permeables e impermeables, según la cobertura dominante en el suelo. Uno de los parámetros que presenta mayor complejidad para su estimación real en una cuenca urbana con escasez de datos hidrológicos (no instrumentalizada) es la proporción del área impermeable, y su valor puede incidir en las salidas del modelo, originando umbrales de incertidumbre imposibles de reducir cuando no se tienen datos observados de variables hidrológicas o hidráulicas. La influencia de las continuas modificaciones del suelo urbano

sobre la escorrentía pluvial urbana aplicando modelos de simulación integrados ha sido estudiada por Bhaduri *et al.* (2001), Campana (1995) y David *et al.* (2006). La complejidad en la determinación inicial de este parámetro hidrológico (% imp.) se debe, entre otras razones, a la alta variabilidad espacial que caracteriza el medio urbano, en el cual se presentan varias coberturas de suelo en pequeñas porciones de terreno, que en ocasiones llegan a ser menores de una hectárea. Cabe resaltar que en numerosas ocasiones la asignación arbitraria de un porcentaje impermeable bajo criterios puramente discrecionales conlleva a resultados inciertos, producto de la alta sensibilidad que tienen tales modelos a este tipo de parámetros (Warwick *et al.*, 1991). En esta investigación se pretende hacer una contribución metodológica para la estimación indirecta inicial de este parámetro, empleado por la mayoría de los modelos matemáticos para la transformación lluvia-escorrentía en ambientes urbanos.

Transformación lluvia-escorrentía con el modelo SWMM

El modelo está organizado en cinco bloques principales: *Runoff*, *Transport*, *Extran*, *Storage Treatment*, *Statistics*; sin embargo, el módulo *Runoff* es el que permite generar escurrimiento superficial y subsuperficial a partir de la topografía, hietogramas y uso del suelo en cada subcuenca (Macor, 2002). Los cálculos de la escorrentía están basados en un modelo agregado de depósito mixto no lineal, cuyo caudal de salida cumple una relación de tipo calado normal (Yn). La expresión para estimar el gasto a la salida de la cuenca es una ecuación diferencial que se genera a partir de la ecuación de conservación de la masa y de la onda cinemática en función del área en planta, el ancho de la subcuenca y el coeficiente de rugosidad de Manning (ecuación (1)):

$$\frac{dD}{dt} = i(t) - \frac{W}{A n} Yn^{5/3} So^{1/2} \quad (1)$$

Donde W es el ancho característico de la subcuenca; n , el coeficiente de rugosidad de Manning; Yn , la profundidad normal y se calcula $Yn = (D - Dp)$; D , la lámina de agua; Dp , el almacenamiento de retención superficial; So , la pendiente media de la subcuenca; t , el tiempo; A , la superficie de la subcuenca vista en planta, y finalmente i es la intensidad de lluvia neta (una vez restada la evaporación y la infiltración). La ecuación mostrada se resuelve mediante un esquema en diferencias finitas de Newton-Raphson en cada incremento de tiempo (Tisdale *et al.*, 1999; Tsai, 2003).

Metodología

Los análisis de sensibilidad son fundamentales en la simulación de eventos a través de modelos paramétricos; como referencias resalantes están las investigaciones desarrolladas por Zaghloul (1983), Maksimovic (2001) y Urbonas (2007). El modelo *EPA-SWMM 5* posee cuatro parámetros que influyen sobre la escorrentía urbana durante el proceso de calibración: el % imp., la pendiente, el ancho, el parámetro de infiltración y el almacenamiento en depresiones (David *et al.*, 2006). De este grupo de parámetros, se realizó el análisis de sensibilidad del % imp., considerándolo como el parámetro hidrológico físico determinante en la modelación integrada de un caso de estudio real.

Prueba de sensibilidad

Con el objeto de comprobar el peso que tiene el % imp. sobre las variables de mayor interés en la modelación de flujo superficial urbano gasto máximo Q , tirante h y velocidad media V , se construyó un modelo digital de la subcuenca del "Sector San Bosco", localizado al norte de la ciudad de Coro. Se implementó el *SWMM*, a fin de simular una tormenta de diez años de periodo de retorno, con una duración de tres horas y una profundidad de lluvia acumulada de 84 mm (figura 1).

