

MODELADO HIDROLÓGICO DE LA PRECIPITACIÓN-ESCORRENTÍA EN UNA MICROCUENCA AGRÍCOLA DEL PARTIDO DE AZUL, BUENOS AIRES

JOAQUÍN MOZO^{1-2*}; MARCELO VARNI¹; MARÍA GUADALUPE ARES¹⁻³; CELIO IGNACIO CHAGAS⁴

Recibido: 20/03/2019

Recibido con revisiones: 07/01/2020

Aceptado: 07/01/2020

RESUMEN

Se analizaron los procesos de precipitación-escurrimiento en una microcuenca bajo uso agrícola (566 ha) ubicada en el área serrana/periserrana del Partido de Azul, Buenos Aires, Argentina. Se utilizó el modelo hidrológico HEC-HMS 3.2 en combinación con el software QGIS, dividiendo la cuenca en varias sub-cuencas interconectadas por un cauce interno. Para el modelo de lluvia-escorrentía se consideró el método del número de curva (CN). Se calcularon los valores de CN para el año 2012 mediante dos procedimientos: a) el método SCS-CN original y b) el método de Hawkins. Al no lograrse un ajuste adecuado entre los datos observados y los valores estimados, se utilizó finalmente un CN según calibración del modelo utilizando registros históricos propios. Los coeficientes de correlación y de eficiencia de Nash Sutcliffe fueron superiores a 0,7 para todas las crecidas. La raíz cuadrada media del error arrojó valores bajos indicando un ajuste aceptable del modelo. Luego, se realizó un análisis de sensibilidad evento a evento. A tal fin, dos de los parámetros incluidos en el modelo (número de curva y tiempo de retardo) fueron sometidos al análisis de sensibilidad. A su vez, los valores de CN estimados para el ajuste fueron analizados versus los datos de precipitación (mm), considerando todas las crecidas e incluyendo como tercer variable: a) la lluvia antecesora y b) la duración de la precipitación. El modelo predijo aceptablemente la descarga máxima, el volumen de escurrimiento y el tiempo al pico en función de los datos históricos de crecidas disponibles para el año 2012. Estos resultados ponen de relieve la importancia de contar con valores de CN calibrados *in situ*, e indican que bajo esas condiciones el HEC-HMS sería adecuado para modelar la respuesta hidrológica de la cuenca estudiada pudiéndose utilizar para el análisis de los datos hidro-meteorológicos disponibles y predecir futuras crecidas, lo cual resulta de importancia para el manejo y la conservación de las tierras de dicha región.

Palabras clave: Lluvias, escorrentía, CN, modelo HEC-HMS

RAINFALL-RUNOFF HYDROLOGICAL MODELING OF AN AGRICULTURAL WATERSHED OF AZUL DISTRICT, BUENOS AIRES

ABSTRACT

The precipitation-runoff processes were analyzed in a micro-basin under agricultural use (566 ha) located in the Hilly/Perirange area of Azul District, Buenos Aires, Argentina. The hydrological model 3.2 HEC-HMS was used in combination with the QGIS software, dividing the basin into several sub-basins interconnected by an internal channel. For the rainfall-runoff model, the NRCS curve number method was considered. CN values were calculated for 2012 using two procedures: a) the original SCS-CN method and b) the Hawkins method. When an adequate adjustment between the observed data and the estimated values was not achieved, a CN was finally used according to the calibration of the model using its own historical records. The correlation coefficient and the Nash Sutcliffe efficiency coefficient were greater than 0.7 for all floods. The mean root square of the error yielded low values indicating an acceptable model fit. Then, an event-to-event sensitivity analysis was performed. To this end, two of the parameters included in the model (curve number and lag time) were subjected to the sensitivity analysis. In turn, the CN values estimated for the adjustment were analyzed versus precipitation data (mm), considering all the floods and including as third variable: a) preceding rainfall and b) precipitation duration. Based on historical flood data available for 2012, the model predicted acceptably maximum discharge, runoff volume and peak time. These results highlight the need to obtain CN values calibrated *in situ*. Under this condition, HEC-HMS can be adequate to model the hydrological response of the studied basin for the analysis of available hydro-meteorological data and to predict future floods, which is relevant for land management and conservation of the region.

Key words: Rainfall, runoff, CN, HEC-HMS model

1 Instituto de Hidrología de Llanuras Dr. E. Usunoff (IHLLA), Azul, Buenos Aires, Argentina

2 Agencia Nacional de Promoción Científica y Tecnológica (ANPCyT), CABA, Buenos Aires, Argentina

3 Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET), CABA, Buenos Aires, Argentina

4 Universidad de Buenos Aires (UBA), Facultad de Agronomía, CABA, Buenos Aires, Argentina

* Autor de contacto: jmozo@ihlla.org.ar

INTRODUCCIÓN

Las condiciones climáticas y los cambios en el uso del suelo influyen en la infiltración y la generación de escurrimiento, procesos que determinan los caudales máximos, la retención de humedad del suelo y la regulación hídrica, y finalmente, afectan el balance de agua (Elsenbeer, 2001; Bruijnzeel, 2004). La predicción de la dinámica hídrica a nivel de cuenca resulta de gran importancia para el manejo y la conservación de los recursos suelo y agua (Ares *et al.*, 2016). El proceso de estimación de la escorrentía es extremadamente complicado, no lineal y de naturaleza dinámica, lo que depende de diversas características meteorológicas y físicas del área de captación (Darji *et al.*, 2019).

Un factor importante a considerar es que la respuesta hidrológica de una cuenca pequeña es diferente a la de una cuenca intermedia o grande. En una cuenca pequeña la cantidad y la distribución del escurrimiento son influenciadas principalmente por las condiciones físicas del suelo y la cobertura anteriormente mencionadas. Mientras que en las cuencas grandes el efecto del almacenamiento en el cauce y depresiones llega a ser pronunciado y adquieren suma importancia. Es difícil definir que se considera una cuenca pequeña, intermedia o grande, según Chow *et al.* (1994), una cuenca pequeña se puede definir como aquella que es sensible a lluvias de alta intensidad y corta duración y en la que predominan las características físicas del suelo con respecto a las del cauce, el tamaño de una cuenca pequeña puede variar desde 4 km² hasta 130 km². Mientras que otros autores como Springall (1969), consideran que una cuenca pequeña tiene un área de hasta 250 km² (Carrillo *et al.*, 2016). Por su parte, Campos Aranda (1992) clasifica a las cuencas en 6 categorías según su tamaño en km², a saber: de 0 a 25; Muy pequeña, de 25 a 250; Pequeña, de 250 a 500; Intermedia pequeña, de 500 a 2500; Intermedia grande, de 2500 a 5000; Grande y mayor a 5000; Muy grande. En definitiva, este análisis se inscribe en los problemas de interpretación de procesos a distintas escalas.

