

Estudio hidrológico de la cuenca ubicada al sur de la bahía del Mariel

Dariel Francisco Chang DomínguezE-MAIL: changdariel@gmail.com

Universidad Tecnológica de La Habana “José Antonio Echeverría” (CUJAE). La Habana, Cuba.

RESUMEN

El estudio hidrológico de la cuenca ubicada al sur de la bahía del Mariel en la provincia de Artemisa tiene como objetivo identificar las áreas propensas a inundaciones en la cuenca para la prevención de peligros para la sociedad y economía del territorio. Se hace la caracterización general de la cuenca, así como procesar estadísticamente la calidad de los datos de los pluviómetros cercanos de la cuenca. Se confeccionó los hietogramas para probabilidades de ocurrencia de eventos calibrando para la probabilidad del 8,33 %. Se hizo la simulación hidrológico – hidráulica mediante el software Iber v3.3 confirmando valores entre moderados y altos en el río lo cual implica tomar medidas para no implantar estructuras aledañas y restringir el tránsito por el mismo, así como en la zona costera.

PALABRAS CLAVE: *cuenca, escurrimiento, hietograma, período de retorno, precipitación*

Hydrological study of the basin located south of Mariel Bay

ABSTRACT

The hydrological study of the basin located south of Mariel Bay in the province of Artemisa aims to identify flood-prone areas within the basin to prevent hazards to the territory's society and economy. A general characterization of the basin is carried out, as well as a statistical processing of the quality of data from nearby rain gauges in the basin. Hyetographs were prepared for event occurrence probabilities, calibrated for the 8.33% probability level. The hydrological-hydraulic simulation was performed using the Iber v3.3 software, confirming values ranging from moderate to high in the river, which implies the need to take measures such as avoiding the construction of nearby structures and restricting transit along it, as well as in the coastal zone.

KEYWORDS: *basin, runoff, hyetograph, return period, precipitation*

01 INTRODUCCIÓN

“La modelación hidrológica de las cuencas hidrográficas permite realizar pronósticos de las posibles afectaciones de una zona debido a la ocurrencia de lluvias extremas máximas, es por ello que estudios de este tipo toman auge y se hace uso de herramientas aplicadas de última generación como son los casos de los Sistemas de Información Geográficos (SIG) y los modelos de simulación hidrológica.” (Carreras, 2013, pág. 1)

Los modelos matemáticos son los más difundidos y utilizados en la práctica hidrológica internacional, ya que permiten comprender el comportamiento de los sistemas en situaciones que ocurren en la realidad, y otras que aún no han sucedido. Los modelos de simulación hidrológica se utilizan para estudiar situaciones extremas difícilmente observables en la realidad. Ejemplo de ellos son los efectos de precipitaciones muy intensas y prolongadas en cuencas hidrográficas en su estado natural, o en las que se ha intervenido con obras como canales, represas, diques de contención, puentes, etc. (Carreras, 2013)

En esta investigación se abordará el estudio hidrológico aplicado a la cuenca ubicada al sur de la bahía del Mariel en la provincia Artemisa con el objetivo de prevenir los peligros para la sociedad y economía de la localidad.

Se calcula y mapea las zonas propensas a inundaciones por lluvias intensas para la probabilidad del 8,33 %, así como su calibración. Identificar estas zonas permite tomar decisiones en cuanto a la protección y seguridad de las estructuras existentes y con proyección al futuro para el desarrollo económico del territorio.

02 DESARROLLO

2.1. Materiales y métodos

Límites de la cuenca

Se establece los límites de una cuenca hidrológica es un proceso que implica la identificación de las áreas que drenan hacia un punto específico, como un río, lago o embalse; para lograr este objetivo se necesitan los datos detallados de la topografía, geología y los datos climatológicos de la zona. El análisis del estudio topográfico realizado conduce a la posibilidad de identificar la divisoria de las aguas, que es la línea imaginaria que limita la cuenca. Esta información unida con las herramientas de sistemas de Información Geográfica (GIS) y la ubicación de los pluviómetros disponibles brindados por la plataforma Sistema de Gestión Integral del Agua (SGIA) (Tabla 2.1) permiten un análisis más preciso, que se completa al utilizar el software QGIS, propicio para la modelación de la cuenca de estudio.

A partir del levantamiento topogeodésico en la cuenca ubicada al sur de la bahía del Mariel y desde el parteaguas al sur respectivamente, según los servicios de Geomática se obtuvo la imagen satelital, delimitación del área de la cuenca mediante hojas cartográficas, la ubicación de los pluviómetros más cercanos a la zona de estudio y la creación del modelo digital del terreno con resolución de 10 m x 10 m (Fig. 2.1).

Table 2.1. Coordenadas de las estaciones pluviométricas obtenidas por la plataforma Sistema de Gestión Integral del Agua (SGIA).

Estación pluviométrica	NC	Estado	<i>x</i>	<i>y</i>	Altitud	Tipo Red
Embalse Pinillo	433	Habilitada	317389,82	345844,99	33	Básica
Acueducto Guanajay	390	Habilitada	327382,22	345043,54	106	Básica
Embalse Mosquito	355	Habilitada	323591,43	352650,52	80	Básica

Caracterización morfológica de la cuenca

La cuenca objeto de estudio se localiza entre las coordenadas 22°95'N y 82°74' entre el sur de la bahía del Mariel y al norte del municipio de Guanajay, ocupando un área total de 21,13 km² y un perímetro de 28,92 km (Fig. 2.1). Según tamaño se clasifica como cuenca pequeña ya que su área es menor a 100 km² y exorreica debido a su red de drenaje hacia el mar. Según el Atlas Nacional de Cuba (Instituto de Geografía Tropical [IGT], 2015), la cuenca se distribuye en un 25 % representando la zona costera por medio de llanuras aluviales y manglares, el 50 % de la zona intermedia por colinas bajas con cotas entre 50 y 130 metros sobre el nivel del mar con suelos calcáreos y la zona sur abarcando el 25 % de valles entre montañas con sedimentos cuaternarios. El relieve se encuentra dividido en llanuras costeras con elevaciones de 0 a 20 metros sobre el nivel del mar, formada por depósitos marinos y fluviales, colinas kársticas con cota de 150 metros sobre el nivel del mar, con pendientes del 10 al 15 %, modeladas por procesos de disolución de calizas y valles aluviales representando zonas planas con suelos fértiles, dedicadas a la agricultura (Pérez Aragón, 2003). Se obtuvo otros parámetros esenciales mediante el software HEC-HMS v4.13, los cuales se presentan en la Tabla 2.2.

