

## ***Estudio Hidrológico - Hidráulico (H-H) para Puente Localizado en Río Grande P.R.***

Carlos Castillo Rivera  
Maestría en Ingeniería Civil  
Mentor: Dr. Christian Villalta Calderón  
Universidad Politécnica de Puerto Rico  
Graduate Project EXPO February 2025

---

**Abstracto** – Como parte del estudio hidrológico - hidráulico en el Bo. Mameyes de Río Grande P.R., se realizó un análisis en la cuenca del Río Mameyes utilizando los programas de QGIS, HEC - HMS y HEC – RAS [1]. El estudio hidrológico e hidráulico consistió en realizar un análisis en la cuenca del Río Mameyes, el cual nos permitirá en un futuro tener un panorama más preciso de las áreas afectadas por inundaciones en esta comunidad. Para el análisis se delimito la cuenca de la zona utilizando un área de 13.264 mi<sup>2</sup> y se consideraron eventos de lluvias temporales para duraciones de 1, 6, 12, y 24 horas; para inundaciones desde 2 hasta 100 años. Para realizar el análisis hidráulico, se utilizó el programa del Sistema de Análisis de Ríos (HEC RAS) del Centro de Ingeniería Hidrológica del Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los Estados Unidos para simular y analizar las diversas condiciones de inundación producidas por los eventos de lluvias. En la cuenca del Río, se estimaron caudales máximos de aproximadamente 16,453 metros cúbicos por segundo para la precipitación máxima probable de 24 horas y 100 años. Los resultados del modelo indican que el evento de lluvia causaría inundaciones en muchas propiedades a lo largo del tramo de la PR #191 hasta el puente ubicado en la PR #3, pero estas no afectarían la estructura del puente. Sin embargo, sería buena práctica realizar inspecciones anuales para monitorear las sovocaciones y posibles fallas futura.

**Key Terms** - Geographical Information System, QGIS, HEC-HMS, HEC-RAS

### **INTRODUCCIÓN**

Con el propósito de evaluar los riesgos potenciales para la vida humana y estructura del puente como vía de transporte de la comunidad se realizó un estudio hidrológico e hidráulico

utilizando un modelo de delimitación automatizada QGIS y otras aplicaciones que nos permiten simular los diferentes eventos de lluvias de manera computarizada. Entre las aplicaciones que se utilizaron para este proyecto se encuentra HEC–HMS, el cual nos permitió simular los diferentes eventos de lluvias y calcular el flujo mayor en cada evento. La otra aplicación fue el HEC–RAS, el cual es un Sistema de Análisis de Ríos del Centro de Ingeniería Hidrología [2]. Es el más común utilizado por El Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los EE.UU. para realizar cálculos hidráulicos unidimensionales. La integración de estos programas nos permitirá ahorrar tiempo, esfuerzo y obtener una mejor precisión en los resultados.

### **OBJETIVO**

El propósito de este informe es analizar los resultados de los análisis hidrológicos e hidráulicos realizados para evaluar eventos de lluvias desde 2 a 100 años que podrían causar daños estructurales al puente y a la población de la comunidad de Mameyes, Río Grande. El potencial de riesgo en una ubicación específica se definió en términos del nivel máximo del río alcanzado en la ubicación durante el paso del evento de lluvia y el tiempo hasta el nivel máximo del río desde la PR #191 hasta el puente localizado en la PR #3.

### **DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO**

El Río Mameyes se origina en el Bosque Nacional de Caribe, en las laderas de El Yunque en la Sierra de Luquillo a elevaciones de hasta 2,600 pies. Es alimentado en la parte alta de la cuenca por un gran número de quebradas formadas por las lluvias abundantes en El Yunque y sus áreas circundantes. Estas quebradas incluyen a Juan Diego, La Máquina, Tabonuca, Anón y la quebrada

que forma la Cascada La Coca en el área de la Reserva Federal en El Yunque. El Río de la Mina es su tributario principal, confluyendo con el cauce principal aproximadamente a 8 millas de su origen. La cuenca es rural, excepto el poblado de Palmer, en la parte baja cerca de la Carretera #3 en Río Grande. La población en la cuenca en el 2004 era de aproximadamente 4,900 habitantes.

## ESTUDIO HIDROLÓGICO

El programa del Sistema de Modelado Hidrológico (HEC-HMS) del Centro de Ingeniería Hidrológica del Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los Estados Unidos (USACE, U.S. Army Corps of Engineers, 2006) se utilizó para determinar los hidrogramas de la cuenca del Río Mameyes, el caudal máximo para los resultantes de un evento de lluvia desde 1 hasta 24 horas y para las inundaciones de 2 a 100 años. El programa HEC-HMS consta de tres componentes del modelo: el modelo de cuenca, el modelo meteorológico y las especificaciones de control.