Por otro lado, para predecir los flujos de agua en una cuenca se puede recurrir al uso de mo-

delos, los cuales deben ser evaluados para diferentes condiciones ambientales (climáticas, topográficas, suelos y cobertura vegetal) (Darji *et al.*, 2019). Algunos de estos modelos hidrológicos buscan capturar los mecanismos físicos de generación de la escorrentía superficial y la recarga a los acuíferos a partir de la precipitación y la evapotranspiración (Xu & Singh, 2004) con simplificaciones más o menos importantes. Hay muchos métodos disponibles para la determinación de la escorrentía en función de los factores anteriores (Subramanya, 2008). Los modelos de cuencas hidrográficas actualmente disponibles van desde modelos conceptuales agregados (Bandaragoda *et al.*, 2004) hasta modelos integrales distribuidos (Olivares *et al.*, 2004; Khakbaz *et al.*, 2009). Los modelos conceptuales agregados son modelos denominados de caja negra donde a partir de un input determinado (precipitación) el modelo da el hidrograma a la salida de la cuenca. Sin embargo, cuando las respuestas de las sub-cuencas son utilizadas en la entrada de otra, aguas abajo, mediante un tránsito de flujo determinado, se induce un nuevo término usado en hidrología recientemente y es el modelo semidistribuido (Caro Camargo, 2015). No obstante siguen sin tener una base física, ya que utilizan métodos sintéticos para transformar la lluvia en escorrentía (Asadi & Boustani, 2013).

Actualmente, los Sistema de Información Geográfica (SIG) junto con los modelos hidrológicos se están utilizando para la estimación de la escorrentía (Jayakrishnan *et al.*, 2005). Algunos de estos modelos que determinan la escorrentía son: HEC-HMS (Hydrologic Engineering Center, US Army Corps of Engineers, 2018), SWAT (University of Texas for the United States Department of Agriculture; ARS-USDA) (Arnold *et al.*, 1998), TOPMODEL (Beven and Kirby, 1979) y WEPP (USDA-Water Erosion Prediction Project, 1995) (Flanagan & Nearing, 1995).

Por otro lado, un punto importante a considerar es que la modelación matemática lluvia-caudal en cuencas de llanura es difícilmente ajustable con los softwares hidrológicos usuales, ya que estos han sido desarrollados para cuencas convencionales (con pendientes mayores). En áreas planas, la red de drenaje es proclive al escurrimiento di-

fuso, siendo formado por numerosos cursos paralelos de escasa pendiente y para crecidas medias en adelante, el almacenamiento superficial es el componente crítico de la propagación (Cazenave & Villanueva, 2007). En tal sentido, el modelo HEC-HMS (US Army Corps of Engineers, 2018) anteriormente mencionado ha sido diseñado para simular la respuesta de la escorrentía superficial de una cuenca a la precipitación al representar la cuenca con componentes hidrológicos e hidráulicos interconectados. Es aplicable a simulaciones de eventos de crecida individuales. Utiliza los métodos del hidrograma unitario y onda cinemática (entre otros) para la generación y propagación de escorrentía (Verma & Mahana, 2010). En HEC-HMS, el modelo de cuenca comprende la pérdida (infiltración) y la transformación de la precipitación en escurrimiento superficial. Cada elemento en el modelo realiza diferentes funciones del proceso de precipitación-escorrentía dentro de una porción de la cuenca conocida como sub-cuenca. Un elemento puede representar una escorrentía superficial, un canal de corriente o un reservorio. A cada uno de los elementos se le asigna una variable que define el atributo particular del elemento y las relaciones matemáticas que describen sus procesos físicos. El resultado del proceso de modelado es el cálculo de hidrogramas de flujo en la salida de la cuenca (Asadi & Boustani, 2013). Como fue previamente descrito, en los últimos tiempos, los SIG se han convertido en parte integral de los estudios hidrológicos y poseen un papel importante en la parametrización del modelo hidrológico distribuido (Samper *et al.*, 2005). La extracción de información hidrológica, como la dirección del flujo, la acumulación del flujo, los límites de las cuencas hidrográficas y las redes de arroyos, desde un modelo digital de elevación (DEM) se realizan a través de aplicaciones SIG (Asadi & Porhemat, 2012). Para poder transformar una determinada precipitación en escorrentía, el método denominado Número de Curva CN (USDA SCS, 1985) es el más utilizado en la bibliografía internacional. El mismo permite obtener el volumen de agua disponible para escurrir superficialmente como una función de la lluvia y el almacenamiento (Silveira *et al.*, 2000). El empleo de esta metodología a pesar de su difusión, ha recibido diversas críticas, como

por ejemplo la forma de estimación de la retención inicial, o la determinación de la condición de humedad antecedente, aunque sigue siendo ampliamente utilizado.

El presente estudio consistió en analizar la adecuación del modelo HEC-HMS combinado con el uso de SIG para predecir la respuesta hidrológica de una microcuenca agrícola perteneciente a la región de la pampa serrana bonaerense. A tal fin se plantearon tres objetivos específicos: 1. Comparar los valores de CN determinados por el método SCS-CN original (USDA SCS, 1972) con los CN calculados mediante el método propuesto por Hawkins; 2. Calibrar, verificar y realizar análisis de sensibilidad del modelo hidrológico HEC-HMS en la microcuenca; 3. Analizar la relación entre el parámetro CN calibrado en el modelo y algunas variables climáticas, hidrológicas y de uso de la tierra intervinientes.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio

El área de estudio corresponde a una microcuenca ubicada en la cuenca superior del arroyo del Azul, situado en la región central de la Provincia de Buenos Aires. Cuenta con una extensión de 566 ha y se encuentra en las nacientes del arroyo Videla, tributario del arroyo del Azul. La microcuenca abarca tres establecimientos agropecuarios donde se realizan actividades agrícolas. La **Figura 1** muestra la ubicación de la microcuenca estudiada.

La geomorfología del área es la del sistema de sierras de Tandilia, que está constituido por una cadena de cerros aislados de rocas graníticas (de edad Precámbrico y Paleozoico), pedemontes y lomas con relieve ondulado. Posee altitudes máximas entre 260 y 280 metros sobre el nivel del mar, y la pendiente media es de 3%, con sectores que pueden superar el 10% y otros en los que puede ser menor que 1%. En cuanto a los suelos, predominan los Argiudoles típicos (67,9%) y en menor proporción, en las áreas de cerros y lomas con roca o tosca cercana a la superficie se encuentran Hapludoles y Argiudoles líticos (27,6%) (INTA, 1992). El punto de cierre de la microcuenca está ubicado en las coordenadas 37°08'48''O; 59°55'25''S.

