

XXIV CONGRESO LATINOAMERICANO DE HIDRÁULICA
PUNTA DEL ESTE, URUGUAY, NOVIEMBRE 2010

DETERMINACIÓN DE PORCENTAJES DE IMPERMEABILIDAD EN
SUBCUENCAS URBANAS MEDIANTE FOTOS SATELITALES

Santiago Symonds, Magdalena Crisci, Christian Chreties, Luis Silveira
Instituto de Mecánica de los Fluidos e Ingeniería Ambiental (IMFIA), Facultad de Ingeniería, Universidad de la
República. Herrera y Reissig 565, Montevideo, Uruguay. ssymonds@fing.edu.uy.

RESUMEN:

Este trabajo se realizó en el marco de un convenio entre la Facultad de Ingeniería y la Intendencia de Salto, que tiene por propósito dar solución a inundaciones urbanas y problemas de calidad de agua asociados. Los estudios hidrológicos requieren determinar la impermeabilidad de subcuencas para posteriormente calcular la escorrentía de las mismas. Para esto, se desarrolló una metodología de trabajo utilizando imágenes satelitales, que permitió identificar zonas de uso y ocupación de suelo uniforme, y clasificar el área de estudio según el grado de impermeabilidad en cuatro clases: nula, baja, media o alta. Luego se analizaron en detalle unidades menores (manzanas), tomadas al azar de cada clase, y se determinó su porcentaje de impermeabilidad, promediándolo y tomándolo como representativo de la clase. Con estos valores se ponderó según el área de cada clase que tenga la subcuenca determinando su impermeabilidad. A efectos de demostrar la robustez y cualidades de la metodología propuesta se realizaron dos análisis de sensibilidad, uno vinculado a la distribución espacial de la impermeabilidad dentro de cada subcuenca y otro considerando el efecto de aumentar la cantidad de muestras y estudiando cada subcuenca en particular.

ABSTRACT:

This work was done under an agreement with the Salto City Council, in order to solve urban flooding, drainage and associated water quality problems. Hydrological studies require determining the subcatchment's percentage of imperviousness in order to calculate runoff. To achieve this a methodology using satellite imagery was developed, identifying areas of uniform land use and occupation, and classifying the study area by the degree of imperviousness in four classes: null, low, medium or high. After that smaller units (blocks) were analyzed in detail, randomly taken from each class, determining the percentage of imperviousness of each one, and taking the average as representative of the class. Finally with these values and considering the area of each class in a subcatchment we calculate their percentage of imperviousness associated. In order to demonstrate the strength and qualities of the proposed methodology, two sensitivity analysis were done. The first one is related to the spacial distribution of the imperviousness within a subcatchment and the second regarding to the effect of considering a greater number of samples and studying each subcatchment independently.

PALABRAS CLAVES:

Uso y ocupación de suelo, porcentaje de impermeabilidad, hidrología y drenaje urbano.

INTRODUCCIÓN

El arroyo Sauzal atraviesa la ciudad de Salto, en el departamento del mismo nombre (Uruguay), desembocando en el río Uruguay. A través de su curso por la ciudad, se generan inundaciones localizadas, a partir de eventos de lluvia de diferente magnitud.

La creciente recurrencia de las inundaciones urbanas en la ciudad generó la necesidad de contar con un diagnóstico del comportamiento hidrológico – hidráulico del arroyo Sauzal, en relación al drenaje de aguas pluviales, el cual fue realizado en el marco de un convenio entre la Universidad de la República (Facultad de Ingeniería – IMFIA) y la Intendencia de Salto.

La componente hidrológica requirió determinar la escorrentía del sistema de subcuencas de aporte al arroyo Sauzal, para lo cual fue necesario estimar el grado de impermeabilidad de las mismas. Si bien existe tecnología con la cual se la podría estimar a partir del tratamiento digital de imágenes satelitales, las mismas tienen dificultades en las áreas urbanas debido a la gran variabilidad de los colores que presentan las mismas. Por esto se buscó una metodología más sencilla y ágil de estimar el porcentaje de impermeabilidad en subcuencas urbanas.

OBJETIVOS

Este trabajo tiene por objetivo presentar la metodología seguida para determinar el grado de impermeabilidad de las subcuencas de aporte del arroyo Sauzal.