El modelo de cuenca representa la cuenca física. El modelo meteorológico calcula la entrada de precipitación requerida por un elemento de la subcuenca. Las especificaciones de control establecen el tiempo de una ejecución de simulación. El componente del modelo de cuenca HEC-HMS está formado por una serie de modelos que representan cada componente del proceso de escorrentía: volúmenes de escorrentía, escorrentía directa (flujo sobre tierra e inter-flujo), caudal base y caudal de canal. Los métodos seleccionados utilizados en cada uno de estos modelos se analizan más adelante en el informe.

## ENFOQUE GENERAL

Como parte del análisis de la cuenca de Mameyes se utilizó el modelo automatizado QGIS, el cual nos permitió delimitar la cuenca del proyecto donde se obtuvieron parámetros geofísicos e hidrológicos. Estos datos se superponen mediante el uso de coberturas que indican las diferentes características y parámetros de la cuenca

hidrográficas. La Figura 1 muestra la delimitación de la cuenca.



**Figura 1**  
**Delimitacion de Cuenca**

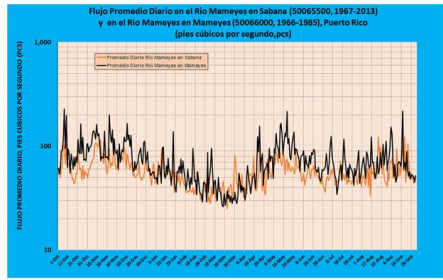
Este modelo es de gran ayuda porque nos permite trabajar las coberturas en formatos “shapefile” y poseer opciones para la delimitacion automatizada de cuencas hidrograficas utilizando un DEM según se muestra en la Figura 2.



**Figura 2**  
**Cuenca hidrografica en formato DEM**

### Característica de la Cuenca

La escorrentía en la cuenca es abundante en relación con su área de captación, debido a las frecuentes lluvias en la Sierra de Luquillo y el Bosque Nacional del Caribe. El promedio anual de escorrentía en el Río Mameyes es de aproximadamente 93,050 acres-pies, tomando en cuenta la evapotranspiración e infiltración [3]. La siguiente Figura 3, ilustra los hidrogramas de flujos promedios diarios históricos para las estaciones del Río Mameyes en Sabana y en Mameyes. El área de captación es Sabana es de 6.88 mi<sup>2</sup>, mientras que en Mameyes es de 11.8 mi<sup>2</sup>.



**Figura 3**  
**Flujo Promedio Diario (PSC)**

### Uso y Cubiertas de Suelo

La cobertura del uso de la tierra de la cuenca del Río Mameyes en Río Grande se obtuvo del mapa de uso de la tierra de 1977 preparado por el Departamento de Recursos Naturales y Ambientales de Puerto Rico [3]. Una vez descargado la cobertura de suelos, se procedió a entrar la capa “layer” en el modelo de QGIS para así clasificar el suelo dentro de la cuenca según se muestra en la Figura 4, donde se clasificó de la siguiente manera: pastizales, bosques, arbustos y pastizales, y zona rural. Los pastizales cubren alrededor del 57 por ciento de la cuenca, los bosques cubren alrededor del 26 por ciento, los arbustos y pastizales cubren alrededor del 13 por ciento. El área restante de la cuenca (alrededor del 4 por ciento) se clasifica como rural de baja densidad. La Figura 5 muestra la clasificación de los suelos.



**Figura 4**  
**Uso y Cobertura de Suelo**

OBJECTID	GRIDCODE	Class_name	TIPOS	CLASIF_GEN	Cod_hid
1	287608	51 Moist grassland...	Moist grassland...	Pastos y Arbustos	B
2	286493	70 Lowland moist r...	Lowland moist r...	Bosques y Arboledas	B
3	286495	67 Freshwater	Freshwater	Humedales	B
4	298442	65 Low-density urb...	Low-density urb...	Desarrollados o Baldi	B

**Figura 5**  
**Clasificación de Suelos**

### Tipo de Suelo

La cuenca del Río Mameyes se encuentra principalmente dentro de las series de suelos Los Guineos-Guayabota-Roca, con características como superficial a profundo, con drenaje bueno a deficiente y con inclinación extremadamente escarpada. Estas series generalmente consisten en suelos bien drenados, moderadamente empinados a muy empinados y moderadamente permeables. La escorrentía superficial en estos suelos es de media a muy rápida; de ahí la susceptibilidad moderada a la erosión. Según el NRCS, estos suelos se encuentran principalmente en los grupos hidrológicos de suelos B, C y D (Figura 6). Ver Figura 7 para los grupos hidrológicos de suelos.



