

## Modelo lluvia-escorrentamiento para la cuenca del río Yanuncay en Cuenca, Ecuador

Carlos Javier Fernández de Córdova Webster e-mail: [jfernand@uazuay.edu.ec](mailto:jfernand@uazuay.edu.ec)  
Universidad del Azuay, Empresa Pública Municipal de Telecomunicaciones, Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento de Cuenca, Av. 24 de Mayo 7-77, Cuenca, Ecuador

Pedro Pablo Arias Lastre e-mail: [parias1990@gmail.com](mailto:parias1990@gmail.com)  
Centro de Investigaciones Hidráulicas, Universidad Tecnológica de La Habana, calle 114, Marianao, La Habana, Cuba

Yakelín Rodríguez López e-mail: [yake@civil.cujae.edu.cu](mailto:yake@civil.cujae.edu.cu)  
Centro de Investigaciones Hidráulicas, Universidad Tecnológica de La Habana, calle 114, Marianao, La Habana, Cuba

Alcides Juan Felipe León Méndez e-mail: [aleonm@civil.cujae.edu.cu](mailto:aleonm@civil.cujae.edu.cu)  
Centro de Investigaciones Hidráulicas, Universidad Tecnológica de La Habana, calle 114, Marianao, La Habana, Cuba

### RESUMEN

En la cuenca del río Yanuncay que atraviesa la ciudad de Cuenca, se producen frecuentemente inundaciones debido a los grandes caudales que circulan por el río. El conocimiento anticipado de estos fenómenos, obliga al estudio detallado de la relación lluvia-escorrentamiento. En el presente trabajo, la determinación de dicha relación pasó por un proceso de calibración con nueve eventos (con gastos máximos contenidos en el rango de 17,1 a 101 m<sup>3</sup>/s que se presentaron en dos estaciones hidrométricas) y una etapa posterior de validación con cuatro eventos nuevos, empleando para esto el programa HEC-HMS. Los eventos seleccionados para estas etapas permitieron realizar el proceso, garantizando su representatividad para el intervalo de caudales con grandes períodos de retorno que se pudieran presentar en la cuenca.

**Palabras clave:** inundaciones, lluvia-escorrentamiento, número de curva, calibración, validación.

## Rain-runoff model for the Yanuncay river basin in Cuenca, Ecuador

### ABSTRACT

In the Yanuncay river that runs through the city of Cuenca, floods frequently occur due to the large discharge that flow through the river. The anticipated knowledge of these phenomena requires a detailed study of the rain-runoff relationship. In the present paper, the determination of this relationship was obtained through a calibration process with nine events (with maximum discharge contained in the range of 17, 1 to 101 m<sup>3</sup> / s that occurred in two hydrometric stations) and a subsequent validation stage, with four new events, using for this the HEC-HMS program. The selected events for these stages allowed the process to be carried out, guaranteeing its representativeness for the flow interval with large return periods that could occur in the basin.

**Keywords:** flood, rain-runoff, curve number, calibration, validation.

## INTRODUCCIÓN

Un aspecto importante en el estudio predictivo de las inundaciones, es conocer con anticipación los caudales máximos que se pudieran presentar por la ocurrencia de una lluvia con determinadas características. La modelación hidrológica de eventos extremos máximos recoge el estudio de las precipitaciones y escurrimientos, con sus consecuentes avenidas, teniendo en cuenta las características geográficas, morfométricas y fisiográficas de la cuenca y el sistema fluvial afectado (Rodríguez, 2011); para que posteriormente, apoyándose en la modelación hidráulica, se pueden establecer las posibles zonas susceptibles a inundación.

Para la elaboración de la etapa hidrológica de una futura propuesta de sistema de alerta temprana (SAT) para la cuenca del Yanuncay, es necesario partir del Modelo Conceptual (MC) de la cuenca, el cual tendrá como salida no solo la subdivisión en subcuencas de la cuenca en estudio, sino que además se establecerá sobre él, las zonas donde se realizará solamente la modelación lluvia-escurrimiento y aquellas en que además se realizará el tránsito hidráulico 1D y 2D de la avenida por el cauce. La división anterior se basará, fundamentalmente, en las características geográficas de la cuenca, base de datos histórica existente, equipos de medición adquiriendo información en el momento del estudio, zonas afectadas por las inundaciones y una estrategia específica trazada por los especialistas.

El trabajo que a continuación se presenta está centrado en el análisis del proceso lluvia-escurrimiento y su objetivo es obtener un modelo hidrológico calibrado y validado de la cuenca del río Yanuncay, que sea capaz de representar el comportamiento de los escurrimientos en la misma.

## ZONA DE ESTUDIO

### Características morfométricas y fisiográficas de la cuenca Yanuncay

La ciudad de Cuenca, está ubicada al sur del Ecuador en la provincia del Azuay, se encuentra atravesada por cuatro ríos importantes, Machángara, Tomebamba, Tarqui y Yanuncay (Fernández de Córdoba y Rodríguez 2016). La cuenca del río Yanuncay tiene una superficie de 416 km<sup>2</sup> hasta la confluencia con el río Tarqui; la misma forma parte de la cuenca del río Paute (6442 km<sup>2</sup>), que a su vez está dentro de la macro cuenca del río Santiago (24953.2 km<sup>2</sup>) (Timbe, 2011).

Hasta el cierre en la estación hidrométrica de Yanuncay AJ Tarqui (o Bomberos), la cuenca del río Yanuncay tiene las características fisiográficas que se presentan en la tabla 1 (Arcos 2015).

**Tabla 1. Características fisiográficas de la cuenca del río Yanuncay.**

Características geométricas		Forma de la cuenca	
Área (km <sup>2</sup> )	416	Índice de Gravelius	1,86
Perímetro (km)	135,5	Factor de forma	0,24
<b>Características de relieve</b>		<b>Sistema de drenaje</b>	
Pendiente media (%)	20,8	Densidad de drenaje	1,7
Elevación media (m)	3638,7	Extensión media de la escorrentía superficial (Km)	0,14
Pendiente media de la corriente principal (%)	2,355	Sinuosidad de las corrientes de agua	1,16
[Fuente: Elaboración propia]			

El uso del suelo en la cuenca es diverso, destacándose la presencia del páramo, como se evidencia en la tabla 2.

