



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA
INGENIERÍA CIVIL – HIDRÁULICA

**ANÁLISIS DE PELIGRO, VULNERABILIDAD Y RIESGO POTENCIAL ANTE LA
INCIDENCIA DE INUNDACIONES FLUVIALES**

TESIS
QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:
MAESTRO EN INGENIERÍA

PRESENTA:
ÁLVARO SATURNINO ROMÁN VELASCO

TUTORES PRINCIPALES:
DR. JOSÉ LUIS ARAGÓN HERNÁNDEZ
FACULTAD DE INGENIERÍA
DR. ÓSCAR ARTURO FUENTES MARILES
INSTITUTO DE INGENIERÍA

| COMITÉ | |
|--------------------------|-------------------------|
| DR. JESÚS GRACIA SÁNCHEZ | INSTITUTO DE INGENIERÍA |
| DR. RAMÓN DOMÍNGUEZ MORA | INSTITUTO DE INGENIERÍA |
| M. EN I. VÍCTOR FRANCO | INSTITUTO DE INGENIERÍA |

CIUDAD UNIVERSITARIA, CD. MX. MAYO 2019



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

JURADO ASIGNADO:

Presidente: DR. JESÚS GRACIA SÁNCHEZ
Secretario: DR. RAMÓN DOMÍNGUEZ MORA
1er. Vocal: DR. JOSÉ LUIS ARAGÓN HERNÁNDEZ
2do. Vocal: DR. OSCAR ARTURO FUETES MARILES
3er. Vocal: M. I. VÍCTOR FRANCO

Lugar o lugares donde se realizó la tesis: CIUDAD DE MÉXICO

TUTORES DE TESIS:

DR. JOSÉ LUIS ARAGÓN HERNÁNDEZ

FIRMA

DR. OSCAR ARTURO FUETES MARILES

FIRMA

AGRADECIMIENTOS

A mi esposa María del Carmen y a mis hijos Jade Yatziry y Gerardo Saturnino, por su invaluable comprensión y apoyo para el desarrollo de mis estudios de posgrado.

A mis padres, hermanos y sobrinos, por alentarme y ser siempre un aliciente en mi vida y en mi formación académica.

A mis tutores y miembros del comité, Dr. José Luis Aragón Hernández, Dr. Oscar Arturo Fuentes Mariles, Dr. Jesús Gracia Sánchez, Dr. Ramón Domínguez Mora y M. I. Víctor Franco; por su dirección y guía en el desarrollo de este trabajo de investigación y en mi estudios de posgrado; así mismo, por compartir sus conocimientos y experiencia conmigo, fue todo un honor haber sido su alumno.

Al M. en C. Hugo Arturo García Castañeda Subgerente de Diseño de Zonas de Riego y Temporal Tecnificado, en la Comisión Nacional del Agua, por su incondicional apoyo en el aspecto personal, profesional y laboral para llevar a buen término el estudio de la maestría en Ingeniería Civil.

Al Ing. Cándido Santiago Ruiz, quien me impulso, incentivo y apoyó para realizar el proceso de admisión al posgrado; que razón tenía sobre estudiar el posgrado.

Al M. en C. Luis Pomposo Viguera Muñoz, quien como profesor de licenciatura en la FES Aragón – UNAM, despertó en mí el gusto por la hidráulica e hidrología y siempre me motivo para continuar preparándome.

Al M. I. Víctor Javier Bourguett Ortiz y al Ing. Leobardo Heredia Aguilar, ambos en su momento Gerentes de Proyectos de Infraestructura Hidroagrícola en la Comisión Nacional del Agua, por brindarme laboralmente su apoyo y las facilidades para el desarrollo del posgrado.

A la Comisión Nacional del Agua, por otorgarme la beca de tiempo necesaria para poder acudir a estudiar el posgrado en Ingeniería Civil, en el área de conocimiento de hidráulica.

A la Ing. Jocelyn Abigail Alamilla Rivas (†), por mostrarme que no importan las vicisitudes y dificultades, nunca hay que claudicar. Donde quiera que estés, quiero compartir contigo este logro académico y que lo sientas tuyo, ya que en vida no lograste concretar tu graduación como M. en C. en el IPN.

A la Universidad Nacional Autónoma de México, a través de la Facultad de Ingeniería e Instituto de Ingeniería, por abrirme las puertas para realizar mis estudios de posgrado en Ingeniería Civil.

RESUMEN

El efecto e impacto de las inundaciones, ha motivado que la ingeniería civil; en particular, el campo de conocimientos y aplicación orientado a la Hidráulica, se ocupe de estudiar fenómenos naturales extremos, a través de la modelación matemática, obteniendo resultados y análisis detallados de los mismos y sus consecuencias, considerando una innumerable cantidad de enfoques, alternativas y posibles soluciones.

De acuerdo a las tendencias de evolución tecnológica de las últimas décadas, se podría pensar que el impacto de las inundaciones está bien documentado, con información y bases de datos sólidas; la realidad es que no, en la actualidad se adolece de información suficiente para la determinación del peligro, vulnerabilidad y riesgo, a las cuales están sujetas zonas con potencial latente de inundación.

Por tal razón, la presente investigación surge de la necesidad de integrar un conjunto de enfoques y análisis, herramientas informáticas y procesamiento de los resultados orientados a proveer de información para la estimación del peligro, vulnerabilidad y riesgo potencial ante la incidencia de inundaciones fluviales. De acuerdo a lo anterior, se ha considerado como punto de partida, el estudio de la legislación vigente tanto en México, como en otras partes del mundo, para la delimitación de la zona federal en los ríos, hasta la recopilación y análisis de la información que en materia de dichos parámetros esté disponible, con el objeto de identificar los criterios y metodologías empleadas, para su estimación, mismas que serán analizadas mediante un caso de aplicación, contemplado en el alcance del presente trabajo.

Para la estimación del peligro, vulnerabilidad y riesgo, se consideró como zona de estudio, la ciudad de Piedras Negras, localizada en el estado de Coahuila, la cual históricamente ha padecido inundaciones originadas principalmente por efecto del desbordamiento del río Escondido. Por ello, se realizó un estudio hidrológico de su cuenca para determinar las avenidas asociadas a los periodos de retorno de 5, 10, 50, 100, 500 y 1,000 años; para esta última se estimó un gasto de 2,217 m³/s.

Definida la caracterización hidrológica para la zona de estudio, fue necesario disponer de las características hidráulicas del citado río (principalmente tirantes y velocidades), ante la incidencia de las avenidas extraordinarias, asociadas a los periodos de retorno referidos,

para lo cual, se implementó el modelo de simulación de hidrodinámica fluvial Iber, permitiendo así conocer las manchas de inundación, cuyos rangos de valores de los parámetros citados, se encuentran entre 0.50 – 4.30 m y 0.60 – 2.40 m/s, respectivamente.

Una vez obtenidos los resultados, primeramente fueron analizadas las manchas de inundación, asociadas a los periodos de retorno de 5 y 10 años, con objeto de contrastarlas con los criterios que al amparo de la Ley de Aguas Nacionales y su Reglamento, se han establecido para tal fin, identificándose que en la zona de estudio, no se ha cumplido con las acotaciones que se establecen en dichos instrumentos legales, quedando expuesta a los probables efectos, ante la incidencia de avenidas asociadas a los referidos periodos de retorno.

Para la determinación del peligro, vulnerabilidad y riesgo de inundación, se han implementado principalmente los criterios desarrollados por los gobiernos de Francia, Estados Unidos, España y Australia, obteniendo como resultado que para la zona de estudio, se tiene una peligrosidad alta y una vulnerabilidad máxima, según el Criterio de Dórrigo. Por otra parte, con relación a la estimación del riesgo, se partió del peligro y la vulnerabilidad obtenidas y por medio del análisis de la información geoestadística fue posible determinar el valor de daños potenciales asociados a cada uno de los eventos extraordinarios analizados, siendo el correspondiente al periodo de retorno de 1,000 años, el de mayor valor, cuyo monto asciende a 265.34 millones de pesos.

Finalmente, como parte del análisis efectuado en el desarrollo del caso de aplicación, se procedió a considerar infraestructura hidráulica en el río Escondido para proteger los centros de población. Específicamente bordos de protección y una combinación de estos en interacción con una presa rompepicos, para los periodos de retorno de 500 y 1,000 años, respectivamente. A partir de lo cual, se ha estimado que el arreglo que provee de mayor protección a la zona de estudio es la combinación de la infraestructura citada.

ÍNDICE GENERAL

| | |
|--|----------|
| RESUMEN | i |
| 1 – INTRODUCCIÓN | 1 |
| 1.1 – JUSTIFICACIÓN | 2 |
| 1.2 – OBJETIVOS..... | 3 |
| 1.2.1 – Objetivo general | 3 |
| 1.2.2 – Objetivos secundarios..... | 3 |
| 2 – ANTECEDENTES | 5 |
| 2.1 – ESTADO DEL ARTE | 5 |
| 2.2 – ANTECEDENTES HISTÓRICOS | 6 |
| 2.3 – DELIMITACIÓN DE ZONAS FEDERALES | 8 |
| 2.3.1 – Legislación en México | 8 |
| 2.3.1.1 – Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos..... | 9 |
| 2.3.1.2 – Ley de Aguas Nacionales (LAN)..... | 10 |
| 2.3.1.3 – Reglamento de la Ley de Aguas Nacionales | 12 |
| 2.3.2 – Legislación en España | 14 |
| 2.3.3 – Legislación en Estados Unidos | 14 |
| 2.4 – INUNDACIONES..... | 15 |
| 2.4.1 – Definición general..... | 15 |
| 2.4.2 – Clasificación de las inundaciones..... | 16 |
| 2.4.2.1 – Inundación fluvial | 17 |
| 2.4.2.2 – Inundaciones por respuesta hidrológica de la cuenca. | 19 |
| 2.4.3 – Clasificación de zonas inundables..... | 20 |
| 2.5 – PELIGRO, VULNERABILIDAD Y RIESGO | 20 |
| 2.5.1 – Peligro | 21 |
| 2.5.2 – Vulnerabilidad..... | 24 |
| 2.5.2.1 – Tipos de vulnerabilidad..... | 24 |
| 2.5.2.2 – Curvas de vulnerabilidad | 25 |
| 2.5.3 – Riesgo..... | 36 |

| | |
|--|-----------|
| 3 – MODELACIÓN MATEMÁTICA..... | 39 |
| 3.1 – MODELOS EN 1D | 40 |
| 3.2 – MODELOS EN 2D | 42 |
| 3.3 – MODELOS EN 3D | 45 |
| 3.4 – SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA | 46 |
| 3.5 – MAPAS DE PELIGRO Y RIESGO DE INUNDACIÓN | 47 |
| 4 – CASO DE APLICACIÓN..... | 49 |
| 4.1 – LOCALIZACIÓN | 49 |
| 4.2 – ANTECEDENTES..... | 50 |
| 4.3 – ANÁLISIS HIDROLÓGICO..... | 52 |
| 4.4 – MODELACIÓN COMPUTACIONAL | 56 |
| 4.5 – RESULTADOS | 63 |
| 4.6 – ANÁLISIS Y PROCESAMIENTO DE RESULTADOS | 69 |
| 4.6.1 – Delimitación de la zona federal | 69 |
| 4.6.2 – Determinación del peligro | 72 |
| 4.6.3 – Determinación de la vulnerabilidad y riesgo | 76 |
| 4.6.3.1 – Viviendas..... | 76 |
| 4.6.3.2 – Bodegas y comercios | 79 |
| 4.6.3.3 – Planteles escolares | 80 |
| 4.6.3.4 – Centros socio-culturales y religiosos | 81 |
| 4.6.3.5 – Calles..... | 84 |
| 4.6.3.6 – Carreteras | 86 |
| 4.6.3.7 – Caminos de terracería | 89 |
| 4.6.3.8 – Vía férrea | 91 |
| 4.6.3.9 – Equipo de servicio eléctrico..... | 92 |
| 4.6.3.10 – Infraestructura y equipos de telecomunicaciones | 95 |
| 4.6.3.11 – Sistema de distribución de agua potable | 96 |
| 4.6.3.12 – Alcantarillado sanitario..... | 99 |
| 4.6.3.13 – Zona agrícola..... | 101 |
| 4.6.3.14 – Vulnerabilidad económica y social | 104 |
| 4.6.4 - Resumen del análisis de vulnerabilidad | 105 |

| | |
|---|------------|
| 4.6.5 - Resumen de la estimación del riesgo | 107 |
| 4.6.6 – Análisis comparativo con infraestructura de protección..... | 110 |
| 4.6.6.1 – Bordos de protección | 110 |
| 4.6.6.2 – Presa rompepicos - bordos | 115 |
| 5 – CONCLUSIONES | 123 |
| 6 – BIBLIOGRAFÍA Y FUENTES DE INFORMACIÓN | 125 |

ÍNDICE DE IMÁGENES

| | |
|--|----|
| Imagen 2.1 – Inundación causada por el huracán Ingrid y Manuel, municipio de Acapulco de Juárez estado de Guerrero. (El Universal, 2013)..... | 6 |
| Imagen 2.2 – Inundación causada por el huracán Karl, municipio de Medellín de Bravo, estado de Veracruz. (Notimex, 2010)..... | 6 |
| Imagen 2.2 – Inundación ocurrida en Villahermosa Tabasco, en el año de 2007 (Archivo: CONAGUA). | 15 |
| Imagen 3.1 – Ventanas representativas del programa HEC-RAS. | 42 |
| Imagen 3.2 – Mapa de inundación, generado en el programa Mike Flood, DHI. | 44 |
| Imagen 3.3 – Modelación computacional de la dinámica de un río, mediante el programa Flow 3D. | 45 |
| Imagen 4.1 – Localización de la zona de estudio. | 50 |
| Imagen 4.2 – Cuenca del río Escondido y ubicación de estaciones climatológicas e hidrométrica..... | 53 |
| Imagen 4.3 – Procesamiento de la información geoestadística en el programa ArcGis, en su versión 10.1. | 57 |
| Imagen 4.4 – Delimitación de la zona de estudio. | 57 |
| Imagen 4.5 – Modelo digital de terreno de la zona de estudio. | 58 |
| Imagen 4.6 – Malla triangular no estructurada, en el área de influencia para efectuar el análisis y asignación de elevaciones mediante archivo de datos ASCII..... | 59 |
| Imagen 4.7 – Distintos usos de suelo y vegetación en la zona de estudio..... | 59 |
| Imagen 4.8 – Asignación de coeficientes de rugosidad en la zona de estudio, mediante archivo de datos ASCII..... | 60 |
| Imagen 4.9 – Configuración del tiempo de duración de la simulación, pasos de tiempo para el almacenamiento de resultados y parámetros hidráulicos..... | 61 |
| Imagen 4.10 – Determinación de condiciones de frontera en el modelo Iber. | 62 |
| Imagen 4.11 – Ventanas estadísticas del proceso de ejecución de simulación en Iber..... | 63 |
| Imagen 4.12 – Tirantes máximos, correspondientes al tránsito de la avenida asociada a un periodo de retorno de 5 años. | 63 |
| Imagen 4.13 – Velocidades máximas, correspondientes al tránsito de la avenida asociada a un periodo de retorno de 5 años. | 64 |
| Imagen 4.14 – Tirantes máximos, correspondientes al tránsito de la avenida asociada a un periodo de retorno de 10 años. | 64 |
| Imagen 4.15 – Velocidades máximas, correspondientes al tránsito de la avenida asociada a un periodo de retorno de 10 años. | 65 |
| Imagen 4.16 – Tirantes máximos, correspondientes al tránsito de la avenida asociada a un periodo de retorno de 50 años. | 65 |
| Imagen 4.17 – Velocidades máximas, correspondientes al tránsito de la avenida asociada a un periodo de retorno de 50 años. | 66 |

| | |
|---|----|
| Imagen 4.18 – Tirantes máximos, correspondientes al tránsito de la avenida asociada a un periodo de retorno de 100 años..... | 66 |
| Imagen 4.19 – Velocidades máximas, correspondientes al tránsito de la avenida asociada a un periodo de retorno de 100 años..... | 67 |
| Imagen 4.20 – Tirantes máximos, correspondientes al tránsito de la avenida asociada a un periodo de retorno de 500 años..... | 67 |
| Imagen 4.21 – Velocidades máximas, correspondientes al tránsito de la avenida asociada a un periodo de retorno de 500 años..... | 68 |
| Imagen 4.22 – Tirantes máximos, correspondientes al tránsito de la avenida asociada a un periodo de retorno de 1000 años..... | 68 |
| Imagen 4.23 – Velocidades máximas, correspondientes al tránsito de la avenida asociada a un periodo de retorno de 1000 años..... | 69 |
| Imagen 4.24 – Análisis del efecto de inundación en la delimitación de la zona federal, asociada a un periodo de retorno de 5 años..... | 70 |
| Imagen 4.25 – Análisis del efecto de inundación en la delimitación de la zona federal, asociada a un periodo de retorno de 10 años..... | 71 |
| Imagen 4.26 – Distribución de la relación profundidad-velocidad máximas, resultantes del tránsito de la avenida asociada al periodo de retorno de 1,000 años; implementado el criterio de la Ciudad de Dórrigo..... | 74 |
| Imagen 4.27 – Mapa de peligro de la inundación fluvial originada por el tránsito de la avenida asociada a un Tr = 1,000 años, en el río Escondido, Piedras Negras, Coahuila..... | 75 |
| Imagen 4.28 – Distribución de viviendas en la zona de estudio..... | 77 |
| Imagen 4.29 – Caracterización del tipo de vivienda predominante en la zona de estudio..... | 77 |
| Imagen 4.30 – Viviendas afectadas con el tránsito de la avenida asociada a un Tr = 1,000 años..... | 78 |
| Imagen 4.31 – Bodegas y comercios afectados a consecuencia de la eventual inundación..... | 79 |
| Imagen 4.32 – Localización de las escuelas de educación básica, afectadas con la inundación..... | 81 |
| Imagen 4.33 – Distribución de los centros socio-culturales y religiosos, susceptibles a ser afectados..... | 82 |
| Imagen 4.34 – Secuencia del proceso para la determinación de la superficie afectada, correspondiente a centros socio-culturales y religiosos, en función de la profundidad del agua..... | 83 |
| Imagen 4.35 – Localización de las calles, con probabilidad de ser afectada, ante la incidencia de la inundación..... | 85 |
| Imagen 4.36 – Proceso para la determinación de la superficie de calles afectadas..... | 85 |
| Imagen 4.37 – Identificación de carreteras vulnerables en la zona de estudio..... | 87 |
| Imagen 4.38 – Proceso para la determinación de la superficie de carreteras afectadas..... | 88 |
| Imagen 4.39 – Localización de caminos de terracería susceptibles a ser afectados por la inundación..... | 89 |
| Imagen 4.40 – Proceso para la determinación de la superficie de caminos de terracería afectados..... | 90 |
| Imagen 4.41 – Identificación del tramo de vía férrea, susceptible a ser afectados por la inundación..... | 92 |
| Imagen 4.42 – Identificación de medidores de energía eléctrica que son susceptibles a ser afectados por la inundación..... | 94 |
| Imagen 4.43 – Localización de infraestructura y equipos de telecomunicaciones..... | 96 |

| | |
|--|-----|
| Imagen 4.44 – Distribución de la red de agua potable cuyos componentes de control y operación son susceptibles a ser afectados con la inundación. | 97 |
| Imagen 4.45 – Proceso para la determinación de la superficie de la red de agua potable, cuyos dispositivos de control de agua potable se verían afectados con la inundación..... | 98 |
| Imagen 4.46 – Distribución de la superficie agrícola en el área de estudio, con probabilidad de ser afectada por la inundación. | 101 |
| Imagen 4.47 – Proceso para la determinación de la superficie de afectación en la zona agrícola..... | 103 |
| Imagen 4.48 – Rectificación del cauce del río Escondido, efectuada mediante la edición de la malla no estructurada. | 111 |
| Imagen 4.49 – Distribución de bordos de protección, efectuados mediante la edición de la malla no estructurada. | 112 |
| Imagen 4.50 – Resultado del tránsito de la avenida asociada a un $Tr = 500$ años, considerando bordos de protección. | 113 |
| Imagen 4.51 – Secuencia de propagación de la avenida asociada a un $Tr = 500$ años, considerando bordos de protección. | 113 |
| Imagen 4.52 – Modelo digital de elevaciones, con resolución de 5 m (INEGI)..... | 115 |
| Imagen 4.53 – Representación del vaso de regulación de la presa rompepicos. | 116 |
| Imagen 4.54 – Distribución de bordos de protección, efectuados mediante la edición de la malla no estructurada, para la combinación con presa rompepicos..... | 120 |
| Imagen 4.55 – Resultado del tránsito de la avenida asociada a un $Tr = 1,000$ años, con interacción de infraestructura de la presa rompepicos y bordos. | 121 |
| Imagen 4.56 – Resultado del tránsito de la avenida asociada a un $Tr = 1,000$ años, sin obras de control y protección. | 121 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|--|-----|
| Figura 2.1 – Marco legal y normativo para la gestión de las aguas nacionales. | 9 |
| Figura 2.2 – Esquema de la zona federal en un cauce. | 14 |
| Figura 2.3 – Tipos de inundación, de acuerdo a su origen. Elaboración con información del CENAPRED (2004). | 16 |
| Figura 2.4 – Menaje para la vivienda tipo I (una sola planta) (CENAPRED, 2006). | 27 |
| Figura 2.5 – Menaje en escuelas localizadas en zona urbana. | 30 |
| Figura 2.6 – Curva de daños asociada a eventos probabilísticos. Adaptada a partir de Bladé et al., (2014).37 | |
| Figura 3.1 – Clasificación de modelos computacionales y las ecuaciones que resuelven (Mendoza, 2015).40 | |
| Figura 3.2 – Esquema de capas temáticas para la construcción de un mapa de riesgo en un SIG. | 48 |
| Figura 4.1 – Menaje para la vivienda tipo V (dos plantas) (CENAPRED, 2006). | 77 |
| Figura 4.2 – Altura de elevación generalmente adoptada para la instalación de medidores de energía eléctrica (CFE). | 93 |
| Figura 4.3 – Sección tipo de los bordos de protección. | 111 |
| Figura 4.4 – Esquema del arreglo de componentes que integran la presa rompepicos. | 119 |