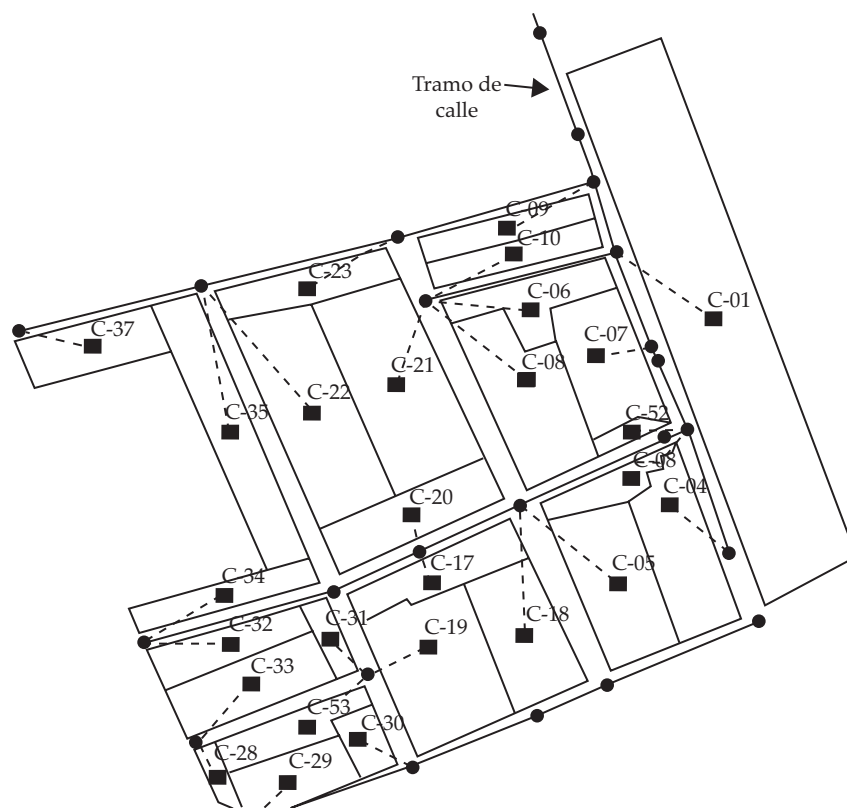


Figura 1. Modelo conceptual de la cuenca experimental en el análisis de sensibilidad.

Se realizaron las corridas del modelo variando el parámetro de impermeabilidad y se elaboraron curvas de dispersión preliminares para conocer la respuesta directa del modelo sobre las variables de interés en un tramo de calle que recibe toda la escorrentía superficial de la cuenca experimental. El rango de variación del parámetro fue $10\% < \% \text{ imp.} < 70\%$, seleccionado a partir de los estudios reportados por Zambrano y Sánchez (2009), según las características de la cuenca. Las familias de curvas muestran que para una franja importante del intervalo de respuesta del modelo, las variables hidráulicas analizadas se mantienen constantes. Se comprobó que el nivel de agua en el tramo de calle (h) y la velocidad del flujo (V) no son sensibles a la variación de este parámetro. Resulta de interés verificar la sensibilidad de la escorrentía

superficial con respecto al $\% \text{ imp.}$ y realizar el respectivo análisis de sensibilidad. Para la prueba de sensibilidad se utilizó el coeficiente de sensibilidad modificado X (ecuación (2)), propuesto por Lugon *et al.* (2008) y Knupp *et al.* (2009):

$$X_{\theta_j}(x,t) = \theta_j \frac{\partial \Psi(x,t)}{\partial \theta_j} \quad (2)$$

Donde Ψ es la variable analizada para el modelo conceptual presentado; θ representa la incógnita o parámetro particular del modelo $j = 1, 2, \dots, M$, y M es el número de incógnitas.

La figura 2 evidencia dos zonas claramente diferenciadas, donde se ve impactada la variable analizada, una de ellas es la zona de ascenso de la curva y la otra es la zona cercana a los valores pico; en ambos casos, la

relación entre el incremento del parámetro y la variable es directamente proporcional. Este comportamiento del modelo se corrobora con los desplazamientos observados entre curvas en la gráfica de dispersión. Se demostró que el flujo superficial en la calle es sensible en todo el intervalo de tiempo; este comportamiento confirma la hipótesis planteada por los autores sobre la alta influencia de la tasa de impermeabilidad sobre variables hidrológicas y, en menor grado, sobre variables hidrodinámicas. La conclusión parcial que resalta de este análisis es la sensibilidad que tiene el escurrimiento superficial a los cambios en la impermeabilidad de la cuenca, y la poca influencia que tiene sobre niveles y velocidades. Una vez comprobada la sensibilidad del parámetro de impermeabilidad, se procedió a su regionalización dentro del caso de estudio. Para determinar analíticamente el % imp., primero

se debe caracterizar la forma urbanística de la zona, ya que es muy común encontrar lotes, parcelas, manzanas o urbanismos con una misma densidad de habitantes, pero con variaciones importantes en su tasa de impermeabilización. Es importante resaltar que los porcentajes de área impermeable calculados en núcleos urbanos horizontales, disgregados y policéntricos serán disímiles a los que se obtienen en urbanizaciones verticales, compactas y monocéntricas.

