Horizonte Académico
Revista Multidisciplinaria
Recibido:09/08/2025 Aprobado:10/09/2025

DOI: https://doi.org/10.70208/3007.8245.v5.n3.227

Calibración de un Modelo en HEC-HMS para la simulación de las avenidas en el río Virú en Trujillo, La Libertad

Gonzalo Ramcés Fano Miranda
gfano16@gmail.com
https://orcid.org/0000-0002-4401-8654
Universidad Nacional Agraria La Molina
Perú

Gonzalo Rodrigo Fano Loayza
rodrigo.fano@pucp.pe
https://orcid.org/0000-0002-3847-0554
Universidad Nacional Agraria La Molina
Perú

RESUMEN

El río Virú es un cuerpo de agua cuyo recorrido pasa a través de centros poblados, así como campos de cultivos. Este río tiene como característica que aguas arriba ocurren, en ciertos periodos, incremento de lluvias, que es cuando, si el tirante del cauce es mayor a la topografía del canal, ocurrirá una inundación. Es debido a esto que es necesario realizar un modelo hidrológico con el que se pueda calcular los caudales que se pueden llegar a producir, y de la misma manera calcular los caudales para los periodos de retorno que según indicación de los manuales se deben de tener en cuenta para la simulación de ciertas variables que se pueden presentar en un río. Para conseguir esto, se ha utilizado el programa HEC-HMS para poder realizar la simulación de la cuenca, tomando en cuenta la información de estaciones pluviométricas aledañas a la cuenca delimitada. Luego de su procesamiento, análisis de frecuencia y obtención de las precipitaciones máximas para los periodos de retorno de 50, 100 y 500 años, en el modelo del HEC-HMS, se seleccionaron los siguientes métodos: el método de hidrograma unitario de Clark, para la escorrentía directa; el método del Número de Curva, para las pérdidas o abstracciones y el método de Muskingum, para el movimiento del flujo en los tramos. Para el modelo del periodo de retorno de 50 años, se ha ejecutado un proceso de calibración, en donde se optimizaron, para las subcuencas, los Número de Curva de cada una y el coeficiente de almacenamiento y, para los tramos entre confluencias, la variable K de Muskingum. Para evaluar la mejor calibración, se ha considerado por separado las condiciones seca, normal y húmeda del Número de Curva. De este proceso, se obtuvo que el Número de Curva tiene un impacto importante en proceso de optimización, lo cual se ve reflejado en el índice de eficiencia Nash-Sutcliffe obtenido

***Palabras clave**:* río virú, modelación hidrológica, hec-hms, caudales de retorno, número de curva (cn)

Calibration of an HEC-HMS Model for Flood Simulation in the Virú River, Trujillo, La Libertad

ABSTRACT

The Virú River is a body of water whose route passes through populated centers, as well as crop fields. This river has the characteristic that upstream there are, in certain periods, increased rainfall, which is when, if the depth of the channel is greater than the topography of the channel, a flood will occur. It is due to this that it is necessary to carry out a hydrological model with which the flows that can be produced can be calculated, and in the same way calculate the flows for the return periods that, according to the indications of the manuals, must be taken into account. account for the simulation of certain variables that can occur in a river. To achieve this, the HEC-HMS program has been used to simulate the basin, taking into account the information from pluviometric stations surrounding the delimited basin. After processing, frequency analysis and obtaining the maximum rainfall for the return periods of 50, 100 and 500 years, in the HEC-HMS model, the following methods were selected: the Clark unit hydrograph method, to direct runoff; the Curve Number method, for the losses or abstractions and the Muskingum method, for the movement of the flow in the sections. For the model of the return period of 50 years, a calibration process has been carried out, where the Curve Number of each one and the storage coefficient were optimized for the sub-basins and, for the sections between confluences, the variable K for Muskingum. To evaluate the best calibration, the dry, normal and humid conditions of the Curve Number have been considered separately. From this process, it was obtained that the Curve Number has an important impact on the optimization process, which is reflected in the Nash-Sutcliffe efficiency index obtained.

