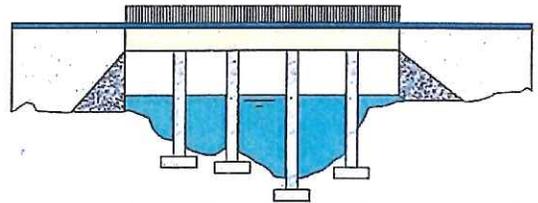
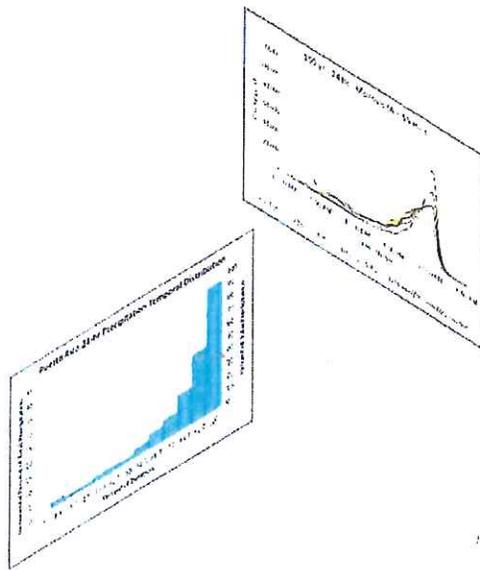
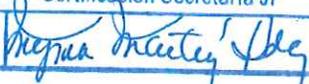


ESTADO LIBRE ASOCIADO DE PUERTO RICO
OFICINA DEL GOBERNADOR
JUNTA DE PLANIFICACIÓN
DEPARTAMENTO DE RECURSOS NATURALES Y AMBIENTALES
SAN JUAN, PUERTO RICO

GUÍAS PARA LA ELABORACIÓN DE ESTUDIOS HIDROLÓGICOS-HIDRÁULICOS



Vigencia
15 de junio de 2016

 ESTADO LIBRE ASOCIADO DE PUERTO RICO OFICINA DEL GOBERNADOR JUNTA DE PLANIFICACIÓN	
Documentos Adoptados en Reunión de Junta	
Firmas	
	
	
Fecha Reunión Junta	JUN 10 2016
Certificación Secretaria JP	
Firma	



ESTADO LIBRE ASOCIADO DE PUERTO RICO
OFICINA DEL GOBERNADOR
JUNTA DE PLANIFICACIÓN
DEPARTAMENTO DE RECURSOS NATURALES Y AMBIENTALES
SAN JUAN, PUERTO RICO

GUÍAS PARA LA ELABORACIÓN DE ESTUDIOS HIDROLÓGICOS-HIDRÁULICOS



Luis García Pelatti
Presidente
Junta de Planificación



Carmen R. Guerrero Pérez
Secretaria
Departamento de Recursos Naturales y Ambientales

Vigencia
15 de junio de 2016

۹۲/۳.ج

-Resolución-

ESTADO LIBRE ASOCIADO DE PUERTO RICO
OFICINA DEL GOBERNADOR
JUNTA DE PLANIFICACIÓN
SAN JUAN, PUERTO RICO

RESOLUCIÓN

10 de junio de 2016

Resolución Núm.: JP-HH-2016

**PARA ADOPTAR LAS GUÍAS PARA LA ELABORACIÓN DE ESTUDIOS
HIDROLÓGICOS-HIDRÁULICOS EN EL PROGRAMA DE PLANIFICACIÓN
FÍSICA DE LA JUNTA DE PLANIFICACIÓN DE PUERTO RICO**

La Ley Núm. 3 de 27 de septiembre de 1961, según enmendada, *Ley para el control de edificaciones en zonas susceptibles a inundaciones*, establece que la Junta de Planificación (JP), con el asesoramiento del Departamento de Recursos Naturales y Ambientales (DRNA), declaran "zona susceptible a inundaciones" (ahora áreas especiales de riesgo a inundación) el área o sector donde exista tal condición y tomará en consideración para ello, entre otros, los datos disponibles sobre los niveles máximos alcanzados por los distintos cuerpos de agua en eventos de inundaciones con el objetivo de establecer los criterios sobre donde se podrá autorizar la construcción de estructuras y donde no y en los casos donde se permitan, la forma en que se podrá llevar a cabo dicha construcción.

A partir del año 1978, Puerto Rico y las islas municipio se incorporan como una comunidad en la fase regular del Programa Nacional del Seguro de Inundación (NFIP, por sus siglas en inglés). De acuerdo a su rol como agencia estatal coordinadora de dicho programa y la facultad concedida por la Ley Núm. 3, la JP adoptó el 15 de diciembre de 1971 el Reglamento de Planificación Núm. 13, *Reglamento sobre control de edificaciones y desarrollo de terrenos en zonas susceptibles a inundaciones* y los *Mapas de zonas susceptibilidad a inundaciones de Puerto Rico*. El 16 de diciembre de 2005, la JP adopta los mapas de inundación de la Agencia Federal para el Manejo de Emergencias, (FEMA por sus siglas en inglés), llamados *Mapas de tasas del seguro de inundación* (FIRM, por sus siglas en inglés) y la sexta versión del Reglamento Núm. 13, *Reglamento sobre áreas especiales de riesgo a inundación* con el objetivo de atemperar y evitar duplicidad de esfuerzos de ambas agencias y facilitar el servicio a los usuarios y público en general.

Los FIRM tienen el objetivo de proveer la información sobre las áreas especiales de riesgo a inundación (SFHA, por sus siglas en inglés) de modo que a su vez sirva de instrumento para la solicitud de los seguros de inundación y para la administración de los valles inundables. FEMA desarrolla estos mapas en base a los estudios de seguro de inundación (FIS, por sus siglas en inglés). El FIS es una combinación de estudios hidrológicos e hidráulicos (EHH) con el objetivo de definir y determinar cuáles son los peligros de inundación para áreas a lo largo de ríos, arroyos, costas y lagos. Por lo tanto, la regulación de los SFHA tiene fundamento en mapas definidos por EHH.

La JP adoptó el 14 de febrero de 1994 las *Guías sobre la preparación de estudios hidrológicos – hidráulicos* en conformidad con el Reglamento Núm. 13 con la intención de establecer unas guías mínimas uniformes sobre la preparación de dichos estudios. Estas guías buscaban orientar a los ingenieros licenciados

expertos en hidrología e hidráulica sobre los procedimientos mínimos necesarios para cumplir con la reglamentación de los SFHA en el Reglamento de Planificación Núm. 13 del 1992.

La revisión de las guías adoptadas en 1994 es necesaria debido a nuevos avances tecnológicos en el área de hidrología e hidráulica, la necesidad de evaluar las revisiones de los FIRM y otros requisitos que se incluyen en las versiones revisadas del Reglamento Núm. 13.

A tales efectos, el DRNA, en colaboración con la Junta de Planificación, elaboró la versión revisada, *Guías para la elaboración de estudios hidrológico-hidráulicos*. Su propósito es establecer unas guías uniformes para la presentación de estudios, con el fin de agilizar el proceso de evaluación.

Los criterios establecidos en las guías, sólo podrán ser sustituidos cuando se demuestre la necesidad y sea consistente con la información requerida. Las agencias reguladoras estatales y federales podrán requerir información adicional durante el proceso de evaluación.

Por lo antes expuesto, esta Junta de Planificación de Puerto Rico, en conformidad con el Reglamento de Planificación Núm. 13, del 7 de enero de 2010, y sus subsiguientes enmiendas, **ADOPTA** las *Guías para la elaboración de estudios hidrológicos-hidráulicos*, las cuales hacen formar parte de esta resolución, adoptada en San Juan, Puerto Rico, hoy 10 de junio de 2016 y deroga la resolución JP-94-254 del 14 de febrero de 1994 que presenta las *Guías sobre la preparación de estudios hidrológicos – hidráulicos*.


Luis García Pelatti,
Presidente


Pedro M. Cardona Roig,
Vicepresidente


Juan C. Santiago Colón
Miembro Asociado


Sylvia Rivera Díaz,
Miembro Asociado


Tomás J. Torres Placa,
Miembro Alterno

CERTIFICO: Que la anterior es copia fiel y exacta del acuerdo adoptado por la Junta de Planificación de Puerto Rico en su reunión celebrada el 10 de junio de 2016 y para su conocimiento y uso general expido y notifico la presente copia bajo mi firma y sello oficial de esta Junta en San Juan, Puerto Rico hoy, **15 JUN 2016**

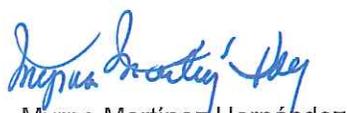

Myrna Martínez Hernández
Secretaria Interina

TABLA DE CONTENIDO

CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 Trasfondo Histórico y Propósito	1
1.2 Propósito de estas guías.....	2
CAPÍTULO 2 TERMINOLOGÍA Y ABREVIATURAS.....	3
2.1 Terminología.....	3
2.2 Abreviaturas.....	11
CAPÍTULO 3 RECONOCIMIENTO DE CAMPO.....	12
CAPÍTULO 4 HIDROLOGÍA.....	13
4.1 Propósito	13
4.2 Recolección y Manejo de Datos Hidrológicos	13
4.2.1 Delimitación de los límites de la cuenca hidrográfica	13
4.2.2 Fuentes de Datos.....	15
4.3 Determinación de Caudales de Diseño	16
4.4 Análisis de Frecuencia de Caudales	16
4.5 Análisis de Lluvias para obtención de caudales	17
4.6 Datos de Lluvia	17
4.6.1 Distribución Temporal de la Lluvia	18
4.6.2 Intervalo de tiempo distribución temporal de lluvia	19
4.7 Modelos Hidrológicos Computadorizados	19
4.7.1 Método del TR-55 del NRCS en HEC-HMS	20
4.7.2 Intervalo de tiempo computacional.....	22
4.8 Otros modelos	22
4.9 Calibración y verificación del modelo	22
4.10 Análisis de sensibilidad.....	23
CAPÍTULO 5 HIDRÁULICA.....	25
5.1 Propósito	25
5.2 Modelos Hidráulicos de una Dimensión	25
5.2.1 Sistema HEC-RAS	25
5.2.2 Caudales para el modelo	27
5.2.3 Elevaciones en las secciones limítrofes del modelo	27
5.2.4 Coeficientes de la Ecuación de Manning.....	28

LGP

5.3	Secciones transversales	29
	5.3.1 Longitud tramo cuerpo de agua para un proyecto	29
	5.3.2 Localización y orientación secciones transversales	29
	5.3.3 Características de las secciones transversales	30
5.4	Información requerida en los planos topográficos	39
5.5	Hidráulica de puentes y atarjeas	39
	5.5.1 Métodos de cálculo	39
	5.5.2 Secciones transversales en puentes y atarjeas.....	40
	5.5.3 Datos necesarios para la descripción de puentes	40
	5.5.4 Datos para la descripción de atarjeas	41
	5.5.5 Múltiples puentes y atarjeas.....	41
5.6	Otras opciones.....	41
5.7	Otros modelos hidráulicos unidimensionales	42
5.8	Modelos de flujo no-permanente.....	42
5.9	Modelos hidrológico/hidráulicos combinados	43
5.10	Modelos Bidimensionales	43
5.11	Calibración del modelo	44
CAPÍTULO 6 CONSIDERACIONES VALLES INUNDABLES		45
6.1.	Propósito	45
6.2	Análisis de Acarreo Hidráulico	45
	6.2.1 Justificación del análisis de Acarreo Hidráulico	45
	6.2.2. Cálculo del Acarreo Hidráulico Local.....	46
	6.2.3 Estimación Pérdida y Compensación Acarreo Hidráulico .	46
6.3	Análisis para Determinar Niveles de Inundación dentro del Valle	47
6.4	Análisis para Delimitación del Cauce Mayor en Valles Inundables ..	48
6.5	Estudios HH para revisión del FIRM	52
	6.5.1 Hidrología	52
	6.5.2 Hidráulica.....	52
	6.5.3 Modelos requeridos para solicitar cambios en el FIRM	53
6.6	Verificación del modelo usando CHECK-RAS	54
CAPÍTULO 7 PRESENTACIÓN ESTUDIOS Y ARCHIVOS.....		55
7.1	Propósito	55
7.2	Estudios sometidos al DRNA y la JP.....	55
7.3	Tabla de Contenido para estudios H-H	55
7.4	Certificación.....	59

CGP

7.5 Información a someter en formato digital	59
CAPÍTULO 8 BIBLIOGRAFÍA.....	60
APÉNDICE I Distribuciones temporales lluvia para PR según el NWS.....	62
APENDICE II Requisitos estimar valores rugosidad para revestimientos..	71

CGP

10

CRÉDITOS

Esta Guía fue elaborada por el Instituto de Investigaciones sobre Recursos de Agua y el Ambiente de Puerto Rico y la Universidad de Puerto Rico Recinto de Mayagüez para el Departamento de Recursos Naturales y Ambientales bajo el contrato número 2014-000008.

El equipo de trabajo estuvo formado por ingenieros y estudiantes del Departamento de Ingeniería Civil y Agrimensura de la Universidad de Puerto Rico, la División de Hidromodificaciones del Negociado de Endosos adscrito a la Secretaría Auxiliar de Permisos, Endosos y Servicios Especializados del Departamento de Recursos Naturales y Ambientales y la Unidad de Valles Inundables de la Junta de Planificación.

Autores:

*Walter F. Silva Araya, Ph. D., P.E.
Depto. Ing. Civil y Agrimensura, Universidad de Puerto Rico en Mayagüez*

*Jorge Rivera Santos, Ph.D., P.E.
Depto. Ing. Civil y Agrimensura, Universidad de Puerto Rico en Mayagüez*

Colaboradores:

*Ing. Ivonne Medina Cortés
Departamento de Recursos Naturales y Ambientales de Puerto Rico*

*Plan. Giovanna I. Fuentes Santiago
Departamento de Recursos Naturales y Ambientales de Puerto Rico*

*Ing. Juan A. González Moscoso
Junta de Planificación de Puerto Rico*

INTRODUCCIÓN

1.1 Trasfondo Histórico y Propósito

El Departamento de Recursos Naturales y Ambientales (DRNA) tiene el deber de proteger los cuerpos de agua y el ecosistema que los rodea, velar porque las obras en o sobre cuerpos de agua y los proyectos dentro de las zonas inundables no alteren los niveles de inundación y servir de asesor a las agencias concernidas en materia de inundaciones.

En 1994 la Junta de Planificación (JP) publicó las “Guías sobre la preparación de estudios hidrológico-hidráulicos” las cuales han servido para la preparación de dichos estudios durante casi dos décadas. El Reglamento sobre Áreas Especiales de Riesgo a Inundación (Reglamento de Planificación Núm. 13) establece las condiciones para las cuales se debe realizar un estudio Hidrológico-Hidráulico (H-H). Este Reglamento es aplicable a las áreas estudiadas por la Agencia Federal para el Manejo de Emergencias (FEMA por

sus siglas en inglés) y que cuentan con un Mapa Sobre Tasas del Seguro de Inundación. Sin embargo, por razones de seguridad, para salvaguardar vida y propiedad y proteger los recursos naturales, se hace necesario que cualquier obra que impacte el cuerpo de agua o valle inundable no estudiado por FEMA, cuente con su respectivo estudio H-H.

Los últimos años se han caracterizado por avances significativos en la tecnología marcados por un uso extenso de la computadora digital, lo cual ha permitido el desarrollo de:

- Modelos hidrológicos e hidráulicos más detallados con los que se logra describir mejor los fenómenos físicos
- La toma de datos por medios remotos mediante sistemas de transmisión inalámbrica y, en muchas ocasiones, a tiempo real.
- Manejo y procesamiento de datos espaciales mediante sistemas de información geográfica.

Estos cambios se han reflejado en una variedad de productos digitales disponibles a través de la Internet que han cambiado radicalmente la forma de realizar estudios H-H en el mundo. Puerto Rico no ha sido una excepción en la disponibilidad de uso de estas tecnologías y, hoy día se cuenta con información digital en climatología,

Los estudios H-H son informes técnicos realizados por personal con conocimientos de hidrología e hidráulica cuyo objetivo principal es la estimación de los niveles de inundación provocados por lluvias torrenciales cuya magnitud se asocia con las probabilidades de ocurrencia y la duración de los eventos. Además de las magnitudes de lluvia, estos estudios requieren recopilar información relacionada con la hidrografía de la cuenca, las propiedades hidrológicas de los suelos, las características geométricas de los cauces y valles inundables y de las estructuras ubicadas dentro de esta zona.

caudales, mapas de uso de terreno y clasificación de suelos, modelos de elevación digital y lluvias de diseño mediante análisis de frecuencias.

Además, se han computadorizado muchos modelos para simulación de procesos hidrológicos e hidráulicos y, cada día se hace más accesible al ingeniero, modelos multidimensionales y de flujo no-permanente que permiten la simulación de situaciones donde las condiciones ameritan tales complejidades. Se han hecho disponibles también programas de computadora para el análisis y diseño de estructuras particulares tales como atarjeas y deflectores de flujo, entre otros.

1.2 Propósito de estas guías

El propósito de estas guías es proporcionar a los ingenieros un documento en el que se establece el lineamiento general y los procedimientos necesarios para realizar estudios H-H que cumplan con las prácticas de ingeniería actuales, presenten sus análisis, resultados e informes en forma uniforme para agilizar el proceso de evaluación y cumplir con disposiciones estatutarias y reglamentarias.

TERMINOLOGÍA Y ABREVIATURAS

2.1 Terminología

La siguiente terminología es la que se debe utilizar en estas guías para describir las condiciones de campo y los datos hidrológicos e hidráulicos.

Abstracciones iniciales - consiste de toda la lluvia que cae antes de que comience la escorrentía.

Acre - Medida de terreno equivalente a 1.0296 cuerdas o a 4,046.87 metros cuadrados.

Alteración Estructural - Todo cambio en los elementos estructurales de un edificio o estructura existente, tales como: paredes de carga, columnas, vigas y techos; o toda adición, extensión, aumento o variación en tamaño de los elementos estructurales existentes; o la construcción en el edificio de nuevos elementos estructurales adicionales tales como: techos, vigas, columnas o paredes de carga.

Ampliación - La extensión o aumento en el área bruta de piso o en la altura de una estructura.

Áreas Costaneras de Alto Peligro - Área en la costa sujeta a la inundación base y a altas velocidades de las aguas que incluyen marejadas ciclónicas. Esta área se designa con Zona V y VE, en los Mapas de Tasas de Seguro Contra Inundación (Flood Insurance Rate Maps – FIRM en inglés).

Área Especial de Riesgo a Inundación (Special Flood Hazard Area en inglés) - Área de riesgos a la inundación con un (1%) por ciento de probabilidad de ocurrir en cualquier año. Área equivalente al valle inundable o inundación con recurrencia de 100 años.

Carga Hidrodinámica - Presión por unidad de peso que actúa sobre objetos sumergidos en un fluido y se debe a su energía cinética. Se expresa en metros o pies de un líquido (normalmente agua). La carga hidrodinámica es proporcional al cuadrado de la velocidad de fluido según la relación $HD = \frac{V^2}{2g}$, donde V = velocidad del fluido, g = aceleración de la gravedad.

Carga Hidrostática - Presión por unidad de peso producida por un fluido en reposo sobre cualquier punto de contacto con una estructura. Se expresa en metros o pies de un líquido (normalmente agua). La presión estática aumenta cuando aumenta la profundidad, afectando elementos estructurales como pisos, paredes, pilotes

cimientos y techos. La relación es $HS = \frac{p}{\gamma}$, donde p es la presión estática y γ es el peso específico del fluido.

Casa Manufacturada - Estructura transportable en una o más secciones, la cual es construida en un armazón permanente y es diseñada para usarse con o sin cimientos permanentes cuando se conecta a los servicios (agua, electricidad, gas, etc.) requeridos.

Cauce - El lecho de un río, canal, quebrada, arroyo o cualquier cuerpo de agua por donde fluyen las aguas sin que ocurra desbordamiento.

Cauce Mayor (Floodway en inglés) - El lecho de un río, quebrada, arroyo, drenaje pluvial natural o cualquier otro cuerpo de agua y aquellas porciones de terrenos adyacentes que se deben reservar para descargar la inundación base sin aumentar acumulativamente la elevación superficial de las aguas del valle inundable por más de 0.30 metros (un (1) pie). En caso de un nuevo estudio detallado en Zona A y la evaluación de un depósito de relleno, el aumento máximo a permitirse será de 0.15 m (medio pie), según determinada por el estudio hidrológico-hidráulico.

Certificación - Declaración por parte de un ingeniero o agrimensor licenciado colegiado, de que los planos y demás documentos sometidos están en conformidad con las especificaciones de estas guías y de acuerdo a las mejores prácticas de la profesión.

Certificación de Inundabilidad - Declaración por parte de la Junta de Planificación o la Comunidad Participante en la cual indica la condición de inundabilidad que afecta un terreno, parcela, finca o área en particular y que se emite por la Oficina del Secretario de la Junta u oficina designada por la Comunidad Participante a solicitud de cualquier persona, entidad o grupo.

Ciclo Hidrológico - es el proceso continuo del movimiento del agua cerca de la superficie de la tierra, este proceso es principalmente producido por la energía del sol.

Condición Hidrológica - calidad o densidad de una cubierta, influye la capacidad de infiltración de un suelo. Su efecto es considerado en el número de curva del método del Servicio de Conservación de los Recursos Naturales (NRCS por sus siglas en inglés).

Cuenca - extensión territorial que contribuye escorrentía a un punto de interés.

Datos - Representación de información de una manera formalizada, útil para comunicación, análisis o procesamiento.

Dato geográfico - Cualquier información sobre la localización, forma de, y relaciones entre los rasgos geográficos.

Datum - Elevación que se utiliza como referencia para definir el resto de los puntos de un mapa.

Descarga - medida de flujo o volumen de agua por unidad de tiempo. Típicamente se mide en pies cúbicos por segundo o metros cúbicos por segundo.

Dique - Estructura dentro del valle inundable que consiste en una barrera para prevenir que las aguas de inundación se extiendan fuera de esos límites. Pueden ser construidos en tierra, cemento u otro material impermeable.

Diseño - Se entenderá como aquél realizado para las obras de protección contra inundaciones. Las obras de control de inundación para efectos del Reglamento Núm. 13 de la Junta de Planificación serán diseñadas para la protección contra la inundación base.

Drenaje Pluvial Natural - Depresión en el terreno por donde discurren las aguas de escorrentía por lluvias.

Dunas de Arena - Acumulaciones naturales de arena formando montículos o terraplenes tierra adentro de la playa.

