

Modelación hidrológica con HEC-HMS en cuencas montañosas de la región oriental de Cuba

Valentina Estrada Sifontes
MSc. Ing. Empresa Raudal. INRH. Holguín.
e-mail: valentina.estrada@raudal.hlg.hidro.cu

Rafael Miguel Pacheco Moya
MSc. Ing. Dpto. Ingeniería Hidráulica. Univ. de Oriente, Stgo. de Cuba.
email: rpacheco@fco.uo.edu.cu

RESUMEN

Especialistas cubanos en los últimos años han dado pasos en la aplicación del HEC-HMS para obtener hidrogramas de avenidas en algunas zonas del país, pero la experiencia de aplicación alcanzada es todavía insuficiente. En este sentido la presente investigación realiza recomendaciones para la modelación con HEC-HMS en cuencas montañosas de la región oriental de Cuba a partir de su aplicación en la cuenca Las Coloradas, obteniendo experiencias en los métodos de cálculo de mejor aplicación y los valores que alcanzan sus parámetros. Se han tenido en cuenta las particularidades físico-geográficas y climáticas de las cuencas montañosas orientales y el estado de la información hidrometeorológica en las mismas.

Palabras clave: modelación hidrológica, modelo hidrológico HEC-HMS, información hidrometeorológica, hidrogramas de avenidas.

Hydrological modeling with HEC-HMS in mountainous basins of Cuban eastern region

ABSTRACT

In the last few years Cuban analysts have been working to obtain flood hydrograms in some regions of the country applying HEC-HMS model but the experience is not yet enough. The present paper reports research work with HEC-HMS model in mountainous basins of the Cuban eastern region and some recommendations are obtained from its application in Las Coloradas basin. Valuable experiences were derived with calculation methods and their best application range as well as suitable parameter values for them. Physico-geographic and climatological characteristics of eastern mountainous basins were taken into account and their existing hydrometeorological information.

Keywords: hydrological modeling, hydrologic model HEC-HMS, hydrometeorological information, flood hydrograms.

INTRODUCCIÓN

La modelación hidrológica es una herramienta de gran importancia para el estudio de avenidas que se ha extendido por todo el mundo, fundamentalmente en países desarrollados. En la actualidad, con el empleo de estos modelos, se realiza el análisis y la prevención de las inundaciones; además, es posible manejar hipótesis suficientemente realistas o previsibles que ofrezcan un cierto grado de confianza para la toma de decisiones, ya sea en la ordenación del territorio en torno a los ríos o para exigir criterios de diseño de obras e infraestructuras capaces de soportar y funcionar adecuadamente en situaciones de emergencia. Incluso, alertar a los servicios de protección civil y establecer protocolos de actuación ante posibles situaciones de peligro por intensas lluvias (Dueñas 1997).

Son varios los modelos hidrológicos que existen, siendo el Sistema de Modelación Hidrológica del Centro de Ingeniería Hidrológica del Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los EE. UU. (HEC-HMS por sus siglas en inglés) el aplicado en la presente investigación, ya que es un programa computacional gratuito y de amplia utilización internacional en el estudio de avenidas, el cual provee una variedad de opciones para simular procesos de precipitación - escurrimiento y tránsito de caudales (Feldman 2000).

Este modelo utiliza métodos de precipitación-escorrentía para estimar los hidrogramas de escorrentía directa generados por las precipitaciones en una cuenca o región durante un período especificado. Es un programa muy flexible que permite al usuario la selección de diferentes métodos para el cálculo de pérdidas, hidrogramas, flujo base y propagación en cauces. Posibilita realizar simulaciones de los procesos hidrológicos a nivel de eventos o en forma continua. Los primeros simulan el comportamiento de un sistema hídrico durante un evento de precipitación. La simulación continua puede comprender un período de tiempo con varios de estos eventos.

Por otra parte, el desarrollo de los Sistemas de Información Geográficos (SIG) permite la integración de los resultados de la modelación hidrológica y las diferentes características físico-geográficas de las cuencas en un sistema de prevención hidrológica que posibilite el pronóstico de inundaciones y la correspondiente toma de decisiones. Los SIG constituyen un instrumento adecuado para responder a cuestiones relacionadas con la distribución espacial y las series temporales de la escorrentía.

Estos sistemas facilitan el tratamiento de la información hidrológica gracias a que incluyen procedimientos diseñados para realizar la captura, almacenamiento, manipulación, análisis, modelación y presentación de datos georreferenciados. Con ayuda de los SIG la modelación hidrológica acelera su desarrollo y aplicación pudiendo actuar a modo de plataforma para la experimentación rápida de nuevas ideas y conceptos, a la vez que sus resultados pueden ser incorporados al proceso de toma de decisiones y en la ordenación del territorio.