Keywords: virú river, hydrological modeling, hec-hms, return flows, curve number (cn)

INTRODUCCIÓN

En el Perú, durante el intervalo de los meses de noviembre a marzo, ocurre un aumento de las precipitaciones en las partes altas y bajas de las montañas, lo cual ocasiona un aumento en el agua que transportan los afluentes que posteriormente alimentan a los ríos, ocasionando un incremento en su caudal. Este incremento es beneficioso para los campos de cultivo, ya que además de proveer agua, permite almacenar el recurso hídrico para las épocas de estiaje.

No obstante, con el incremento del caudal en los tramos de los ríos, también ocurren aumentos de la cota del agua, lo cual puede ocasionar inundaciones y perjudicando a los usuarios de las áreas aledañas a las riberas de los ríos, ya sea echando a perder los campos de cultivos o dañando las viviendas o estructuras que no han sido diseñadas para ese tipo de interacción.

Acerca del aumento de los caudales, los eventos que causan interés de estudio son los que producen máximas avenidas, las cuales ocurren cada cierto periodo de tiempo. Es debido a esto que es necesario realizar simulaciones que correspondan a estos periodos de tiempo y así poder obtener los caudales de estos periodos de retorno y luego hallar sus tirantes correspondientes.

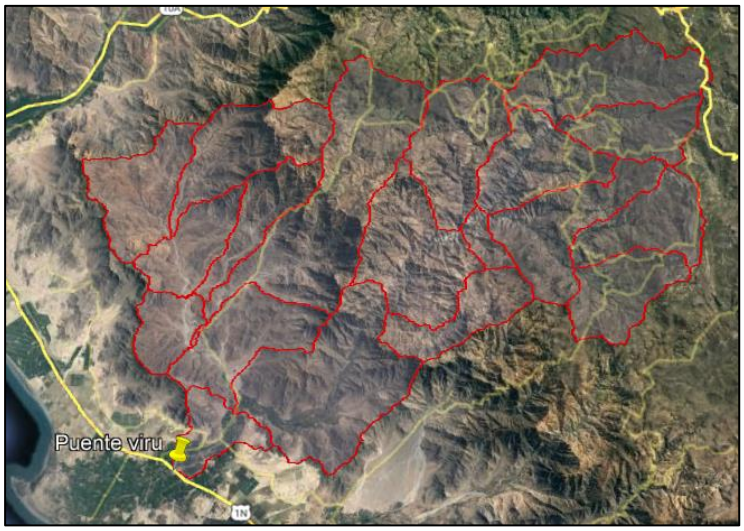
Por medio del programa HEC-HMS se puede realizar la simulación del modelo hidrológico, estableciendo para esto las subcuencas, las confluencias y los tramos de la cuenca de estudio. Como los parámetros de entrada, primero, para este caso, se ha elegido para la escorrentía directa en el punto de aforo de toda la superficie de la cuenca, el método de hidrograma unitario de Clark. En segundo lugar, para las pérdidas o abstracciones, se ha utilizado el método del Número de Curva del SCS y, por último, para el movimiento del flujo en los tramos, se ha elegido el método de Muskingum.

El objetivo de esta investigación es realizar por medio de la calibración, la optimización de las variables de Número de Curva, coeficiente de almacenamiento en las subcuencas y la variable K del método de Muskingum en los tramos entre confluencias, para poder utilizarlas en los modelos hidrológicos de los periodos de retorno de 100 y 500 años. Además, se ha tomado en cuenta las condiciones seca, normal y húmeda del Número de Curva en el área de la cuenca delimitada.

METODOLOGÍA

La provincia de Virú se encuentra en el departamento de la Libertad en el norte de Perú. A través de esta transita el río Virú, el cual termina desembocando en el océano pacífico. Como en varios ríos del Perú, el caudal de este río varía durante las temporadas de máximas avenidas que ocurren entre los meses de diciembre y marzo. La formación de este río se produce de la unión de afluentes que provienen de las cadenas montañosas de la sierra, las cuales forman la cuenca Virú.

Figura 1. Áreas de cuencas y subcuencas delimitadas



Fuente: Elaboración propia

Alrededor de la cuenca delimitada, existen estaciones pluviométricas, a partir de las cuales se puede recopilar su información registrada para procesarla y obtener los caudales máximos cada 24 horas para diferentes periodos de retorno. Las estaciones que se encuentran a los alrededores de la cuenca delimitada y sus registros de lluvia podrían dar un aporte a los afluentes de la cuenca son 6: Laredo, Salpo, Julcan, Quiruvilca, Virú y Cabana. Además, aguas arriba del punto de aforo, se encuentra la estación hidrométrica Huacapongo, la cual se usará para el proceso de calibración.