Análisis de registros históricos de precipitación en la cuenca

Según las estaciones pluviométricas ubicadas en el terreno según la figura 2.1 se encuentran fuera del área de la cuenca, no obstante, se utilizaron dichos pluviómetros denominados Embalse Pinillo, Embalse Mosquito y Acueducto Guanajay, por la cercanía al área de estudio como se mostró anteriormente en la Tabla 2.1. Para el análisis del comportamiento de las precipitaciones se adquirió la información a partir de la plataforma Sistema de Gestión Integral del Agua (SGIA) <https://sgia.hidro.gob.cu>, la cual contiene los registros históricos de

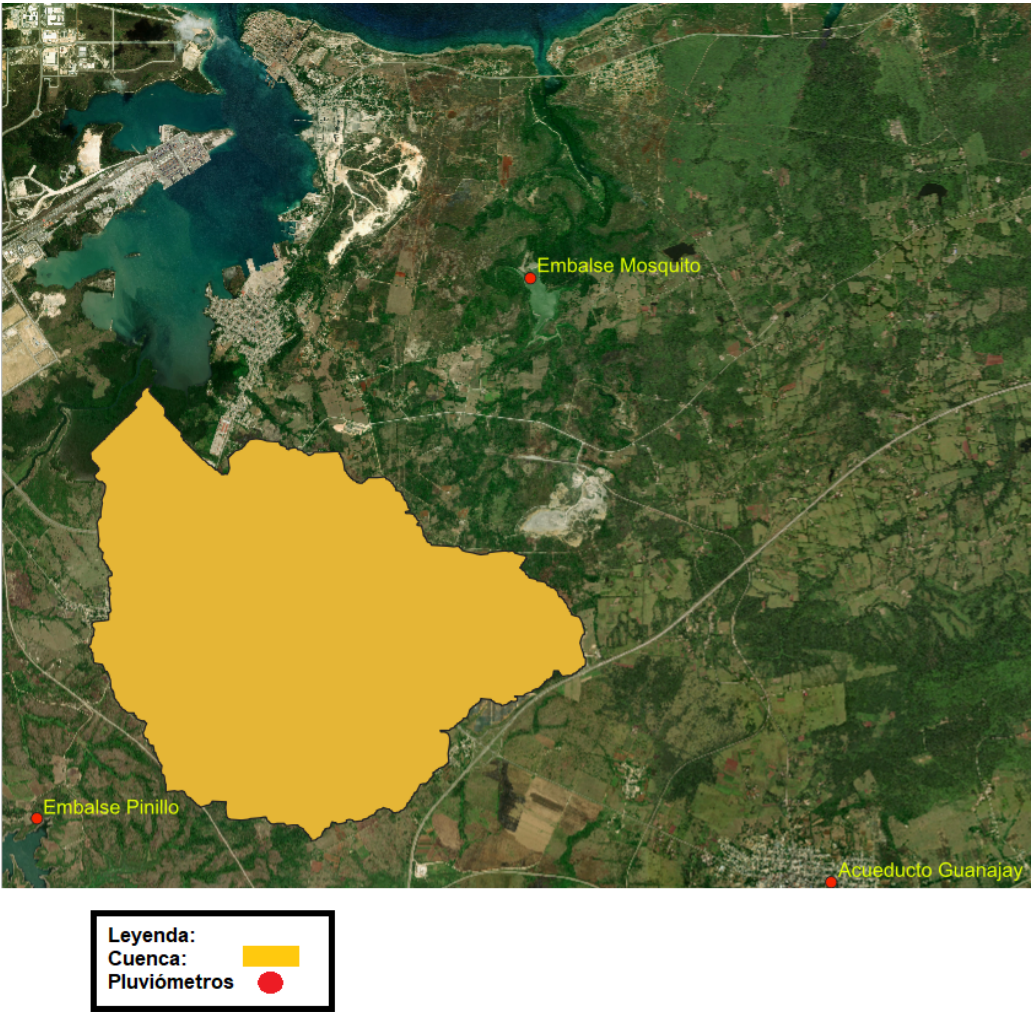


Figure 2.1. Ubicación geográfica de la cuenca al sur de la bahía del Mariel en la provincia de Artemisa.

Table 2.2. Características extraídas a partir del modelo hidrológico mediante el software HEC-HMS v4.13.

Parámetro	Valor
Longitud máxima del cauce principal (km)	11,5486
Pendiente del cauce principal (m/m)	0,01134
Longitud de la trayectoria del flujo centroidal (km)	6,68079
Pendiente de la trayectoria del flujo centroidal (m/m)	0,00359
Longitud de la trayectoria del flujo (km)	8,66145
Pendiente de la trayectoria del flujo (m/m)	0,00716
Pendiente de la cuenca (m/m)	0,11011
Relieve de la cuenca (m)	131
Relación de relieve	0,01134
Relación de elongación	0,44922
Densidad de drenaje (km/km²)	1,70576

los acumulados diarios de las estaciones en la provincia de Artemisa para el período comprendido (julio/2006 - diciembre/2025). Si en las series históricas se observa datos faltantes, se procede al completamiento de los datos de lluvia por medio de los pluviómetros aledaños que presentan la información suficiente en el período analizado aplicando una interpolación de tipo polinómica para rellenar los registros. Posteriormente se calcula la serie de lluvia histórica distribuida para la cuenca mediante el software HEC-HMS v4.13 por el método denominado “Distancia Inversa” introduciendo las series correspondientes a cada pluviómetro con sus coordenadas.

Cálculo de la serie de precipitación máxima diaria anual

Se determina la serie de precipitaciones máximas diaria anual a partir de la extracción de los valores máximos diarios por año en el período analizado según la precipitación distribuida en la cuenca.

Ajuste a una distribución de probabilidad

Se realiza el análisis de homogeneidad a la serie de lluvia histórica por las diferentes pruebas de hipótesis tales como t-Student, Cramer, Spearman, Helmer, Secuencias o Corridas y Kruskal-Wallis. Posteriormente se determina cual es la función de probabilidad que más se ajusta mediante la prueba de bondad de ajuste “Smirnov-Kolmogorov” a la serie de lluvia histórica.

Estimación de la precipitación máxima probable (PMP)

Se aplica la metodología propuesta por Campos Aranda (1992) acorde a la función de probabilidad de mejor ajuste y posteriormente se aplica la corrección del intervalo fijo (CIF) partiendo del estudio de miles de estaciones de datos de lluvia, Weiss citado por Campos Aranda (1992) encontró que los resultados de un análisis probabilístico llevado a cabo con lluvias máximas diarias anuales tomadas en un único y fijo intervalo de observación, para cualquier duración comprendida entre 1 y 24 horas, al ser incrementados en un 13 % conducían a magnitudes más aproximadas a las obtenidas en el análisis basado en lluvias máximas verdaderas y entonces, con tal corrección la lluvia representativa se convierte en lluvia máxima en 24 horas (para determinado período de retorno).

Planos et al. (2011) en su estudio de grandes e intensas precipitaciones en el archipiélago cubano, establece el coeficiente de reducción de la precipitación no al área de la cuenca, sino al área donde se distribuye. Dicho coeficiente tiene un valor significativo para la interpretación de las relaciones espaciales. Para el archipiélago cubano, Planos et al. (2011) plantean coeficientes de reducción (CR) máximos y mínimos en función del área donde se distribuye la precipitación. En este sentido:

$$CR_{min} = \exp(-0,0008 A^{0,8}) \quad (2.1)$$

$$CR_{max} = \exp(-0,00046 A^{0,8}) \quad (2.2)$$

Por tanto, en este estudio la corrección a la PMP se ha concebido formalmente como:

$$PMP = CIF \cdot CA \cdot PMP = 1,13 \cdot \frac{CR_{min} + CR_{max}}{2} \cdot PMP \quad (2.3)$$

Obtención de las curvas Intensidad -- Frecuencia -- Duración (IFD)

Según las relaciones o cocientes a la lluvia de 24 horas se emplean para duraciones de varias horas. Campos Aranda (1992) propone los siguientes cocientes (Tabla 2.3):

Table 2.3. Valores para las relaciones a la lluvia de duración 24 horas. Fuente: Campos Aranda (1992).