**Figura 6**  
**Tipos de Suelo**

OBJECTID	drclasscd	drclassmt	hydrpdcd	forpshrhc	mulind	Tipo_suelo
17882	Poorly drained	Poorly drained	B/D	Severe	Complex	B
17884	Moderately wel...	Poorly drained	B/D	Severe	Complex	B
17887	Somewhat poor...	Somewhat poor...	B/D	Moderate	Complex	B
17889	Well drained	Well drained	B	Severe	Consociation	B
17823	Well drained	Well drained	D	Severe	Consociation	D
17840	Well drained	Well drained	D	Severe	Consociation	D
17842	Well drained	Well drained	D	Severe	Consociation	D
17846	Well drained	Well drained	D	Severe	Consociation	D
17859	NULL	NULL	NULL	Not rated	Consociation	NULL
17860	Somewhat poor...	Somewhat poor...	C	Slight	Consociation	C
17862	NULL	NULL	NULL	Not rated	Consociation	NULL
17866	Excessively dral...	Excessively dral...	A	Slight	Undifferentiate...	A

**Figura 7**  
**Grupos Hidrológicos de Suelos**

### Parámetros de la Cuenca

Otro modelo utilizado fue el Programa de HEC-HMS, el cual se utilizó para determinar los hidrogramas de inundación y los caudales máximos para las cuencas de drenaje del Río Mameyes en Río Grande, Puerto Rico, para eventos de lluvias desde 1 hasta 24 horas con precipitaciones de 2 hasta 100 años. Los datos de precipitaciones para

las duraciones seleccionadas y las probabilidades de excedencia se obtuvieron del “NOAA Atlas 14 Point Precipitation Frequency (PF) Estimates” [4]. El procedimiento para estimar las profundidades de las precipitaciones para estos eventos hipotéticos seleccionados basadas en frecuencias se analiza en la sección precipitaciones de este informe.

El modelo de pérdida del Servicio de Conservación de Suelos de los Estados Unidos (SCS), ahora conocido como el Servicio de Conservación de Recursos Naturales (NRCS), disponible en el programa HEC-HMS, se utilizó para calcular el volumen de escorrentía para cada uno de los eventos de lluvia simulados (Soil Conservation Service, 1972). Este modelo, también conocido como el modelo de pérdida de Número de Curva (CN) del SCS, estima la escorrentía de la cuenca utilizando la siguiente ecuación:

$$Q = (P - Ia)^2 / (P - Ia + S) \quad (1)$$

Donde;

Q, es escorrentía en milímetros

P es precipitación en milímetros

Ia es la abstracción inicial (pérdida inicial), en milímetros

S es la retención máxima potencial después de que comienza la escorrentía, en milímetros.

La extracción inicial (Ia) consiste principalmente en intersección, infiltración y almacenamiento superficial, todos los cuales ocurren antes de que comience la escorrentía. La extracción inicial incluye agua retenida en depresiones superficiales, agua interceptada por la vegetación, evaporación e infiltración. Ia está relacionada con la retención máxima potencial después de que comienza la escorrentía (S) por la siguiente ecuación empírica:

$$Ia = 0,2S \quad (2)$$

Por lo tanto, sustituyendo la ecuación anterior en la ecuación de escorrentía se obtiene:

$$Q = (P - 0.2S)^2 / (P + 0.8S) \quad (3)$$

S se relaciona con las condiciones del suelo y la cobertura de la cuenca a través del CN. Esta relación se expresa de la siguiente manera:

$$S = 25,400 / CN - 254 \text{ (SI units)} \quad (4)$$

La simulación hidrológica, basada en el método SCS, para la cuenca del Río Mameyes de Río Grande requiere la determinación del número de curva (CN), el tiempo de concentración (Tc) y el tiempo de retardo (Tl). La determinación del CN requiere el uso de varias tablas desarrolladas por el NRCS.

El CN es un parámetro adimensional que indica la característica de respuesta de escorrentía de una cuenca de drenaje. En el método SCS, este parámetro está relacionado con el uso de la tierra, el tipo de suelo y las condiciones de humedad antecedentes en la cuenca de drenaje. El uso de la tierra representa las condiciones de la superficie en una cuenca de drenaje y está relacionado con el grado de cobertura. Las propiedades del suelo influyen en gran medida en la cantidad de escorrentía. Las tasas de infiltración de los suelos varían ampliamente y se ven afectadas por la permeabilidad del subsuelo, así como por las tasas de absorción de la superficie.

El NRCS clasifica los suelos en cuatro grupos hidrológicos de suelos (A, B, C y D) de acuerdo con su tasa de infiltración mínima, que se obtiene para el suelo desnudo después de un humedecimiento prolongado. Otro factor importante que influye en el valor de CN es la condición de humedad del suelo en la cuenca de drenaje antes de que se produzca la escorrentía. El NRCS clasifica la condición de humedad del suelo en tres clases de condición de humedad antecedente (AMC): AMC I (condiciones secas), AMC II (condiciones promedio) y AMC III (condiciones saturadas). Esta clasificación se basa en la precipitación antecedente de 5 días. Para determinar el valor de CN adecuado, el NRCS desarrolló varias tablas que relacionan el valor de CN con los factores analizados anteriormente. Los valores de CN, que se muestran en estas tablas, varían de 30 (suelos permeables con altas tasas de infiltración) a