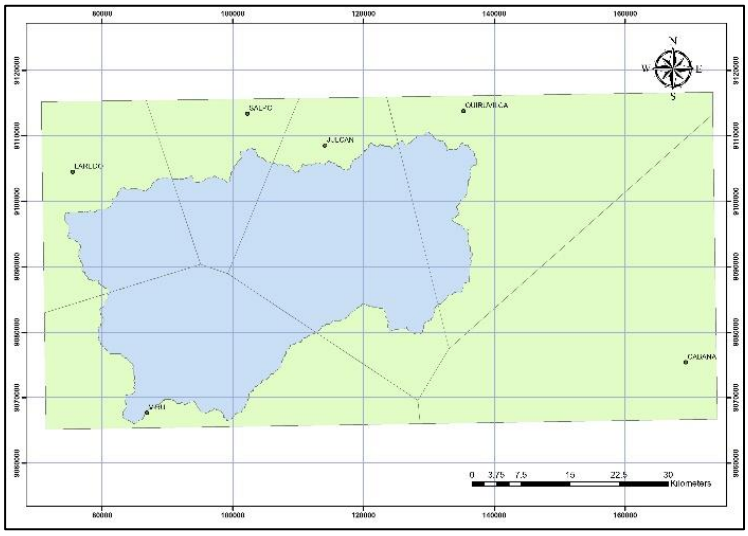
El aforo que se ha considerado para la cuenca delimitada es en la ubicación del puente del río Virú, por ser un lugar de interés para conocer la altura del cauce que puede alcanzar en máximas avenidas. Este

punto de aforo se encuentra a 49.8 msnm, en las siguientes coordenadas WGS84: una latitud de 9°24'33.97", una longitud de de 77°11'48.26".

Descripción del procesamiento de los datos pluviométricos

Se empezó por la delimitación de la cuenca y de las subcuencas en el programa ArcMap 10.5, para lo cual se hizo uso del DEM del territorio del Perú, y aproximando con un área más grande que la cuenca, se procesó la zona, obteniendo la cuenca delimitada, con un área de 1683 km^2, y posteriormente las subcuencas. Con la cuenca delimitada, se colocaron los puntos donde se encuentran las estaciones pluviométricas. Hecho esto se aplicó el método de polígonos de Thiessen (Chow, 1994) para encontrar cuáles de estas estaciones pluviométricas registran un aporte a la cuenca delimitada. Con esto se estableció que solamente 5 de las estaciones registran lluvia que influye en el área de la cuenca, las cuales son: Laredo, Salpo, Julcan, Quiruvilca, Virú, como se puede ver en la siguiente figura.

Figura 2. Áreas de influencia de las estaciones pluviométricas mediante Polígonos de Thiessen



Fuente: Elaboración propia

Con los datos recopilados de las estaciones seleccionadas, se calculó los histogramas de precipitaciones máximas anuales en 24 horas. Ya con estos valores se realizó la prueba de bondad de ajuste para el análisis de frecuencia por métodos analíticos utilizando el programa Hidroesta2, según como indica el Ministerio de Transportes y Comunicaciones (2014), obteniendo finalmente las siguientes distribuciones para cada estación en la prueba de Kolmogorov-Smirnov:

Tabla 1. Distribución de ajuste para cada estación

Estación	Distribución
Laredo	Gumbel
Salpo	Gumbel
Julcan	Gumbel
Quiruvilca	Normal
Virú	Gumbel

Fuente: Elaboración propia

Usando el programa Hidroesta 2, con las distribuciones elegidas, se pude calcular las precipitaciones máximas, en cada estación, para el periodo de retorno que se desee, en el caso de esta investigación se eligieron los periodos de 50, 100 y 500 años, ya que de lo que señalaba Villón, estos tiempos son representativos para cálculos en el cauce, como la altura libre en puentes y fenómenos de socavación. Es así que se obtiene los siguientes valores:

Tabla 2. Precipitaciones máximas para los tiempos de retorno en cada una de las estaciones

