

Estudio de la cuenca del río Martín Pérez

Jenifer Luis GonzálezE-MAIL: jluisglez00@gmail.com

Centro de Investigaciones Hidráulicas (CIH), Universidad Tecnológica de La Habana “José Antonio Echeverría” (Cujae)

Yakelín Rodríguez LópezE-MAIL: yakelin780603@gmail.com

Centro de Investigaciones Hidráulicas (CIH), Universidad Tecnológica de La Habana “José Antonio Echeverría” (Cujae)

RESUMEN

El tema de las inundaciones en zonas urbanas, debido al desbordamiento de ríos es amplio y complejo. Esta investigación aborda la modelación hidrológica del río Martín Pérez. Se utilizó la curva de masa regional normalizada de (Perdigón et al., 2019) para obtener los hietogramas a partir de las precipitaciones diarias. Se emplearon los modelos CHAC y HEC-HMS para simular la respuesta hidrológica de la cuenca. Se comprobó que el software HEC-HMS es más conveniente emplearlo para este tipo de estudio, ya que además de calcular el caudal máximo, ofrece el hidrograma del escurrimiento y el volumen de la avenida y permite preparar la información de entrada a los modelos hidráulicos como el HEC-RAS.

PALABRAS CLAVE: *modelaciones hidrológicas, hietogramas, hidrogramas de escurrimiento*

Study of the Martín Pérez River Basin

ABSTRACT

The issue of urban flooding caused by river overflows is broad and complex. This research addresses the hydrological modeling of the Martín Pérez River. Rainfall data necessary for modeling with CHAC and HEC-HMS were obtained using the SGIA platform. The normalized regional mass curve (Perdigón et al., 2019) was used to obtain hyetographs from daily precipitation data. The CHAC and HEC-HMS models were used to simulate the hydrological response of the basin. It was found that HEC-HMS software is more suitable for this type of study, as it provides the runoff hydrograph and flood volume in addition to peak flow, and allows for the preparation of input data for hydraulic models such as HEC-RAS.

KEYWORDS: *hydrological modeling, hyetographs, runoff hydrographs*

01 INTRODUCCIÓN

El agua se encuentra entre los recursos naturales más importantes con los que cuenta la humanidad, y es el tesoro más preciado al que tienen derecho todos los seres humanos. Se puede encontrar de diferentes maneras en la naturaleza, sin embargo, a lo largo de la historia se ha demostrado que puede resultar un elemento de grave peligro en situaciones extremas.

A medida que transcurre un año tienen lugar épocas de intensas lluvias que en la mayoría de los casos provocan inundaciones considerables mayormente en las zonas cercanas a los ríos, lo que trae consigo, dependiendo de la intensidad de la lluvia, el desbordamiento de los cauces naturales de los ríos. Tomando en consideración estas razones se realizan estudios hidrológicos e hidráulicos de avenidas extremas, para tener un mayor conocimiento de la zona y con esto evitar al máximo los daños que se puedan ocasionar (Cabello, 2021).

En Cuba las inundaciones se asocian, fundamentalmente, a modificaciones que ha sufrido el terreno producto de las malas prácticas agrícolas, tala de árboles, incendios, urbanización, entre otras. Éstas constituyen un

problema medioambiental grave a escala global las cuales afectan grandes extensiones de terreno provocando pérdidas de vidas humanas y severos daños a la economía (Flores, 2013).

La recuperación de los daños provocados por estas suelen ser una tarea ardua, costosa e imposible de acometer en poco tiempo, especialmente para países del tercer mundo. Es por esto que la prevención y la inversión en obras de protección es la alternativa más viable en el enfrentamiento a este flagelo.

Las cuencas actúan como sistemas de procesos y respuestas en donde la escorrentía superficial es su consecuencia más evidente, además de ser responsable de catástrofes y desastres naturales y de numerosos daños relacionados con las avenidas e inundaciones. Simular el comportamiento hidrológico e hidráulico de una cuenca con la ayuda de un modelo matemático cobra gran sentido cuando la información obtenida con el mismo resulta imprescindible para lograr un objetivo difícilmente alcanzable por otros medios menos costosos. Los modelos facilitan la manipulación de las variables que intervienen en el proceso de conversión lluvia-caudal, aportando datos sobre la distribución espacial de la escorrentía superficial y mejorando la calidad de la cartografía temática sobre zonas inundables y zonas con riesgo de inundación.