Levantamiento y validación de la información básica

Se seleccionó la información básica para caracterizar la zona en estudio, entre ellas el plano digital de zonificación catastral de la red geodésica municipal de la ciudad, el cual permitió conocer el uso de la tierra permisible

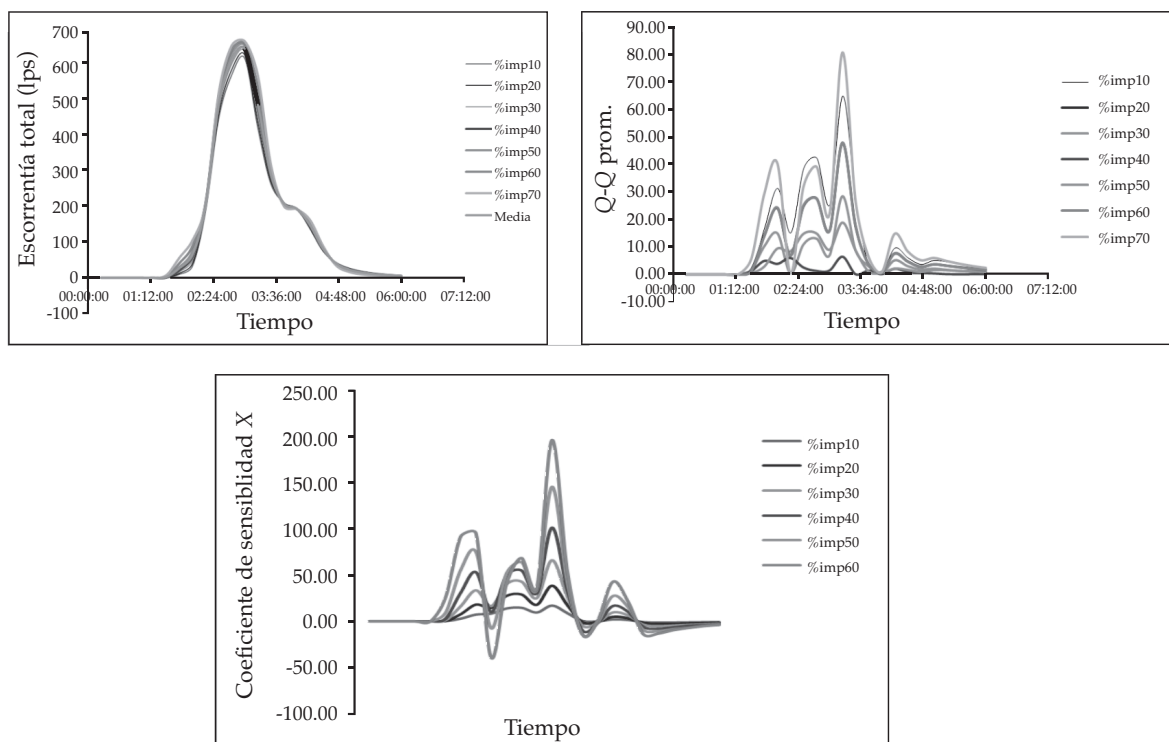


Figura 2. Gráficas de dispersión de h (lámina de agua), V (velocidad media) para diferentes valores del parámetro y variación de la sensibilidad del parámetro respecto a la escorrentía total (Q).

en la zona en estudio, densidad residencial neta, y las condiciones de las parcelas y edificaciones. La delimitación de la zona de estudio y el análisis cualitativo preliminar se llevó a cabo con el apoyo de las imágenes de satélite (figura 3).

Se corroboró en campo la información previamente aportada por las imágenes de satélite; para ello se identificaron los usos y las coberturas de suelos existentes; además, se aplicaron técnicas para la recolección y validación de los datos de campo, entre las que se incluyen encuestas, entrevistas informales y entrevistas no estructuradas a los habitantes de la comunidad. Las coberturas mixtas que caracterizan la zona en estudio requirieron de un detallado y exhaustivo conocimiento de cada cobertura, para ello se seleccionaron zonas con características homogéneas y representativas de las parcelas predominantes en el sector oeste de la ciudad. En total se especificaron cinco clases, claramente diferenciadas: pavimento

(concreto y asfalto), aceras, árboles, techo y tierra (suelo desnudo).