Estaciones	Precipitación máxima (mm)		
	50	100	500
Laredo	17.62	20.39	26.79
Salpo	51.72	57.25	70.05
Julcan	54.73	59.78	71.43
Quiruvilca	56.74	63.14	77.93
Virú	2.36	2.79	3.8

Fuente: Elaboración propia

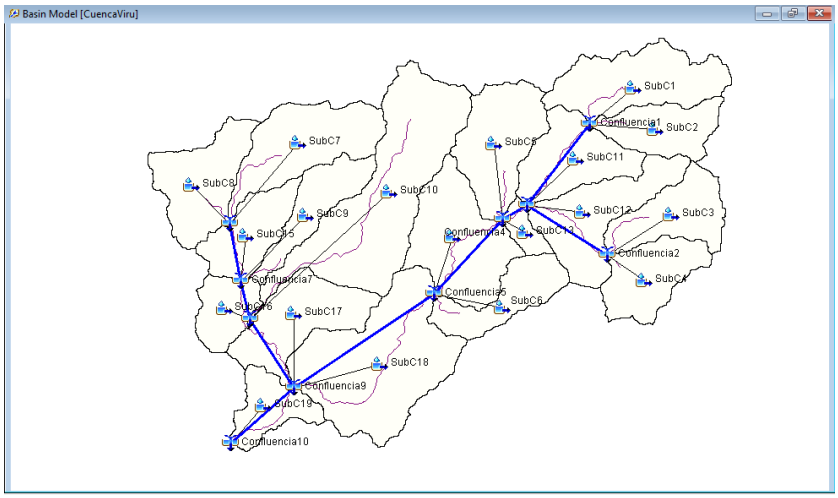
Para el cálculo del hietograma de diseño de cada una de las 5 estaciones, se ha utilizado la distribución de lluvia SCS de 24 horas Tipo II junto con los valores de precipitaciones máximas para cada tiempo de retorno.

Descripción del modelo hidrológico

El programa HEC-HMS permite importar tanto la cuenca como subcuencas delimitadas y los tramos de los afluentes. Asimismo, ya en el programa se debe ingresar los componentes, que es donde se ingresarán los datos de entrada, y en el mapa de la cuenca, utilizando las herramientas que proporciona el programa, se ubican los puntos de las subcuencas, por medio de la herramienta Subbasin Creation

Tool; los puntos de las confluencias, con la herramienta Junction Creation Tool; y los tramos de la red del cauce, con la herramienta Reach Creation tool. Resultando como se muestra en la siguiente figura:

Figura 3. Modelo conceptual de la cuenca en HEC.HMS



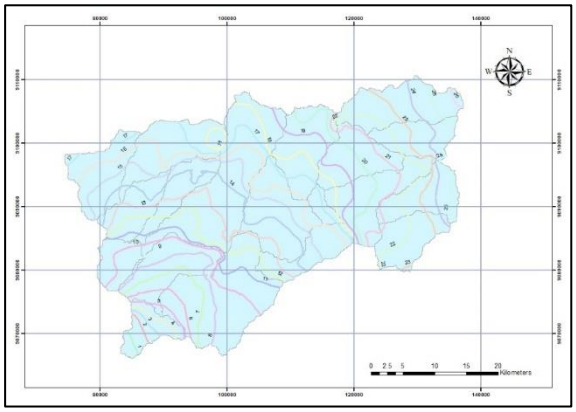
Fuente: Elaboración propia

En donde el punto de aforo de la cuenca delimitada es en la Confluencia 10.

Para el modelamiento hidrológico de la cuenca, el programa HEC-HMS permite escoger entre varios métodos para la escorrentía directa, las pérdidas y el movimiento del flujo en los tramos. En los casos de la escorrentía directa y las pérdidas, al aplicarse sobre la superficie de la cuenca, para escoger los métodos, se ingresa a cada subcuenca colocada en el mapa y se selecciona el método a utilizar: para la escorrentía directa se ha elegido el método del Hidrograma unitario de Clark, mientras que, para las pérdidas, el método de Número de Curva SCS. Respecto a el movimiento del flujo en los tramos, se ha ingresado a cada tramo colocado en el mapa y se ha seleccionado el método de Muskingum.