**Tabla 2: Uso del suelo de la cuenca del río Yanuncay.**

Tipo de suelo	Área (km <sup>2</sup> )	Porcentaje (%)
Bosque Alto Andino	27,85	6,71
Bosque de Pino	14,40	3,47
Bosque de Eucaliptus	2,37	0,57
Bosque de Quínoa	4,34	1,05
Suelo de Cultivo (70%) y Pasto (30%)	6,60	1,59
Degradación	4,95	1,19
Laguna	4,71	1,14
Páramo	311,47	75,10
Pasto	30,46	7,34
Área urbana	6,71	1,62
Vía	0,88	0,21
[Fuente: Elaboración propia]		

### Creación del modelo hidrológico conceptual (MHC) de la cuenca

El MC representa la cuenca física, define la división de la cuenca en pequeñas áreas y/o tramos de ríos para ser analizadas durante el proceso de transformación de la lluvia en escorrentamiento y luego para transitar las avenidas por el sistema fluvial

El MC de la cuenca para una modelación hidrológica o hidráulica es la representación simplificada de la zona de estudio, a través de los elementos componentes del modelo seleccionados para representar, lo más cercano posible, la realidad la cuenca. Este primer paso es uno de los más importantes, la correcta construcción del modelo redundará en mejores resultados del mismo en su etapa de simulación y con ello la toma de mejores decisiones por parte de los encargados. Corresponde al especialista la modificación y la total adecuación del MC, por tanto, conocer el terreno, las características de la cuenca y demás, sin dudas es de vital importancia.

Para la definición del MHC de una cuenca donde se presentan frecuentemente inundaciones es necesario analizar las dos etapas de la modelación: la hidrológica y la hidráulica. La etapa hidrológica determina el MHC inicial, que se obtiene procesando el modelo digital de elevaciones (MDE) con un Sistema de Información Geográfica (SIG) y sus herramientas afines. Posteriormente con la delimitación del tramo de cauce a modelar en la etapa hidráulica se le hacen modificaciones a este MHC inicial para obtener el MC definitivo de trabajo para la cuenca.

La determinación del MC definitivo para la cuenca del río Yanuncay estuvo marcada por dos criterios: la delimitación de la cuenca en el menor número de subcuencas posibles de forma tal que refleje, de la mejor manera posible, su morfología y las características de su red de drenaje y la segunda razón relacionada con la delimitación del tramo de río que posteriormente se simulará con el software de modelación hidráulica HEC-RAS, que responde al tramo de cauce responsable de las inundaciones que se generan cuando se presentan eventos extremos máximos de precipitación. La creación del MC de la cuenca del río Yanuncay se realizó con la ayuda de

las herramientas informáticas ArcGIS v10.5 y HEC-GeoHMS v10.5, esta última vincula el SIG con el programa de modelación hidrológica HEC-HMS.

Previamente a utilizar estas herramientas, fue necesario disponer de un MDE que sirvió de base para crear el MHC de la cuenca; en el caso del río Yanuncay se utilizó el MDE generado por (SIGTIERRAS 2011) con una resolución de pixel de 3 por 3 metros.

A partir del MDE de la cuenca y utilizando el ArcGIS y su extensión HEC-GeoHMS se generaron las diferentes subcuencas de drenaje, posteriormente, en función de la ubicación de las estaciones hidrometeorológicas se unieron las subcuencas de drenaje que formarían el MH de la cuenca (Figura 1). Utilizando la herramienta, HEC-GeoHMS, se elaboró el esquema del modelo y se obtuvieron sus principales características (áreas de las subcuencas, longitudes de ríos) para importar al HEC-HMS.



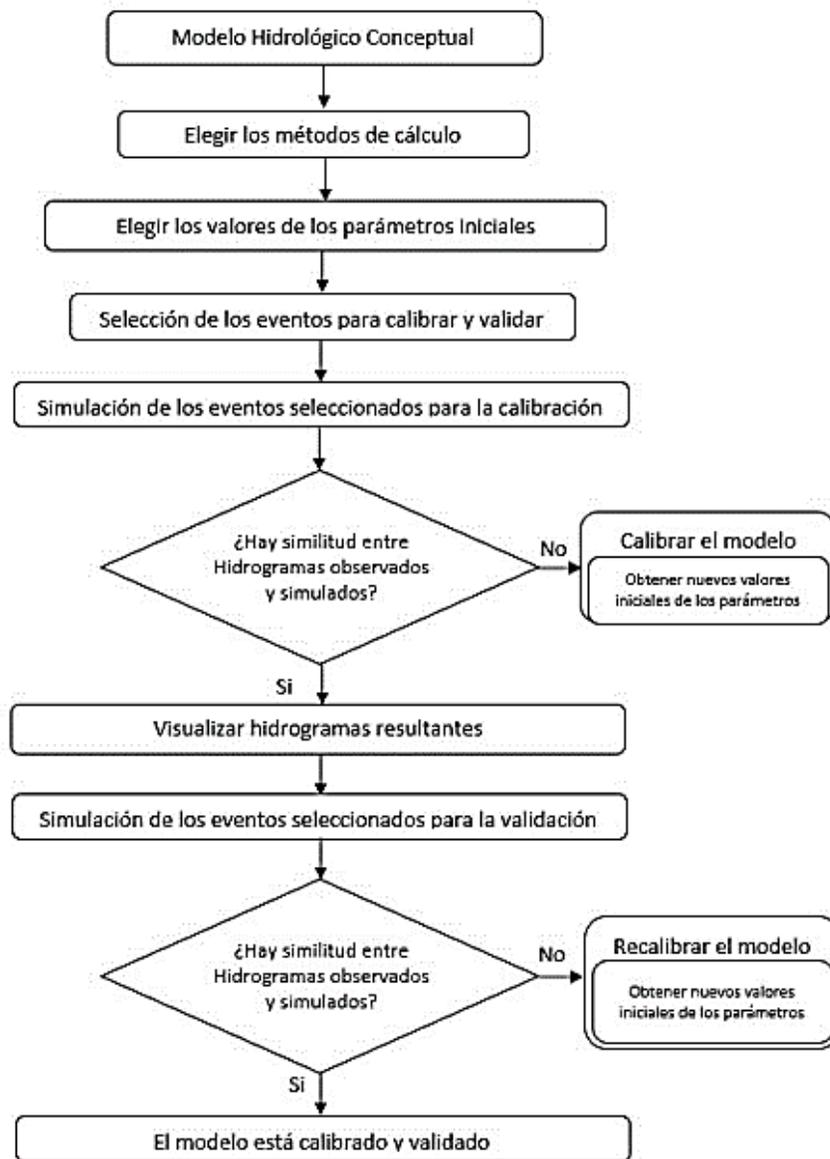
Figura 1. Modelo hidrológico conceptual de la cuenca del río Yanuncay.