En el río Martín Pérez, en la zona del Valero, en Guanabacoa, se producen inundaciones debido a las intensas lluvias y al desbordamiento del río, lo que provoca grandes afectaciones a la población que reside en esa zona. Existe la necesidad de realizar el estudio de la cuenca del río Martín Pérez para iniciar el análisis del comportamiento de dicha cuenca. El objetivo de esta investigación es estudiar el comportamiento de la cuenca del río Martín Pérez con dos modelos matemáticos, el CHAC y el HEC-HMS.

02 MÉTODOS

Para la modelación hidrológica de la cuenca del río Martín Pérez se emplean dos software de libre acceso: CHAC (versión 2021) y HEC-HMS (versión 4.12.0). La metodología se estructura en cuatro fases:

- Recopilación y procesamiento de datos de lluvia.
- Obtención de parámetros morfométricos de la cuenca.
- Determinación de los hietogramas de diseño.
- Configuración y ejecución de los modelos hidrológicos.

2.1. Datos de precipitación

Los datos necesarios de lluvia se obtuvieron de la plataforma del Sistema de Gestión de Información del Agua (SGIA) del Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos de Cuba (<https://sgia.hidro.gob.cu/>). De los equipos analizados 3 de ellos tenían la mayor influencia como se muestra en la figura 2.1 (Cuenca Martín Pérez y los pluviómetros de la zona con las áreas de influencia según los polígonos de Thiessen), los cuales son Arroyo Las Vegas, Acueducto Loma de la Cruz y Tele-Correo Guanabacoa. En el SGIA se extraen los datos de dichos equipos de los cuales, sólo se realiza el estudio con el equipo Acueducto Loma de la Cruz (código Plu2300281) ya que éste dispone de los datos necesarios recogiendo información de precipitaciones del periodo contenido entre los años 1965 al 2025. Luego se filtran los datos en el Excel para tener en cuenta en la serie de máximos anuales, las lluvias que excedan los 60 mm en 24 horas. Cuando se superan los 60 mm de lluvia, es más probable que ocurran inundaciones, especialmente en áreas con drenaje deficiente, como es el caso de la zona del Valero.

De esta serie se extrajeron las lluvias máximas de 24 horas para cada año. Dado que el modelo HEC-HMS requiere un hietograma (distribución temporal de la lluvia) y solo se disponía de valores diarios, se empleó la curva de masa regional normalizada para la zona occidental de Cuba por debajo de los 100 m de altitud propuesta por Perdigón et al. (2019). Este patrón permite desagregar la lluvia diaria en láminas acumuladas horarias y, posteriormente, construir los hietogramas de entrada, mostrándose en las figuras 2.2 y 2.3.

La curva de masa normalizada propuesta por Perdigón et al. (2019) es una representación adimensional del patrón temporal de la lluvia, construida a partir del análisis de múltiples eventos ciclónicos. En esta curva, el tiempo se expresa como una fracción adimensional $t^* = t/T$, donde T es la duración total del evento (24 h para lluvias diarias), y la precipitación acumulada se expresa como $P^* = P/P_{total}$, variando ambos entre 0 y 1.