Elipsoide o Esferoide - Modelo matemático que representa la superficie terrestre.

CG

Erosión debido a corrientes de agua - Deslizamiento del terreno en las orillas de un cuerpo de agua como resultado de los mecanismos de remoción de partículas de suelo causado por olas o corrientes de agua.

Estudio Hidrológico-Hidráulico - Estudio técnico científico mediante el cual se determinan las descargas y los niveles de agua. Usualmente se hace para inundaciones de diferentes magnitudes dentro de una cuenca hidrográfica.

Estudio del Seguro de Inundaciones - Informe oficial preparado por la Agencia Federal sobre Manejo de Emergencias en el cual se indican los perfiles de las inundaciones, así como los Cauces Mayores y Límites de Inundación y elevación de las aguas de la inundación base.

Flujo Base - es el flujo en un canal que proviene del flujo sub-superficial o del agua subterránea.

Flujo Crítico - es el flujo que ocurre en un canal cuando posee su energía específica mínima. Corresponde a un número de Froude igual a uno. En canales compuestos como los de zonas inundables, puede ocurrir más de una profundidad crítica ya que puede existir más de un mínimo en la energía específica.

Flujo No-Permanente - es un flujo en el cual las propiedades (principalmente velocidad y profundidad) en una sección del cuerpo de agua cambian con el tiempo.

Flujo Permanente - es un flujo en el cual las propiedades (principalmente velocidad y profundidad) en una sección del cuerpo de agua no cambian con el tiempo.

Flujo Subcrítico - Es aquel flujo cuyo número de Froude es menor de uno. Se caracteriza por ser un flujo tranquilo, de bajas velocidades y altas profundidades.

Flujo Supercrítico - Es aquel flujo cuyo número de Froude es mayor de uno. Se caracteriza por flujos agitados, de altas velocidades y bajas profundidades.

Formato de celdas - Ver "raster".

Fotogrametría - Ciencia y arte de deducir las dimensiones físicas de los objetos a partir de mediciones realizadas sobre fotografías. Una de sus principales aplicaciones es la obtención de datos utilizando fotografías aéreas.

Fotointerpretación - Técnica de identificar los objetos geográficos en una fotografía utilizando sus características de tamaño, ubicación, forma, luz, sombra, textura, color, entre otras.

Gráfico Digital de Línea (DLG) - "Digital line graph" por su nombre en inglés. Los DLG contienen información derivada de los mapas topográficos en formato vectorial (líneas, puntos, polígonos) que representan redes de transportación, hidrografía y límites. Estos archivos fueron generados por el USGS.

Geodato - Datos digitales que representan la localización geográfica y características de los rasgos naturales o artificiales, fenómenos y límites de la tierra. El geodato representa las abstracciones de entidades del mundo real, como caminos, edificios, vehículos, lagos, bosques y países. El geodato se refiere a los datos en cualquier formato "raster", vector, punto, texto, video y registros de una base de datos.

Hidráulica - Es el estudio de la mecánica del agua en procesos y sistemas físicos. Mediante la hidráulica es posible determinar la extensión y profundidad de las aguas. En el manejo de los valles inundables, la hidráulica se refiere a la determinación de la extensión lateral y vertical de una inundación en particular. La hidráulica también abarca las características del flujo alrededor y a través de las estructuras hidráulicas tales como puentes, atarjeas y vertedores.

Hidrografía - Es una rama de la geografía que se ocupa de la descripción y estudio sistemático de los diferentes cuerpos de agua.

Hidrograma - gráfico que muestra la relación entre la descarga y el tiempo para un punto y evento específico.

Hidrología - Rama de la ciencia y la ingeniería que trata la ocurrencia, la circulación y la distribución de las aguas de la tierra. En el manejo de los valles inundables, la hidrología se refiere a la porción de precipitación-escorrentía del ciclo hidrológico

aplicada a los eventos extremos. En un estudio de valles inundables, la hidrología se utiliza para estimar los caudales de la inundación.

Hietograma - Es una gráfica que muestra la relación entre la intensidad o profundidad de lluvia y el tiempo.

Inundación - La acción o efecto en las extensiones de terreno, normalmente secos al quedar cubiertos por las aguas debido a lluvias, crecientes, marejadas y desbordamiento de cuerpos de agua, quebradas, arroyos y a otras fuerzas de la naturaleza.

Inundación Base - Inundación que tiene un uno (1%) por ciento de probabilidad de ser igualada o excedida en un año dado. El periodo de recurrencia es el inverso de la probabilidad de excedencia, por lo tanto, la Inundación Base es la inundación con un periodo de recurrencia de 100 años.

Mapa - Es una representación visual de datos geospaciales en dos dimensiones.

Mapa de zonas inundables - Representación gráfica del área especial de riesgo a inundación.

Mapa de Tasas del Seguro de Inundación (Flood Insurance Rate Maps, FIRM) - Mapa oficial preparado y aprobado por Agencia Federal sobre Manejo de Emergencias (Federal Emergency Management Agency, FEMA) que adopta la Junta de Planificación y que identifica las áreas especiales de riesgo a inundación.

Metadata - No tiene una definición única. La definición más conocida es que son "datos sobre los datos". Es información relevante acerca de los datos. Entre la información contenida en un metadata se puede incluir: la fecha en que se generaron los datos, la agencia o persona que los generó, el sistema de coordenadas que utilizaron, la precisión y resolución de los datos y cualquier otra información relevante.

Modelo Digital de Elevaciones (DEM) - Digital Elevation Model por su nombre en inglés. Es una representación de los valores de elevación de una superficie topográfica, usualmente utilizada para representar la superficie del terreno.

Nivel de Inundación Base - Elevación máxima que alcanzarían las aguas desbordadas de un cuerpo de agua durante una inundación base. Es la elevación que tendría un (1%) por ciento de probabilidad de ser igualada o excedida en cualquier año.

Nivel Promedio del Mar (Mean Sea Level, MSL) - significa para propósitos de la Administración de los Valles Inundables, el "National Geodetic Vertical Datum" (NGVD) del año 1929 u otro, al cual están referidos los niveles de inundación base.

Número de Curva (CN por sus siglas en inglés) - es un índice adimensional desarrollado por el Servicio de Conservación de Recursos Naturales (NRCS por sus

siglas en inglés) que representa la combinación del tipo de suelo y el uso de terreno para un área.

Número de Froude (Fr) - Es un parámetro adimensional que caracteriza el flujo en canales abiertos. Este número es una medida de la razón entre la fuerza de inercia que actúa en un elemento de fluido y el peso de dicho elemento. Este parámetro se utiliza para clasificar el flujo en supercrítico si Fr es mayor que uno, crítico si Fr es igual a uno y, subcrítico si Fr es menor que uno.

Número de Reynolds - El número de Reynolds es un parámetro adimensional que se utiliza para clasificar el flujo en turbulento, transitorio o laminar. Este número es una medida de la razón entre la fuerza de inercia actuando sobre un fluido y las fuerzas viscosas que actúan en él. En general, los cuerpos de agua tienen flujos turbulentos.

Obstáculo (obstrucción, invasión o restricción) - Incluye cualquier represa, desvío, desarrollo o nueva construcción, pared revestida de piedra, terraplén, malecón, dique, pila, estribo, proyección, excavación, rectificación de canal, puente, conducto, atarjea, relleno u otra estructura análoga o natural que se encuentra a lo largo, a través o proyectado dentro del valle inundable el cual puede impedir, retardar o alterar el patrón del flujo de las aguas ya sea por sí mismo o atrapando escombros transportados por el agua o, que esté localizado donde el flujo natural de las aguas podría transportar el obstáculo aguas abajo para daño o pérdida de la vida o propiedad.

Oficina de Gerencia de Permisos (OGPe) - Oficina del Gobierno de Puerto Rico creada por la Ley 161 del 1 de diciembre de 2009, según enmendada. Esta Oficina es la encargada de emitir determinaciones finales y permisos, licencias, inspecciones, certificaciones y cualquier otra autorización o trámite para atender las solicitudes de la ciudadanía.

Perímetro Mojado - Longitud de la línea de contacto entre el agua y las paredes y fondo del cauce de agua.

Píxel - Abreviatura para "Picture Element", por su nombre en inglés. Término utilizado para denominar los elementos que componen una imagen. La menor unidad en la que se descompone una fotografía o una imagen.

Planicie inundable - Porción del valle inundable que yace en el exterior del cauce mayor y colinda con éste. El valle inundable consiste del cauce mayor y de las planicies inundables.

Programa Nacional del Seguro de Inundación (National Flood Insurance Program, NFIP) - Programa creado por el Congreso de los Estados Unidos en el año 1968 y mediante el cual se hace disponible el seguro de inundación a las comunidades participantes.

Proyección cartográfica - Forma de representar el globo terráqueo sobre una superficie plana. Esta se define por el tipo de superficie que adopte.

Quebrada - Curso de agua que forma parte del sistema de tributarios de un río o que descarga a un lago, laguna, mar u océano.

Radio hidráulico - representa la relación entre el área de la sección transversal del cauce llena de agua y el perímetro mojado.

“Raster” - Modelo de representación espacial de datos que define los espacios en arreglos de celdas de tamaños iguales ordenadas en filas y columnas. Cada celda contiene un valor asociado y una localización geográfica. Contrario al formato de vector que almacena la posición geográfica de forma explícita, la localización en un “raster” está en el orden de las celdas en la matriz. Grupos de celdas con el mismo valor representan el mismo tipo de objeto geográfico.

Resolución espacial - Está relacionado con la claridad con que se pueden distinguir los objetos en una imagen. Se refiere al tamaño de un píxel y el área que cubre en la superficie.

Río - Curso de agua que sirve de desagüe principal a una cuenca y que descarga a otro río, lago, laguna, mar, océano u otro cuerpo de agua.

Salto hidráulico - Es una transición súbita de un flujo supercrítico a un flujo subcrítico. En un salto hidráulico de número de Froude cambia de $Fr > 1$ a $Fr < 1$.

“Shapefile” (.shp) - Tipo de archivo digital desarrollado por la compañía ESRI para almacenar localización, forma y atributos de un objeto geográfico como vectores.

Sistema de coordenadas - Sistema para la ubicación de un objeto sobre la tierra. Consiste de dos lecturas angulares que son Latitud y Longitud partiendo desde el centro del globo terráqueo hasta la superficie de la tierra.

Sistema de coordenadas planas estatal (State Plane Coordinate System) - Por sus siglas en inglés SPCS. Es un sistema de coordenadas desarrollado por el “U.S. Coastal and Geodetic Survey” para todos los estados y territorios de Estados Unidos. Utiliza el cono y el cilindro como superficies desarrollables dependiendo de la zona en que se encuentre. Para Puerto Rico utiliza la proyección cónica Lambert (NAD-83).

Sistema de información geográfica (GIS) - Este sistema comprende equipo de computadora, programas y recurso humano que utiliza datos geográficos espacialmente referenciados que permiten la interacción, análisis, visualización de éstos y que nos ayudan a identificar relaciones, patrones, tendencias y buscar solución a problemas (GIS, Geographic Information System, por sus siglas en inglés).

Sistema de posicionamiento global (GPS) - Sistema de navegación basado en satélites, desarrollado por el Departamento de Defensa de los Estados Unidos y utilizado para determinar posiciones sobre la superficie de la tierra.

Tiempo de concentración (T_c) - Tiene varias definiciones. La más común es el tiempo que tarda una gota de agua en viajar del punto hidráulicamente más distante en una cuenca al punto de interés. El tiempo de concentración se puede definir también como el tiempo entre el centro de masa de la lluvia efectiva y el punto de inflexión del hidrograma.

Valle Inundable - Terrenos llanos o semi-llanos normalmente secos y susceptibles a inundaciones por aguas provenientes de una fuente natural. Usualmente es un área baja adyacente a un cuerpo de agua, quebrada, arroyo, océano o lago afectados por la inundación de niveles más altos conocida en la historia de la región o por la inundación base, según ilustrados en estudios y mapas disponibles hasta el presente.

“Vector” - Modelo de representación espacial de los datos basado en la ubicación geográfica que representa los objetos como puntos, líneas y polígonos.

2.2 Abreviaturas

CRIM - Centro de Recaudación de Impuestos Municipales

DEM - Modelo digital de elevaciones de la superficie (Digital Elevation Model, por su nombre en inglés).

DLG - Gráfico digital de líneas, usualmente cotas de elevación (Digital Line Graph, por su nombre en inglés).

DRNA - Departamento de Recursos Naturales y Ambientales.

ESRI - Instituto de Investigaciones sobre Sistemas Ambientales (Environmental Systems Research Institute, por su nombre en inglés).

FHWA - Administración Federal de Carreteras (FHWA por sus siglas en inglés)

FEMA - Agencia Federal para el Manejo de Emergencias del Departamento de Seguridad Nacional que administra el Programa Nacional de Seguro de Inundación.

FIS - Flood Insurance Study

FIRM - Flood Insurance Rate Map

JP - Junta de Planificación

Msl - Nivel medio del mar (msl por sus siglas en inglés)

NOAA - Administración Nacional de los Océanos y la Atmósfera (NOAA por sus siglas en inglés)

NRCS - Servicio de Conservación de Recursos Naturales del Departamento de Agricultura del gobierno de los Estados Unidos (NRCS por sus siglas en inglés).

NWS - Servicio Nacional de Meteorología (NWS por sus siglas en inglés)

TIN - Malla triangular irregular (Triangular Irregular Network, por su nombre en inglés).

USACE - Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los Estados Unidos (United States Army Corp of Engineers, por su nombre en inglés)

USGS - Servicio Geológico de los Estados Unidos (United States Geological Survey, por su nombre en inglés).

GIS - Sistema de Información Geografía (Geographic Information System, por sus siglas en inglés).

GPS - Sistema de Posicionamiento Global (Global Positioning System por sus siglas en inglés)

RECONOCIMIENTO DE CAMPO

Los ingenieros a cargo de la modelación hidrológica e hidráulica deberán incluir una descripción de las visitas de campo que se realizaron para el proyecto.

Los ingenieros a cargo de la modelación hidrológica e hidráulica deberán incluir una descripción de las visitas de campo que se realizaron.

En esta sección se incluye la información hidráulica y geomorfológica del cauce y el valle inundable requerida

para un estudio H-H. Esta información provee criterio para la selección de alternativas para el diseño y permite incorporar aspectos particulares para la realización de un proyecto con diseños seguros y estructuras de dimensiones apropiadas.

Las visitas de campo deben ser documentadas mediante fotografías o videos cortos en formato digital. Durante la visita se deben anotar características hidráulicas y geomorfológicas que describan las condiciones del cauce y del valle inundable.

Deben documentarse como mínimo las siguientes condiciones:

1. Características del material del cauce y los bancos (tipo de suelos, elevación, pendiente y material de los bancos)
2. Vegetación, cultivos y otras características del valle inundable
3. Posible migración de meandros y alineación del cuerpo de agua
4. Condiciones de estabilidad del cuerpo de agua en el tramo del proyecto
5. Condición de las estructuras existentes tales como puentes, atarjeas, compuertas y obras de tomas de agua
6. Erosión de la ribera en su parte superior e inferior
7. Descripción de los materiales predominantes en el tramo del proyecto (arenas, gravas, arcillas)
8. Existencia de umbrales geomorfológicos y controles hidráulicos tales como vertedores, contracciones y expansiones súbitas
9. Evaluación cualitativa de la capacidad del cauce para el transporte de sedimentos
10. Tipos de protección recomendadas para el pie del banco y para la parte superior (si aplica)
11. Otras condiciones en la cuenca que puedan provocar inestabilidad dentro del tramo afectado por el proyecto

HIDROLOGÍA

4.1 Propósito

La respuesta hidrológica de la cuenca hidrográfica proporciona hidrogramas que indican el valor de la descarga máxima o caudal de diseño a ser utilizado para determinar los niveles de inundación producidos.

La hidrología es un tema multidisciplinario que trata la ocurrencia, la circulación y la distribución de las aguas del planeta Tierra. Las descargas de una corriente fluvial son una función de las características de la cuenca hidrográfica, así como las condiciones meteorológicas locales. La respuesta hidrológica de la cuenca hidrográfica proporciona

hidrogramas que indican el valor de la descarga máxima o caudal de diseño a ser utilizado para determinar los niveles de inundación producidos.

El propósito de este capítulo es detallar las metodologías aceptadas para estimar estas descargas fluviales. Estas metodologías incluyen el obtener las descargas fluviales a ser utilizadas en los estudios requeridos por el DRNA y la JP para estudios hidráulicos y de transporte de sedimentos, usando un modelo computadorizado de precipitación-escorrentía.

4.2 Recolección y Manejo de Datos Hidrológicos

El tipo de datos necesarios para realizar un análisis hidrológico dependen de la naturaleza del estudio y de la metodología a utilizar. Las siguientes secciones presentan un compendio de los datos más comunes utilizados en estos estudios.

4.2.1 Delimitación de los límites de la cuenca hidrográfica

Uno de los pasos de mayor importancia en un estudio hidrológico es la determinación espacial del área de drenaje del punto de interés. A esta extensión territorial se le conoce como cuenca hidrográfica, área de drenaje o área de captación. Los límites del área de captación deben ser identificados y provistos mediante una representación gráfica como parte del informe del análisis hidrológico. La cuenca hidrográfica debe ser subdividida según la necesidad del estudio de tal manera que cada división represente áreas homogéneas hidrológicamente hablando. Cada subcuenca debe estar debidamente identificada en la figura.

4.2.1.1 Delimitación manual

La delimitación de los límites de la cuenca hidrográfica requiere el uso de planos o mapas topográficos. Para este propósito se utilizará la última versión de los cuadrángulos de 7.5 minutos (escala 1:20,000) del USGS. La cuenca se delimitará sobre el plano topográfico marcando claramente el punto de interés y los límites sobre las cotas de elevación. El área de cada subcuenca se debe medir mediante una técnica que provea suficiente precisión (planímetro por ejemplo).

4.2.1.2 Delimitación Automatizada

Se recomienda la utilización de un Sistema de Información Geográfica (GIS) para la delimitación automatizada de cuencas hidrográficas, así como, para la obtención de otros parámetros geofísicos e hidrológicos.

Se recomienda la utilización de un Sistema de Información Geográfica (GIS) para la delimitación automatizada de las cuencas hidrográficas, así como, para la obtención de otros parámetros geofísicos e hidrológicos. Los datos se superponen mediante el uso de coberturas que indican las diferentes características y parámetros de la cuenca hidrográfica.

Existen distintas aplicaciones de GIS que permiten el manejo y procesamiento de datos geográficos. Las aplicaciones deben aceptar y trabajar con coberturas en formato "shapefile" (.shp) y poseer opciones para la delimitación automatizada de cuencas hidrográficas utilizando un DEM.

Es requisito proveer información de las fuentes de donde provienen los DEMs y detalles de la metodología utilizada en la obtención de los parámetros geográficos e hidrográficos de la cuenca.

Algunas de estas herramientas permiten procesar un DEM y a la vez generar variables hidrológicas. Se recomienda la mejor resolución y calidad posible en todos los datos. En el caso particular de los DEM, si provienen del USGS pudieran tener una resolución espacial de 30 metros por 30 metros por cada celda; si provienen del CRIM pueden tener una resolución espacial de 10 metros por 10 metros por cada celda o menos. Estos últimos son preferibles. Algunos datos pueden ser generados mediante la digitalización de los mismos sobre una fotografía aérea, utilizando un GPS. Es requisito proveer detalles de la metodología utilizada en la obtención de los parámetros geográficos e hidrográficos de la cuenca.

A pesar de ser una herramienta de trabajo poderosa, los GIS tienen la limitación de que dependen de la precisión y resolución de los datos geográficos que se utilizan. Si los datos utilizados no son correctos los

resultados tampoco lo serán. En ocasiones los datos son correctos pero la resolución no es la adecuada y en esos casos se requiere de trabajo de campo para obtener la información necesaria. Por ejemplo, en áreas llanas, el DEM pierde precisión al delimitar una cuenca y definir la red de drenajes, por lo que el ingeniero deberá hacer uso de otros medios para definir los límites de la cuenca en esas áreas. Otro caso parecido son las áreas urbanizadas en los bordes de la cuenca. Dichas áreas deberán ser corregidas con trabajo de campo debido al cambio de los patrones de drenajes naturales causados por los sistemas de alcantarillados pluviales y cunetas.

Para mejorar la precisión del DEM se recomienda incorporar datos topográficos tomados por un agrimensor. Una topografía de campo puede ser convertida a DEM y ser utilizada para corregir las elevaciones en esa área, mejorando la precisión y la resolución del DEM original. Estos cambios deben ser mencionados en el estudio H-H.

4.2.2 Fuentes de Datos

Existen varias agencias estatales y federales, así como grupos especializados, que distribuyen sus datos al público descargándolos a través de la red cibernética u ordenándolos en formato digital. También están disponibles las coberturas de terreno, límites geográficos, hidrografía, carreteras, topografía, y elevaciones. Las fuentes de información digitales cambian continuamente y los ingenieros deben mantenerse al día para poder utilizar los datos más recientes.

A continuación se mencionan algunas fuentes de datos, por categoría, útiles para los estudios H-H.

1. Elevaciones:

Trabajo de campo (agrimensor)

DEM (USGS, CRIM)

2. Lluvia:

Atlas 14 de la NOAA

Lluvia de radar de NWS

3. Tipos Suelos:

Websoil de NRCS

4. Uso de terrenos:

Junta de Planificación

Departamento de Recursos Naturales y Ambientales

4.3 Determinación de Caudales de Diseño

En Puerto Rico, el USGS recolecta y mantiene registros de caudales obtenidos en estaciones de aforo en varios cuerpos de agua de la isla. Los registros varían en duración desde sobre 50 años de datos hasta menos de 20 años. Esta información está disponible a través de la red cibernética y pueden ser obtenidos con relativa facilidad.

En la determinación de caudales de diseño es necesario utilizar técnicas probadas y aceptadas en la práctica de la Ingeniería de Recursos de Agua. Las secciones que siguen presentan algunas de estas técnicas en el orden de preferencia de aplicación.

4.4 Análisis de Frecuencia de Caudales

Como se mencionó anteriormente, el resultado del estudio hidrológico es la determinación de la magnitud de los caudales a ser utilizados en el diseño de obras hidráulicas o algún otro tipo de análisis hidrológico o hidráulico. Siendo así, los datos históricos de caudales son de suma importancia para la determinación de las magnitudes de los caudales de diseño que correspondan a una recurrencia, o probabilidad específica. Los registros de caudales históricos proveen una fuente de información que puede ser utilizada para estimar la magnitud y frecuencia de ciertos eventos de caudales. La técnica más aceptada en el campo del análisis de caudales es el análisis de frecuencia.