Estimación del porcentaje de área impermeable en el sector oeste de la ciudad de Coro

Se procesaron imágenes de satélite de alta resolución por dos vías: una automática (clasificación supervisada y no supervisada) y otra manual. Para el procesamiento automático asistido por computador se emplearon imágenes de satélite que cubren un área aproximada de 60 km² del municipio Miranda de la ciudad de Coro, captadas por el satélite *Quickbird-2*, con resolución de 60 cm (pancromático) – 2.4 m (multiespectral) por píxel; cuatro bandas espectrales; tres bandas en el espectro visible (RGB); una banda en el infrarrojo cercano; una pancromática. De forma preliminar se experimentó un procesamiento automático de las imágenes de satélite basado en

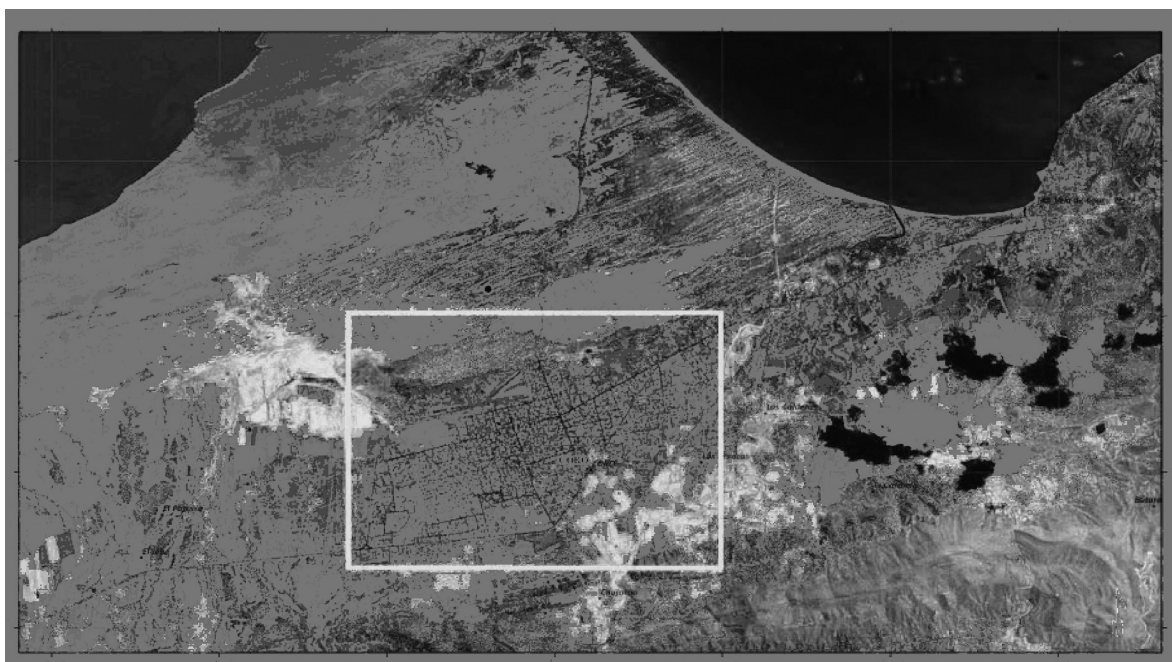


Figura 3. Mapa de ubicación del área de estudio, Coro, estado Falcón.