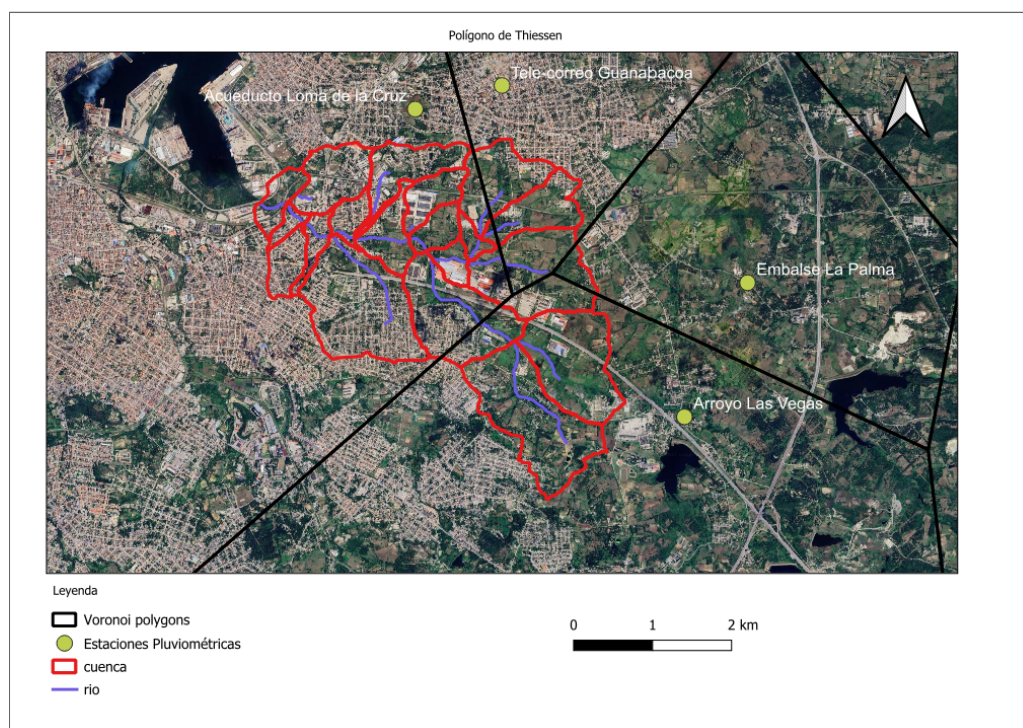


Figura 2.1. Cuenca Martín Pérez y los pluviómetros de la zona con las áreas de influencia según los polígonos de Thiessen.

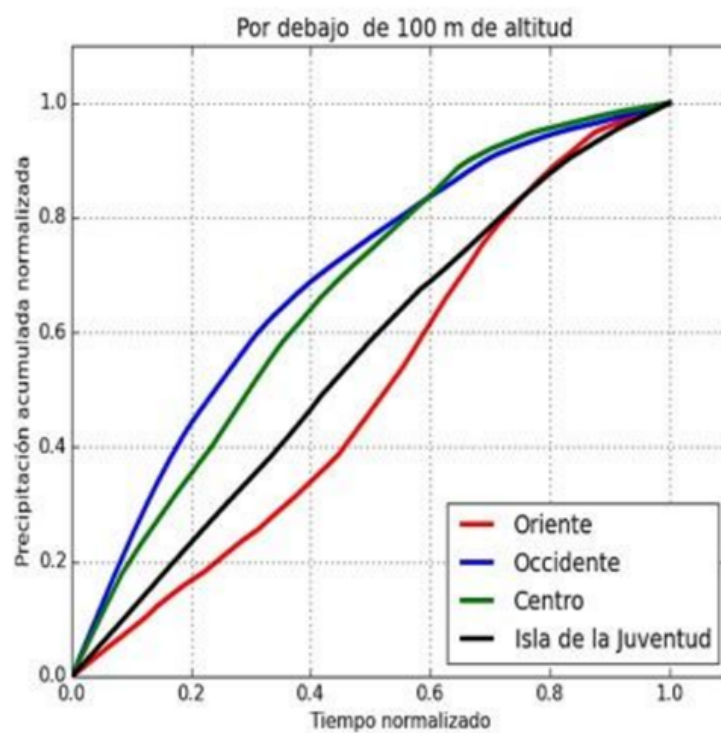


Figura 2.2. Curva de masa normalizada obtenida en el estudio de (Perdigón et al., 2019).