ÍNDICE DE GRÁFICAS

| | |
|---|-----|
| Gráfica 2.1 – Efectos más importantes de fenómenos hidrometeorológicos en México. Elaborada con información del CENAPRED (2004), Asociación Mexicana de Instituciones de Seguros (AMIS) y diarios de circulación nacional. | 7 |
| Gráfica 2.2 – Criterio del Gobierno de Francia. Adaptada de Alcocer-Yamanaka et al., (2016). | 21 |
| Gráfica 2.3 – Niveles de peligro que relacionan tirante del agua (m) y velocidad (m/s). Adaptada de FEMA, (2009). | 22 |
| Gráfica 2.4 – Niveles de peligro aplicados en la ciudad de Dórrigo, Australia (NSW, 2005). | 23 |
| Gráfica 2.5 – Curva de vulnerabilidad para vivienda tipo I, (CENAPRED, 2006). | 27 |
| Gráfica 2.6 – Curva de vulnerabilidad para vivienda tipo II, (CENAPRED, 2006). | 28 |
| Gráfica 2.7 – Curva de vulnerabilidad para vivienda tipo III, (CENAPRED, 2006). | 28 |
| Gráfica 2.8 – Curva de vulnerabilidad para vivienda tipo IV, (CENAPRED, 2006). | 29 |
| Gráfica 2.9 – Curva de vulnerabilidad para vivienda tipo V, (CENAPRED, 2006). | 29 |
| Gráfica 2.10 – Curva de vulnerabilidad para escuela en zona urbana. | 30 |
| Gráfica 2.11 – Curva de vulnerabilidad elemental agrícola para cultivos arbolados. Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino (2011). | 32 |
| Gráfica 2.12 – Curva de vulnerabilidad elemental agrícola para cultivos no arbolados. Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino (2011). | 32 |
| Gráfica 2.13 – Curva de pérdida de producción agrícola por duración de la inundación (Gracia, 2002). | 33 |
| Gráfica 4.1 – Gastos máximos registrados en la estación hidrométrica Villa de Fuente. | 54 |
| Gráfica 4.2 – Hidrograma asociado al gasto máximo registrado el 04 de abril de 2004, en la estación hidrométrica Villa de Fuente. | 55 |
| Gráfica 4.3 – Hidrogramas asociados a los periodos de retorno de interés. | 56 |
| Gráfica 4.4 – Estimación de la peligrosidad de inundación, asociadas a distintos periodos. Criterio desarrollado por el gobierno Francés. Adaptada de Loat y Petrascheck (1997). | 73 |
| Gráfica 4.5 – Estimación de la peligrosidad, empleando el criterio desarrollado por el Gobierno de Australia, implementado en la Ciudad de Dórrigo. | 73 |
| Gráfica 4.6 – Estimación de la peligrosidad de inundación, asociadas a distintos periodos. Criterio desarrollado por la Agencia Federal para el Manejo de Emergencias de los Estados Unidos. | 74 |
| Gráfica 4.7 – Curva de disminución de la producción de nogal, por la inundación originada por el tránsito de la avenida asociada a un periodo de retorno de 1,000 años. | 103 |
| Gráfica 4.8 – Curva de daños asociada a distintos periodos de retorno. | 109 |
| Gráfica 4.9 – Curva elevaciones – áreas – capacidades. | 116 |
| Gráfica 4.10 – Sección transversal de la boquilla considerada para la presa rompepicos. | 117 |
| Gráfica 4.11 – Variantes de dimensionamiento para conducto de fondo y altura de vertedor para presa rompepicos, con longitud de cresta = 25 m. | 118 |
| Gráfica 4.12 – Hidrogramas de entrada y salida de la presa rompepicos. | 119 |

ÍNDICE DE TABLAS

| | |
|--|-----|
| Tabla 2.1 – Clasificación de zonas inundables asociadas a distintos periodos de retorno (Fuentes, 2011). | 20 |
| Tabla 2.2 – Criterio de riesgo de tirante máximo (Gómez et al., 2011). | 23 |
| Tabla 2.3 – Criterio de riesgo de velocidad máxima (Gómez, Macchione, & Russo, 2011). | 24 |
| Tabla 4.1 – Cronología histórica de inundaciones en Piedras Negras, Coahuila, ("El Zócalo", 2009; "La Jornada", 2004). | 51 |
| Tabla 4.2 – Estaciones climatológicas de influencia para la zona de estudio. | 54 |
| Tabla 4.3 – Distribución de gastos asociados a distintos periodos de retorno. | 55 |
| Tabla 4.4 – Coeficientes de rugosidad de Manning, para los distintos tipos de suelo en la zona de estudio. | 60 |
| Tabla 4.4 – Valores máximos de profundidad y velocidad en la zona urbana, susceptible al efecto de inundación. | 72 |
| Tabla 4.5 – Estimación de la vulnerabilidad y daño en viviendas. | 78 |
| Tabla 4.6 – Estimación de la vulnerabilidad y daño en escuelas de educación básica. | 81 |
| Tabla 4.7 – Estimación de la vulnerabilidad y daño a centros socio-culturales y religiosos. | 84 |
| Tabla 4.8 – Estimación de la vulnerabilidad y daño en calles. | 86 |
| Tabla 4.9 – Estimación de la vulnerabilidad y daño en carreteras. | 88 |
| Tabla 4.10 – Estimación de la vulnerabilidad y daño en caminos de terracería. | 91 |
| Tabla 4.11 – Estimación de la vulnerabilidad y daño en vía férrea. | 92 |
| Tabla 4.12 – Estimación de la vulnerabilidad y daño en equipo de servicio eléctrico. | 95 |
| Tabla 4.13 – Estimación de la vulnerabilidad y daño en infraestructura y equipos de telecomunicaciones. | 96 |
| Tabla 4.14 – Estimación de la vulnerabilidad y daño en dispositivos de control de agua potable. | 99 |
| Tabla 4.15 – Estimación de la vulnerabilidad y daño en alcantarillado sanitario. | 100 |
| Tabla 4.16 – Estadísticas de producción agrícola de cultivo de nogal en Piedras Negras, Coahuila (SIAP-SAGARPA, 2018). | 102 |
| Tabla 4.17 – Estimación de la vulnerabilidad y daño en la zona agrícola. | 104 |
| Tabla 4.19 – Vulnerabilidad económica, asociada a distintos periodos de retorno. | 105 |
| Tabla 4.20 – Vulnerabilidad social, asociada a distintos periodos de retorno. | 105 |
| Tabla 4.18 – Vulnerabilidad física, asociada a distintos periodos de retorno. | 106 |
| Tabla 4.21 – Estimación del daño, ocasionado por la incidencia de una inundación asociada a un periodo de retorno de 1,000 años. | 107 |
| Tabla 4.22 – Estimación del daño, ocasionado por la incidencia de una inundación asociada a un periodo de retorno de 1,000 años. | 108 |
| Tabla 4.23 – Determinación del daño anual esperado, asociado a los periodos de retorno analizados.... | 109 |

Índice de contenido

| | |
|---|-----|
| Tabla 4.23 – Comparación de cuantificación y potenciales daños, entre los escenarios con obras de protección y sin ellas, para la incidencia de una inundación asociada a un periodo de retorno de 500 años. | 114 |
| Tabla 4.24 – Comparación de cuantificación y potenciales daños, entre los escenarios con obras de control y protección, y sin ellas, para una inundación asociada a un periodo de retorno de 1,000 años. | 122 |

1 – INTRODUCCIÓN

Históricamente las civilizaciones humanas han establecido y desarrollado sus centros de población en las proximidades de los escurrimientos naturales y afluentes de éstos, generalmente en las zonas de planicie, lo que ha propiciado la incidencia de innumerables inundaciones fluviales, cuyos impactos en muchos de los casos, de los que se tiene evidencia, han sido catastróficos.

En general, los ríos han sido utilizados por el hombre para riego de zonas agrícolas, abastecimiento de agua para consumo humano, generación de energía eléctrica, pesca, recreación, etc. Sin embargo, históricamente no se ha considerado con la importancia debida, el impacto que dichas actividades, pueden llegar a generar en las funciones naturales de los ríos, como son: la modificación de su cauce por el transporte de sedimentos, en su morfología y en general cambios medioambientales de la región de influencia de los cauces. Cuando ocurre una alteración en el río, ya sea natural o artificial, trae consigo variaciones en las características del cauce, no sólo localmente sino también aguas abajo y aguas arriba del sitio. Por esto es necesario estimar la respuesta o reacción de un río a una posible intervención, procurando determinar y evaluar los posibles efectos de su comportamiento hidráulico ante la incidencia de fenómenos hidrometeorológicos.

El desarrollo y evolución de las civilizaciones, representada por el crecimiento de la urbanización en las ciudades, conlleva a alteraciones de las redes de drenaje natural (ríos urbanos) y un incremento de las zonas impermeables en superficie, cuya consecuencia al presentarse precipitaciones, es que el agua no puede ser infiltrada al subsuelo y se propicia su escurrimiento por las calles y el terreno natural hacia las partes bajas, afectando el comportamiento hidrológico de la cuenca, debido a un menor tiempo de reacción de ésta, acelerando el proceso lluvia-escurrimiento.

Dentro de las diversas amenazas naturales que con frecuencia impactan las áreas urbanas y en general los centros de población destacan las de origen hidrometeorológico, sobre todo las derivadas de precipitaciones intensas, de corto tiempo y las provocadas por los ciclones tropicales, cuyos escurrimientos derivados, al vincularse con la dinámica del proceso de ocupación humana, favorecen el riesgo de desastre por inundaciones, cuya incidencia, se refleja en las consecuencias, que éstas originan rápidamente, como lo son: pérdidas económicas, daños materiales y humanos.

De acuerdo a las tendencias de evolución tecnológica de las últimas décadas, se podría pensar que el impacto de las inundaciones está bien documentado, con información y bases de datos sólidas, de los fenómenos que las han ocasionado y los efectos que se han originado a consecuencia de ellas, pero la realidad es que no, en la actualidad se adolece de información que sea objeto de análisis para la determinación del peligro, vulnerabilidad y riesgo, a las cuales están sujetas zonas con potencial latente de inundación.

La problemática relacionada al efecto e impacto de las inundaciones ha motivado que la ingeniería civil, en particular, el campo de conocimientos y aplicación orientado a la hidráulica, se ocupe de estudiar fenómenos a través de la modelación matemática, cuyos resultados constituye una herramienta muy poderosa para el análisis y estudio del citado fenómeno y sus consecuencias, considerando una innumerable cantidad de enfoques, alternativas y posibles soluciones.

La demanda de modelos de predicción más rápidos, precisos, operativos y complejos, es creciente. La posibilidad de disponer de ordenadores personales de considerable capacidad de cálculo y de alta velocidad de procesamiento, ha favorecido el desarrollo y uso de programas de tipo hidrológico e hidráulico, haciéndolos cada vez más amigables y accesibles.

El desarrollo del presente trabajo surge de la necesidad de integrar un conjunto de enfoques y análisis, herramientas informáticas y procesamiento de los resultados orientados a proveer de información para la estimación del peligro, vulnerabilidad y riesgo potencial ante la incidencia de inundaciones fluviales.

1.1 – JUSTIFICACIÓN

De acuerdo a la tendencia de los últimos años, ha sido notoria la mayor incidencia en México y en otras partes del mundo, de fenómenos hidrometeorológicos aún más extremos, que han derivado en inundaciones tanto en zonas con pocos habitantes, como en las densamente pobladas, y cuyos impactos han resultado devastadores en muchos de los casos. Por tal razón, se considera necesario estimar y analizar el peligro, la vulnerabilidad y riesgo de una eventual inundación fluvial. Es por ello que, en el presente

trabajo, se describen los principales avances y resultados obtenidos durante el desarrollo de esta investigación.

1.2 – OBJETIVOS

Con la creciente preocupación a nivel nacional e internacional respecto al aumento en la frecuencia y severidad de los desastres y las amenazas naturales, y particularmente con los relacionados a las causas y efectos de la inundaciones fluviales, como producto de factores relacionados con el cambio climático, existe cada vez más voluntad para poner en marcha medidas políticas, legales, técnicas, económicas e institucionales que reduzcan los efectos destructivos de dicho fenómeno, razón por la que, para orientar la presente investigación, se plantearon las siguientes interrogantes:

- a) ¿Cómo y para qué, estimar el riesgo, la vulnerabilidad y el peligro asociado a la incidencia de una inundación fluvial?
- b) ¿Cuáles son las variables a considerar para efectuar el análisis de dichos factores?

A partir de las cuales, para este trabajo de investigación se han propuesto los siguientes objetivos:

1.2.1 – Objetivo general

Desarrollar mediante un caso de aplicación, el proceso metodológico para la estimación del peligro, vulnerabilidad y riesgo potencial ante la incidencia de inundaciones fluviales, a partir del análisis de información fisiográfica e hidrológica con el apoyo de sistemas de información geográfica (SIG) y la implementación de modelos de cálculo computacionales.

1.2.2 – Objetivos secundarios

- Analizar la normatividad vigente para la determinación o delimitación de zonas federales en los cauces, y contrastarla con las aplicables en los Estados Unidos y España.
- Hacer un análisis comparativo de los resultados obtenidos en el caso de aplicación, con la consideración de infraestructura de protección a centros de población, en apego a la normatividad vigente.

2 – ANTECEDENTES

Se abordará desde un contexto histórico el impacto de las inundaciones fluviales que históricamente se han presentado en México, así como los efectos asociados a ellas, que han derivado en daños a la infraestructura pública urbana y sectores productivos de bienes y servicios y en algunos casos en la pérdida de vidas humanas.

Por otra parte, se efectuará el análisis de la legislación vigente en México, referente a la delimitación de zonas federales en cauces y se llevará a cabo el contraste de la misma, con las aplicables en países como España y Estados Unidos.

2.1 – ESTADO DEL ARTE

A nivel mundial las inundaciones están aumentando más rápidamente que ningún otro desastre. De acuerdo con la Cruz Roja Internacional, durante el periodo 1919-2004, han colaborado con ayuda en más eventos de inundaciones que de cualquier otro tipo, en gran medida porque el acelerado desarrollo de las comunidades modifica los ecosistemas locales, incrementando el riesgo de inundación al que están expuestas muchas poblaciones (CENAPRED, 2004). Por tal razón en el contexto internacional, diversas instituciones y entidades han creado programas para la evaluación y gestión del riesgo derivado de las inundaciones, suponiendo un estímulo considerable para el desarrollo de nuevos métodos y herramientas de modelización numérica de las inundaciones fluviales. Así como el establecimiento en horizontes temporales para la elaboración de mapas de peligrosidad y riesgo, y obligaciones de actualización de los mencionados resultados. Algunas de estas instituciones son la Directiva Europea 2007/60/CE, Organización de las Naciones Unidas (ONU), Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO).

Por su parte, en México en las últimas tres décadas, diversas instituciones tanto gubernamentales, como de investigación, como lo son el Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED), Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA), Comisión Federal de Electricidad (CFE), Instituto de Ingeniería de la UNAM, Centro de Investigación y Estudios Avanzados del IPN, por citar algunos, se han abocado a desarrollar estudios, proyectos y trabajos de investigación, relacionados con la estimación y probable incidencia de inundaciones fluviales y sus potenciales efectos, ya sean ocasionados por fenómenos hidrometeorológicos o por la

operación de la infraestructura hidráulica del país o una combinación de ambas situaciones. Derivado de dichos trabajos, actualmente el gobierno de la República Mexicana, ha desarrollado el Atlas Nacional de Riesgos, donde se incluye el semáforo de peligro potencial de inundaciones a nivel nacional.

Como se ha mencionado, han sido desarrollados trabajos en el contexto nacional, estatal, municipal y regional; sin embargo, para el análisis del peligro, vulnerabilidad y riesgo ante la probable incidencia de inundaciones fluviales, se requiere un análisis particular de las zonas de estudio, de sus características fisiográficas, hidroclimatológicas y socioeconómicas, es por ello que el presente trabajo de investigación está orientado a dicho nivel de profundidad de análisis.

2.2 – ANTECEDENTES HISTÓRICOS

En diversas partes del mundo, se ha presentado un alarmante incremento en la incidencia y severidad de los eventos hidroclimáticos extremos, asociados en gran parte con una creciente variabilidad y cambio climático.

En México, la problemática de inundaciones en algunas ciudades es recurrente (imagen 2.1 y 2.2), ante la carencia de programas y acciones que permitan prevenir y por ende mitigar este problema, sus efectos se ven reflejados generalmente en la ciudadanía, interrupción de servicios básicos e infraestructura más vulnerable y suelen producir daños severos a la población, vías de comunicación, a la infraestructura urbana e hidroagrícola, fauna, así como a diversas actividades económicas e incluso la pérdida de vidas humanas.