### Procedimiento empleado para la modelación del proceso lluvia-escurrimiento

A partir de la determinación del modelo hidrológico conceptual con las herramientas ArcGIS y su extensión HEC-GeoHMS se procede a calibrar y validar el modelo hidrológico de la cuenca Yanuncay usando el procedimiento que se muestra en la figura 2, empleando el programa HEC-HMS.

### Métodos de cálculo y parámetros iniciales del modelo hidrológico

El HEC-HMS es un programa que permite obtener los hidrogramas de las avenidas, en uno o varios puntos del sistema fluvial, a partir de la información necesaria que requieren, en las subcuencas, los modelos: pérdidas por infiltración, transformación lluvia – escurrimiento, flujo base y tránsito de la avenida por el cauce, que representan las diferentes fases del proceso de transformación de la lluvia en escurrimiento.

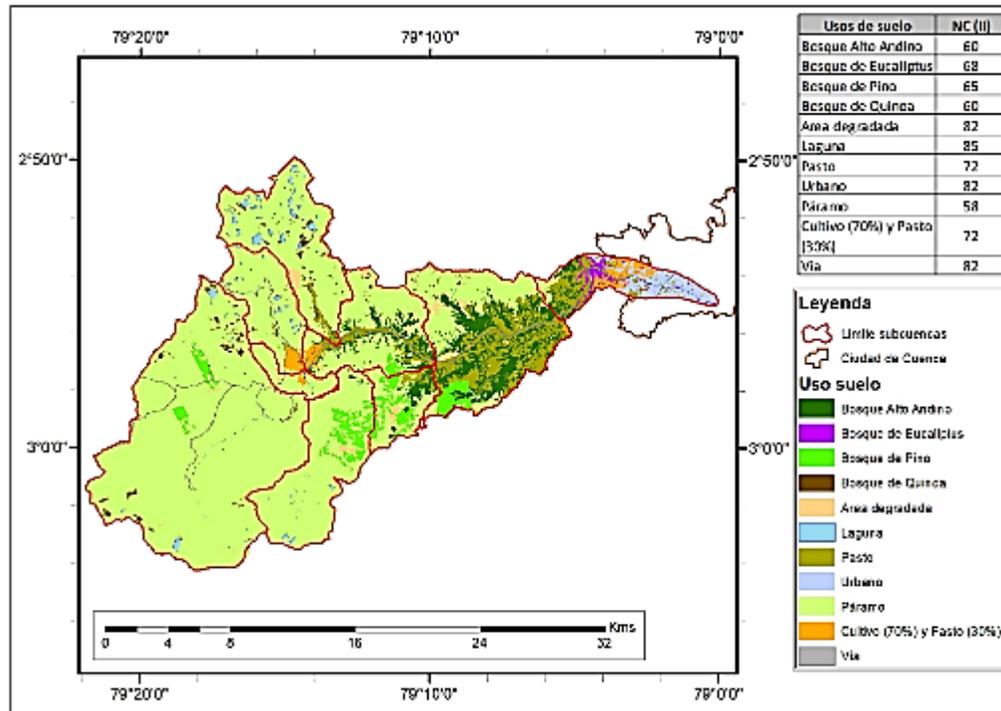


**Figura 2. Procedimiento para realizar la modelación hidrológica de la cuenca con HEC-HMS**

Los métodos que pueden ser empleados en la modelación hidrológica de cuencas a escala de eventos y de forma semidistribuida son los que se presentan en (Rodríguez 2011) y (Rodríguez y Marrero 2015). Haciendo un análisis de los mismos y considerando la cantidad de parámetros e información requerida por cada uno, se seleccionaron para este estudio los siguientes: Número de curva (pérdidas), Hidrograma Unitario del SCS (transformación de lluvia en escurrimiento), Constante Mensual (escorrentamiento base) y Muskingum-Cunge (tránsito de avenidas por el cauce). Los criterios para la determinación de los parámetros iniciales de cada uno se explican a continuación.

El Número de la curva (NC) es un factor de escorrentía que sirve para obtener la lluvia efectiva que finalmente se transformará en el caudal que llega a un río. La determinación del NC se basó en el mapa de uso de suelo de la cuenca del río Yanuncay y en los valores del número de

curva propuestos en el estudio de una cuenca vecina (Coello 2015). En la figura 3 se muestran los NC en condición de humedad media para los suelos que componen la cuenca Yanuncay.



**Figura 3. Uso de suelo y números de curva de la cuenca del río Yanuncay.**

Para cada subcuenca se calculó el área de cada tipo de cobertura y con los NC correspondientes se obtuvo un número de curva ponderado (NCII). Este NC permitió obtener la precipitación neta en condiciones medias de humedad antecedente, como el objetivo final de la modelación hidrológica realizada es proponer un sistema de alerta temprana ante inundaciones, con la ecuación (1) se calculó un NC en condiciones saturadas de humedad antecedente (NCIII), es decir, cuando se presentaría el máximo escurrimiento, haciendo uso de la ecuación 1.

$$NC(III) = \frac{23 * NC(II)}{10 + 0,13 * NC(II)} \quad (1)$$

Los resultados de los NC para cada subcuenca (mostrada en la figura 1) para las condiciones antes mencionadas se presentan en la tabla 3.