En Puerto Rico, el USGS recolecta y mantiene registros de caudales obtenidos en estaciones de aforo en varios cuerpos de agua de la isla. Los registros varían en duración desde sobre 50 años de datos o más, hasta menos de 20 años. Esta información está disponible a través de la red cibernética y pueden ser obtenidos con relativa facilidad.

Los datos históricos de caudales, si están disponibles, deben ser analizados y estudiados para determinar ciertas características de la cuenca hidrográfica. Por ejemplo, cuando se utiliza la curva de recesión del hidrograma para calcular el flujo base en un canal es necesario obtener la constante de recesión de los datos observados. Otra información importante puede ser obtenida al analizar los datos históricos de caudales.

En muchas ocasiones la ubicación de la estación de aforo con los datos históricos de caudales no coincide con la ubicación del punto de interés en la cuenca hidrográfica. En estos casos los caudales históricos pueden ser ajustados, siempre y cuando las condiciones hidrológicas sean similares y la diferencia en área de captación de los puntos (punto de interés y ubicación de la estación de aforo) no exceda 10% del área mayor, utilizando la siguiente relación lineal:

$$Q_a = \frac{A_i}{A_h} Q_h$$

donde Q_a es el caudal ajustado para el área de interés A_i , Q_h es el caudal histórico medido en la estación de aforo y A_h es el área de captación de la estación de aforo. Los valores de caudales ajustados pueden ser utilizados para realizar los análisis necesarios para determinar el caudal de diseño según requerido.

En el caso de cuencas desaforadas, la utilización de ecuaciones de regresión podría ser una alternativa. El problema con esta técnica es que los errores obtenidos al presente en los diversos estudios realizados en Puerto Rico en el desarrollo de estas ecuaciones han demostrado que no son suficientemente pequeños como para ser utilizados con el propósito de diseño de obras hidráulicas. Por lo tanto, estas ecuaciones no se utilizarán con el propósito de diseño.

El análisis de frecuencia de caudales es un procedimiento para estimar la frecuencia, o probabilidad, de ocurrencia de un evento del pasado o del futuro. Siempre y cuando estos datos estén disponibles, y sean adecuados para su uso, el análisis de frecuencia de caudales debe ser la técnica primaria para la estimación de caudales de diseño. La utilización de esta técnica debe realizarse siguiendo estrictamente la guía del Boletín 17B (USIACWD, 1982). El USGS y el USACE han desarrollado aplicaciones para computadora que automatizan este procedimiento y producen las magnitudes de caudales para varias recurrencias o probabilidades de excedencia definidas.

4.5 Análisis de lluvias para obtención de caudales

Cuando el record de datos históricos no sea adecuado para realizar un análisis de frecuencia, o no existen datos históricos algunos, se utilizarán datos de lluvia para generar caudales mediante la utilización de modelos hidrológicos computadorizados de precipitación-escorrentía. Los datos de lluvia que alimentan los modelos hidrológicos de precipitación-escorrentía se usan para estimar los caudales necesarios para el diseño de estructuras hidráulicas y otros tipos de análisis hidrológicos e hidráulicos. La naturaleza del estudio hidrológico determina el tipo de datos requeridos. Datos históricos de lluvia son usualmente utilizados para reconstruir eventos del pasado y determinar la respuesta hidrológica de un área de captación específica. Por otro lado, el análisis hidrológico con propósito de diseño requiere la determinación de caudales que correspondan a ciertas recurrencias y duraciones de lluvia.

4.6 Datos de Lluvia

El NWS realizó un análisis de frecuencia para la lluvia de Puerto Rico y publicó los resultados en el Atlas de Precipitación-Frecuencias para Puerto Rico y las Islas Vírgenes - Atlas 14 (NWS, 2006). Los resultados del análisis del NWS presentan distribuciones temporales de lluvia para duraciones de 1, 6, 12, 24 y 96 horas

desarrolladas con datos históricos de lluvia de Puerto Rico. Esta información está disponible a través de la red cibernética en las páginas de la NOAA.

Los datos de lluvia para el análisis hidrológico deberán obtenerse de este documento para las recurrencias y duraciones requeridas según el propósito del estudio y la reglamentación vigente.

4.6.1 Distribución Temporal de la Lluvia

La distribución temporal de la lluvia se refiere a la forma en que la cantidad total de lluvia se distribuye dentro del tiempo de duración del evento. Usualmente la distribución temporal de la lluvia depende de factores meteorológicos inherentes en la formación de las nubes de lluvia y la cantidad de agua en éstas, así como de otros factores meteorológicos, como la velocidad y dirección del viento. Aunque se han realizado varias investigaciones específicas para las condiciones climáticas de Puerto Rico, los estudios no son concluyentes como para recomendar procedimientos para desarrollar distribuciones temporales de lluvia que representen la realidad de la Isla con el propósito de diseñar.

CA

Para satisfacer esta necesidad, la práctica de la ingeniería en el desarrollo de análisis hidrológicos ha utilizado distribuciones temporales de lluvia empíricas desarrolladas en otros lugares. Un ejemplo es la distribución tipo II desarrollada por el NRCS, la cual se ha usado en Puerto Rico en aquellos casos en que el evento analizado tiene una duración de 24 horas. Para el análisis de eventos con duraciones diferentes a 24 horas, se ha aceptado el método de Bloques Alternos descrito en varias referencias clásicas de hidrología.

Los resultados del análisis del NWS incluyen distribuciones temporales de lluvia para duraciones de 1, 6, 12, 24 y 96 horas desarrolladas con datos históricos de lluvia de Puerto Rico.

En el estudio del NWS (2006), las distribuciones temporales para Puerto Rico se presentan en términos probabilísticos como porcentajes acumulados de precipitación y duración para varios percentiles. Además, las distribuciones se subdividen en cuartiles basado en dónde, dentro de la

distribución del tiempo, se concentra el mayor volumen de la lluvia. Los resultados de este análisis demostraron que la distribución tradicional con la lluvia concentrada en las horas centrales de la duración del evento no puede ser sostenida por la data histórica.

Luego de un análisis exhaustivo de las 180 distribuciones temporales para las duraciones de 1, 6, 12 y 24 horas se concluye que las distribuciones temporales de lluvia que producen los caudales picos mayores corresponden al primero y cuarto cuartiles y los percentiles 10% y 90%, respectivamente. Estas distribuciones serán utilizadas en los estudios H-H requeridos por el DRNA y la JP para las duraciones de 1, 6, 12 y 24 horas en conjunto con la lluvia acumulada obtenida del NOAA Atlas

14, Volumen 3 para los periodos de recurrencia reglamentados. El Apéndice I presenta estas distribuciones en forma tabular y gráfica.

4.6.2 Intervalo de tiempo para la distribución temporal de la lluvia

La magnitud del caudal pico, determinado mediante el uso de modelos hidrológicos computadorizados, es sensible al tamaño del intervalo de tiempo utilizado en la distribución temporal de la lluvia. Aunque no se han provisto métodos específicos para determinar el tamaño del intervalo de tiempo, sí se ha demostrado que a mayor la magnitud del intervalo de tiempo menor será la magnitud del flujo pico, y viceversa. La Tabla 4.1 presenta el tamaño del intervalo de tiempo que se utilizarán para los datos de lluvia de eventos de varias duraciones.

Tabla 4.1. Criterio para la selección del tamaño de intervalo de tiempo para describir la distribución temporal de la 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

4.7 Modelos Hidrológicos Computadorizados

Existen en el mercado una variada cantidad de modelos computadorizados que pueden ser utilizados para determinar el caudal de diseño en un análisis hidrológico. Al transcurrir del tiempo, algunos de estos modelos han sido mejorados y sustituidos por otros más actualizados que incorporan métodos hidrológicos aceptados y que permiten el uso de herramientas modernas como los GIS. Entre los métodos hidrológicos aceptados, el TR-55 (NRCS, 1986) es preferido para los estudios hidrológicos. Este método ha sido incluido en la aplicación HEC-HMS. El DRNA y la JP recomiendan el uso de la aplicación HEC-HMS para estudios hidrológicos en Puerto Rico. Otras aplicaciones pueden ser utilizadas previa consulta con el DRNA y la JP.

El Sistema de Simulación Hidrológica (HMS, por sus siglas en inglés) fue creado por el USACE para simular los procesos de precipitación-escorrentía de sistemas de cuencas. La aplicación puede ser utilizada en cualquier área geográfica y para la solución de una amplia variedad de problemas. Los hidrogramas calculados por esta aplicación pueden ser utilizados directamente o en conjunto con otras aplicaciones computadorizadas para estudiar la disponibilidad de agua, drenajes urbanos, predicciones de caudales, impactos de futuros desarrollos urbanos, diseño de vertedores, estudios de reducción de daños por inundaciones, análisis de valles inundables, y operación de sistemas. HEC-HMS contiene varios métodos hidrológicos

Entre los métodos hidrológicos aceptados, el TR-55 (NRCS, 1986) es preferido para los estudios hidrológicos. Este método ha sido incluido en la aplicación HEC-HMS. El DRNA y la JP recomiendan el uso de la aplicación HEC-HMS para estudios hidrológicos en Puerto Rico.

para determinar las pérdidas de la lluvia y calcular la escorrentía. Entre ellas está el método del NRCS (TR-55), el cual es muy utilizado en Puerto Rico. También contiene otras técnicas, las cuales se ven en ocasiones limitadas en su uso debido a la falta de información requerida en su aplicación. HEC-HMS tiene además la posibilidad de integrar las herramientas de GIS a través de la aplicación GEO-HMS. El ingeniero deberá ser consistente en las

metodologías seleccionadas y evitar mezclar unas con otras.

4.7.1 Método del TR-55 del NRCS en HEC-HMS

El Informe Técnico Núm. 55 (TR-55) del SCS (hoy conocido por NRCS) contiene procedimientos para estimar el caudal como respuesta de una cuenca hidrográfica a un impulso de lluvia. Este método está incluido en la aplicación HEC-HMS. La aplicación HEC-HMS provee la oportunidad para crear varios modelos de lluvia-escorrentía, seleccionando de entre las varias técnicas, para calcular las pérdidas de la lluvia, flujo base, hidrogramas y rastreos en los canales de la red fluvial. Para efectos de la determinación de caudales de diseño, el HEC-HMS será ejecutado en modo de evento independiente.

4.7.1.1 Número de Curva (Curve Number, CN)

La aplicación HEC-HMS contiene varias técnicas de hidrograma unitario desarrolladas por el NRCS. En la estimación de las abstracciones hidrológicas (pérdidas) se usará el método del Número de Curva, descrito a continuación.

El ingeniero incluirá en su informe los mapas de suelo y uso de terreno utilizados en el cómputo del CN. En el cómputo del CN se excluirá la condición de humedad antecedente I (AMC-I).

El Número de Curva, (CN, por sus siglas en inglés) es un parámetro de escorrentía que engloba las condiciones de la superficie de la cuenca para la producción de escorrentía. Las condiciones de la superficie incluyen aquellas atribuibles a las condiciones y tipo de suelos, los usos de los terrenos y otros factores hidrológicos. El CN varía entre 0 y 100 donde el cero representa

que el 100 por ciento de la lluvia se ha retenido en el cuenca y no produce escorrentía mientras que el 100 indica que prácticamente toda la lluvia se ha convertido en escorrentía. El ingeniero incluirá en su informe los mapas de suelo y uso de terreno utilizados en el cómputo del CN. Estos mapas deben tener claramente marcados e identificados los límites de la cuenca y subcuencas. Se podrá utilizar herramientas de GIS para la preparación de

estos mapas y para el cómputo del CN. Los cálculos del CN deberán ser incluidos en un apéndice del estudio. En el cómputo del CN se excluirá la condición de humedad antecedente I (AMC-I).

4.7.1.2 Tiempo de concentración y de retardo

El método del NRCS recomienda únicamente dos maneras para calcular los parámetros de tiempo utilizados en esta técnica. Las mismas son conocidas como *Método de Velocidad* y *Método de Retardo* (Lag Method, por su nombre en inglés). Sin embargo, otras técnicas para calcular el tiempo de concentración pueden utilizarse si se demuestra que dichas técnicas aplican a las condiciones locales y no únicamente a las condiciones donde fueron desarrolladas.

El *método de velocidad* incluye el cálculo del tiempo de viaje de una partícula de agua dentro de la cuenca. El tiempo de viaje se calcula para tres tipos de regímenes de flujo diferentes, esto es, flujo como lámina sobre la superficie, flujo concentrado de poca profundidad, y flujo en canal abierto. Cada uno de estos regímenes cuenta con su propia técnica para determinar el tiempo de viaje y sus propias limitaciones. El ingeniero deberá referirse al Informe Técnico Núm. 55 (TR-55) del NRCS para más detalles. El tiempo de concentración es el tiempo que le toma a una partícula de agua viajar desde el punto más lejano de la cuenca, hidráulicamente hablando, hasta llegar al punto de interés.

El ingeniero deberá presentar el valor de todos los parámetros utilizados en el cómputo del tiempo de retardo. El HEC-HMS requiere el ingreso del tiempo de retardo en minutos u horas. Si el ingeniero calcula el tiempo de concentración podrá utilizar la relación $T_{lag} = 0.6 T_c$ para obtener el tiempo de retardo.

El *método de retardo* requiere el uso del CN, del largo hidráulico de la cuenca y de la pendiente promedio de la superficie de la cuenca. Hasta el presente el uso de este método era tedioso y consumía mucho tiempo, específicamente para determinar la pendiente promedio de la cuenca. Sin embargo, con la ayuda de las nuevas herramientas de GIS, el cómputo de la pendiente promedio de la superficie de la cuenca se ha simplificado en gran manera. No obstante, el ingeniero deberá ejercer precaución al utilizar las herramientas de

GIS. El uso y aplicación incorrecta de los modelos de elevación digital (DEM) pueden producir valores errados en áreas escarpadas con altas pendientes. Para estos casos se requiere el uso de DEMs con resolución espacial de 10 metros o menos. El ingeniero deberá presentar el valor de todos los parámetros utilizados en el cómputo del tiempo de retardo. El HEC-HMS requiere el ingreso del tiempo de retardo en minutos u horas. Si el ingeniero

calcula el tiempo de concentración podrá utilizar la relación $T_{lag} = 0.6 T_c$ para obtener el tiempo de retardo.

4.7.2 Intervalo de tiempo computacional

El ingeniero utilizará el tamaño de intervalo de tiempo más pequeño posible sin recibir avisos o advertencias del modelo al respecto. El tamaño más pequeño es de un minuto.

Este es el *intervalo de tiempo* utilizado por HEC-HMS para realizar los cálculos del hidrograma de escorrentía. El tamaño de este intervalo tiene influencia en la magnitud del caudal pico determinado por el modelo. El ingeniero utilizará el tamaño de intervalo de tiempo más pequeño posible sin recibir avisos o advertencias del modelo al respecto.

El tamaño más pequeño es de un minuto. El tiempo al pico también es influenciado por este parámetro de tiempo.

Si el intervalo de tiempo de computación de un minuto funciona bien para eventos de lluvia de 24 horas de duración, entonces se utilizará un minuto para el intervalo de tiempo de computación para eventos de lluvia de menor duración. Intervalos de tiempo entre 1 y 5 minutos parecen dar resultados razonables para eventos de lluvia de 24 horas de duración.

El ingeniero debe estar consciente que el intervalo de tiempo de computación es distinto al intervalo de tiempo de los datos de lluvia. Consecuentemente, la aplicación HEC-HMS interpolará los valores de lluvia para aquellos intervalos de tiempo de computación para los cuales no se ha provisto información en los datos ingresados.

4.8 Otros modelos

Si el ingeniero pretende utilizar otros modelos hidrológicos deberá consultar por escrito y brindar una justificación al DRNA y la JP previo a la preparación del estudio para establecer detalles de su aplicación.

4.9 Calibración y verificación del modelo

Un modelo de simulación hidrológico, sin importar cuál sea, contiene parámetros que definen las condiciones particulares de la cuenca bajo estudio. Estos parámetros, usualmente con valores constantes durante el tiempo de la simulación, deben ser determinados usando datos locales. El valor verdadero de estos parámetros nunca es conocido, por lo que se introducen errores en los resultados del modelo.

Calibrar un modelo es buscar los valores de los parámetros del modelo que produzcan los errores mínimos en la respuesta del mismo. Para minimizar los errores en los resultados, se han desarrollado técnicas y procedimientos que garantizan la reducción

Para minimizar los errores en los resultados, se han desarrollado técnicas y procedimientos que garantizan la reducción de los errores en los resultados. Estas técnicas se conocen como calibración del modelo.

de los errores en los resultados. Estas técnicas se conocen como calibración del modelo.

La calibración puede ser manual o automatizada. En una calibración manual el ingeniero trata diferentes valores para los parámetros y compara el resultado del modelo con datos observados. Usualmente la comparación se realiza mediante la observación de diagramas que muestran el comportamiento de los residuales y utilizando estadísticas que definen el comportamiento de los residuales. El ingeniero ejerce entonces su juicio profesional para seleccionar la mejor combinación de valores de los parámetros. La calibración manual es requerida cuando la aplicación

de lluvia-escorrentía utilizada no contiene módulos, o subrutinas, de calibración.

La calibración automatizada realiza la búsqueda de la mejor combinación de los valores de los parámetros que produzca el menor error posible en los resultados. Este proceso se lleva a cabo utilizando métodos de búsqueda automáticos junto a un criterio para medir el error (función objetiva). El ingeniero ejerce su juicio profesional sobre los resultados de la calibración automatizada y decide si la misma fue exitosa o si necesita ser ajustada. La aplicación HEC-HMS contiene un módulo de calibración.

Existe una gran variedad de técnicas o métodos de búsqueda y criterios de errores (funciones objetivas) que pueden ser utilizados para calibrar un modelo. El ingeniero debe tener un conocimiento mínimo sobre técnicas de calibración para seleccionar adecuadamente el método aplicable.

Una vez el modelo es satisfactoriamente calibrado, se debe verificar utilizando datos observados diferentes a los empleados en la calibración. Los mismos criterios para medir la bondad de ajuste de los parámetros durante la calibración pueden ser utilizados para establecer las bondades de la verificación.

En ocasiones es difícil calibrar un modelo por falta de datos observados adecuados para este propósito. En este caso, el ingeniero incluirá en su informe todas las gestiones realizadas para calibrar el modelo y las razones por las cuales no se pudo realizar la misma. Sin embargo, se incluirá un análisis de sensibilidad de los parámetros del modelo que identifique aquellos parámetros de mayor influencia en los resultados del modelo y las precauciones tomadas para justificar el valor adoptado para estos parámetros.

4.10 Análisis de sensibilidad

El ingeniero debe incluir en el estudio H-H un análisis de sensibilidad para todos los parámetros utilizados durante la simulación. El análisis de sensibilidad es una herramienta que permite identificar aquellos parámetros del modelo que influyen la

El ingeniero debe incluir en el estudio H-H un análisis de sensibilidad para todos los parámetros utilizados durante la simulación.

respuesta del mismo. El ingeniero incluirá en el estudio H-H un análisis de sensibilidad para todos los parámetros utilizados durante la simulación. El análisis de sensibilidad es una herramienta que permite identificar aquellos parámetros del modelo que

influyen la respuesta del mismo, al mismo tiempo que ofrece un estimado del grado de influencia. Es importante identificar estos parámetros, ya que los errores en el valor asumido para éstos se propagan multiplicativamente en los caudales calculados. El análisis de sensibilidad también permite seleccionar sólo aquellos parámetros que deben ser calibrados. De esta manera se evita incluir parámetros en la calibración cuya influencia en los resultados del modelo es mínima o nula. Estos parámetros, conocidos como parámetros insensibles, causan problemas de estabilidad en el proceso de búsqueda en calibraciones automatizadas.

El ingeniero informará la sensibilidad relativa de los parámetros y las acciones tomadas con los parámetros más sensibles en el caso en que no se pueda realizar una calibración por falta de datos observados.

El coeficiente de sensibilidad relativa, S_r (adimensional), es dado por:

$$S_r = \frac{\partial Q}{\partial P} \frac{P}{Q}$$

donde Q representa el caudal calculado por el modelo hidrológico y P el valor original del parámetro. El análisis de sensibilidad se realizará utilizando la técnica de perturbación de parámetros utilizando $\pm 10\%$ de cambio en el valor original del parámetro ($\partial P \cong \Delta P = \pm 0.1P$), según se describe en (Hann, 2002). Deberán informar los valores de sensibilidad relativa para cada parámetro y su interpretación de tal forma que se puedan identificar los parámetros más sensibles.

HIDRÁULICA

5.1 Propósito

El propósito de este capítulo es dar una descripción de los requisitos necesarios para la elaboración de los modelos hidráulicos que se sometan al DRNA y la JP. Este capítulo se divide en estudios realizados con modelos en una y dos dimensiones y se incluye una sección sobre modelos para flujo no-permanente. Cuando los impactos geomorfológicos de un proyecto puedan alterar significativamente el equilibrio de un sistema fluvial, se podrían solicitar análisis más detallados que permitan conocer los impactos sobre la estabilidad del cauce de agua y los cambios en las características del mismo.

5.2 Modelos Hidráulicos de una Dimensión

5.2.1 Sistema HEC-RAS

La primera opción para realizar estudios H-H será el modelo de flujo permanente, gradualmente variado disponible en HEC-RAS (River System Analysis).

A continuación se incluye la guía para la creación de modelos hidráulicos adecuados a las capacidades del programa y a la representación efectiva de las condiciones hidráulicas del proyecto. Muchos de los aspectos mencionados en este Capítulo aplican también a otros modelos hidráulicos.

La primera opción para realizar estudios H-H será el modelo de flujo permanente, gradualmente variado disponible en HEC-RAS (River System Analysis). Alternativamente, los ingenieros podrán presentar sus estudios en otros modelos, debidamente justificado y aprobado previamente por el DRNA y la JP. Cuando el estudio afecta las zonas abarcadas por los mapas de inundación de la FEMA o tienen como propósito ser sometidos a la consideración de ésta, el modelo utilizado debe estar contenido en la lista de aquellos modelos aprobados por la misma y consultados previamente con la JP y el DRNA.