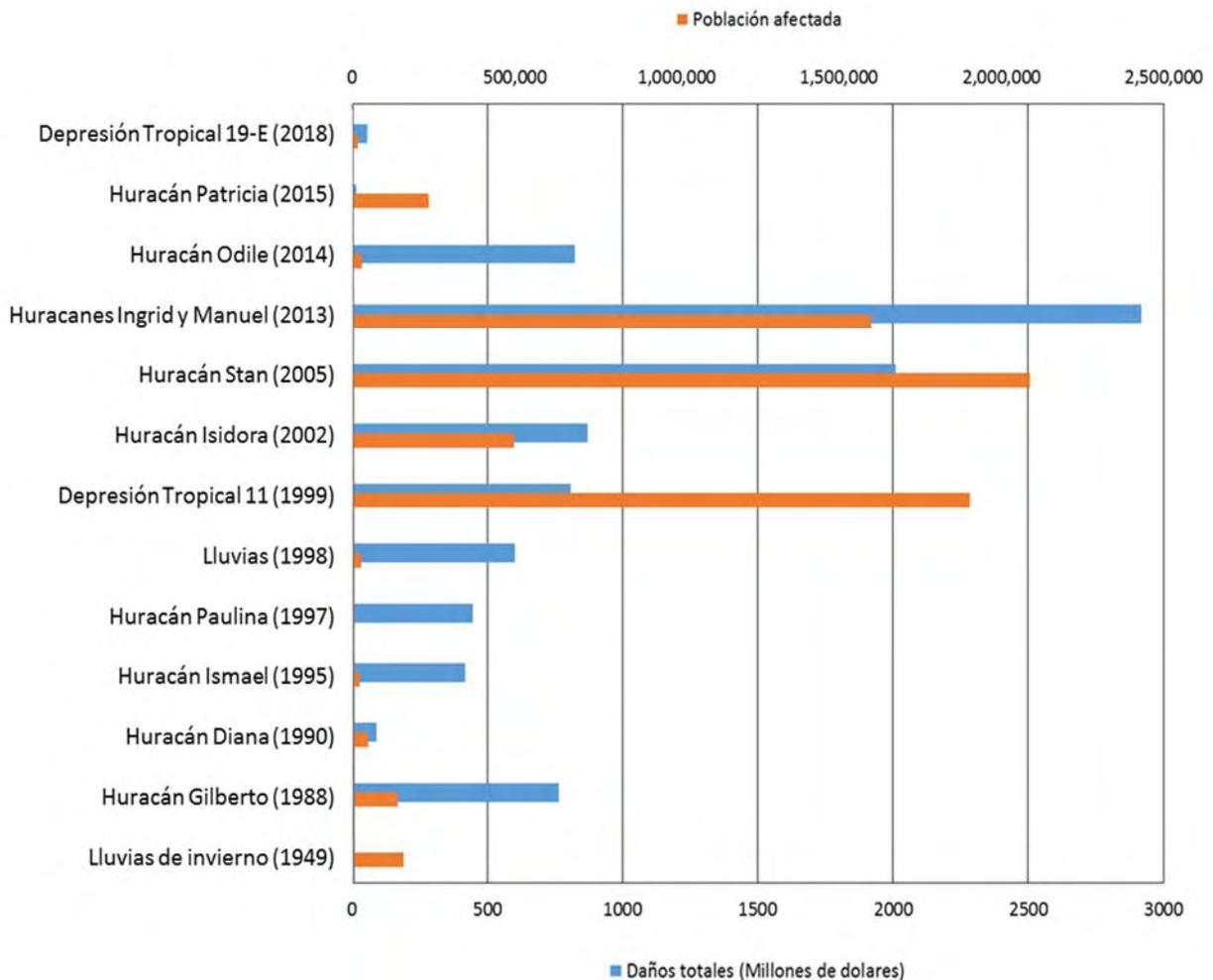
Imagen 2.1 – Inundación causada por el huracán Ingrid y Manuel, municipio de Acapulco de Juarez estado de Guerrero. (El Universal, 2013).



Imagen 2.2 – Inundación causada por el huracán Karl, municipio de Medellín de Bravo, estado de Veracruz. (Notimex, 2010).

Entre los factores a considerar en las inundaciones están: la distribución espacial de la lluvia, la topografía, las características físicas de los arroyos y ríos, la pendiente del terreno, la pérdida de cobertura vegetal, el uso de suelo, la basura dejada en las calles, la invasión de zonas inundables, la expansión de la mancha urbana sin planificación (Rodríguez-Varela et al., 2007).

En los últimos 75 años, en México se han logrado documentar una serie de eventos que provocaron inundaciones en distintas zonas del país, como se plasma cronológicamente en la Gráfica 2.1.



Gráfica 2.1 – Efectos más importantes de fenómenos hidrometeorológicos en México. Elaborada con información del CENAPRED (2004), Asociación Mexicana de Instituciones de Seguros (AMIS) y diarios de circulación nacional.

2.3 – DELIMITACIÓN DE ZONAS FEDERALES

Las metodologías, normatividad y leyes, destinadas para la delimitación de las zonas federales de los cauces, tienen connotaciones y criterios de aplicación distintos en todos los países. Se podría suponer que esto atiende a las características de los cauces, condiciones, experiencia y situaciones que guarda cada uno.

Es evidente que la determinación de la zona federal de un río, definida en sus riveras, no es sencilla y requiere de un procedimiento complejo, es por ello que de acuerdo a la normatividad vigente aplicada tanto en otros países del mundo como en México, se han adoptado diversos criterios y normas que permiten la simplificación para su determinación, sin embargo, con ello se ha subestimado en cierta forma la importancia de efectuar un análisis minucioso, cuyos resultados sin duda, tendrían trascendencia significativa en la estimación del peligro, vulnerabilidad y riesgo de inundación.

La morfología y características propias de la zona donde se localizan los escurrimientos naturales es diversa, por lo que su análisis, debería ser efectuado de forma particular y no caer en la generalización de criterios para la determinación de la denominada zona federal, por lo cual es necesario el desarrollo de una metodología, en la que su aplicación involucre dichas características asociadas y particulares, propias de cada uno de los cauces, a fin de que sea susceptible su consideración en el análisis y que los resultados proporcionados sean de una trascendencia representativa y específica, que garanticen la confiabilidad de dicha delimitación y provean de información propia para garantizar la seguridad de los habitantes aledaños a dichas zonas.

2.3.1 – Legislación en México

Los primeros antecedentes legales en materia de administración y uso de aguas nacionales, de los que se tenga registro en México, se remontan a la Constitución de 1857, en cuyo artículo 72, se sentaban las bases para que las instancias legislativas federales reglamentaran la gestión del recurso hídrico, mismas que fueron reforzadas con la adopción de la Ley de Vías Generales de Comunicación, publicada en junio de 1888, en la cual se sometía al control federal los lagos y ríos navegables y flotables, lo mismo que los lagos y corrientes de agua interestatales o internacionales (Aboites, 1998). Posteriormente, a inicios del siglo XX, las aguas nacionales se encontraban regidas de igual manera por la Ley de Clasificación y Régimen de los Bienes Inmuebles Federales,

publicada el 18 de diciembre de 1902. Todos estos esfuerzos llevaron a la reforma de la fracción XXII del artículo 72 de la citada Constitución, que en junio de 1908, reconoció al poder federal una competencia suprema sobre las aguas nacionales (Aragón y González, 1914; Lanz, 1982). Así, posteriormente, por medio del artículo 27 de la Constitución de 1917 se otorga al poder federal la competencia exclusiva sobre las aguas nacionales superficiales (Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos, 1917).

En la actualidad, el marco legal y normativo en el que se fundamenta la gestión de las aguas nacionales, está representado en la Figura 2.1.

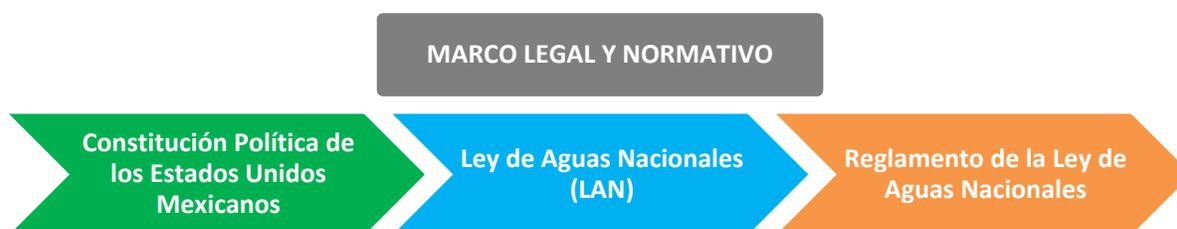


Figura 2.1 – Marco legal y normativo para la gestión de las aguas nacionales.

2.3.1.1 – Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos

En relación a temas de aguas, la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos, los enmarca en el artículo 27, en el cual se establece que:

“La propiedad de las tierras y aguas comprendidas dentro de los límites del territorio nacional, corresponde originariamente a la nación, la cual ha tenido y tiene el derecho de transmitir el dominio de ellas a los particulares, constituyendo la propiedad privada.

Son propiedad de la Nación las aguas de los mares territoriales en la extensión y términos que fije el Derecho Internacional; las aguas marinas interiores; las de las lagunas y esteros que se comuniquen permanente o intermitentemente con el mar; las de los lagos interiores de formación natural que estén ligados directamente a corrientes constantes; las de los ríos y sus afluentes directos o indirectos, desde el punto del cauce en que se inicien las primeras aguas permanentes, intermitentes o torrenciales, hasta su desembocadura en el mar, lagos, lagunas o esteros de propiedad nacional; las de las corrientes constantes o intermitentes y sus afluentes directos o indirectos, cuando el cauce de aquéllas en toda su extensión o en parte de ellas, sirva de límite al territorio nacional o a dos entidades federativas, o cuando pase de una entidad federativa a otra o cruce la línea divisoria de la

República; la de los lagos, lagunas o esteros cuyos vasos, zonas o riberas, estén cruzadas por líneas divisorias de dos o más entidades o entre la República y un país vecino, o cuando el límite de las riberas sirva de lindero entre dos entidades federativas o a la República con un país vecino; las de los manantiales que broten en las playas, zonas marítimas, cauces, vasos o riberas de los lagos, lagunas o esteros de propiedad nacional, y las que se extraigan de las minas; y los cauces, lechos o riberas de los lagos y corrientes interiores en la extensión que fija la ley.

Las aguas del subsuelo pueden ser libremente alumbradas mediante obras artificiales y apropiarse por el dueño del terreno, pero cuando lo exija el interés público o se afecten otros aprovechamientos, el Ejecutivo Federal podrá reglamentar su extracción y utilización y aun establecer zonas vedadas, al igual que para las demás aguas de propiedad nacional. Cualesquiera otras aguas no incluidas en la enumeración anterior, se considerarán como parte integrante de la propiedad de los terrenos por los que corran o en los que se encuentren sus depósitos, pero si se localizaren en dos o más predios, el aprovechamiento de estas aguas se considerará de utilidad pública, y quedará sujeto a las disposiciones que dicten los Estados”.

2.3.1.2 – Ley de Aguas Nacionales (LAN)

De acuerdo a la citada Ley, la delimitación del cauce y zona federal, se define como los trabajos y estudios topográficos, batimétricos, fotogramétricos, hidrológicos e hidráulicos, necesarios para la determinación de los límites del cauce y la zona federal.

Así mismo, define y establece que la ribera o zona federal, serán las fajas de diez metros de anchura contiguas al cauce de las corrientes o al vaso de los depósitos de propiedad nacional, medidas horizontalmente a partir del nivel de aguas máximas ordinarias. La amplitud de la ribera o zona federal será de cinco metros en los cauces con una anchura no mayor de cinco metros. El nivel de aguas máximas ordinarias se calculará a partir de la creciente máxima ordinaria que será determinada por "la Comisión" o por el Organismo de Cuenca que corresponda, conforme a sus respectivas competencias, de acuerdo con lo dispuesto en los reglamentos de esta Ley.

En los ríos, estas fajas se delimitarán a partir de cien metros río arriba, contados desde la desembocadura de éstos en el mar. En los cauces con anchura no mayor de cinco metros, el nivel de aguas máximas ordinarias se calculará a partir de la media de los gastos

máximos anuales producidos durante diez años consecutivos. Estas fajas se delimitarán en los ríos a partir de cien metros río arriba, contados desde la desembocadura de éstos en el mar. En los orígenes de cualquier corriente, se considera como cauce propiamente definido, el escurrimiento que se concentre hacia una depresión topográfica y forme una cárcava o canal, como resultado de la acción del agua fluyendo sobre el terreno. La magnitud de la cárcava o cauce incipiente deberá ser de cuando menos de 2.0 metros de ancho por 0.75 metros de profundidad.

La estimación de la zona federal, está regida por los siguientes artículos, contenidos en dicho instrumento legal:

- Artículo 113. La administración de los siguientes bienes nacionales queda a cargo de “la Comisión”:
 - I. Las playas y zonas federales, en la parte correspondiente a los cauces de corrientes en los términos de la presente Ley.
 - II. Los terrenos ocupados por los vasos de lagos, lagunas, esteros o depósitos naturales cuyas aguas sean de propiedad nacional.
 - III. Los cauces de las corrientes de aguas nacionales.
 - IV. Las riberas o zonas federales contiguas a los cauces de las corrientes y a los vasos o depósitos de propiedad nacional, en los términos previstos por el Artículo 3 de esta Ley.
 - V. Los terrenos de los cauces y los de los vasos de lagos, lagunas o esteros de propiedad nacional, descubiertos por causas naturales o por obras artificiales.
 - VI. Las islas que existen o que se formen en los vasos de lagos, lagunas, esteros, presas y depósitos o en los cauces de corrientes de propiedad nacional, excepto las que se formen cuando una corriente segregue terrenos de propiedad particular, ejidal o comunal.

- VII. Las obras de infraestructura hidráulica financiadas por el gobierno federal, como presas, diques, vasos, canales, drenes, bordos, zanjas, acueductos, distritos o unidades de riego y demás construidas para la explotación, uso, aprovechamiento, control de inundaciones y manejo de las aguas nacionales, con los terrenos que ocupen y con las zonas de protección, en la extensión que en cada caso fije "la Comisión".
- Artículo 114. Cuando por causas naturales ocurra un cambio definitivo en el curso de una corriente propiedad de la Nación, ésta adquirirá por ese solo hecho la propiedad del nuevo cauce y de su zona federal.

Cuando por causas naturales ocurra un cambio definitivo en el nivel de un lago, laguna, estero o corriente de propiedad nacional y el agua invada tierras, éstas, la zona federal y la zona federal marítimo-terrestre correspondiente, pasarán al dominio público de la Federación. Si con el cambio definitivo de dicho nivel se descubren tierras, éstas seguirán siendo parte del dominio público de la Federación.

En caso de que las aguas superficiales tiendan a cambiar de vaso o cauce, los propietarios de los terrenos aledaños tendrán el derecho de construir las obras de defensa necesarias. En caso de cambio consumado, tendrán el derecho de construir obras de rectificación, dentro del plazo de un año contado a partir de la fecha del cambio. Para proceder a la construcción de defensas o de rectificación, bastará determinar el impacto ambiental, y que se dé aviso por escrito a "la Autoridad del Agua", la cual podrá suspender u ordenar la corrección de dichas obras en el caso de que se causen o puedan causarse daños a terceros o a ecosistemas vitales.

2.3.1.3 – Reglamento de la Ley de Aguas Nacionales

Por su parte en el reglamento de la Ley de Aguas Nacionales, se define a la delimitación de cauce y zona federal como: los trabajos topográficos para señalar físicamente con estacas o mojoneas en el terreno, la anchura del cauce o vaso y su zona federal. En el caso de barrancas profundas, "La Comisión" determinará la ribera o zona federal de corrientes o depósitos de agua, únicamente cuando la inclinación de dicha faja sea de treinta grados o menor, en forma continua;

Así mismo, en dicho reglamento, se plasma para la citada delimitación lo siguiente:

- Artículo 4°. Para efectos de las fracciones VIII del artículo 3°, y IV, del artículo 113 de la “Ley”, por lo que se refiere a la delimitación, demarcación y administración de las riberas o zonas federales contiguas a los cauces de las corrientes y a los vasos o depósitos de propiedad nacional, se estará a lo siguiente:

- I. El nivel de aguas máximas ordinarias a que se refiere la fracción VIII, del artículo 3°, de la “Ley”, se entiende como el que resulta de la corriente ocasionada por la creciente máxima ordinaria dentro de un cauce sin que en éste se produzca desbordamiento. La creciente máxima ordinaria estará asociada a un período de retorno de cinco años.

Para el caso de corrientes que presenten flujo nulo durante uno o más años de su período de registro, “La Comisión” determinará el período de retorno equivalente que tome en cuenta esta situación. Para el caso de estas corrientes y de las cuencas sin registro hidrométrico, la creciente máxima ordinaria se obtendrá a partir de tormentas máximas ordinarias, a las que se asociará el período de retorno correspondiente y el cálculo del escurrimiento respectivo se hará con las normas oficiales mexicanas que expida “La Comisión”.

Para determinar la creciente máxima ordinaria de un cauce ubicado aguas abajo de una presa, se deberá considerar la ocurrencia simultánea de la creciente máxima ordinaria que genera la cuenca propia de dicho cauce y los caudales máximos posibles que descarga la presa, después de regular la creciente máxima ordinaria que genera su cuenca alimentadora, para el mismo período de retorno de cinco años.

En los ríos en llanuras de inundación, para efectos de lo dispuesto en este artículo, se tomará el punto más alto de la margen o ribera.

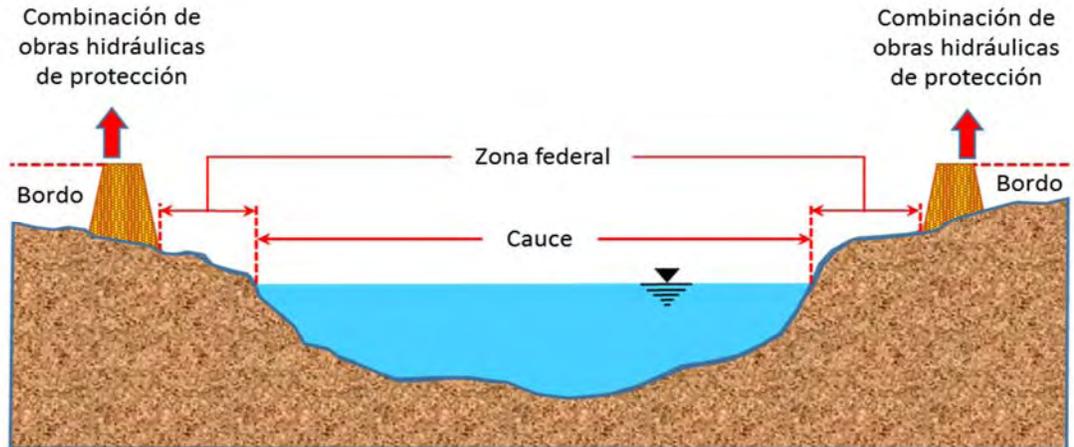


Figura 2.2 – Esquema de la zona federal en un cauce.