**Tabla 3. Números de curva para las diferentes subcuencas del río Yanuncay.**

Subcuenca	NC (II)	NC (III)
Yanuncay AJ Bermejós	58,40	76,35
Bermejós	59,16	76,91
Yanuncay AJ Izhcayrrumi	58,40	76,35
Izhcayrrumi	59,69	77,30
Soldados	60,20	77,67

Yanuncay AJ Pucán	61,01	78,26
Pucán	61,73	78,77
Yanuncay DJ Minas	63,78	80,20
Yanuncay AJ Tarqui	73,34	86,35
[Fuente: Elaboración propia]		

El tiempo de retardo (lag time) se puede asumir como el 60% del tiempo de concentración (Scharffenberg 2016). El tiempo de concentración se calculó mediante la fórmula de Kirpich, ecuación 2 (Aparicio 1992). Los resultados del tiempo de retardo y del tiempo de concentración para cada subcuenca se presentan en la tabla 4.

$$tc = 0,000325 * L^{0,77} * S^{0,385} \quad (2)$$

Donde:

*tc* es el tiempo de concentración en horas.

*L* es la longitud del cauce principal en metros.

*S* es la pendiente promedio del río o cauce principal en m/m.

**Tabla 4. Tiempo de concentración y Lag time para cada subcuenca.**

Subcuenca	L (m)	S (m/m)	tc (h)	lag time (min)
Soldados	13974	0,065	1,450	52,19
Yanuncay AJ Tarqui	14437	0,017	2,509	90,33
Izhcayrumi	9192	0,069	1,025	36,92
Yanuncay DJ Minas	10728	0,021	1,823	65,64
Yanuncay AJ Izhcayrumi	2406	0,026	0,535	19,25
Yanuncay AJ Pucán	8757	0,040	1,218	43,85
Pucán	7906	0,103	0,783	28,21
Yanuncay AJ Bermejós	16955	0,030	2,252	81,06
Bermejós	11822	0,037	1,575	56,70
[Fuente: Elaboración propia]				

El método de Muskingum Cunge requiere como información la longitud y pendiente del tramo de río y la *n* de Manning. Los valores asignados a estos parámetros se muestran en la tabla 5, los cuales fueron determinados con ayuda del SIG y el conocimiento de las características de los mismos (estos elementos hidrológicos se pueden ver en la figura 1).

**Tabla 5. Valores asignados a los parámetros de los tramos de ríos.**

Tramo de río	L(m)	S (m/m)	n de Manning
Reach-110	2406	0,0256	0,038
Reach-80	3643,5	0,0289	0,038
Reach-50	7756,8	0,034	0,038
Reach-100	1000	0,034	0,038
Reach-30	10728	0,032	0,038
Reach-10	14437	0,0271	0,038
[Fuente: Elaboración propia]			

### Distribución de equipos de monitoreo hidrometeorológico en la cuenca del río Yanuncay

En la cuenca del río Yanuncay existen cuatro estaciones meteorológicas, un pluviómetro, una estación mixta que registra lluvia, niveles y caudales, y una estación hidrológica que mide niveles y caudales (Figura 4). Existe información histórica registrada por estas estaciones desde 2014 que sirvieron para calibrar y validar el modelo hidrológico implementado en el HEC-HMS.

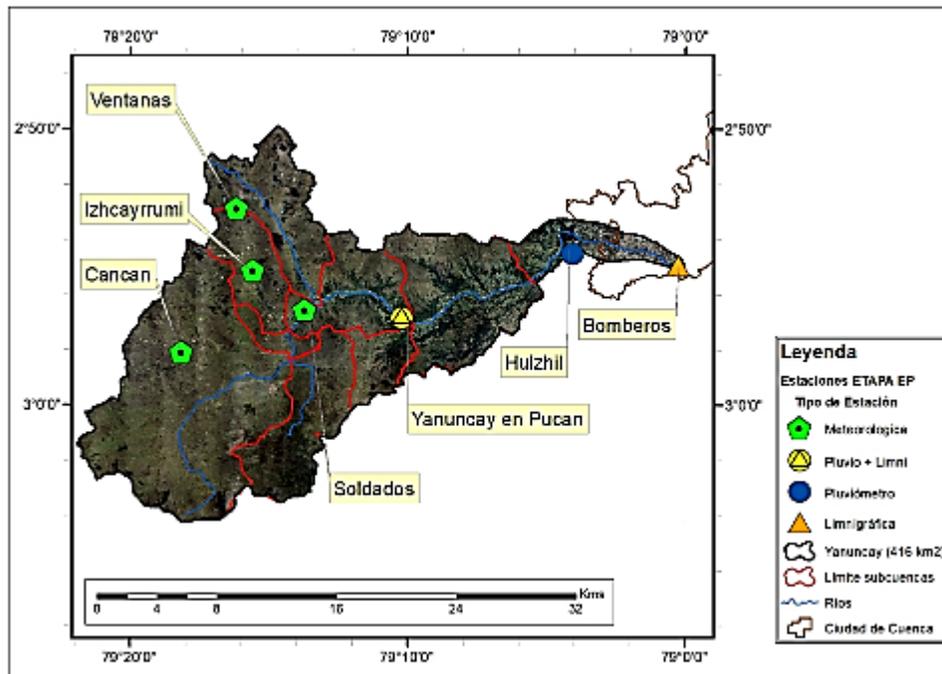


Figura 4. Ubicación de estaciones hidrometeorológicas en la cuenca del río Yanuncay.

### Selección de los eventos a modelar

Para la selección de los eventos a simular con el modelo HEC-HMS, se requiere analizar simultáneamente la información de precipitación-escorrentía registrada en la zona de estudio. A partir de la información recopilada se dispuso de registros de precipitación y escorrentía para el período comprendido entre mediados de 2014 y 2016. Se seleccionaron aquellos eventos extremos que produjeron un gasto pico igual o superior a los 20 m<sup>3</sup>/s en la estación hidrométrica ubicada en el cierre de la cuenca. Este es un caudal bastante superior al valor medio del río Yanuncay y a partir de este gasto, si se produjeran lluvias en la zona, podrían generarse problemas de desbordamientos.

La tabla 6, recoge la selección de los eventos extremos registrados bajo las condiciones anteriores. Se seleccionaron un total de 13 eventos de lluvia-escorrentía, de ellos 7 empleados para calibrar el modelo hasta la estación hidrométrica Pucán y 9 para la estación hidrométrica Bomberos, abarcando el período comprendido entre 2014-2016. Posteriormente para validar el modelo hidrológico, una vez calibrados los parámetros del mismo, se seleccionaron los restantes eventos extremos (3 para Pucán y 4 para Bomberos) que abarcaron principalmente el período comprendido entre 2015-2016.