La aparición del módulo de interfase geoespacial HEC-GEO-HMS (Geospatial Hydrologic Modelling System Extension), desarrollado por el centro de Ingeniería Hidrológica del Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los EE.UU. (Doan 2003) como una extensión del SIG ARCVIEW, permite generar la información que caracteriza a la cuenca y los parámetros hidrológicos de entrada para el modelo HEC-HMS.

En Cuba, en los últimos años, se han dado pasos en la aplicación de este modelo para obtener hidrogramas de avenidas en algunas zonas del país, pero la escasa experiencia nacional en su aplicación, en modelación hidrológica en general y variados inconvenientes en la observación, conservación y organización de la información básica hidrometeorológica, impiden o dificultan la calibración de sus parámetros en las condiciones cubanas y, específicamente, en la región oriental, frenando su tan necesaria generalización.

En el país existen algo más de 40 cuencas fluviales con riesgo de inundación de frecuencia variable y se prevé ampliar la hasta ahora muy escasa utilización del modelo HEC-HMS con el proyecto del INRH: “Fortalecimiento de Capacidades Locales para la Alerta Temprana en Tiempo Real”, en sus variantes PNUP y CARIB-HYCOS. Para 6 de estas cuencas ya se inician los trabajos de dicho proyecto, ubicándose 5 de ellas, total o parcialmente, en la región montañosa oriental, entre las que se encuentra la subcuenca “Las Coloradas”, nacimiento del río Cauto, y cuyos resultados fundamentales son:

- Experiencias hasta ahora inexistentes en la aplicación de la modelación matemática hidrológica con HEC-HMS en cuencas montañosas de la región oriental de Cuba, lo que posibilitará su posterior utilización en diferentes estudios (pronóstico de inundaciones, diseños hidráulicos, caracterizaciones físico-climáticas, ordenamiento territorial, modelaciones de escenarios futuros relacionados con el cambio climático, etc.), con:
 - Definición de los métodos de cálculo de mejor aplicación
 - Definición de los intervalos de valores que alcanzan sus parámetros de calibración.

- Experiencias en la aplicación del módulo de interfase geoespacial HEC-GEO-HMS, extensión del SIG ARCVIEW, para generación de información de la cuenca y parámetros hidrológicos de entrada para el modelo HEC-HMS.

- Definición de relaciones regionales de probabilidades y gastos máximos del ciclón Flora para la cuenca del río Cauto.

- Aportes específicos para la cuenca las Coloradas:
 - Modelo matemático de la cuenca para el estudio de escenarios futuros.
 - Definición de precipitaciones y gastos máximos de diferentes probabilidades.
 - SIG que contiene mapas temáticos de tipos de suelo, uso del suelo y número de la curva.

DESARROLLO

Para simular la respuesta hidrológica de una cuenca, el HEC-HMS utiliza los siguientes componentes: *modelo de la cuenca*, *modelo meteorológico*, *especificaciones de control* y *datos de entrada*. Una simulación calcula la transformación de lluvia a caudal en el modelo de la cuenca, dada la entrada del modelo meteorológico. Las especificaciones de control definen el período de tiempo durante el cual se realizará la simulación y el intervalo de tiempo a utilizar. Los componentes de los datos de entrada, tales como las series temporales, tablas y datos por celdas, son requeridos como parámetros o condiciones de contorno tanto en el modelo de la

cuenca como en el meteorológico (Nanía 2007). Para definir la estructura de una cuenca, el programa considera los siguientes elementos hidrológicos: Subcuenca (subbasin), Tramo de tránsito (routing reach), Unión (junction), Embalse (reservoir), Fuente (source), Sumidero (sink) y Derivación (diversion).

MODELO DE CUENCA

Para la modelación de la cuenca en el HEC-HMS se necesita representar la cuenca hidrológica mediante el desarrollo del modelo de la cuenca que para “Las Coloradas” se creó con ayuda del ArcView 3.3 y su extensión HEC-GEO-HMS, siguiendo el siguiente procedimiento de trabajo.

Modelo digital de elevaciones en ArcView 3.3

Se creó un modelo digital de elevaciones (MDE) que contiene información suficiente para definir las propiedades de la red de drenaje superficial y de la cuenca hidrológica. Dicho MDE en formato Grid, fue creado a partir de la cartografía digital de curvas de nivel a escala 1: 25 000 en el SIG ArcView 3.3.