2.3.2 – Legislación en España

En España, se define el cauce como el lecho más las riberas, y corresponde al nivel que se alcanza con la máxima crecida ordinaria; este ancho es de Dominio Público Hidráulico. A partir del cauce en toda su extensión longitudinal, las márgenes están sujetas a una zona de servidumbre de cinco metros de anchura para uso público, y a una zona de policía de cien metros de anchura, en la que se condiciona el uso del suelo y las actividades que se desarrollen (Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente, 1992).

2.3.3 – Legislación en Estados Unidos

En los Estados Unidos de América, cada estado maneja sus propios criterios para la delimitación de riberas y la determinación de sus anchos, pero la mayoría tiene una tendencia a determinar los anchos de acuerdo con alguna de las siguientes clasificaciones de los cauces (González & Peñalosa, 2015):

1. Por la permanencia del flujo, que puede ser perenne, intermitente o efímero.
2. La geomorfología fluvial, como orden de la corriente, si son cauces principales o tributarios, la pendiente o el ancho del cauce.
3. Uso del agua.

2.4 – INUNDACIONES

Se efectuará una descripción conceptual de los términos propios asociados al efecto de las inundaciones fluviales; partiendo de las causas que les dan origen, su clasificación, hasta los criterios para la estimación de sus potenciales efectos, mediante la evaluación del peligro, vulnerabilidad y riesgo, asociados a este tipo de inundaciones.

2.4.1 – Definición general

De acuerdo con el glosario internacional de hidrología (OMM/UNESCO, 1974), la definición oficial de inundación es: “aumento del agua por arriba del nivel normal del cauce” (Imagen 2.2). En este caso, “nivel normal” se debe entender como aquella elevación de la superficie del agua que no causa daños, es decir, inundación es una elevación mayor a la habitual en el cauce, por lo que puede generar pérdidas (CENAPRED, 2004).



Imagen 2.2 – Inundación ocurrida en Villahermosa Tabasco, en el año de 2007
(Archivo: CONAGUA).

Cada evento de inundación puede contar con características tales como la profundidad del agua, la velocidad del flujo, los flujos de materia y la dinámica temporal y espacial, dentro de las cuales se pueden ubicar las que se presentan en las zonas urbanas.

Las inundaciones en la mayoría de los casos, son un fenómeno natural que, en las llanuras inundables naturales no puede clasificarse como una amenaza. Sin embargo, las inundaciones en las cuencas intensamente utilizadas son a menudo influenciadas por el hombre a través del uso de la tierra, la formación fluvial, etc.

Por otra parte, avenida se define como: “Una elevación rápida y habitualmente breve del nivel de las aguas en un río o arroyo hasta un máximo desde el cual dicho nivel desciende a menor velocidad” (OMM/UNESCO, 1974). Estos incrementos y disminuciones, representan el comportamiento del escurrimiento en un río (CENAPRED, 2004).

2.4.2 – Clasificación de las inundaciones

Existen básicamente dos tipos de clasificación para las inundaciones, de acuerdo su origen y en función de la respuesta hidrológica de la cuenca en la que se originan. La primera de ellas, se fundamenta en el origen de la fuente hídrica que la ocasiona, como se muestra en la Figura 2.3.

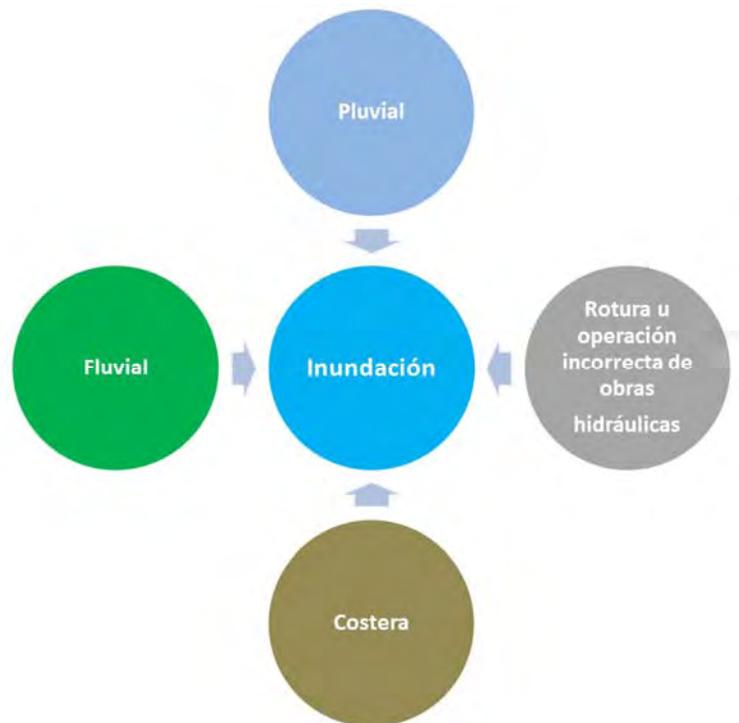


Figura 2.3 – Tipos de inundación, de acuerdo a su origen. Elaboración con información del CENAPRED (2004).

2.4.2.1 – Inundación fluvial

Una inundación fluvial, se genera cuando el agua que se desborda de los ríos queda sobre la superficie de terreno cercano a ellos. A diferencia de las inundaciones pluviales, en este tipo de inundaciones el agua que se desborda sobre los terrenos adyacentes corresponde a precipitaciones registradas en cualquier parte de la cuenca tributaria y no necesariamente a lluvia sobre la zona afectada. Es importante observar que el volumen que escurre sobre el terreno a través de los cauces, se va incrementando con el área de aportación de la cuenca, por lo que las inundaciones fluviales más importantes se darán en los ríos con más desarrollo (longitud) o que lleguen hasta las planicies costeras (CENAPRED, 2004).

Las inundaciones de tipo fluvial, de acuerdo al CENAPRED, tienen su origen a partir de dos factores, uno natural como lo es la precipitación y el otro debido a la falla de infraestructura hidráulica, mismos que se describen a continuación:

- **Origen debido a la precipitación**

El principal factor, que propicia la inundación fluvial, es la precipitación, la cual se origina, cuando el terreno se ha saturado y el agua de lluvia excedente comienza a acumularse, pudiendo permanecer horas o días.

Su principal característica es que el agua acumulada es agua precipitada sobre esa zona y no la que viene de alguna otra parte (por ejemplo de la parte alta de la cuenca).

La República Mexicana es afectada por precipitaciones originadas por diferentes fenómenos hidrometeorológicos. En verano (de junio a octubre) las lluvias más intensas están asociadas con la acción de ciclones tropicales que afectan gran parte del territorio nacional. En cambio, durante el invierno los frentes fríos son la principal fuente de lluvia.

A estos fenómenos se suman el efecto ejercido por las cadenas montañosas (lluvia orográfica), además del convectivo, que ocasiona tormentas de corta duración y poca extensión, pero muy intensas (lluvias convectivas).

Igual o más importante aún es considerar la acción conjunta de estos mecanismos productores de lluvia. Estas condiciones climatológicas dan lugar para que los ríos presenten regímenes hidráulicos muy irregulares, alternando estiajes duraderos con periodos de avenidas muy grandes.

- **Origen por falla de la infraestructura hidráulica**

Existe una causa que puede generar una inundación de tipo fluvial, de consecuencias altamente graves y potencial catastrófico, si la capacidad de las obras destinadas para protección es insuficiente; la inundación provocada por la falla de dicha infraestructura será mayor que si no existieran obras. Afortunadamente las inundaciones por insuficiencia de obras de almacenamiento y control han sido poco frecuentes. Sin embargo, con el transcurrir del tiempo en operación, dichas obras pueden presentar fallas en su funcionamiento hidráulico debido a diferentes factores:

1. Diseño escaso: algunas causas de un diseño escaso son la falta de información hidrológica en la cuenca o de la climatología misma que afecta la región. Otra causa es el empleo de criterios o metodologías inapropiadas u obsoletas para el diseño de las obras.
2. Deficiencia en la operación: este caso se refiere, básicamente, a las presas con compuertas. Las posibles alternativas son:
 - ♦ Las compuertas de la obra de control, se abren más de lo necesario y las descargas a través del vertedor producen una cantidad de agua mayor a la que puede conducir el cauce aguas abajo, provocando el desbordamiento del río y, en consecuencia, una inundación.
 - ♦ Cuando dichas compuertas, no se abren lo suficiente para dejar pasar la crecida, tratando de almacenar el mayor volumen de agua, su capacidad resultará insuficiente, provocando que el agua suba más allá de su nivel de aguas máximas extraordinarias y poniendo en peligro potencial, la estabilidad de la cortina.

3. Falta de mantenimiento o término de la vida útil de la obra: esta situación, es susceptible de presentarse en muchas estructuras pequeñas, principalmente bordos de protección y algunas presas, que fueron construidas a finales del siglo XIX.

Tanto el azolvamiento existente, como las filtraciones a través del cuerpo de las cortinas, son indicios de una falta de mantenimiento, posiblemente porque las estructuras llegaron al término de su vida útil. Sin embargo, un punto de suma importancia es el referente a las modificaciones, las cuales en la mayoría de los casos han sido efectuadas por los beneficiarios de dichas obras hidráulicas, alterando con ello, su funcionamiento hidráulico, respecto al diseño original.

2.4.2.2 – Inundaciones por respuesta hidrológica de la cuenca.

Con relación a la respuesta hidrológica de una cuenca básicamente se han definido dos grupos: inundaciones lentas e inundaciones rápidas. Lo anterior significa que en cuencas cuya respuesta hidrológica es lenta se generan avenidas en un tiempo relativamente largo (del orden de varias horas o días); en ellas ocurren principalmente daños materiales. Mientras que cuando la inundación se forma en poco tiempo (desde unos cuantos minutos, hasta un par de horas) se llama inundación súbita, causando, principalmente, la pérdida de vidas humanas en zonas pobladas (CENAPRED, 2004), dichos tipos de inundaciones se describen a continuación:

- Inundaciones lentas: Al ocurrir una precipitación capaz de saturar el suelo, el volumen remanente escurre sobre el terreno, por los arroyos y ríos. Conforme el escurrimiento avanza hacia la salida de la cuenca, se incrementa proporcionalmente con el área drenada, si el volumen que fluye por el cauce excede la capacidad de éste, se presentan desbordamientos sobre sus márgenes y el agua desalojada puede permanecer horas o días sobre el terreno inundado.

Este efecto se presenta comúnmente en zonas donde la pendiente del cauce es pequeña y, por ende, la capacidad de los ríos disminuye considerablemente provocando desbordamientos que generan inundaciones en las partes aledañas.

- Inundaciones súbitas: Las inundaciones súbitas son el resultado de lluvias repentinas e intensas que ocurren en áreas específicas. Pueden ocasionar que pequeñas corrientes se transformen, en cuestión de minutos, en violentos torrentes capaces de causar grandes daños.

Las zonas urbanas son usualmente sitios donde se presenta este tipo de avenidas, como consecuencia de la “cubierta impermeable” formada artificialmente por los edificios y calles, así como por la deforestación. Debido a ello, el agua no puede infiltrarse y prácticamente todo el volumen precipitado se convierte en escurrimiento.

2.4.3 – Clasificación de zonas inundables

De acuerdo a la magnitud del evento de precipitación o al tránsito de la avenida asociada al escurrimiento derivado de ella, se ha desarrollado un sistema de clasificación de las zonas de inundación, en función de la probabilidad de excedencia del fenómeno que le da origen, misma que se presenta en la Tabla 2.1.

Tabla 2.1 – Clasificación de zonas inundables asociadas a distintos periodos de retorno (Fuentes, 2011).

| Zona de inundación | Fenómeno que la origina | Periodo de Retorno (Tr) (años) |
|--------------------|-------------------------|-----------------------------------|
| Habitual | lluvia o avenidas | 2 |
| Frecuente | | 5 |
| Ocasional | | 10 |
| Esporádica | | 50 |
| Excepcional | | 100 |
| Extraordinaria | | 500 |
| Extrema máxima | | 1,000 |

2.5 – PELIGRO, VULNERABILIDAD Y RIESGO

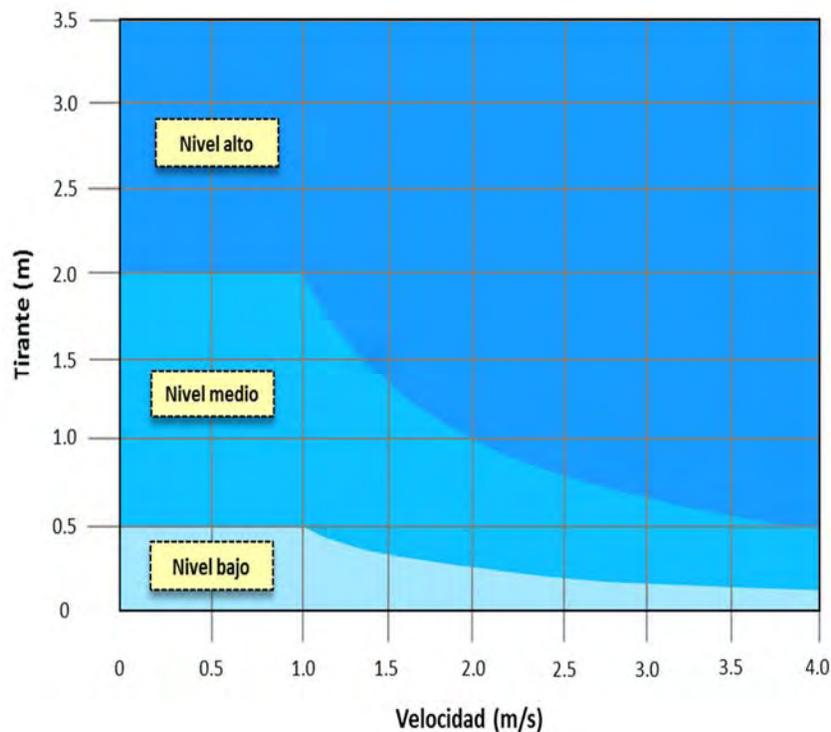
Como parte de la necesidad de conocer los posibles impactos y/o consecuencias que una inundación fluvial ocasionaría, en los últimas dos décadas, han sido comúnmente empleados los términos de peligro, vulnerabilidad y riesgo, a través de los cuales se han desarrollado diversos criterios y metodologías encaminadas al desarrollo de esquemas de prevención y protocolos de acción, encaminados a la mitigación de los efectos ante la incidencia de dicho fenómeno.

2.5.1 – Peligro

Está representado en términos de la probabilidad de ocurrencia, en un periodo de tiempo dado, de un fenómeno potencialmente dañino para los bienes expuestos antes sus probables efectos. Para caracterizar adecuadamente al fenómeno, es conveniente hacer referencia a su intensidad.

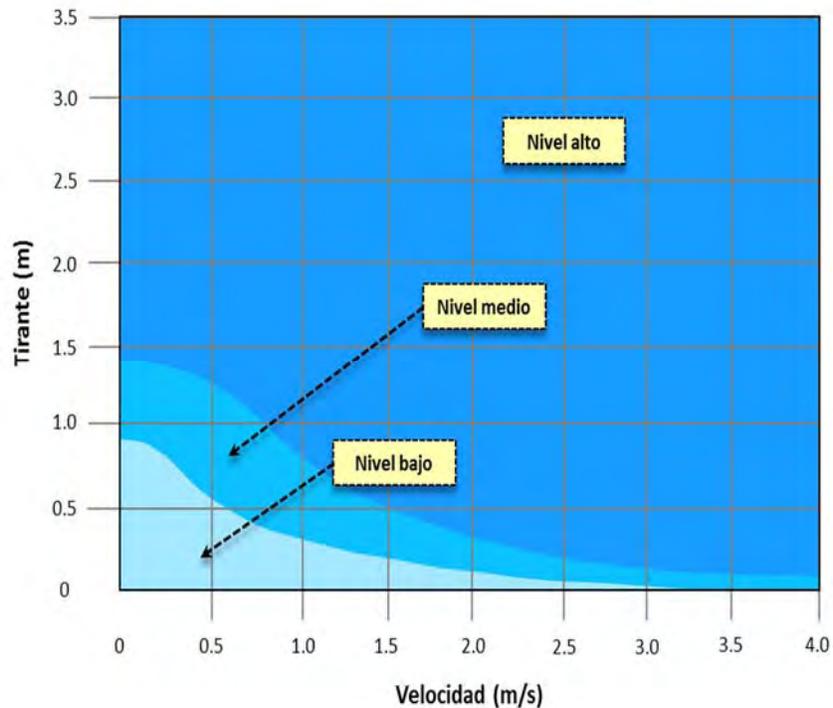
El peligro de inundación se puede definir con base en ciertos criterios, que pueden ser tirante y velocidad del agua alcanzada en las calles, ríos o arroyos; como se ha documentado en el conjunto de criterios descritos en (Alcocer-Yamanaka et al., 2016). Los cuales son comúnmente empleados en la actualidad y que se presentan a continuación:

- Criterio del gobierno de Francia. Oficina Federal de la Economía de las Aguas, (*Office Fédéral de l'Economie des Eaux*; OFEE, por sus siglas en francés), en el cual se evalúan los peligros generados por las inundaciones basado en tres niveles: alto, medio y bajo (Loat & Petrascheck, 1997); cuya distribución se muestra en la Gráfica 2.2.



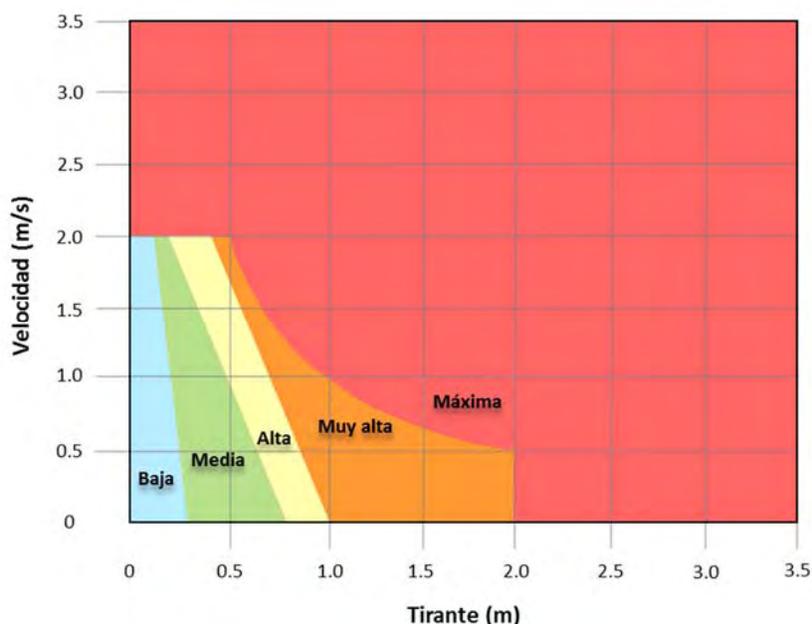
Gráfica 2.2 – Criterio del Gobierno de Francia. Adaptada de Alcocer-Yamanaka et al., (2016).

- Criterio de la Agencia Federal para el Manejo de Emergencias de los Estados Unidos (*Federal Emergency Management Agency, FEMA*), en el que relacionan el tirante máximo h (m) con la velocidad máxima del agua v (m/s). Con base en estas relaciones establece tres rangos de peligro: zona de nivel bajo, amenaza moderada y alto nivel de amenaza, cuya caracterización se presenta en la Gráfica 2.3.



Gráfica 2.3 – Niveles de peligro que relacionan tirante del agua (m) y velocidad (m/s). Adaptada de FEMA, (2009).