Duración (h)	1	2	3	4	5	6	8	12	18	24
Cociente	0,30	0,39	0,46	0,52	0,57	0,61	0,68	0,80	0,91	1,00

Estos cocientes se aplican a la PMP para los períodos de retorno, obteniéndose las precipitaciones para diferentes

duraciones. Posteriormente se calculan los valores de intensidad a partir de la división entre la precipitación y la hora que le corresponde obteniéndose las curvas.

Se obtiene la ecuación que describe como es la intensidad de las precipitaciones teniendo en cuenta el comportamiento de las curvas IFD ajustándose a los tiempos de retorno según el método de Aparicio:

$$I = \frac{k \cdot T^a}{D^b} \quad (2.4)$$

Siendo: I la intensidad (mm/h); T el tiempo de retorno (años); y k , a y b los parámetros de ajuste.

Obtención de hietogramas de precipitación

Para la obtención del hietograma de la precipitación se empleó el método de la intensidad instantánea desarrollado por Keifer and Chu (1957) citado y analizado en detalle por Chow et al. (1994). Los hietogramas de precipitación son obtenidos a partir de la expresión de intensidad descrita anteriormente en función de la duración de la tormenta y los períodos de retorno. Para lograr una mayor confiabilidad y corrección de estos hietogramas se procede a la calibración de un modelo hidrológico adaptable a la cuenca mediante el software HEC-HMS v4.13. Para el procedimiento de la calibración se adquirió los caudales horarios por la plataforma Geoglows <https://hydroviewer.geoglows.gob.org> primeramente seleccionando el cauce aguas abajo de la bahía y automáticamente sale una interfaz con el código que lo identifica (Fig. 2.2).

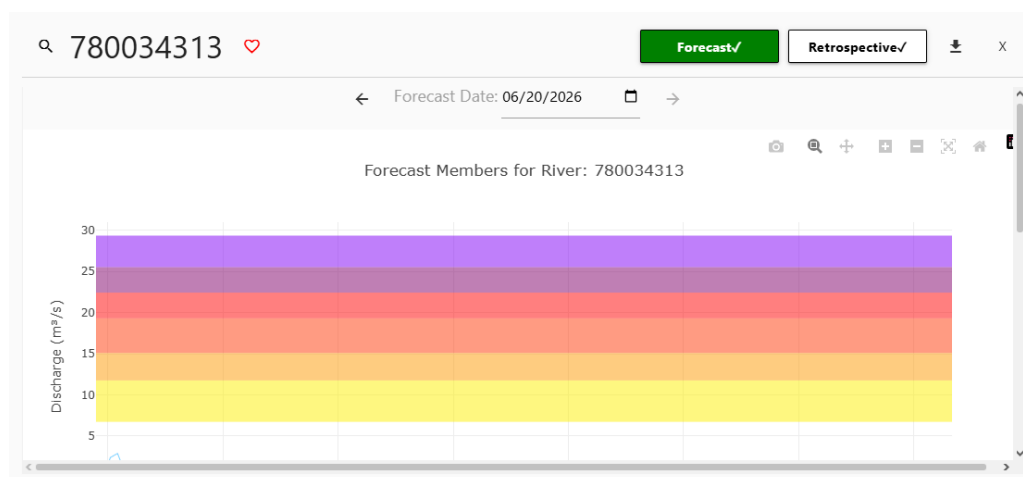


Figure 2.2. Código del cauce aguas abajo de la cuenca al sur de la bahía del Mariel por la plataforma Geoglows.

Posteriormente se accede a los datos horarios retrospectivos del cauce de descarga hacia la bahía (Fig. 2.3) por una hoja de código por medio del siguiente vínculo en el período analizado: https://colab.research.google.com/drive/1eYhmjL8TV9VATyYk_w6o5EJeS-naGK1D?usp=sharing

Según la figura anterior podemos observar que los dos eventos extremos máximos de precipitación ocurrieron en el año 2008 y 2020, lo cual indica un tiempo de retorno de 12 años resultando propicio el análisis del período (julio/2006 - diciembre/2025).

Según la figura anterior seleccionamos los caudales horarios del mayor evento extremo registrado en 24 horas y calibramos mediante el software HEC-HMS v4.13 los parámetros denominados tiempo de retraso (Lag time) y la Curva Número (CN) declarando un intervalo (Tabla 2.4) por el método simplex y ajustando el hietograma generando un escurrimiento similar al observado para el completamiento de la calibración y validación del modelo hidrológico.

Determinación de las zonas de inundación

Para determinar las zonas de inundación de la cuenca en estudio se utilizará el software Iber. Es un software de simulación numérica desarrollado en España, diseñado específicamente para modelar flujos en ríos y áreas inundables con la aplicación de las ecuaciones de Saint-Venant de forma bidimensional para flujo no permanente

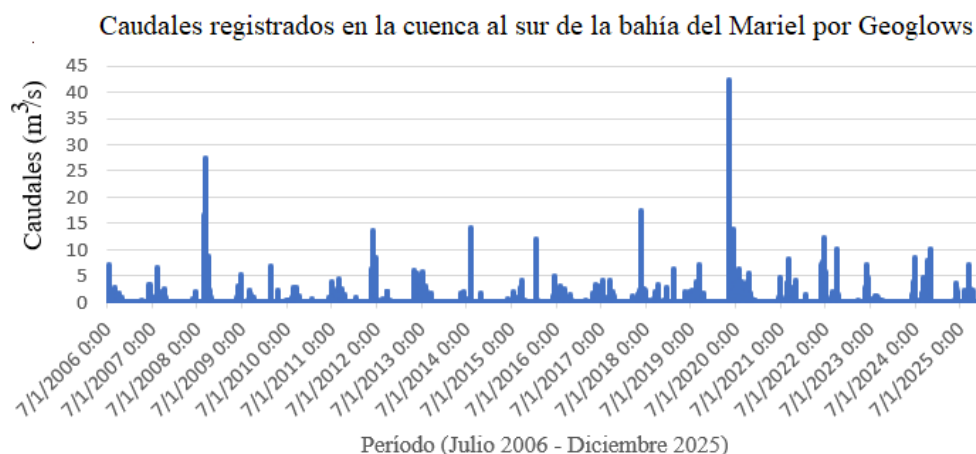


Figure 2.3. Caudales registrados en la cuenca al sur de la bahía del Mariel en el período analizado (julio/2006 - diciembre/2025).

Table 2.4. Valor inicial y extremos de las variables a calibrar mediante el software HEC-HMS v4.13.

Parámetro	Valor inicial	Valor mínimo del intervalo	Valor máximo del intervalo
Curva Número (CN)	84	50	99
Tiempo de retraso (Lag time)	88,58	0	3000 minutos

basándose en las expresiones de la conservación de la masa y momentum.

