

VALIDACION DE UNA METODOLOGIA EMPIRICA PARA EVALUAR MODIFICACIONES DEL RIESGO DE INUNDACION URBANA ANTE ESCENARIOS HIPOTETICOS DE USO DEL SUELO

Erik Zimmermann ⁽¹⁾ y Laura Bracalenti ⁽²⁾

⁽¹⁾ Cátedra de Hidrología. Fac. Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura, UNR., Argentina. CONICET Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas.

⁽²⁾ CEAH (Centro de Estudios del Ambiente Humano). Facultad de Arquitectura, Planeamiento y Diseño. UNR., Argentina. CIUNR (Consejo de Investigaciones de la Universidad Nacional de Rosario). Riobamba 245 bis. (2000) Rosario. Argentina
e_mail: erikz@fceia.unr.edu.ar

RESUMEN

Con el propósito de analizar la incidencia de los espacios verdes urbanos y periurbanos en la dinámica hídrica de subcuencas urbanas de la ciudad de Rosario se propuso, en trabajos precedentes, una metodología de estimación de los cambios en el riesgo de inundación pluvial urbana frente a cambios de uso del suelo. La metodología es de carácter empírico y se basa en la fórmula racional de Mulvaney junto con la expresión de Kieffer y Chu para las curvas IDR, siendo aplicada a 5 cuencas urbanas de Rosario, considerando un escenario base (actual) de uso del suelo y 3 escenarios futuros con/sin disponibilidad de espacios verdes. En este trabajo se valida la metodología empírica aplicando una estimación estadística convencional a las cuencas anteriores. La misma contempla la estimación de parámetros geomorfológicos e hidrológicos de las cuencas para el escenario base y los escenarios futuros, aplicando el Colorado Urban Hydrograph Procedure, CUHP. Se procesan series pluviométricas de Rosario Aero (71 años de extensión, alrededor de 7000 eventos) construyendo hietogramas de lluvia total y neta mediante un coeficiente de escorrentía por cuenca y escenario. Se generan series de caudales diarios y se seleccionan los máximos anuales, asignándoles leyes de distribución de probabilidad (Gumbel). Finalmente, para cada cuenca y escenario se obtienen los cambios de probabilidad de excedencia para las series actuales y futuras de caudales. Al comparar los resultados con la metodología empírica se alcanzan coeficientes de correlación muy altos (0.9975) y coeficientes de eficiencia de Nash-Sutcliffe elevados (0.9929). Consecuentemente la metodología denominada empírica constituye una simple y efectiva herramienta para estimar los cambios en el riesgo de inundación ante cambios de uso del suelo evaluados a través del coeficiente de escorrentía.

Palabras clave: infraestructura verde, coeficiente de escorrentía, riesgo hídrico, validación metodológica.

ABSTRACT

In order to analyze the incidence of urban and peri-urban green spaces in the water dynamics of urban sub-basins of the city of Rosario, a methodology was proposed in previous papers to estimate the changes in the urban flood risk in front of land use changes. The methodology is an empirical approach and is based on Mulvaney's rational formula together with the expression of Kieffer and Chu for the IDR curves, being applied to 5 urban watersheds of Rosario, considering a base (current) scenario of land use and three future scenarios with / without availability of green spaces. In this work the empirical methodology is validated applying a conventional statistical estimation to the previous basins. It contemplates the estimation of geomorphological and hydrological parameters of the basins for the base scenario and future scenarios, applying the Colorado Urban Hydrograph Procedure, CUHP. Rosario Aero's rainfall series (71 years of extension, around 7,000 events) are processed, constructing total and net rainfall hyetographs by means of a runoff coefficient by basin and scenario. Series of daily flows are generated and annual maxima are selected, assigning probability distribution functions (Gumbel). Finally, for each basin and scenario the exceedance probability changes are obtained for the current and future series of flows. When comparing the results with the empirical methodology, very high correlation coefficients (0.9975) and high Nash-Sutcliffe efficiency coefficients (0.9929) are achieved. Consequently, the so-called empirical methodology is a simple and effective tool for estimating changes in flood risk in the face of changes in land use evaluated through the runoff coefficient.

Keywords: green infrastructure, runoff coefficient, water risk, methodology validation.

INTRODUCCIÓN

La escorrentía superficial constituye un componente del ciclo hidrológico que provoca alto impacto en las zonas urbanas. Para su evaluación se deben considerar las entradas por precipitación, los procesos de intercepción de la lluvia por parte del follaje y su infiltración en las áreas permeables. En función de cómo se den estos procesos resultarán los volúmenes de agua almacenados en el suelo que permitirán, luego, la evapotranspiración y la recarga de acuíferos.

En las ciudades, el aumento sostenido del exceso de precipitación -o precipitación efectiva- debido a la creciente impermeabilización del suelo, se ha convertido en una preocupación ambiental seria a la que se suma el incremento de las lluvias anuales, en determinadas áreas, debido a las consecuencias del calentamiento global.

Ante el aumento de la pavimentación y de las lluvias, el hidrograma de crecida en cuencas en proceso de urbanización se va modificando, presentando caudales pico más altos y tiempos de ascenso más cortos a medida que la impermeabilización del suelo aumenta. Las condiciones en base a las cuales se han diseñado los distintos elementos de la red de drenaje urbano (hidrograma de proyecto) se modifican significativamente debido a la impermeabilización del suelo, implicando un desajuste entre las demandas y la capacidad de respuesta del sistema. Frente a las tendencias crecientes de los procesos de urbanización, este problema se tornará más complejo y difícil de resolver si no se toman medidas inmediatas que puedan desarrollarse paralelamente a los mencionados procesos de pavimentación y edificación.

Dado que además, en estas áreas urbanas la adecuación necesaria de la infraestructura pluvial -conforme aumentan las precipitaciones y la impermeabilización- demanda grandes inversiones e intervenciones muchas veces inviables en sectores con alta densidad edilicia, es prioritario definir estrategias sinérgicas de solución -para éste y otros problemas ambientales asociados- que permitan reducir los volúmenes de salida por escorrentía a través de incrementar el agua interceptada y absorbida por el soporte edáfico y la almacenada en receptáculos de diversos tipos.

Planificar y diseñar ciudades con mayores superficies permeables para reducir y retardar el volumen de agua a derivar a la red de drenaje, es una alternativa que puede implicar, además, otros muchos efectos positivos. Es un hecho probado que, frente a los conflictos que plantea el crecimiento urbano y la incertidumbre que genera el cambio climático, preservar áreas verdes en cantidad, calidad y conectividad adecuadas, es un modo de garantizar la prestación de servicios ecosistémicos indispensables para la vida en las ciudades.