- Criterio del gobierno de Gales del Sur (*New South Wales Government*). El lugar de aplicación de este criterio fue la ciudad de Dórrigo, Australia. Es uno de los criterios de mayor aplicación para la estimación de la peligrosidad ante inundaciones fluviales, se caracteriza por considerar la profundidad de la inundación y la velocidad de desplazamiento del agua en un determinado punto de interés, y a partir de dicha relación, se estima la peligrosidad asociada a las regiones clasificadas como: baja, media, alta, muy alta y máxima, cuya distribución de las distintas regiones que define a la peligrosidad en este criterio está representada en la Gráfica 2.4.



Gráfica 2.4 – Niveles de peligro aplicados en la ciudad de Dórrigo, Australia (NSW, 2005).

Así mismo, en la literatura existe una gran cantidad de criterio asociado a la determinación de la peligrosidad ante la incidencia de inundaciones, los cuales se relacionan en las Tablas 2.2 y 2.3.

Tabla 2.2 – Criterio de riesgo de tirante máximo (Gómez et al., 2011).

| Fuente | Referencia | $Y_{\text{máx}}$ (m) | Justificación del criterio | Ámbito de estudio |
|--|--------------------------|----------------------|--|-------------------|
| Manual de Drenaje de la Ciudad de Denver (EEUU) | Wright-Mc Laughlin, 1969 | 0.45 | Altura máxima próxima al límite a partir del cual un vehículo empieza a perder adherencia con el pavimento y flotar en el agua | Urbano |
| Monografía Colegio de Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos (España) | Témez, 1992 | 1 | Altura máxima para una situación de peligro para individuos en cauces naturales y llanuras de inundación | Rural |
| Manual de Drenaje del Contado de Clark (EEUU) | CCRFCD, 1999 | 0.3 | Altura máxima para garantizar que la escorrentía no sobrepase el bordillo | Urbano |
| Criterio de Mendoza (Argentina) | Nanía, 1999 | 0.3 | Altura máxima para evitar el ingreso de agua pluvial en viviendas y comercios | Urbano |
| Consejo para la Agricultura y la Gestión de los Recursos (Australia y Nueva Zelanda) | ARMC, 2000 | 1.20 – 1.50 | Este criterio no se refiere sólo a la estabilidad de los individuos sino también a los daños generales que esta altura de inundación puede provocar. | Urbano |
| Riesgos hidro-meteorológico (Suiza) | Belleudy, 2004 | 0.00 -1.00 | Este criterio propone varios calados máximo en función del uso del suelo y se refiere a inundaciones provocadas por desbordamiento de ríos | Urbano / Rural |
| Picba07: Plan Integral de Alcantarillado de Barcelona 2007 | CLABSA, 2007 | 0.06 | Para una lluvia con periodo de retorno de 10 años, tener los dos carriles laterales inundados dejando el resto de la calzada despejado | Urbano |

Tabla 2.3 – Criterio de riesgo de velocidad máxima (Gómez, Macchione, & Russo, 2011).

| Fuente | Referencia | V _{máx} (m/s) | Justificación del criterio | Ámbito de estudio |
|--|----------------|---------------------------|---|-------------------|
| Monografía Colegio de Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos (España) | Témez, 1992 | 1.0 | Velocidad límite para que un individuo pueda vencer a nado la resistencia del flujo | Rural |
| Consejo para la Agricultura y la Gestión de los Recursos (Australia y Nueva Zelanda) | ARMC, 2000 | 1.5 | Velocidad límite, para calados pequeños, que supone la pérdida de capacidad por parte de un individuo de caminar por el agua | Urbano |
| Riesgo hidro-meteorológico (Suiza) | Belleudy, 2004 | 0.25 -1.00 | Este criterio propone varias velocidades máximas en función del uso del suelo y se refiere a inundaciones provocadas por desbordamiento de ríos | Urbano / Rural |

2.5.2 – Vulnerabilidad

La vulnerabilidad, se define como la susceptibilidad de que cierto elemento de riesgo sea dañado cuando se presenta una amenaza de determinada intensidad (Fuentes, 2011). Ante la cual, las características y circunstancias de una comunidad, sistema o bien se hacen susceptibles a los efectos dañinos de una amenaza.

Para lograr una interpretación más acertada del concepto de vulnerabilidad es común plasmarlo en términos del porcentaje de afectación, al cual se le conoce como índice de vulnerabilidad (I_v) y se define como la proporción en que puede dañarse cierto elemento de riesgo cuando ocurre una amenaza de determinada magnitud en un sitio (Fuentes, 2011). Para la determinación del índice de vulnerabilidad asociada a algún tipo de bien, generalmente se recurre a la construcción de curvas de vulnerabilidad, donde su valor se define en un rango de 0 a 1.

2.5.2.1 – Tipos de vulnerabilidad

Existen diversos tipos de vulnerabilidad asociadas, de forma inherente a los efectos de fenómenos hidrometeorológicos extraordinarios, dentro de los cuales de acuerdo a Valdés-Martínez (2014), se identifican los siguientes:

- Física: Corresponde a la evaluación de los elementos estructurales y no estructurales, que expuestos al peligro pueden originar daños en los bienes y servicios de una comunidad.

- Económica: Se evalúan los elementos económicos expuestos al peligro (zonas industriales en áreas de riesgo, la cantidad de áreas cultivadas y animales en zonas de riesgo, el nivel de ejecución del presupuesto de reducción de vulnerabilidades.
 - Social: Valora el grado en que los factores sociales puedan incrementar la vulnerabilidad, teniendo en cuenta el papel del hombre en la construcción social del riesgo, su percepción, su nivel de preparación para enfrentar los desastres, el nivel de exposición, entre otros.
 - Ecológica: Se debe considerar la exposición en zonas de peligro potencial de ecosistemas frágiles o zonas ecológicamente sensibles y áreas protegidas.
- Dentro de la vulnerabilidad física se han diferenciado tres tipos:
- ♦ Estructural: Es la capacidad resistiva de las edificaciones a las fuerzas destructivas de los diferentes peligros (tipología constructiva, el estado técnico y altura de las mismas).
 - ♦ No estructural: Afectaciones que pueden sufrir las líneas vitales del territorio (carreteras, sistemas de gasificación, comunicaciones, sistema energético, redes eléctricas, redes de alcantarillado).
 - ♦ Funcional: Estado de los factores preparativos de respuesta (disponibilidad de generadores eléctricos de emergencia, preparación del sistema de salud, capacidad de albergues para evacuación, acceso a zonas aisladas, la reserva de suministros básicos como agua, alimentos, combustibles, medicamentos) y otros.

2.5.2.2 – Curvas de vulnerabilidad

Para la determinación de las curvas de vulnerabilidad, se requiere conocer la función de vulnerabilidad asociada a alguno de los tipos de vulnerabilidad citados, para ello es conveniente precisar que dicha función o conjunto de ellas, son producto de las relaciones matemáticas que representan la susceptibilidad al daño específico que se puede generar, cuando se somete a una condición probabilística de acción.

Por ello, las funciones de vulnerabilidad pueden ser calculadas o definidas a través de datos observados (Caicedo et al., 1994). Las observadas se basan en información existente de registros de daños, a diferencia de las calculadas, que dada la falta de esta información, simulan las características de las edificaciones para evaluar el daño (SEMARNAT-CONAGUA, 2014).

Para el caso particular de las curvas de vulnerabilidad asociadas a inundaciones, es frecuente encontrar en la literatura, las asociadas a la estimación de ésta en viviendas, sin embargo, por el contrario, para la estimación de vulnerabilidades como lo son en vías de comunicación, en infraestructura público-urbana y en zonas de producción agrícola, por citar algunas; no existe tal diversidad de información disponible al respecto, esto principalmente a que la gran mayoría de análisis de riesgos desarrollados en la actualidad, se enfocan en la determinación de la vulnerabilidad que impacta directamente en la presentación y salvaguarda, condición prioritaria de la integridad de los seres humanos.

No obstante, como parte del desarrollo de la presente investigación, se ha recopilado un conjunto de curvas de vulnerabilidad física, que son susceptibles de ser aplicables para la estimación de los daños potenciales que pueden ser resultado de la incidencia de inundaciones fluviales en el territorio nacional, las cuales proporcionan los índices de vulnerabilidad, al correlacionar el parámetro de profundidad del flujo, no siendo este limitativo, ya que se pueden considerar parámetros hidrodinámicos (velocidades, esfuerzos, etc.) y relacionarlos con comportamientos estructurales y/o geotécnicos, para la determinación de la vulnerabilidad en casos particulares que requieran de un análisis detallado. Dicho conjunto de curvas, se muestra a continuación:

- **Viviendas**

Para estimar las curvas de vulnerabilidad en viviendas, el CENAPRED, en el año 2006, publicó la Guía Básica para la Elaboración de Atlas Estatales y Municipales de Peligros y Riesgos, en la cual, se ha incluido una clasificación en cinco tipos, cuya diferenciación a grandes rasgos está definida por los materiales de construcción y por el menaje con el que cuentan, como se muestra a manera de ejemplo en la Figura 2.4. Las curvas de vulnerabilidad asociada a cada uno de los distintos tipos de vivienda se presentan en las Gráficas 2.5 a la 2.9.

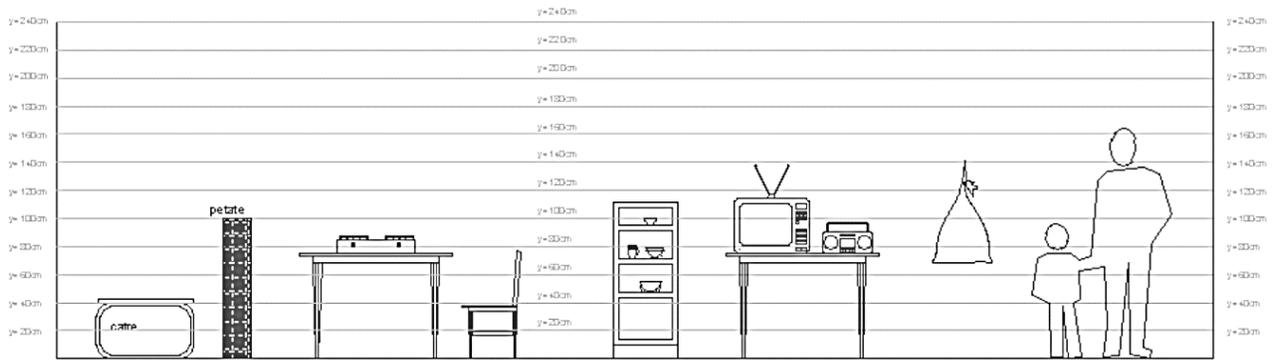
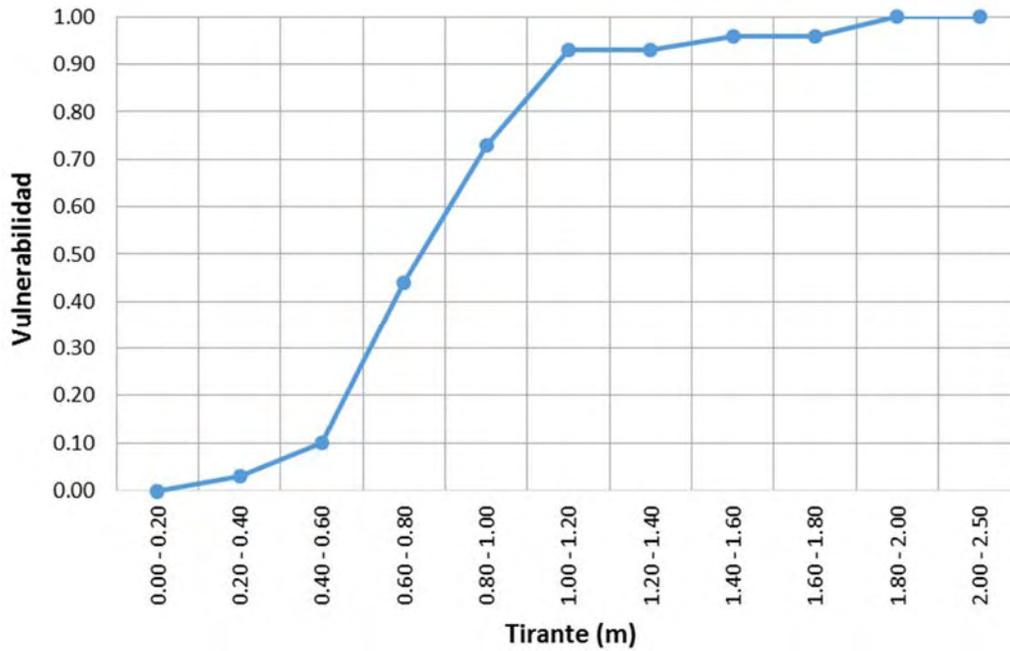
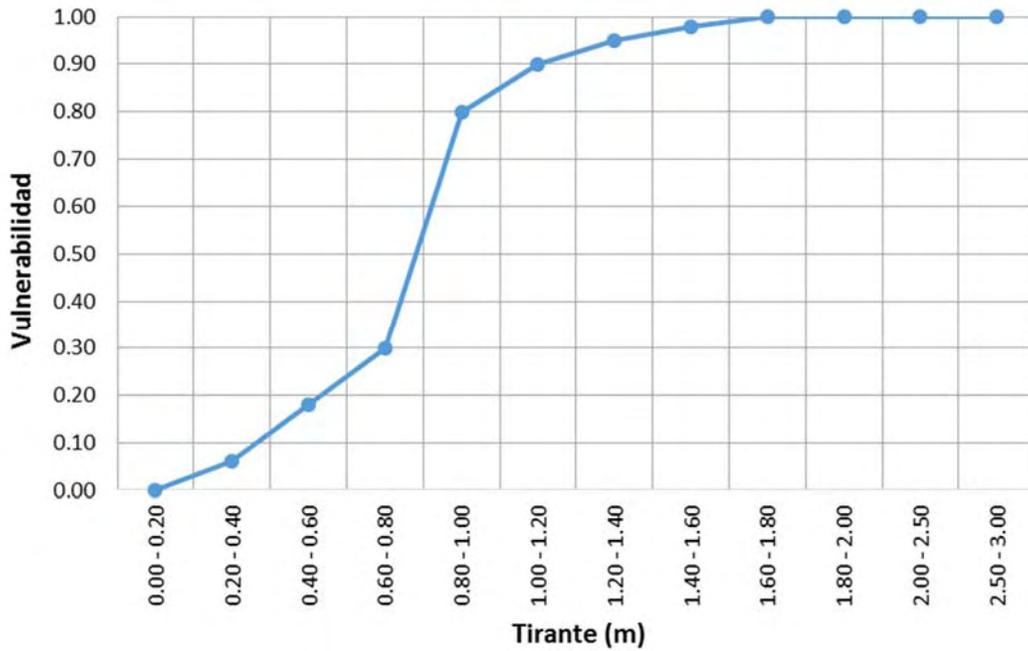


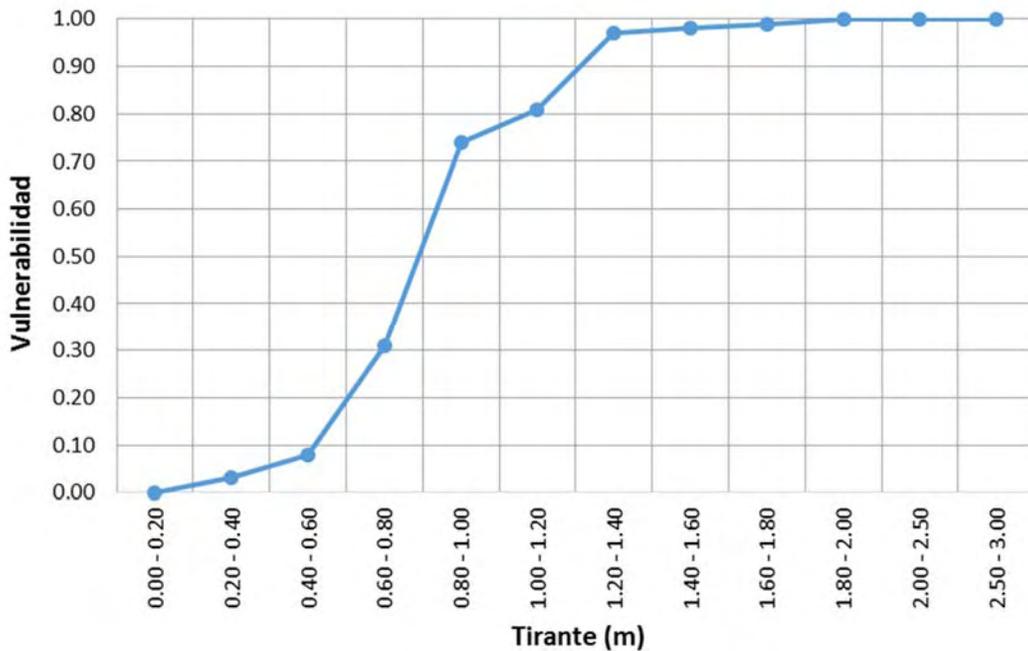
Figura 2.4 – Menaje para la vivienda tipo I (una sola planta) (CENAPRED, 2006).



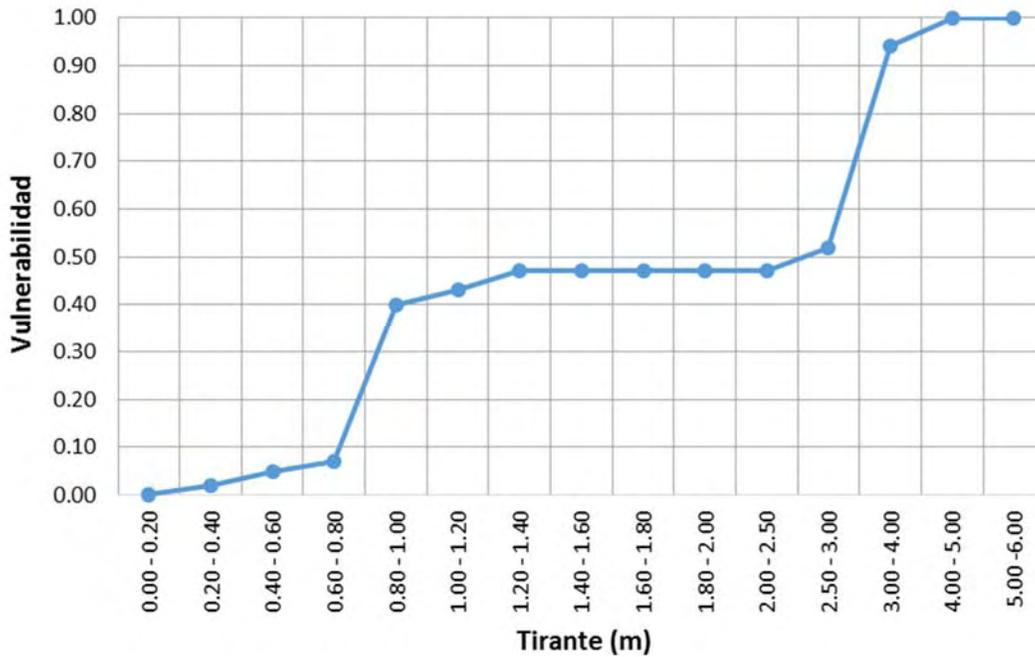
Gráfica 2.5 – Curva de vulnerabilidad para vivienda tipo I, (CENAPRED, 2006).