Extensión HEC-GEO-HMS

Con la extensión HEC-GEO-HMS en ArcView y activado el MDE se procesaron los datos con la siguiente secuencia:

1. *Corrección hidrológica del modelo digital de elevaciones.* (Menú Terrain preprocessing/Fill Sinks).

2. *Procesamiento del terreno:* Menú Terrain preprocessing: En el mismo se obtienen 8 conjuntos de datos que describen los patrones de drenaje de la cuenca: dirección de la mayor pendiente, número de celdas que drenan a cada celda, clasificación de celdas, división de cauces en segmentos, definición de una cuenca por cada segmento de cauce, conversión de las subcuencas de formato grid a formato vector, conversión de los cauces de formato grid a formato vector y aglutinamiento de subcuencas.

3. *Configuración del modelo hidrológico inicial:* Menú HMS Project Setup.

4. *Procesamiento de la cuenca.* Menú Basin Processing. En este punto se obtienen las características de la cuenca y su red de drenaje, además de algunos parámetros hidrológicos, y se fusionan subcuencas y cauces según el criterio del modelador y los objetivos de la modelación. A partir de dicha fusión se manejaron 2 variantes de representación conceptual de la cuenca. En una primera variante se fusionaron las subcuencas básicas obtenidas en 5 subcuencas: La Cubana, El Nacimiento, Prosperidad, Palenque y Las Coloradas, de acuerdo con los afluentes principales de la cuenca. En una segunda se realizó una fusión total de las subcuencas considerando la cuenca como unitaria.

5. *Generación de entrada al modelo HEC-HMS.* Menú HMS: Se generaron dos variantes del modelo conceptual de la cuenca según los dos criterios anteriores para ser exportados al HMS. (figura 1).

MODELACIÓN CON HEC-HMS

En una primera variante se importó al HEC-HMS el modelo conceptual de la cuenca dividida en 5 subcuencas, pero luego de tentativas preliminares de modelación se determinó manejar un modelo conceptual de cuenca unitaria (figura 1) debido a las siguientes causas:

(1) existencia de una única estación hidrométrica a la salida de la cuenca; (2) existencia de un único pluviógrafo con ubicación cercana al centro de gravedad de la cuenca unitaria; (3) escasa representatividad territorial de los pluviómetros por subcuencas; (4) escasez de información de varios parámetros solicitados por los diferentes métodos de cálculo y que tenían que ser tomados idénticos para todas las subcuencas; (5) falta de información de las secciones transversales de los cauces para poder realizar el tránsito de caudales; (6) no existen objetivos internos con interés de modelación, como obras hidráulicas, poblaciones, etc.; (7) no existen cambios significativos en los regímenes geológico y climático de la cuenca; (8) Por sus dimensiones la cuenca es abarcable en su totalidad por las lluvias ciclónicas.

En las 44 avenidas inicialmente seleccionadas las precipitaciones tuvieron un carácter relativamente homogéneo para todo el territorio.

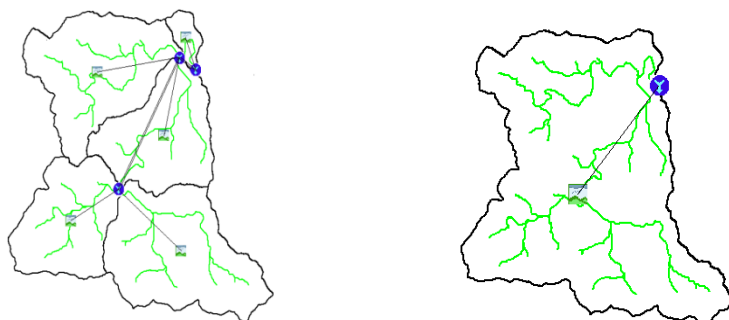


Figura 1. Modelos conceptuales de la cuenca con la simbología del HEC-HMS.

DATOS DE ENTRADA

Como ya se ha expresado, en el país existen variadas dificultades en la observación, conservación y organización de la información hidrometeorológica básica necesaria al modelo, lo que conlleva a la rareza de datos paralelos de hietogramas de tormentas, hidrógrafos de avenidas y otras variables hidrometeorológicas. Para disminuir el efecto de dichas dificultades se aplicó a la información a introducir al modelo el “Esquema Hidrometeorológico Integral para HEC-HMS” (Estrada 2009), desarrollado en EXCEL y que posibilita la recopilación, organización y análisis preliminar de la información hidrometeorológica, facilitando conocer la información necesaria y determinar con qué se cuenta realmente para definir las opciones de modelación a utilizar.