METODOLOGÍA

La metodología empleada para determinar el grado de impermeabilidad de cada subcuenca de aporte del arroyo Sauzal, consistió en reconocer zonas con un grado de ocupación del suelo relativamente homogéneo y uniforme, analizando visualmente imágenes satelitales. En la Figura 1 se muestra una imagen satelital que abarca toda la cuenca del arroyo Sauzal, donde al observar la misma en su conjunto se aprecia que hay zonas con colores relativamente uniformes, variando desde un gris o blanco para las zonas más urbanizadas y por lo tanto impermeabilizadas, hasta el color verde asociado a zonas rurales o no urbanizadas y por lo tanto permeables.



Figura 1.- Imagen satelital de la cuenca del arroyo Sauzal

Para considerar esta variación entre los dos colores extremos, el grado de ocupación de suelo o impermeabilidad de las zonas se diferenció en cuatro clases: nula, baja, media o alta.

- **Nula:** cuando el terreno se encuentra en estado “natural” como por ejemplo pasturas sin intervención.
- **Baja:** cuando las manzanas presentan un alto porcentaje de zonas verdes en el centro y por lo general las calles adyacentes no se encuentran pavimentadas.
- **Media:** cuando se perciben algunas zonas verdes en el centro de las manzanas; pero en menor medida que la categoría anterior; y las calles adyacentes por lo general se encuentran pavimentadas.
- **Alta:** cuando el contenido de zonas verdes dentro de las manzanas es muy bajo a nulo y las calles adyacentes se encuentran pavimentadas.

En la Figura 2 se presenta un ejemplo de cada una de las clases de ocupación del suelo consideradas.



(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 2.- Ejemplos de las diferentes clases de impermeabilidad consideradas, (a) nula (b) baja (c) media (d) alta

Una vez establecidas las características de cada una de las cuatro clases de impermeabilidad del suelo, se procedió a identificar las zonas dentro de la cuenca del arroyo Sauzal que presentaran las características antes mencionadas. Se obtuvo así la división de la cuenca según zonas con uso de suelo relativamente uniforme, las cuales se pueden apreciar más adelante en la Figura 4. Cabe mencionar que esto se realizó independientemente de los límites de cada subcuenca, es decir puede haber una zona de cierta clase de impermeabilidad que vaya más allá de los límites de una subcuenca.

Seguidamente se interceptó las zonas de impermeabilidad uniforme con las divisorias de las subcuencas para calcular que porcentaje del área total de cada subcuenca está asociada a cada clase de impermeabilidad. De esta forma se obtuvieron los resultados presentados en la Tabla 1.

A continuación se calculó un porcentaje medio de impermeabilidad asociado a cada clase para tomarlo como representativo de la misma. Para esto se seleccionaron las tres subcuencas con mayor área de cierta clase de impermeabilidad, asociadas a los valores mostrados en negrita en la Tabla 1. Dentro de dichas subcuencas se eligieron tres manzanas al azar respectivamente (una en cada subcuenca y en la zona de dicha clase de impermeabilidad) y se calculó el porcentaje de impermeabilidad de cada manzana como el cociente entre el área impermeable y el área total de la misma, como se muestra en la Ecuación 1.

$$\%imp = \frac{A_{impermeable}}{A_{total}} \times 100 = \frac{A_{total} - A_{permeable}}{A_{total}} \times 100 \quad [1]$$

Donde:

%imp: es el porcentaje de impermeabilidad de la manzana

$A_{impermeable}$: área impermeable de la manzana

$A_{permeable}$: área permeable de la manzana

A_{total} : área total de la manzana

Se presentan las dos formas ya que en algunos casos es más fácil cuantificar la porción impermeable y en otros la permeable.

Dichas áreas fueron determinadas digitalizando las zonas impermeables de la manzana sobre la imagen satelital. Por último se determinó el porcentaje medio de impermeabilidad de la clase correspondiente, promediando los valores obtenidos en las tres manzanas. Este procedimiento se realizó para cada una de las clases de impermeabilidad definidas anteriormente. En la Figura 3 se presentan las manzanas escogidas al azar de cada clase de impermeabilidad, y la delimitación de las áreas impermeable, permeable y total posteriormente utilizadas para los cálculos.

Finalmente, contando con un valor de porcentaje de impermeabilidad asociado a cada clase, se determinó el porcentaje de impermeabilidad de cada subcuenca de aporte del arroyo Sauzal, ponderando según el área correspondiente a cada clase de impermeabilidad. Esto se puede expresar para cada subcuenca mediante la siguiente ecuación:

$$\%imp = \frac{A_{imp-baja} \times \%_{imp-baja} + A_{imp-media} \times \%_{imp-media} + A_{imp-alta} \times \%_{imp-alta}}{A_{total}} \quad [2]$$

Siendo:

%imp: es el porcentaje de impermeabilidad de la subcuenca

$A_{imp-baja}$: es el área dentro de la subcuenca con clase de impermeabilidad baja

$\%_{imp-baja}$: es el porcentaje de impermeabilidad asociado a la clase de impermeabilidad baja

Lo mismo para clase media y alta.