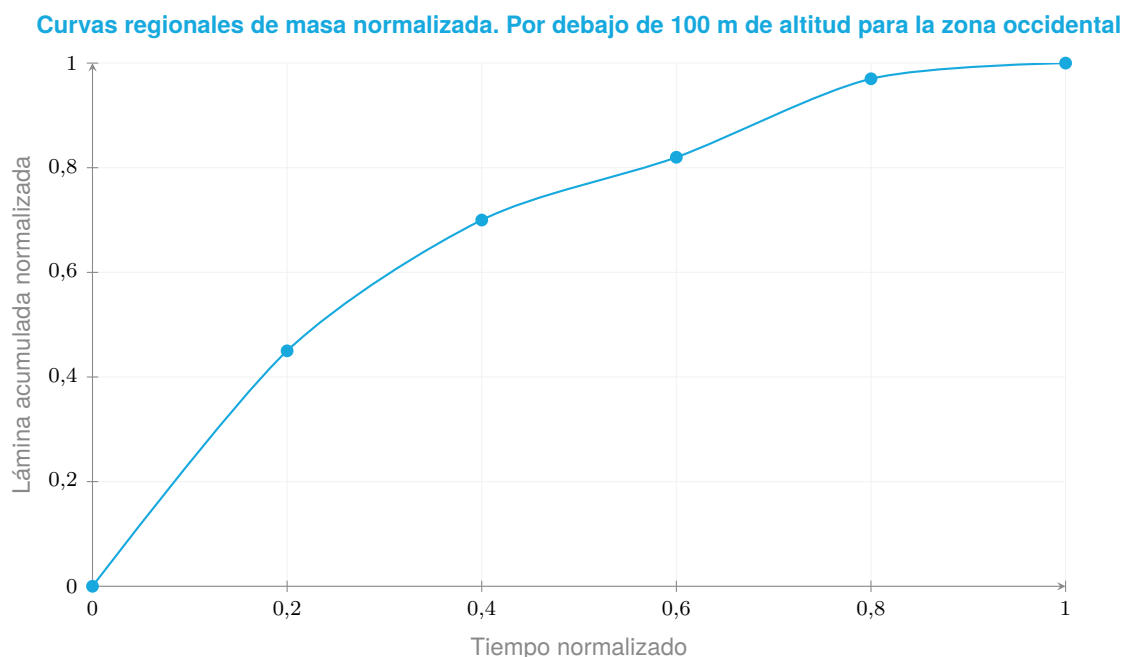


Figura 2.3. Curva de masa normalizada para la zona occidental por debajo de 100 m de altitud.

2.2. Modelación con HEC-HMS

El modelo hidrológico conceptual (MHC) de la cuenca se generó a partir de un Modelo Digital de Elevación (MDE) de celdas de 10×10 metros, siguiendo la metodología descrita por Cruz et al. (2024).

Para simular la respuesta hidrológica de una cuenca, el HEC-HMS utiliza cuatro componentes (Fernández de Córdova, 2021), en la figura 2.4 se muestra un esquema de dicho proceso:

- **Modelo de la cuenca:** es donde se establecen las subcuencas en las que se dividirá la cuenca, así como las características de las mismas (área, número de curva, tiempo de retardo, caudal base).
- **Modelo meteorológico:** calcula la precipitación requerida en una subcuenca. Puede calcular precipitación sólida, líquida y evapotranspiración.
- **Especificaciones de control:** sirve para definir el inicio y fin de la simulación, así como el intervalo de tiempo con el que se realizarán los cálculos del modelo.
- **Datos de entrada:** es la información proveniente de las estaciones de medición de la precipitación y de los caudales, así como datos del embalse y sus componentes cuando sea necesario.

2.3. Obtención del hietograma

Para representar el comportamiento temporal de las precipitaciones, es necesario contar con hietogramas, los cuales pueden obtenerse a partir de las curvas IFD y del estudio de series históricas de lluvias intensas. Un hietograma de diseño se considera como el patrón temporal de la lámina de lluvia.

Se utilizó la curva de masa regional normalizada de Perdigón et al. (2019) para obtener el hietograma de la lluvia. El caso de estudio se ubica en la zona occidental de Cuba, por debajo de los 100 m de altitud (el pluviómetro Loma de la Cruz se encuentra a 5 msnm), lo que permite aplicar la curva de masa normalizada propuesta por Perdigón et al. (2019).

A partir del patrón de comportamiento para esta zona occidental, las autoras proponen convertir esta curva de masa normalizada a láminas reales para lo cual el tiempo se multiplica por 24 h y las láminas de lluvias diarias de los patrones de comportamiento por la lámina total caída en 24 h, en este caso se presenta para 140,4 mm, la cual es la máxima lluvia registrada en el pluviómetro en la fecha del 23 de marzo del 2024 que es la fecha conocida del último evento extremo ocurrido por el testimonio de los pobladores de la zona.

Se procede a realizar el hietograma para un intervalo de tiempo de 0–24 horas, figura 2.5.