Del análisis integral de la información hidrometeorológica realizado mediante dicho esquema, fueron seleccionadas 2 avenidas que se consideran las más representativas, a partir de

la información existente y sus probabilidades de ocurrencia para comenzar el desarrollo de experiencias en la modelación de cuencas montañosas con HEC-HMS a partir de su calibración en la cuenca de la estación hidrométrica “*Las Coloradas*”.

Estas avenidas fueron: (1) la ocurrida el 12 de junio de 1979 que es la mayor de las 6 avenidas que cuentan con pluviogramas. Tiene una probabilidad alta, de aproximadamente el 20% y está condicionada por una alta humedad antecedente. Aunque es una avenida de corto período de retorno (5 años) la existencia de pluviografía posibilitará establecer comparaciones entre las modelaciones a partir de pluviogramas y lluvias diarias y adquirir experiencias de aplicación del modelo en las condiciones comunes de ausencia de los primeros; (2) La mayor observada en la estación el 25 de abril de 1979, con una probabilidad de ocurrencia relativamente baja del 5% y condicionada por una baja humedad antecedente. La misma presenta 2 picos y solo cuenta con observaciones de lluvia diaria por lo que será modelada su tendencia general. Posibilitará modelar una avenida de baja repetición (20 años) y aplicar las experiencias obtenidas del caso anterior.

PROCESO DE MODELACIÓN

Para realizar recomendaciones de modelación matemática de avenidas con el modelo hidrológico HEC-HMS en cuencas montañosas de la región oriental de Cuba, es necesario adquirir experiencias en la definición de los métodos de cálculo de los diferentes submodelos aplicables a las condiciones de dichas cuencas y de los valores o intervalos de valores que adquieren sus parámetros de calibración para estas condiciones.

Para ello se diseñó el proceso de modelación de las dos avenidas seleccionadas en dos etapas consecutivas:

1. Modelación de las avenidas con los métodos seleccionados y con los parámetros correspondientes predefinidos a partir de la bibliografía internacional y la información existente, comparando los resultados obtenidos con la realidad del fenómeno.
2. Calibración automática de las avenidas para las combinaciones de métodos con resultados positivos en la modelación anterior y comparación de los parámetros obtenidos por calibración con los predefinidos.

Dicho diseño responde al hecho de que la calibración automática de parámetros puede conllevar a la obtención de valores que no presenten un fundamento físico propio de las características de las cuencas montañosas orientales cubanas, pues solo estarán restringidos por los intervalos de parámetros implícitos en el modelo. Por otra parte, la opción de establecer restricciones por parte del usuario conllevaría a la utilización de los intervalos aproximados predefinidos sin posibilitar comparar cuánto se apartan los valores de calibración de los mismos.

Obtención de los parámetros de cada uno de los métodos de los submodelos

La determinación de los parámetros, de manera preliminar para las condiciones de las cuencas montañosas orientales (Pacheco y Estrada 2011), se realiza a partir de un análisis del manual de referencias técnicas del programa y la bibliografía especializada, así como la información existente sobre la cuenca en particular. Los resultados definitivos obtenidos con la calibración se resumen más adelante en las tablas 2 y 3.

Modelo meteorológico

El modelo meteorológico se aplicó en las siguientes variantes para las 2 avenidas seleccionadas:

Avenida 12/6/79:

- (1) Hietograma especificado (figura 2);
 - (1.1) Hietograma real observado;
 - (1.2) Hietograma de la lluvia diaria promedio en 3 subvariantes, tomándose como definitiva la tercera:
 - (1.2.1) Hietograma distribuido en 24 h;
 - (1.2.2) Hietograma de 24 h desplazado con respecto al pico del hidrógrafo en un tiempo igual al tiempo de concentración $T_c = 2.8$ h;
 - (1.2.3) Desplazado en un tiempo igual al tiempo de desfase del pico T_{dp} promedio = 1.4 h;
- (2) Pluviómetros con peso;
- (3) Tormenta de frecuencia con probabilidad igual a la de la avenida, intervalos de intensidad de 1 h, duración de 24 h, posición de la intensidad máxima al centro y área de tormenta superior al área de la cuenca;
- (4) Tormenta del SCS Tipo III (correspondiente a la península de la Florida) con los valores de lluvia promedio obtenidos para la avenida.

A pesar de la existencia de un hietograma observado que define la duración real de la lluvia que provocó la avenida, el obtenido a partir de la lluvia promedio diaria se manejó distribuido en 24 h para obtener experiencias adecuadas a la ausencia de observación pluviográfica.