5.2.1.1 Condiciones requeridas para cualquier modelo de flujo permanente creado en HEC-RAS

El programa HEC-RAS permite al ingeniero modificar opciones dentro del modelo. Sin embargo, las opciones mencionadas en esta sección deberán ser comunes a todos los modelos desarrollados con HEC-RAS. Consecuentemente, no se deben cambiar opciones entre la condición

existente y las alternativas o planes propuestos en un proyecto, a menos que exista una justificación para ello. Estas opciones son:

- Método de cálculo del acarreo hidráulico
- Cálculo de la pendiente promedio de la energía entre dos secciones transversales consecutivas
- Tolerancias para los resultados
- Método de cálculo de la profundidad crítica

5.2.1.2 Método de cálculo del acarreo hidráulico

Se utilizará la ecuación de Manning para el cálculo de las pérdidas de energía por fricción en cuerpos de agua en movimiento. El cálculo del acarreo hidráulico deberá realizarse usando la condición pre-determinada por el programa, el cual calcula el acarreo hidráulico en aquellos sitios donde ocurren cambios en el valor del coeficiente de Manning. Una excepción a este caso es cuando se necesite reproducir un modelo existente desarrollado en HEC-2. En este caso deberá usarse la opción en la cual el acarreo hidráulico se calcula entre cada dos estaciones de la sección transversal. Ambas formas de calcular el acarreo hidráulico producen resultados diferentes y, por lo tanto, es necesario ser consistente para tener resultados comparables.

5.2.1.3 Cálculo de la pendiente promedio de la energía entre dos secciones transversales consecutivas

El cálculo de la pendiente promedio de la línea de energía entre dos secciones transversales consecutivas debe realizarse mediante el promedio pesado por el acarreo hidráulico entre las dos secciones. Este último método es el que produce los mejores resultados en la mayoría de los casos.

5.2.1.4 Tolerancias para los resultados

No se permite modificar la tolerancia propuesta por el modelo para el cálculo de la elevación de la superficie del agua ni de la profundidad crítica.

5.2.1.5 Método de cálculo de la profundidad crítica

Puesto que para la mayoría de los estudios se estiman flujos en las zonas inundables fuera del cauce principal, se debe usar el método de *búsqueda de múltiples profundidades críticas*. Este no es el método pre-determinado en HEC-RAS sino que el ingeniero debe cambiarlo en las opciones del programa. La razón de esta determinación es que los valles inundables típicamente se asemejan a secciones compuestas con diferentes resistencias y con múltiples

profundidades críticas. La opción de búsqueda de múltiples profundidades críticas permitirá al ingeniero darse cuenta de la existencia de más de una profundidad crítica y hacer las correcciones correspondientes.

5.2.2 Caudales para el modelo

El caudal correspondiente a una recurrencia de 100 años debe incluirse en todo estudio H-H que se somete al DRNA y la JP.

Los caudales para los modelos hidráulicos se calcularán con los métodos presentados en el Capítulo 4 de estas Guías. El caudal correspondiente a una recurrencia de 100 años debe incluirse en todo estudio H-H que se somete al DRNA y la JP. Cuando el

estudio tenga que ser revisado por la FEMA y se disponga del caudal con recurrencia de 100 años obtenido previamente en un estudio H-H realizado para el Programa de Seguro de Inundaciones, este caudal tiene que usarse para efectos de diseño. Deberán considerarse los cambios de caudal en lugares de confluencia o bifurcación de tributarios o, en cualquier sitio donde se tenga una descarga lateral significativa.

5.2.3 Elevaciones en las secciones limítrofes del modelo

El modelo hidráulico requiere especificar las elevaciones del agua en las secciones ubicadas al comienzo y/o al final del tramo del cuerpo de agua modelado. Los valores requeridos dependerán de los regímenes de flujo dentro del tramo que comprende el modelo hidráulico. Si el flujo es subcrítico se requieren condiciones aguas abajo, si el flujo es supercrítico se requieren condiciones aguas arriba y, si es mixto se requieren en ambos extremos. Los siguientes procedimientos se pueden utilizar para determinar las elevaciones en los extremos:

1. Si se determina que la primera sección del modelo aguas abajo se encuentra en una zona donde ocurre un cambio de régimen subcrítico a supercrítico, entonces se puede utilizar la profundidad crítica para establecer el nivel del agua en esta sección. Esta decisión debe estar debidamente justificada dentro del estudio. Secciones de cambio drástico de pendiente o contracciones significativas del flujo pueden provocar profundidad crítica. Deberá asegurarse que el flujo crítico ocurre para todos los caudales que se utilicen en el modelo. De no ser así, se debe usar otra relación de frontera para aquellos casos donde esto no ocurra.
2. Se permite calcular una curva de descarga usando una relación conocida entre elevación y caudal o el método de área-pendiente para determinar la elevación de la superficie del agua. La sección debe ser apropiada para el uso de estos métodos. Usar la pendiente del terreno o la del fondo del cuerpo de agua en el método de área-pendiente representa una aproximación. Por lo que se debe utilizar la pendiente de la línea de energía.
3. Si se usa la profundidad normal como condición en alguna sección de frontera, su uso debe hacerse asegurando que la pendiente que se utiliza es la

pendiente de la línea de energía y no la del terreno. Aunque por definición el término “profundidad normal” se refiere a un flujo uniforme, el cálculo de los perfiles se realiza bajo las suposiciones de flujo gradualmente variado; por lo tanto, la pendiente que se requiere es la de la línea de energía. El tramo que se utiliza para estos cálculos debe ser de características geométricas uniformes y de rugosidades similares. Deben evitarse cambios abruptos entre las secciones transversales ubicadas cerca de las fronteras del modelo.

4. Si el modelo incluye confluencia con algún tributario se pueden presentar dos casos: **Caso 1:** El flujo de diseño para el que se calcula el perfil para el tributario y para el cuerpo de agua principal que recibe sus aguas coincidan al mismo tiempo. En este caso se utiliza la elevación del agua del cuerpo de agua principal como el valor inicial en la confluencia del tributario. **Caso 2:** El flujo máximo en el tributario y en el cuerpo de agua principal no coinciden al mismo tiempo. En este caso se usa el método de *área-pendiente* para obtener el valor de la elevación del agua para el tributario en la confluencia.

5.2.4 Coeficientes de la Ecuación de Manning

La ecuación de Manning se usará para representar las pérdidas de energía a lo largo del cuerpo de agua. Este coeficiente incluye los efectos de fricción por la rugosidad y/o obstáculos a lo largo del cauce del agua así como los cambios en dirección del cauce principal. Estos efectos se cuantifican mediante el coeficiente “n” de la ecuación de Manning aplicado a cada tramo de diferente rugosidad dentro de la sección transversal. Los valores de “n” usados en los modelos desarrollados deben ser debidamente documentados. Estos valores han sido publicados en textos de ingeniería hidráulica, en tablas y fotografías. Los valores usados deben ser representativos del cauce principal y de los valles inundables según sea el caso.

El uso de “bloques” como opción en HEC-RAS se recomienda para representar obstrucciones significativas al paso del agua en lugar de valores de “n” altos. Ejemplo de esto son el desarrollo de nuevas urbanizaciones o edificios en las zonas inundables.

Si se dispone de estudios previos que reflejan las condiciones actuales o de marcas de agua producidas por inundaciones históricas documentadas, se recomienda usarlas como una guía para evaluar lo adecuado de los valores en “n”. Cuando se modela un proyecto nuevo y se prevé que la resistencia del flujo aumente con los años, deberá escoger valores de “n” que reflejen la condición futura del proyecto.

La rugosidad de cualquier revestimiento depende de las características del material. En el caso de gaviones o piedras (rip-rap), la rugosidad depende del tamaño y forma de las piedras que se usen; sin embargo, estas características varían según las velocidades y esfuerzos cortantes que deben resistir. Por lo tanto, en estos casos se requiere un diseño particular donde se especifique el valor de la “n” de Manning y los tamaños de las rocas que se colocarán. Refiérase al Apéndice II de estas Guías para más detalles.

5.3 Secciones transversales

A continuación se detallan los requisitos para el levantamiento de secciones transversales para modelos hidráulicos en una dimensión.

5.3.1 Longitud del tramo del cuerpo de agua para un proyecto

La longitud a lo largo del cuerpo de agua del cual se deben levantar las secciones transversales es requisito para definir los límites del proyecto y el alcance de los datos que se deben recolectar.

El tramo del cuerpo de agua para el área de estudio debe tener sus límites lo suficientemente lejos del proyecto en forma tal que se puedan obtener resultados precisos en el sitio donde se proponen los cambios.

Las secciones transversales deben levantarse desde lo suficientemente aguas abajo y/o aguas arriba, en forma tal que las condiciones en los límites no afecten el perfil de la superficie del agua en el tramo del cuerpo de agua donde se ubica el proyecto.

El subestimar la longitud del tramo de estudio puede producir resultados con poca precisión, que posteriormente haga necesario el levantamiento topográfico y recolección de datos adicionales. Se debe revisar la longitud del tramo de estudio mediante visitas de campo y durante la preparación del estudio para determinar si es necesario ampliar los límites.

5.3.2 Localización y orientación de las secciones transversales

Para modelos unidimensionales es preferible disponer de secciones transversales completas obtenidas mediante un levantamiento topográfico de campo detallado. Las áreas inundables se asemejan a secciones compuestas, como la mostrada en la Figura 5.1. Para planicies inundables de gran extensión se pueden usar levantamientos aéreos de la zona inundable, suplementados con secciones más detalladas dentro del cauce principal del cuerpo de agua. Se debe documentar el proceso de levantamiento topográfico con fotografías.

La precisión de los cálculos y la delimitación de las zonas inundables dependen, entre otras cosas, de la planificación y realización del levantamiento de campo.

Para estudios en valles inundables, siempre que sea posible, se obtendrán secciones transversales que abarquen el ancho de toda la planicie inundable.

Las secciones transversales deben ser representativas del tramo del cuerpo de agua donde están ubicadas y, deben localizarse lo suficientemente cerca unas de otras para asegurar una estimación precisa de las pérdidas de

energía y una descripción apropiada de la geometría del paisaje.

Las secciones transversales utilizadas en estudios H-H tienen características particulares que las diferencian de aquellas para otros proyectos.

Esto se detalla en la siguiente sección.

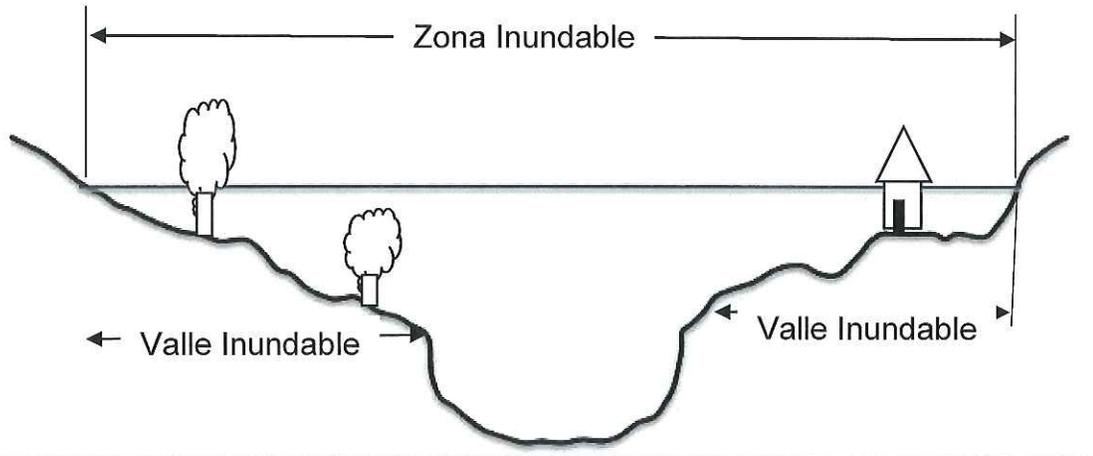


Figura 5.1. Esquemático de un cauce con valle inundable

5.3.3 Características de las secciones transversales

La localización y orientación de las secciones deberán ser analizadas por el ingeniero a cargo de realizar el estudio hidráulico y discutido con el agrimensor a cargo del trabajo topográfico, preferiblemente durante una visita de campo.

Las secciones transversales deben ser levantadas con las siguientes características y en los sitios indicados:

1. Cada sección transversal debe tener un nombre único, preferiblemente asociado con la distancia desde la primera sección del modelo aguas abajo hacia aguas arriba. La numeración debe ser ascendente de aguas abajo hacia

aguas arriba. (ver Figura 5.2).

2. Todas las secciones transversales deben ser medidas y presentadas con las estaciones en orden ascendente de izquierda a derecha mirando el cuerpo de agua hacia aguas abajo.
3. Anote la forma en que se definió y midió la porción del cauce principal del cuerpo de agua. Detalle la metodología que usó para medir esta porción; por ejemplo: con una varilla, con una cinta, con un sonar u otro método. Esto es importante, ya que en cuerpos de agua profundos se pueden usar

diferentes metodologías. Esto debe incluirse como una nota explicativa en los planos de secciones transversales.

4. La sección transversal debe ser típica de las condiciones del tramo que representa. Se pueden ignorar pequeñas hondonadas y/o lagunas que no son representativas para los propósitos del estudio. Sin embargo, se deben añadir objetos y/o construcciones que restringen significativamente el paso del agua.
5. Levantar secciones donde ocurren cambios en la pendiente longitudinal del cauce o del valle inundable.
6. Si se cuenta con estudios previos, se recomienda obtener secciones transversales que coincidan con esos estudios para facilitar la comparación de los niveles de agua obtenidos.
7. Se recomienda levantar secciones transversales donde se conozcan elevaciones de agua producidas por eventos históricos de periodo de recurrencia conocido o estimado para comparar los valores calculados con los observados.
8. Obtener secciones transversales más cercanas donde ocurran cambios apreciables en el área de la sección transversal, la rugosidad o la pendiente del cuerpo de agua.
9. Obtener secciones transversales al comienzo y al final de cualquier dique natural o artificial.
10. Obtener secciones transversales donde se prevea que existe una sección de control.
11. Las secciones transversales deben ser perpendiculares al movimiento principal del flujo. La Sección 3 de la Figura 5.3 muestra una desviación en la dirección para mantener la sección perpendicular a la dirección del flujo dentro de cauce principal.
12. A menos que se realice un estudio particular en una curva, no es recomendable obtener secciones transversales en la curva, ya que estos lugares no son representativos de la forma del cauce principal en ese tramo.
13. Las secciones cerca de las confluencias o bifurcaciones deben separarse adecuadamente para que no queden dentro de la zona de mezcla de ambas corrientes.
14. Es recomendable obtener secciones transversales donde hay límites territoriales entre municipios.
15. Considere obtener secciones transversales donde se planeen posibles desarrollos futuros tales como áreas residenciales, comerciales, parques y carreteras. Se deben levantar por lo menos tres secciones transversales que contengan el proyecto propuesto.
16. Anote en las secciones transversales las condiciones generales del terreno que se observaron en el campo, tanto para el cauce principal como para el valle de inundación. Algunos ejemplos de palabras para esta descripción son: gravas, arenas, gramas, arbustos, arboles, cultivos, edificios.
17. A menos que el propósito de su estudio lo requiera, las secciones en meandros no deben ser ubicadas pasando por el vértice de la curva, debido

a que esta sección no es representativa del cauce principal del cuerpo de agua. Probablemente en esta zona se encontrarán barras de arena, el cauce será más ancho y más profundo en la parte exterior de la curva. En la Figura 5.3 se marcan posibles sitios para la medición de secciones en una zona de meandros.

18. Nunca se deben cruzar dos o más secciones transversales. Las secciones 3.0 y 4.0 en la Figura 5.3 no se interceptan, ya que la Sección 4 fue desviada. Además, el cambio en dirección la hace perpendicular a la dirección del flujo durante una inundación. Note que la sección 3.0 posee una zona de flujo, la cual debe tomarse en cuenta si el levantamiento topográfico se extiende hasta el final del valle.
19. Siempre que sea posible, se recomienda incluir fotografías de cada sección transversal para documentar el modelo hidráulico y para ayudar en la selección de los valores del coeficiente para la ecuación de Manning. Estas fotos pueden incorporarse al modelo hidráulico en HEC-RAS.
20. La Figura 5.4 muestra un esquemático con las partes de un puente que pueden ser descritas dentro del modelo hidráulico. En zonas cercanas a puentes o atarjeas se deben levantar por lo menos cinco secciones transversales para una descripción adecuada de la hidráulica a través de la estructura. Estas secciones corresponden a las mostradas en la Figura 5.5. Las secciones 2 y 3 deben medirse cerca del puente pero fuera de los estribos o rellenos del puente o la carretera. De no existir estribos o rellenos se puede medir al lado de la estructura. Las secciones 1 y 4 se miden en el valle a una distancia siguiendo en una relación de expansión de aproximadamente 2:1 para aguas abajo (Sección 1) y 1:1 para aguas arriba (Sección 4). La Sección 5 corresponde a una sección sobre la superficie de rodaje que incluya el puente y la porción de la carretera dentro del valle inundable.
21. Si el ángulo que forma el puente con respecto a la dirección principal del agua está entre 20° y 30° , debe ajustarse la apertura del puente considerando el ángulo de alineamiento del puente con respecto al cauce del cuerpo de agua. Esta corrección está disponible en el modelo HEC-RAS. Ángulos menores de 20° no requieren ajuste, a menos que el ingeniero estime necesario por alguna condición específica que debe documentar. Para casos donde el ángulo sea mayor de 30° se espera que el área de paso efectiva sea mayor que la obtenida para ángulos entre 20° y 30° , ya que la corriente de agua va a girar un poco para pasar por el puente. En este caso el ingeniero deberá hacer los ajustes necesarios y documentar su decisión.
22. En áreas urbanas con cauces pequeños y pendientes altas las secciones deben reflejar mayores pérdidas de energía, razón por la cual se requieren secciones más cercanas una de la otra.
23. Se recomienda que las secciones transversales no estén separadas más de 1000 pies (305 m).
24. En ningún caso se permitirán secciones interpoladas usando el modelo HEC-RAS.

En la Sección 5.5.2 de estas guías se incluyen otros detalles de los levantamientos topográficos para la descripción de puentes y atarjeas.

160

161

16

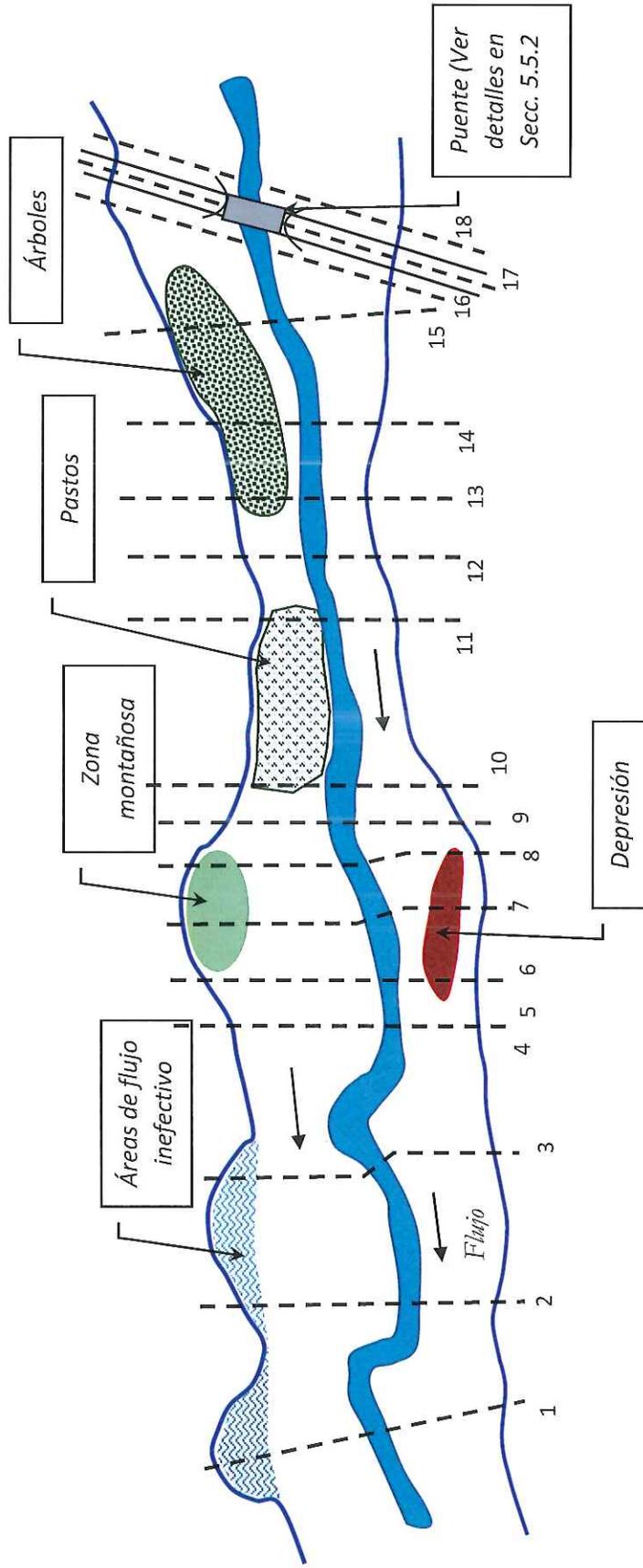


Figura 5.2 Ubicación de secciones transversales y características de la zona (Adaptado de https://secure.in.gov/dnr/water/files/wa-GGHA-chapter_5.pdf)