A_{total} : es el área total de la subcuenca

RESULTADOS

La Tabla 1 muestra, para cada subcuenca de aporte al arroyo Sauzal, el área correspondiente a cada clase de impermeabilidad, destacando en **negrita** las tres subcuencas con mayor área de cada clase de impermeabilidad respectivamente.

Tabla 1.- Distribución impermeabilidad por subcuencas

Subcuenca	Área de cada clase de impermeabilidad [has]			
	Nula	Baja	Media	Alta
Presa	45.3	49.4	0.0	0.0
Talleres	1.0	51.9	11.1	11.4
Solari	17.4	0.0	0.8	0.0
B° Parque	7.8	10.4	0.0	0.0
Uni	1.3	6.8	1.0	0.0
Este-1	0.0	6.0	17.6	0.0
Este-2	7.0	7.0	7.0	2.4
Fátima	23.4	41.3	19.6	6.3
Herrera	1.0	0.0	19.1	19.8
Viera	0.0	0.0	11.6	0.0
Cuartel	2.4	14.0	9.5	0.0
Centro	0.0	6.8	12.1	22.7
Cerro	0.0	4.9	20.5	0.0
Delgado	0.0	0.0	8.5	0.0
Brum	2.5	4.7	10.8	0.0
Puerto	0.0	12.6	0.0	0.0

Las tres manzanas de cada clase de impermeabilidad seleccionadas al azar se presentan en la Figura 3, con el área permeable o impermeable sombreada en verde o magenta respectivamente.

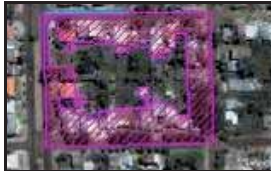
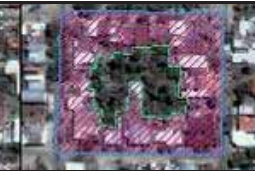
Clase de impermeabilidad	Manzana seleccionada al azar en cada subcuenca		
Baja	 Presa	 Talleres	 Fátima
Media	 Fátima	 Herrera	 Centro
Alta	 Centro	 Herrera	 Talleres

Figura 3.- Manzanas seleccionadas para determinar porcentajes de impermeabilidad

En la Tabla 2 se presentan los porcentajes de impermeabilidad obtenidos en las manzanas elegidas al azar, donde promediando se obtiene el porcentaje de impermeabilidad asociado a cada clase.

Tabla 2.- Impermeabilidad de muestras al azar de cada clase

Clase	Subcuenca	Área [m ²]		Porcentaje de impermeabilidad	
		Imper.	Total		
Baja	Presa	2047.5	6610.1	31.0%	35.7%
	Talleres	1721.2	5020.1	34.3%	
	Fátima	2643.8	6299.9	42.0%	
Media	Fátima	4061.9	6381.7	63.6%	71.8%
	Herrera	4212.5	5684.3	74.1%	
	Cerro	5253.4	6763.9	77.7%	
Alta	Talleres	5486.9	6278.2	87.4%	89.2%
	Herrera	3406.6	3819.3	89.2%	
	Centro	5236.0	5750.7	91.0%	

A continuación en la Figura 4 se presenta el mapa de impermeabilidad generado para la cuenca del arroyo Sauzal, donde se aprecia la distribución de las clases de impermeabilidad y el porcentaje de impermeabilidad determinado para cada subcuenca, el cual fue determinado ponderando según el área correspondiente a cada clase de impermeabilidad dentro de cada subcuenca.