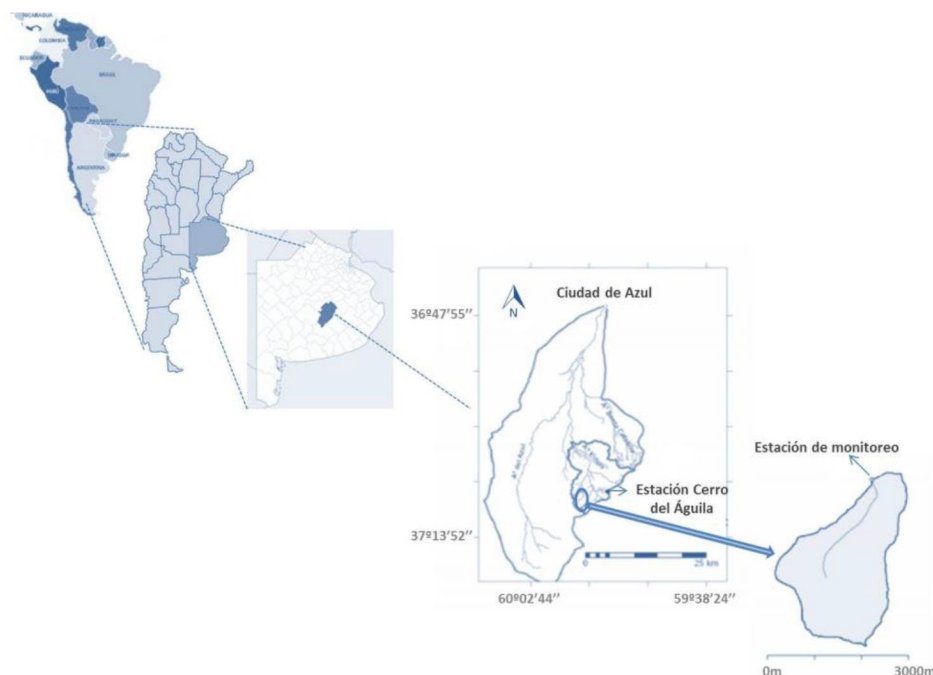


Figura 1. Ubicación de la microcuenca en la cuenca superior del arroyo del Azul, con detalle de la microcuenca y ubicación de la estación Cerro del Águila y de la estación de monitoreo de caudales y muestreo de agua de crecidas.

Figure 1. Micro-basin location in the upper basin of the Azul stream, with details of the micro-basin and Cerro del Águila station location and of the monitoring station for floodwater flow and sampling.

Con el fin de tener una mejor representación espacial de la cuenca se realizó una subdivisión del área de estudio. Mediante el software QGIS (QGIS Org, 2017) y utilizando el modelo de elevación generado por la digitalización de las cartas del Instituto Geográfico Nacional (IGN), la microcuenca fue dividida en cuatro sub-cuencas, considerando las divisorias de aguas para la fragmentación.

En este estudio la calibración se realizó en dos pasos: una primera aproximación global de los parámetros de ruteo de la crecida en el cauce y el tiempo de concentración de la cuenca, para lo que se utilizaron datos de precipitaciones y crecidas correspondientes al período 2013-2017. A partir de esta pre-calibración, el ajuste final se realizó evento a evento para el año 2012, modificando el valor de CN, ya que se trató del año con mayor número de crecidas del período analizado (Ares *et al.*, 2016).

Tratamiento de los datos

Los datos de precipitación fueron obtenidos por la Estación Meteorológica Cerro del Águila (Latitud 37°10'25" S, Longitud 59°54'4" O), la cual se encuentra a una distancia de 5 km del punto de cierre de la microcuenca. Dicha estación posee un pluviómetro construido y dispuesto según las normas de la Organización Meteorológica Mundial, que registra la lluvia cada 10 minutos con una precisión de 0,20 mm a través de un sis-

tema de cangilones. Se calculó el valor total de la precipitación (P, mm), y su duración (Dur, hs).

Se consideró también a la precipitación de los 5 días previos como otra variable para evaluar las condiciones antecedentes en la microcuenca. Su valor fue calculado a partir de los registros de precipitación diaria correspondientes a la estación "Cerro del Águila".

Los valores de caudales fueron determinados a intervalos de 15 minutos, por medio de un limnógrafo, en el punto de cierre de la microcuenca. Las alturas se convirtieron en caudales a través de la relación altura-caudal de la sección de salida. Toda la simulación del modelo hidrológico fue realizada con un paso horario de 10 minutos.

A fin de conocer la condición hidrológica de la cuenca en cuanto a cobertura vegetal al momento de los eventos a analizar, se determinó el porcentaje de cobertura y tratamiento del suelo. Ello requirió conocer los cultivos, las rotaciones, fechas de siembra, cosecha, rendimientos y sistemas de labranzas implementados en los lotes pertenecientes a la microcuenca durante el período de estudio. Para cada evento analizado, y a partir de los datos relevados, se elaboró una planilla en la que se establecieron las etapas de crecimiento en que se encontraban los cultivos en cada lote, incluyendo a los períodos de barbecho y de postcosecha. El grado de cobertura

correspondiente a cada cultivo en cada lote se determinó con información obtenida en relevamientos en el campo. Posteriormente se calculó el porcentaje de cobertura ponderado, considerando para cada lote de la microcuenca, su superficie y tipo de cultivo y estado fenológico.

El modelo de la cuenca y sus características fueron creados mediante el software QGIS a partir del modelo de elevación generado por la representación de cartas topográficas del IGN. Dicho mapa sirvió de base para el modelo de cuenca (**Figura 2**). Como puede observarse, la cuenca fue subdividida en cuatro sub-cuencas interconectadas por un arroyo interno.

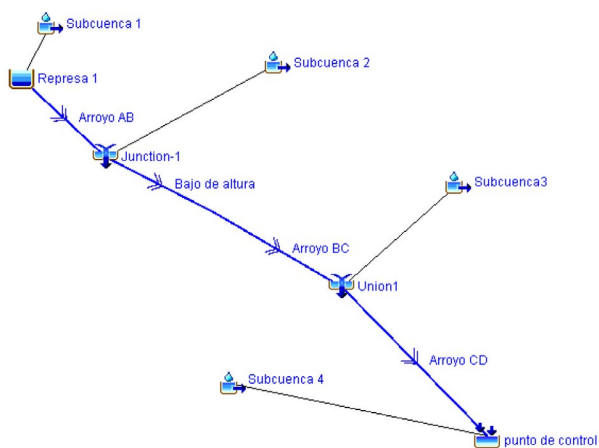


Figura 2. Modelo de cuenca utilizado en el software HEC-HMS 3.2. Nótese la división en sub-cuencas interconectadas por el arroyo interno.

Figure 2. Basin model used in the 3.2 HEC-HMS software. Note the division into sub-basins interconnected by the internal stream.

El método de CN (USDA SCS, 1985) permite obtener el volumen de agua disponible para escurrir superficialmente como una función de la lluvia y el almacenamiento (Silveira *et al.*, 2000). El valor de CN se obtiene consultando tablas específicas (USDA SCS, 1985).