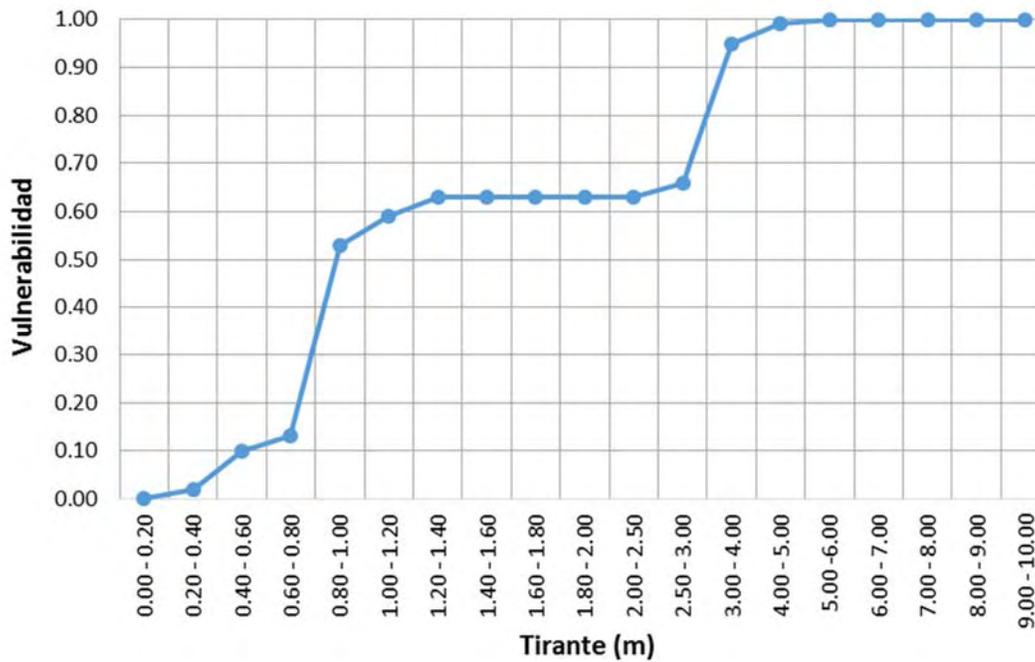
Gráfica 2.6 – Curva de vulnerabilidad para vivienda tipo II, (CENAPRED, 2006).



Gráfica 2.7 – Curva de vulnerabilidad para vivienda tipo III, (CENAPRED, 2006).



Gráfica 2.8 – Curva de vulnerabilidad para vivienda tipo IV, (CENAPRED, 2006).



Gráfica 2.9 – Curva de vulnerabilidad para vivienda tipo V, (CENAPRED, 2006).

- **Escuelas**

En el caso de los inmuebles destinados para la impartición de educación de los niveles básicos, en el contexto nacional, no se dispone de curvas de vulnerabilidad publicadas por la Secretaria de Educación Pública, ni por alguna otra instancia de investigación, por lo que como aportación en el desarrollo de la presente investigación, se ha desarrollado el esquema mostrado en la Figura 2.5 y su respectiva curva de vulnerabilidad para el arreglo del menaje estándar con el cual está equipada una escuela urbana mostrado en la Gráfica 2.10.

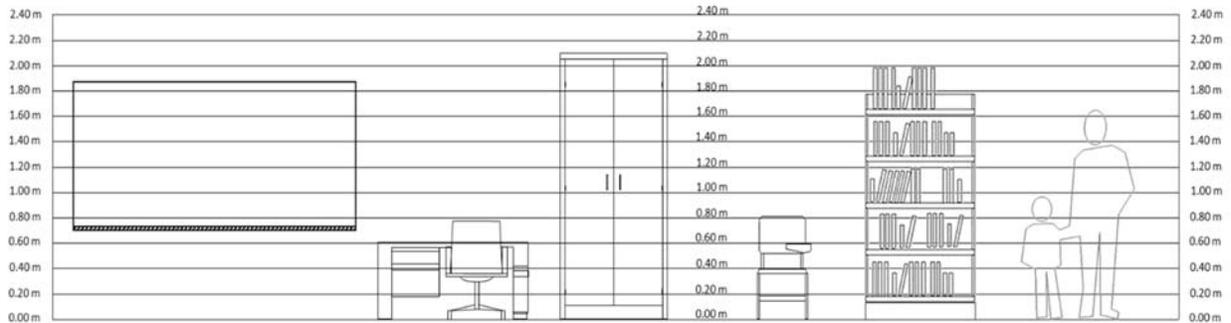
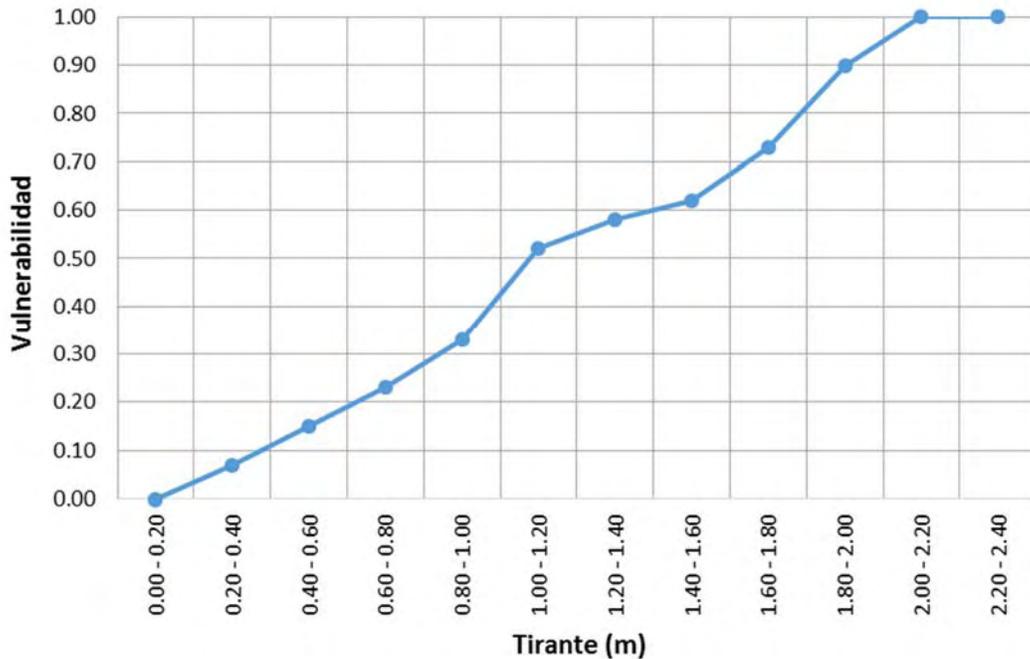


Figura 2.5 – Menaje en escuelas localizadas en zona urbana.



Gráfica 2.10 – Curva de vulnerabilidad para escuela en zona urbana.

- **Áreas Agrícolas**

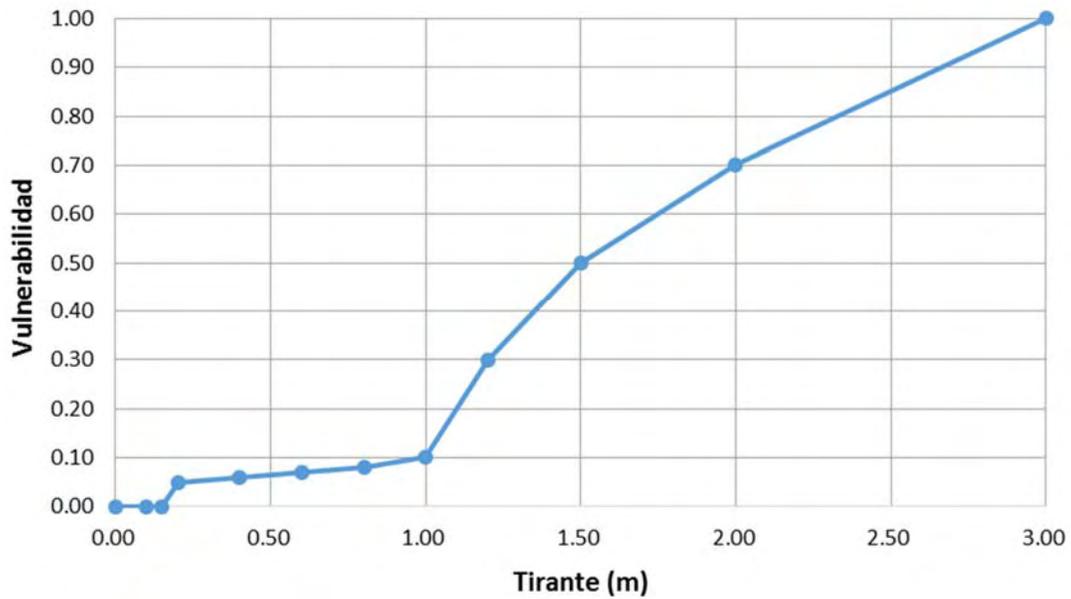
Las inundaciones tienen efectos negativos sobre la mayoría de plantas terrestres debido a que reduce su crecimiento e induce su envejecimiento prematuro. La deficiencia de oxígeno, efecto principal de la inundación, cambia el metabolismo de la planta induciendo la vía anaeróbica o fermentativa como mecanismo alternativo, aunque poco eficiente para la producción de energía. Igualmente, el déficit de oxígeno aumenta la producción de especies reactivas de oxígeno (ROS), tanto en la mitocondria como en el cloroplasto (IMTA et al, 2014).

En América Latina alrededor de 11.3 % de las tierras cultivables presentan drenajes pobres principalmente porque la fisiografía promueve la inundación, niveles freáticos altos o aguas superficiales estancadas (Wood et al., 2000).

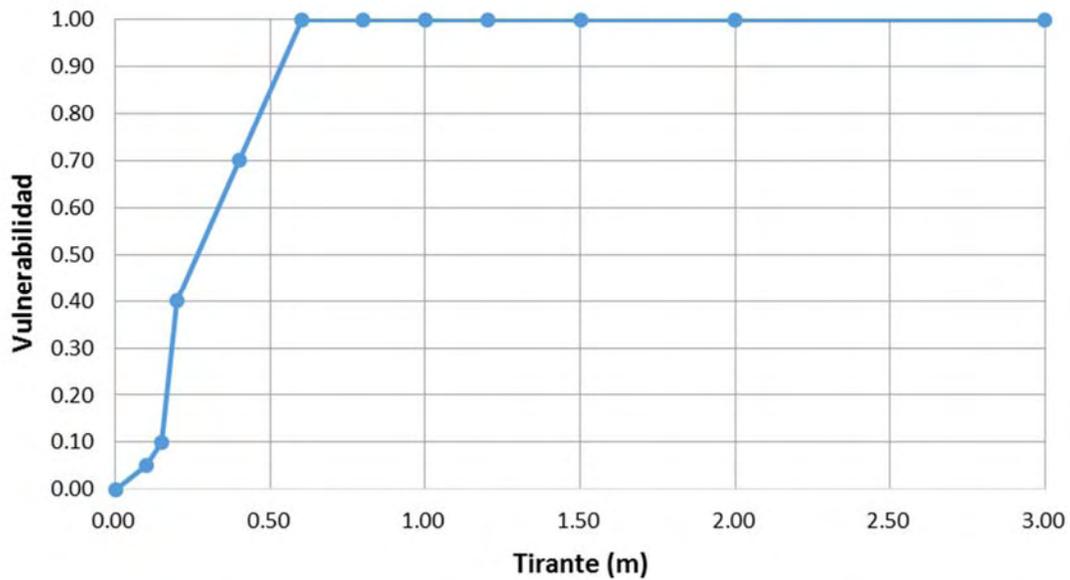
El primer síntoma de daños por anegación es un cierre estomático. Con el cierre de las estomas, la absorción pasiva de agua por la planta disminuye. El descenso de la transpiración conlleva un marchitamiento de las hojas y una senescencia precoz que acaba en su caída (Kozlowski, 1984).

El daño por anegamiento depende de factores como etapa del ciclo vegetativo al momento de la inundación, la duración de ésta, y las temperaturas del aire y el suelo (Dupont Pioneer, 2012). La principal causa de afectación a una planta por inundación es, entonces, la concentración de etileno en sus tejidos (Kawase, 1972), y los síntomas básicamente son: pérdida de nutrientes minerales y metabolitos intermedios por lavado de las raíces, producción de sustancias tóxicas como etanol, entre otros (Pardos, 2004).

A partir de dichas consideraciones el IMTA, por medio del convenio celebrado con la CONAGUA, en el año 2014, llevó a cabo el desarrollo de la investigación para la “Construcción de curvas de costos de daños por inundación en las zonas agrícolas e infraestructura urbana y red carretera del país”, cuyas curvas de vulnerabilidad, son el resultado de la adaptación de las desarrolladas por el Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino, de España en el año 2011 y el análisis de diez años de estadísticas agrícolas publicadas por la CONAGUA, para determinar los cultivos representativos en México (Lafragua, 2013); las cuales se presentan en las Gráficas 2.11 y 2.12, para cultivos arbolados y no arbolados respectivamente.

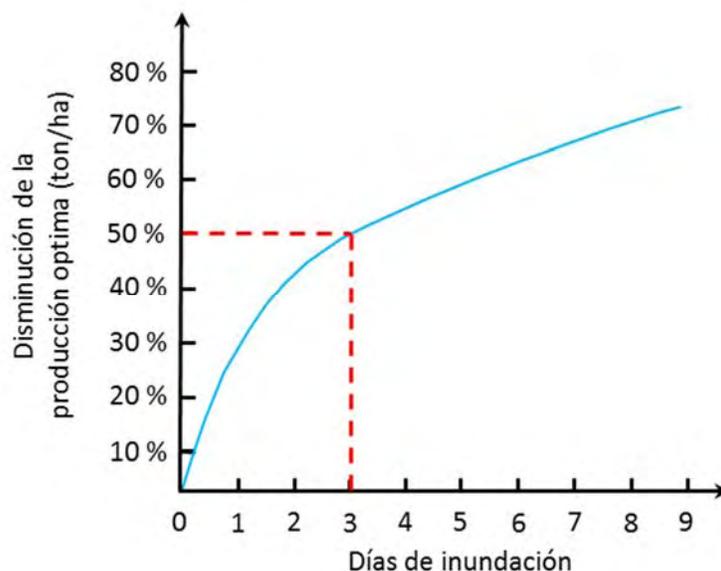


Gráfica 2.11 – Curva de vulnerabilidad elemental agrícola para cultivos arbolados. Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino (2011).



Gráfica 2.12 – Curva de vulnerabilidad elemental agrícola para cultivos no arbolados. Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino (2011).

Por otra parte, con objeto de contar con un mayor grado de análisis en cuanto al efecto que tendría una inundación en el rendimiento e integridad de los cultivos, es adecuado considerar la temporalidad del anegamiento provocado por ésta, ya que está directamente relacionada con el estrés hídrico y la probable asfixia radicular a la que pueden estar expuestos; sin embargo, para efectuar dicho análisis se requiere de información producto de investigaciones propias, efectuadas a cada tipo de cultivo desarrollado en las zonas de estudio de interés, esto debido a las condiciones hidroclimatológicas particulares que prevalezcan en éstas y a la fisiología vegetal de las distintas variedades de cultivos; un ejemplo representativo de una curva de pérdida de producción, se presenta en la Gráfica 2.13.



Gráfica 2.13 – Curva de pérdida de producción agrícola por duración de la inundación (Gracia, 2002).

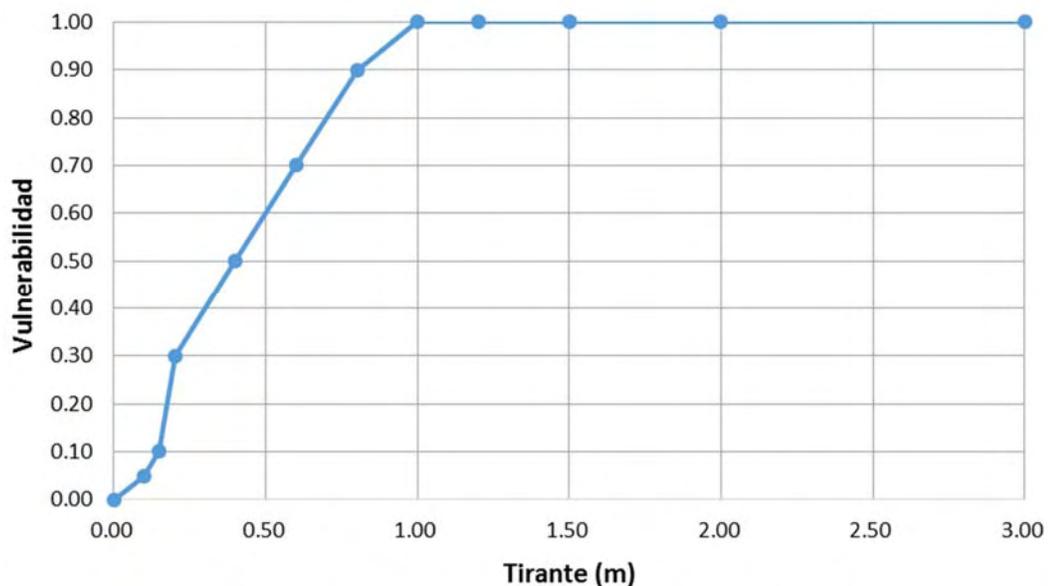
- **Infraestructura público – urbana.**

Como se ha referido con antelación, el Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino, de España, en el año 2011, desarrolló un conjunto de curvas de vulnerabilidad asociadas a los potenciales efectos que las inundaciones pueden ocasionar a las vías de comunicación y a la infraestructura público-urbana y de servicios, las cuales pueden ser adaptables para la determinación de daños en los citados rubros a nivel nacional; dichas curvas se presentan en las Gráficas 2.14 y 2.15.

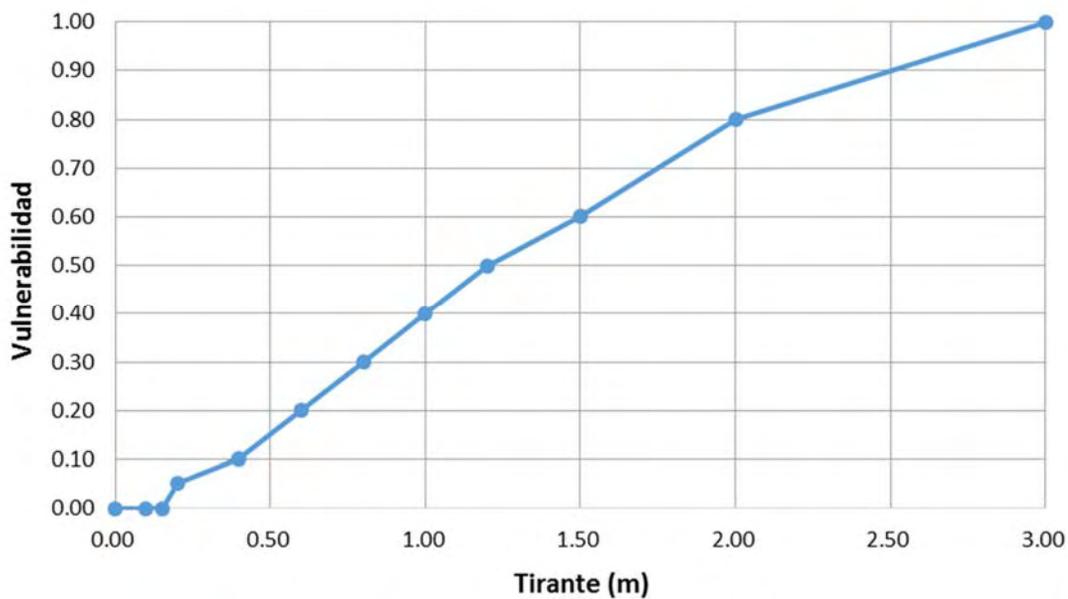
Para la limpieza y estimación de daños en vialidades el Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino, de España, determinó que, para llevar a cabo dichas acciones, se requieren montos de 0.70 €/m² y 15.00 €/m², respectivamente.