Acerca del método del Hidrograma Unitario de Clark (Sánchez, 2017), los datos de entrada que pide el programa son el tiempo de concentración y el coeficiente de almacenamiento. Para el primero, usando las fórmulas de Kirpich y la de Temez, se calculó el tiempo de concentración parcial promedio para cada punto colocado sobre los cauces en el mapa en el programa ArcMap. Estos resultados se acumularon siguiendo cada uno de los cauces, con lo que finalmente se pudo crear un mapa de tiempo de concentración como se muestra en la siguiente figura:

Figura 4. Mapa con las curvas de tiempo de concentración de la cuenca

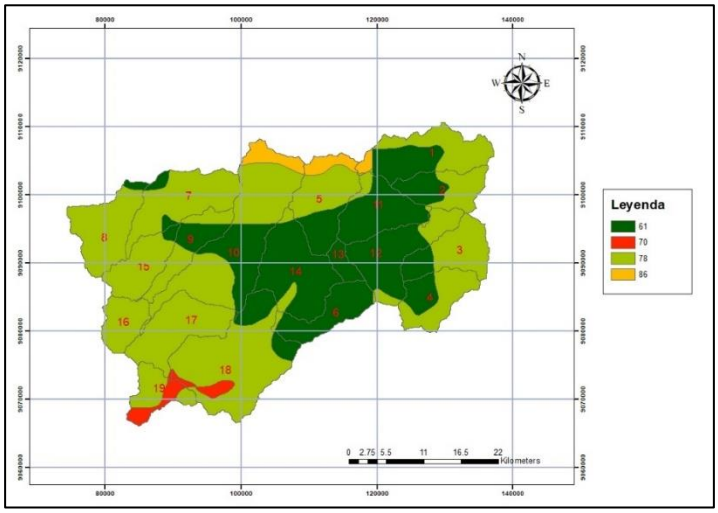


Fuente: Elaboración propia

Es así que se obtuvo el tiempo de concentración en cada subcuenca, que, junto con los tramos de mayor longitud en cada una de ellas, se halló el tiempo de concentración al inicio y al final de dichos tramos y al restarlos, se encontró el tiempo de concentración de cada subcuenca. En cuanto al coeficiente de almacenamiento, este se calculó como el producto del tiempo de concentración por un factor de 0.8 (Sánchez, 2017).

Sobre el método de Número de Curva (Chow, 1994), se obtuvieron los mapas, de la base de datos de GEO GPS Perú, en las condiciones seca, normal y húmeda. Utilizando el programa ArcMap, se delimitó al área de la cuenca de estudio. Para encontrar el valor de cada subcuenca, se calculó el peso que tiene cada área dividida de cada subcuenca respecto al área de la misma subcuenca, teniendo como base las zonas del mapa de Número de Curva. Una vez calculado el peso, este se multiplicó por el valor del Número de Curva que le corresponde y se sumaron entre los que corresponden a una misma subcuenca, obteniendo así el valor de Número de Curva de cada subcuenca. En la siguiente figura se muestra el caso de las subcuencas con el mapa de Número de Curva en condiciones normales:

Figura 5. Mapa de Número de Curva en condiciones normales



Fuente: Elaboración propia

Para el método de Muskingum, primero se calculó la variable K, el tiempo de tránsito de la onda de flujo a través del tramo del canal, para lo cual se encontraron los tiempos de concentración en las confluencias y con sus diferencias, se halló los tiempos de concentración en cada tramo y por último, se consideró la variable K como un porcentaje igual al 70% de los tiempos de concentración de cada tramo. Para la variable X, se ha determinado a partir de la pendiente de cada tramo, si son suaves o fuertes, variando el valor en un rango de 0 a 0.5 (López,2006).

Aplicación de la simulación

Ingreso de los componentes necesarios para la simulación

Con el componente del modelo de cuenca terminado, también es necesario añadir componentes adicionales para que el programa HEC-HMS pueda realizar la simulación. En el componente Modelo Meteorológico, se ha relacionado las estaciones pluviométricas con las subcuencas, colocando el peso que representa cada estación en cada subcuenca, como ejemplo se muestra en la siguiente figura:

Figura 6. Relación entre las estaciones pluviométricas y las subcuencas

Element Name: SubC3

Gage Name	Depth Weight
ESTACION_JULCAN	0.34
ESTACION_QUIRUVIL...	0.66

Fuente: Elaboración propia

El siguiente componente es Especificaciones de Control, aquí se ha especificado la fecha y hora de inicio y fin en los que se desarrollará la simulación, además de especificar el intervalo de tiempo igual a 1 hora.