Caso de la ciudad de Rosario

A partir de 2008 se comenzaron a detectar nuevas urbanizaciones, barrios cerrados y abiertos, estos últimos de libre acceso lo cual implica la apertura de calles en predios antes utilizados para las actividades agrícola-ganaderas sin la instalación de cercos perimetrales. Los barrios abiertos son desarrollados por emprendedores inmobiliarios pero, en algún momento, pasan a depender, respecto de las tareas de mantenimiento, de las respectivas Comunas o Municipios. El incremento de la superficie a urbanizar solicitada año a año se incrementa considerablemente (Dirección Provincial de Protección Urbana Contra Inundaciones, 2012).

El hecho es que el impacto presente y futuro de este incremento de la impermeabilización será muy dificultoso de absorber mediante obras de infraestructura urbana debido a la densidad edilicia de los sectores que afectarían en la traza planteada para los emisarios o conductos necesarios.

La agricultura y la forestación urbana y periurbana (AFUP) constituyen una estrategia adecuada para la planificación de interfaces periurbanas y para el aprovechamiento de espacios vacantes interurbanos, porque posibilitan la producción de alimentos sanos cerca de los espacios de consumo, trabajo genuino y espacios verdes diversos que garanticen una mejor calidad ambiental al presente y futuro intraurbano.

Desde un punto de vista hidrológico, estos espacios verdes fomentan la infiltración y almacenamiento de agua de lluvia. Esto implica mantener la porosidad del suelo natural, aumentar la cubierta vegetal, especialmente en las zonas inundables para protegerlas de posibles urbanizaciones.

En anteriores trabajos se aborda la incidencia de los espacios verdes urbanos y periurbanos en la dinámica hídrica de cinco subcuencas de la ciudad de Rosario, ubicadas al Norte, Noroeste y Sur del casco urbano sobre los valles de inundación del arroyo Ludueña y Saladillo. Se aplica un método simple para estimar un indicador (Zimmermann y Bracalenti, 2012), basado en el coeficiente de escurrimiento de la fórmula racional, que permite cuantificar la magnitud del impacto de áreas verdes en el escurrimiento de cada subcuenca. El coeficiente de escurrimiento (C), correspondiente a un área determinada, se estima en base al uso y el tipo de suelo existentes, pautado por una vasta bibliografía internacional.

Seguidamente se propuso un método empírico para relacionar cambios en el indicador mencionado, conforme a escenarios hipotéticos de uso del suelo, con modificaciones del riesgo de inundación, en términos de recurrencia de diseño (Zimmermann y Bracalenti, 2014; Zimmermann et al., 2016). Esta relación permite cuantificar que aumentos adecuados de superficie con cobertura vegetal, reducen significativamente el riesgo de inundaciones en los sistemas urbanos.

En el presente trabajo se pretende validar esta metodología empírica y sencilla con el desarrollo de estudios estadísticos convencionales. Se aplicarán a las subcuencas analizadas de la ciudad de Rosario y se compararán los resultados entre las metodologías empírica y convencional, discutiendo y concluyendo en base a los resultados que se alcanzarán.

INDICADORES PARA MEDIR IMPACTO POTENCIAL SOBRE EL ESCURRIMIENTO Y SU RELACION CON EL RIESGO DE INUNDACION

Una metodología sencilla, que se puede utilizar para estimar el impacto de AFUP en la escurrimiento urbana, consiste en la aplicación de la actualmente utilizada fórmula racional.

La fórmula racional fue desarrollada por Mulvaney (1850) y la idea fundamental se basa en: dada una cuenca de área A con un tiempo de concentración TC, si se produce una lluvia P con duración $d = TC$ el caudal generado en el punto de salida será el máximo ya que estará aportando toda la cuenca en forma simultánea. El método plantea una

proporcionalidad entre el caudal máximo y la intensidad de lluvia y puede expresarse como:

$$Q = C_u \cdot C \cdot i \cdot A \quad (1)$$

donde: Q es el caudal de diseño (L^3/T), C_u es el coeficiente de conversión de unidades, C es el coeficiente de escurrimiento (adimensional), i es la intensidad de la precipitación de diseño (L/T), y A es el área de drenaje de cuencas (L^2).

El coeficiente de escurrimiento se puede cuantificar en función del tipo de suelo, pendiente topográfica y tipo de cobertura. Numerosa bibliografía puede consultarse para estimar los coeficientes de escurrimiento (Chow et al., 1988; McCuen, 1998).

La intensidad media máxima, i, se determina a partir de curvas Intensidad-Duración-Recurrencia (IDR) construidas con datos medidos en el sitio en estudio. Con dichas curvas se adopta una duración de diseño igual al tiempo de concentración de la cuenca y para una recurrencia especificada se obtiene la intensidad media máxima.

El tiempo de concentración de una cuenca, TC, se define como el tiempo que demora el sector más alejado de la cuenca en aportar a la sección de salida. El tiempo de concentración se calcula como la suma de los tiempos de escurrimiento mantiforme (no encauzado) y el tiempo de flujo canalizado (encauzado).

Indicador para la evaluación de impactos

Teniendo en cuenta la fórmula racional, la variación del coeficiente de escurrimiento con la impermeabilización del suelo o, por el contrario, el incremento de infraestructura verde (permeable), constituiría un indicador que permite evaluar el impacto de estas modificaciones en la hidrología de las cuencas urbanas. Se propuso entonces medir la "modificación" en el coeficiente de escurrimiento (ΔC) para el seguimiento de los impactos a nivel urbano (Zimmermann y Bracalenti, 2012). Valores ΔC negativos para cualquier período de tiempo indican una disminución neta de la escurrimiento (y consecuente reducción de riesgo de inundación), provocado por un aumento en la infiltración/almacenamiento de la precipitación en esa superficie

urbana. Por el contrario, aumentos en el C implicarían aumentos en el riesgo de inundación.

Relación entre la modificación de C y la modificación del riesgo de inundación

Utilizando la ecuación racional, el caudal de diseño para un espacio en el tiempo t_a (escenario actual) puede cuantificarse como:

$$Q_{ta} = C_u \cdot C_{ta} \cdot i_{ta} \cdot A \quad (2)$$

donde Q_{ta} es el caudal de diseño, C_{ta} es el coeficiente de escorrentía e i_{ta} es la intensidad de la lluvia de diseño, todas las variables en el tiempo t_a .

Para un escenario futuro (escenario hipotético), en el tiempo t_f , considerando que no hay cambios en la red de drenaje pluvial ($Q_{ta} = Q_{tf}$) los cambios en el coeficiente de escorrentía incidirán en la lluvia de diseño que es capaz de “soportar” ese nuevo escenario hidrológico de la cuenca futura.

Si cuantificamos la magnitud de la lluvia en términos de probabilidad de excedencia (o riesgo de inundación asumido en el diseño), se puede deducir que cambios en el coeficiente de escorrentía generados por usos de suelo diferentes, generarán cambios en la misma.

De acuerdo con Kieffer y Chu (citado por Chow et al., 1988), en el marco de un modelo empírico que ajusta una curva IDR, la intensidad de lluvia puede expresarse como:

$$i = \frac{g \cdot T^m}{d^e + f} \quad (3)$$

donde T es el período de retorno (inversa de la probabilidad de excedencia $P=1/T$), d es la duración y g , m , e y f son constantes que dependen de las características geográficas locales.