Para la configuración del modelo hidrológico se representó la superficie del terreno, el mapa de uso de suelo para introducir los coeficientes de rugosidad de Manning acorde a los diferentes elementos, la malla bidimensional con resolución 10 m x 10 m y 155282 nodos para realizar cálculos numéricos (Fig. 2.4) y se estableció los límites del área de estudio, como zonas de entrada y salida del flujo. Se establece una modelación en régimen no estacionario considerando escorrentía superficial, estado del cauce seco y poca infiltración en áreas verdes para un evento lluvioso con período de retorno de 12 años en 24 horas, mediante la aplicación del hietograma adecuado y declarando una condición de salida analizando el comportamiento de la elevación del mar dentro de la bahía alcanzando una máxima elevación de 0,67 m (Fig. 2.5) información registrada actualmente en aplicaciones climáticas en la provincia de Artemisa.

2.2. Resultados

Según las series históricas adquiridas por las estaciones pluviométricas, aspectos abordados en la sección de materiales y métodos, se hace el completamiento de estas y según las coordenadas de cada estación se aplica el método denominado “Distancia Inversa” mediante el software HEC-HMS v4.13 y se obtiene la serie histórica diaria distribuida en toda la cuenca (Fig. 2.6) desde el período (julio/2006 - diciembre/2025).

En la figura 2.6 se aprecia en los registros históricos diarios de las estaciones pluviométricas valores máximos de precipitación entre 180,07 y 235,37 mm en noviembre del año 2006 y en junio del año 2012. Estos valores máximos de precipitación registrados por las series anteriores tienen referencia con respecto a valores reportados por la plataforma EcuRed como eventos meteorológicos relevantes en Artemisa en el municipio Bauta con un acumulado de 136,2 mm y por el centro de pronósticos del Instituto de Meteorología (INSMET) en el año 2012 como fuertes e intensas lluvias en Artemisa en la Presa Pinillo en Mariel con 249 mm y en la Empresa de Aprovechamiento de Recursos Hidráulicos de Artemisa con 201 mm.

La obtención de las precipitaciones máximas diarias anuales es fundamental en dicho estudio para el análisis de las inundaciones a la cuenca de referencia. De igual forma será obtenida la precipitación máxima probable (PMP) para el período de retorno de 12 años para una duración de 24 horas de lluvias intensas, obteniéndose

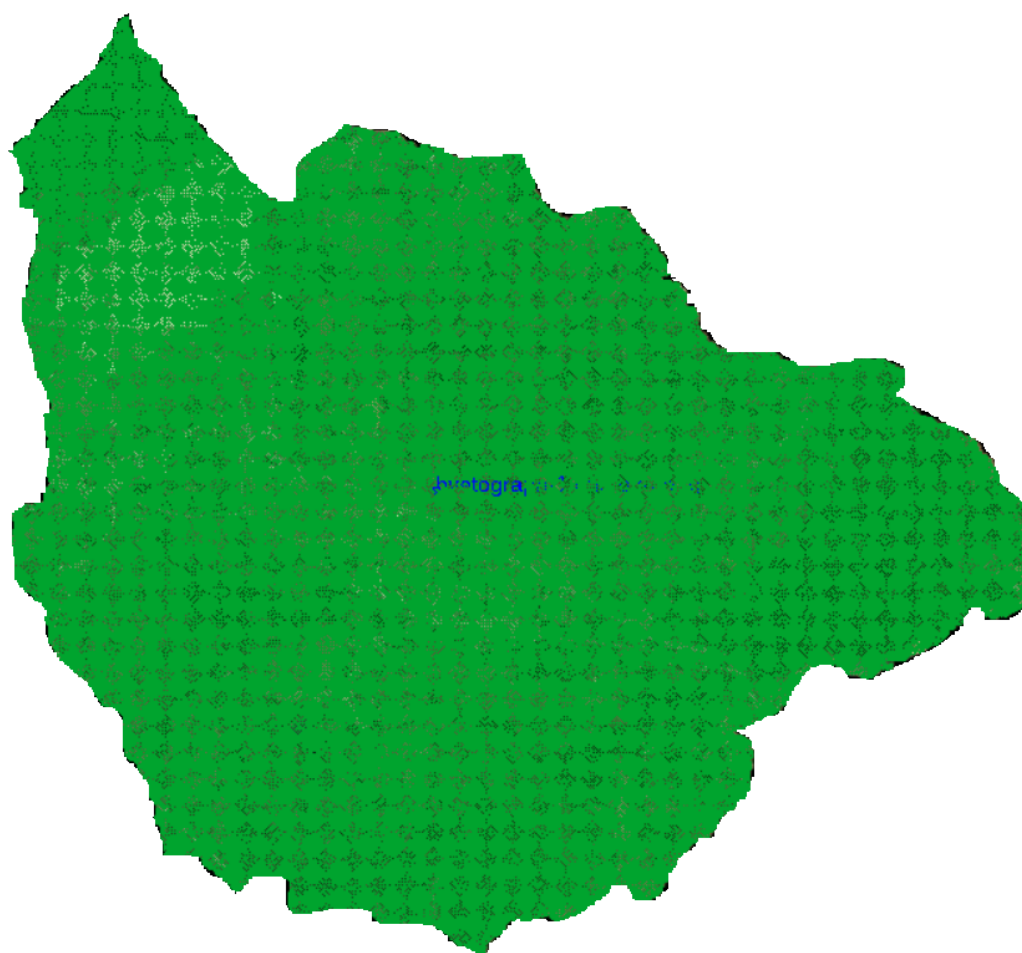


Figure 2.4. Malla bidimensional declarada en la cuenca al sur de la bahía del Mariel.

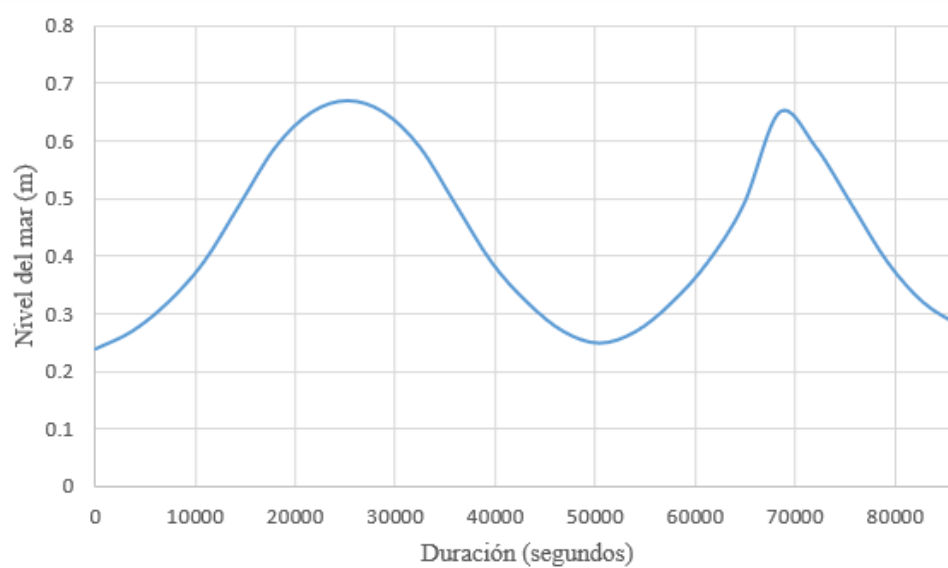


Figure 2.5. Comportamiento máximo del nivel del mar al sur de la bahía del Mariel.