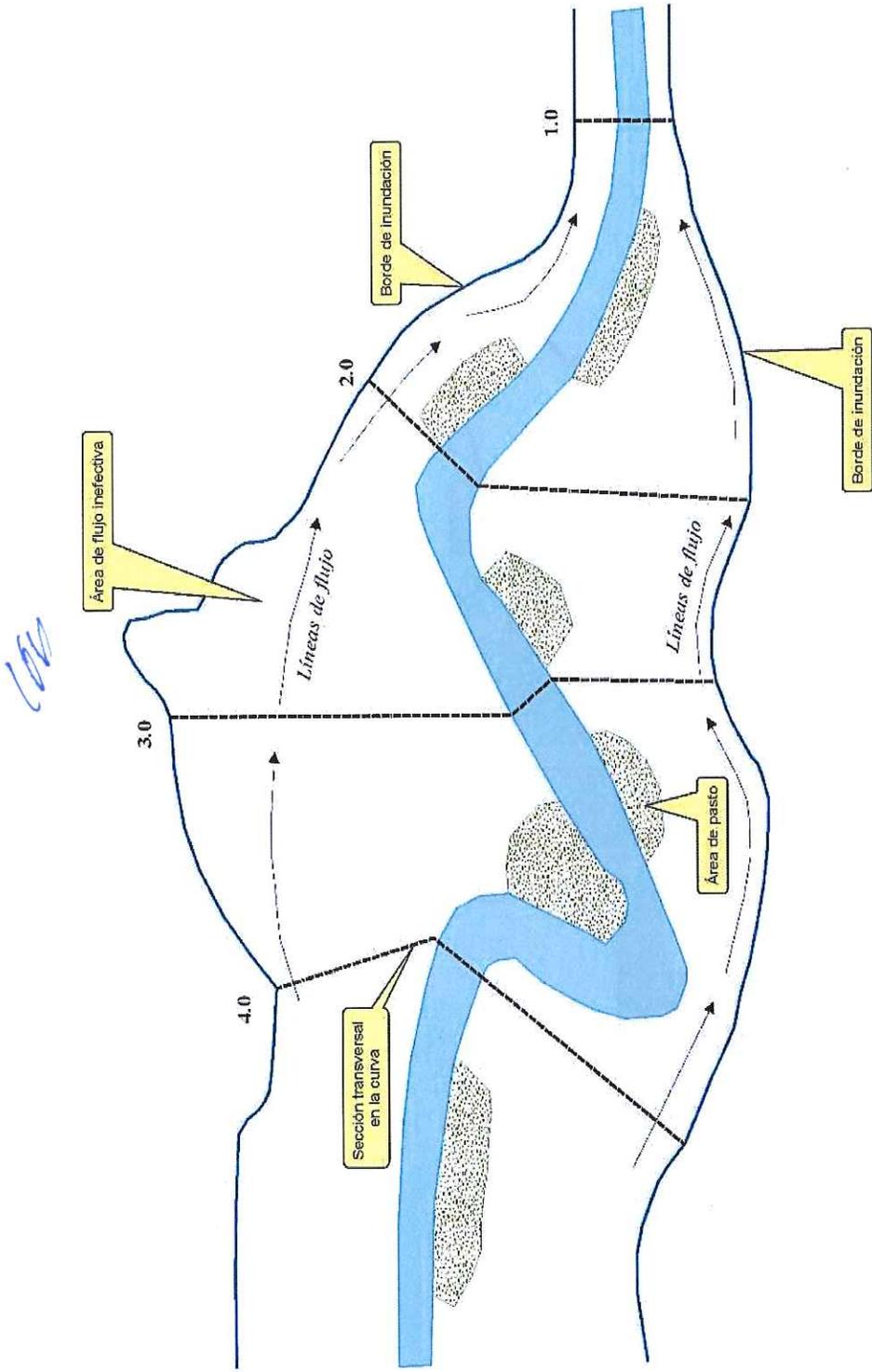


Figura 5.3. Ubicación de secciones transversales en cuerpos de agua con meandros

Cap

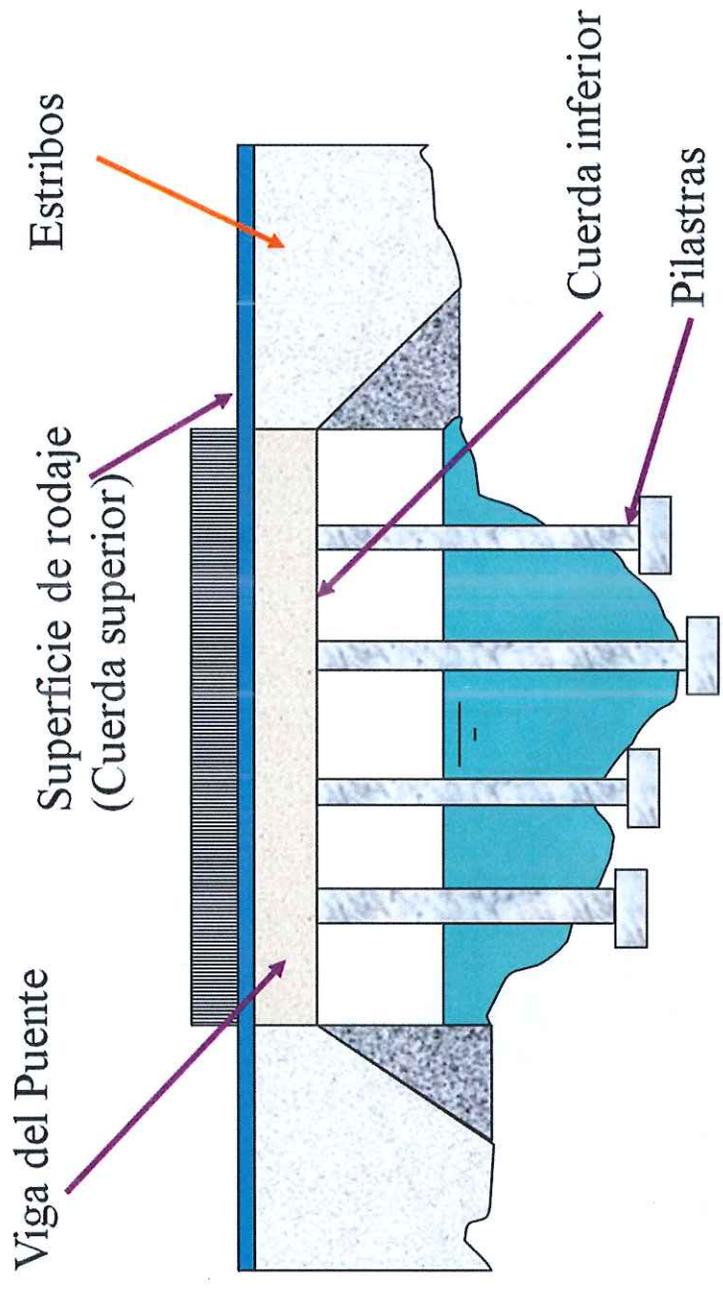


Figura 5.4. Esquemático de un puente mostrando sus partes

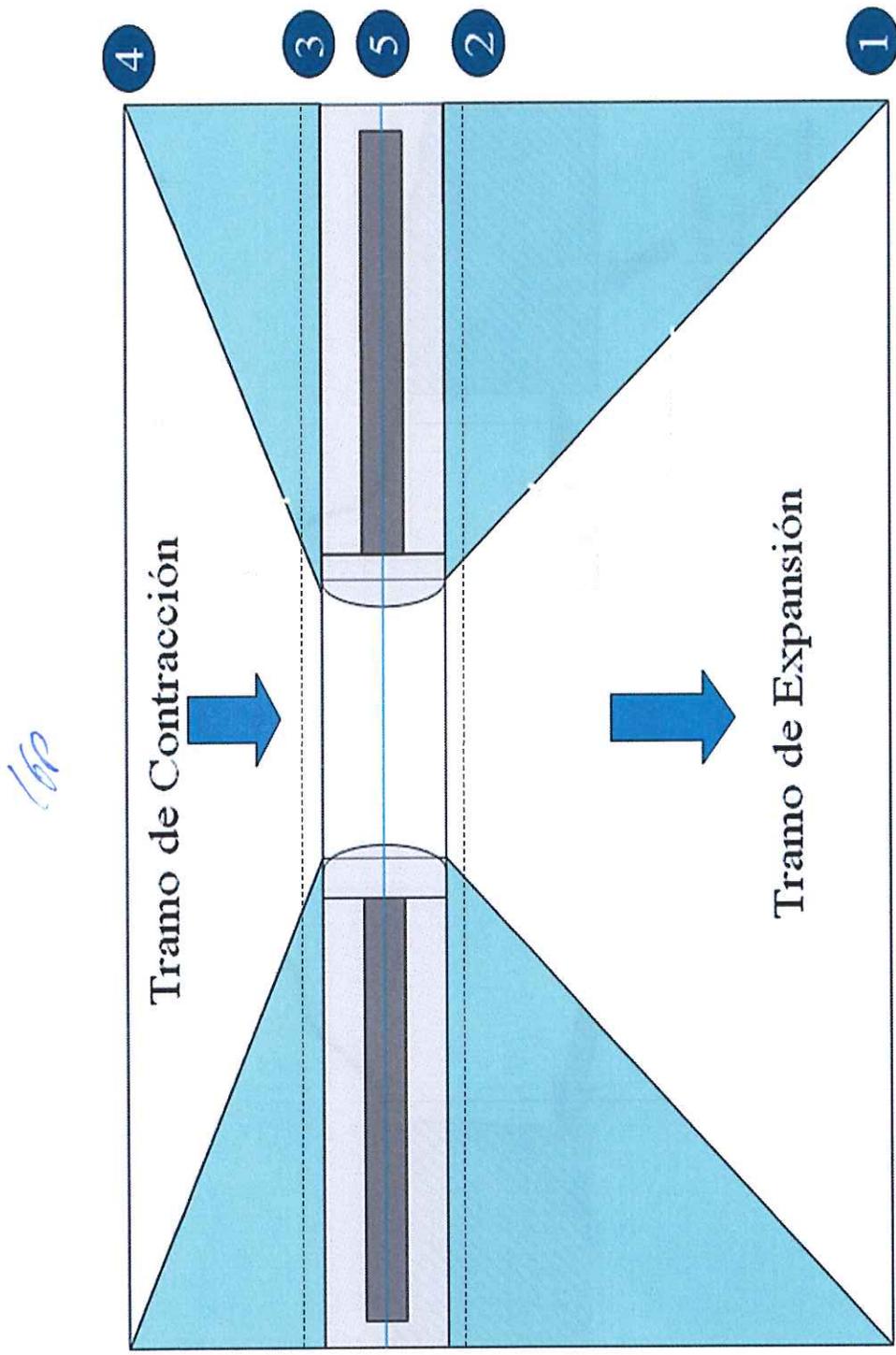


Figura 5.5. Ubicación de secciones transversales para puentes

167

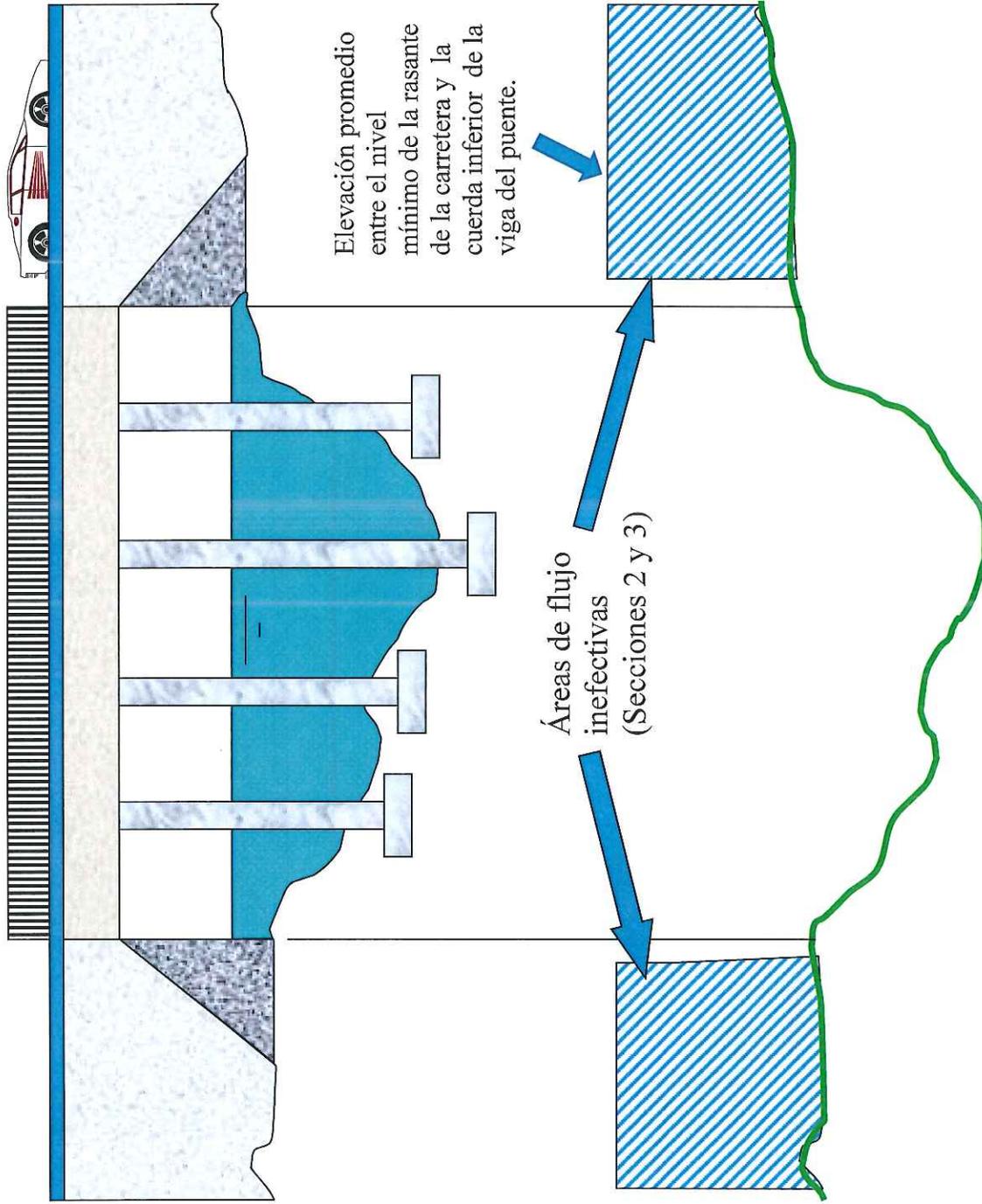


Figura 5.6. Ubicación de zonas de flujo inefectivo para la modelación de puentes

5.4 Información requerida en los planos topográficos

Los planos deben ser preparados digitalmente y en hojas de 24"x 36" bajo la supervisión de un agrimensor o ingeniero licenciado autorizado a ejercer la agrimensura en Puerto Rico por el Departamento de Estado y deben contener la siguiente información:

1. Indicación de Norte
2. Escala horizontal y vertical
3. Los controles que se usaron tanto verticales como horizontales. Los controles horizontales deben estar referidos al sistema de coordenadas estatales planas NAD-83 en su última revisión. Se debe especificar también la monumentación de los controles del proyecto y los que marcan las secciones transversales. Es preferible que los controles verticales estén referidos al msl. De no ser así debe especificar la superficie de referencia. Si utiliza GPS debe presentar la información de la sesión
4. Ubicación del proyecto sobre el cuadrángulo topográfico y sobre una fotografía aérea a escala legible
5. Contornos o perfiles existentes
6. Cuerpos de agua adicionales; así como, otras características notables del paisaje relacionadas con los cauces los mismos
7. Carreteras y caminos
8. Dibujo de las secciones transversales completas y un plano de vista en planta de la zona estudiada en escala apropiada
9. Una tabla con los datos de elevación y distancia de cada sección transversal. Cada punto del levantamiento debe aparecer en la tabla indicándose su distancia y elevación con respecto a los niveles de referencia indicados
10. Metodología utilizada para el levantamiento de las secciones dentro del cuerpo de agua
11. Firma y sello del agrimensor o ingeniero licenciado autorizado a ejercer la agrimensura en Puerto Rico responsable del levantamiento
12. Cualquier otra información que sea relevante a la zona de estudio o que deba considerarse en la creación del modelo hidráulico

5.5 Hidráulica de puentes y atarjeas

Los puentes y atarjeas que se incluyan en los modelos de HEC-RAS deben ser simulados usando la subrutina para puentes y/o atarjeas disponible en el programa. No son aceptables alteraciones de las secciones transversales del cauce asemejando las pilastras u otras características de puentes.

5.5.1 Métodos de cálculo

Los métodos permitidos para estimar las condiciones correspondientes a flujos bajos en puentes son: Energía, Cantidad de Movimiento y WSPRO. Se

seleccionará la solución que dé el nivel de agua mayor. No se permite el método de Yarnell, ya que el mismo no fue desarrollado para las condiciones predominantes en Puerto Rico.

Para flujos altos se usará el método de flujo como vertedor cuando la superficie del agua pase sobre el puente. Este método se combina con el de energía para completar la solución. La longitud del vertedor debe ser consistente con el ancho de la superficie del agua aguas arriba y aguas abajo del puente.

Como parte del reconocimiento de campo se debe indicar si hay acumulación de sedimentos, signos de agradación o degradación o inestabilidad de los bancos cerca del puente y si considera necesario realizar obras de protección para la estructura.

5.5.2 Secciones transversales en puentes y atarjeas

Las siguientes condiciones deben seguirse para completar el modelo de puentes y atarjeas:

1. Se requieren las cinco secciones cercanas a la estructura según se describió en la Sección 5.3.3, punto 20.
2. El estacionamiento horizontal de las secciones más cercanas al puente aguas abajo y aguas arriba deben estar alineadas entre sí y con las secciones aguas arriba y aguas abajo del cauce. La estación en el centro de una atarjea debe ser consistente con las secciones ubicadas aguas arriba y aguas abajo.
3. La sección sobre la superficie del puente debe medirse a lo largo de la elevación más baja que produzca flujo como un vertedor. Normalmente este corresponde a la corona de la superficie de rodaje.
4. Si existen barandas, barreras o vallas de seguridad continuas se debe anotar el tipo de barrera (por ejemplo de hormigón continua o de tubos de metal) y medirse como parte de la sección transversal de la carretera. Su altura, tipo y longitud son importantes para una descripción apropiada de la parte superior del puente (véase la Figura 5.4).
5. Anote si el puente está sesgado con respecto al cauce del cuerpo de agua tal como se indicó en el punto 21 de la Sección 5.3.3.
6. Documente el puente con fotos que muestren las condiciones cuando se realizó el estudio.
7. Deberá anotarse el material y la configuración de los alerones ("wingwalls" & "headwalls"). Esto es crítico en atarjeas, ya que estas características pueden variar la capacidad del conducto.

5.5.3 Datos necesarios para la descripción de puentes

Además de las secciones transversales y los datos mencionados en la Sección 5.5.2, para puentes se requieren los siguientes datos adicionales:

1. El alineamiento de la cuerda inferior (usualmente son las elevaciones de la parte inferior de la viga del puente). Véase la Figura 5.4.
2. El ancho, la forma y localización de cada pilastra. Si la pilastra varía su espesor o forma con la altura, debe definirse claramente la forma de la pilastra.
3. Indicar los estribos en las secciones de los puentes. En la mayoría de los casos los estribos tienen una pendiente constante la cual debe ser definida con dos elevaciones, una en la parte alta y otra en la parte baja del estribo.
4. Debido a la contracción del cauce provocada por el puente, las secciones adyacentes no serán efectivas en su totalidad y deben utilizarse zonas de flujo inefectivo hasta una elevación donde el agua comienza a pasar sobre la sección correspondiente a la superficie de rodaje (Figura 5.6).

5.5.4 Datos para la descripción de atarjeas

1. Se debe especificar la forma de la atarjea, las dimensiones y el material. Además se debe indicar el tipo de alerón o muro de cabecera (headwall) que tiene (por ejemplo la descripción puede ser: *alineado con el terreno o hacia afuera de la superficie de rodaje a un ángulo de 45 grados*). Se recomienda consultar la literatura de la FHWA para detalles y opciones disponibles sobre atarjeas. Estos datos son requeridos para la simulación en la computadora.
2. Se debe medir la longitud de la atarjea así como las elevaciones de las invertidas aguas abajo y aguas arriba de la misma.
3. Se deben examinar cuidadosamente los resultados de cálculos de atarjeas para determinar si los mismos son razonables en términos de control a la entrada y control a la salida. En caso de duda se recomienda realizar un cálculo independiente para determinar la operación de la atarjea.

5.5.5 Múltiples puentes y atarjeas

Estos casos representan situaciones complejas donde el agua atraviesa unas secciones compuestas por uno o varios puentes y una o varias atarjeas ubicadas en la misma sección transversal. Estos casos requieren especial cuidado para su modelación. Si se utiliza la opción de "aperturas múltiples" disponible en HEC-RAS, se deben seleccionar cuidadosamente los "*puntos de estancamiento*" que separan la porción del área que contribuye con el acarreo hidráulico de cada atarjea o puente. Este aspecto será evaluado para asegurar que la distribución del flujo en estos casos es la adecuada.

5.6 Otras opciones

HEC-RAS permite modelar estructuras hidráulicas, tales como vertedores, tanto a través del cauce principal como paralelas al mismo. En estos casos el DRNA y la JP revisarán las aplicaciones específicas para evaluar si las mismas se adaptan a las condiciones que se desean para el proyecto.

5.7 Otros modelos hidráulicos unidimensionales

El modelo HEC-RAS es adecuado para la mayoría de los estudios donde sea aceptable un modelo en una dimensión (1D). Hay otros modelos de flujo 1D – permanente que pueden ser usados, previa consulta con el DRNA y/o la JP. El modelo WSPRO desarrollado por el USGS está disponible a través de la FHWA. La versión disponible es de 1996 y no ha sido actualizada; además, este modelo no posee las capacidades para el cálculo de cauce mayor, por lo que no se recomienda su uso para estudios H-H. Sin embargo, HEC-RAS contiene la metodología usada por WSPRO para simular la hidráulica de los puentes, por esta razón se menciona en esta Guía.

Otros modelos han sido declarados “inaceptables” por la FEMA debido a que no han sido lo suficientemente probados, fueron absorbidos por otros modelos más recientes o, las agencias que los desarrollaron descontinuaron su desarrollo. Por otra parte, hay modelos hidráulicos recientes que, sin ser los aprobados por la FEMA ni requerir aprobación de esta agencia para el proyecto, pueden ser usados por los ingenieros, previo acuerdo con el DRNA y la JP. Normalmente estos serán casos excepcionales donde no hay otras opciones.

5.8 Modelos de flujo no-permanente

Por lo general los estudios se realizan asumiendo que las condiciones de flujo máximo son suficientes para la obtención de los niveles de agua en el cuerpo de agua. En estos casos se desprecian los efectos de almacenamiento a lo largo del tramo del cuerpo de agua estudiado y se asume que los flujos máximos coinciden con los niveles máximos del agua. Sin embargo, en ciertas condiciones, tales como las mencionadas en la siguiente lista, estas suposiciones no son correctas:

- Pendientes del cauce muy bajas (menos de 5 pies/milla).
- Flujos transitorios severos (rompimiento de represas).
- Valles inundables con áreas de almacenamiento grandes durante los eventos de inundación.
- Existen represas, compuertas, vertedores o estructuras de control.
- Valles empinados propensos a inundaciones rápidas (flash floods).