Bajo estas consideraciones, y vinculando la intensidad de diseño con el riesgo de inundación mediante la ecuación de Kieffer y Chu se llega a la siguiente ecuación (Zimmermann y Bracalenti, 2014):

$$\left(\frac{C_{tf}}{C_{ta}} \right)^{1/m} = \frac{P_{tf}}{P_{ta}} \quad (4)$$

donde C_{ta} y C_{tf} son los coeficientes de escorrentía, P_{ta} y P_{tf} son las probabilidades de excedencia de la intensidad de lluvia, en las situaciones t_a y t_f , respectivamente. En términos generales, la ecuación (4) puede expresarse de la siguiente manera:

$$P_* = C_*^{1/m} \quad (5)$$

donde C_* representa el cambio adimensional en el coeficiente de escorrentía y P_* el correspondiente cambio adimensional en la probabilidad de excedencia (o riesgo de inundación), bajo las siguientes condiciones:

- Si $C_{tf} < C_{ta}$ entonces $C_* = C_{tf}/C_{ta}$ y $P_* = P_{tf}/P_{ta}$

- Si $C_{ta} < C_{tf}$ entonces $C_* = C_{ta}/C_{tf}$ y $P_* = P_{ta}/P_{tf}$

La Figura 1 presenta gráficamente la ecuación (5). En resumen, aplicando (5) es posible estimar los cambios en el riesgo de inundación frente a las modificaciones del coeficiente de escorrentía debido a los cambios de uso del suelo.

APLICACIÓN DEL METODO EN CUENCAS URBANAS DE ROSARIO

Subcuencas analizadas en la ciudad de Rosario

El estudio se ha realizado en cinco de las dieciocho subcuencas de la ciudad.

Para la selección de las mismas se tuvo en cuenta la conveniencia de analizar situaciones urbanas y periurbanas diversas, es decir, áreas no urbanizadas, áreas parcialmente urbanizadas y áreas altamente urbanizadas (Figura 2). En general representan áreas con importantes espacios no-urbanizables según las ordenanzas vigentes, sobre las cuales es posible optimizar la infraestructura. Las subcuencas del noroeste de la ciudad están siendo urbanizadas a un ritmo veloz y sin analizar el impacto que presentan las mismas en el cuerpo receptor (Arroyo Ludueña).

Escenarios

En la aplicación de la metodología a las cuencas descriptas anteriormente se analizaron cuatro escenarios: 1) urbanización actual; 2) urbanizadas las áreas urbanizables de acuerdo a planes y normativas vigentes; 3) urbanizadas las áreas actualmente no urbanizables y 4) urbanizadas las

áreas urbanizables de acuerdo a planes y normativa vigentes mediante tipologías residenciales de alta densidad poblacional y alta permeabilidad de suelo (Di Bernardo, 2013), e incrementadas y optimizadas las áreas verdes.

Se comparó el escenario actual con los escenarios hipotéticos que simulan porcentajes mayores de suelo con coberturas impermeables (construidas) y permeables (verdes), respectivamente. Para el escenario actual se realizó la clasificación de usos de suelo a través de la interpretación de imágenes

satelitales y de su constatación en campo, dando lugar a 30 tipos de uso. Para los escenarios futuros se propusieron usos para los suelos vacantes, considerando las tendencias de ocupación en el marco de las normativas vigentes. Seguidamente, asociando las clases detectadas a los coeficientes de escorrentía determinados definidos en la bibliografía internacional para distintos tipos de tejido y coberturas de suelo urbano y rural (McCuen, 1998) se calcularon los coeficientes de escorrentía promedio.

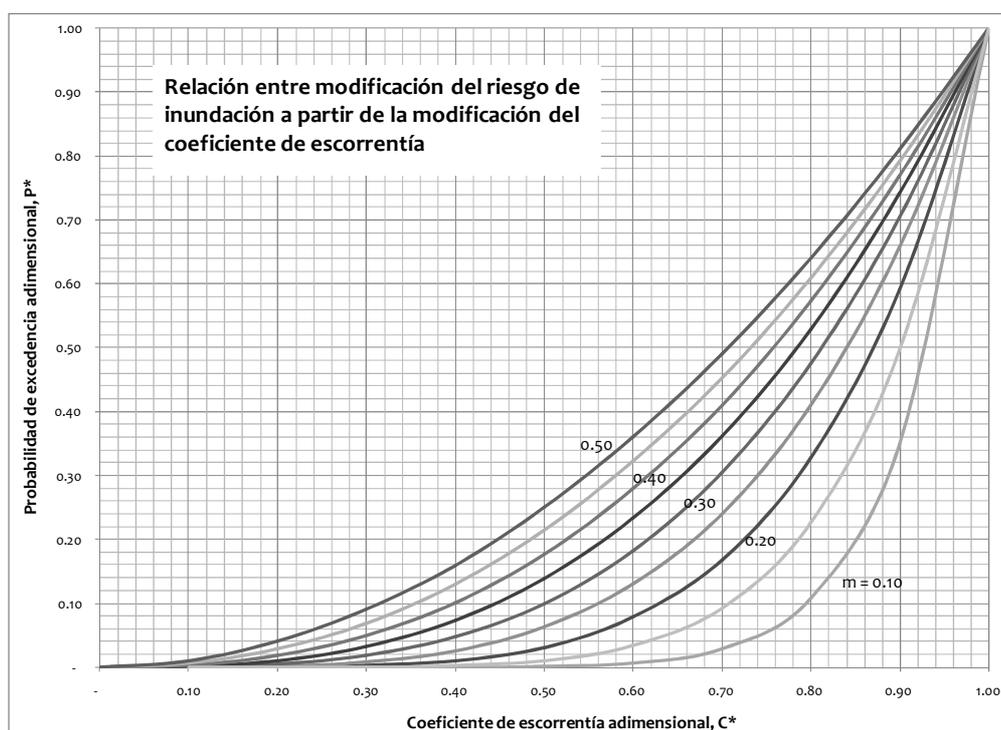


Figura 1. Relaciones adimensionales entre cambios en el uso del suelo y riesgo de inundación.

A manera de ejemplo se presentan los resultados alcanzados para la subcuenca del Emisario 10 (Tabla 1, Figuras 3 y 4).

La Tabla 2 muestra los resultados obtenidos de aplicar la metodología a las 5 cuencas mencionadas. Allí se ha considerado un exponente m de la ecuación (3) ajustada a los datos pluviográficos de Rosario de 0,122 (Zimmermann, 2013)

VALIDACIÓN DE LA PROPUESTA

La ecuación (5) es de carácter empírico deducida a partir de dos ecuaciones del mismo carácter: la

fórmula racional y la ecuación de Kieffer y Chu para las IDR. La misma permite la estimación directa de los cambios en el riesgo de inundación a partir de los cambios de uso de suelo, evaluados en términos del coeficiente de escorrentía de la fórmula racional.