98 (áreas impermeables). Las publicaciones del NRCS brindan más información y detalles sobre el uso del modelo de pérdida de CN (Soil Conservation Service, 1972, 1986).

$$CN = \sum NC_i \times A_i / \sum A_i \quad (5)$$

Otro de los parámetros utilizados para esta aplicación o el método de hidrograma unitario SCS incluido en el modelo de cuenca HEC-HMS lo fue el tiempo de concentración (Tc) o retardo de la cuenca. El Tc se define como el tiempo de viaje del flujo desde el punto más distante aguas arriba en la cuenca hasta la salida de la cuenca. Se utilizó el informe Técnico Núm. 55 (TR-55) del NRCS. Esta ecuación se expresa de la siguiente manera:

$$T_c = T_s + T_{sc} + T_{cc}; \quad (6)$$

Donde,

$$T_s = 0.007 (n_s L_s)^{0.8} / (P_2)^{0.5} \times S_s^{0.4}$$

$n_s$  es el coeficiente de Manning

$L_s$  son los primeros 100 ft del largo del flujo en (m).

$P$  es la precipitación en 2yrs a 24 horas

$S$  es la pendiente de la línea de nivelación hidráulica (pendiente del terreno, pies/pies)

$$T_{sc} = L_{sc} / 3,600 V \quad (7)$$

$$V = 16.1345 \sqrt{S}$$

$L$  es el largo del flujo

$V$  es la velocidad promedio (ft/s)

3600 factor de conversión de segundos a horas

$S$  es la pendiente de la línea de nivelación hidráulica (pendiente del terreno, pies/pies)

$$T_{cc} = L_{cc} / 3,600 V \quad (8)$$

$$V = 1.49R^{2/3} S^{1/2} / n$$

$L$  es el largo del flujo

$V$  es la velocidad promedio (ft/s)

3600 factor de conversión de segundos a horas

$R$  es Radio hidráulico (pies) y es igual a  $a/pw$

$a$  = área de flujo de la sección transversal (pies<sup>2</sup>)

$pw$  = perímetro mojado (pies)

$S$  es la pendiente de la línea de nivelación hidráulica (pendiente del terreno, pies/pies)

$n$  es el coeficiente de Manning

Para la cuenca del Río de Mameyes se obtuvieron los siguientes datos:

$$CN = 61.53$$

$$T_c = 0.033 \text{ hr}$$

### Distribución de Lluvias

El modelo meteorológico HEC-HMS es el módulo en el que se ingresan los datos de precipitación de la cuenca. La precipitación puede ser lluvia observada de un evento histórico, puede ser un evento de lluvia hipotético basado en frecuencia, o puede ser un evento que representa el límite superior de precipitación posible en una ubicación determinada. Como se indicó antes, los datos de lluvia que se utilizarán en el modelo meteorológico para la cuenca del Río Mameyes, se obtuvieron de la NOAA Atlas 14 Point Precipitation Frequency (PF) Estimates [4]. Se seleccionó el método Specified Hyetograph especificado por el usuario para ingresar los datos de lluvia en el modelo meteorológico en HEC-HMS. Este método permite definir la profundidad y la distribución temporal de un evento de lluvia hipotético. La distribución temporal de lluvia se determinó según lo describe La Guía Para Elaboración de Estudios H-H utilizando el método de percentila 10% y 90% según ejemplo mostrados en la Figura 8 y Figura 9; y la tabla de distribución de lluvia en un intervalo de tiempo mostrada en la Tabla 1.

**Tabla 1**  
**Intervalo de Tiempo Para Describir la Distribucion de Lluvia**

Duración de la lluvia, horas	Número de Intervalos de Tiempo	Tamaño de Intervalos, minutos
24	48	30
12	48	15
6	36	10
1	30	2

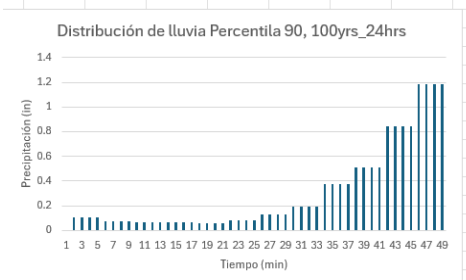
Este análisis incluye distribuciones de lluvia en 1, 6, 12 y 24 horas con duración de 2, 10, 25, 50 y 100 años según la guía antes mencionada.

Las profundidades de lluvia más crítico para los eventos de lluvias simulados resultaron de la siguiente manera: las profundidades de lluvia correspondientes al PMP de 24 horas con duración

de 50 y 100 años fueron 13, 491.5 y 16,453 CFS, respectivamente.