**Tabla 6: Eventos hidrometeorológicos seleccionados para calibrar y validar el modelo hidrológico en HEC-HMS.**

Nº	Eventos para calibrar	Q <sub>máx</sub> Pucán (m <sup>3</sup> /s)	Q <sub>máx</sub> Bomberos (m <sup>3</sup> /s)	Eventos para validar	Q <sub>máx</sub> Pucán (m <sup>3</sup> /s)	Q <sub>máx</sub> Bomberos (m <sup>3</sup> /s)
1	(04-10) jul 2014	26,7	33,1	(11-16) jun 2015	No hay observación	56,10
2	(12-18) sep 2014	22,3	28,6	(08-14) feb 2016	27,4	32,5
3	(06-14) oct 2014	66,9	87,4	(15-21) mar 2016	36,0	45,4
4	(18-23) dic 2014	17,1	27,5	(09-15) jun 2016	94,8	118,2
5	(15-21) mar 2015	56,2	61,3			
6	(16-22) abr 2015	36,3	26,6			
7	(01-05) may 2015	No hay observación	40,64			
8	(05-11) jun 2015	No hay observación	63,32			
9	(25-01) may 2016	35,9	40,7			

[Fuente: Elaboración propia]

## MODELACIÓN CON HEC-HMS

### Modelación hidrológica: calibración y validación.

Para la calibración de los parámetros del modelo se define el algoritmo de ajuste a emplear (Univariate Gradient y Nelder Mead) y la función objetivo que cumpla con los objetivos del estudio que se realiza (existen 14 disponibles en el HEC-HMS).

La validación de los resultados del modelo, después de calibrados los parámetros, se hace directamente con la simulación del programa, al cual se le introduce un registro de precipitación de verificación y se compara el hidrógrafo de salida calculado con el registrado para el mismo período de tiempo. El software no presenta inconveniente alguno para su aplicación, siempre que se cuente con hidrogramas observados en el período elegido para la citada validación del modelo.

Para la calibración del modelo se definió el algoritmo de ajuste: Univariate Gradient, y la función objetivo: Percent Error Peak. La selección de esta función objetivo se debe a que (Rodríguez, 2011) realizó la comparación de seis funciones objetivos, determinando que la función objetivo que mejor representa el comportamiento del caudal máximo y el tiempo al pico, es Percent Error Peak para el caudal máximo, obteniéndose errores menores al 16% en el peor de los casos.

Esta función objetivo centra el interés exclusivamente en el valor del caudal máximo del hidrograma, calculando el error cometido en la simulación en forma de porcentaje respecto al valor realmente observado. En el caso de que el problema planteado esté relacionado con la planificación y gestión de usos del suelo en una llanura de inundación, en la que sólo interese conocer los máximos niveles alcanzados por la lámina de agua, puede resultar suficiente la utilización de esta función objetivo. Desde un punto de vista conservador, se puede ser más tolerante con los errores cometidos por exceso.

En este trabajo, donde el objetivo final de la simulación hidrológica es obtener los caudales máximos provocados por lluvias intensas en el río Yanuncay para, posteriormente, alertar sobre

una posible inundación, el criterio adoptado para la calibración del modelo sigue dos ideas fundamentales: la primera, que el caudal simulado sea igual o superior al observado, nunca inferior y la segunda que el gasto pico se presente antes del caudal observado.

Se calibran las subcuencas: AJ Izhcayrrumi, AJ Bermejós, AJ Pucán, Bermejós, Izhcayrrumi y Soldados respecto a la estación hidrométrica Pucán y las subcuencas AJ Tarqui, DJ Minas y Pucán respecto a la estación hidrométrica Bomberos. En la tabla 7 se relacionan los caudales máximos obtenidos del proceso de calibración por eventos, además recoge la relación cuantitativa entre los gastos máximos simulados y los observados, más el momento en que ocurre el pico en la estación hidrométrica Pucán.

**Tabla 7. Relación entre el gasto máximo simulado y observado, resultado de la calibración en la estación Pucán.**

Eventos	Variable	Simulado	Observado	Diferencia	Diferencia Porcentual
(04-10) jul 2014	Gasto Pico(m <sup>3</sup> /s)	26,50	26,70	-0,20	-0,75%
	Tiempo Pico	07jul2014, 13:00	07jul2014, 16:00	-3h	
(12-18) sep 2014	Gasto Pico(m <sup>3</sup> /s)	22,40	22,30	0,00	0,00%
	Tiempo Pico	15sep2014, 13:00	15sep2014, 15:00	-2h	
(06-14) oct 2014	Gasto Pico(m <sup>3</sup> /s)	66,9	66,9	0	0,00%
	Tiempo Pico	11oct2014, 22:00	11oct2014, 23:00	-1h	
(18-23) dic 2014	Gasto Pico(m <sup>3</sup> /s)	17,10	17,10	0,00	0,00%
	Tiempo Pico	21dic2014, 19:00	21dic2014, 20:00	-1h	
(15-21) mar 2015	Gasto Pico(m <sup>3</sup> /s)	56,20	56,20	0,00	0,00%
	Tiempo Pico	18mar2015, 15:00	18mar2015, 16:00	-1h	
(16-22) abr 2015	Gasto Pico(m <sup>3</sup> /s)	65	65	0	0,00%
	Tiempo Pico	21abr2015, 17:00	21abr2015, 16:00	1h	
(25-01) may 2016	Gasto Pico(m <sup>3</sup> /s)	35,9	35,9	0	0,00%
	Tiempo Pico	28abr2016, 15:00	28abr2016, 12:00	3h	
[Fuente: Elaboración propia]					

Realizando un análisis de los resultados de la tabla 7 se puede afirmar que en la totalidad de los eventos simulados el modelo logra reproducir los gastos máximos con diferencias inferiores al 10% con relación al gasto máximo observado. Esto sin dudas demuestra la correcta estimación de los parámetros iniciales del modelo, y que la variación de los parámetros, acorde a sus algoritmos de ajuste, logra equilibrar el modelo en correspondencia a los registros reales medidos en la estación.