La estimación convencional de estos cambios en el riesgo de inundación consistiría en los siguientes pasos:

- (a) estimar los parámetros geomorfológicos e hidrológicos de la cuenca urbana considerada para el escenario base y los escenarios futuros, obteniendo en cada caso su función

- de transferencia lluvia-caudal (hidrograma unitario, HU);
- (b) disponer de una serie suficientemente extensa de precipitaciones, representativa de condiciones actuales y futuras;
 - (c) estimar las condiciones antecedentes de humedad para dicha serie de precipitaciones;
 - (d) generar una serie de precipitaciones netas considerando (b) y (c);
 - (e) convolucionar la serie de precipitaciones netas (d) con los hidrogramas unitarios de (a) y generar una serie de caudales erogados de la cuenca para todos los escenarios;
 - (f) realizar un análisis de frecuencias y asignar funciones de probabilidad a la misma a cada serie de caudales;
 - (g) relacionar los cambios en el coeficiente de escorrentía para cada escenario futuro respecto al escenario base con los cambios en la probabilidad de excedencia respectivos.

Con el fin de validar la metodología empírica se propuso en este trabajo aplicar la metodología convencional descrita precedentemente a las cuencas estudiadas de la ciudad de Rosario.

Para ello se elaboró un programa de cálculo escrito en lenguaje FORTRAN que automatizó las tareas involucradas en la mayoría de los apartados señalados.

Para comenzar con el apartado (a) se parametrizaron las cinco cuencas con HU sintéticos (HUS), utilizando el Colorado Urban Hydrograph Procedure, CUHP (Denver Regional Council Of Governments, 1984). Los parámetros de las subcuencas pueden verse en la Tabla Anexo.

Respecto al apartado (b), se contó con una serie de precipitaciones diarias, la cual fue depurada, de la estación Rosario Aero (Aeropuerto de Fisherton) del período 1936-2006, totalizando 71 años, con algo menos de 7000 eventos de lluvia. Con el propósito de constatar los cambios en las probabilidades de excedencia para escenarios actuales y futuros se consideró que la misma es estacionaria y estadísticamente representativa para todos los escenarios considerados.

Se consideró, de manera simplificada, que los aportes netos de dicha serie de precipitación se estiman por producto de la misma y el correspondiente coeficiente de escorrentía de cada escenario y cuenca. Además es la manera de vincular cambios de riesgo de inundación con cambios en el coeficiente de escorrentía. Esto resuelve los apartados (c) y (d).

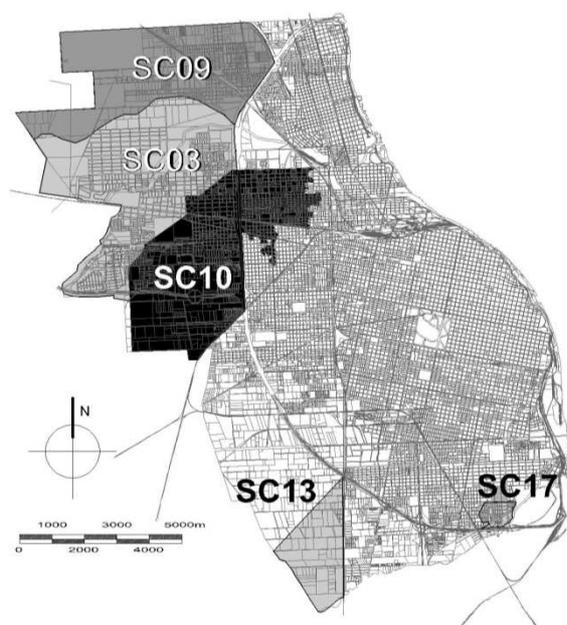


Figura 2. Subcuencas urbanas analizadas de la ciudad de Rosario.

Tabla 1. Porcentajes de coberturas y coeficientes de escurrimientos medios por escenarios subcuenca Emisario10

	C	Escen 0	Escen 1	Escen 2	Escen 3
		% Sup	% Sup	% Sup	% Sup
Pavimentos en espacios públicos	0.90	16.9	17.2	17.8	17.3
Vivienda unifamiliar, hasta 2 pisos (< OCUPACION DE SUELO)	0.60	9.1	12.8	16.2	9.4
Vivienda unifamiliar, hasta 2 pisos (> OCUPACION DE SUELO)	0.65	6.9	7.0	13.9	7.0
Vivienda unifamiliar con centro de manzana forestado	0.57	5.6	6.8	6.9	5.5
Viviendas multi - unidades, hasta 4 pisos	0.70	0.0	0.0	1.0	3.6
Viviendas multi - unidades, mas de 4 pisos	0.75	0.0	0.0	0.0	0.0
Viviendas multi unidades con acera, centro de Mz. y terraza verde	0.48	1.3	1.3	1.3	5.9
Residencial o suburbano	0.40	1.5	0.6	-	0.7
Barrio cerrado	0.48	0.6	0.6	0.6	0.6
Area comercial y de negocios	0.60	-	-	-	-
Asentamientos irregulares incipiente	0.56	0.5	-	-	-
Asentamientos irregulares consolidados	0.70	1.2	1.1	1.1	1.1
Industrial poco densa	0.70	1.5	2.4	3.6	4.6
Industrial densa	0.80	3.7	5.8	7.3	3.3
Pasto/prado/césped suelo arcillo-limoso	0.30	21.1	18.7	23.1	19.1
Suelo desnudo compactado	0.63	4.2	4.2	5.8	4.1
Cultivo extensivo	0.21	13.1	9.7	-	7.3
Cultivo hortícola tradicional	0.20	1.3	1.3	-	0.6
Cultivo hortícola agroecológico	0.19	-	1.9	0.3	5.5
Forestal : bosques denso	0.13	-	-	-	3.1
Forestal : (más del 50% del terreno cubierto)	0.23	0.1	0.6	0.1	2.6
Forestal : (menos del 50% del terreno cubierto)	0.33	3.0	2.7	1.6	3.9
Escasa vegetación (no compactado por la actividad humana)	0.44	8.1	4.5	-	-
Ladrilleras	0.63	1.0	1.0	-	-
Ladrilleras con construcciones dispersas	0.74	-	-	-	-
Basurales	0.63	0.1	0.1	-	-
Cursos de agua, Cavas	1.00	-	0.2	0.2	0.2
Equipamiento deportivo sobre terreno forestado	0.30	0.3	0.5	0.4	0.3
Equipamiento urbano (> permeabilidad)	0.55	-	-	-	-
Equipamiento urbano (< permeabilidad)	0.60	-	-	-	-
C medio		0.51	0.53	0.62	0.49

Tabla 2. Cambios en el riesgo de inundación P* y coeficiente de escorrentía C* para las cuencas y los escenarios analizados.