Avenida 25/4/79:

- (1) Hietograma especificado de la lluvia diaria promedio distribuido en 24 h (figura 2) y desplazado en un tiempo igual al T_{dp} promedio = 1.4 h;
- (2) Tormenta de frecuencia;
- (3) Tormenta del SCS Tipo III.

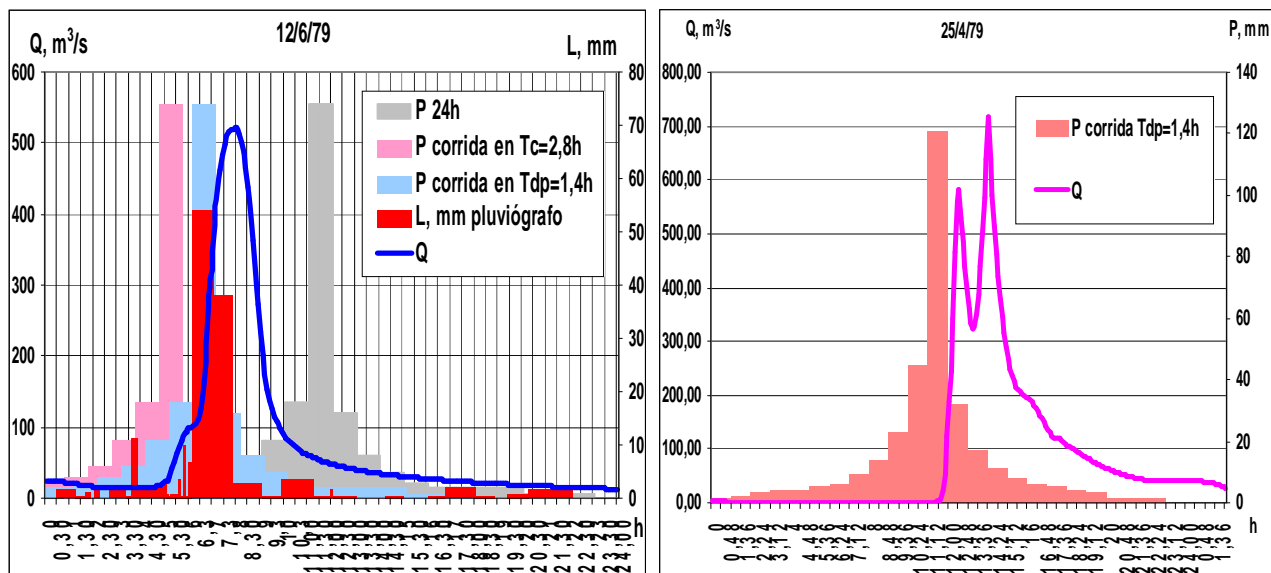


Figura 2. Hietograma especificado.

Especificaciones de control

Con estas avenidas se definió el período de tiempo durante el cual se realizó la simulación y el intervalo de tiempo utilizado de 6 min. En el caso del tiempo final fue necesario terminar unas horas después del cese de la precipitación para permitir que el caudal generado llegara a la desembocadura de la cuenca (ese tiempo depende del tiempo de concentración de la cuenca). El intervalo de tiempo define el intervalo de cálculo del modelo, este intervalo debe ser pequeño, si es mayor que el 29% del Tlag de la cuenca, la corrida del modelo se interrumpe.

Resultados de la modelación

Para comparar los resultados simulados y observados se establecieron los siguientes criterios de admisibilidad de los parámetros a comparar. Estos criterios se asumieron teniendo en cuenta que el objetivo fundamental de la modelación de inundaciones es, por lo general, la salvación de vidas humanas y objetivos económicos, por lo que la definición más exacta posible del gasto pico (para posteriormente obtener la cota máxima de inundación) y de su momento de ocurrencia adquiere una importancia relevante en la modelación, mientras que el volumen y forma del hidrógrafo adquieren una importancia relativa en función de las circunstancias. Se tuvo en consideración que la magnitud de las variables hidrológicas observadas lleva implícito un error de $\pm 10\%$. Su aplicación estuvo en función del modelo meteorológico utilizado. Ver tabla 1.

Los modelos meteorológicos tormentas de frecuencia y del SCS se aplican con el objetivo de obtener experiencias que posibiliten la modelación de avenidas de determinada probabilidad a partir de lluvias distribuidas en 24 h, en ausencia de observación pluviográfica, con conocimiento del patrón de distribución temporal típico de la región para la primera y sin dicho conocimiento para la segunda. Es por ello que se consideran sólo dos parámetros de admisibilidad en la evaluación de la modelación (tabla 1), obviándose el tiempo de ocurrencia del pico, y sólo se tomarán como positivas las combinaciones de métodos donde ambos parámetros resulten satisfactorios

Tabla 1. Criterios de admisibilidad.