Por otra parte, los valores de CN se obtuvieron por una vía alternativa, que consistió en aplicar el método propuesto por Hawkins (1993). Este método solo se puede aplicar luego de que haya ocurrido el evento. Dicho investigador indicó que, a partir de los datos de precipitación-escorrentía observados, se podía determinar el parámetro S de SCS-CN, para una $AI=0,2S$, mediante la siguiente fórmula:

$$S = 5 \left[(P + 2Q) - \sqrt{Q(4Q + 5P)} \right]$$

Posteriormente, el parámetro S podía transformarse a escala CN utilizando la siguiente relación empírica:

$$CN = \frac{25400}{S + 254}$$

donde S está en mm y CN es adimensional (escala 0 a 100).

Considerando lo anteriormente mencionado, en este trabajo se calcularon los valores de CN para el año 2012, mediante los dos métodos señalados: el método SCS-CN original (USDA SCS 1985) (llamado aquí "CN SCS") y el método de Hawkins (1993) (aquí "CN Hawkins").

A su vez se empleó una tercera alternativa, que fue la de obtener un CN ajustado mediante calibración del modelo HEC-HMS de manera de reproducir lo más fielmente posible el hidrograma de salida, denominado aquí "CN calibrado". Esto se realizó con el método de prueba y error. Aunque es el método más utilizado y usualmente recomendado, implica un ajuste manual de los parámetros, siendo más lento y subjetivo que el ajuste automático (Finger, 2011). Este ajuste de los valores de los parámetros entre simulaciones se realiza con el fin de alcanzar los errores mínimos que den un mejor ajuste entre los hidrogramas observados y simulados.

Un total de 15 crecidas superiores a 0,1 m³/s en el año 2012, fueron analizadas junto con la correspondiente precipitación. Se calcularon los valores de CN de tabla (CN SCS) y mediante el método de Hawkins (1973) (CN Hawkins) e, independientemente de estos dos valores se ajustó un CN (CN calibrado) para obtener el mejor ajuste según los siguientes criterios: similitud entre las escorrentías modeladas y medidas, y el tiempo y la magnitud de los picos del hidrograma. Para evaluarlos se tuvieron en cuenta el coeficiente de correlación (R²), el error de la raíz cuadrada de la media (RMSE) y el coeficiente de Nash Sutcliffe (Nash & Sutcliffe, 1970).

Luego de calibrar el modelo, se realizó un análisis de sensibilidad que consistió en determi-

nar qué parámetros del modelo tenían el mayor impacto en los resultados del mismo. Se realizó sobre el CN y el tiempo de retardo, tomando como caso de estudio la crecida del 16 de agosto de 2012, ya que fue el evento que presentó mejores resultados de eficiencia de ajuste. El análisis de sensibilidad se realizó incrementando o disminuyendo un 10% el valor del parámetro analizado, manteniendo todos los demás parámetros en sus valores calibrados.

RESULTADOS

La **Tabla 1** muestra la comparación entre los valores de CN estimados empleando el método de USDA SCS (1985), los calculados por el método de Hawkins y aquellos obtenidos de la calibración del modelo HEC-HMS evento a evento. La **Tabla 2** resume los resultados del análisis de eficiencia realizado a fin de decidir el valor de CN a utilizar en dicho modelo. El mejor ajuste de los datos se logró utilizando el CN calibrado evento a evento.

Tabla 1. Comparación de los valores del CN aplicando el método USDA SCS, por el método de Hawkins y mediante la calibración del modelo HEC HMS.

Table 1. Comparison of CN values applying the USDA SCS method, the Hawkins method and by calibrating the HEC-HMS model.

Fecha de crecida	CN SCS	CN Hawkins	CN calibrado
10/01/2012	54	49	49
18/02/2012	54	54	54
05/03/2012	54	48	66
11/03/2012	73	66	74
19/03/2012	56	76	70
18/04/2012	56	65	63
17/05/2012	56	38	42
16/08/2012	59	40	45
04/09/2012	59	72	75
05/10/2012	56	69	68
16/10/2012	56	57	63
30/11/2012	72	77	74
05/12/2012	72	77	79
19/12/2012	53	73	75
28/12/2012	53	69	61

Tabla 2. Análisis de eficiencia (volumen de escurrimiento y caudal en el pico - Qp) y diferencia media al pico (hs).

Table 2. Efficiency analysis (runoff volume and peak flow - Qp) and average difference at peak (h).

	Coefficiente de Nash Sutcliffe (Eficiencia Esc. Total)	Coefficiente de Nash Sutcliffe (Eficiencia Q _p)	Diferencia media tiempo al pico (hs)
CN SCS	0,446	-0,747	02:11
CN Hawkins	0,770	0,630	01:56
CN calibrado	0,964	0,762	01:37

Tabla 3. Resumen de los parámetros del modelo hidrológico y del análisis de eficiencia por evento individual.

Table 3. Summary of hydrological model parameters and efficiency analysis per individual events.

Fecha de crecida	Número de curva (CN)	Abstracción inicial (AI) (mm)	Precipitación (mm)	Escurrimiento (mm)	Coefficiente de correlación (R ²)	Raíz cuadrada media del error (RMSE)	Coefficiente de Nash Sutcliffe (Eficiencia Q Total)
10/01/2012	49	52,87	60,00	0,237	0,875	0,004	0,828
18/02/2012	54	43,27	53,40	0,384	0,962	0,004	0,942
05/03/2012	66	26,17	65,20	0,420	0,937	0,005	0,897
11/03/2012	74	17,85	33,00	0,325	0,928	0,003	0,890
19/03/2012	70	21,77	20,00	0,227	0,842	0,004	0,818
18/04/2012	63	29,83	31,80	0,107	0,812	0,002	0,781
17/05/2012	42	70,15	136,80	6,654	0,869	0,081	0,824
16/08/2012	45	22,82	108,60	2,350	0,842	0,004	0,959
04/09/2012	75	22,82	28,60	0,688	0,834	0,012	0,786
05/10/2012	68	16,93	30,00	0,496	0,834	0,010	0,713
16/10/2012	63	29,83	53,80	1,079	0,891	0,001	0,881
30/11/2012	74	17,85	21,00	0,364	0,928	0,005	0,899
05/12/2012	79	13,50	26,80	1,563	0,797	0,046	0,794
19/12/2012	75	27,35	38,60	3,463	0,836	0,115	0,724
28/12/2012	61	32,48	32,60	0,685	0,770	0,106	0,768

Tabla 4. Valores de tiempo al pico (T_p), caudal máximo (Q_p) y caudal total (Q_t) estimados para los distintos escenarios considerados en el análisis de sensibilidad.

Table 4. Time to peak values (T_p), maximum flow (Q_p) and total flow (Q_t) estimated for the different scenarios considered in the sensitivity analysis.