El último componente a considerar es Datos de Series de Tiempo. Aquí se ha ingresado el tipo de dato Medidores de precipitación. Aquí se ingresan las estaciones pluviométricas, en donde además de especificar el intervalo de tiempo, el tiempo de inicio y fin que la estación registra lluvia, también es donde se ha ingresado los valores de intensidad de lluvia del periodo de retorno de 50 años.

En este componente además es donde se ingresan los valores de caudales máximos de la estación hidrométrica con la que se realizará el proceso de calibración, esto por medio del tipo de dato Medidores de Descarga, el intervalo de tiempo y el tiempo de inicio y fin que la estación registró caudal.

Proceso de optimización

Para este proceso se ha utilizado la información de caudales máximos anuales en 24 horas obtenidos de la estación hidrométrica Huacapongo. Con estos datos se hizo un análisis de frecuencia con los que se obtuvo el caudal máximo para el periodo de retorno elegido anteriormente de 50 años. El caudal máximo obtenido se muestra en la siguiente tabla:

Tabla 3. Caudal máximo para el periodo de 50 años

Periodo de retorno	Caudal máximo (m3/s)
50	216

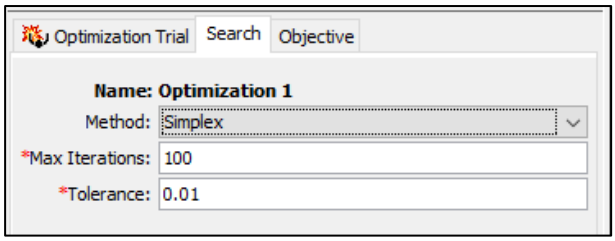
Fuente: Elaboración propia

Para la obtención de los hidrogramas horarios de estos tiempos de retorno, los cuales se utilizarán como los valores de caudales máximos de la estación hidrométrica en la componente Datos de Series de Tiempo, los valores de caudales máximos de los tiempos de retorno se multiplicaron al hidrograma unitario conseguido a partir del adimensionamiento de los datos obtenidos de una simulación realizada con los datos de precipitaciones.

Luego de ingresar los valores de caudales máximos al dato de Medidores de Descarga en el componente Datos de Series de Tiempo, se creó un nuevo proceso de Optimización en el programa HEC-HMS, por medio de la opción Optimization Trial Manager.

El programa HEC-HMS ofrece tres métodos para realizar el proceso de calibración: Markov Chain Monte Cralo, Simplex y Univariate. Para esta investigación se ha elegido el método Simplex. Respecto a los valores que se ingresan luego de elegido el método como se ve en la siguiente figura, se optó por dejar los valores que el programa da por defecto.

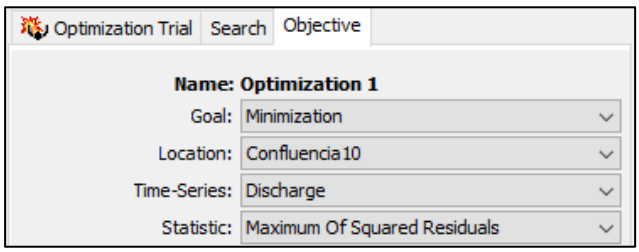
Figura 7. Etapa de la selección de las opciones de búsqueda



Fuente: Elaboración propia

En las opciones que el programa pide en objetivo, como se ve en la figura, se ha especificado que el propósito de este proceso es minimizar, en el punto de la salida de la cuenca por medio de la descarga. Acerca de la opción estadística con la que se realizará la optimización, el programa HEC-HMS, ofrece 14 opciones, de las cuales se elegirá con la que se tenga un resultado más preciso.

Figura 8. Etapa de selección de las funciones objetivo



Fuente: Elaboración propia

RESULTADOS

Por medio del proceso de calibración, las variables que serán optimizadas son los Número de Curva y los coeficientes de almacenamiento de las subcuencas y la variable K de los tramos entre confluencias. En el caso particular de los valores de los Números de Curva, como se ha mencionado previamente, se ha dispuesto de tres mapas de distintas condiciones: normal, seca y húmeda. Es por esto que, como parte de la identificación del mejor ajuste, se ha agrupado en tres grupos la optimización según que condición de se utilice.