En estos casos es deseable el uso de modelos que consideren las variaciones temporales de las velocidades, los flujos y las elevaciones del cuerpo de agua durante eventos de inundación. Estos modelos se conocen como modelos de flujo no-permanente. El DRNA y la JP podrán requerir expansiones en un estudio H-H si se considera que los efectos de inundaciones rápidas (flash floods) combinados con almacenamientos en la cuenca y los posibles efectos de un proyecto sobre los niveles de inundación ameritan un modelo de flujo no-permanente. Deberá reunirse con personal especializado del DRNA y la JP si se anticipa la necesidad de un modelo no-permanente para el estudio.

El modelo HEC-RAS permite la creación de modelos de flujo no-permanente al alcance de profesionales especializados en estudios hidráulicos. Estos modelos requieren cuidados especiales de estabilidad numérica asociada con los intervalos de tiempo, cantidad y ubicación de las secciones transversales, regímenes de flujo, cambios en las condiciones de frontera, cambios en los parámetros del modelo, pre-procesamiento de los datos, calibración y, en general, un conocimiento más detallado de la hidráulica y la modelación numérica de las ecuaciones que gobiernan el flujo transitorio. De ser requeridos estos modelos, el ingeniero deberá reunirse con personal especializado del DRNA y la JP para determinar los requisitos específicos del modelo y su alcance.

5.9 Modelos hidrológico/hidráulicos combinados

Se incluyen en una categoría aparte aquellos modelos que combinan la hidrología y la hidráulica en un solo sistema. En esta categoría se incluye el modelo Storm Water Management Model (SWMM por sus siglas en inglés) del cual existe una versión de uso público que se obtiene del portal cibernético de la Agencia Federal de Protección Ambiental (EPA por sus siglas en inglés) y se consigue también a través de varios proveedores privados, quienes incluyen interfaces gráficas e integran en algunos casos el Sistema de Información Geográfica (PCSWMM, XPSWMM). ICPR y XPSTORM también se encuentran en esta categoría. Estos modelos han sido desarrollados mayormente para aplicaciones de manejo de aguas de escorrentía en áreas urbanas y pueden resolver las ecuaciones para flujo no-permanente. La aplicación de estos modelos es adecuada y recomendada en áreas urbanas donde se combinan los sistemas de alcantarillado pluvial mayor y menor, el diseño de estructuras de mitigación de escorrentías y/o se desea incorporar medidas de desarrollo de bajo impacto (LID por sus siglas en inglés).

5.10 Modelos Bidimensionales

Los modelos en dos dimensiones se han convertido en una alternativa viable para proyectos que así lo ameriten.

Los avances en los modelos hidráulicos han llegado a poner al alcance de los ingenieros modelos hidráulicos multidimensionales. En algunos casos las zonas inundables, tales como los valles aluviales cerca de las zonas costeras, se extienden lateralmente. Esta apertura en

forma de abanico se aleja de las suposiciones hechas por los modelos unidimensionales. En estos casos se deben considerar las variaciones de velocidad en dirección transversal para describir adecuadamente los patrones del flujo. Para casos donde la distribución del flujo dentro del valle o de un cuerpo de agua ancho se vea afectado por un proyecto y esto produzca desviaciones significativas del patrón de flujo o pueda afectar los niveles de agua, el DRNA y la JP podrán requerir el uso de un modelo bi-dimensional. La mayoría de los modelos bi-dimensionales pueden realizar simulaciones para flujo permanente y flujo no-permanente. El uso de

modelos bidimensionales deberá ser solicitado al DRNA y la JP por escrito y debidamente justificado.

5.11 Calibración del modelo

La calibración del modelo es posible si se dispone de elevaciones de agua y caudales durante inundaciones históricas o, de mapas de inundación de eventos significativos elaborados por las agencias del gobierno. El USGS y el USACE son fuentes de información que se pueden consultar. La calibración consiste en modificar los parámetros del modelo para que, dentro de los valores razonables, reproduzcan las elevaciones históricas para los caudales correspondientes. Un modelo se considera calibrado si reproduce los niveles históricos dentro de un intervalo de 6 pulgadas (0.15 metros).

Utilice secciones transversales con datos que se adecuen a las condiciones del evento histórico que se trata de calibrar. Si las condiciones han cambiado significativamente, desde el momento de la inundación usada para la calibración hasta el momento correspondiente al estudio que se realiza, deberá hacer los ajustes necesarios con su debida justificación.

Quando se dispone de más de un mapa de inundación histórica, se usará el evento más reciente. En el caso en que el estudio tenga que ser revisado por la FEMA, en lugar de una calibración, el modelo reproducirá los niveles de agua correspondientes a los del Estudio para Seguro de Inundaciones (FIS). El Capítulo 6 presenta más detalles de los estudios para la FEMA que se someten a la JP.

CAPÍTULO 6

CONSIDERACIONES ESPECIALES PARA VALLES INUNDABLES

6.1. Propósito

El propósito de este capítulo es establecer los requerimientos que aplican a los estudios H-H en valles inundables que requieren aprobación por la FEMA y la JP; así como, ofrecer guías sobre el procedimiento para realizar un análisis del Cauce Mayor en aquellos casos que lo requiera el Reglamento Sobre Áreas Especiales de Riesgo a Inundación.

El propósito de este capítulo es establecer los requerimientos que aplican a los estudios H-H en valles inundables que requieren aprobación por la FEMA y la JP; así como, ofrecer guías sobre el procedimiento para realizar un análisis del cauce mayor en aquellos casos que lo requiera el Reglamento Sobre Áreas Especiales de Riesgo a Inundación, Reglamento de Planificación Núm. 13 y la FEMA. Los temas que se tratan son: análisis de acarreo hidráulico local, metodología para delimitar un cauce

mayor y cambios en los mapas FIRM.

6.2 Análisis de Acarreo Hidráulico

La Sección 6.01 del Reglamento Sobre Áreas Especiales de Riesgo a Inundación prohíbe la ubicación de estructuras, rellenos, desarrollos o cualquier obstáculo dentro de la zona del Cauce Mayor. Sin embargo, cuando se han evaluado todas las alternativas y la única disponible es construir dentro de esta zona, el Reglamento permite la construcción de estructuras, siempre y cuando se demuestre, mediante un estudio H-H, que no ocurrirá ningún aumento en los niveles del Cauce Mayor durante el evento de descarga de la inundación base. Esta sección del reglamento también establece que *“el estudio hidrológico- hidráulico a realizar, deberá tener como base el estudio vigente regulatorio. Se aceptará además, como parte del estudio, sólo aquellas metodologías aplicables aprobadas por las agencias reguladoras, estatales y por la FEMA para evaluar el impacto de un proyecto en el Cauce Mayor”*.

El DRNA y la JP requieren además, que para los casos en que se introduzcan obstáculos en la zona del Cauce Mayor se realice un análisis de acarreo hidráulico según descrito en el documento de la FEMA titulado “Certification Requirements for Simple Floodway Encroachments” (FEMA).

6.2.1 Justificación del análisis de Acarreo Hidráulico

Los modelos hidráulicos pueden no detectar cambios pequeños en las elevaciones del agua producidos por obstáculos individuales dentro del Cauce Mayor. De esta manera, la proliferación de estructuras dentro del Cauce Mayor pasaría desapercibida; sin embargo, a largo plazo, el efecto acumulado de estos obstáculos

resultará significativo. El cálculo del acarreo hidráulico permite un análisis más detallado y enfocado en la zona cercana a la ubicación de los nuevos obstáculos, a la vez que se incluyen medidas para compensar por la pérdida de la capacidad para permitir el paso del agua en la zona del proyecto.

A continuación se detalla el análisis de acarreo hidráulico necesario para estos casos.

6.2.2. Cálculo del Acarreo Hidráulico Local

La ecuación de Manning se puede expresar de la siguiente manera:

$$Q = K \sqrt{S} \quad (6.1)$$

Donde Q es el caudal, S es la pendiente de la energía y K es el "acarreo hidráulico". Según esta forma de la ecuación, el coeficiente K es:

$$K = \frac{C}{n} AR^{2/3} \quad (6.2)$$

Donde C es un coeficiente que depende del sistema de unidades (1.49 para sistema inglés, 1.0 para sistema internacional), A es el área de la sección de flujo de agua, R es el radio hidráulico y n es el coeficiente de rugosidad de Manning.

La construcción o colocación de algún obstáculo dentro del Cauce Mayor reduce el área para el paso del agua y, por lo tanto, reduce el valor de K. Entonces, es necesario proponer alternativas para compensar esa pérdida en forma tal que, la capacidad del Cauce Mayor no se vea reducida.

6.2.3 Estimación de la Pérdida y Compensación del Acarreo Hidráulico

Los estudios H-H para valles inundables donde se conoce el nivel de inundación base (Zona AE) y se ha delimitado el Cauce Mayor poseen un Estudio de Seguro de Inundaciones (FIS) para el cual se desarrolló un modelo hidráulico. Cuando se desea realizar un proyecto dentro del Cauce Mayor se revisa el modelo original provisto por la FEMA y, de ser necesario, se modifica para reflejar las condiciones existentes al momento de realizar el nuevo estudio.

6.2.3.1 Datos requeridos

El procedimiento requiere incluir en el modelo hidráulico, al menos dos secciones transversales nuevas, representativas del área del proyecto propuesto, y delimitar el Cauce Mayor para las mismas. Los resultados de este modelo deberán contener las elevaciones del Cauce Mayor para las condiciones existentes revisadas en el sitio del proyecto propuesto.

6.2.3.2 Procedimiento de cálculo

Los cálculos para estimar el acarreo hidráulico se realizan con la Ecuación 6.2 usando la sección transversal y los niveles de agua del Cauce Mayor obtenidos con este modelo y se siguen los siguientes pasos:

1. Se calcula la reducción del acarreo hidráulico (K) ocasionada por la obstrucción propuesta, asumiendo que no ocurren cambios en el nivel del agua dentro del Cauce Mayor y, usando el coeficiente de rugosidad de Manning (n), adecuado para la condición existente en el sitio donde se propone la obstrucción.
2. Se calcula el acarreo hidráulico considerando medidas de diseño que lo incrementen en forma tal que la reducción ocasionada por la obstrucción sea menor que los resultados obtenidos con las medidas de diseño.
3. Las medidas propuestas para compensar la pérdida de acarreo hidráulico dentro del Cauce Mayor deben favorecer el cauce del agua y no representar depresiones o condiciones donde no se provea continuidad verdadera al paso de las aguas.
4. Con el análisis se someterá evidencia fehaciente del compromiso perpetuo al mantenimiento que se le debe proveer a las medidas que se construyan.
5. Se proveerán los cálculos detallados del análisis de acarreo hidráulico como parte del estudio H-H.

6.3 Análisis para Determinar Niveles de Inundación dentro del Valle

La FEMA define la Elevación de la Inundación Base (BFE) como la elevación del agua que se obtiene cuando se realizan los cálculos para el caudal cuya probabilidad de ser igualado o excedido en un año cualquiera es 1%. El inverso de esta probabilidad tiene unidades de años y se conoce como el periodo de retorno. Entonces, los niveles correspondientes serán los de la inundación con periodo de recurrencia de 100 años. El flujo base es el valor usado por el Programa Nacional de Seguros por Inundaciones (NFIP) y por todas las agencias federales, para propósitos de adquisición de los seguros de inundaciones y para reglamentar nuevos desarrollos. Los niveles de agua correspondientes al BFE se muestran en los FIRMs.

El Reglamento Sobre Áreas Especiales de Riesgo a Inundación de la JP establece que, *“para desarrollos en terrenos que radiquen en áreas especiales de riesgo a inundación en las cuales se desconozca el nivel de inundación base (identificados como Zona A en los Mapas de Tasas del Seguro de Inundación), el proponente someterá estudios hidrológicos e hidráulicos y propuestas específicas a la Junta”* (Sec. 7.02) las cuales deberán tener el endoso del DRNA. En esta sección se incluyen requisitos específicos para estos estudios.

La FEMA define la Elevación de la Inundación Base (BFE) como la elevación del agua que se obtiene cuando se realizan los cálculos para el caudal cuya probabilidad de ser igualado o excedido en un año cualquiera es 1%. Estos niveles corresponden a lo que se conoce como la inundación con periodo de recurrencia de 100 años.

Los estudios para seguros por inundaciones (FIS) típicamente producen elevaciones para caudales con periodos de retorno de 10, 50, 100 y 500 años. La metodología utilizada para delimitar el valle inundable correspondiente a estos caudales debe realizarse siguiendo la metodología descrita en esta Guía. Además, se debe cumplir con las siguientes condiciones:

1. Aunque la inundación base es la correspondiente al caudal con periodo de recurrencia de 100 años, para ser consistentes con los FIS se obtendrán niveles de inundación correspondientes a 10, 50, 100 y 500 años de periodo de retorno.
2. Los puentes existentes deben incluirse en los modelos hidráulicos durante los cálculos dentro del valle inundable.
3. Siempre que sea posible, seleccione límites del valle inundable que sean fáciles de localizar en el terreno.
4. Cuando se delimite la inundación entre dos secciones del modelo, el ancho no podrá ser menor que el de las secciones. Se debe seguir la forma general del valle.
5. Si existen diques (*levees*) debidamente aprobados y acreditados para protección contra la inundación reglamentaria (1% de probabilidad de excedencia), estos deben incluirse en el modelo y se trazan a lo largo del pie del dique en el lado seco de la estructura.
6. Otras decisiones con respecto a la delimitación de la inundación cuyos criterios no están mencionados aquí, deben ser discutidas con la JP y el DRNA.
7. No se permiten delimitaciones de valles inundables mediante trazos aproximados. En caso de duda se debe consultar con la JP y el DRNA.
8. Las secciones transversales para delimitar el valle inundable deben abarcar todo el valle inundable, por lo que los niveles de inundación base no pueden calcularse con un modelo que usa secciones truncadas o incompletas.

6.4 Análisis para Delimitación del Cauce Mayor en Valles Inundables

En muchos cauces en Puerto Rico se conoce el nivel de la inundación base pero no se ha delimitado el Cauce Mayor. En otros casos no se conoce el nivel de la inundación base ni tampoco se ha delimitado el Cauce Mayor. Para efectos de la construcción de desarrollos en los casos mencionados anteriormente se requiere delimitar el Cauce Mayor. En estos casos la práctica más común es usar los métodos que posee HEC-RAS para delimitar el Cauce Mayor en valles inundables usando las condiciones de flujo permanente, gradualmente variado.

La práctica más común es usar los métodos que posee HEC-RAS para especificar el Cauce Mayor en valles inundables usando las condiciones de flujo permanente, gradualmente variado.

HEC-RAS contiene cinco métodos para realizar este análisis. El propósito de esta Sección es ofrecer una guía de cuáles deben ser los métodos a seguir en estos casos, de forma tal que se mantenga uniformidad en la metodología usada en Puerto Rico y aceptada por la FEMA.

El método a seguir es el número 4 conocido como "igual reducción de acarreo hidráulico", descrito en el documento "*Hydraulic Reference Manual*" suministrado junto con el programa HEC-RAS. En esta referencia se deben consultar los detalles de los datos requeridos. El Método Núm. 4 ajusta el Cauce Mayor de tal forma que la pérdida de acarreo hidráulico provocada por la delimitación del Cauce Mayor sea igual a ambos lados del cauce para un incremento fijo en el nivel del agua. La Figura 6.1 muestra un ejemplo de igual reducción de acarreo hidráulico, denotado con la letra K, a ambos lados del valle inundable. Una posible aplicación de este procedimiento será cuando, según lo requiere el Reglamento Núm. 13, sea necesario un nuevo estudio detallado en Zona A, la evaluación de un depósito de relleno en Zona A y desarrollos en terrenos en Zona AE donde se conoce el nivel de inundación base y no se ha delimitado el Cauce Mayor. El aumento máximo a permitirse será de 0.15 metros (Junta de Planificación, 2010).

Los resultados obtenidos mediante este método deben ser analizados para verificar si los cambios en la elevación del agua corresponden al valor de 0.15 metros y si los cambios en velocidad, ancho del cauce y otros parámetros son aceptables. Ajustes posteriores se hacen con el Método Núm. 1, en el cual, el ingeniero especifica la localización exacta de las estaciones que definen el Cauce Mayor. Para la delimitación del Cauce Mayor se requiere que se cumpla con que el incremento en el nivel del agua sea de 0.15 metros (0.5 pies).

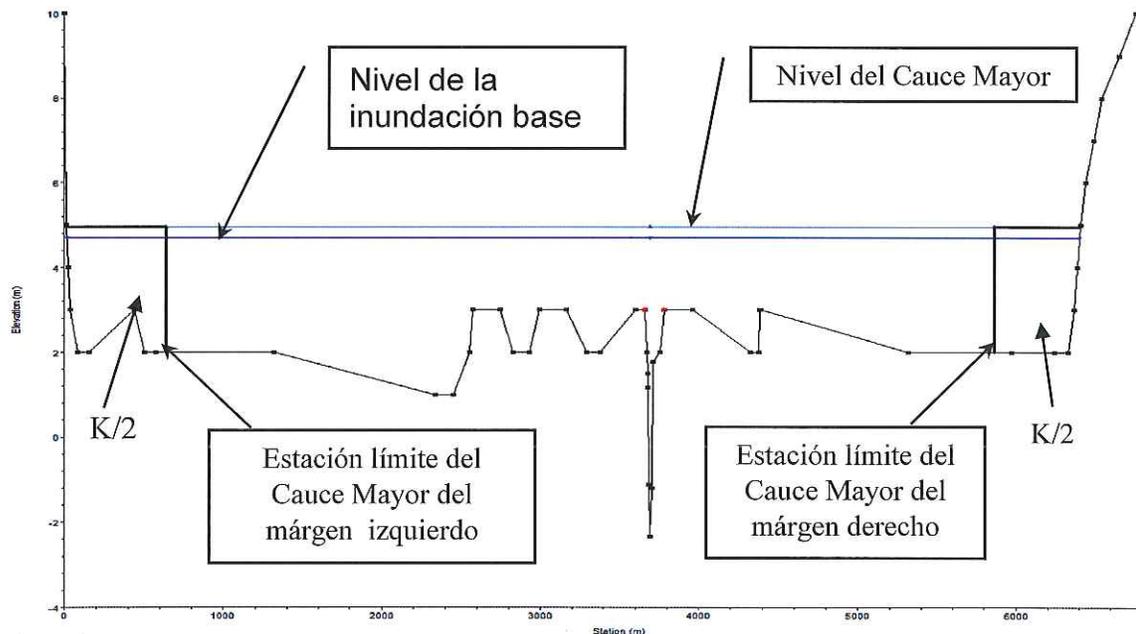


Figura 6.1 Delimitación del Cauce Mayor usando igual reducción de acarreo hidráulico a ambos lados

Además del análisis de encausamiento (*encroachment*) descrito en los párrafos anteriores, para los estudios en los valles inundables se debe cumplir con las siguientes condiciones:

1. El Cauce Mayor siempre se calcula usando el caudal máximo correspondiente a una probabilidad de excedencia anual del 1%.
2. Los puentes existentes deben mantenerse en los modelos hidráulicos durante los cálculos en el valle inundable.
3. Luego de graficar la delimitación del Cauce Mayor se debe asegurar que en todas las estaciones que lo limitan, los incrementos en el nivel del agua no excedan 0.15 m (0.5 pies) entre la Inundación Base y la inundación dentro del Cauce Mayor.
4. Siempre que sea posible, seleccione límites de Cauce Mayor que sean fáciles de localizar en el terreno.
5. Siempre que sea posible, obtenga límites en el Cauce Mayor en las secciones donde se conoce la elevación del Flujo Base.
6. Si el modelo hidráulico contiene secciones de flujo inefectivo cerca de un puente, establezca las estaciones para el encausamiento en el modelo coincidiendo con los límites de la sección de flujo inefectivo. Sin embargo, para efectos de delimitar el Cauce Mayor, se deben usar las estaciones que se encuentran más cercanas al puente, pero fuera de la zona de contracción y expansión de la estructura. Estas estaciones corresponden a la 1 y la 4 de la Figura 5.5.

7. Aplicar límites del Cauce Mayor en cualquier sección transversal con flujo inefectivo si la porción de flujo inefectivo ocurre naturalmente y no debido a un puente.
8. Cuando ocurra desborde sobre una carretera, ajuste las estaciones de límite de Cauce Mayor en forma tal que queden adecuadamente alineadas con el alineamiento del Cauce Mayor aguas arriba y aguas abajo de la carretera.
9. Nunca coloque límites del Cauce Mayor dentro del cauce principal del cuerpo de agua.
10. Cuando se delimite el Cauce Mayor entre dos secciones del modelo, el ancho no podrá ser menor que el de las secciones. Se debe seguir la forma general del valle y estar contenido dentro de la zona inundable.
11. Si existen diques (levees) debidamente aprobados y acreditados para protección contra la inundación reglamentaria (1% de probabilidad de excedencia), el Cauce Mayor se traza a lo largo del pie del dique en el lado seco de la estructura.
12. Otras decisiones con respecto a la delimitación del Cauce Mayor cuyos criterios no están mencionados aquí, deben ser anotadas en el modelo hidráulico para el Cauce Mayor luego de haberse discutido con la JP y el DRNA.
13. No se permiten delimitaciones de Cauce Mayor mediante trazos aproximados. En caso de duda se debe consultar con la JP y el DRNA.
14. Las secciones transversales para delimitar las inundaciones en valles inundables deben abarcar todo el valle inundable, por lo que el Cauce Mayor no puede calcularse con un modelo que usa secciones truncadas o incompletas.
15. Si el paso de la inundación reglamentaria sobre una atarjea incluye flujo fuera de la misma, se debe usar el ancho del Cauce Mayor incluyendo el área de flujo fuera de la misma.
16. Si existen áreas no perturbadas (no elevadas como resultado de una construcción o desarrollo urbano), las cuales se encuentran sobre el nivel de inundación base, pero que, geográficamente se encuentran dentro del Cauce Mayor, pueden identificarse como fuera del Cauce Mayor, siempre que la "isla" esté incluida adecuadamente en el modelo hidráulico.
17. Las estaciones finales que limitan el Cauce Mayor en cada sección transversal deben colocarse en el modelo hidráulico usando el Método 1. Esto permitirá que, en el futuro, otros usuarios conozcan explícitamente donde se colocaron las estaciones limítrofes del Cauce Mayor al momento de delimitarlo.

6.5 Estudios HH para revisión del FIRM

Cuando se somete a la JP una solicitud para revisión de un mapa de zona inundable (FIRM), la FEMA establece procedimientos específicos para la preparación de estudios H-H; así como, el cumplimiento con otros requisitos y documentos detallados en la solicitud MT-2.