Parámetros por orden de prioridad	Modelo meteorológico				
	Hietograma especificado y Pluviómetros con peso			Tormenta de frecuencia y del SCS	
	% de error				
	Satisfactorio	Admisible	Insatisfactorio	Satisfactorio	Insatisfactorio
Q _{máx.}	≤ 12	13-18	≥ 19	≤ 12	≥ 13
T _{Q_{máx.}}	≤ 8	9-11	≥ 12		
W	≤ 25	26-29	≥ 30	≤ 25	≥ 26
Cumplimiento	Todos	Al menos 1	Al menos 1	Todos	Al menos 1

De las 896 modelaciones realizadas para ambas avenidas, 35 resultaron Satisfactorias y 11 admisibles. De los resultados obtenidos se obtuvieron conclusiones que se constituyen a su vez en recomendaciones de aplicación del HEC-HMS para otras cuencas montañosas orientales.

Conclusiones de la modelación

1. En ausencia de hietogramas observados representativos, ellos pueden ser reconstruidos a partir de la lluvia media diaria por cuencas (o subcuencas) y deben ser desplazados con respecto al pico del hidrógrafo en un tiempo igual al Tdp de la misma, si este se desconoce se puede utilizar el Tc calculado a partir del centro de gravedad.
2. Los modelos de Tormenta de frecuencia y del SCS pueden ser utilizados en la modelación de fenómenos de determinada probabilidad o donde no exista un interés específico en el tiempo de ocurrencia del gasto pico.
3. El modelo de transformación de mejores resultados es el Hidrógrafo unitario del SCS, seguido por el de Clark en su valor mínimo, mientras que el de Snyder da resultados Inadmisibles para el intervalo de valores utilizado.
4. El intervalo de valores de los coeficientes de la cuenca Ct y del pico Cp de Snyder propuestos por Martínez et al. (2008) para la cuenca en estudio, no satisfacen los criterios de admisibilidad aplicados.
5. Es necesario considerar siempre las pérdidas. El método de pérdida de mejores resultados es Green and Ampt en el mínimo del intervalo utilizado.
6. De 6 casos positivos con pérdidas del NC del SCS, en 4 de ellas están combinadas con el Hidrógrafo unitario del SCS, por lo que se puede esperar una asociación de dichas pérdidas con dicho hidrógrafo.
7. Por lo general no es necesario considerar flujo base, lo que es típico de las pequeñas cuencas montañosas. De considerarse, los mejores resultados generalmente se obtienen por Recesión en el intervalo mínimo utilizado

Resultados de la calibración

La calibración de los parámetros se realizó de manera automática utilizando la función objetivo Error porcentual en el caudal máximo, esta función se encarga de eliminar el % de error en el caudal obtenido por la modelación buscando la mejor combinación de parámetros. En la búsqueda y aproximación de los valores óptimos de cada uno de los parámetros se empleo el método del gradiente univariado que cambia un parámetro por iteración. Se utilizó este método y no el de Nelder & Mead, debido a que proporcionó mejores resultados en las pruebas de calibración preliminares.

Se realizaron 46 calibraciones para las modelaciones que arrojaron resultados admisibles (A) y satisfactorios (S) en el epígrafe anterior, correspondiendo 40 para la avenida 12/6/79 y 6 para la avenida 25/4/79, y de las que a su vez, resultaron 41 positivas con 32 S y 9 A (según los criterios de admisibilidad utilizados en la tabla 1), correspondiendo 36 para la avenida 12/6/79 y 5 para la avenida 25/4/79. A partir de dichas calibraciones se definió el intervalo a proponer para los parámetros que conforman las combinaciones de métodos anteriormente recomendadas. Se tomó en consideración la variación de los valores con respecto a los iniciales cuando la calibración produjo cambios en los mismos superiores al 10%.

Para el caso del hidrograma unitario de Snyder, donde no se obtuvo ningún resultado positivo en la modelación anterior y sólo con el objetivo de establecer comparaciones con los valores propuestos por Martínez et al. (2008) para la cuenca en estudio, se realizaron 35 calibraciones para las modelaciones de mejores resultados y otras escogidas al azar, de las cuales 23 resultaron positivas (20 S y 3 A). Para estas 23 no se realiza el análisis de las variaciones de los parámetros

de los diferentes métodos (que resultó significativo en la mayoría de los casos) sino que solo se exponen los intervalos generales de los parámetros de Snyder.