La forma en que se ha evaluado la bondad de ajuste entre lo obtenido en la simulación con los datos de lluvias con lo observado de la estación hidrométrica es por medio del índice de eficiencia de Nash-Sutcliffe. La forma de evaluar de este índice varía en el rango de 0 a 1 (González et al, 2004), siendo calculado por la siguiente fórmula:

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n}(OBS_i - SIM_i)^2}{\sum_{i=1}^{n}(OBS_i - \overline{OBS})^2}$$

(1)

Donde: OBS_i es el valor observado; SIM_i es el valor pronosticado y $\overline{OBS}$ es el promedio de los valores observados

En este caso, se ha buscado los índices que estén más próximos a 1, esto indicaría cuál de las opciones tiene una coincidencia más perfecta que otra (AgriMetSoft, 2019).

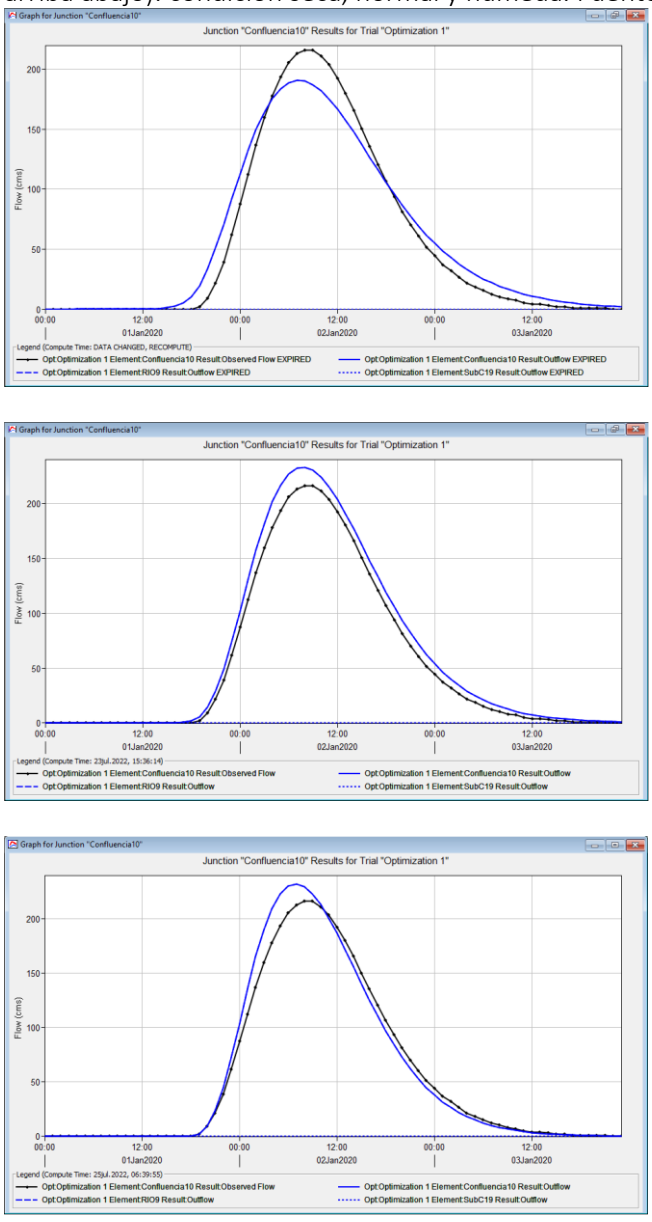
Luego de haber corrido los procesos de optimización se obtuvieron los siguientes máximos en cada una de las condiciones del Número de Curva.