La tabla 8 relaciona los gastos al pico y el tiempo para el cual se alcanzan, obtenidos en la calibración en la zona baja de la cuenca correspondiente a la estación ubicada en Bomberos. En este caso fue posible considerar un mayor número de eventos en relación con la estación Pucán, toda vez que se dispuso de dichas mediciones.

**Tabla 8. Relación entre gasto máximo simulado y observado, resultado de la calibración en la estación Bomberos.**

Eventos	Variable	Simulado	Observado	Diferencia	Diferencia %
(04-10) jul 2014	Gasto Pico(m <sup>3</sup> /s)	33,1	33,1	0	0,00%
	Tiempo Pico	07jul2014, 08:00	07jul2014, 19:00	-11h	
(12-18) sep 2014	Gasto Pico(m <sup>3</sup> /s)	28,6	28,6	0	0,00%
	Tiempo Pico	15sep2014, 14:00	15sep2014, 17:00	-3h	
(06-14) oct 2014	Gasto Pico(m <sup>3</sup> /s)	87	87,4	-0,4	-0,46%
	Tiempo Pico	11oct2014, 23:00	12oct2014, 00:00	-1h	
(18-23) dic 2014	Gasto Pico(m <sup>3</sup> /s)	29,1	27,5	1,5	5,6
	Tiempo Pico	21dic2014, 20:00	21dic2014, 23:00	-3h	
(15-21) mar 2015	Gasto Pico(m <sup>3</sup> /s)	61,3	61,3	0	0,00%
	Tiempo Pico	18mar2015, 17:00	18mar2015, 18:00	-1h	
(16-22) abr 2015	Gasto Pico(m <sup>3</sup> /s)	95,1	101	-5,9	-5,84%
	Tiempo Pico	21abr2015, 18:00	21abr2015, 18:00	0h	
(01-05) may 2015	Gasto Pico(m <sup>3</sup> /s)	40,6	40,6	0	0,00%
	Tiempo Pico	03may2015, 19:00	04may2015, 01:00	-5h	
(05-11) jun 2015	Gasto Pico(m <sup>3</sup> /s)	65,3	63,3	2	3,16%
	Tiempo Pico	08jun2015, 15:00	08jun2015, 18:00	-3h	
(25-01) may 2016	Gasto Pico(m <sup>3</sup> /s)	40,7	40,7	0	0,00%
	Tiempo Pico	28abr2016, 11:00	28abr2016, 12:00	-1h	
[Fuente: Elaboración propia]					

Analizando los resultados de las tablas 7 y 8 se puede afirmar que en ambas estaciones el comportamiento del modelo tiende a encontrar el gasto máximo para el modelo calibrado un tiempo prudencial antes del ocurrido realmente, lo cual, en términos de seguridad en la implementación de un Sistema de Alerta Temprana (SAT), es un factor positivo a considerar.

Las tablas 9 y 10, relacionan los valores obtenidos en la calibración de los parámetros del modelo obtenidos para ambos puntos (Pucán y Bomberos), los parámetros calibrados fueron el NC y el Lag time. Se obtuvo un valor calibrado por eventos, resultando el valor final (últimas filas de las tablas 9 y 10) a utilizar en la validación el promedio de los parámetros por cada evento calibrado, eliminando del análisis los valores que se alejaban del intervalo conformado por la ecuación 3.

$$(\bar{x} - S) \leq \text{Valor del parámetro obtenido en la calibración} \leq (\bar{x} + S) \quad (3)$$

Donde:

$\bar{x}$  : Promedio de los valores obtenidos en la calibración para el parámetro analizado

S: desviación media de los valores obtenidos en la calibración para el parámetro analizado

**Tabla 9. Valores del parámetro Número de la Curva calibrado por eventos, en ambas estaciones y valor final propuesto para el modelo calibrado.**

Eventos	Estación: Yanuncay en Pucán/Subcuencas						Estación: Bomberos/Subcuencas		
	Ber	AJ Ber	AJ Izhc,	AJ Pucán	Izhc	Sold	DJ Minas	AJ Tarqui	Pucán
<b>Valores iniciales NC</b>	<b>76,91</b>	<b>76,35</b>	<b>76,35</b>	<b>78,26</b>	<b>77,3</b>	<b>77,67</b>	<b>78,77</b>	<b>80,2</b>	<b>86,35</b>
(04-10) jul 2014	77	76	76	99	78	99,00	89,78	98,53	55,44
(12-18) sep 2014	76,91	76,35	76,35	85,7	83,81	77,67	80,59	85,99	79,40
(06-14) oct 2014	98	51	75	75	76	76	52	56	77,00
(18-23) dic 2014	76,91	76,35	76,35	73,66	77,3	77,67	80,00	83,00	53,00
(15-21) mar 2015	99	66,05	76,35	88,97	77,66	78,05	80,20	86,35	52,56
(16-22) abr 2015	99	55	51	78	84	78	80,24	99	99,00
(01-05) may 2015	73,85	74,82	71,913	78	77	77,67	80,2	99	80,00
(5-11) jun 2015	51	84	99	99	99	99	55	99	77,00
(25-01) may 2016	75,37	83,14	74,82	76,02	77,3	77,92	85,84	97,60	98,94
<b>Promedio</b>	<b>76,01</b>	<b>76,67</b>	<b>75,25</b>	<b>79,33</b>	<b>78,88</b>	<b>77,57</b>	<b>82,41</b>	<b>93,56</b>	<b>78,35</b>

Nota: Ber: Bermejós, AJ Ber. AJ Bermejós, AJ Izhc: AJ Izhcayrrumi, AJ Puc.: AJ Pucán, Izhc.: Izhcayrrumi, Sol: Soldados y Puc. Pucán  
[Fuente: Elaboración propia]

**Tabla 10: Valores del parámetro Lag Time, calibrado por eventos, en ambas estaciones y valor final propuesto para el modelo calibrado.**