Duración Lluvia	24 Horas	Percentía 90	1440 min	14.7 in	
Duración (min)	Incrementos (%)	Duración (min)	Lluvia (in)	Tiempo (min)	PREC (in)
0		0	0	0	0
8.3	2.8	120	0.418	30	0.1629
16.7	2	240	0.544	60	0.1629
25	1.7	360	0.2493	90	0.1629
33.3	1.7	480	0.2493	120	0.1629
41.7	1.6	600	0.2352	150	0.0735
50	2.2	720	0.3234	180	0.0735
58.3	3.6	840	0.5392	210	0.0735
66.7	5.2	960	0.7644	240	0.0735
75	10.2	1080	1.4394	270	0.062475
83.3	13.8	1200	2.0286	300	0.062475
91.7	23	1320	3.381	330	0.062475
100	32.2	1440	4.7344	360	0.062475
			14.7	420	0.062475
				450	0.062475
				480	0.062475
				510	0.0588
				540	0.0588
				570	0.0588
				600	0.0588
				630	0.0588
				660	0.0588
				690	0.0588
				720	0.0588
				750	0.1323
				780	0.1323
				810	0.1323
				840	0.1323
				870	0.1911
				900	0.1911
				930	0.1911
				960	0.1911
				990	0.37485
				1020	0.37485
				1050	0.37485
				1080	0.37485
				1110	0.50715
				1140	0.50715
				1170	0.50715
				1200	0.50715
				1230	0.84525
				1260	0.84525
				1290	0.84525
				1320	1.18335
				1350	1.18335
				1380	1.18335
				1410	1.18335
				1440	1.18335
				1470	1.18335

**Figura 8**  
Distribución Temporal de Lluvia Percentila 90% 24hr 100 Años



**Figura 9**  
Distribución Temporal de Lluvia Ilustrado en Hietograma  
Hidrograma de Inundaciones y Caudales Máximos

Se utilizó el programa HEC-HMS para determinar los hidrogramas de la cuenca del Río Mameyes y los caudales máximos para los PMF resultantes de un PMP fueron de 24 horas con duración de 50 y 100 años. El evento de lluvia PMP de 24 horas con duración a 50 años generó un caudal máximo de entrada de aproximadamente 13,491.5 CFS mientras que el evento PMP de 24 horas con duración de 100 años produjo un caudal máximo de entrada estimado de 16,453 CFS. Estos eventos de inundación no rebasaron el puente, sin embargo, sí podrían causar inundaciones que provocarían limitaciones y acceso en la comunidad

localizada en la Carretera #191. Como consecuencia de esta situación las propiedades cercanas al río estarían en peligro (ver Figura 10).



Weather News P.R. - RÍO GRANDE 🚨 Nos informan del Río Mameyes saliéndose de su cauce por la 191...

**Figura 10**  
Inundaciones Río Mameyes  
Análisis de Sensibilidad

El análisis de sensibilidad es un estudio cuantitativo o cualitativo de las relaciones que existen entre la información que ingresa y sale de un modelo, determinando los parámetros de entrada que más influyen en la variabilidad de la salida, y por lo tanto deben ser estudiados y analizados para fortalecer el modelo bajo estudio. Este análisis es utilizado para incrementar la confianza en el modelo y para investigar su robustez. Los métodos para realizar un análisis de sensibilidad se agrupan principalmente en dos clases: Los métodos locales y los métodos globales. Los primeros se concentran en un impacto local de los parámetros de entrada, por lo cual todos varían dentro de un rango de incertidumbre muy pequeño. Este método se puede considerar como un caso particular del OAT (one at a time), que es un procedimiento donde se varía solamente un parámetro al tiempo y los otros se mantienen constantes.

En los segundos, los parámetros de entrada son variados al mismo tiempo, dentro de rangos de incertidumbre diferentes, determinando de manera cuantitativa los parámetros de entrada que más afectan el desempeño del modelo. El análisis de sensibilidad crea varios estados operativos variando los parámetros de entrada y evalúa el comportamiento del modelo ante estas variaciones. Este análisis se realiza para representar circunstancias reales como medidas erróneas, falta

de información o incertidumbre en los parámetros de entrada.

Para este proyecto se realizó el análisis de sensibilidad simulando el programa con un +/- 10% del número de curva y un +/- 10% del tiempo de concentración según lo muestra la Figura 11. En la Figura 12 podemos observar el flujo pico de cada simulación y en la Figura 13 podemos ver el coeficiente de sensibilidad relativa.

Basin	CN	CN+	CN-
Rio Mameyes	62	68	56
Basin	Tc	Tc+	Tc-
Rio Mameyes	2.00	2.20	1.80

Figura 11

Analisis de Sensibilidad con + 10% del Número de Curva y Tc

Basin	Peak Flows (cfs)		
	CN	+0.10CN	-0.10CN
Rio Mameyes	16,453.0	18,169.0	14,648.7
Basin	Peak Flows (cfs)		
	T <sub>c</sub>	+0.10T <sub>c</sub>	-0.10T <sub>c</sub>
Rio Mameyes	16,453.0	15,922.3	16,690.0