Tabla 4. Resultados de los valores máximos para cada una de las condiciones

Condición de CN	Funciones Objetivo	Índice
Seca	Maximum of Squared Residuals	0.968
Normal	Mean of Squared Residuals	0.983
Húmedo	Variance of Squared Residuals	0.983

Fuente: Elaboración propia

Figura 9. Hidrogramas resultantes de las tres funciones objetivos con mayor índice de eficiencia, (de arriba abajo): condición seca, normal y húmeda. Fuente: Elaboración propia



El índice que tuvo un mayor valor fue 0.983; sin embargo, este valor se encuentra para la condición normal y húmeda, por lo que se ha tomado en cuenta el porcentaje de sesgo obtenido en cada uno, los cuales fueron los siguientes:

Tabla 5. Porcentaje de sesgos para los mayores índices de las funciones obtenidas

Funciones Objetivo	Sesgo (%)
Mean of Squared Residuals	12.55
Variance of Squared Residuals	2.49

Fuente: Elaboración propia

De esto dos se ha elegido el de menor sesgo, que corresponde a la función objetivo de la condición húmeda, debido a que un sesgo positivo significa estar por encima del valor real, por lo que a mayor sesgo más por encima del valor real se encuentra el resultado.

Las variables calibradas: Número de Curva, coeficiente de almacenamiento y la variable k de Muskingum, que se han obtenido de la optimización usando la función objetivo Variance of Squared Residuals son las que se considerarían para ingresar en los modelos hidrológicos al calcular el caudal de salida de la cuenca de estudio para los periodos de retorno de 100 y 500 años.

CONCLUSIONES

El programa HEC-HMS ofrece la posibilidad de poder usar varios métodos de acuerdo a los datos que se tengan disponibles para el cálculo de una misma variable como la escorrentía directa y pérdidas o abstracciones.

Por medio de las optimizaciones considerando diferentes condiciones del Número de Curva relacionadas con el porcentaje de humedad, se puede afirmar que es un factor que no se puede pasar por alto para obtener un adecuado resultado de la calibración.

En general, los valores máximos obtenidos en las tres condiciones han sido altos, lo que significa que en los tres casos se tiene un alto grado de coincidencia entre lo obtenido de los simulado y lo obtenido de lo observado.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AgriMetSoft. (2019). *Nash Sutcliffe model Efficiency coefficient*. Fonte: https://agrimetsoft.com/calculators/Nash%20Sutcliffe%20model%20Efficiency%20coefficient

Bustamante Ortega, R. S. (2008). *Calibración y validación del modelo HEC-HMS, en la cuenca de Huechún, región metropolitana.* Talca.

Chow, V. (1994). *Hidrología Aplicada.* Santafé de Bogota: McGraw-Hill Interamericana S.A.

Fattorelli, S., & Fernandez, P. (2011). *Diseño Hidrológico* (2 ed.). Water Assessment & Advisory Global Network. Basile, P. A. (2018). *Transporte de Sedimentos y Morfodinámica de Ríos Aluviales.* Rosario: UNR EDITORA.

González, M.A., Scaini, A., Goñi, M., Valdenebro, J.V., López, J.J. (2004). Análisis del modelo HEC-HMS para la simulación de las avenidas del río Arga en Pamplona

López Miñano, I. (2006). *Análisis de los principales parámetros de un método hidrometeorológico para el cálculo de avenidas y aplicación a una cuenca mediterránea.* Cartagena.

Ministerio de Transportes y Comunicaciones. (2014). *Manual de hidrología, hidráulica y drenaje.* Obtenido de http://transparencia.mtc.gob.pe/idm_docs/normas_legales/1_0_2950.pdf

Nanía, L. S. (2007). *Manual Básico de HEC-HMS 3.0.0 Y HEC-GeoHMS 1.1.* Obtenido de http://www.ugr.es/~lnania/_private/ManualBasico_HEC-HMS300_HEC-GeoHMS11_Espanol.pdf

Pascual Aguilar, J. A., & Díaz Martín, M. (2016). *Guía práctica sobre la modelización hidrológica y el modelo HEC-HMS.* Alcalá de Henares.

Sánchez San Roman, F. J. (2017). *Hidrología Superficial y Subterránea.* Salamanca: Createspace Independent

US Army Corps of Engineers. (2000). *Hydrologic Modeling System HEC-HMS Technical Reference Manual.* Obtenido de https://www.hec.usace.army.mil/software/hec-hms/documentation/HEC-HMS_Technical%20Reference%20Manual_(CPD-74B).pdf

US Army Corps of Engineers. (2018). *Hydrologic Modeling System HEC-HMS User's Manual version 4.3.* Obtenido de https://www.hec.usace.army.mil/software/hec-hms/documentation/HEC-HMS_Users_Manual_4.3.pdf

Villón, M. B. (2002). *Hidrología.* Lima, Perú: Villón