Eventos	Estación: Yanuncay en Pucán/Subcuencas						Estación: Bomberos/Subcuencas		
	Ber.	AJ Ber.	AJ Izhc.	AJ Pucán	Izhc.	Sold.	DJ Minas	AJ Tarqui	Pucán
<b>Parámetros iniciales</b>	<b>56,62</b>	<b>80,94</b>	<b>19,22</b>	<b>43,78</b>	<b>36,68</b>	<b>52,16</b>	<b>65,54</b>	<b>90,20</b>	<b>28,17</b>
(04-10) jul 2014	57,00	81,00	19,00	44,00	37,00	178,00	65,54	89,24	28,00
(12-18) sep 2014	56,62	80,94	19,22	28,61	36,13	52,12	62,78	90,25	28,17
(06-14) oct 2014	25,00	81,00	19,00	51,00	55,00	47,00	58,00	106,00	28,00
(18-23) dic 2014	56,62	80,94	19,22	59,18	36,86	52,12	66,00	91,00	28,00
(15-21) mar 2015	114,66	80,94	19,00	38,80	24,58	48,75	96,75	80,85	28,17
(16-22) abr 2015	58,00	81,00	19,00	40,00	25,00	35,00	41,96	57,75	28,17
(01-05) may 2015	85,35	173,00	19,22	43,78	36,86	52,12	65,54	40,09	28,17
(5-11) jun 2015	57,00	342,00	19,00	50,00	36,00	52,00	44,00	63,00	28,00
(25-01) may 2016	55,93	80,71	19,22	44,21	36,13	52,12	65,87	90,20	28,17
<b>Promedio</b>	<b>60,93</b>	<b>92,44</b>	<b>19,10</b>	<b>44,54</b>	<b>36,50</b>	<b>48,90</b>	<b>63,95</b>	<b>84,09</b>	<b>28,09</b>

[Fuente: Elaboración propia]

Haciendo un análisis de los resultados presentados en las tablas 9 y 10 se puede decir que en todos los casos se aprecia una ligera variación entre los parámetros iniciales y el calibrado, sin ser esta desproporcionada, en total correspondencia con el riguroso análisis para su estimación

inicial. Los valores arrojados por la calibración (últimas filas de las tablas 9 y 10) pasan a ser los valores iniciales del modelo, para realizar la validación del modelo para otros períodos de tiempo.

Con los resultados de los parámetros calibrados para cada subcuenca (tablas 9 y 10) se procedió a evaluar los eventos seleccionados para la validación del modelo (tabla 6). Los resultados de las diferencias entre el gasto y tiempo pico obtenidos para cada evento en cada estación hidrométrica se muestran en las tablas 11 y 12.

**Tabla 11. Relación entre el gasto máximo simulado y observado, resultado de la validación en la estación Pucán.**

Eventos	Variable	Simulado	Observado	Diferencia %
(11-16) jun 2015	Gasto Pico(m <sup>3</sup> /s)	62,4	No hay registros en la estación	
	Tiempo Pico	14jun2015, 18:00		
(08-14) feb 2016	Gasto Pico(m <sup>3</sup> /s)	32,6	27,4	15%
	Tiempo Pico	11feb2016, 10:00	11feb2016, 11:00	-1h
(15-21) mar 2016	Gasto Pico(m <sup>3</sup> /s)	40,5	36	11%
	Tiempo Pico	18jun2016, 17:00	18jun2016, 19:00	-2h
(09-15) jun 2016	Gasto Pico(m <sup>3</sup> /s)	116,6	94,8	18%
	Tiempo Pico	12jun2016, 19:00	12jun2016, 21:00	-2h

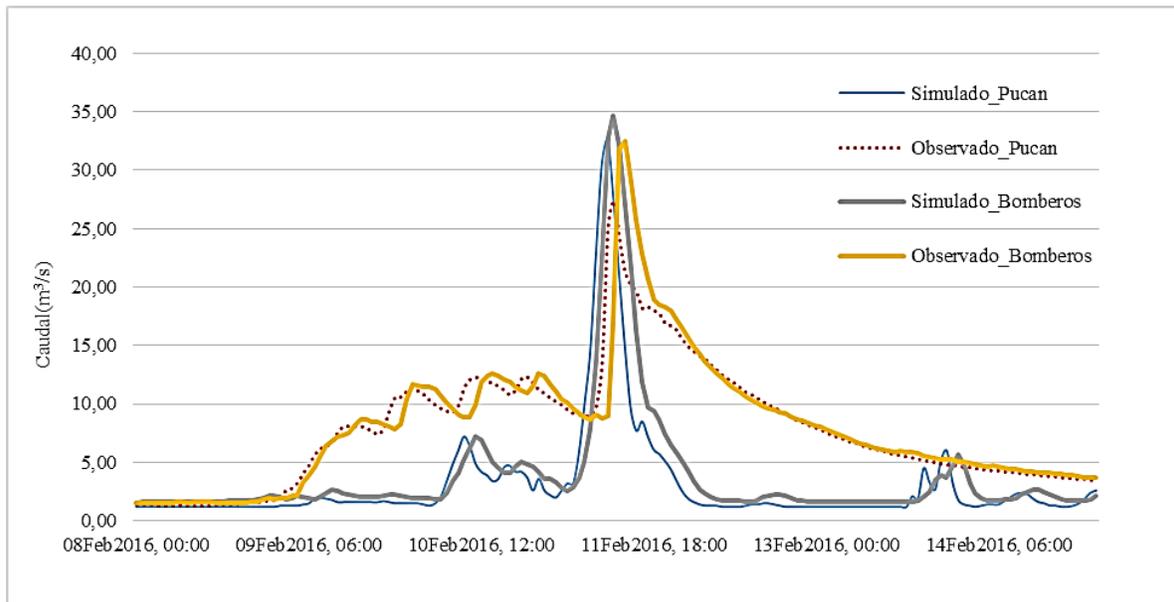
[Fuente: Elaboración propia]

**Tabla 12. Relación entre el gasto máximo simulado y observado, resultado de la validación en la estación Bomberos.**

Eventos	Variable	Simulado	Observado	Diferencia	Diferencia %
(11-16) jun 2015	Gasto Pico(m <sup>3</sup> /s)	60,7	56,1	4,6	7%
	Tiempo Pico	14jun2015, 19:00	14jun2015, 20:00	-1h	
(08-14) feb 2016	Gasto Pico(m <sup>3</sup> /s)	34,7	32,5	2,2	6%
	Tiempo Pico	11feb2016, 11:00	11feb2016, 13:00	-2h	
(15-21) mar 2016	Gasto Pico(m <sup>3</sup> /s)	47,9	45,4	2,5	5%
	Tiempo Pico	18jun2016, 17:00	18jun2016, 19:00	-2h	
(09-15) jun 2016	Gasto Pico(m <sup>3</sup> /s)	121,1	118,2	2,9	2%
	Tiempo Pico	12jun2016, 19:00	12jun2016, 20:00	-1h	