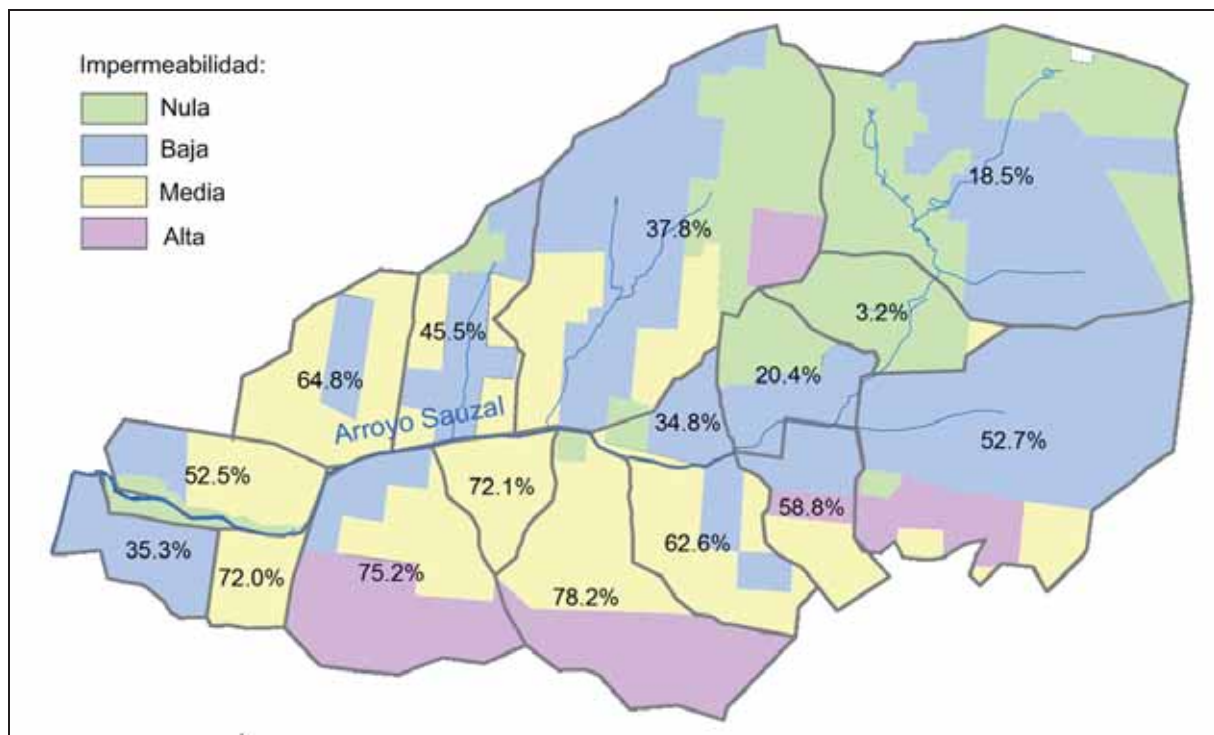


Figura 4.- Distribución y porcentaje de impermeabilidad de las subcuencas del arroyo Sauzal.

DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

Para poder demostrar la robustez y cualidades de la metodología propuesta se realizaron dos análisis de sensibilidad, uno enfocado a tomar en cuenta la variabilidad espacial de la impermeabilidad dentro de cada subcuenca y otro considerando el efecto de tomar una mayor cantidad de muestras estudiando cada subcuenca en particular.

Análisis de sensibilidad I

Aplicando la metodología propuesta se obtiene un valor promedio de impermeabilidad para cada subcuenca, con el cual se calcularán los caudales picos e hidrogramas de salida. Por lo tanto el mismo no considera la ubicación espacial de las clases de impermeabilidad dentro de la subcuenca, es decir el efecto sobre caudal pico e hidrograma si la clase de impermeabilidad se encuentra en la parte alta o baja de la subcuenca. Por esta razón se realizó un análisis de sensibilidad, para estudiar las variaciones en el caudal pico y en el hidrograma de salida comparando para dos subcuencas de interés (“Fátima” y “Herrera”), los resultados obtenidos mediante la metodología propuesta y la resultante de tomar en cuenta el orden de aparición de zonas de distinto grado de impermeabilidad. Para esto es necesario una mayor discretización de las subcuencas, considerando el escurrimiento de cada clase de impermeabilidad en forma independiente, con sus tiempos de concentración y de viaje, porcentajes de impermeabilidad y área y por lo tanto caudales picos. Se tiene entonces un hidrograma para cada clase de impermeabilidad, con los cuales asumiendo válido el principio de superposición de los mismos en el punto de cierre se obtiene el hidrograma resultante. A su vez se consideró el orden de aparición real de las clases de impermeabilidad en cada subcuenca, y también el orden inverso, de forma de ver qué pasaría con el método si la urbanización hubiese sido inversa a la real. En las Figuras 5 y 6 se presentan, para las subcuencas “Fátima” y “Herrera” respectivamente, a modo comparativo, los hidrogramas originales obtenidos con la metodología propuesta y los de considerar el orden real e inverso de la ubicación de la clases de impermeabilidad.