Respecto a la estimación del monto de las afectaciones a la infraestructura público urbana, el Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino, de España desglosó su costo unitario en los siguientes rubros, describiendo a grandes rasgos el alcance de cada uno de ellos, como se plasma a continuación:

- Mobiliario urbano: Se consideran los daños en bancos, papeleras, señales, etc. (2.5 €/m²).
- Alumbrado y semáforos: daños sobre las luminarias y semáforos, el cableado y los cuadros eléctricos o de maniobra (3.5 €/m²).
- Electricidad: los daños sobre el cableado se consideran mínimos, sin embargo, en caso de resultar dañado algún centro de transformación la cuantificación de la reparación puede ser considerable (2.5 €/m²).
- Saneamiento: aunque las conducciones de saneamiento y alcantarillado no suelen dañarse durante las inundaciones, el gasto en limpieza puede llegar a alcanzar el valor de la construcción de un nuevo colector (4.0 €/m²).
- Agua potable: los daños sobre las conducciones, válvulas y otros elementos singulares no van a ser muy elevados, ya que la red de abastecimiento no suele ser afectada durante las inundaciones (0.5 €/m²).
- Telefonía: al igual que en el caso anterior, no se esperan daños elevados sobre la red telefónica. en este caso, los daños se centrarán en los cuadros eléctricos y de maniobra más que en el cableado (0.5 €/m²).
- Vialidades: las propias vías de comunicación terrestres pueden resultar dañadas con el arrastre de sedimentos, lo que implicará reparaciones tanto en el asfaltado como en el pavimento de las guarniciones y banquetas (1.5 €/m²). Para daño máximo en vialidades se consideran (15.00 €/m²).



Gráfica 2.14 – Curva de vulnerabilidad elemental para limpieza de vialidades.
(Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino, 2011).



Gráfica 2.15 – Curva de vulnerabilidad elemental para estimar daños en vialidades e
infraestructura público-urbana (Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino, 2011).

2.5.3 – Riesgo

Se define como la combinación de la probabilidad de que se produzca un evento y sus consecuencias negativas, tales como muertes, lesiones, propiedad, medios de vida, interrupción de actividad económica o deterioro ambiental, como resultado de interacciones entre las amenazas naturales o antropogénicas y las condiciones de vulnerabilidad (FAO, 2009). Así mismo, es común definir al riesgo como el valor esperado de pérdidas de cierto elemento de riesgo, se estima considerando la probabilidad de incidencia de determinada amenaza o evento (Fuentes, 2011).

En forma cuantitativa, una de las definiciones más aceptadas, es la se representa por la siguiente expresión:

$$R = f(P, V, E,)$$

En donde la función (f), está integrada por el factor P, que representa el peligro en términos de la probabilidad de ocurrencia de un fenómeno potencialmente dañino de cierta intensidad; V, el cual corresponde a la vulnerabilidad, representada en forma cualitativa por medio del índice de vulnerabilidad (I_v) y finalmente el factor E, corresponde al valor de los bienes expuestos.

Para la estimación del valor del riesgo, como se ha referido, es necesario determinar previamente el peligro y la vulnerabilidad, para orientar adecuadamente el análisis, de forma tal que para la evaluación del riesgo por inundación, se consideran los daños potenciales a los bienes y servicios, infraestructura y pérdida de vidas humanas, que se podrían ocasionar ante la probable incidencia de una inundación fluvial, y en términos generales de acuerdo a Bladé et al., (2014), se emplea el siguiente procedimiento para dicha evaluación:

- Generación de mapas de peligro, asociados a distintos períodos de retorno. Estos mapas pueden mostrar resultados de profundidad, velocidad, caudal específico o algún índice deducido a partir de los valores de una o varias de estas variables.
- Inventario y valoración de los bienes, infraestructuras y equipos existentes que se pueden ver afectados. El inventario se puede realizar a partir de los usos del suelo.

En la valoración se considerará el grado de afección, que puede incluir la exposición y la vulnerabilidad.

- Obtención de curvas de daños, que permitan conocer el porcentaje de pérdidas (índice de vulnerabilidad), respecto a los bienes afectados que supone una peligrosidad determinada, asociada a algún evento probabilístico.
- Evaluación, para cada periodo de retorno, de los mapas de daños, cruzando dichos mapas con las curvas de daños obtenidas.

Con este procedimiento, se obtendrá un daño esperado para cada periodo de retorno expresado en un valor por unidad de superficie, o bien un valor total en la zona. Se puede realizar un proceso similar para evaluar los daños sobre personas, con resultados expresados en número de afectados o víctimas (totales o por unidad de área), o incluso transformarlos a una valoración económica (Bladé et al., 2014).

Tanto para daños materiales como para personas, teniendo en cuenta que el periodo de retorno expresado en años es el inverso de la probabilidad anual de que se exceda un determinado nivel de inundación, se pueden combinar los distintos períodos de retorno y obtener un resultado global de daño anual esperado (*expected annual damage*) calculando el área que queda por abajo del gráfico de daños en función de la probabilidad (Bladé et al., 2014). Se puede determinar el daño estimado asociado a el, como se muestra en la Figura 2.6.

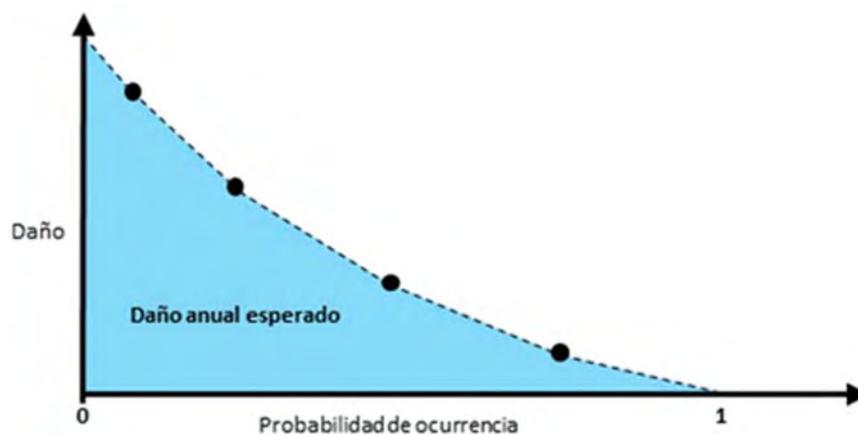


Figura 2.6 – Curva de daños asociada a eventos probabilísticos. Adaptada a partir de Bladé et al., (2014).

La evaluación del daño anual esperado será más precisa cuantos más periodos de retorno se hayan considerado. Si la evaluación de los daños se ha realizado en valor por unidad de área, se dispone de esta manera de un mapa de riesgo que indica, en cada zona, las pérdidas por metro cuadrado y por año que se pueden esperar, en promedio, debido a las inundaciones, integrando en superficie, es decir, trabajando en daños totales. El valor del daño anual esperado representa el promedio en un año del valor total de pérdidas en la zona de estudio (Bladé et al., 2014) y éste representa el área bajo la curva que se forma al graficar las probabilidades de excedencia de los daños, respecto al monto económico asociado a estas, mediante la aplicación de la fórmula (Meyer et al, 2012):

$$\bar{D} = \sum_{i=1}^k D[i][\Delta P_i]$$

Donde:

\bar{D} = Daño anual esperado

$$D[i] = \frac{D(P_i - 1) + D(p_i)}{2}$$

$$\Delta P_i = |P_i - P_{i-1}^2|$$

ΔP_i = Intervalo de probabilidad entre las probabilidades de excedencia de ambos eventos.

3 – MODELACIÓN MATEMÁTICA

En general, se puede considerar que la modelación computacional del flujo de agua en un río, consiste en la estimación de los parámetros hidráulicos que describen el comportamiento de flujo de agua en el mismo, los cuales en muchos de los casos variables en el espacio y el tiempo y estas corresponden principalmente al caudal, profundidad y velocidad. Para su estimación se recurre principalmente a la implementación de métodos numéricos para la resolución de las ecuaciones asociadas a dichos parámetros, mismos que a su vez, son obtenidas a partir de una serie de hipótesis planteadas para el análisis y estimación del comportamiento de los cauces. De forma tal que, una vez que se conocen estos parámetros hidráulicos en secciones transversales, celdas o volúmenes, es posible efectuar la estimación de la lámina de agua, asociada a un periodo de retorno definido o conjunto de ellos, y su respectiva representación geoespacial en modelos digitales de elevaciones, los cuales permiten implementar dicha información, para la estimación del peligro, vulnerabilidad y riesgo de inundación.

Dicho procedimiento de modelación y análisis, se basa principalmente en las ecuaciones completas de Saint Venant, las cuales corresponden a un sistema de ecuaciones diferenciales en derivadas parciales, hiperbólicas y cuasi-lineales, cuyas deducciones se atribuyen a Barré de Saint Venant en 1871, las cuales no tienen una solución analítica para geometrías reales. Para un fluido incompresible e isótropo, como es el agua, se obtienen las ecuaciones de Navier-Stokes que, particularizadas para describir las variables promediadas en un pequeño incremento de tiempo, se concretan en las ecuaciones de Reynolds (Bladé et al. 2009). Su resolución exigiría una discretización tridimensional del dominio de estudio y el esquema numérico sería complejo y muy costoso computacionalmente. Frecuentemente el flujo de agua en cauces naturales presenta unas características que permiten simplificar estas ecuaciones más generales y obtener resultados suficientemente precisos (FNCA, 2013). La clasificación de las distintas aproximaciones, se muestra en la Figura 3.1.

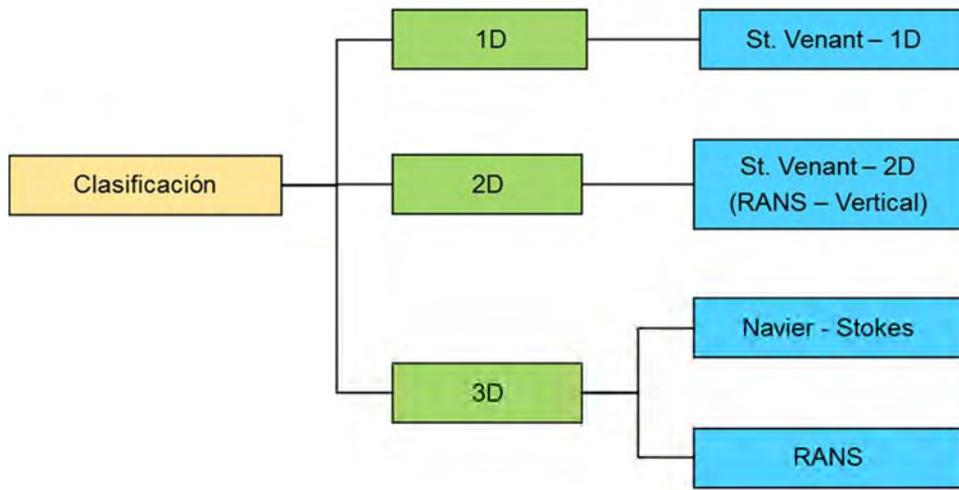


Figura 3.1 – Clasificación de modelos computacionales y las ecuaciones que resuelven (Mendoza, 2015).

3.1 – MODELOS EN 1D

A mediados del siglo XX, se comenzó a desarrollar e implementar la modelación numérica, con objeto de estudiar y analizar los efectos de la propagación de las ondas de avenidas en los ríos, y en concreto para la obtención de las velocidades y las profundidades en el cauce y zonas aledañas, asociadas a éstas. Con tal objeto, se han desarrollado modelos computacionales unidimensionales, mediante los cuales es posible efectuar el análisis del flujo, en régimen permanente y variable, con fondo fijo. Por tal razón estos modelos, son los más extensamente utilizados por su sencillez y amplia difusión; constituyen una herramienta suficiente para estudios donde la evolución temporal no sea un factor a tener en cuenta y el flujo sea eminentemente unidimensional como se ha referido. Están basados en esquemas numéricos relativamente simples pero eficaces, como lo son las ecuaciones de la conservación de la energía, de Manning y de la cantidad de movimiento, por citar algunas; mediante las cuales es posible considerar cambios de régimen, cauces con geometrías complejas y con llanuras de inundación y singularidades tales como pequeños bordos, puentes, pasos bajo vías de comunicación, etc. (Bladé et al. 2009).

Un problema típico de los modelos 1D es la definición de las secciones transversales cuando existen llanuras de inundación importantes y el cauce principal tiene cierta curvatura. En estos casos es difícil definir las secciones de forma que se cumplan las hipótesis que el flujo deberá ser perpendicular a la sección y sin que las secciones transversales se superpongan o crucen entre sí. Todavía más crítico en estos casos es el

hecho de que la velocidad del agua es muy variable dentro de cada sección, siendo habitual la existencia de zonas muertas difíciles de definir a priori, y pudiendo incluso existir zonas de recirculación, con formación de vórtices. Algunos modelos 1D incluyen parámetros para considerar de forma aproximada estos efectos, que no dejan de ser simplificaciones muy difíciles de evaluar posteriormente de forma independiente.

Los modelos 1D, proporcionan una interfaz muy intuitiva, lo que facilita la creación y ejecución del modelo cuando se compara con otras opciones, sobre todo en régimen permanente Imagen 3.1. En este caso, sin duda el programa de referencia es HEC-RAS, del *Hydrologic Engineering Center del U.S. Army Corps of Engineers*, el cual es un programa gratuito que permite realizar mediante el método paso a paso, cálculos en régimen permanente y en régimen variable emplea el esquema de Preissmann y por consiguiente tiene limitaciones para cambios de régimen y régimen rápido, tanto en dominios puramente unidimensionales como cuasi-bidimensionales. Otros modelos comerciales de simulación unidimensional ampliamente utilizados y que pueden resultar una alternativa o complemento al modelo HEC-RAS son el *Watershed Modelling System (WMS)*, o el software RiverCad; este último, basado en un entorno CAD con conexiones a HEC-RAS.

En el caso de que el proceso a estudiar sea claramente no permanente se debe recurrir a la resolución de las ecuaciones unidimensionales del régimen gradualmente variable o ecuaciones de Saint Venant unidimensionales. Los esquemas numéricos clásicos son: el método de las características, que podría servir para canales prismáticos pero no es adecuado para cauces fluviales, los métodos en diferencias finitas (implícitas como el de Preissmann o de los 4 puntos, o explícitas como el de McCormack), y por último los métodos de elementos finitos que necesitan un elevado consumo de tiempo de cálculo y no aportan ventajas considerables respecto al anterior. HEC-RAS dispone actualmente también de un módulo de simulación para este caso (modelo UNET en diferencias finitas implícitas), que ha ido ganando en robustez y versatilidad de cálculo. Otros modelos comerciales unidimensionales que resuelven estas ecuaciones para un régimen no permanente son el MIKE11 del Instituto de Hidráulica de Dinamarca (DHI), el modelo SOBEK, de *Delf Hydraulics* y el DAMBRK de *BOSS International*.

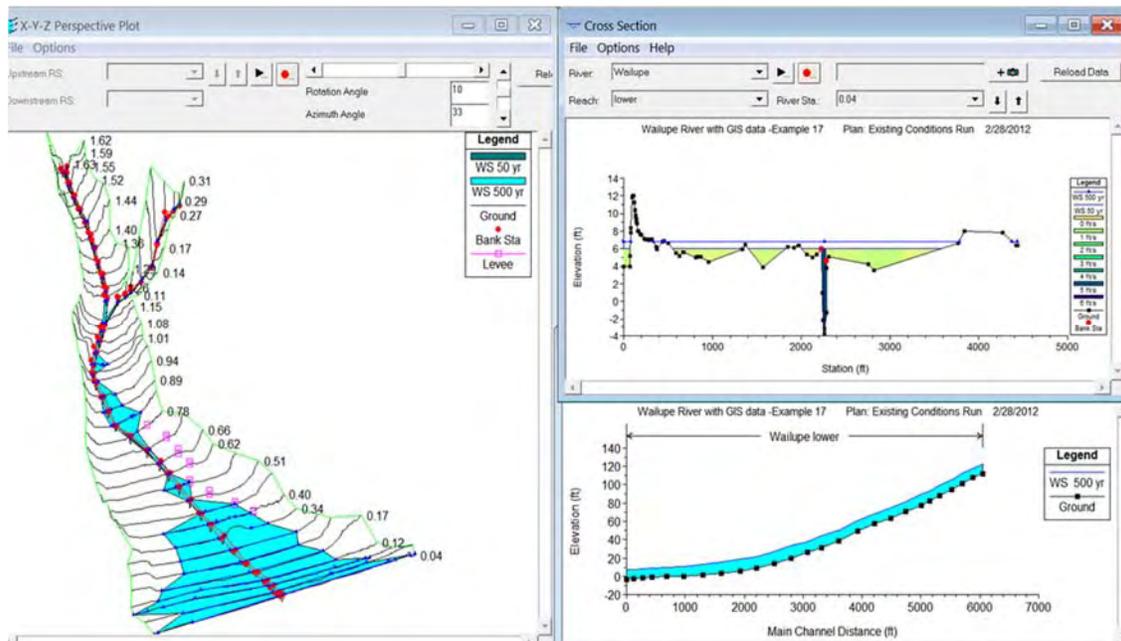


Imagen 3.1 – Ventanas representativas del programa HEC-RAS.

3.2 – MODELOS EN 2D

En dos dimensiones el río ya no se discretiza como una línea con una serie de secciones transversales, sino como una malla formada por una serie de celdas poligonales que representan la topografía del cauce y llanuras de inundación. Dicha malla puede ser regular o irregular, estructurada o no estructurada. La mayor flexibilidad para una buena representación de la geometría y contornos se suele conseguir con una malla irregular. Lo habitual es que las mallas estén formadas por triángulos o cuadriláteros.

Los modelos 2D pioneros fueron Mike-21 del DHI (Imagen 3.2) y Sobek de *Delft-Hydraulics*, ahora Deltares. Ambos utilizaban esquemas en diferencias finitas de direcciones alternadas, muy parecidos entre sí, aunque desde hace unos años Mike-21 incorpora también un módulo en volúmenes finitos. Otro programa europeo que utiliza volúmenes finitos es Infoworks 2D, que fue inicialmente desarrollado por H.R. Wallingford pero hoy es comercializado por la empresa Innovyze. La tendencia que había en Estados Unidos hacia los esquemas en elementos finitos se ha visto alterada también a favor de los volúmenes finitos con la aparición de FLO-2D.

Con relación a la técnica de los volúmenes finitos, es oportuno mencionar que ha permitido, que en las últimas décadas se desarrollaran esquemas numéricos robustos, fiables, conservativos que representan unas herramientas de utilidad para problemas de dinámica fluvial y evaluación de zonas inundables. Así como hace 10 años no existían programas mínimamente amigables que utilizaran esta técnica, hoy hay un gran número de ellos disponibles, ya sean comerciales, o de uso público. Con relación a dicha técnica de análisis, destacarían en principio, los distintos módulos de cálculo del modelo americano SMS (RMA2 y HIVEL2D) y el modelo Telemac (Hervouet, 2000) desarrollado en el Laboratoire National d'Hydraulique, un departamento de Electricité de France. Este último es ahora de código abierto, e incorpora asimismo módulos para simulaciones 3D.