Cuenca	Escenario		C	C*	P*
SC09	#0	#1	0.47	0.851	0.408
	0.4	#2	0.63	0.635	0.080
	1641 ha	#3	0.39	0.975	0.869
SC03	#0	#1	0.53	0.925	0.647
	0.49	#2	0.57	0.860	0.432
	1952 ha	#3	0.49	1.000	1.000
SC10	#0	#1	0.53	0.962	0.808
	0.51	#2	0.62	0.823	0.338
	1905 ha	#3	0.49	0.961	0.801
SC13	#0	#1	0.32	0.844	0.389
	0.27	#2	0.65	0.415	0.008
	505 ha	#3	0.27	1.000	1.000
SC17	#0	#1	0.66	0.409	0.007
	0.6	#2	0.66	0.409	0.007
	70 ha	#3	0.54	0.500	0.021

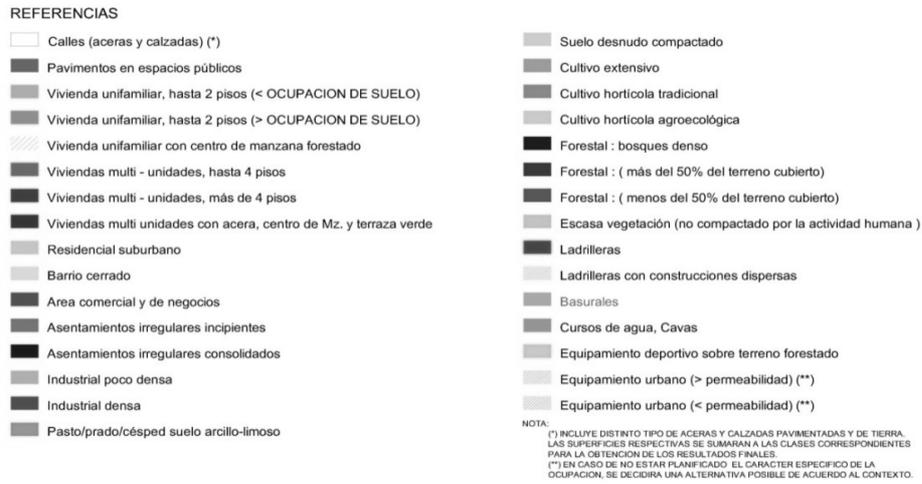


Figura 3. Referencias para los usos de suelo en la Figura 4.



Figura 4. Escenarios de uso del suelo propuestos para la subcuenca del Emisario10

El programa, en primera instancia, genera una serie de duraciones de lluvia en forma aleatoria debido a que los registros disponibles son pluviométricos. Las duraciones generadas con una distribución probabilística exponencial (con media de 3.8 h y desvío estándar de 2.7 h) la cual respeta los estadísticos obtenidos en estaciones pluviográficas regionales (Zimmermann, 1998).

Conocida la precipitación y propuesta la duración se construyeron los hietogramas de lluvia total que se asumen de tipo triangular, con un coeficiente de avance (relación entre el tiempo al máximo de intensidad y duración de la lluvia) de 0.33 el cual tiene representatividad estadística regional (Zimmermann, 1998). El hietograma neto se definió por producto entre el hietograma de lluvia total y el coeficiente de escorrentía considerado por escenario y cuenca discretizado conforme al tiempo de lluvia neta definido para los HUS.

El programa realiza a continuación la convolución discreta entre hietogramas netos e hidrogramas unitarios, para la serie total de precipitaciones por cuenca y escenario. Selecciona los caudales máximos anuales y los presenta en tablas para realizar el estudio estadístico de las series de caudales por escenario y subcuenca.

Externamente al mismo, se realizaron los estudios estadísticos ajustando la distribución de Gumbel a las muestras de caudales máximos para los 4 escenarios considerados y las 5 cuencas analizadas. Dicha distribución probabilística ha sido ajustada en numerosos estudios estadísticos en la región para variables climáticas con buenos resultados.

A manera de ejemplo se presentan los resultados hallados para la subcuenca del Emisario 10, en la Tabla 3. Allí puede verse las series de caudales máximos obtenidos a partir de la serie de precipitaciones de Rosario Aero en las cinco columnas de la izquierda. Sobre esas series correspondientes a los 4 escenarios considerados se ajustaron distribuciones de probabilidad conforme a la ley de Gumbel, cuyos parámetros figuran en la parte inferior.

Las columnas de la derecha representan el riesgo teórico para el escenario base, obtenido mediante la distribución de Gumbel, la serie de caudales máximos para el escenario base ordenadas de

manera descendente, la recurrencia del evento obtenida como la inversa de la probabilidad de excedencia y las probabilidades adimensionales P_* obtenidas mediante la siguiente forma:

$$- \text{Si } C_{tf} < C_{ta} \text{ entonces } P_* = P_{tf}/P_{ta}$$

$$- \text{Si } C_{ta} < C_{tf} \text{ entonces } P_* = P_{ta}/P_{tf}$$

Y además, las probabilidades de excedencia se calculan con la ecuación de la ley de Gumbel.

$$P_{ta} = 1 - \exp(-\exp(-\alpha_a(Q\#0 - x_{0a})))$$

$$P_{tf} = 1 - \exp(-\exp(-\alpha_f(Q\#0 - x_{0f}))),$$

donde \exp representa la función exponencial, α_a y x_{0a} son los parámetros de Gumbel ajustados para el escenario base; α_f y x_{0f} son los parámetros de Gumbel ajustados para los escenarios futuros considerados y $Q\#0$ es el caudal máximo anual para el escenario base.

Seguidamente se calcularon las relaciones entre los riesgos para cada escenario y cuenca (Tabla 4).

En Tabla 4 puede observarse que la probabilidad adimensional P_* estimada por la metodología estadística convencional es dependiente de la recurrencia adoptada. Esto puede observarse en la Tabla 3 también, considerando el caso de la subcuenca Emisario 10.

Como medida de ajuste entre los resultados de la metodología empírica (ecuación 5) y la estadística convencional se estimaron los coeficientes de correlación y de eficiencia de Nash-Sutcliffe.

Aquí puede observarse que, si bien los coeficientes de correlación son muy buenos para todas las recurrencias analizadas, para recurrencias medias a altas (p.ej. 10 y 40 años) los coeficientes de eficiencia de Nash-Sutcliffe son mejores.

Podría considerarse entonces que la metodología empírica propuesta se acerca mejor al pronóstico estadístico para recurrencias medias a altas.

El grado del ajuste entre ambas metodologías puede verse en la Figura 5. El gráfico corrobora los resultados de ajuste numéricos de la Tabla 4.