la clasificación supervisada y no supervisada con ayuda de un programa especializado para tal fin (IDRISI). Se realizó la clasificación no supervisada procesando el grupo de archivos *raster* para las cuatro bandas, obteniendo 35 clases espectrales. A criterio de los autores, esta categorización resulta exagerada y puede justificarse por la disparidad espacial en las coberturas presentes en la zona, y atribuibles a los diferentes tipos de techo en las viviendas. Posteriormente, se probó la clasificación supervisada, a fin de desarrollar las firmas espectrales de categorías conocidas: pavimento asfáltico, concreto, techos, árboles y tierra. Para ello, se trazaron polígonos, con el objeto de identificar y localizar los sitios de entrenamiento correspondientes a cada tipo de cobertura. Se analizaron automáticamente todos los píxeles y se comparó su firma particular con cada una de las firmas conocidas. Los clasificadores empleados fueron los siguientes: clasificador por mínima distancia en sus dos modalidades, distancia Euclídea o directa, y distancia normalizada; clasificador por máxima probabilidad, y clasificador por paralelepípedos (Hang y Segovia, 2003). A criterio de los autores, los resultados obtenidos con este tipo de clasificadores no son satisfactorios, ya que al contrastar áreas comunes, claramente se observan patrones totalmente diferenciados. Además, el arreglo geométrico y la disposición de coberturas tanto de techos como de suelo desnudo (tierra) no coinciden con la validación realizada en campo; en tal sentido, las imágenes resultantes demuestran que la técnica implementada pierde validez cuando las clases seleccionada para entrenamiento se presentan muy mezcladas en áreas pequeñas. De forma alternativa se optó por un método manual, identificando zonas representativas sobre las imágenes por satélite, que incluyeran los cinco usos detectados como predominantes en el área (pavimento, tierra, techo, aceras y árboles), a fin de construir por cada manzana de la cuenca polígonos de área conocida. La técnica fue implementada sobre seis subsectores, a fin de asegurar la representatividad espacial de la muestra.

Construcción de la curva “densidad poblacional vs % imp.”

La hidrología urbana moderna establece dos criterios para la determinación indirecta del valor del porcentaje de suelo impermeable de una subcuenca urbana: el primero de ellos correlaciona el porcentaje de área impermeable con la densidad poblacional concentrada en esa subcuenca y el otro lo relaciona con la cantidad de domicilios por unidad de área. La fiabilidad de ambos criterios es un tema que está actualmente en discusión; sin embargo, los dos enfoques parten de la base de que existe dependencia directa entre la impermeabilidad del suelo y los procesos urbanizadores (Pinto y Martins, 2008). A criterio de los autores, la estimación indirecta del parámetro de impermeabilidad depende principalmente de la disponibilidad de datos demográficos (núm. hab./área) adecuado a la escala del estudio hidrológico urbano. Para efectos del posterior análisis comparativo a nivel local y global, se construyeron curvas que correlacionan este parámetro con las dos variables mencionadas (Heaney *et al.*, 1999). Los instrumentos para levantar información de campo (encuestas) demostraron que para las zonas analizadas, el promedio de habitantes por vivienda es de 4 hab./dom.

Resultados y discusión

Los resultados obtenidos a partir de la interpretación automática de imágenes coinciden con lo publicado por Campana (1995) en el uso de técnicas de clasificación tradicionales en áreas urbanas. Las curvas regionalizadas obtenidas (figura 4) muestran la relación funcional entre el porcentaje de área impermeable y la densidad poblacional en la zona estudiada. Es pertinente aclarar que el sistema de unidades utilizado para construir las funciones fue seleccionado de forma conveniente para realizar las comparaciones con las curvas reportadas en las escasas publicaciones sobre este tema.

Se aprecian con claridad modelos tendenciales diferentes entre una zona con una forma urbana predominantemente horizontal y dispersa (Pantano Abajo), y otra zona (La Velita 4). Este resultado era de esperarse, y reafirma la hipótesis planteada acerca de la influencia de la estructura urbana sobre la función. En el cuadro 1 se muestra, para cada caso, el polinomio que correlaciona la variable independiente per./acre y la relación dom./ha, con el parámetro % imp.

Donde D_p representa la densidad de población y D_d la densidad de domicilios en el área urbanizada de la subcuenca. Se probaron varios modelos matemáticos tendenciales para ajustar los datos, sin embargo, en función del coeficiente de correlación (R^2) y del consenso reportado en la literatura, se optó por el ajuste a un polinomio de segundo grado.

Verificación local de los resultados

Se diseñó un experimento en el que se estudiaron tres núcleos urbanos horizontales y disgregados, localizados al oeste de la ciudad, en sectores diferentes a los utilizados para ajustar las funciones regionales. Para tal fin, se seleccionaron manzanas representativas de dichas subcuencas y se estimó manualmente el parámetro hidrológico (% imp.), a fin de conocer su valor numérico real en las zonas seleccionadas. Luego, se procedió a superponer los tres pares (pers./acre; % imp.) sobre la familia de curvas obtenidas (figura 5). Las diferencias porcentuales relativas entre el valor esperado en la función y los valores calculados para los núcleos urbanos de prueba fueron 7.415% para la primera subcuenca analizada, 2.64%