Cuando se somete a la JP una solicitud para revisión de un mapa de zona inundable (FIRM), la FEMA establece procedimientos específicos para la preparación de estudios H-H; así como, el cumplimiento con otros requisitos y documentos detallados en la solicitud MT-2 (<https://www.fema.gov/mt-2-application-forms-and-instructions>).

A continuación se resume la parte relacionada con cálculos hidrológicos e hidráulicos para la elaboración del estudio H-H cuyo propósito es la revisión del FIRM. Para otros requisitos de la FEMA fuera del alcance de esta Guía, se deberá consultar con la JP.

6.5.1 Hidrología

El estudio hidrológico solamente se incluye en aquellos casos donde hay razones para proponer un cambio en los caudales reglamentarios que se usaron en el Estudio de Seguros de Inundaciones (FIS) vigente. Los nuevos resultados deben evidenciar diferencias estadísticamente significativas cuando se comparan con los caudales vigentes. El estudio hidrológico compara la magnitud de la inundación base vigente con la propuesta en tres sitios representativos del cauce donde se propone realizar los cambios en el FIRM.

Si el cambio en el flujo base se propone solamente para un tramo del cauce, es importante asegurar una transición adecuada con los tramos que no se van a revisar para asegurar continuidad en el estudio. Deberá explicarse como el tramo que se propone modificar hace la transición con los tramos que no se revisarán. Se debe explicar la metodología utilizada para el análisis e incluir la información detallada que apoya dicho cambio, según se especifica en el Capítulo 7 de estas Guías. Además, la FEMA requiere que se consideren los aspectos relacionados con el transporte de sedimentos, si esto afecta a la hidrología.

6.5.2 Hidráulica

Para sustentar el reemplazo de un FIRM, el estudio hidráulico debe incluir los requisitos descritos a continuación.

6.5.2.1 Cauces en los cuales se tiene estudios detallados

Para cauces en los cuales se dispone de estudios detallados, en los cuales se ha delimitado el Cauce Mayor, los límites aguas arriba y aguas abajo del tramo incluido en el estudio hidráulico, deben mantener dos criterios:

1. Que las elevaciones del flujo base y el cauce mayor para las condiciones propuestas en los extremos aguas arriba y aguas abajo cumplen con los 0.15 m (0.5 pies) de separación mencionado en la Sección 6.4.
2. Que las estaciones que delimitan el Cauce Mayor en las secciones ubicadas en los límites aguas arriba y aguas abajo para las condiciones propuestas y las existentes coinciden.

6.5.2.2 Cauces donde no se tiene estudio detallado

Cuando los estudios FIS no tienen detallado el Cauce Mayor, los límites aguas arriba y aguas abajo del tramo incluido en el estudio hidráulico para las condiciones propuestas deben cumplir con que las elevaciones del flujo base se encuentren dentro de 0.15 m (0.5 pies) de diferencia con respecto a las elevaciones de las condiciones existentes. La longitud del modelo desarrollado para la modificación propuesta deberá extenderse en ambas direcciones hasta que se cumplan las condiciones anteriores.

6.5.3 Modelos requeridos para solicitar cambios en el FIRM

Cuando se solicitan cambios al FIRM, se debe incluir varios modelos hidráulicos que representan las diferentes condiciones, los cuales se explican a continuación.

6.5.3.1 Duplicado del modelo existente o modelo efectivo

El modelo efectivo es el modelo que se desarrolló para el FIS vigente. En áreas donde existe previamente un estudio de inundación detallado se debe duplicar ese modelo antes de proceder a introducir cualquier cambio. Las elevaciones y los perfiles de agua del modelo deben coincidir con los del informe preparado para el FIS, con una diferencia máxima de 0.1 pies. En caso de no existir un modelo anterior, el nuevo modelo deberá ser calibrado para reproducir los perfiles del FIS con una desviación máxima de 0.15 m (0.5 pies). Si se opta por hacer un modelo nuevo alternativo al existente que se usó para el FIS, debe demostrarse que el modelo existente para el FIS es inadecuado y que el nuevo modelo deberá calibrarse para reproducir los perfiles de agua del FIS con una desviación máxima de 0.15 m (0.5 pies).

6.5.3.2 Modelo Efectivo Corregido

Este es el modelo en el cual se corrige cualquier error que se detecte en el duplicado mencionado en el párrafo anterior. En el modelo corregido también se pueden incluir secciones transversales nuevas o introducir información topográfica más detallada que la que contiene el modelo original.

6.5.3.3 Modelo de la Condición Existente antes del proyecto

Este modelo consiste en tomar el modelo efectivo (duplicado o corregido según sea el caso) y se modifica para que sea representativo de las condiciones existentes al presente. La diferencia es que, en este modelo se añaden los cambios que han ocurrido dentro del valle inundable a partir de la fecha en que se hizo el modelo efectivo existente.

Si no ocurrieron cambios o modificaciones desde la fecha en que se hizo el FIS, entonces este modelo será igual al modelo corregido o al duplicado, según sea el caso. El Modelo de la Condición Existente servirá de apoyo para determinar los impactos que tendrá el proyecto propuesto.

6.5.3.4 Modelo de la Condición Propuesta o Revisado

El Modelo de la Condición Existente se modifica para incluir los cambios propuestos por el proyecto. Este modelo debe incluir los cambios físicos que impactarán el valle inundable y los efectos del proyecto. Este modelo debe ser representativo de la condición propuesta. Los cambios realizados en los modelos hidráulicos deben limitarse a tramos para el cual se pide la revisión del FIRM. Las secciones transversales aguas arriba y aguas abajo del tramo bajo revisión deben permanecer idénticas a aquellas que tiene el modelo efectivo original. Si se hace de esta manera, las elevaciones del agua y los anchos de cauce obtenidos con los modelos revisados deben coincidir con aquellos que se tienen en estos tramos con el modelo existente original.

6.6 Verificación del modelo usando CHECK-RAS

Cuando se utiliza el modelo HEC-RAS la FEMA recomienda que los modelos hidráulicos sean analizados con el programa CHECK-RAS para verificar posibles errores en los modelos. CHECK-RAS es una herramienta para la validación de modelos hechos con HEC-RAS, desarrollada por el USACE y que se puede conseguir en la Internet (<http://www.fema.gov/check-ras-hec-ras-validation-tool>). Los modelos hidráulicos que se sometan para el proceso de cambios en un FIRM deberán ser cuidadosamente revisados antes de ser sometidos a la JP.

PRESENTACIÓN DE LOS ESTUDIOS Y ARCHIVOS

7.1 Propósito

El propósito de esta sección es especificar el contenido de los estudios H-H.

7.2 Estudios sometidos al DRNA y la JP

En aquellos casos en que el DRNA y la JP tengan que emitir una opinión, los estudios H-H deben contener los datos y procedimientos especificados en la presente Guía y estar escritos según descrito en este Capítulo.

A continuación se incluye la tabla de contenido requerida para aquellos estudios H-H en los cuales el DRNA y la JP tengan que emitir una opinión.

7.3 Tabla de Contenido para estudios H-H

68

I. Resumen Ejecutivo

II. Introducción

- A. Propósitos del Estudio
- B. Partes envueltas (dueño, desarrollador, consultor)
- C. Autorización

III. Descripción del Estudio

- A. Plano de localización (escala 1:20,000 o menor)
- B. Topografía existente
- C. Cuerpos de Agua
- D. Descripción del Problema de Inundaciones
 - 1. Identificar planes de control o de mitigación de inundaciones en el área
- E. Condiciones de Diseño (obras actuales vs. futuras)
- F. Alcance del Estudio
- G. Impacto del Proyecto

IV. Recolección de Datos

- A. Inspección visual de campo.

- B. Fotografías que describan la condición existente y cualquier otro detalle que sea relevante para el estudio.
- C. Revisión de estudios previos
- D. Colección de datos históricos

V. Formulación de alternativas

- A. Preventivas
- B. Correctivas

VI. Estudio Hidrológico

- A. Datos
 - 1. Delimitación de los límites de la cuenca
 - a. Delimitación Manual
 - b. Delimitación Automatizada
 - 2. Identificación de cuerpos de agua
 - a. Identificar usos de agua en la cuenca para fines agrícolas, recreativos y otros
 - b. Presencia de acuíferos, relación con cuerpos de agua bajo estudio, si aplica.
 - 3. Información Fisiográfica
 - a. Topografía, mapas
 - b. Usos de terrenos
 - c. Cubierta vegetal
 - d. Cálculo del Número de Curva – CN
 - e. Calculo del Tiempo de Concentración
 - 4. Lluvia
 - a. Lluvias históricas importantes
 - b. Análisis de frecuencias
 - c. Datos de NOAA Atlas 14
 - d. Distribución temporal
 - 5. Hidrogramas
 - a. Hidrogramas medidos
 - b. Cálculo de Hidrogramas sintéticos
- B. Metodologías
 - 1. Método del NRCS. Aplicación de HEC-HMS, TR-55, SWMM u otros. Presentar detalles sobre lo adecuado del modelo para el propósito del estudio.
 - 2. Diagrama de configuración de las subcuencas en que se dividió la simulación
 - 3. Parámetros de modelo
 - 4. Ensamblaje del modelo
 - 5. Calibración y validación del modelo hidrológico
 - 6. Análisis de sensibilidad
 - 7. Resumen de alternativas evaluadas y corroboración de resultados

- C. Análisis de Resultados
 - 1. Resumen
 - 2. Interpretación
 - 3. Selección de caudales para diseño
 - 4. Adopción de resultados y limitaciones del estudio

VII. Estudio Hidráulico

- A. Inundaciones conocidas – históricas o simuladas (FEMA, USGS, otros estudios)
- B. Descripción y evaluación del sistema hidráulico
 - 1. Conceptualización del sistema hidráulico (tipo de flujo: uniforme, gradual, transitorio)
- C. Metodologías
 - 1. Se seleccionará y justificarán metodologías apropiadas de acuerdo al tipo de flujo que mejor describa el problema bajo estudio.
 - a. Flujo uniforme
 - b. Flujo gradualmente variable y permanente
 - c. Flujo rápidamente variable y permanente
 - d. Flujo espacialmente variable y no-permanente
 - e. Flujo uni-dimensional
 - f. Flujo bi-dimensional
 - 2. El modelo en una dimensión que se debe usar es HEC-RAS para flujo gradualmente variable, permanente o no-permanente. Otros modelos serán aceptados, previa consulta con el DRNA y la JP y según se especifica en el Capítulo 4 de este documento. Los puntos c, d, e y f aplican a todo tipo de modelo.
 - 3. Resumen y análisis de los parámetros hidráulicos para el modelo; incluyendo: coeficientes de resistencia, pérdidas de energía locales, pendientes laterales y transversales, secciones transversales, segmentos del tramo del cuerpo de agua que se modela, niveles de control, condiciones en los bordes del tramo modelado, caudales de diseño y otros.
 - 4. Configuración hidráulica y ensamblaje del modelo
 - 5. Calibración y validación del modelo
 - 6. Resumen de alternativas evaluadas
- D. Datos hidráulicos
 - 1. Secciones transversales (actuales y propuestas)
 - 2. Perfiles longitudinales (actuales y propuestos)
 - 3. Planta (actual y propuesta)
 - 4. Capas de GIS para las elevaciones, coeficientes de resistencia y otros parámetros usados en modelos de dos dimensiones (si es el caso).
- E. Análisis de resultados
 - 1. Resumen de resultados
 - 2. Interpretación de resultados

3. Planta y perfiles de agua
4. Adopción de resultados y sus limitaciones
- F. Consideración de sistemas de almacenamiento
 1. Rastreo de hidrogramas
 2. Diseño hidráulico de estructuras de salida
- G. Otras consideraciones de diseño
 1. Posible erosión en la riberas (estabilidad de taludes) y en estructuras
 2. Análisis de sensibilidad de los resultados hidráulicos
 3. Mantenimiento de los canales
 4. Diseño de transiciones
 5. Diseño de estructuras hidráulicas de control
 6. Consideraciones ambientales (consideraciones de bio-ingeniería)
 7. Consideración de flujos mínimos en el cuerpo de agua
 8. Otros

VIII. Impacto del Proyecto

- A. Enmienda y Revisión a Mapas sobre Tasas del Seguro de Inundación
- B. Variaciones
- C. Impacto Ambiental (explicar brevemente y referir al documento)
- D. Áreas anegadas
- E. Escorrentía pluvial (de ser el caso)
- F. Presencia de acuíferos y su relación con las aguas superficiales
- G. Otros.

IX. Determinación de Riesgos (de ser necesario)

- A. Factores de Riesgos por Inundaciones
- B. Zonas de Primas de Seguros

X. Preparación de Mapas (de ser necesario)

- A. Límites de las zona inundables vigentes (mapas de la FEMA)
- B. Nuevos límites de las zonas inundables (mapas de la FEMA)

XI. Otros estudios especializados sobre inundaciones

- A. Marejadas en estuarios
- B. Métodos utilizados. Deben ser previamente consultados con el DRNA y la JP

XII. Certificación

- A. Toda información sometida, documentos, metodologías, corridas de computadora, planos, elevaciones del terreno y de piso, obras estructurales y de control de inundaciones y otros se certificarán al

final del informe por un Ingeniero licenciado en Puerto Rico según se especifica en la Sección 7.4 de estas guías.

7.4 Certificación

El estudio H-H debe incluir una certificación sellada y firmada por un ingeniero licenciado autorizado a ejercer en Puerto Rico. De ser una firma de servicios de ingeniería, el nombre de la entidad debe establecer que se trata de una corporación profesional mediante el uso de las palabras "corporación profesional" o las abreviaciones "C.S.P.", "P.S.C.", "C.P." o "P.C."

7.5 Información a someter en formato digital

El estudio H-H deberá venir acompañado por un disco compacto (CD) o un DVD debidamente identificado con el nombre del proyecto y la fecha de elaboración del informe. Los archivos digitales deben incluir:

1. Fotos y videos obtenidos durante el reconocimiento de campo junto con una breve explicación de los mismos.
2. Un directorio con los archivos digitales utilizados en el modelo hidrológico, junto con otro directorio con todos los archivos digitales utilizados en el modelo hidráulico. Este requisito aplica para cualquier tipo de modelo utilizado ya sea de flujo permanente, no-permanente, bi-dimensional o transporte de sedimentos.
3. Incluir entre los archivos digitales únicamente aquellas corridas que contengan la condición existente y las alternativas evaluadas en el estudio H-H. El ingeniero debe presentar entre sus conclusiones la alternativa seleccionada.
4. Cualquier información adicional que el ingeniero considere importante para documentar o justificar las alternativas seleccionadas.

BIBLIOGRAFÍA

1. American Society of Civil Engineers, **Hydraulic Design of Flood Control Channels**, EM 1110-2-1601, 1995.
2. American Society of Civil Engineers, **River Hydraulics**, EM 1110-2-1416, 1996.
3. American Society of Civil Engineers, **Channel Stability Assessment for Flood Control Projects**, EM 1110-2-1418, 1997.
4. Chow, V. T., D. R. Maidment, y L. W. Mays, 1988. **Applied Hydrology**. McGraw-Hill Book Comp., New York.
5. Federal Highway Administration, United States Department of Transportation, **Stream Stability at Highway Structures**, 3rd Edition, HEC No. 20, March 2001.
6. Federal Highway Administration, United States Department of Transportation, **Bridge Scour and Stream Instability Countermeasures**, 2nd Edition, HEC-23, March 2000.
7. FEMA, "*Procedures for "No-Rise" Certification for Proposed Developments in Regulatory Floodways*," Federal Emergency Management Agency, Georgia, 1992.
8. FEMA, "*Certification Requirements for Simple Floodway Encroachments*", Federal Emergency Management Agency, Washington, D.C. (Not dated)
9. Haan, C. T., 2002. **Statistical Methods in Hydrology**. 2da Edición, Iowa State Press, Iowa.
10. Junta de Planificación. (2010). *Reglamento Sobre Areas Especiales de Riesgo a Inundación: Reglamento de Planificación Núm. 13*. Junta de Planificación de Puerto Rico, Santurce.
11. Legislatura de Puerto Rico, 2002. **Ley para Adoptar el Sistema de Coordenadas Planas Estatales de Puerto Rico**. Ley Núm. 264 aprobada el 16 de noviembre de 2002.
12. Maynard, S. "**Gabion-Mattress Channel Protection Design**", *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 121, No 7, 1995.
13. National Weather Service, 2006. **Precipitation-Frequency Atlas of the United States**, Atlas 14, Volume 3, Version 4.0: Puerto Rico and the U.S. Virgin Islands, National Oceanic and Atmospheric Administration, U.S. Department of Commerce, Silver Spring, Maryland.
14. NRCS, 1986. **Urban Hydrology for Small Watersheds**. Technical Release 55, Natural Resources Conservation Service, USDA.NRCS, 1997.
15. **National Engineering Handbook**. Part 630 – Hydrology, Natural Resources Conservation Service, USDA.NRCS, 2007.

16. **National Engineering Handbook**. Part 654 – Stream Restoration Design, Natural Resources Conservation Service, USDA
 14. Normann J. & Associates, **Hydraulic Design of Highway Culverts**, Federal Highway Administration, United States Department of Transportation, Report FHW-IP-85-15, September 1985. USIACWD, 1982.
 15. **Guidelines for Determining Flood Flow Frequency**, Bulletin 17-B of the Hydrology Subcommittee, U.S. Interagency Advisory Committee on Water Data, Reston, Virginia.
-

69

69

APÉNDICE I

Distribuciones temporales de lluvia para Puerto Rico según el NWS¹

¹ National Weather Service, 2006. **Precipitation-Frequency Atlas of the United States**, Atlas 14, Volume 3, Version 4.0: Puerto Rico and the U.S. Virgin Islands, National Oceanic and Atmospheric Administration, U.S. Department of Commerce, Silver Spring, Maryland.

Tabla 1. Distribución Temporal de Lluvia (1 hora – 1^{er} Cuartil – Percentil 10%)

Por Ciento de Duración	Por Ciento de Precipitación Total	Incrementos
0.0	0.0	
8.3	19.3	19.3
16.7	38.2	18.9
25.0	53.7	15.5
33.3	63.8	10.1
41.7	70.2	6.4
50.0	76.2	6.0
58.3	82.3	6.2
66.7	88.3	5.9
75.0	93.0	4.8
83.3	96.4	3.3
91.7	98.3	1.9
100.0	100.0	1.7

668

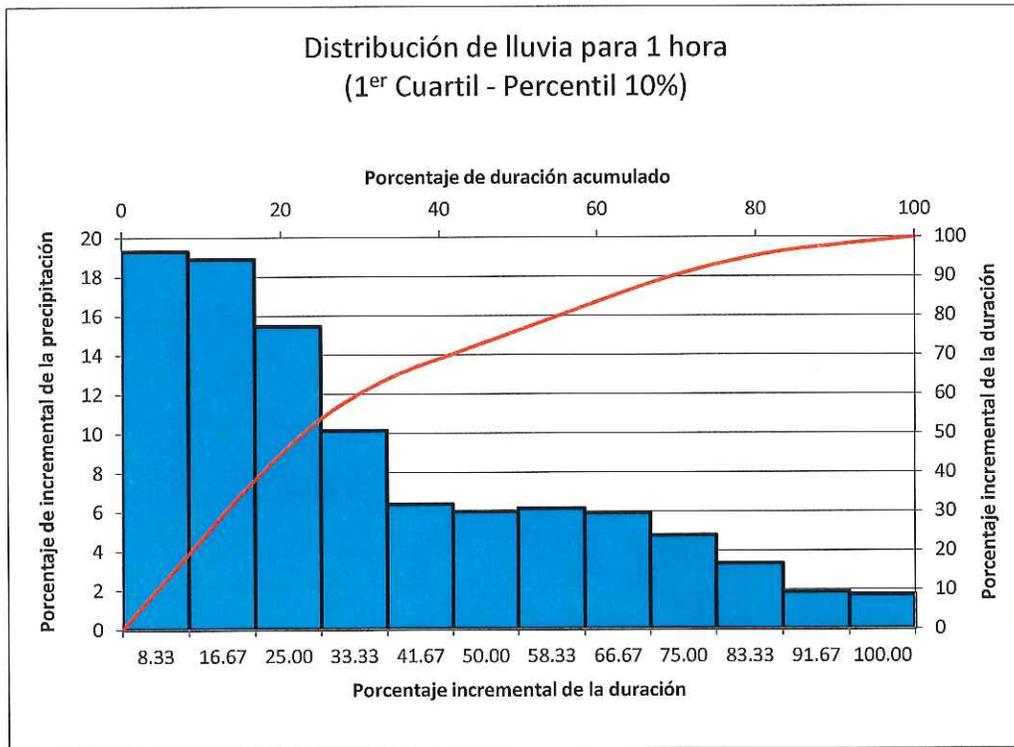


Tabla 2. Distribución Temporal de Lluvia (6 horas – 1^{er} Cuartil – Percentil 10%)

Por Ciento de Duración	Por Ciento de Precipitación Total	Incrementos
0.0	0.0	
8.3	35.3	35.3
16.7	66.0	30.7
25.0	87.0	21.0
33.3	97.2	10.2
41.7	99.3	2.1
50.0	100.0	0.7
58.3	100.0	0.0
66.7	100.0	0.0
75.0	100.0	0.0
83.3	100.0	0.0
91.7	100.0	0.0
100.0	100.0	0.0

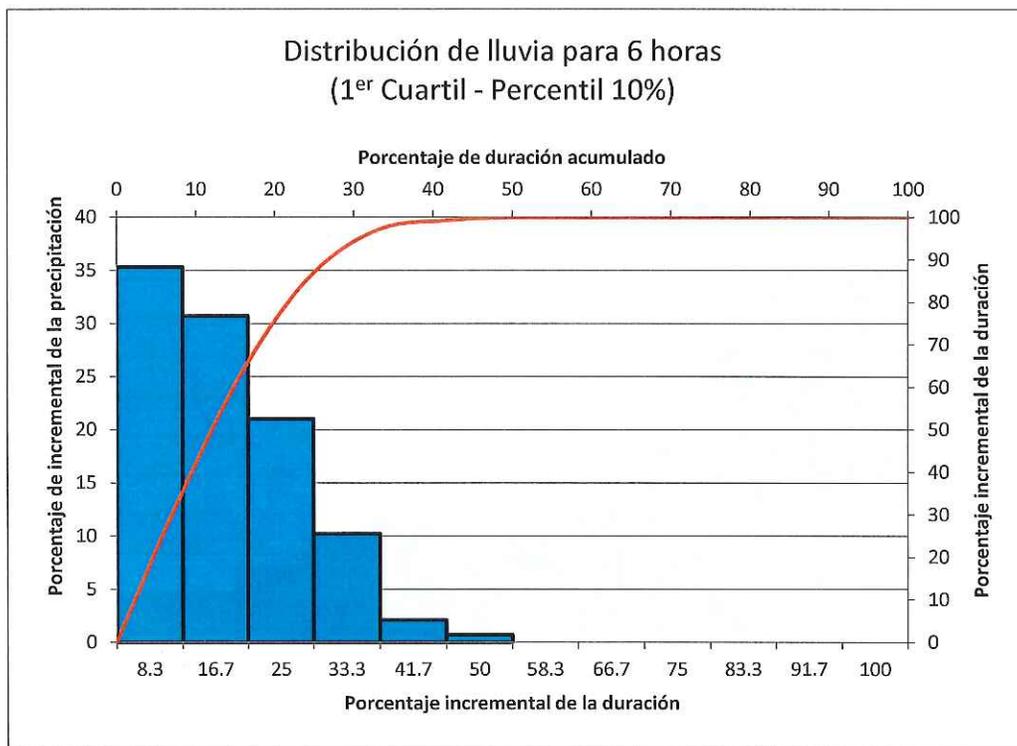


Tabla 3. Distribución Temporal de Lluvia (12 horas – 1^{er} Cuartil – Percentil 10%)