Figura 12

Analisis de Sensibilidad Flujo Pico

Basin	Relative Sensivity Coefficient (S <sub>r</sub> )		
	CN	+0.10CN	-0.10CN
Rio Mameyes		1.04	1.10
Basin	Relative Sensivity Coefficient (S <sub>r</sub> )		
	T <sub>c</sub>	+0.10T <sub>c</sub>	-0.10T <sub>c</sub>
Rio Mameyes		-0.32	-0.14

Figura 13

Coefficiente de Sensibilidad Relativa (Sr)

## ESTUDIO HIDRÁULICO

El propósito del análisis hidráulico es evaluar el riesgo potencial para la vida humana y daños estructurales de las propiedades publicas y privadas, en este caso puente que atraviesa el Río Mameyes y propiedades privadas cercanas al río. Se utilizó el programa informático del Sistema de Análisis de Ríos del Centro de Ingeniería Hidrológica USACE (HEC-RAS) (Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los EE. UU., 2002) para determinar el nivel de inundación, el pico de inundación y el tiempo hasta el pico desde que comienza el desborde del Río Mameyes para cada

condición simulada [5]. El análisis del evento de lluvia se realizó utilizando el módulo de flujo inestable disponible en HEC-RAS.

## ENFOQUE GENERAL

Los hidrogramas de diseño de entrada al Río Mameyes se generaron utilizando el programa informático HEC-HMS. La información sobre los hidrogramas de la cuenca y los caudales máximos para los PMF resultantes de un PMP de 24 horas con duración de 50 y 100 años se analizó en la sección de hidrogramas de inundación y caudales máximos del Estudio hidrológico.

Luego, los caudales de diseño se ingresaron en el programa informático HEC-RAS y se utilizó el componente inestable del programa para determinar las secciones de cortes transversales necesarias (ver Figura 14), los perfiles de la superficie del agua y el cauce del río.

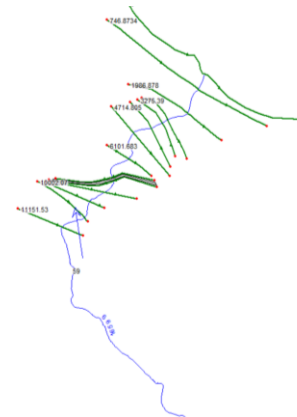


Figura 14

Cortes de Secciones Transversales del Río Mameyes

## Cómputo del Modelo

HEC-RAS es un sistema integrado de software, diseñado para uso interactivo en un entorno multitarea. El sistema se compone de una interfaz gráfica de usuario (GUI), componentes de análisis separados, capacidades de gestión y almacenamiento de datos, gráficos, mapas y funciones de generación de informes.

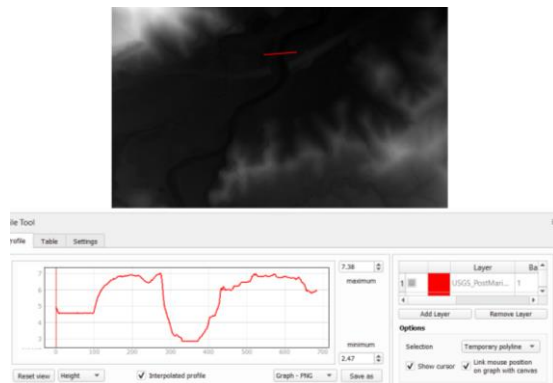
El sistema HEC-RAS contiene los siguientes componentes de análisis de ríos para: (1) cálculos unidimensionales del perfil de la superficie del agua de flujo constante; (2) simulación de flujo inestable

unidimensional y/o bidimensional; (3) Cálculos de transporte de sedimentos en límites móviles de flujo casi inestable o totalmente inestable (1D y 2D); y (4) análisis unidimensional de la calidad del agua. Un elemento clave es que los cuatro componentes utilizan una representación de datos geométricos común y rutinas de cálculo geométrico e hidráulico comunes. Además de los cuatro componentes del análisis del río, el sistema contiene varias características de diseño hidráulico que se pueden invocar una vez que se calculan los perfiles de la superficie del agua. HEC-RAS también cuenta con un extenso sistema de mapeo e integración de datos espaciales (HEC-RAS Mapper).

### Estudio de las Características del Alcance

El sistema hidráulico simulado consta del tramo inferior del Río Mameyes en Río Grande PR. Un total de 59 secciones transversales se utilizaron para definir la geometría del alcance en el análisis del río. De este total, 13 secciones transversales definieron la geometría del Río Mameyes en el área de estudio. Estas secciones transversales se generaron utilizando el mapa de inundaciones de FEMA y otras en modelo de QGIS según se muestra en la Figura 15. El alcance inferior del Río Mameyes incluye el cauce principal del arroyo y la llanura aluvial [6].

El fondo del Río Mameyes fue definido por 8 líneas de sección transversal. Estas secciones transversales fueron obtenidas de un mapa DEM y del mapa de inundaciones de FEMA.