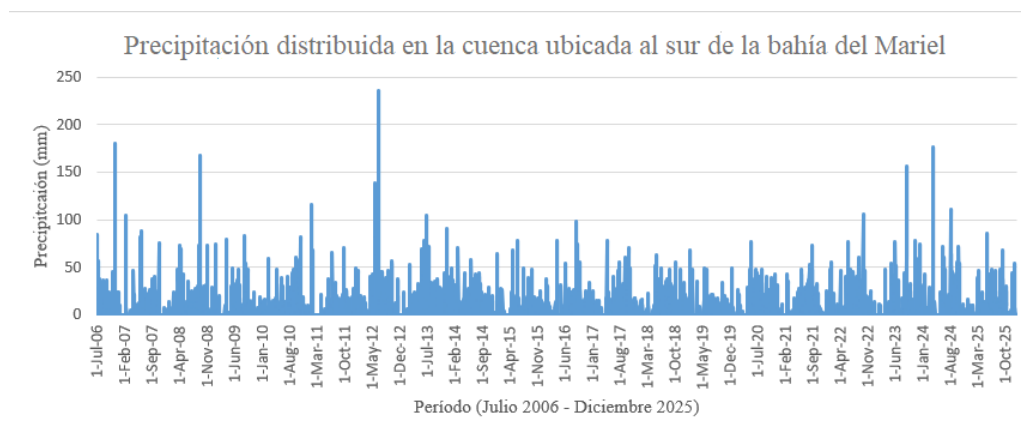


Figure 2.6. Precipitación diaria distribuida en la cuenca ubicada al sur de la bahía del Mariel.

finalmente las curvas de Intensidad – Frecuencia – Duración (IFD) con el propósito de diseñar sistemas de drenaje adecuados para evacuar los escurrimientos calculados para la protección contra las inundaciones en los poblados cercanos al cauce según las normas cubanas de drenaje.

Se determinó la serie de precipitaciones máximas diaria anual (Fig. 2.7) según la sección de materiales y métodos descrita anteriormente.

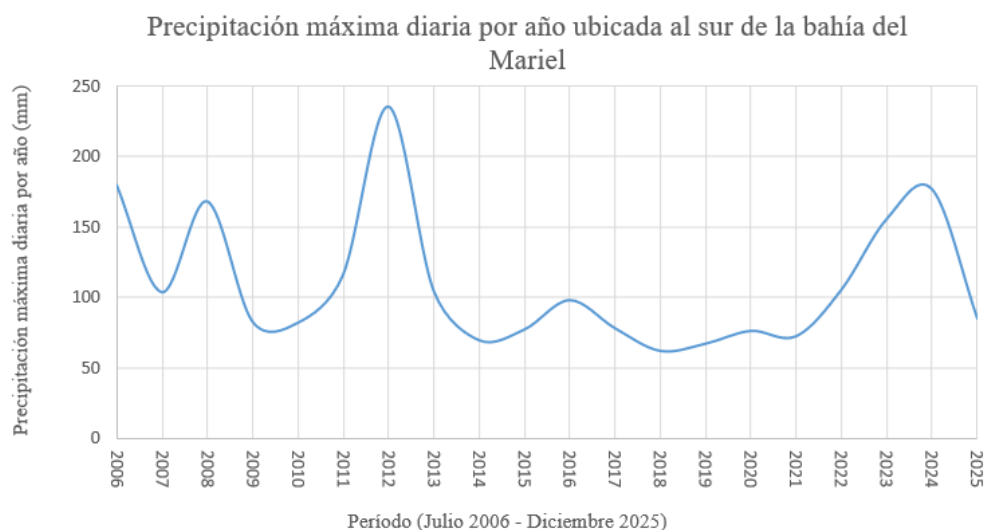


Figure 2.7. Precipitación máxima diaria por año en la cuenca ubicada al sur de la bahía del Mariel.

De la figura anterior se obtiene el valor medio de la serie siendo 42,41 mm con una desviación estándar de 32,73 mm. Se puede decir que la serie anual es generalmente la más utilizada, debido primeramente a su rapidez y facilidad de integración, pero además tal serie representa una base teórica sólida para la extrapolación de los eventos, más allá del intervalo de observación, a través del concepto de Período de Retorno según Campos *et al.* (1998).

De acuerdo con Chow *et al.* (1994), una distribución de probabilidad es una función que representa la probabilidad de ocurrencia de una variable aleatoria. Mediante el ajuste a una distribución de un conjunto de datos hidrológicos, una gran cantidad de información probabilística en la muestra puede resumirse en forma compacta en la función y en sus parámetros asociados. Según la serie histórica que se tiene comprende las lluvias máximas en un período de 20 años para hacer el análisis de homogeneidad de la serie y determinar la función de probabilidad que mejor se ajusta.

Se le realizó el análisis de homogeneidad a la serie de lluvias histórica por las pruebas de hipótesis y arrojó como resultado ser homogénea por t-Student, Cramer, Spearman, Helmer, Secuencias o Corridas y Kruskal-Wallis. Seguidamente se procedió al análisis exploratorio de la función probabilística más representativa, ajustándose a la distribución Log-Normal la cual puede expresarse formalmente como:

$$f(y) = \frac{1}{\sigma_y \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{y - \mu_y}{\sigma_y} \right)^2} \quad (2.5)$$

Siendo $\mu_y = 2$ y $\sigma_y = 0,162$ parámetros ajustados.

Para caracterizar los registros anuales de las lluvias máximas diarias de la cuenca, por intercomparación se seleccionaron los máximos absolutos de la cuenca y hacer una estimación más realista de los parámetros que ajustan la distribución probabilística. En la figura 2.8 se muestran los ajustes correspondientes.

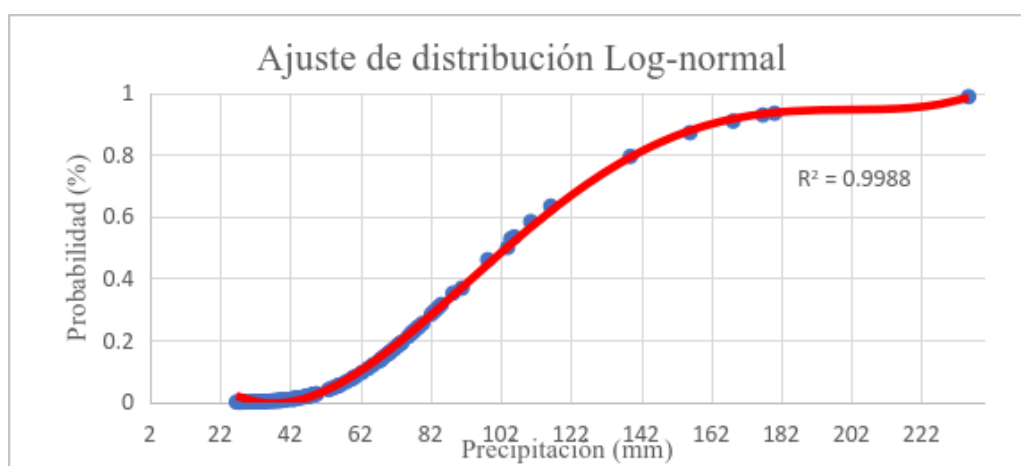


Figure 2.8. Ajuste de la distribución Log-Normal para la serie máxima diaria por año en la cuenca.