Parámetro	Variación	Valor parámetro	T_p , hr	Q_p , m ³ /s	Q_t (1000 m ³)
CN	Valor observado	-	19:00	0,41	13,29
	CN calculado	45,00	18:50	0,41	13,41
	CN - 10%	40,50	18:50	0,38	11,14
	CN + 10%	49,50	18:20	0,43	15,68
Tiempo de retardo	Valor observado	-	19:00	0,41	13,29
	Lag Time calculado	345,00	18:50	0,41	13,41
	Lag Time - 10%	310,50	19:10	0,34	13,05
	Lag Time + 10%	379,50	18:40	0,46	13,74

La **Tabla 3** resume el modelo hidrológico, observándose los 15 eventos de crecida correspondientes al año 2012, con los valores de precipitación y los CN estimativos para el escurrimiento. También se muestran los resultados del análisis de eficiencia (coeficiente de correlación, raíz cuadrada media del error y coeficiente de Nash Sutcliffe).

La **Tabla 4** muestra los resultados del análisis de sensibilidad del modelo en los distintos escenarios considerados tomando como caso de estudio la crecida del 16 de agosto de 2012. El CN mostró ser el parámetro más sensible.

La **Figura 3** muestra el análisis de los valores de CN estimados para el ajuste versus los valores de precipitación (mm), considerando todas las crecidas estudiadas e incluyendo, además, una tercera variable, a) la lluvia antecesora y b) la duración de la precipitación (denotadas por el tamaño de las burbujas).

La relación CN-precipitación mostró un ajuste aceptable ($R^2=0,71$). Al incluir la variable

de lluvia precedente pueden observarse dos líneas de tendencia, una que incluye los eventos que poseen lluvia antecesora, la cual arroja un ajuste aceptable ($R^2=0,779$) y otra que incluye los eventos que ocurrieron sin precipitaciones los 5 días previos, mostrando un ajuste excelente ($R^2=0,977$). Nótese la diferencia de CN de aproximadamente 10 puntos entre una y otra línea de tendencia. Por otro lado, al incluir la variable duración de la tormenta, se advierte que al aumentar la precipitación, la duración del evento crece mientras que el CN disminuye.

La **Tabla 5** muestra los resultados del análisis de correlación de Pearson, en la cual se consideran los valores de CN utilizados en el modelo, los parámetros de precipitación calculados a fin de caracterizar las lluvias causantes de los eventos, los parámetros de escurrimiento y los de cobertura vegetal. Nótese la existencia de una correlación significativa ($p<0,05$) entre el CN calibrado y las variables meteorológicas analizadas.

Tabla 5. Matriz de correlación de Pearson. CN, parámetros de precipitación, de escurrimiento y de cobertura vegetal. Los valores en negrita y con un asterisco indican correlación significativa entre las variables ($p<0,05$). Donde; CN=número de curva, P=precipitación, Q=caudal, CE=coeficiente de escurrimiento, Dur=duración, EI_{30} =Intensidad de las precipitaciones en 30 minutos por la energía acumulada en el período de lluvia, I=intensidad

Table 5. Pearson correlation matrix. CN, precipitation, runoff and vegetation cover parameters. Values in bold and with an asterisk indicate significant correlation between the variables ($p<0.05$). Where; CN=curve number, P=rainfall, Q=flow, CE=runoff coefficient, Dur=duration, EI_{30} = Intensity of rainfall in 30 minutes by the accumulated energy in the rain period, I=intensity

	P (mm)	Q Total (mm)	CE (%)	Dur (hs)	EI_{30} (MJ mm (ha h ⁻¹))	I30 (mm h ⁻¹)	Lluvia antecesora 5 días (mm)	Cobertura vegetal (%)
CN	-0,84*	-0,42	0,23	-0,74*	-0,64*	-0,14	0,44	0,06