Tabla 3. Resultados hallados de aplicar la metodología estadística convencional en la SC10

Año	Q#0 (m3/s)	Q#1 (m3/s)	Q#2 (m3/s)	Q#3 (m3/s)	Riesgo actual	Q#0 (m3/s)	Recurrencia	P* #1	P* #2	P* #3
1936	121.89	127.73	155.89	115.81	0.009	197.32	105.49	0.69	0.18	0.66
1937	72.87	76.37	93.20	69.23	0.014	188.73	73.89	0.71	0.19	0.67
1938	94.63	99.17	121.02	89.91	0.044	160.21	22.86	0.75	0.26	0.71
1939	106.23	110.93	135.01	101.02	0.050	156.77	19.87	0.75	0.27	0.72
1940	126.74	132.82	162.09	120.41	0.056	153.96	17.73	0.76	0.28	0.72
1941	65.53	68.67	83.81	62.26	0.114	136.30	8.76	0.79	0.34	0.76
1942	63.83	66.89	81.63	60.64	0.114	136.27	8.75	0.79	0.34	0.76
1943	72.15	75.59	92.01	68.88	0.165	126.74	6.05	0.81	0.39	0.78
1944	121.49	127.32	155.38	115.43	0.166	126.60	6.02	0.81	0.39	0.78
1945	126.60	132.68	161.92	120.29	0.175	125.29	5.73	0.81	0.39	0.78
1946	99.88	104.64	127.78	94.93	0.180	124.51	5.56	0.81	0.40	0.78
1947	90.49	94.92	115.43	86.40	0.186	123.59	5.37	0.81	0.40	0.78
1948	115.25	120.72	144.09	109.92	0.189	123.20	5.30	0.81	0.40	0.79
1949	153.96	160.64	191.94	146.46	0.198	121.89	5.04	0.82	0.41	0.79
1950	61.86	64.83	79.12	58.77	0.201	121.49	4.97	0.82	0.41	0.79
1951	108.78	114.00	139.12	103.35	0.201	121.49	4.97	0.82	0.41	0.79
1952	74.70	78.29	95.54	70.98	0.208	120.58	4.80	0.82	0.42	0.79
1953	79.68	83.51	101.91	75.71	0.210	120.31	4.76	0.82	0.42	0.79
1954	96.20	100.81	123.03	91.40	0.213	119.92	4.69	0.82	0.42	0.79
1955	108.65	113.86	138.96	103.23	0.214	119.82	4.67	0.82	0.42	0.79
1956	120.58	126.36	154.21	114.56	0.239	116.77	4.18	0.83	0.44	0.80
1957	109.83	115.10	140.46	104.35	0.245	116.12	4.08	0.83	0.45	0.80
1958	115.57	120.97	146.38	109.90	0.250	115.57	4.00	0.83	0.45	0.80
1959	107.60	112.76	137.62	102.23	0.253	115.25	3.96	0.83	0.45	0.80
1960	67.76	71.01	86.66	64.38	0.303	110.09	3.30	0.84	0.49	0.82
1961	123.20	129.11	157.56	117.05	0.306	109.83	3.27	0.85	0.49	0.82
1962	197.32	206.34	249.04	187.91	0.317	108.78	3.15	0.85	0.50	0.82
1963	91.48	95.87	117.00	86.92	0.319	108.65	3.14	0.85	0.50	0.82
1964	120.31	125.98	153.41	114.84	0.330	107.60	3.03	0.85	0.51	0.83
1965	110.09	115.37	140.80	104.60	0.346	106.23	2.89	0.85	0.52	0.83
1966	87.04	90.59	106.93	83.32	0.362	104.85	2.76	0.86	0.53	0.83
1967	100.92	105.76	129.07	95.88	0.381	103.28	2.62	0.86	0.54	0.84
1968	55.83	58.51	71.41	53.05	0.394	102.23	2.54	0.87	0.55	0.84
1969	156.77	163.79	196.80	149.00	0.411	100.92	2.43	0.87	0.56	0.84
1970	103.28	108.23	132.08	98.12	0.425	99.88	2.35	0.87	0.57	0.85
1971	119.82	125.37	149.18	114.36	0.475	96.20	2.10	0.88	0.61	0.86
1972	121.49	127.32	155.38	115.43	0.498	94.63	2.01	0.89	0.62	0.86
1973	77.71	81.28	98.06	73.98	0.511	93.71	1.96	0.89	0.63	0.87
1974	58.98	61.81	75.43	56.04	0.521	93.03	1.92	0.89	0.64	0.87
1975	116.12	121.69	148.51	110.33	0.544	91.48	1.84	0.90	0.65	0.87
1976	116.77	122.38	149.35	110.95	0.559	90.49	1.79	0.90	0.66	0.88
1977	136.27	142.75	172.54	129.48	0.579	89.12	1.73	0.90	0.68	0.88
1978	85.45	89.55	109.29	81.19	0.603	87.55	1.66	0.91	0.69	0.89
1979	124.51	130.48	159.24	118.30	0.605	87.42	1.65	0.91	0.69	0.89
1980	68.54	71.83	87.66	65.13	0.611	87.04	1.64	0.91	0.70	0.89
1981	160.21	167.68	200.78	152.48	0.622	86.35	1.61	0.91	0.71	0.89
1982	74.70	78.29	95.54	70.98	0.636	85.45	1.57	0.91	0.72	0.89
1983	48.23	50.54	61.68	45.82	0.650	84.53	1.54	0.92	0.73	0.90
1984	123.59	129.52	158.06	117.43	0.723	79.68	1.38	0.93	0.78	0.91
1985	41.55	43.54	53.14	39.47	0.738	78.64	1.35	0.94	0.79	0.92
1986	119.92	125.67	153.37	113.94	0.752	77.71	1.33	0.94	0.80	0.92
1987	87.55	91.75	111.97	83.18	0.780	75.75	1.28	0.94	0.82	0.93
1988	69.07	72.38	88.34	65.62	0.794	74.70	1.26	0.95	0.83	0.93
1989	87.42	91.61	111.80	83.06	0.794	74.70	1.26	0.95	0.83	0.93
1990	188.73	197.78	241.37	179.31	0.799	74.33	1.25	0.95	0.83	0.93
1991	84.53	88.59	108.11	80.32	0.812	73.39	1.23	0.95	0.84	0.94
1992	75.75	79.39	96.88	71.97	0.818	72.87	1.22	0.95	0.85	0.94
1993	89.12	93.40	113.98	84.68	0.827	72.15	1.21	0.95	0.86	0.94
1994	125.29	131.17	156.29	119.83	0.860	69.46	1.16	0.96	0.88	0.95
1995	78.64	82.41	100.57	74.71	0.864	69.07	1.16	0.96	0.89	0.95
1996	102.23	107.13	130.74	97.13	0.870	68.54	1.15	0.96	0.89	0.95
1997	93.71	98.12	118.29	89.27	0.879	67.76	1.14	0.97	0.90	0.95
1998	61.71	64.29	75.58	59.10	0.901	65.53	1.11	0.97	0.91	0.96
1999	93.03	97.32	117.96	87.99	0.917	63.83	1.09	0.98	0.93	0.97
2000	136.30	142.84	174.32	129.50	0.933	61.86	1.07	0.98	0.94	0.97
2001	86.35	90.16	109.79	82.15	0.934	61.71	1.07	0.98	0.94	0.97
2002	104.85	109.88	134.10	99.62	0.937	61.32	1.07	0.98	0.94	0.97
2003	61.32	64.45	78.12	58.45	0.952	58.98	1.05	0.98	0.96	0.98
2004	73.39	76.91	93.87	69.73	0.969	55.83	1.03	0.99	0.97	0.98
2005	69.46	72.79	88.84	66.00	0.991	48.23	1.01	1.00	0.99	0.99
2006	74.33	78.07	94.84	70.98	0.998	41.55	1.00	1.00	1.00	1.00