Acorde con Chow et al. (1994), así como Sarkar and Maity (2020), la PMP es la mayor lámina de precipitación para una duración dada, meteorológicamente posible para una cuenca o un área de tormenta específica en una ubicación particular y en un momento particular del año, sin considerar las tendencias climáticas a largo plazo. Según la metodología propuesta por Campos Aranda (1992) para la distribución Log-Normal, se propone la ecuación básica para la estimación de la PMP:

$$\log(X_{PMP}) = \mu_y + Z_y \sigma_y \quad (2.6)$$

donde X_{PMP} es la estimación de la PMP para una ubicación (serie creada) particular en la cuenca, μ_y es la media logarítmica de la serie de lluvias máximas diarias de M años, σ es la desviación estándar logarítmica y Z_y es el factor de frecuencia para esa ubicación y $F(x)$ es el cuantil inverso de la probabilidad p (en este caso $p = 1 - \frac{1}{T}$ siendo T el período de retorno en años), el cual se calcula a partir de la distribución de probabilidades ajustada en la sección anterior.

A partir de la metodología en la sección de materiales y métodos la serie de registros anuales de lluvias máximas diarias por año es aplicada al método propuesto por Campos Aranda considerando las correcciones planteadas, observándose su tendencia en la figura 2.9. En este caso el área de la cuenca es 21,13 km² observándose que la precipitación máxima probable es 190 mm para un tiempo de retorno de 12 años.

Las curvas IFD entre múltiples aplicaciones facilitan que los diseños ingenieriles de obras civiles y en particular las hidráulicas sean más confiables (Gutiérrez et al., 2015 y Balbastre, 2018). Constituyen una herramienta de análisis y planificación en el corto mediano y largo plazo.

Se obtuvo la ecuación que describe como es la intensidad de las precipitaciones teniendo en cuenta el comportamiento de las curvas IFD ajustándose a los tiempos de retorno según el método de Aparicio y la representación de la curva para el tiempo de retorno de 12 años:

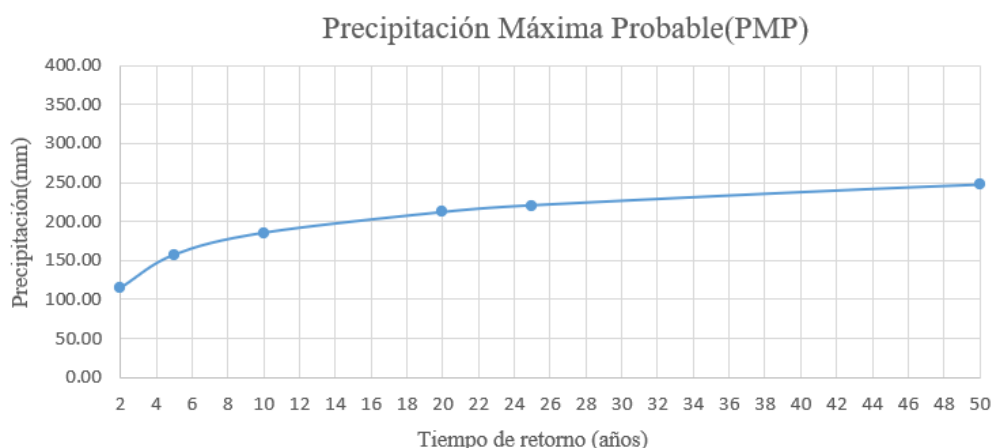


Figure 2.9. Valores de la PMP para diferentes períodos de retorno.

$$I = \frac{432,11 \cdot T^{0,1868}}{D^{0,5902}} \quad (2.7)$$

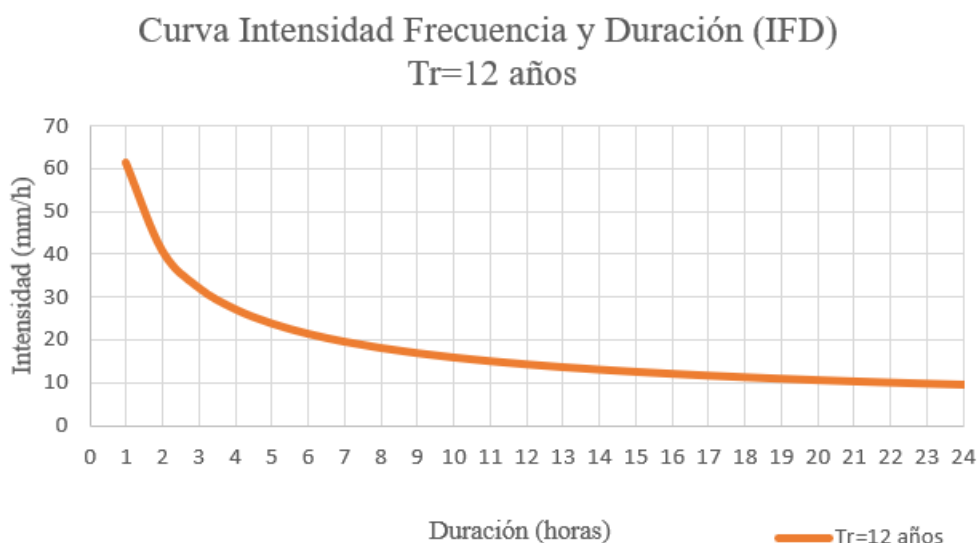


Figure 2.10. Curva IFD de la serie de precipitación máxima diaria para el tiempo de retorno 12 años.

Según estudios realizados con respecto a la región occidental de Cuba las lluvias (convectivas) con alta intensidad y corta duración son generadas en la etapa de verano por tormentas locales y huracanes. Los hietogramas representan picos abruptos de alta intensidad en cortos períodos de tiempo provocando inundaciones repentinas, planteándose la distribución de la lluvia con picos máximos entre la segunda y tercera hora transcurrido dicho evento según plantea Alfonso, A. P. (2018) y García, E. (2020), es por ello que se aplica las mismas condiciones teniendo en cuenta los aspectos antes abordados.

Se va ajustando el hietograma para el tiempo de retorno de 12 años en el proceso de calibración para ajustar el modelo hidrológico hacia la cuenca de estudio mediante los parámetros declarados en la sección de materiales y métodos fijando los valores del hietograma (Fig. 2.11).