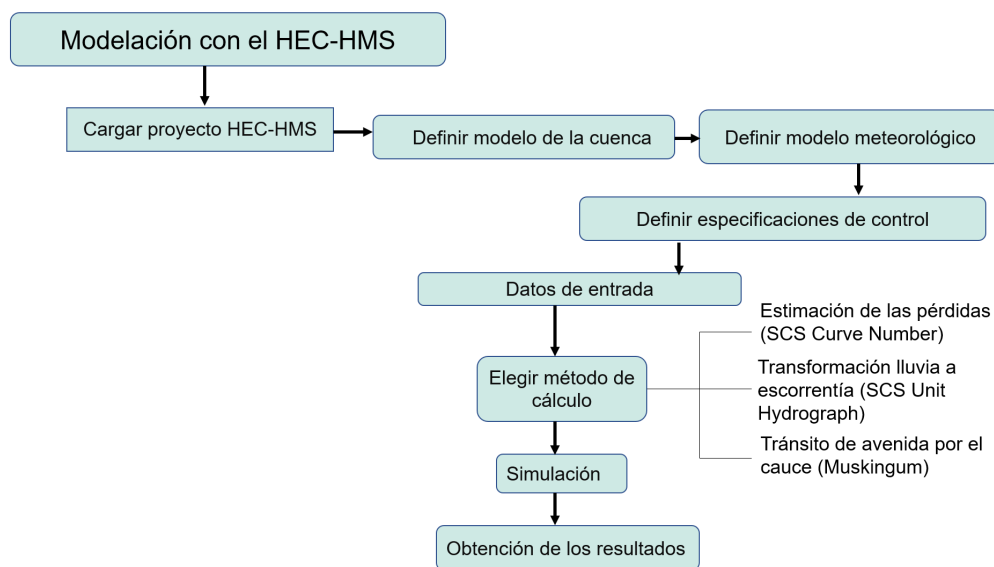


Figura 2.4. Metodología empleada durante el trabajo con HEC-HMS.

El modelo hidrológico de la cuenca requiere de cierta información inicial para poder realizar las simulaciones de los eventos de lluvia en el HEC-HMS.

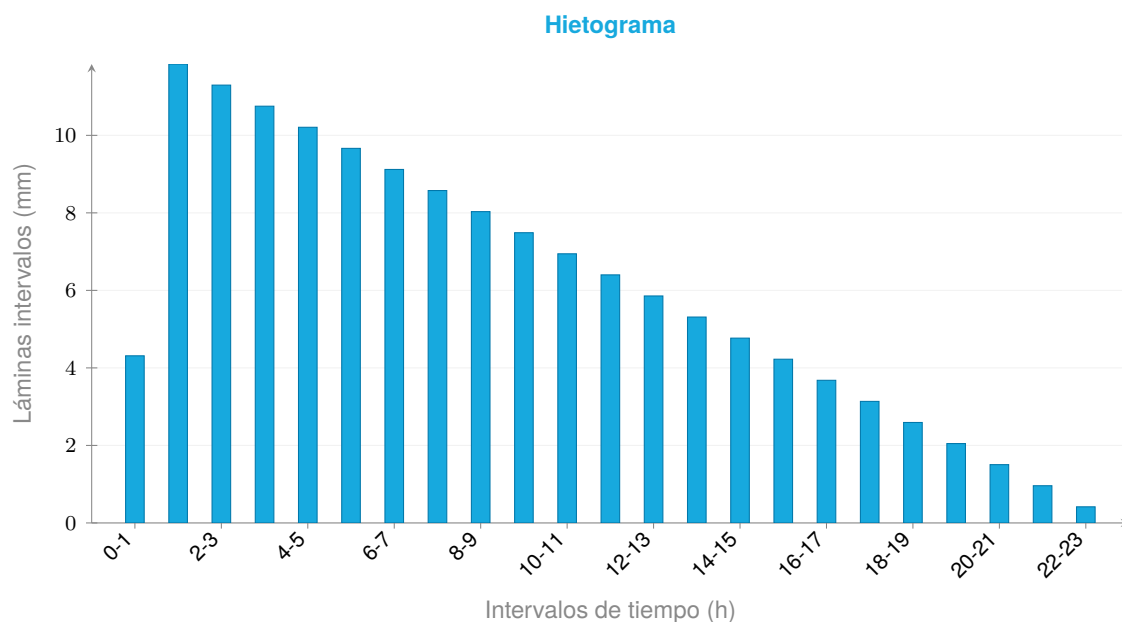


Figura 2.5. Hietograma con intervalo de 2 horas para el río Martín Pérez.

Uno de los métodos que propone el HEC-HMS para calcular la precipitación neta que genera la escorrentía, y que se utiliza en este trabajo, es el método del Número de Curva (NC), propuesto por el Servicio de Conservación de Suelos de los Estados Unidos, actualmente Servicio de Conservación de Recursos Naturales. El 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. Para calcular el CN se emplea la ecuación obtenida por Sánchez (s.f.), a partir del umbral de escurrimiento P_0 :

$$CN = \frac{25400}{254 + \frac{P_0}{0,2}} \quad (2.1)$$

donde P_0 es adimensional.

Para la transformación de la lluvia en escurrimiento, se emplea el método del Número de la Curva del SCS, el cual emplea el parámetro tiempo de retardo (T_{lag}). El tiempo de retardo (T_{lag}) se puede asumir como el 60 % del tiempo de concentración (Rodríguez, 2011), tomando en consideración la recomendación que se hace en Feldman (2000) para cuencas no aforadas.

$$T_{lag} = T_c \cdot 0,6 \quad (2.2)$$

El tiempo de concentración puede calcularse por muchas fórmulas empíricas (Kirpich, Izzard, California, entre otras), por nomogramas, por los datos de lluvias e hidrogramas y haciendo uso de un SIG, como se plantea en Rodríguez (2011). En este caso se empleó la fórmula de California debido a su amplio uso.

$$t_c = 0,02 \cdot \frac{L^{0,77}}{S^{0,385}} \quad (2.3)$$

Donde: t_c – tiempo de concentración en minutos; L – longitud del río en metros; $S = Y_r = \frac{\Delta H}{L}$, pendiente del río en tanto por uno o fracción; ΔH – desnivel del río principal en metros.