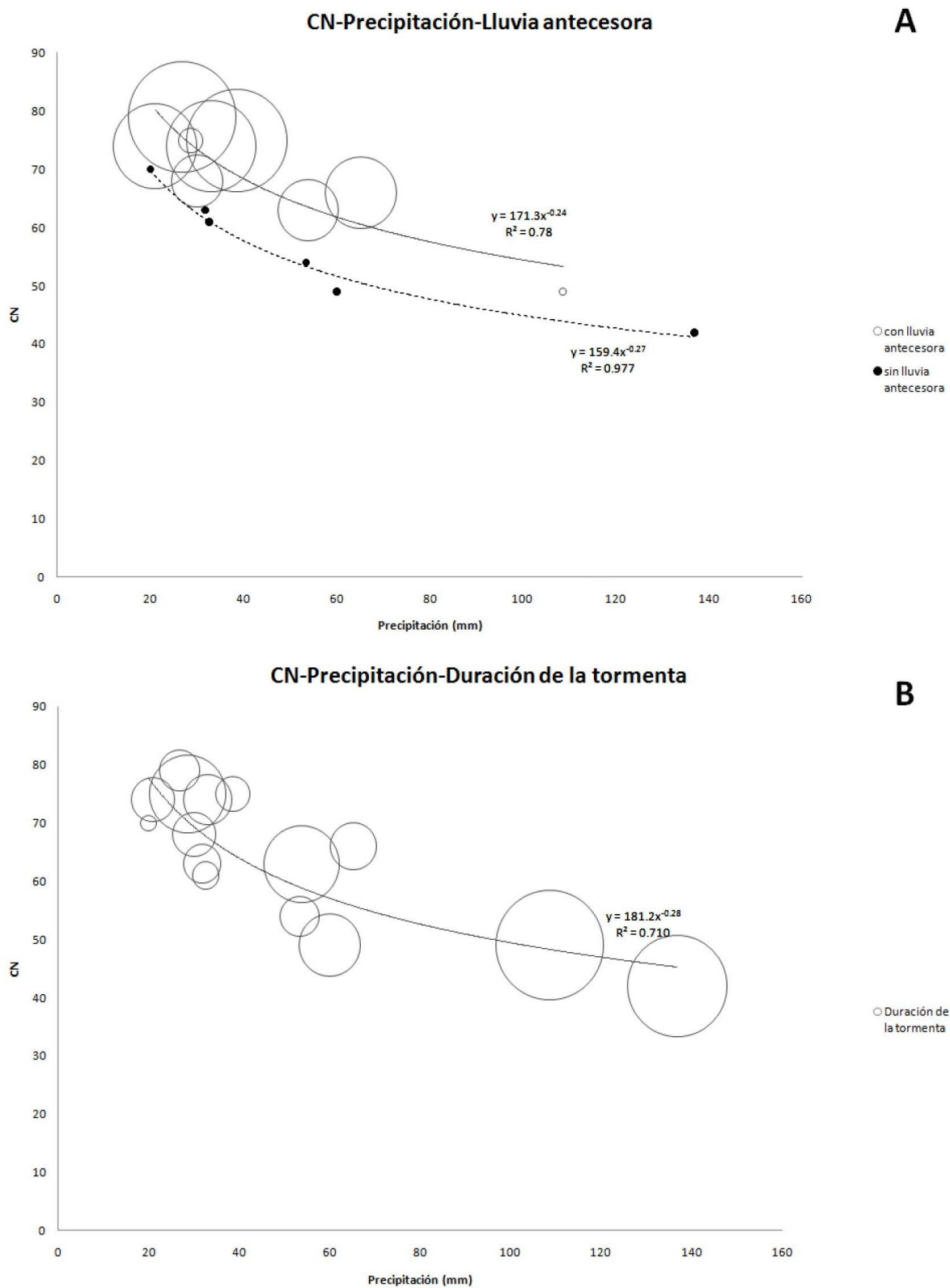


Figura 3A. Valores de CN vs. Precipitación. El tamaño de las burbujas indica la magnitud de la lluvia acumulada los 5 días previos. **B.** Valores de CN vs. Precipitación. El tamaño de las burbujas denota la duración de la precipitación.

Figure 3A. CN values vs. Precipitation. Bubble size indicate accumulated rainfall magnitude of the previous 5 days. **B.** CN Values vs. Precipitation. Bubbles sizes indicate rainfall duration.

DISCUSIÓN

Numerosos autores han analizado críticamente el método SCS-CN (Fennessey & Hawkins, 2001; Woodward *et al.*, 2003; D'Asaro *et al.*, 2014; Randusová *et al.*, 2015). A tal respecto, algunos autores han demostrado que al usar valores de CN tabulados existe una tendencia a predecir en exceso el volumen de escurrimiento (Schneider *et al.*, 2005). Hoy en día, la mayoría de los estudios utilizan el método de Hawkins para estimar el valor de CN a fin de evitar predicciones de escurrimiento inconsistentes (Tan *et al.*, 2018). En nuestro caso, al analizar los valores de CN determinados con el método SCS original y los determinados por el método de Hawkins (1973), para algunas de las crecidas del año 2012, existieron diferencias en los CN del orden de 20, obteniéndose solamente en una de las crecidas valores coincidentes mediante los tres métodos, tal como se puede observar en la **Tabla 1**. El mejor ajuste de los datos se logró utilizando el CN calibrado evento a evento mediante el método de prueba y error, ya que se alcanzaron las mayores eficiencias en Q total y Q al pico y la menor diferencia horaria media al pico, tal lo indicado en la **Tabla 2**. Si bien la metodología de prueba y error para el calibrado del método requiere un mayor tiempo de proceso (Asadi & Porhemat, 2012), en nuestro caso su aplicación fue de utilidad, lográndose verificar cuidadosamente mediante el uso de datos históricos observados, correspondientes a 36 crecidas del período 2013-2017.

D'Asaro *et al.* (2012) compararon los valores de CN obtenidos mediante el método de Hawkins y los calculados mediante las tablas de CN. Hallaron para su cuenca que los valores de CN calculados por el método de Hawkins fueron todos inferiores a los obtenidos mediante el método SCS original, mientras que en nuestro caso, de los 15 eventos analizados, solo 5 fueron inferiores. Autores como Tan *et al.* (2018) compararon, mediante el uso de otro software, los mismos tres métodos utilizados por nosotros a fin de estimar el valor de CN para una cuenca pequeña (21,12 km²). Obtuvieron, al igual que en nuestro caso, un mejor ajuste con el CN calibrado. Además analizaron variaciones del orden de 0.5 del valor de CN alrededor de su CN calibrado encontran-

do grandes diferencias en cuanto al caudal total de escurrimiento obtenido.

En este punto caben señalarse los resultados de algunos trabajos anteriores a 2012 realizados por nuestro grupo en relación a los diferentes métodos para determinar valores de CN. En ellos se han comparado entre sí pequeñas cuencas de la pampa serrana y pampa ondulada bonaerense (Chagas *et al.*, 2008, Ares *et al.*, 2012a y 2012b) y, a diferencia de lo hallado para la microcuenca, al aplicar el método de Hawkins (1993) para lluvias de gran volumen e intensidad, se obtuvieron valores de CN que resultaron coherentes con los surgidos al utilizar las tablas del método original.

Con respecto a lo anteriormente mencionado, Hawkins (1998) y Canters *et al.* (2006) han sugerido que las tablas de CN deben ser utilizadas solo como una guía y que el valor de CN a aplicar debe ser determinado en base a datos locales y regionales.

Muchos investigadores han realizado importantes estudios hidrológicos utilizando el modelo HEC-HMS, el cual demostró su capacidad para simular y pronosticar flujos de corriente, pudiéndose aplicar en diversas áreas geográficas tales como ambientes áridos y semiáridos, cuencas tropicales y para estimar captación en áreas pequeñas, etc. (Kafle, 2019). En nuestro caso, al aplicarse en una microcuenca, el software HEC-HMS resultó ser un programa simple y con una interfase accesible. El mismo ya había sido utilizado anteriormente por Cazenave & Villanueva (2007) en la cuenca superior del arroyo del Azul, donde se encuentra la microcuenca, con el fin de modelar la respuesta de la cuenca ante eventos intensos de precipitación que ponen en riesgo de anegamiento al casco urbano de la ciudad de Azul. Los resultados que obtuvieron fueron aceptables, al igual que en nuestro caso.

El uso de SIG (en nuestro caso QGis) a fin de parametrizar el modelo hidrológico resultó de gran utilidad en la microcuenca en estudio, al igual que lo había sido para otras cuencas similares, tal como lo indicado por Samper *et al.* (2005). La utilización del modelo de elevación generado por la digitalización de las cartas del

IGN, resultó de utilidad. Asadi & Porhemat (2012) y Tassew *et al.* (2019) también lograron parametrizar adecuadamente sus respectivas cuencas utilizando sus propios modelos de elevación. Nandalal y Ratnayake (2010) ensayaron dos modelos diferentes, uno de 4 sub-cuencas, al igual que nuestro modelo, y otro de 10 sub-cuencas, no encontrando que el número de sub-cuencas utilizado tenga impacto en los resultados.

Con respecto a la valoración del ajuste del modelo, los coeficientes de correlación y los coeficientes de eficiencia de Nash Sutcliffe se encontraron en el rango de 0,713 - 0,956, indicando un ajuste de muy bueno a excelente, según los valores sugeridos para la toma de decisiones en el análisis de eficiencia (Molnar, 2011). Estos valores coinciden con los hallados por Derdour *et al.* (2018), quienes luego de calibrar y validar el modelo, aplicando también el parámetro CN, encontraron que las descargas del pico simulado fueron muy cercanas a los valores observados. A su vez, la raíz cuadrada media del error arroja valores bajos indicando un buen ajuste del modelo. En el análisis de eficiencia, el porcentaje de error en el pico de crecida y el caudal total estuvieron también dentro del rango de aceptación. En cuanto al análisis de sensibilidad local adoptado para evaluar el modelo donde fueron analizados los parámetros CN y TR, las mayores diferencias entre los hidrogramas de picos generados y el hidrograma de picos de línea de base fueron causados por el CN, tal como puede observarse en los resultados mostrados en la **Tabla 4**. Tassew *et al.* (2019) encontraron igualmente que el parámetro CN fue el más sensible para la calibración de su modelo.