Por Ciento de Duración	Por Ciento de Precipitación Total	Incrementos
0.0	0.0	
8.3	45.3	45.3
16.7	79.8	34.5
25.0	95.8	16.0
33.3	99.5	3.7
41.7	100.0	0.5
50.0	100.0	0.0
58.3	100.0	0.0
66.7	100.0	0.0
75.0	100.0	0.0
83.3	100.0	0.0
91.7	100.0	0.0
100.0	100.0	0.0

CGM

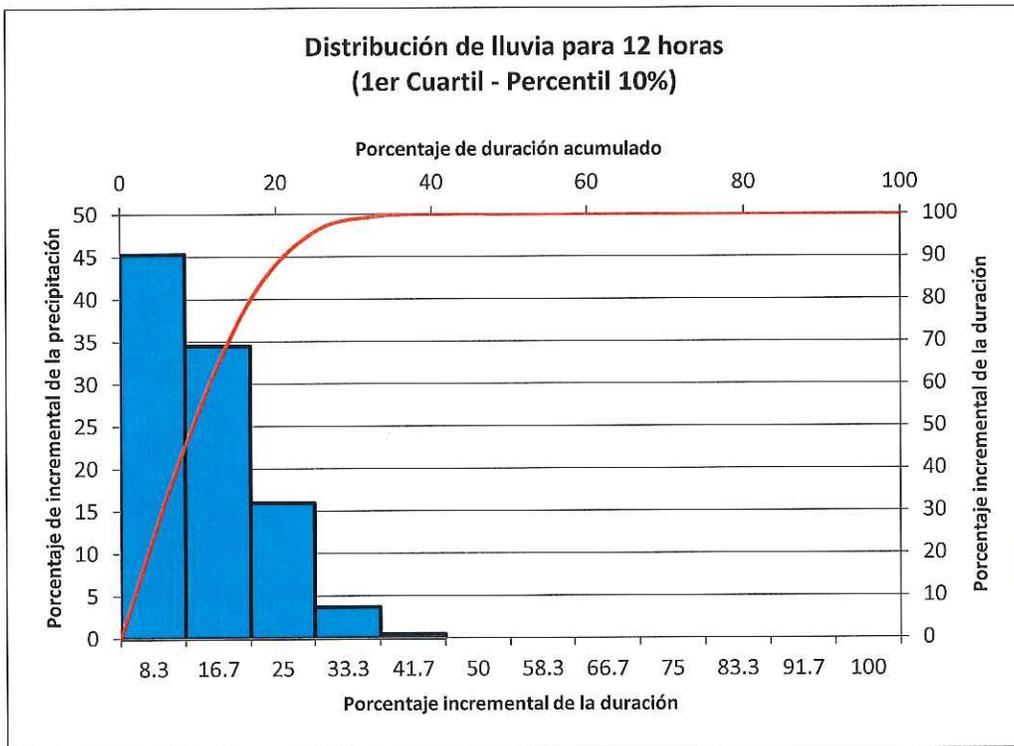


Tabla 4. Distribución Temporal de Lluvia (24 hora – 1^{er} Cuartil – Percentil 10%)

Por Ciento de Duración	Por Ciento de Precipitación	
	Total	Incrementos
0.0	0.0	
8.3	55.8	55.8
16.7	89.1	33.3
25.0	97.2	8.1
33.3	99.6	2.4
41.7	100.0	0.4
50	100.0	0.0
58.3	100.0	0.0
66.7	100.0	0.0
75.0	100.0	0.0
83.3	100.0	0.0
91.7	100.0	0.0
100.0	100.0	0.0

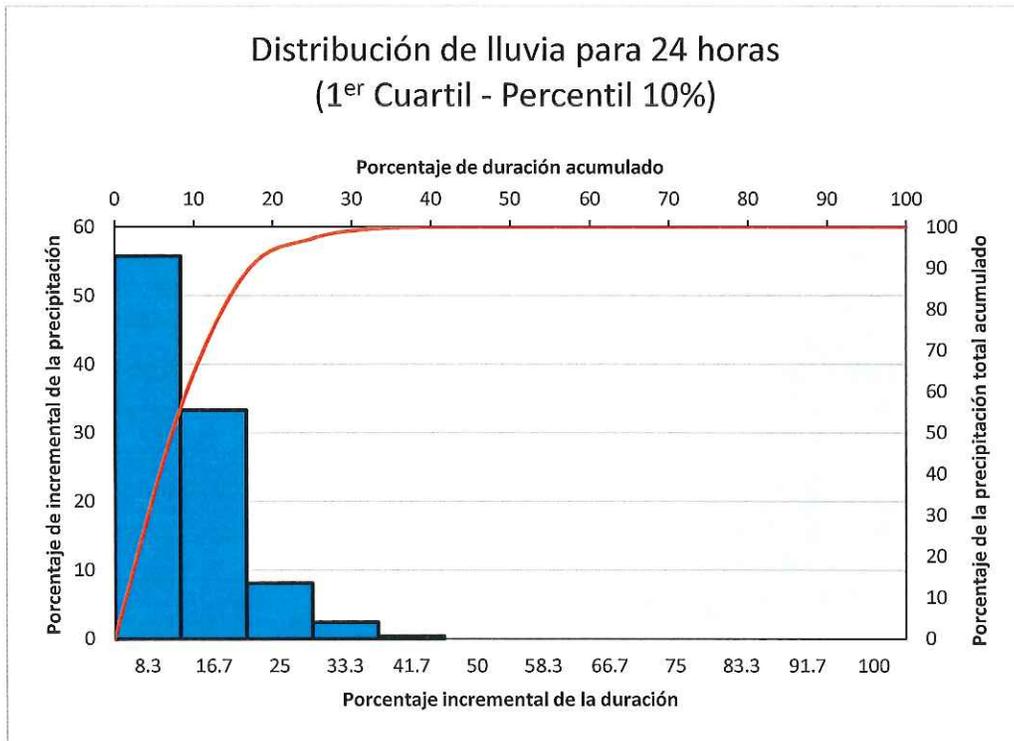


Tabla 5. Distribución Temporal de Lluvia (1 hora – 4^{to} Cuartil – Percentil 90%)

Por Ciento de Duración	Por Ciento de Precipitación Total	Incrementos
0.0	0.0	
8.3	0.7	0.7
16.7	1.3	0.6
25.0	2.5	1.2
33.3	4.1	1.7
41.7	6.5	2.4
50.0	11.2	4.8
58.3	17.5	6.2
66.7	25.1	7.6
75.0	35.9	10.8
83.3	52.9	17.0
91.7	76.4	23.5
100.0	100.0	23.6

Distribución de lluvia para 1 hora
(4th Quartile - Percentil 90%)

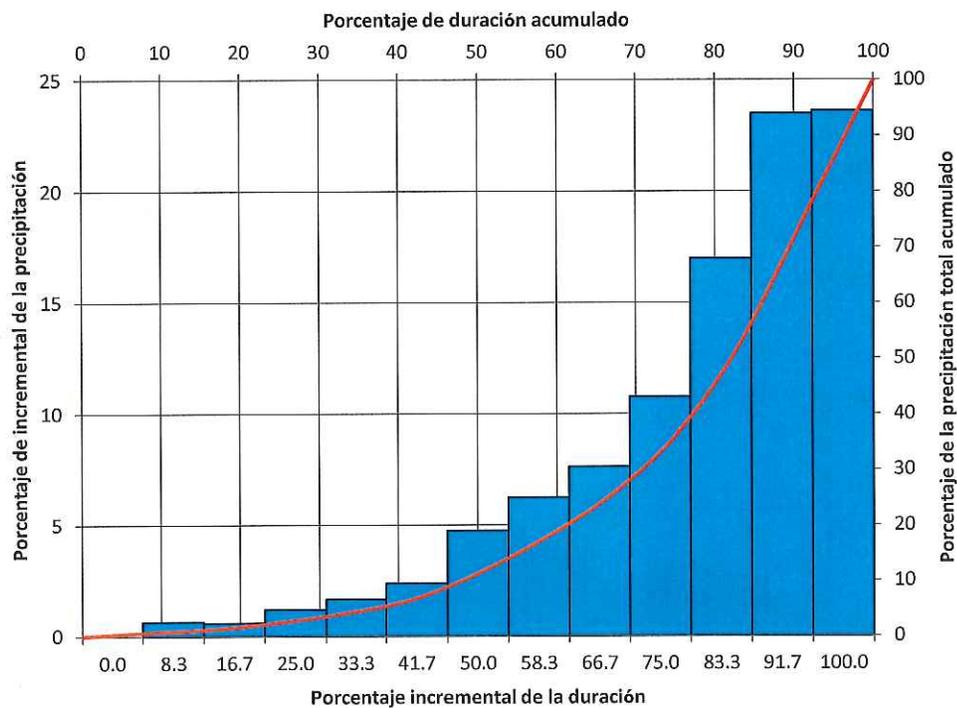


Tabla 6. Distribución Temporal de Lluvia (6 horas – 4^{to} Cuartil – Percentil 90%)

Por Ciento de Duración	Por Ciento de Precipitación Total	Incrementos
0.0	0.0	0.0
8.3	2.1	2.1
16.7	4.5	2.4
25.0	6.2	1.7
33.3	9.4	3.2
41.7	13.7	4.3
50.0	18.3	4.6
58.3	24.3	6.0
66.7	33.2	8.9
75.0	45.3	12.1
83.3	60.8	15.5
91.7	79.5	18.7
100.0	100.0	20.5

Distribución de lluvia para 6 horas
(4th Quartile - Percentil 90%)

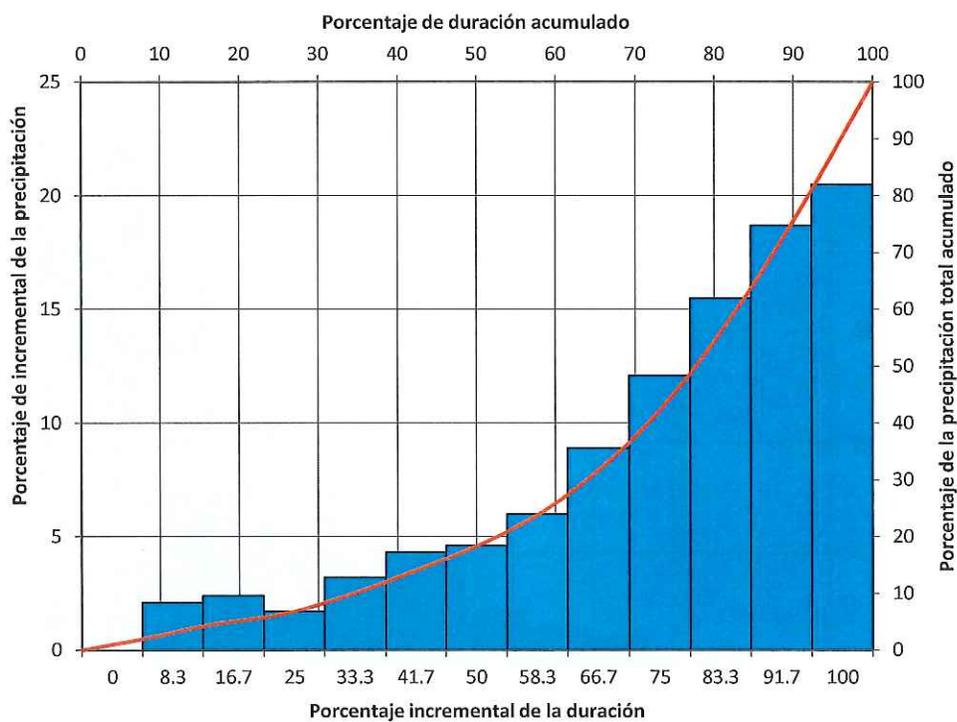


Tabla 7. Distribución Temporal de lluvia (12 horas – 4^{to} Cuartil – Percentil 90%)

Por Ciento de Duración	Por Ciento de Precipitación	
	Total	Incrementos
0.0	0.0	0.0
8.3	1.6	1.6
16.7	2.7	1.1
25.0	3.9	1.2
33.3	6.2	2.3
41.7	10.5	4.3
50.0	15.2	4.7
58.3	20.0	4.8
66.7	26.5	6.5
75.0	36.0	9.5
83.3	49.7	13.7
91.7	71.1	21.4
100.0	100.0	28.9

Distribución de lluvia para 12 horas
(4th Quartile - Percentil 90%)

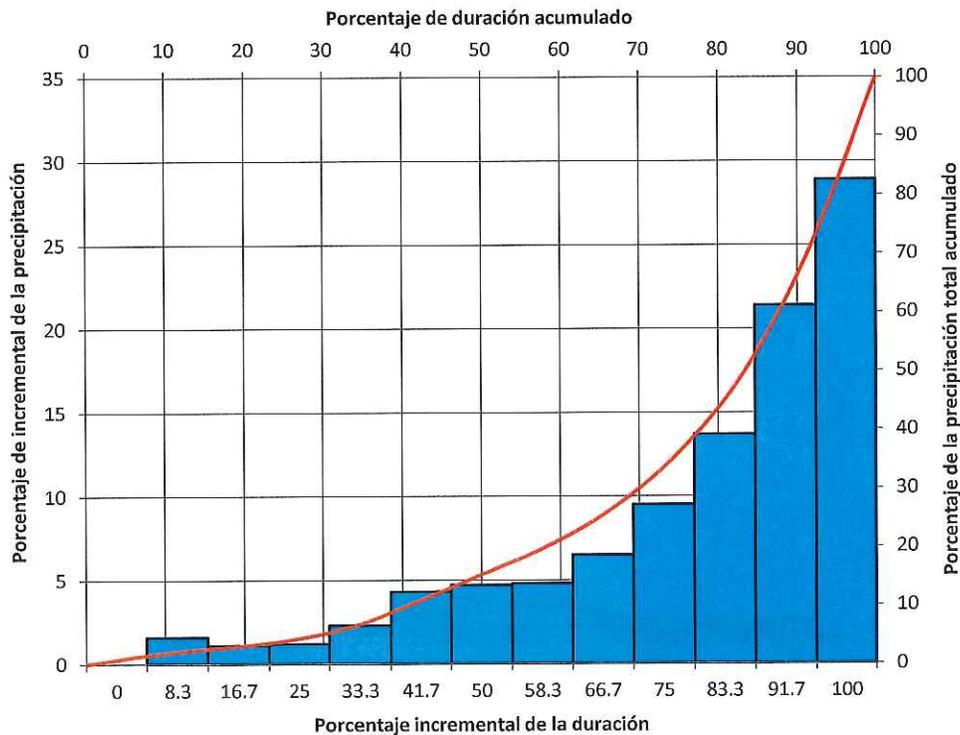
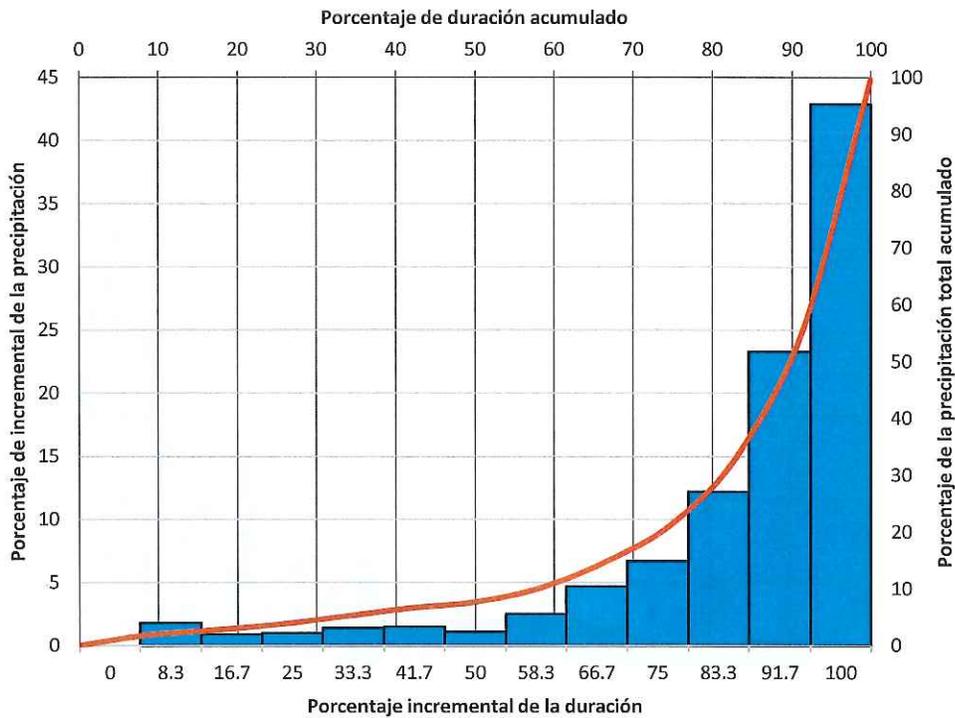


Tabla 8. Distribución Temporal de Lluvia (24 horas – 4^{to} Cuartil – Percentil 90%)

Por Ciento de Duración	Por Ciento de Precipitación Total	Incrementos
0.0	0.0	0.0
8.3	1.8	2.8
16.7	2.7	2.0
25.0	3.7	1.7
33.3	5.1	1.7
41.7	6.6	1.6
50.0	7.7	2.2
58.3	10.2	3.6
66.7	14.9	5.2
75.0	21.6	10.2
83.3	33.8	13.8
91.7	57.1	23.0
100.0	100.0	32.2

Distribución de lluvia para 24 horas
(4^{to} Cuartil - Percentil 90%)



APENDICE II

Requisitos para estimar valores de rugosidad para revestimientos

En este Apéndice se dan recomendaciones generales para aquellos revestimientos de uso frecuente en Puerto Rico. Sin embargo, el DRNA y la JP considerarán alternativas propuestas por los ingenieros que cumplan con los propósitos del proyecto y contribuyan en la preservación del ambiente.

Métodos de bioingeniería

Los métodos de bioingeniería para control de erosión son una alternativa atractiva ya que ayudan en la preservación de la vida acuática, la calidad del agua, y el paisaje. Debe recordarse que la protección de riberas no depende exclusivamente del método de protección sino de otros aspectos también, como por ejemplo la estabilidad del cauce y la pendiente de los bancos. Siempre que sea posible se recomienda utilizar métodos de bioingeniería combinados con otras alternativas en forma tal que el proyecto contenga un arreglo sistemático de vegetación y otras alternativas de protección. En todos los casos debe documentarse el coeficiente de rugosidad de Manning usado para el tipo de revestimiento seleccionado. A continuación se introducen revestimientos de rocas y gaviones los cuales, sin ser estrictamente elementos naturales, permiten ser usados en combinación con vegetación.

Revestimiento con rocas (rip-rap)

Los métodos de protección de riberas incluyen el uso de revestimiento de rocas (conocido también como "rip-rap"). El diseño de este tipo de revestimiento, incluyendo la selección de los tamaños y el diámetro máximo, está documentado en la literatura profesional técnica. El ingeniero debe incluir estos detalles si se usan en un estudio H-H. Los estudios que incluyan rip-rap como método de revestimiento deberán estar basados en algún método de diseño para la selección del tamaño y, de ser requerido, la gradación de las rocas. Se debe documentar la relación entre el tamaño de las piedras y el valor del coeficiente de rugosidad de Manning utilizado. Dependiendo de la importancia del proyecto el DRNA y la JP podrán requerir incluir la gradación de los tamaños de las rocas (rip-rap) según la velocidad local del agua, el peso específico, el tamaño máximo disponible de la roca y, la estimación del factor de seguridad. El método de diseño será alguno cuyo criterio de estabilidad sea el de esfuerzos cortantes permisibles y no el de velocidad máxima permisible. Debe explicarse cómo se va a anclar la estructura al terreno.

Gaviones

Los gaviones poseen rugosidades menores que el rip-rap, su apariencia es más natural que la de otros materiales, permiten el crecimiento de algunos tipos de vegetación y pueden ser una solución para sitios donde otras alternativas no son viables. Guías de diseño para gaviones han sido desarrolladas por los diferentes fabricantes y será necesario presentar los detalles de cada diseño para su evaluación. Las canastas hechas de acero están sujetas a corrosión y abrasión por lo que se requiere que posean un recubrimiento de PVC. Al igual que con el rip-rap, un buen anclaje de la estructura al terreno es requerida. Cualquier diseño que se proponga deberá incluir documentación sobre el procedimiento y los parámetros utilizados en la selección de los materiales y el coeficiente de rugosidad de Manning. El uso de gaviones debe realizarse con cautela en aquellos tramos del cauce que posean una carga de material del fondo alta compuesta de rocas y gravas gruesas que puedan producir abrasión y romper las canastas. Debe explicarse cómo se va a anclar la estructura al terreno.

Revestimientos rígidos

Los revestimientos rígidos son resistentes a la erosión, sin embargo no poseen mucha flexibilidad para adaptarse a los cambios en el terreno ni permiten el crecimiento de vegetación. Entre los más usados están los muros de hormigón y rocas con lechada de cemento. Estos métodos resisten altas velocidades, poseen poca rugosidad y son duraderos. Sin embargo, evitan la infiltración, son difíciles de construir bajo el agua y no permiten el crecimiento de la vegetación. Estos revestimientos son permitidos cuando otras alternativas no sean viables y se cumpla con todas las regulaciones que apliquen. El diseño debe proveer un anclaje adecuado de la estructura al terreno.