Se seleccionó el evento ocurrido con fecha 11 de mayo del año 2020 con una duración de 24 horas, el cual llegó a reportar un caudal máximo de 42,25 m³/s y se realizó una primera simulación arrojando valores iniciales para

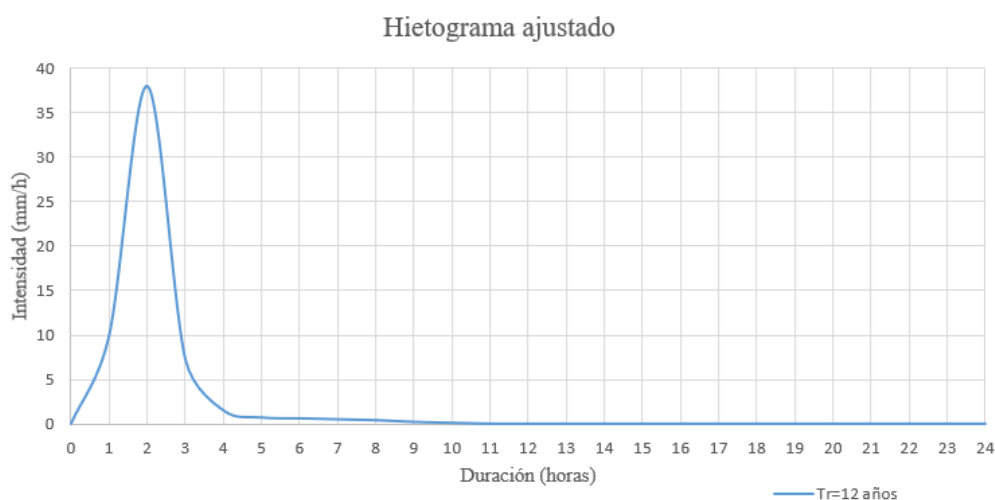


Figure 2.11. Hietograma instantáneo.

las variables como la Curva Número (CN) a un valor de 94,4 y tiempo de retraso (Lag time) a un valor de 272 minutos. Sin embargo, los caudales fueron ajustados cada vez más debido a una serie de simulaciones (Tabla 2.5) por medio de la variación de las dos variables antes descritas mediante el software HEC-HMS v4.13 llegando a un coeficiente de correlación de 0,9714 arrojando valores de caudales similares a los observados (Fig. 2.12) permitiendo la validez del hietograma antes propuesto.

Table 2.5. Simulaciones para calibrar las variables declaradas mediante el software HEC-HMS v4.13.

Tiempo de retraso (Lag time)	Curva Número (CN)	R^2
272 minutos	94,4	0,9537
277 minutos	95	0,9708
280 minutos	96	0,9714

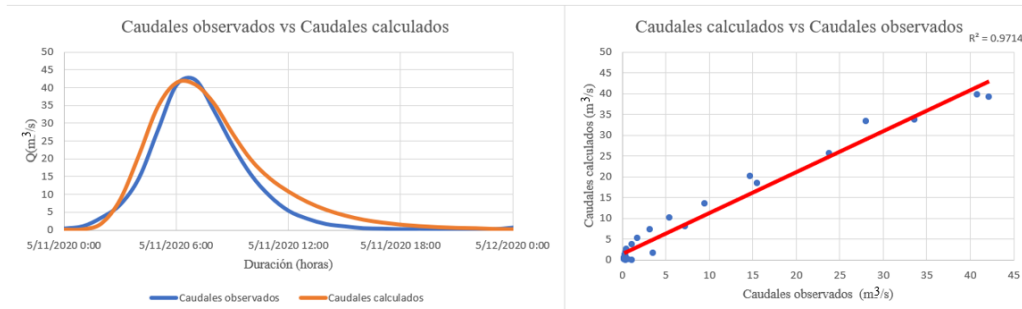


Figure 2.12. Calibración del modelo hidrológico para $T_r = 12$ años, Lag time = 280 minutos y CN = 96.

En la cuenca cuando se aplica la modelación hidrológica-hidráulica pueden observarse las áreas de inundación dentro de la zona de estudio. Estas áreas permiten observar la variabilidad en la profundidad de circulación del escurrimiento superficial. La zona de riesgo es detectada por el aumento de la profundidad de circulación en el transcurso del cauce “Cajío” producto del escurrimiento superficial aumentando la profundidad de circulación entre 3,1 y 4,2 m con velocidades que oscilan entre 0,4 y 0,5 m/s en la hora más crítica de duración para la probabilidad de ocurrencia del 8,33 % del evento alertando a los pobladores del peligro al estar cerca del cauce (Fig. 2.13).

Se declaró dos secciones en el mapa de calado de la cuenca para la obtención de la profundidad de circulación del cauce en las zonas más próximas a los poblados para el período de retorno de 12 años (Fig. 2.14) alcanzando valores entre 2,07 y 3,2 m proponiendo el diseño de sistemas de drenaje que evacuen como caudal máximo 3 m³/s.

Varios autores coinciden en tomar el criterio de peligrosidad como el producto de la velocidad por la profundidad, es decir este valor se le conoce en la literatura referente al tema como producto número (product number). En este sentido FEMA (1979), County (199), FHWA (2001) y Gómez *et al.* (2008) coinciden en que valores mayores a 0,5 m²/s indica inundación peligrosa, con daños a infraestructura rural y la inestabilidad de los pobladores transitar por las zonas bajas lo cual indica el grado de peligrosidad entre alto y moderado en el cauce (Fig. 2.15).

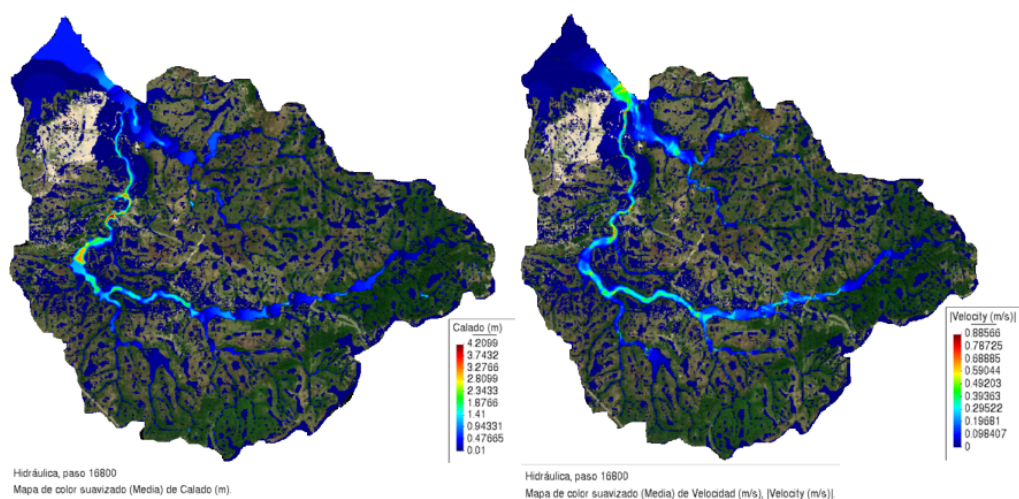


Figure 2.13. Niveles de inundación y velocidades transcurridas 4 horas y 40 minutos del evento, para un tiempo de retorno de 12 años en la cuenca “Cajío”.