2.4. Modelación con CHAC

El software CHAC, basado en el método racional modificado, se utilizó para estimar los caudales máximos. Los parámetros para la modelación con el CHAC son:

- **Área:** esta la proporciona el software HEC-HMS en Parameters/Subbasin Area.
- **Umbral de escorrentía.**

Utilizando la tabla 2.1 presentada por Sánchez (s.f.), se obtiene el umbral de escorrentía.

Tabla 2.1. Tabla utilizada para la obtención del umbral de escorrentía (Sánchez, s.f.)

Tipo de terreno	Pendiente (%)	Umbral de escorrentía (mm)
Rocas permeables	≥ 3	3
	< 3	5
Rocas impermeables	≥ 3	2
	< 3	4
Firmes granulares sin pavimento		2
Adoquinados		1,5
Pavimentos bituminosos o de hormigón		1

Como el uso del terreno de la zona de estudio se puede considerar como pavimentos bituminosos (por ser una zona altamente urbanizada) o de hormigón, el umbral de escorrentía es de 1 mm.

Sánchez (s.f.) plantea que si en los días anteriores a la precipitación estudiada, se produjeron precipitaciones abundantes entonces las abstracciones (retenciones superficiales, infiltración) serán menores, por lo que el valor real de P_0 será menor que el proporcionado. Por el contrario, si los días anteriores no ha llovido nada, el suelo estará seco y todas las abstracciones serán mayores por lo que hay que corregir el P_0 aumentándolo.

03 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El análisis de frecuencia de las lluvias máximas diarias en la estación Acueducto Loma de la Cruz, utilizando la distribución de Gumbel, permitió obtener las láminas de precipitación para los diferentes períodos de re-

torno. La precipitación del evento del 23 de marzo de 2024 (140,4 mm) se asoció a un período de retorno de aproximadamente 4,35 años, lo que indica una probabilidad de ocurrencia relativamente alta (22 %). En la Tabla 3.1 se resumen las lluvias de diseño empleadas en las modelaciones.

Tabla 3.1. Lluvias para los diferentes períodos de retorno

Tr (años)	Probabilidad de ocurrencia	Lluvia (mm)
2	0,5	95,00
5	0,2	147,15
10	0,1	178,40
25	0,04	219,50
50	0,02	243,00
100	0,01	283,11
200	0,005	313,72
500	0,002	354,10

3.1. Análisis de resultados de la modelación hidrológica

Los resultados de las simulaciones con ambos modelos se presentan en la Tabla 3.2. Se observa una tendencia coherente en ambos software: a medida que aumenta el período de retorno (y, por tanto, la lámina de lluvia), el caudal máximo estimado también se incrementa. Sin embargo, se evidencia una diferencia significativa en las magnitudes de los caudales calculados por cada programa. Para la lluvia del 23 de marzo (140,4 mm), el CHAC arrojó un caudal de 160,8 m³/s correspondiente a los 5 años de período de retorno, mientras que el HEC-HMS estimó 33,5 m³/s.

Tabla 3.2. Resumen de los caudales obtenidos para los diferentes períodos de retorno en ambos software

Tr	2	5	10	25	50	100	200	500	Lluvia del 23 marzo
Láminas (mm)	95	147,15	178,4	219,5	243	283,11	313,72	354,1	140,4
CHAC (m ³ /s)	100,5	160,8	196,6	243,5	270,2	315,8	350,5	396,2	—
HEC-HMS (m ³ /s)	21,3	35,5	43,8	54,9	61,4	72,6	80,6	91,5	33,5

La discrepancia mostrada en la Tabla 3.2 entre los software HEC-HMS y CHAC se atribuye fundamentalmente a la diferencia en los enfoques de cálculo de cada modelo. El CHAC implementa el método racional, que estima un caudal pico basado en la intensidad de lluvia promedio para una duración igual al tiempo de concentración de la cuenca. Este método no considera la distribución temporal de la lluvia (hietograma) y asume que la escorrentía se genera de manera uniforme en el espacio y el tiempo, lo que suele resultar en sobreestimaciones, especialmente en cuencas de mayor tamaño o con tiempos de concentración largos (Témez, 1991).