La relación CN-precipitación mostró un ajuste aceptable ($R^2=0,71$) (**Figura 3**). En el análisis se incluyó una tercera variable en cada caso (denotada por el tamaño de cada burbuja). En primer lugar (**Figura 3A**), la variable utilizada fue la precipitación antecedente de los cinco días previos: Al incluir dicha variable pueden observarse dos líneas de tendencia, una que incluye los eventos que poseen lluvia antecesora, la cual arroja un ajuste aceptable ($R^2=0,779$) y otra que incluye los eventos que ocurrieron sin precipitaciones los 5 días previos, mostrando un ajuste

excelente ($R^2=0,977$). Puede observarse que aquellos eventos que ocurrieron ante la presencia de lluvia precedente los 5 días previos tuvieron valores de CN aproximadamente 10 puntos más elevados que aquellos que ocurrieron sin lluvia previa. La incidencia de las condiciones hídricas antecedentes sobre los valores de CN ha sido señalada en trabajos previos para esta cuenca (Ares *et al.*, 2012b) y discutido recientemente por otros autores (Lal *et al.*, 2015). En la **Figura 3B** se incluyó la duración de la tormenta, donde se advierte que al aumentar la precipitación la duración del evento crece mientras que el CN disminuye. Es decir que, la duración del evento resultaría directamente proporcional al volumen de lluvia e inversamente proporcional al valor de CN.

Por último, mediante una matriz de correlación de Pearson (**Tabla 5**) se analizaron los datos de CN estimado obtenidos mediante la calibración del modelo HEC-HMS (CN calibrado) versus variables de precipitación (volumen total, duración, I_{30}), variables de cobertura vegetal (% de cobertura) y variables de escurrimiento (caudal total y coeficiente de escurrimiento). Se encontró correlación significativa ($p<0,05$) entre el CN calibrado y las variables meteorológicas: volumen total de lluvia, duración de la tormenta e índice EI_{30} .

Como síntesis del análisis realizado surge que la utilización del modelo HEC-HMS para el área de las nacientes del arroyo del Azul en la subregión de la Pampa Serrana bonaerense, ha mostrado un comportamiento aceptable, siempre y cuando se realice una exhaustiva adecuación del valor de número de curva a las condiciones de la cuenca estudiada.

CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos mediante la aplicación del software HEC-HMS en una microcuenca bajo uso agrícola del Partido de Azul, Provincia de Buenos Aires, Argentina, predijeron aceptablemente los hidrogramas salientes de la cuenca estudiada a las precipitaciones que generaron crecidas por sobre un mínimo establecido arbitrariamente para el año 2012. Tanto el volumen de escurrimiento como el tiempo al pico fueron bastante precisos. Los parámetros utilizados para

evaluar los ajustes (R^2 , Error medio cuadrático y coeficiente de Nash-Sutcliffe) arrojaron valores más que aceptables. Esto muestra que HEC-HMS ajustado con un conjunto de datos adecuados al área de trabajo (particularmente la elección del número de curva) resulta una herramienta apta para la microcuenca estudiada, pudiéndose utilizar para el análisis de los datos hidro-meteorológicos disponibles y predecir futuras crecidas al igual que diseñar prácticas de manejo y conservación de suelos y aguas.

BIBLIOGRAFÍA

- Ares, MG; MR Varni; CI Chagas & I Entraigas. 2012a. Runoff curve number calibration of a 116 km² agricultural basin, Buenos Aires province, Argentina. *Rev. Agric.* 46(6): 535-541.
- Ares, MG; CI Chagas & M Varni. 2012b. Predicción de la escorrentía y estimación de la humedad antecedente en una cuenca aforada. *Cienc. Suelo*, 30(2):151-160.
- Ares, MG, F Bongiorno, M Holzman, C. Chagas, M Varni & I Entraigas. 2016. Water erosion and connectivity analysis during a year with high precipitations in a watershed of Argentina. *Hidrol. Res.* 47(6):1239-1252.
- Arnold, JG; R Srinivasan; RS Muttiah & JR Williams. 1998. Large areahydrologic modeling and assessment. Part I. Model development. *J. Am. Water Resour. Assoc.* 34:73-89.
- Asadi, A & F Boustani. 2013. Performance evaluation of the HEC-HMS hydrologic model for lumped and semi-distributed stormflow simulation (study area: Delibajak Basin). *Am. J. Eng. Res.* 2(11):115-121.
- Asadi, A & J Porhemat. 2012. Calibration, verification and sensitivity analysis of the HEC-HMS hydrologic model (study area: Kabkian basin and Delibajak subbasin), Iran. *J. Ecol. Environ. and Cons.* 18(4):805-812.
- Bandaragoda, C; DG Tarboton & R Woods. 2004. Application of TOPNET in the distributed model intercomparison project, *J. Hydrol.* 298, 178-201.
- Beven, KJ & MJ Kirkby. 1979. A physically based, variable contributing area model of basin hydrology. *Hydrol. Sci. Bull.* 24(1):43-69.
- Bruijnzeel, LA. 2004. Hydrological functions of tropical forests: not seeing the soil for the trees? *Agric. Ecosyst. Environ.* 104,185-228.
- Campos Aranda, D. 1992. *Procesos del Ciclo Hidrológico*. (2ª reimpression) México: Universidad Autónoma de San Luis Potosí.
- Canters, F; J Chormanski; T Van de Voorde & O Batelaan. 2006. Effects of Different Methods for Estimating Impervious Surface cover on Runoff Estimation at Catchment Level. In: *Proceedings of 7th International Symposium on Spatial Accuracy Assessment in Natural Resources and Environmental Sciences*, Lisbon, Portugal, 557-566.
- Caro Camargo, CA. 2015. Modelación hidrológica distribuida basada en esquemas de volúmenes finitos. Tesis Doctoral, Programa de Doctorado en Ingeniería Civil, Universitat Politècnica de Catalunya.
- Cazenave, G & AON Villanueva. 2007. Modelación superficial en una cuenca de llanura con el HEC-HMS. Caso de estudio: cuenca del Azul superior. XXI Congreso Nacional del Agua. 15 – 19 mayo de 2007. Tucumán, Argentina.
- Chagas, CI; OJ Santanoglia; MG Castiglioni; MJ Massobrio; A Buján & C Irurtia. 2008. Numero de curva de escurrimiento para una microcuenca de pampa ondulada bajo labranza convencional y siembra directa. *Cienc. Suelo*. 26:71-79.
- Chow, VTDR; D Maidment & LW Mays. 1994. *Hidrología Aplicada*, McGraw-Hill Interamericana, Santa Fe de Bogotá, Colombia.
- Darji, K; V Khokhani; I Prakash; M Khalid; B Thai Pham & ME Final. Rainfall-Runoff Modelling Using HEC-HMS Model: An Application of Regression Analysis. *J. Em. Tech. and Inn. Res.* 6(5):226-234.
- D'Asaro, F; G Grillone & R Hawkins. 2014. Curve Number: Empirical Evaluation and Comparison with Curve Number Handbook Tables in Sicily. *J. Hydrol. Eng.* 19(12):1-13
- Derdour, A; A Bouanani & K Babahamed. 2018. Modelling rainfall runoff relations using HEC-HMS in a semi-arid region: case study in Ain Sefra watershed, Ksour Mountains. *J. Water and Land Dev.* 36(I-III):45-55.
- Elsenbeer, H. 2001. Hydrologic flow paths in tropical forest soilscaapes-a review. *Hydrol. Proc.* 15, 1751-1759.
- Fennessey, LAJ & RH Hawkins. 2001. The NRCS Curve Number, a new look at an old tool. *Proceedings of the 2001 Pennsylvania Stormwater Management Symposium. Re-thinking Comprehensive Stormwater Management-Integrating Quality, Volume and Peak Controls.* October 17-18.
- Finger, D. 2011. *Calibration of Hydrological Models. Hydrological Processes and Modelling*, SS 2011. Swiss Federal Research Institute WSL. Switzerland.
- Flanagan, DC & MA Nearing. 1995. *USDA-Water Erosion Prediction Project: Hillslope Profile and Watershed Model Documentation*, NSERL Report No. 10, USDA-ARS National Soil Erosion Research Laboratory, West Lafayette, Indiana.
- Hawkins, RH. 1973. Improved prediction of storm runoff in mountain watersheds. *J. Irrig. and Drain Div.* 99(4): 519-523.