Tabla 2. Avenida 12/06/1979. Intervalos de parámetros resultantes de la calibración.

Parámetro Inicial	Resultante									
	Mod. Met.	Hietogr. Especif.		Hiet. Especif. Tdp =1.4 h.		Pluvióm. con Peso		Torm. Frec.	Torm. SCS	Total
	HU	Clark	SCS	Clark	SCS	Clark	SCS	SCS	SCS	
12/6/1979										
Transformación										
HU Clark										
Tc, 2.8 h		2,8		2,8-3,2		2,8-3,2				2,8-3,2
Coef. Alm., 5.8-0.6 h		0,6		0,4-0,6		0,6				0,4-0,6
HU SCS										
SCS Lag, 100 min			100		100-114		100	100-115	100-113	100-115
Pérdidas										
Déficit y tasa constante										
Déficit inicial, 8 mm				8				8	8	8
Alm. máx., 40 mm				40				40	40	40
Tasa pérd. Cte. 7-4 mm/h				8				5-7	5-8	5-8
Green and Ampt										
Pérd. Inicial, 8 mm	14-21	8-12	9-12	12-18	18-21	12-14				8-21
Déficit Hum., 0.10-0.12	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10				0,10
Succ. frente moj., 462-261 mm	261	261	261	261	261	261				261
Conduct. Hid., 38-9 mm/h	9	9	9	6	9	9				6-9
Inicial y tasa constante										
Pérd. Inicial, 8 mm				8				8	8	8
Tasa Pérd. Cte., 7-4 mm/h				8				5-7	5-8	5-8
NC del SCS										
Extrac. Inic., 8 mm			12	9						9-12
NC, 86			86	86						86
Flujo base										
Recesión										
Desc. Inic., 14 m ³ /s	6	14	14	14		6				6-14
Const. Reces., 0.95-0.8	0,37	0,8	0,80	0,53		0,36				0,36-0,80
Proporc. al pico, 0.13-0.08	0,08	0,08	0,08	0,08		0,08				0,08
Desc. Inic., 14 m ³ /s	6	21	14	14	3,0	14				3-21
Const. Reces., 0.95-0.80	0,37	0,8	0,80	0,53	0,16	0,37				0,16-0,80
Umbral Desc., 70-40 m ³ /s	40	40	40	40	40	40				40

Conclusiones de la calibración

1. El comportamiento de los parámetros se define en los intervalos resultantes que aparecen en las tablas 2 y 3, de manera general y por combinaciones de métodos, para las condiciones de cada avenida.
2. Las variaciones de parámetros más significativas entre ambas avenidas están relacionadas con la humedad antecedente de cada una, reflejándose en los valores de los parámetros de pérdidas.
3. La constante de recesión fue definida erróneamente en un intervalo inicial muy alto correspondiente a flujo subterráneo y subsuperficial que en general son poco

significativos en condiciones montañosas, sus valores deben utilizarse en el intervalo resultante de las tablas 2 y 3, y que se corresponde con el que aparece en el manual técnico del modelo para flujo superficial, a pesar de la significativa diferencia de área entre las pequeñas cuencas montañosas cubanas y las expuestas en dicha tabla.

- Para el hidrógrafo unitario de Snyder, en 23 calibraciones positivas, C_t varía entre 0.23 y 0.60 con promedio de 0.35, lo que es inferior a los valores propuestos por Feldman (2000) y Martínez et al. (2008); y C_p varía entre 0.31 y 1.00 con promedio de 0.61, con un intervalo más amplio que el propuesto por Feldman (2000) y coincidiendo con el valor propuesto por Martínez et al. (2008). Aunque en muchos casos los valores mayores de C_p son asociados con valores más pequeños de C_t , este comportamiento es muy errático, no definiéndose una correlación inversamente proporcional entre ellos.

Tabla 3. Avenida 25/04/1979. Intervalos de parámetros resultantes de la calibración.