Por el contrario, el HEC-HMS es un modelo de simulación continua a nivel de evento que desagrega la lluvia total en un hietograma. Esto permite modelar la variación de la intensidad de la lluvia a lo largo de la tormenta y, mediante el hidrograma unitario, obtener la respuesta completa de la cuenca, incluyendo no solo el caudal pico, sino también el tiempo al pico, el volumen de escorrentía y la forma del hidrograma. Este enfoque es más robusto y representa de manera más realista la física del proceso de transformación lluvia-escorrentía (Feldman, 2000; Flores, 2013). Para validar esta hipótesis, se realizó un cálculo manual con la fórmula racional utilizando la intensidad máxima horaria derivada del hietograma empleado en HEC-HMS. El caudal obtenido fue cercano a los 160 m³/s, confirmando que la diferencia radica en la metodología de cálculo y no en un error de implementación. En este sentido, el resultado del HEC-HMS se considera más fiable para estudios detallados de inundación.

El hidrograma obtenido con HEC-HMS para el evento de 140,4 mm muestra un caudal pico de 33,5 m³/s que ocurre aproximadamente 8 horas después del inicio de la lluvia. Además del pico, el modelo proporciona información valiosa como el volumen total de la avenida (3,59 millones de m³), dato fundamental para el

dimensionamiento de obras de drenaje o para estudios de laminación de crecidas en embalses.

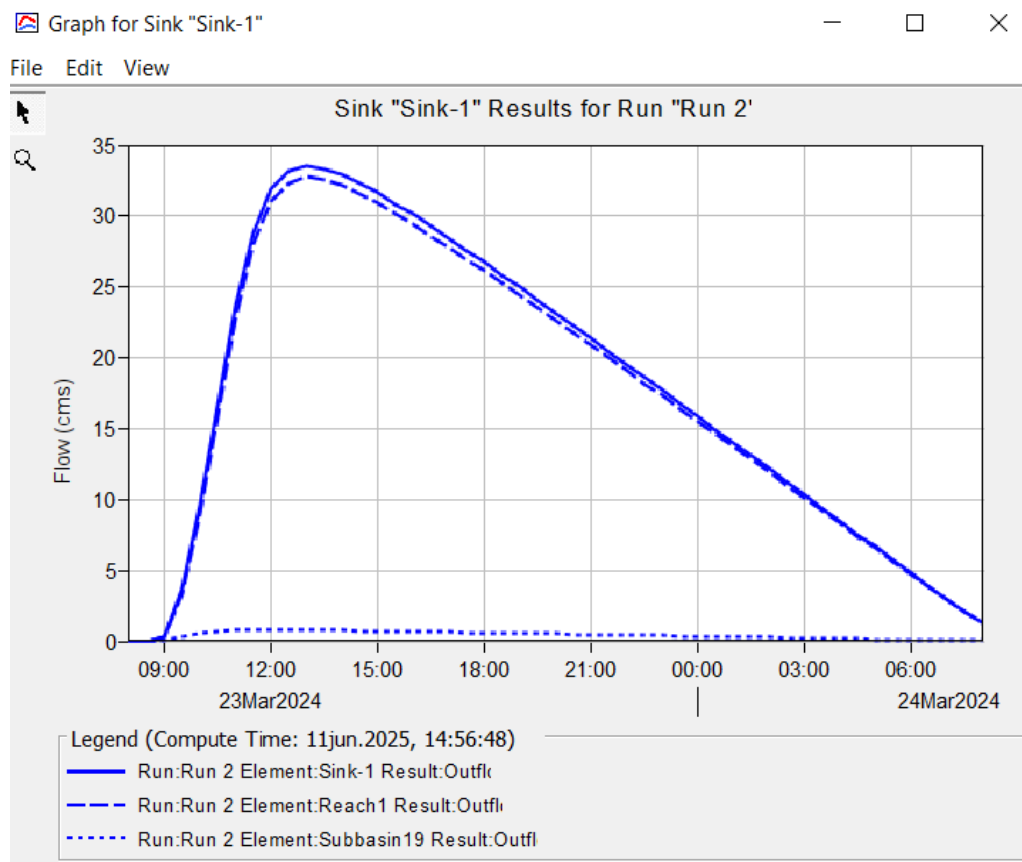


Figura 3.1. Hidrograma resultante de la modelación con HEC-HMS para una lámina de lluvia de 140,4 mm.