[Fuente: Elaboración propia]

De forma general, con la inspección de los gráficos resultantes del proceso de validación (figura 5) y los resultados presentados en las tablas 11 y 12, se puede concluir que los parámetros calibrados para representar los procesos hidrológicos que tienen lugar en la cuenca hidrográfica Yanuncay son admisibles, la diferencia entre los gastos máximos en la estación Pucán como promedio es menor al 15 % y en la estación Bomberos es de un 5% y el gasto pico siempre se presenta antes. Estos resultados están en total correspondencia con los criterios establecidos en la investigación para la implementación del SAT en la cuenca.



**Figura 5. Comparación entre los hidrogramas simulados y observados en las estaciones Pucan y Bomberos para el evento del 8-14 de febrero de 2016.**

Es válido resaltar que un ajuste perfecto entre dos patrones de comportamiento en modelación es bastante difícil de lograr, sobre todo cuando se pretende representar mediante modelación matemática los complejos fenómenos que tienen lugar en las cuencas hidrográficas.

## CONCLUSIONES

1. Un estudio detallado de las características geográficas de cada una de las subcuencas en las que se dividió el modelo hidrológico conceptual de la cuenca, permitió estimar acertadamente los valores iniciales del parámetro número de curva (NC) y el tiempo de retardo (lag time).

2. Se obtuvo como resultado de la calibración de los parámetros de la cuenca que en sólo uno de los siete eventos modelados en la estación Pucán, el gasto máximo obtenido es menor al observado con una diferencia de 0,75 % y el tiempo pico solo en dos eventos se alcanza después del observado. Para la estación Bomberos en dos de los nueve eventos se obtienen gastos inferiores, que en el peor de los casos la diferencia es menor al 6%. Cabe destacar que este es el mayor caudal modelado (101 m<sup>3</sup>/s) para este punto del sistema fluvial. El tiempo pico en el hidrograma simulado en esta estación se presenta igual o antes del hidrograma observado, por lo que se consideran satisfactorios los resultados obtenidos para ambas estaciones.

3. En el proceso de validación se obtuvieron gastos picos superiores a los simulados, con una diferencia promedio menor al 15 % en la estación Pucán y un 5% en la estación Bomberos y se presentan en un tiempo anterior, lo cual está en total correspondencia con los criterios de calibración-validación adoptados.

4. Con el resultado aquí obtenido es posible pronosticar para eventos futuros, el gasto máximo que se presentará en los dos puntos del río Yanuncay (estaciones hidrométricas Pucán y Bomberos), información necesaria, y que sirve como punto de partida, para alimentar el modelo hidráulico, y así poder realizar la alerta temprana ante la ocurrencia de una inundación en la ciudad de Cuenca, Ecuador, afectada por el desbordamiento del río estudiado.

## REFERENCIAS

- Aparicio F. J.** (1992). Fundamentos de Hidrología de Superficie. Editorial Limusa, S.A de C.V. ISBN: 968-18-3014-8. México
- Coello C. I.** (2015). Análisis de la vulnerabilidad a eventos de crecida y diseño de obras físicas para la protección de márgenes e infraestructura del río Tarqui. *ETAPA EP-SENAGUA*. Ecuador.
- Arcos E. X.** (2015). Caracterización fisiográfica de las áreas de aporte a varias estaciones hidrológicas en la cuenca del río Yanuncay. (Trabajo de grado previo a la obtención del título de: Ingeniero Civil con énfasis en Gerencia de Construcciones), Universidad del Azuay, Cuenca, Ecuador.
- Fernández de Córdova C. J. y Rodríguez Y.** (2016). Primeros resultados de la red actual de monitoreo hidrometeorológico de Cuenca, Ecuador. *Ingeniería Hidráulica y Ambiental*, XXXVII (No. 2), 44-56. ISSN 2788-6050. Cuba
- Rodríguez Y.** (2011). Modelación hidrológica de avenidas. Caso de estudio: Cuenca del río Zaza. (Tesis en opción al grado científico de Doctor en Ciencias Técnicas), Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría, La Habana.
- Rodríguez Y. y Marrero N.** (2015). Simulación hidrológica en dos subcuencas de la cuenca del río Zaza de Cuba. *Ingeniería Hidráulica y Ambiental*, XXXVI (No. 2), 109-123. ISSN 2788-6050. Cuba
- Scharffenberg W.** (2016). Hydrologic Modeling System HEC-HMS User's Manual. Retrieved from USA
- SIGTIERRAS.** (2011). Sistema Nacional de Información y Gestión de Tierras Rurales e Infraestructura Tecnológica. Ecuador: <http://www.sigtierras.gob.ec>.
- Timbe L.** (2011). Análisis de la vulnerabilidad a eventos de crecida y diseño de obras físicas para la protección de márgenes e infraestructura del río Yanuncay. Cuenca, Ecuador.

## Conflicto de intereses

Los autores declaran que no existen conflictos de intereses.

## Contribución de los autores

*Carlos Javier Fernández de Córdova Webster* <https://orcid.org/0000-0003-3288-6822>  
Realizó contribuciones en el diseño de la investigación, en la modelación hidrológica, redacción inicial parcial del documento y análisis de los resultados.

*Pedro Pablo Arias Laestre* <https://orcid.org/0000-0002-5666-7192>  
Realizó contribuciones en la modelación hidrológica y análisis de los resultados.

*Yakelín Rodríguez López* <https://orcid.org/0000-0001-8802-6843>  
Realizó contribuciones en el diseño de la investigación, en la modelación hidrológica, redacción final del documento y análisis de los resultados.

*Alcides Juan Felipe León Méndez* <https://orcid.org/0000-0002-5072-6438>  
Realizó contribuciones en el diseño de la investigación, redacción final del documento y análisis de los resultados.