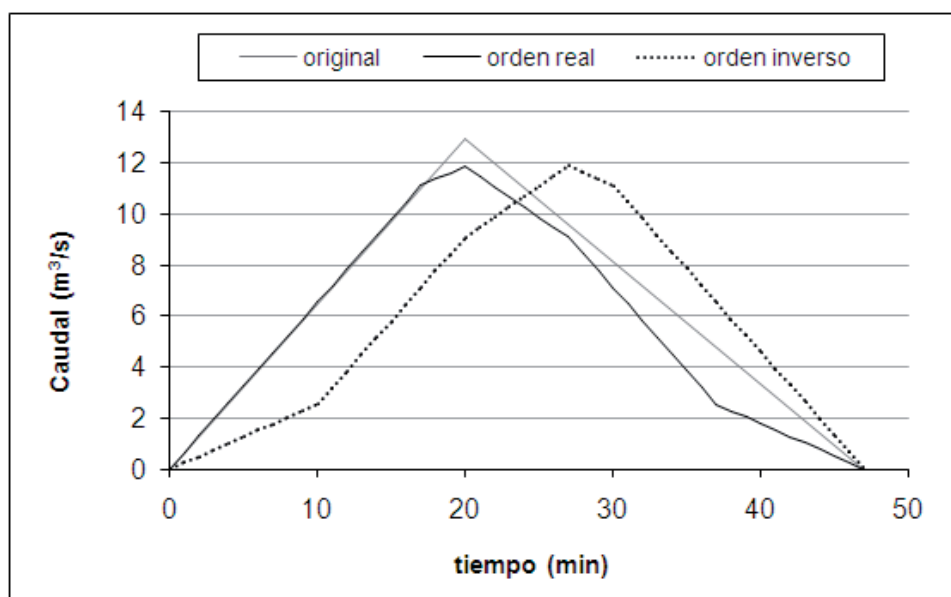


Figura 5.- Hidrogramas subcuenca Fátima

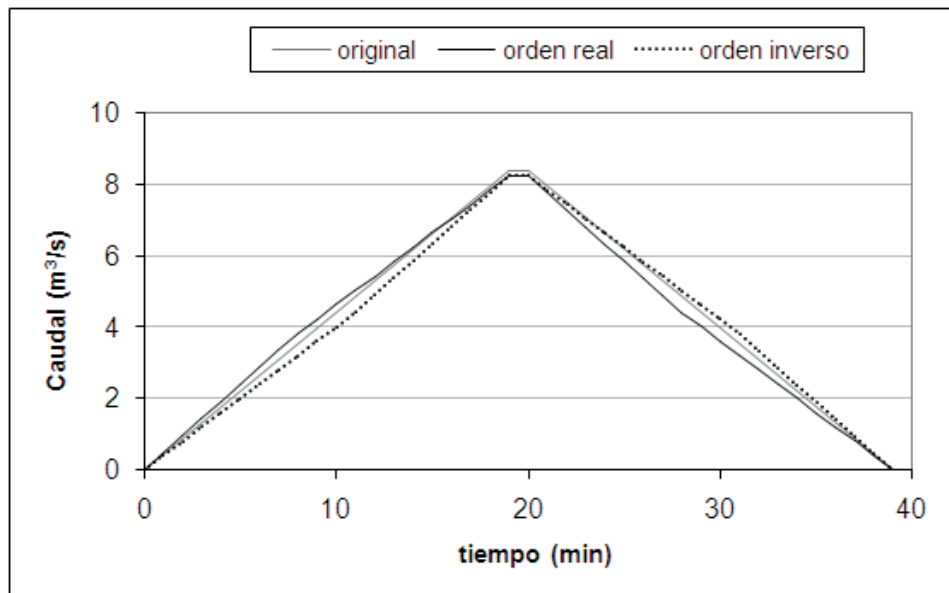


Figura 6.- Hidrogramas subcuenca Herrera

Puede observarse que el hidrograma original considerado en el estudio se encuentra del lado de la seguridad respecto a los dos hidrogramas resultantes de considerar el orden de aparición del grado de impermeabilidad. Por otra parte el mismo es muy similar al hidrograma correspondiente al “orden real”, por lo que se considera que la metodología utilizada en el estudio es una buena aproximación, sin necesidad de discretizar aún más las subcuencas.