MEDIA =	99.52	104.23	126.64	94.63
DES. EST.=	30.76	32.18	38.83	29.25
α =	0.04	0.04	0.03	0.04
Xo =	85.67	89.75	109.16	81.47

Referencias: Año: año hidrológico; Q#0, Q#1, Q#2 y Q#3: caudales máximos anuales generados para cada escenario; Riesgo actual: probabilidad de excedencia teórica obtenida mediante distribución de Gumbel para el escenario base; Q#0: caudales máximos anuales escenario base ordenados descendientemente; Recurrencia: equivalente a la inversa del riesgo actual; P* #1, P* #2 y P* #3: riesgo adimensional;

Tabla 4. Resultados comparativos entre metodologías empírica y estadística convencional.

Escenario		C	C*	P* ec.5	P*(Recurr 5)	P*(Recurr 10)	P*(Recurr 40)	P*(Recurr 60)
#0 0.4 1641 ha	#1	0.47	0.851	0.267	0.465	0.400	0.280	0.260
	#2	0.63	0.635	0.024	0.220	0.140	0.060	0.046
	#3	0.39	0.975	0.813	0.860	0.840	0.790	0.780
#0 0.49 1952 ha	#1	0.53	0.925	0.526	0.636	0.580	0.490	0.465
	#2	0.57	0.860	0.290	0.469	0.390	0.290	0.265
	#3	0.49	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
#0 0.51 1905 ha	#1	0.53	0.962	0.730	0.817	0.780	0.740	0.710
	#2	0.62	0.823	0.202	0.412	0.340	0.256	0.200
	#3	0.49	0.961	0.720	0.789	0.754	0.710	0.670
#0 0.27 505 ha	#1	0.32	0.844	0.248	0.438	0.341	0.233	0.205
	#2	0.65	0.415	0.001	0.213	0.100	0.024	0.020
	#3	0.27	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
#0 0.6 70 ha	#1	0.66	0.909	0.458	0.592	0.530	0.420	0.415
	#2	0.66	0.909	0.458	0.592	0.530	0.420	0.415
	#3	0.54	0.900	0.422	0.593	0.541	0.430	0.439

Coefficiente de correlación	0.9975	0.9975	0.9969	0.9965
Coef. Eficiencia Nash-Sutcliffe	0.7708	0.9224	0.9929	0.9895

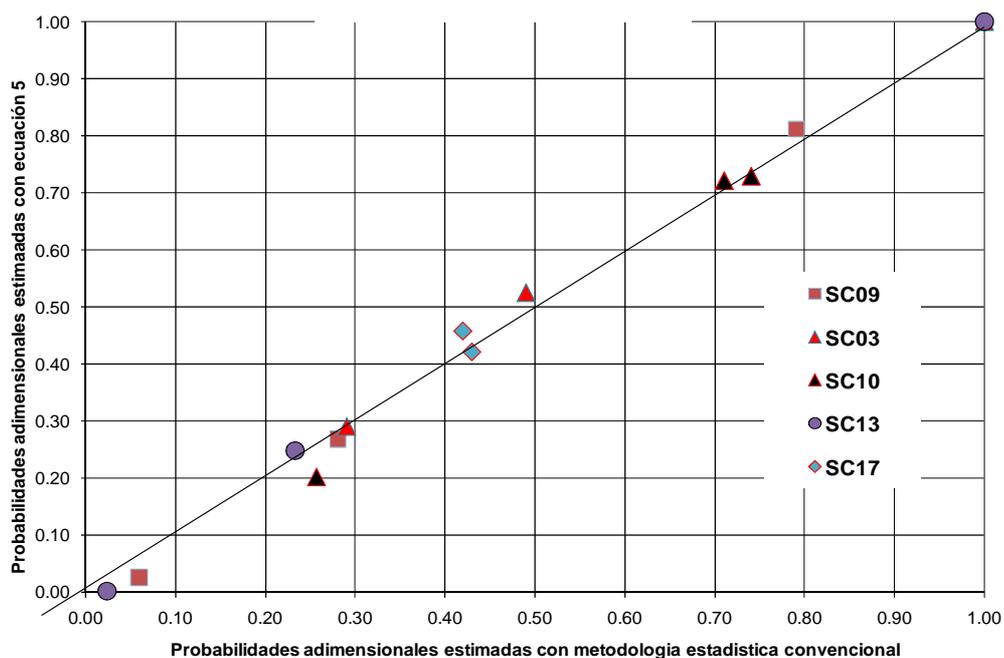


Figura 4. Probabilidades estimadas con estadística convencional vs. estimadas con ecuación 5.

CONCLUSIONES

Con el propósito de analizar la incidencia de los espacios verdes urbanos y periurbanos en la dinámica hídrica de subcuencas urbanas de la ciudad de Rosario se propuso, en trabajos precedentes, una metodología de estimación de los cambios en el riesgo de inundación pluvial urbana frente a cambios de uso del suelo. La metodología es de carácter empírico y se basa en la fórmula racional de

Mulvaney junto con la expresión de Kieffer y Chu para las curvas IDR, siendo aplicada a 5 cuencas urbanas de Rosario, considerando un escenario base (actual) de uso del suelo y 3 escenarios futuros con/sin disponibilidad de espacios verdes.

En este trabajo se valida la metodología empírica aplicando una estimación estadística convencional a las cuencas anteriores. La misma contempló la estimación de parámetros geomorfológicos e

hidrológicos de las cuencas para el escenario base y los escenarios futuros, aplicando el Colorado Urban Hydrograph Procedure, CUHP. Se procesaron series pluviométricas de Rosario Aero (71 años de extensión, alrededor de 7000 eventos) construyendo hietogramas de lluvia total y neta mediante un coeficiente de escurrimiento por cuenca y escenario. Se generaron series de caudales diarios y fueron seleccionados los máximos anuales. Se les asignaron leyes de distribución de probabilidad (Gumbel). Finalmente, para cada cuenca y escenario se obtuvieron los cambios de probabilidad de excedencia en las series actuales y futuras de caudales.

Se compararon, de esta manera, ambas metodologías llegando a resultados satisfactorios alcanzando coeficientes de correlación muy altos (0.9975) y coeficientes de eficiencia de Nash-Sutcliffe elevados (0.9929).