Parámetro Inicial	Resultante				Total
	Mod. Met.	Hiet. Especif. Tdp =1.4 h.		Torm. Frec.	
	HU	CI	SCS	SCS	
Transformación					
Hidrógrafo Unitario de Clark					
Tc, 2.8 h		2,8			2,8
Coef. Almacenamiento, 5.8-0.6 h		0,6			0,6
HU SCS					
SCS Tlag, 100 min			100	100	100
Pérdidas					
Green and Ampt					
Pérdida Inicial, 45 mm				68	68
Déficit Humedad, 0.4-0.3				0,3	0,3
Succión frente mojado, 462-261 mm				261	261
Conductividad Hid. 38-9 mm/h				9	9
NC del SCS					
Abstracción Inicial, 45 mm		52	45		45-52
NC, 53		53	53		53
Flujo base					
Recesión					
Descarga Inicial, 3 m ³ /s				1,03	1,03
Constante recesión, 0.95-0.80				0,4	0,4
Proporcional al pico, 0.14-0.07				0,07	0,07
Descarga Inicial, 3 m ³ /s				1,0	1,0
Constante recesión, 0.95-0.80				0,4	0,4
Umbral de descarga, 100-50 m ³ /s				40	40

CONCLUSIONES

- El modelo conceptual de cuenca unitaria es suficiente para modelar cuencas pequeñas con escasez de información, homogeneidad de características físico-geográficas y climáticas y ausencia de objetivos internos de interés.
- Los serios inconvenientes existentes en la observación, conservación y organización de la información hidrometeorológica básica pueden ser reducidos con la aplicación del “Esquema Hidrometeorológico Integral para HEC-HMS”.

3. En ausencia de hietogramas observados representativos, ellos pueden ser reconstruidos a partir de la lluvia media diaria por cuencas o subcuencas y deben ser desplazados con respecto al pico del hidrógrafo en un tiempo igual al Tdp de la misma, si este se desconoce, se puede utilizar el Tc calculado a partir del centro de gravedad.
4. Las combinaciones de métodos propuestas y los intervalos de parámetros resultantes de la calibración facilitarán la modelación con HEC-HMS en cuencas montañosas orientales con escasez o ausencia de información.
5. La modelación de avenidas de varios picos es muy difícil en ausencia de hietogramas reales observados, sólo unas pocas combinaciones de métodos son capaces de representar su comportamiento general de manera satisfactoria a partir de valores totales de lluvia.
6. Los modelos de Tormenta de frecuencia y del SCS pueden ser utilizados en la modelación de fenómenos de determinada probabilidad o donde no exista un interés específico en el tiempo de ocurrencia del gasto pico.
7. El modelo de transformación de mejores resultados es el Hidrógrafo unitario del SCS, seguido por el de Clark en su valor mínimo, mientras que el de Snyder da resultados inadmisibles para el intervalo de valores utilizado.
8. Para el hidrógrafo unitario de Snyder, el intervalo del parámetro Ct es inferior al propuesto en la bibliografía y el de Cp es más amplio, no definiéndose una correlación inversamente proporcional entre ellos.
9. Es necesario considerar siempre las pérdidas. En general el método de pérdida de mejores resultados es Green and Ampt.
10. Para las pequeñas cuencas montañosas por lo general no es necesario considerar flujo base. De considerarse, los mejores resultados se obtienen por el método de Recesión.

REFERENCIAS

- Dueñas, C.** (1997). "Marco normativo vigente ante el riesgo de inundaciones." In: Jornadas Parlamentarias sobre prevención de riesgos relacionados con el agua: VI- La protección civil ante el riesgo de inundaciones, Cámara del Senado. Madrid, 7.
- Feldman, A. D.** (2000). "Hydrologic Modelling System HEC-HMS, Technical reference manual." U. S. Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Center, HEC, Davis, CA, 157.
- Doan, J. H.** (2003). "Geospatial Hydrologic Modelling System Extensión HEC-Geo-HMS, user's manual." U. S. Army Corps of Engineering, Hydrologic Engineering Center, Davis, CA., 281.
- Nanía, L. S.** (2007). "Manual Básico de HEC-HMS 3.0 y HEC-GEO-HMS 1.1." Universidad de Granada, Dpto. de Mec. de Estructuras e Ingeniería Hidráulica, Área de Ingeniería Hidráulica.
- Estrada, V.** (2009). "Esquema Hidrometeorológico Integral para HEC-HMS." Ponencia XVI Fórum de Ciencia y Técnica. EIPIH Raudal, Holguín, Cuba.
- Pacheco, R. M.** (2011). "Modelación Hidrológica con HEC-HMS en cuencas montañosas de la región oriental de Cuba." Tesis en opción al título de Máster en Ingeniería Hidráulica, CIH, ISPJAE, La Habana.
- Martínez, M.** (2008). "Modelación hidrológica para la obtención de hidrogramas de avenidas en cuencas montañosas de la zona oriental de Cuba. Caso de estudio: Las Coloradas," Tesis en opción al título de Ingeniería Hidráulica, Universidad de Oriente, Santiago de Cuba.