Análisis de sensibilidad II

En este análisis de sensibilidad se busca comparar los resultados de la metodología propuesta con los obtenidos por otra que describa con mayor detalle el uso de suelo en la subcuenca en busca de mayor precisión en el resultado. La metodología alternativa consiste en calcular la impermeabilidad de cada subcuenca independientemente, tomando tres muestras al azar de cada clase de impermeabilidad dentro de esa subcuenca, promediándolas y ponderándolas por su área asociada. Se realiza la comparación en una subcuenca de interés, la denominada “Centro” dado que cuenta con 3 clases de impermeabilidad. En la misma se seleccionan 3 manzanas al azar en cada zona con clase de impermeabilidad uniforme y mediante el mismo procedimiento descrito en la metodología propuesta se calcula el porcentaje de impermeabilidad de cada manzana, los resultados se muestran en la Tabla 3.

Tabla 3.- Impermeabilidad de manzanas subcuenca “Centro”

Clase	Manzana	Área [m ²]			Porcentaje de impermeabilidad	
		imper	perm	total		
Baja	B1	8167.7	8245.8	16413.6	0.50	49.6%
	B2	8454.4	6806.4	15260.8	0.55	
	B3	8075.2	10457.0	18532.2	0.44	
Media	M1	11388.7	5399.1	16787.8	0.68	70.7%
	M2	12247.6	3795.1	16042.7	0.76	
	M3	11118.2	5244.3	16362.6	0.68	
Alta	A1	15182.7	1375.0	16557.7	0.92	88.2%
	A2	16464.3	2637.1	19101.4	0.86	
	A3	14153.3	2164.7	16317.9	0.87	

En la Tabla 3 se aprecia que los valores de impermeabilidad asociados a clase media y alta varían en menos de 2% respecto a los hallados con la metodología propuesta. No así el caso de impermeabilidad baja donde se pasa de 35.7% a 49.6% aumentando casi un 15% al tomar varias manzanas de esta subcuenca. Con estos valores se calcula la impermeabilidad de la subcuenca que resulta en 76.8% en comparación con el 75.2% obtenido anteriormente. Este aumento menor al 2% puede atribuirse al aumento en el porcentaje de impermeabilidad asociado a la clase baja. Cabe señalar que esta diferencia puede ser despreciable en esta subcuenca dado que el área asociado a la clase de impermeabilidad baja es pequeña con respecto a la total, pero, ¿qué pasaría en las subcuencas donde la clase de impermeabilidad baja tiene un peso mayor?

Se podría pensar que el error en el porcentaje de impermeabilidad asociado a las mismas sería mayor. Sin embargo debe considerarse que en la metodología propuesta se calcula el porcentaje de impermeabilidad representativo de cada clase con muestras tomadas en las subcuencas que presentan mayor cantidad de dicha clase.

Este resultado sugiere que pueda ser necesario una mayor discretización de las clases, sobretodo de la clase baja, para considerar estas diferencias entre subcuencas, por ejemplo una clase baja con un porcentaje cercano al 25% y una baja-media cercana al 50%.

Por otra parte se considera que la diferencia en los resultados es muy baja en comparación con el aumento en los cálculos necesarios para obtener una mayor descripción cuantitativa de cada subcuenca.

Una vez realizados estos análisis de sensibilidad se concluye que la metodología desarrollada es de fácil y rápida aplicación y permite determinar el porcentaje de impermeabilidad de las diferentes subcuencas de estudio con un grado de precisión aceptable para el uso propuesto.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Campana, N.; Tucci, C.E.M. (1994). "Estimativa de área impermeável de macrobacias urbanas", Caderno de Recursos Hídricos V12 n°2 p19-94.

Chow, V.T., Maidment, D.R. y Mays, L.W. (1994) Hidrología Aplicada. McGraw-Hill -ISBN: 958-600-171-7.

Lee, J.G., Heaney, J.P. (2003). "Estimation of Urban Imperviousness and its Impacts on Storm Water Systems". J. Water Resour. Plng. and Mgmt., ASCE, Volume 129, Issue 5, pp. 419-426.

Silveira, L. et. Al. (2010). "Estudio de los arroyos Sauzal y Ceibal". Convenio Intendencia de Salto – UdelaR.

Tucci, C.E.M. Hidrologia: ciencia e aplicação. 2.ed.; 1 reimp.- Porto Alegre: Ed. Universidade/ UFRGS: ABRH, 2000. Coleção ABRH de Recursos Hídricos; v.4. ISBN 85-7025-298-6.