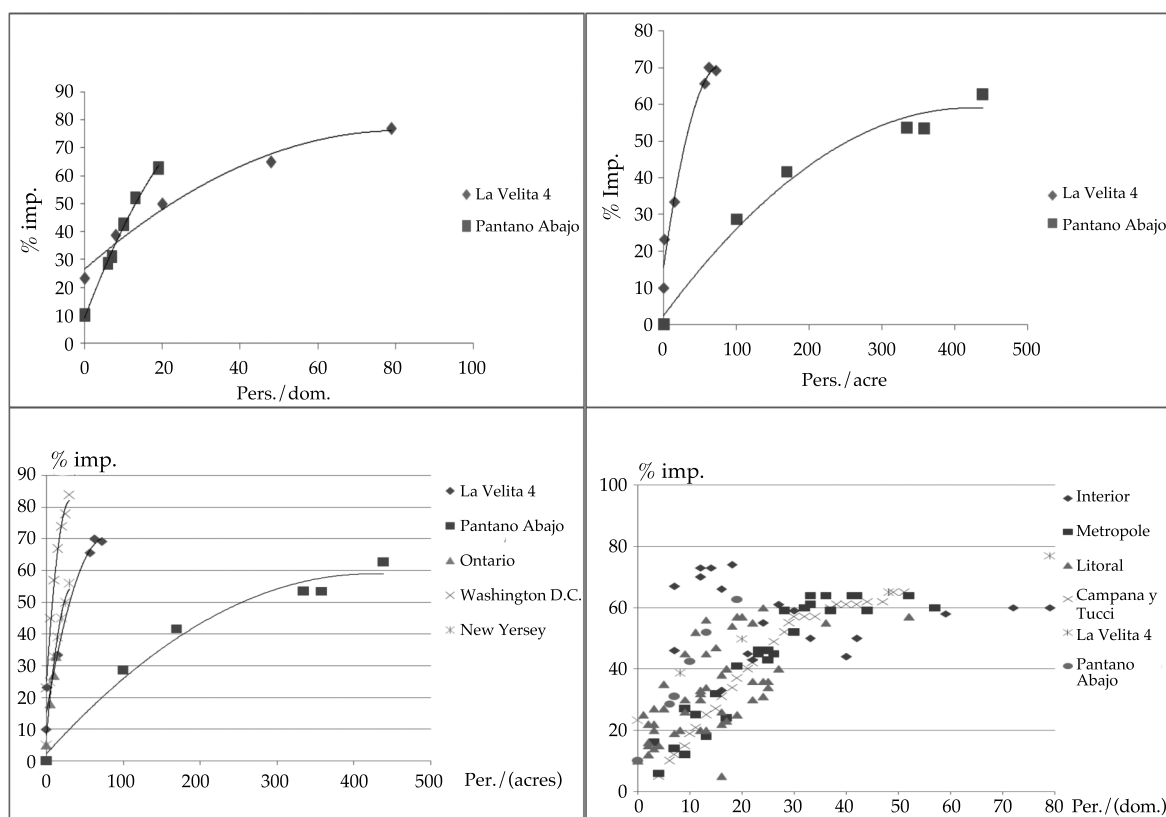


Figura 4. Curvas regionalizadas para la ciudad de Coro y comparación global con otros autores.

Cuadro 1. Funciones regionalizadas.

Función	Forma urbana predominante	Modelo ajustado	R ²
D_p vs. % imp.	Horizontal y dispersa	% imp. = $-0.000D_p^2 + 0.268D_p + 2.352$	0.976
	Monocéntrica y medianamente verticalizada	% imp. = $-0.009D_p^2 + 1.410D_p + 15.44$	0.978
D_D vs. % imp.	Horizontal y dispersa	% imp. = $-0.007D_D^2 + 1.223D_D + 26.36$	0.982
	Monocéntrica y medianamente verticalizada	% imp. = $-0.043D_D^2 + 3.698D_D + 9.126$	0.993

para la segunda y 9.92% para la tercera. Resulta notable señalar, según la experiencia de los autores aplicando el SWMM en la modelación hidrológica e hidráulica de los sistemas de drenaje en Coro, que variaciones de +/- 10% en el parámetro % impermeable, repercuten de forma insignificante en las salidas del módulo de cálculo hidrológico del modelo. Este procedimiento demuestra que la metodología proporciona al modelador una aproximación aceptable para la estimación del parámetro.