Consecuentemente la metodología denominada empírica constituye una simple y efectiva herramienta para estimar los cambios en el riesgo de inundación ante cambios de uso del suelo evaluados a través del coeficiente de escurrimiento.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos la colaboración del Grupo AFUP (UNR, CONICET, Municipalidad de Rosario y Sub-Secretaría de Recursos Naturales de la provincia de Santa Fe), a cargo del Proyecto "Monitoreo de los efectos de la agricultura y la silvicultura urbana y periurbana en la adaptación y mitigación del cambio climático, coordinado por el Dr. Rubén Piacentini (IFIR-UNR-CONICET) y la Dra. Marielle Dubbeling (RUAF Foundation) y subsidiado por la Red de Desarrollo del Conocimiento sobre Cambio Climático (CDKN)

REFERENCIAS

Chow, Ven Te, David R. Maidment, y Larry W. Mays (1988). *Applied Hydrology*. McGraw-Hill.

- Denver Regional Council of Governments. (1984). *"Drainage Criteria Manual"*, Denver, Colorado, USA.
- Di Bernardo E. (2013). Propuesta para establecer un patrón de referencia de eficiencia ambiental urbano-edilicia. XXXVI ASADES Tucumán, Argentina. <http://asades.inenco.net/index.php/asades/asades2013/paper/view/1189>
- Dirección Provincial de Protección Urbana Contra Inundaciones (2012). Informe interno período 2008-2011. Secretaría de Aguas, MASPMA, Rosario, Provincia de Santa Fe, Argentina.
- McCuen RH. (1998). *Hydrology: Analysis and Design*. Prentice-Hall. 2ed.
- Zimmermann, E.D. (1998) Synthetic Storm Generation in a Flatland Region, Santa Fe, Argentina. *Journal of Environmental Hydrology*. Vol. 6, Paper 2.
- Zimmermann Erik (2013) Ajuste de funciones empíricas a las IDR Regionales. *Comunicación personal*. Departamento de Hidráulica. FCEIA. UNR.
- Zimmermann E.D. y L. Bracalenti (2012). Escorrentías pluviales y Regulación del Suelo en el municipio de Rosario. *VI Jornadas de Ciencia y Tecnología 2012*. Secretaría de Ciencia y Técnica. Universidad Nacional de Rosario.
- Zimmermann ED; Bracalenti L (2014). Reducción de riesgo de inundación urbana mediante incremento de áreas verdes. *IV Taller de Regionalización de Precipitaciones Máximas*. Red Argentina de Capacitación y Fortalecimiento en Gestión Integrada de los Recursos Hídricos (Arg Cap-Net). Tucumán, Argentina.
- Zimmermann ED; Bracalenti L, Piacentini R., Inostroza L. (2016). Urban flood risk reduction by increasing green areas for adaptation to climate change. *Procedia Engineering and World Multidisciplinary Civil Engineering-Architecture-Urban Planning Symposium*. Edit. Elsevier.

Artículo recibido el 03/2018 y aprobado para su publicación el 06/2018.

Tabla Anexo

Parametros del HU Snyder urbano para la cuenca del Emisario 10 - Rosario

Escenario	C	Ct	Cp	tp hs	tn hs	Tp hs	Qp m3/s.mm	Tb hs
0	0.51	0.364	0.559	0.857	0.156	0.935	3.367	3.10
1	0.53	0.353	0.551	0.832	0.151	0.907	3.422	3.05
2	0.62	0.312	0.521	0.736	0.134	0.803	3.655	2.85
3	0.49	0.375	0.567	0.884	0.161	0.964	3.310	3.15
k1=		1 L (km) =		9		A (km2) =	18.77	
k2=		1 LC (km) =		5		S (m/m) =	0.0025	
						TC (hs) Vent	6.07	

Parametros del HU Snyder urbano para la cuenca del Area 17 - Rosario

Escenario	C	Ct	Cp	tp hs	tn hs	Tp hs	Qp m3/s.mm	Tb hs
0	0.6	0.423	0.599	0.347	0.063	0.378	0.333	1.17
1	0.66	0.393	0.579	0.322	0.059	0.351	0.346	1.12
2	0.66	0.393	0.579	0.322	0.059	0.351	0.346	1.12
3	0.54	0.459	0.622	0.376	0.068	0.411	0.318	1.22
k1=		1.1 L (km) =		1.39		A (km2) =	0.7	
k2=		1.2 LC (km) =		0.96		S (m/m) =	0.002	
						TC (hs) Vent	1.31	

Parametros del HU Snyder urbano para la cuenca del Area 3 - Rosario

Escenario	C	Ct	Cp	tp hs	tn hs	Tp hs	Qp m3/s.mm	Tb hs
0	0.49	0.702	0.756	1.406	0.256	1.534	2.884	3.76
1	0.53	0.660	0.735	1.323	0.240	1.443	2.981	3.63
2	0.57	0.624	0.716	1.250	0.227	1.363	3.074	3.52
3	0.49	0.702	0.756	1.406	0.256	1.534	2.884	3.76
k1=		1.1 L (km) =		6.1		A (km2) =	19.5	
k2=		1.7 LC (km) =		4.3		S (m/m) =	0.0014	
						TC (hs) Vent	8.26	

Parametros del HU Snyder urbano para la cuenca del Area 9 - Rosario

Escenario	C	Ct	Cp	tp hs	tn hs	Tp hs	Qp m3/s.mm	Tb hs
0	0.4	0.967	0.876	1.803	0.328	1.967	2.139	4.16
1	0.47	0.853	0.827	1.590	0.289	1.734	2.289	3.88
2	0.63	0.679	0.745	1.265	0.230	1.380	2.590	3.43
3	0.39	0.986	0.884	1.839	0.334	2.006	2.116	4.20
k1=		1.1 L (km) =		6.25		A (km2) =	16	
k2=		2 LC (km) =		3.3		S (m/m) =	0.0008	
						TC (hs) Vent	9.90	

Parametros del HU Snyder urbano para la cuenca del Area 13 - Rosario

Escenario	C	Ct	Cp	tp hs	tn hs	Tp hs	Qp m3/s.mm	Tb hs
0	0.27	1.314	1.009	2.450	0.445	2.673	1.812	4.90
1	0.32	1.151	0.949	2.146	0.390	2.341	1.947	4.57
2	0.65	0.662	0.736	1.235	0.224	1.347	2.624	3.39
3	0.27	1.314	1.009	2.450	0.445	2.673	1.812	4.90
k1=		1.1 L (km) =		4.2		A (km2) =	5	
k2=		2 LC (km) =		3		S (m/m) =	0.0008	
						TC (hs) Vent	5.53	

Ref.: t_p : tiempo de retardo, definido desde el centroide del hietograma hasta el pico del hidrograma; T_p : tiempo al pico, desde el inicio de la lluvia hasta el pico del hidrograma; t_n : tiempo de lluvia neta; Q_p : caudal pico Del HU; t_b : tiempo de base; C_p : coeficiente de pico; C_t : coeficiente de tiempo, k_1 y k_2 constantes de red y pendiente, L y LC longitud de conducto total y al centro de gravedad de la cuenca, A y S área y pendiente de la cuenca, respectivamente; TC tiempo de concentración (fórmula de Ventura).