El HEC-HMS ofrece una ventaja adicional al permitir la exportación de los hidrogramas resultantes a modelos hidráulicos como el HEC-RAS. Esto posibilita la continuación del estudio para determinar niveles de agua, velocidades de flujo y la posterior elaboración de mapas de inundación, lo que constituye una limitación importante del software CHAC, cuyo alcance se limita a la estimación del caudal máximo. Por lo tanto, a pesar de la utilidad del CHAC para análisis preliminares o académicos, se concluye que el HEC-HMS es la herramienta más conveniente para el estudio de la cuenca del río Martín Pérez, ya que sienta las bases para una evaluación integral del riesgo de inundación.

04 CONCLUSIONES

A partir de la modelación hidrológica realizada en la cuenca del río Martín Pérez y el análisis comparativo de los software empleados, se arriban a las siguientes conclusiones:

1. Se obtuvieron y procesaron satisfactoriamente los datos de lluvias necesarios para la modelación hidrológica de la cuenca del río Martín Pérez, utilizando la plataforma SGIA como fuente primaria de información. La aplicación de la curva de masa regional normalizada para la zona occidental de Cuba permitió, de manera efectiva, la desagregación temporal de las precipitaciones diarias máximas en hidrogramas de diseño.
2. Se elaboró un modelo hidrológico conceptual de la cuenca del río Martín Pérez mediante el software HEC-HMS (v.4.12), el cual quedó correctamente parametrizado para simular la respuesta de la cuenca. Este modelo constituye una herramienta fundamental para la gestión del riesgo, al permitir no solo la estimación de caudales pico, sino también la obtención de hidrogramas completos de avenidas, como el calculado para el evento de 140,4 mm, que mostró un caudal máximo de 33,5 m³/s y un volumen total de escorrentía de 3,59 millones de m³.

3. Se evidenció una marcada discrepancia entre los caudales máximos estimados por el software CHAC (método racional) y el HEC-HMS (modelación con hietograma). Mientras que el CHAC proporciona una estimación rápida, el HEC-HMS ofrece una representación más realista del proceso de transformación lluvia-escorrentía. Para la lluvia de 140,4 mm, se determinó que el caudal máximo más confiable es el de 33,5 m³/s obtenido con HEC-HMS, ya que el CHAC (160,8 m³/s) sobrestima el caudal al no considerar la distribución temporal de la lluvia.
4. Para el caso de estudio de la cuenca del río Martín Pérez y con vistas a un análisis integral del peligro de inundación, el software HEC-HMS resulta ser la herramienta más conveniente y robusta. Su capacidad para generar hidrogramas completos y su compatibilidad para exportar estos resultados a modelos hidráulicos como el HEC-RAS lo posicionan como la opción idónea para continuar con la modelación hidráulica, la delimitación de áreas inundables y la consecuente elaboración de mapas de peligro de inundación para la zona del Valero.

05 REFERENCIAS

- Cruz, D., Rodríguez, D., & Santana, D. (2024). Recopilación de datos del río Martín Pérez. Práctica Laboral N.º 3. Gestión de los Recursos Hidráulicos.
- Feldman, A. D. (2000). *Hydrologic Modeling System HEC-HMS: Technical Reference Manual* (inf. téc.). US Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Center. Davis, CA, USA. <https://www.hec.usace.army.mil/software/hec-hms/documentation.aspx>
- Fernández de Córdova, C. (2021). Modelo lluvia-escurrimiento para la cuenca del río Yanuncay en Cuenca, Ecuador. *Ingeniería Hidráulica y Ambiental*, 42(3), 80-94.
- Flores, L. C. (2013). *Metodología para la modelación distribuida con el software HEC-HMS* [Tesis de Diploma]. Instituto Superior Politécnico “José Antonio Echeverría” (Cujae).
- Perdigón, D., Pérez, A., & Martínez, Y. (2019). Patrones de distribución temporal de lluvias ciclónicas en Cuba estimada por el modelo WRF. *Ingeniería Hidráulica y Ambiental*, 40(3), 17-31.
- Rodríguez, Y. (2011). *Modelación hidrológica de avenidas. Caso de estudio: Cuenca del río Zaza* [Tesis Doctoral]. Instituto Superior Politécnico “José Antonio Echeverría” (ISPJAE).
- Sánchez, J. (s.f.). Cálculo de la precipitación neta mediante el método del SCS [s.f.].

Conflicto de intereses

Los autores declaran que no existen conflictos de intereses.

Contribución de los autores

Jenifer Luis González <https://orcid.org/0009-0007-0127-845X>

Yakelín Rodríguez López <https://orcid.org/0000-0001-8802-6843>