Conclusiones

El modelo de cuenca urbana fue sometido a una prueba de sensibilidad de las variables analizadas (niveles, velocidades y caudales) en relación con el parámetro de impermeabilidad, evidenciando que el caudal es notablemente

más sensible a la variación de este parámetro hidrológico que la lámina de flujo en calles y las velocidades. En general, puede afirmarse que los algoritmos utilizados al aplicar la técnica de interpretación automática de imágenes de satélite a través de la clasificación no supervisada no representan una opción viable para cuencas altamente urbanizadas. Al hacer clasificación supervisada de las imágenes satelitales, con el fin de generar los mapas que representan la cobertura impermeable en la cuenca, se presentaron problemas en las zonas de transición con usos mezclados que no pueden ser resueltos con los clasificadores tradicionales; en este aspecto, la resolución espacial de las imágenes de satélite es un elemento fundamental cuando se aplica la clasificación supervisada en una cuenca urbana. En cuanto al uso de estas funciones como método indirecto para la estimación del % imp., los resultados del experimento sobre las subcuencas piloto evidencian una correspondencia aceptable para el nivel de análisis hidrológico que se persigue. Los resultados demostraron además que existe una correspondencia directa entre la forma urbana y el parámetro estudiado, por lo que resulta fundamental la caracterización preliminar de la forma urbana como factor clave para decidir el tipo de curva que se aplicará en un determinado caso. Las validaciones de campo de los sectores estudiados indica que la metodología puede ser considerada como eficaz, aunado al hecho de que estas curvas constituyen una herramienta eficiente para ahorrar tiempo importante en la estimación inicial de este parámetro en la

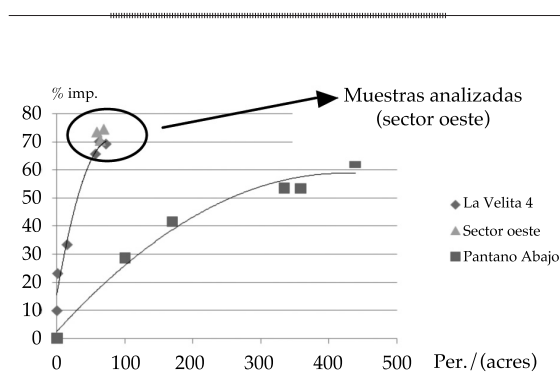


Figura 5. Representación simultánea de los tres casos de estudio (sector oeste) sobre las curvas obtenidas.

primera corrida del modelo, considerando que cuando se dispone de mediciones de campo, el valor del parámetro se variará hasta obtener una calibración aceptable. Como aporte adicional del trabajo se construyó una base de datos espaciales incorporada a un sistema de información geográfico, con los respectivos parámetros de uso de la tierra y su respectivo porcentaje de área impermeable por manzana, de tal forma que al aplicar cualquier modelo de simulación se pueda determinar la escorrentía superficial en cualquiera de las zonas estudiadas.