- Hawkins, RH. 1993. Asymptotic determination of runoff curve numbers from data. *J. Irrig. and Drain Eng. (ASCE)* 119(2): 334-345.
- Hawkins, RH. 1998. Local Sources for Runoff Curve Numbers, In *Proceedings of 11th Annual Symposium of the Arizona Hydrological Society*, 23-26.
- Hawkins, RH; TJ Ward & E Woodward. 2010. Continuing evolution of rainfall-runoff and the curve number precedent. 2nd Joint Federal Interagency Conference, Las Vegas, NV, June 27 - July 1.
- INTA (Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria) 1992. *Carta de Suelos de la República Argentina*. Hoja 3760-22, Chillar.
- Jayakrishnan, R; R Srinivasan; C Santhi & JG Arnold. 2005. Advances in the application of the SWAT model for water resources management. *Hydroll. Proc.* 19(3):749-762.
- Khakbaz, B; B Ima; K Hsu & S Sorooshian. 2009. From lumped to distributed via semi-distributed: Calibration strategies for semi-distributed hydrologic models. *J. Hydrol.* 418-419.
- Kafle, MR. 2019. Rainfall-runoff modelling of Koshi River basin using HEC-HMS. *J Hydrogeol. & Hydrol. Eng.* 8(1):1-9.
- Lal, M; SK Mishra & A Pandey. 2015. Physical verification of the effect of land features and antecedent moisture on runoff curve number. *Catena* 133:318-327.
- Molnar, P. 2011. Calibration. *Watershed Modelling*, SS 2011. Institute of Environmental Engineering, Chair of Hydrology and Water Resources Management, ETH Zürich. Switzerland.
- Nandalal, HK & UR Ratnayake. 2010. Event based modeling of a watershed using HEC-HMS. *Eng.* 43(2):28-37.
- Nash, JE & Sutcliffe, JV. 1970. River flow forecasting through conceptual models part I - A discussion of principles. *J. Hydrol.* 10 (3): 282-290.
- Olivares, A. 2004. Modelización hidrológica Pseudodistribuida del barranc del carraixet. Aplicación al episodio de Octubre del 2000, *Cuad. Geogr.* 76, 155-182.
- QGIS Org. 2017. User Guide/Manual (QGIS Testing).
- Randusová, B; R Marková; S Kohnová & K Hlavčová. 2015. Comparison of CN estimation approaches. *Int. J. Eng. Res. & Sci.*, 1(7):34-40.
- Samper, J; MA García Vera; B Pisani; D Alvares; A. Varela & JA Losada. 2005. Modelos hidrológicos y sistemas de información geográfica para la estimación de los recursos hídricos: aplicación de gis-balan a varias cuencas españolas. *Est. Zona No Sat. Suelo (VII)*: 269-274.
- Silveira, L; F Charbonnier & JL Genta. 2000. The antecedent soil moisture condition of the curve number procedure. *Hydrol. Sci. J.* 45(1):3-12.
- Springall, R. 1969. Drenaje en cuencas pequeñas. Publicación núm. 143. México, D. F.: Instituto de Ingeniería de la UNAM, 24 pp.
- Subramanya, K. 2008. *Engineering Hydrology*. 3rd Edition, Tata McGraw-Hill Publishing, New Delhi.
- Tan, WJ; JF Khor; L Ling & YF Huang. 2018. Exploratory Research of New Curve Number System. In *E3S Web of Conferences*, 65, 07005. EDP Sciences.
- Tassew, BT; MA Belete & K Miegel. 2019. Application of HEC-HMS model for flow simulation in the Lake Tana basin: The case of Gilgel Abay catchment, Upper Blue Nile basin, Ethiopia. *Hydrol.* 6(21)1-17.
- US Army Corps of Engineers. 2018. *HEC HMS User's Manual*. Hydrologic Modeling Center, Davis, CA
- USDA SCS. 1972. *National Engineering Handbook*, Section 4. U.S. Government. Printing Office, Washington DC.
- USDA SCS. 1985. *National Engineering Handbook*, Section 4. U.S. Government. Printing Office, Washington DC.
- Verma, AK & RK Mahana. 2010. Evaluation of HEC-HMS and WEPP for simulating watershed runoff using remote sensing and geographical information system. *Pad. and Wat. Environ.* 8(2):131-144.
- Woodward, DE; RH Hawkins; R Jiang; AT Hjelmfelt; JA Van Mullem & QD Quan. 2003. Runoff Curve Number Method: Examination of the Initial Abstraction Ratio, *World Water & Environmental Resources Congress*, 1-10.
- Xu, CY & VP Singh. 2004. Review on regional water resources assessment models under stationary and changing climate, *Water Res. Manag.* 18(6):591-612.