**Figura 15**  
**Cortes de Secciones Transversales DEM**

### Condiciones de Límites Iniciales

Las simulaciones de flujo inestable requieren definir las condiciones de contorno en todos los límites externos del sistema, así como cualquier ubicación interna deseada. También se deben establecer las condiciones iniciales de flujo en el sistema al inicio del período de simulación del río arriba, condiciones de contorno donde se desarrollaron los hidrogramas de entrada operado desde el modelo de computadora HEC-HMS para cada una de las tormentas simuladas. En la sección transversal 1 (aguas abajo extremo del sistema), se utilizó la profundidad normal como condición de contorno del arroyo. El flujo de descarga inicial se fijó en 43323.16 cfs en cada tramo de estudio.

### Parámetros del Río Para Modelo HEC-RAS

Los parámetros clave que deben preestablecerse con precisión dictados en cualquier análisis de inundación del río son los máximos tamaño de la apertura del río y su tiempo de desarrollo. Generalmente se supone que las inundaciones de los ríos deben tener una forma aproximadamente trapezoidal donde la geometría se puede describir en términos de altura del cauce, ancho promedio del cauce y pendiente lateral del cauce. La pendiente del cauce invertida en la dirección del flujo se supone que debe ser horizontal. Estos parámetros describen el incumplimiento de la geometría en la medida necesaria para calcular los caudales a través del río, asumiendo características de descarga a un evento de lluvia de 100 años a 24 horas. El tiempo de desarrollo de la inundación o tiempo de falla es el tiempo entre el primer incumplimiento del frente aguas arriba del río hasta que el río esté completamente salido del cauce.

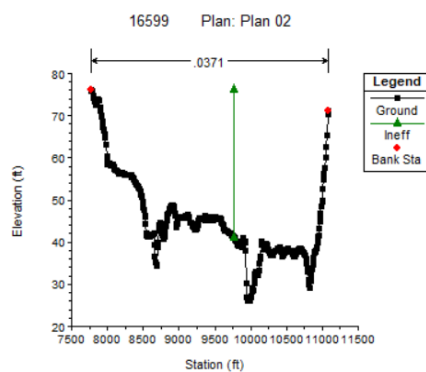
Utilizando el modelo HEC-RAS se realizó el análisis de inundación del Río Mameyes considerando un evento de lluvias de 100 años a 24 horas. El modelo HEC-RAS utiliza secciones transversales para simular el evento de lluvia en las áreas de estudios (ver Figura 16).

Flow Change Location		Profile Elevations and Flow Rates							
River	Reach	R/S	20yr	25yr	50yr	100yr	100yrMax	900yr	
1	16599	59	11151.53	23274.9	30859.46	36783.74	43223.16	51184.06	57935.04
2	16599	59	10002.07	2484.55	33088.88	39962.56	47523.73	56417.38	65461.04
3	16599	59	9179.972	24518.11	33151.33	40052.2	47878.56	56566.03	65677.51
4	16599	59	8377.715	24576.34	33259.77	40207.93	48097.22	56824.43	66054.13
5	16599	59	7663.443	24600.17	33304.17	40271.72	48186.9	56930.32	66208.59
6	16599	59	7479.303	24623.68	33348	40334.7	48275.42	57034.91	66361.22
7	16599	59	16101.683	24642.53	33383.14	40385.21	48346.44	57118.81	66483.72

**Figura 16**  
Descargas del Río para Diferentes Eventos de Lluvias

### Simulaciones y Resultados

Se utilizó el programa HEC-RAS para determinar los hidrogramas de la cuenca del Río Mameyes y los caudales máximos para los PMF resultantes de un PMP fueron de 24 horas con duración de 100 años. El evento de lluvia PMP de 24 horas produjo un caudal máximo de entrada estimado de 43,323 CFS hasta aumentar hasta un máximo en la desembocadura del río de 62707.05 CFS. Estos eventos de inundación no rebasaron el puente, sin embargo, sí causaron inundaciones que provocarían limitaciones y acceso en la comunidad localizada en la Carretera #191. Como consecuencia de esta situación las propiedades cercanas al río estarían en peligro. En la Figura 17 se puede observar un ejemplo gráfico de un corte se sección transversal.



**Figura 17**  
HEC-RAS Data de Corte de Sección Transversal

### Mapas de Inundaciones

Mapas de inundaciones que delinean las áreas que serían inundadas como resultado de los hipotéticos eventos de lluvia del Río Mameyes fueron preparado para cada condición de inundación simulada. Los límites se basan en la

superficie máxima del agua, elevaciones resultantes de las inundaciones simuladas del río. Los límites de inundación son aproximados y pueden no incluir áreas donde se producirían inundaciones poco profundas. Además de mostrar los límites de las inundaciones, los mapas de inundaciones presentan información en ubicaciones críticas sobre la distancia desde el río, pico de inundación o elevación máxima de la superficie del agua; y tiempo desde que comienza el evento de lluvia hasta el nivel máximo del agua. La Figura 18 presenta el mapa de inundaciones y las zonas afectadas por los eventos de lluvias [7].