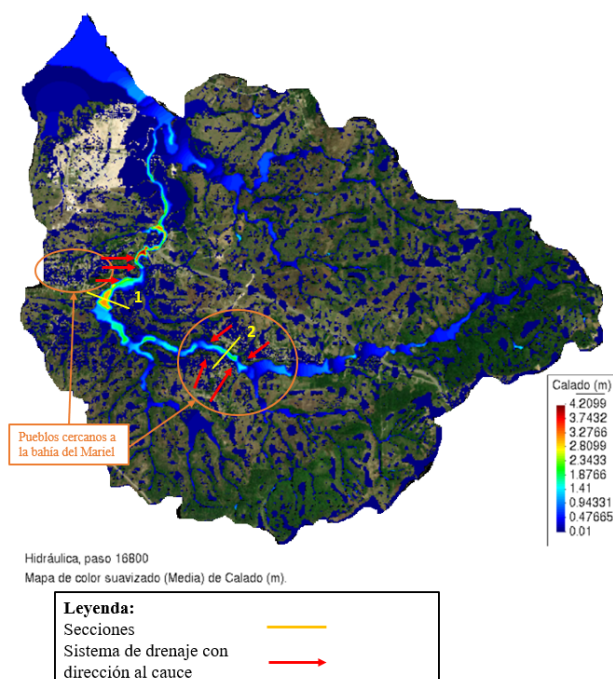


Figure 2.14. Nivel de inundación máxima en la sección 1 con cota máxima del agua de 13,23 m y en la sección 2 con cota máxima de agua de 22,2 m en la cuenca ubicada al sur de la bahía del Mariel.

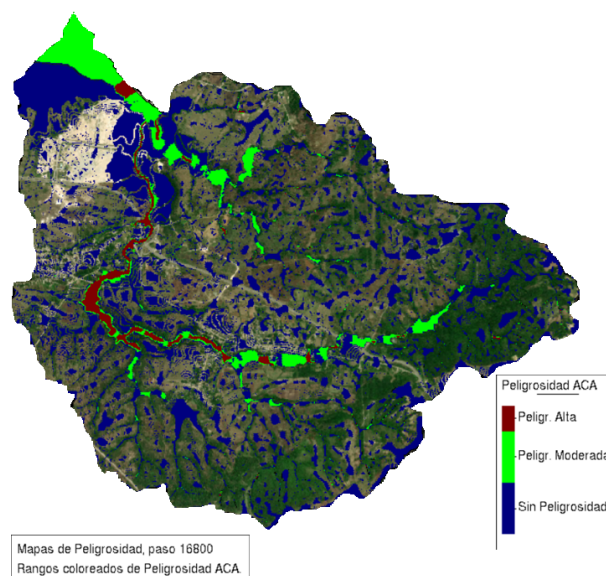


Figure 2.15. Mapa de peligrosidad en la cuenca ubicada al sur de la bahía del Mariel.

03 CONCLUSIONES

- A partir de la definición del modelo digital del terreno, se determinó la cuenca con un área de 21,13 km² tributaria a la zona de estudio.
- Se procesaron los datos pluviométricos con las tres estaciones pluviométricas abordadas según la plataforma SGIA y calculando la serie histórica de lluvia máxima diaria anual.
- Se obtuvo la curva de Intensidad – Frecuencia – Duración (IFD) que caracteriza el patrón conductual de las máximas precipitaciones en la cuenca ubicada al sur de la bahía del Mariel para condiciones actuales y se determinó un valor del tiempo de retraso (Lag time) de 280 minutos y la Curva Número (CN) con un valor de 96 adaptándose el modelo hidrológico según el tiempo de retorno de 12 años generando un escurrimiento similar al ocurrido el 11 de mayo del año 2020.
- Se determinó las áreas de inundaciones en toda la zona de estudio para la hora más crítica para una duración del evento en 24 horas, con aumentos considerables de la profundidad de circulación del cauce alertando a los pobladores a mantenerse alejados de posibles avenidas.
- Se propuso el diseño de un sistema de drenaje para los poblados que evacuen como caudal máximo 3 m³/s hacia el cauce para la protección de la población.
- Se obtuvo los valores de profundidad, velocidad del flujo y cota de inundación en diferentes secciones y áreas de interés con respecto a los poblados cercanos al cauce.

04 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alfonso, A. P. (2018). Comportamiento de las precipitaciones en cuba occidental ante eventos extremos. *Revista Cubana de Meteorología*.
- Aparicio Mijares, F. J. (1992). *Fundamentos de hidrología de superficie*. Editorial Limusa.
- Balbastre, R. (2018). *Análisis comparativo de metodologías de cálculo de tormentas de diseño para su aplicación en hidrología urbana* [Tesis de maestría]. Universidad Politécnica de Valencia. <https://riunet.upv.es/handle>
- Batista Silva, J. L. (1991). Cálculo del escurrimiento medio anual sin observaciones hidrométricas. *Voluntad Hidráulica*, (85), 2–7.
- Batista Silva, J. L. (2021). *Hidrología práctica para el caribe insular*.

- Campos Aranda, D. F.** (1992). *Procesos del ciclo hidrológico*. Universidad Autónoma de San Luis Potosí.
- Chow, V. T., Maidment, D. R., & Mays, L. W.** (1994). *Hidrología aplicada*. McGraw-Hill Interamericana.
- Colectivo de Autores.** (2024). *Léxico estratigráfico de cuba* (4th ed.). Instituto de Geología y Paleontología (IGP) / Servicio Geológico de Cuba.
- Consejo de Ministros de la República de Cuba.** (2017). Decreto no. 337/2017 reglamento de la ley no. 124 de las aguas terrestres.
- EIPHH.** (2010). *Estudio hidrológico presas pinillos, san francisco y mosquito (pid estudio de factibilidad abasto de agua zdm)*. Empresa de Investigaciones y Proyectos Hidráulicos de La Habana. La Habana, Cuba.
- García, E.** (2020). Caracterización de hietogramas en la región occidental de cuba.
- GEOGLOWS.** (2024). Material de entrenamiento de la plataforma geogloWS.
- Gómez Valentín, M.** (2008). *Hidrología urbana*. Universitat Politècnica de Catalunya, Grupo FLUMEN. Barcelona, España.
- Haan, C. T.** (2002). *Statistical methods in hydrology* (2nd ed.). Iowa State University Press.
- Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos.** (2024). *Sistema de gestión integral del agua (sgia)*.
- Keifer, C. J., & Chu, H. H.** (1957). Synthetic storm pattern for drainage design [Paper 1332]. *Journal of the Hydraulics Division, ASCE*, 83(4), 1–25.
- Martínez, Y., Planos, E., & Perdigón, D.** (2019). Hietogramas instantáneos adimensionales para ciclones tropicales que afectan al archipiélago cubano. *Ingeniería Hidráulica y Ambiental*, XL(1), 17–31.
- Planos, E., Limia, M., Vega, R., Boudet, D., & Hernández, M.** (2011). *Las grandes precipitaciones y las precipitaciones intensas en cuba: Causas y características* (Informe científico del Proyecto 0801). Instituto de Meteorología. La Habana, Cuba.
- Sarkar, S., & Maity, R.** (2020). Estimation of probable maximum precipitation in the context of climate change. *MethodsX*, 7, 100904. <https://doi.org/10.1016/j.mex.2020.100904>

Conflicto de intereses

Los autores declaran que no existen conflictos de intereses.

ORCID de los autores

Dariel Francisco Chang Domínguez <https://orcid.org/0009-0003-8296-4689>