Referencias

- BHADURI, B., MINNER, M., TATALOVICH, S., and HARBOR, J. Long-Term Hydrologic Impact of Urbanization: A Tale of Two Models. *Journal of Water Resources Planning and Management*. ASCE. Vol. 127, No. 1, 2001, pp. 13-19.
- CAMPANA, A.N. *Impacto da urbanização nas cheias urbanas*. Tesis de doctorado. Porto Alegre, Brasil: UFRGS Programa de Pós-Graduação em Engenharia, Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, 1995.
- DAVID, J.P., ROHRER, C.A., and ROESNER, L.A. *Effects of Four Catchment Modifications on Urban Runoff*. Fort Collins, USA: Laboratorio de Infraestructura Urbana, Departamento de Ingeniería civil, Universidad de Colorado, 2006.
- HANG, M.V. y SEGOVIA, M.A. *Estimación del valor del número de curva (CN) a través de imágenes satelitales Landsat 5 – TM*. Resistencia, Argentina: Administración Provincial del Agua del Chaco, 2003, 8 pp.
- HEANEY, J.P., SAMPLE, D., and WRIGHT, L. *Geographical Information Systems and Urban Stormwater Management*. Edison, USA: Draft report to the USA EPA, 1999.
- KNUPP, D.C., SILVA, A.J., and SACCO, W.F. Radiative Properties Estimation with the Particle Collision Algorithm Based on a Sensitivity Analysis, High Temperatures – High Pressures. *Mecánica Computacional*. Vol. XXIX, No. 74, 2009.
- LUGON, J., SILVA NETO, A.J., and WATTS-RODRIGUES, P.P.G. *Assessment of Dispersion Mechanisms in River by Means of an Inverse Problem Approach*. Inverse Problems. Design and Optimization Symposium, Miami, Florida, April, 2008, pp. 16-18.
- MACOR, J. Análisis comparativo del parámetro ancho de cuenca del modelo Runoff – SWMM. *Ingeniería Hidráulica en México*. Vol. XVII, núm 2, abril-junio de 2002, pp. 17-26.
- MAKSIMOVIC, C. General overview of urban drainage principles and practice: Volumen I. In: *Urban Drainage in Specific Climates*. Paris: Ediciones UNESCO, 2001, 227 pp.
- PINTO, C.A. y MARTINS, R. *Variabilidade da Taxa Impermeabilização do solo urbano*. XXIII Congreso Latinoamericano de Hidráulica en Cartagena de Indias, Colombia, 2008.
- TISDALE, T.S., HAMRICK, J.M., and YU, S.L. Kinematic wave analysis of sheet flow using topography fitted coordinates. *Journal of Hydrologic Engineering*. ASCE. Vol. 4, No. 4, 1999, pp. 367-370.
- TSAL, C.W. Applicability of Kinematic, Noninertia, and Quasi-Steady Dynamic Wave Models to Unsteady Flow Routing. *Journal of Hydraulic Engineering*. ASCE. Vol. 129, No. 8, 2003, pp. 613-627.
- URBONAS, B. *Stormwater Runoff Modeling: Is it as Accurate as We Think?* Engineering Conferences. International Conference on Urban Runoff Modeling: Intelligent Modeling to Improve Stormwater Management, Humboldt State Univ., Arcata, CA, USA, 2007.
- WARWICK, J.J. and TADEPALLI, P. Efficacy of SWMM Application. *Journal of Water Resources Planning and Management*. ASCE. Vol. 117, No. 3, 1991, pp. 352-366.
- ZAGHLOUL, N.A. Sensitivity analysis of the SWMM Runoff-Transport parameters and the effects of catchment discretisation. *Advanced Water Resources*. Vol. XI, No. 4, December, 1983, pp. 214-223.
- ZAMBRANO, D. y SÁNCHEZ, L. *Evaluación de la Respuesta Hidrodinámica de la Quebrada de Chabe Empleando un Modelo Hidráulico Unidimensional*. Coro-Falcón. Trabajo de Investigación. Coro, Venezuela: UNEFM, 2009, 300 pp.

Abstract

ALEJANDRO-SÁNCHEZ, L. & MARTÍNEZ-GONZÁLEZ, Y. Sensitivity analysis and regional imperviousness in an urban basin. *Water Technology and Sciences (in Spanish)*. Vol. IV, No. 1, January-March, 2013, pp. 203-212.

The complexity of the initial determination of water imperviousness, commonly abbreviated as % imp., is partially due to the high spatial variability that characterizes an urban environment, which presents a variety of land covers within small portions of land, some of which may be less than 1 hectare. This article seeks to contribute to the methodology for indirectly measuring imperviousness based on the number of inhabitants and residences per unit area, using as a case study two sub-basins located in the western sector of the city of Coro, Venezuela. First, sensitivity tests of imperviousness were performed and then the technique for automatic digital interpretation of satellite images with traditional classifiers was tested to determine its quantification, revealing considerable inconsistencies in the transition zones with mixed uses. Manual extraction of impermeable zones was chosen and regionalized curves were constructed. From a methodological perspective, the procedure was effective since the regionalized curves enabled saving a significant amount of time in the initial calculation of this parameter.

Keywords: imperviousness parameter, urban hydrology, satellite images, regionalization, SWMM.

Dirección institucional de los autores

Ing. Luis Alejandro Sánchez Román

Profesor agregado
Especialista en Gestión de Recursos Hidráulicos
Doctorante en el área de Ingeniería Hidráulica
Centro de Investigaciones de Recursos Hídricos (CIDRHI)
Universidad Nacional Experimental Francisco de Miranda
Complejo Académico Los Perozo, Coro, Estado Falcón,
VENEZUELA
Teléfono: +268 2524 685
luisanchezr@yahoo.com

Dr. Yoel Martínez González

Centro de Investigaciones Hidráulicas (CIH)
Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría
(ISPJAE)
Calle 114, Marianao
19390 Ciudad de La Habana, CUBA
Teléfono: + 53 (7) 2663 383
ymarq@cih.cujae.edu.cu