**Figura 18**  
Mapa de Inundaciones de PR en Area de Analisis

### CONCLUSIÓN

Se realizaron análisis hidrológicos e hidráulicos para evaluar el peligro potencial para la vida humana y propiedades cercanas al Río Mameyes de Río Grande PR desde la PR #191 hasta el puente ubicado en la Carretera #3 de esa misma zona de estudio. Estos análisis se realizaron con el fin de preparar mapas de inundaciones que delineen las áreas que quedaría inundada producto de un evento de lluvia basado en 100 años y 24 horas, descarga máxima para un evento de lluvia para esta zona de estudio. Este análisis se realizó con el propósito de evaluar alternativas que permitan mitigar los riesgos y danos causados por el evento de lluvia. Este análisis es necesario para las agencias gubernamentales porque les permiten delinear un plan de desarrollo de varias alternativas para resolver esta situación; que residentes del área llevan pasando cada año sin resolver el problema.

El análisis hidrológico consistió en definir los hidrogramas de la cuenca del Río Mameyes, el caudal máximo para los resultantes de un evento de lluvia desde 1 hasta 24 horas y para las

inundaciones de 2 a 100 años. Se determinaron algunos parámetros como la cuenca, la entrada de precipitación requerida, tiempo de concentración y número de curvas.

Se utilizó el programa HEC-HMS para determinar los hidrogramas de la cuenca del Río Mameyes y los caudales máximos para los PMF resultantes de un PMP fueron de 24 horas con duración de 50 y 100 años. El evento de lluvia PMP de 24 horas con duración a 50 años generó un caudal máximo de entrada de aproximadamente 13,491.5 CFS mientras que el evento PMP de 24 horas con duración de 100 años produjo un caudal máximo de entrada estimado de 43323.3 CFS. Estos eventos de inundación no rebasaron el puente, sin embargo, sí podrían causar inundaciones que provocarían limitaciones y acceso en la comunidad localizada en la Carretera #191. Como consecuencia de esta situación las propiedades cercanas al río estarían en peligro.

Para el análisis hidráulico en este caso del puente que atraviesa el Río Mameyes y propiedades privadas cercanas al río se utilizó el programa informático del Sistema de Análisis de Ríos del Centro de Ingeniería Hidrológica USACE (HEC-RAS) (Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los EE. UU., 2002) para determinar el nivel de inundación, el pico de inundación y el tiempo hasta el pico desde que comienza el desborde del Río Mameyes para cada condición simulada. El análisis del evento de lluvia se realizó utilizando el módulo de flujo inestable disponible en HEC-RAS. Como resultado de la simulación se determinó que la zona de estudio es inundable, por lo que el municipio debe determinar cual alternativa es mas costo-efectiva para desarrollar un proyecto que permita mitigar los riesgos que podrían causar el evento de lluvia simulado. En efecto el puente de la Carretera #3 está diseñado correctamente, sin embargo, la Carretera #191 y las propiedades quedarían expuesta a la inundación.

Cuando se construyeron las propiedades no se consideraron que era zona inundable. Como parte este análisis se ofrecen varias alternativas que el municipio podría evaluar:

- Canalizar, ensanchar y profundizar el cauce del río al punto que permita tener la capacidad de descarga máxima del río incluyendo banco de arena o algún otro control de ingeniería.
- Reconstruir la zona de inundación rellenando el área ubicándola así por encima de los límites de agua en el evento de lluvia.

## REFERENCIAS

- [1] U.S. Army Corp of Engineering (USACE), *HEC-HMS Technical Reference Manual*, 2010 [Online]. Available: <https://www.hec.usace.army.mil>
- [2] U.S. Army Corp of Engineering (USACE), *HEC-RAS River Analysis System-User's Manual* [Online] Available: [https://www.u-cursos.cl/ingenieria/2007/2/CI41C/1/material\\_docente/bajar?id\\_material=152814](https://www.u-cursos.cl/ingenieria/2007/2/CI41C/1/material_docente/bajar?id_material=152814)
- [3] *Sistemas de Información Geográfica (GIS)*. [Online] Available: <https://gis.pr.gov/descargaGeodatos/Pages/default.aspx>
- [4] *NOAA Atlas 14 Point Precipitation Frequency Estimates: KS*. [Online] Available: [https://hdsc.nws.noaa.gov/pfds/pfds\\_map\\_cont.html](https://hdsc.nws.noaa.gov/pfds/pfds_map_cont.html)
- [5] *Mapa Niveles de Inundación Recomendados por la Junta de Planificación*. [Online] Available: <https://sige.pr.gov/portal/apps/webappviewer/index.html?id=53ed4b9fa37840a88bb44d2a911512fc>
- [6] National Oceanic and Atmospheric Administration, *Digital Coast Data Access Viewer*. [Online] Available: <https://coast.noaa.gov/dav-admin-3/public/Request.jsf?id=821538&t=AE89C5AB2D9D49FCCD6F8A48E5C915AD>