En la presente investigación, se ha considerado desarrollar un caso de aplicación en el cual se llevará a cabo la estimación del peligro, vulnerabilidad y riesgo de inundación; para ello, se recurrirá a la a la implementación del modelo de análisis bidimensional Iber.

Iber, es un modelo numérico bidimensional de simulación de flujo turbulento en lámina libre en régimen no-permanente y de procesos medioambientales en hidráulica fluvial, que se distribuye gratuitamente a través de la página www.iberaula.es (Bladé et al., 2014). El rango de aplicación de Iber abarca la hidrodinámica fluvial, la simulación de rotura de presas, la evaluación de zonas inundables, el cálculo de transporte de sedimentos y el flujo de marea en estuarios. Iber se desarrolló en colaboración con el Grupo de Ingeniería del Agua y del Medio Ambiente, GEAMA (Universidad de A Coruña, UDC) y el Instituto FLUMEN (Universidad Politécnica de Cataluña, UPC, y Centro Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería, CIMNE). El modelo Iber surgió como respuesta al interés mostrado por el Centro de Estudios Hidrográficos del CEDEX en disponer de una herramienta flexible y adaptable que facilitara la aplicación de la legislación sectorial vigente en materia de aguas.

El motor de cálculo de Iber, está sustentado en la solución de las ecuaciones de conservación de la masa (1) y de cantidad de movimiento en las dos direcciones horizontales (2):

$$\left. \frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial h U_x}{\partial x} + \frac{\partial h U_y}{\partial y} = M_s \right\} \dots (1)$$

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial h U_x}{\partial t} + \frac{\partial h U_x^2}{\partial x} + \frac{\partial h U_x U_y}{\partial y} &= -gh \frac{\partial Z_s}{\partial x} + \frac{\tau_{s,x}}{\rho} - \frac{\tau_{b,x}}{\rho} - \frac{g h^2}{p} \frac{\partial p}{\partial x} + 2\Omega \sin\lambda U_y + \frac{\partial h \tau_{xx}^e}{\partial x} + \frac{\partial h \tau_{xy}^e}{\partial y} + M_x \\ \frac{\partial h U_y}{\partial t} + \frac{\partial h U_x U_y}{\partial x} + \frac{\partial h U_y^2}{\partial y} &= -gh \frac{\partial Z_s}{\partial y} + \frac{\tau_{s,y}}{\rho} - \frac{\tau_{b,y}}{\rho} - \frac{g h^2}{p} \frac{\partial p}{\partial y} - 2\Omega \sin\lambda U_x + \frac{\partial h \tau_{xy}^e}{\partial x} + \frac{\partial h \tau_{yy}^e}{\partial y} + M_y \end{aligned} \right\} \dots (2)$$

Dónde: h es el calado, U_x y U_y son las velocidades horizontales promediadas en profundidad, g es la aceleración de la gravedad, Z_s es la elevación de la lámina libre, τ_s es la fricción en la superficie libre debida al rozamiento producido por el viento, τ_b es la fricción debida al rozamiento del fondo, ρ es la densidad del agua, Ω es la velocidad angular de rotación de la tierra, λ es la latitud del punto considerado, h_{xx}^e , h_{xy}^e y h_{yy}^e son las tensiones tangenciales efectivas horizontales, y finalmente M_s , M_x y M_y son respectivamente los términos fuente/sumidero de masa y de momento, mediante los cuales se realiza la modelación de la precipitación, infiltración y sumideros.

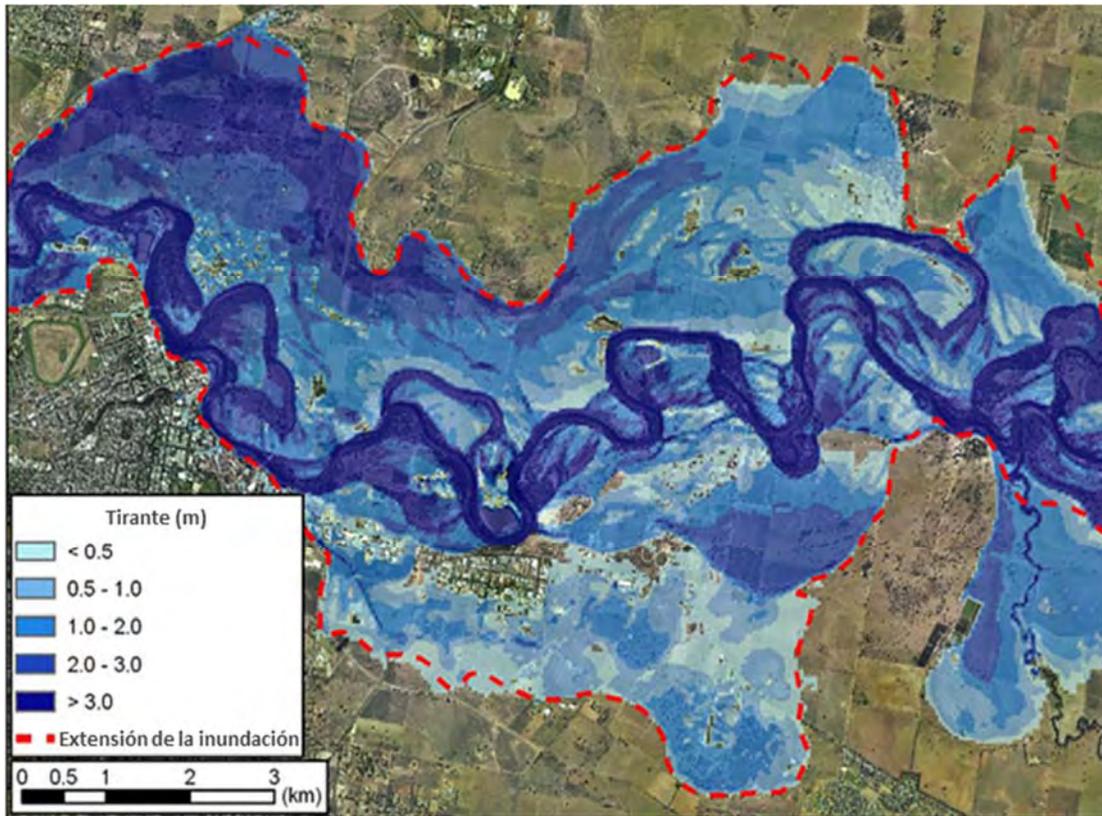


Imagen 3.2 – Mapa de inundación, generado en el programa Mike Flood, DHI.

3.3 – MODELOS EN 3D

La utilización de modelos tridimensionales para el cálculo de zonas inundables es mucho menos común que la de los modelos 1D y 2D, debido a que la extensión espacial del modelo requeriría la utilización de mallas de cálculo de varios millones de elementos, con un coste computacional muy elevado. Los modelos 3D aplicados a hidráulica fluvial se suelen restringir al estudio del flujo local en meandros o en torno a estructuras hidráulicas como pilas de puentes, vertederos o compuertas.

Los modelos 3D utilizan distintos tipos de discretización espacial, la cual suele estar relacionada con el método utilizado para el tratamiento de la lámina libre. Una posibilidad muy extendida es la utilización de capas sigma (Phillips, 1957) para generar la discretización vertical. Este tipo de discretización consiste en una malla 2D horizontal a partir de la cual se generan un número determinado de capas en la dirección vertical. Dichas capas tienen un espesor variable y se distribuyen entre el fondo y la lámina libre. El espesor de todas las capas varía durante el cálculo de forma que el contorno de la capa superior coincida en cada momento con la lámina libre. Este tipo de discretización es la utilizada por el modelo Delft3D (Imagen 3.3), uno de los más extendidos en aplicaciones medioambientales en hidráulica fluvial y costera, y tiene la ventaja de poder capturar de forma precisa la forma de la lámina de agua con un número pequeño de capas (Cea et al., 2009; Stelling y Zijlema, 2003). Sin embargo, para poder definir de forma precisa la variación del campo de velocidades en profundidad es necesario utilizar normalmente del orden de 25 capas.

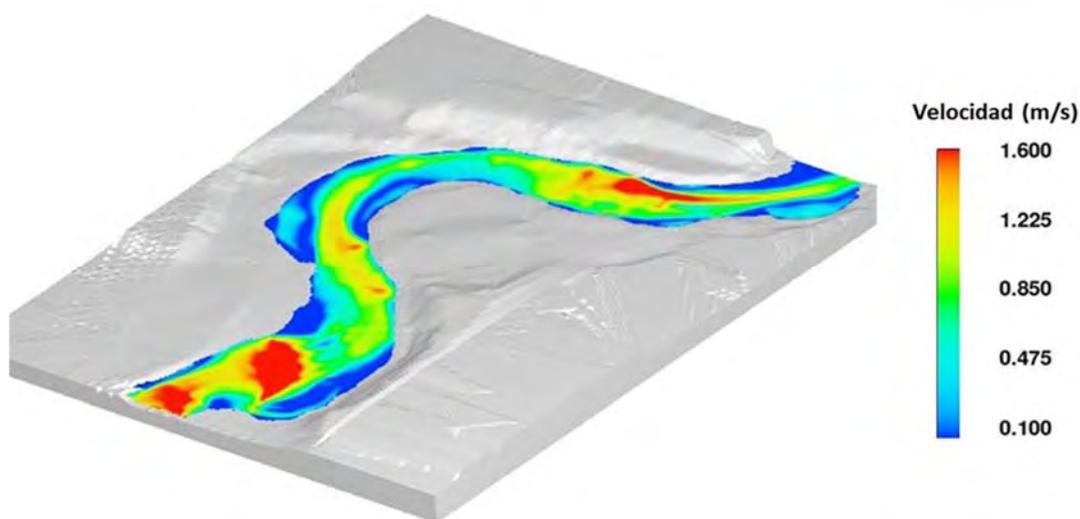


Imagen 3.3 – Modelación computacional de la dinámica de un río, mediante el programa Flow 3D.

Otra posible discretización utilizada en modelos 3D es utilizar una malla tridimensional fija (ya sea estructurada o no estructurada), y definir la posición de la lámina de agua a partir del valor de una variable definida en cada elemento de la malla. Un método de este tipo es el *Volume of Fluid* (VOF), desarrollado originalmente por Hirt and Nichols (1981) para mallas estructuradas cartesianas y adaptado posteriormente por un gran número de investigadores a otro tipo de mallas. Este tipo de discretización tiene la ventaja de poder capturar formas de la lámina de agua muy complejas, y el inconveniente de que es necesario utilizar mallas relativamente finas para definir de forma precisa la posición de la lámina de agua, lo cual puede incrementar de forma importante el número de elementos de la malla y el tiempo de cálculo. Este método es el utilizado en el modelo Flow3D, el cual ha sido utilizado en un gran número de aplicaciones de ingeniería hidráulica, fluvial y medioambiental, incluido el cálculo de zonas inundables (Flow3D, 2018).

3.4 – SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA

Si bien, los Sistemas de Información Geográfica no son, en principio, instrumentos diseñados para la simulación mediante modelos matemáticos, ya que no se prestan con facilidad a estudios dinámicos al no disponer de representación explícita de la variable tiempo (ecuaciones diferenciales que gobiernan los problemas de flujos), son herramientas que facilitan el pre y post proceso de la información espacial que maneja un modelo de simulación hidrológica - hidráulica.

En el estudio de un cauce, los SIG se utilizan para el análisis hidrológico y cálculo de caudales previo al cálculo hidráulico, para regionalizar o agregar las variables y parámetros y para utilizar sus resultados como entradas del modelo. El flujo generalmente es modelado con un software diseñado específicamente para ello, como se ha descrito con antelación, y posteriormente, las salidas de este modelo son nuevamente exportadas a un SIG para su postprocesamiento y representación gráfica. La representación de la llanura de inundación para un caudal de periodo de retorno dado es actualmente posible, únicamente mediante esta técnica.

La interacción entre los Sistemas de Información Geográfica con los modelos hidrológicos e hidráulicos ha sufrido una lógica evolución en la última década: los SIG comenzaron a utilizarse de forma aislada a los modelos, como herramientas para regionalizar, agregar y/o calcular variables y parámetros, usando los resultados como entradas a los modelos;

recientemente han proliferado las aplicaciones, macros, extensiones o módulos que conectan directamente SIG y modelo, y además en relación biunívoca. De forma tal que todas las aplicaciones disponibles actualmente para la modelación hidráulica bidimensional, se apoyan en los Sistemas de Información Geográfica, tanto para el preprocesamiento de la información, como para la implementación de ésta en los cálculos internos y los formatos de salida. Así, algunos de los programas de uso más difundido como MIKE-Flood y su componente bidimensional MIKE 21, Iber, SOBECK, o GUAD2D precisan datos SIG de entrada, normalmente en formato matricial, como los MDE de alta precisión (LIDAR) o parámetros de rugosidad del terreno a la escorrentía superficial en régimen de lámina libre (valores de n de Manning).

3.5 – MAPAS DE PELIGRO Y RIESGO DE INUNDACIÓN

El concepto de riesgo fue identificado por la UNESCO en 1972, como la expectativa de que se produzca una pérdida de vidas humanas, bienes naturales o capacidad productiva. Diversos términos como la peligrosidad, la exposición o la vulnerabilidad hacen relación a variables para la evaluación de este riesgo.

Las inundaciones provocadas por el desbordamiento de ríos, en general, constituyen una de las catástrofes naturales que mayor cantidad de daños humanos y materiales producen a nivel mundial. Este riesgo es potencialmente más elevado en ríos, que se caracterizan por tener un escurrimiento de carácter torrencial que con frecuencia provoca avenidas e inundaciones.

El análisis de esta problemática específica puede ser abordado desde diversos enfoques: Uno de ellos consiste, en la delimitación de las áreas de riesgo por efecto de una inundación, detectables a partir de la topografía del territorio y de la geomorfología de los cauces de los ríos y sus llanuras de inundación, y otro, parte de la estimación de los potenciales efectos que podrían tener en los diferentes usos del suelo localizados en las inmediaciones de las zonas de riesgo potencial. Información mediante la cual es posible la construcción de mapas de riesgo Figura 3.2.

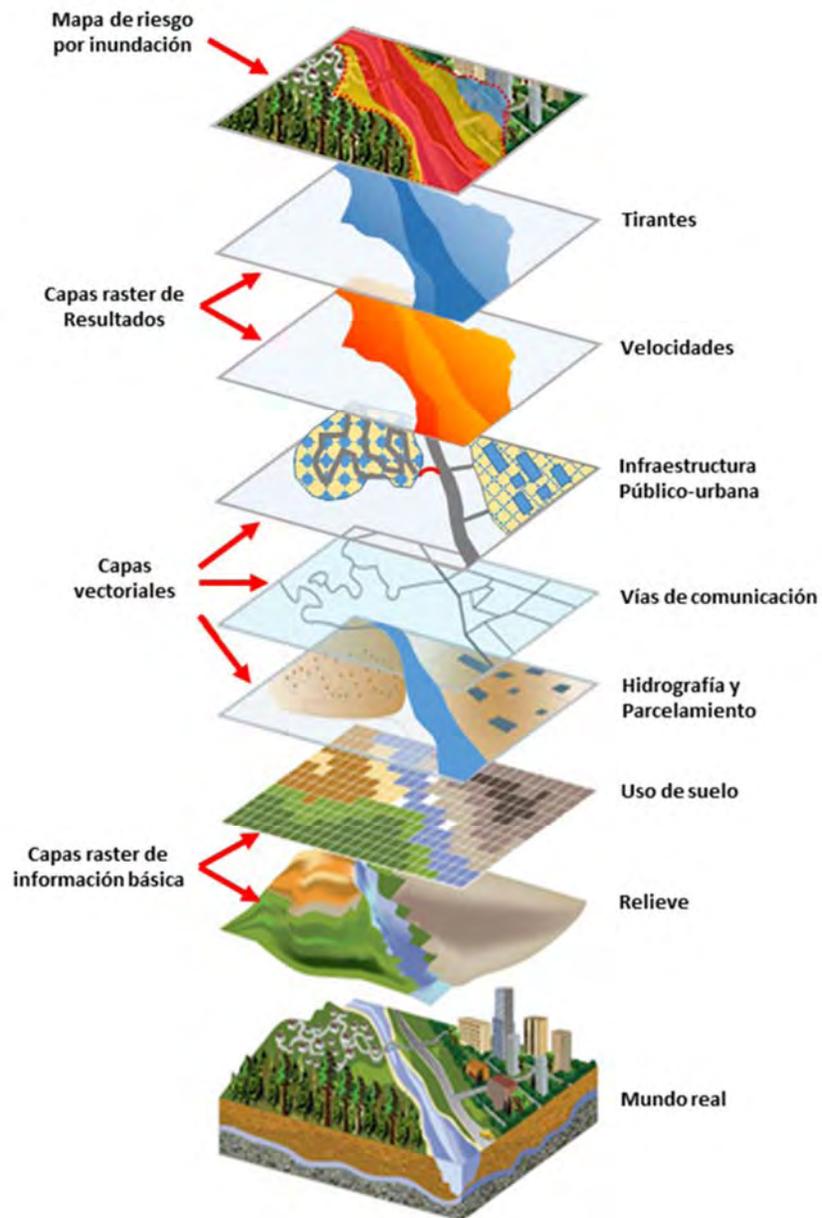


Figura 3.2 – Esquema de capas temáticas para la construcción de un mapa de riesgo en un SIG.

4 – CASO DE APLICACIÓN

Con objeto de llevar a cabo la estimación del peligro, vulnerabilidad y riesgo de inundación, se desarrollará la modelación y simulación del funcionamiento hidráulico del río Escondido, en el tramo ubicado en el municipio de Piedras Negras, Coahuila; se analizará el comportamiento de las avenidas asociadas a periodos de retorno de 5, 10, 50, 100, 500 y 1,000 años. Además, se efectuará el análisis, procesamiento e interpretación de información hidroclimatológica y geoespacial, cuya orientación está abocada a la estimación de dichos parámetros, con el objeto de propiciar la prevención y por ende la reducción de sus efectos.

Para ello, se partirá de información esencial correspondiente a hidrografía, hidrología, usos del suelo y vegetación, modelos digitales de elevaciones, cartas topográficas e imágenes satelitales.

Los puntos principales como se ha referido, se enfocarán el análisis del peligro, vulnerabilidad y riesgo, para lo cual se partirá del establecimiento de puntos de control hidrológico, análisis de los tiempos de concentración y recorrido de la onda de avenida para la definición de la mancha de inundación para diferentes periodos de retorno. Dicha información será la base para la determinación de distintos aspectos de interés, ya que se procesará en conjunto con información geoestadística. Por lo que, los resultados que se obtengan, serán generados y presentados por medio de Sistemas de Información Geográfica, bases de datos, documentos, etc.

4.1 – LOCALIZACIÓN

El río Escondido se ubica en el municipio de Piedras Negras, el cual está enmarcado por las coordenadas geográficas 28° 39' 05' de latitud norte y 100° 36' 12' de longitud oeste, al norte del estado de Coahuila (Imagen 4.1), cuenta con una población aproximada de 204,000 habitantes y una extensión de 914.2 km²; limita al noreste con el municipio de Jiménez y la ciudad de Eagle Pass, Texas, Estados Unidos, al sur con el municipio de Nava y al oeste con el municipio de Zaragoza.

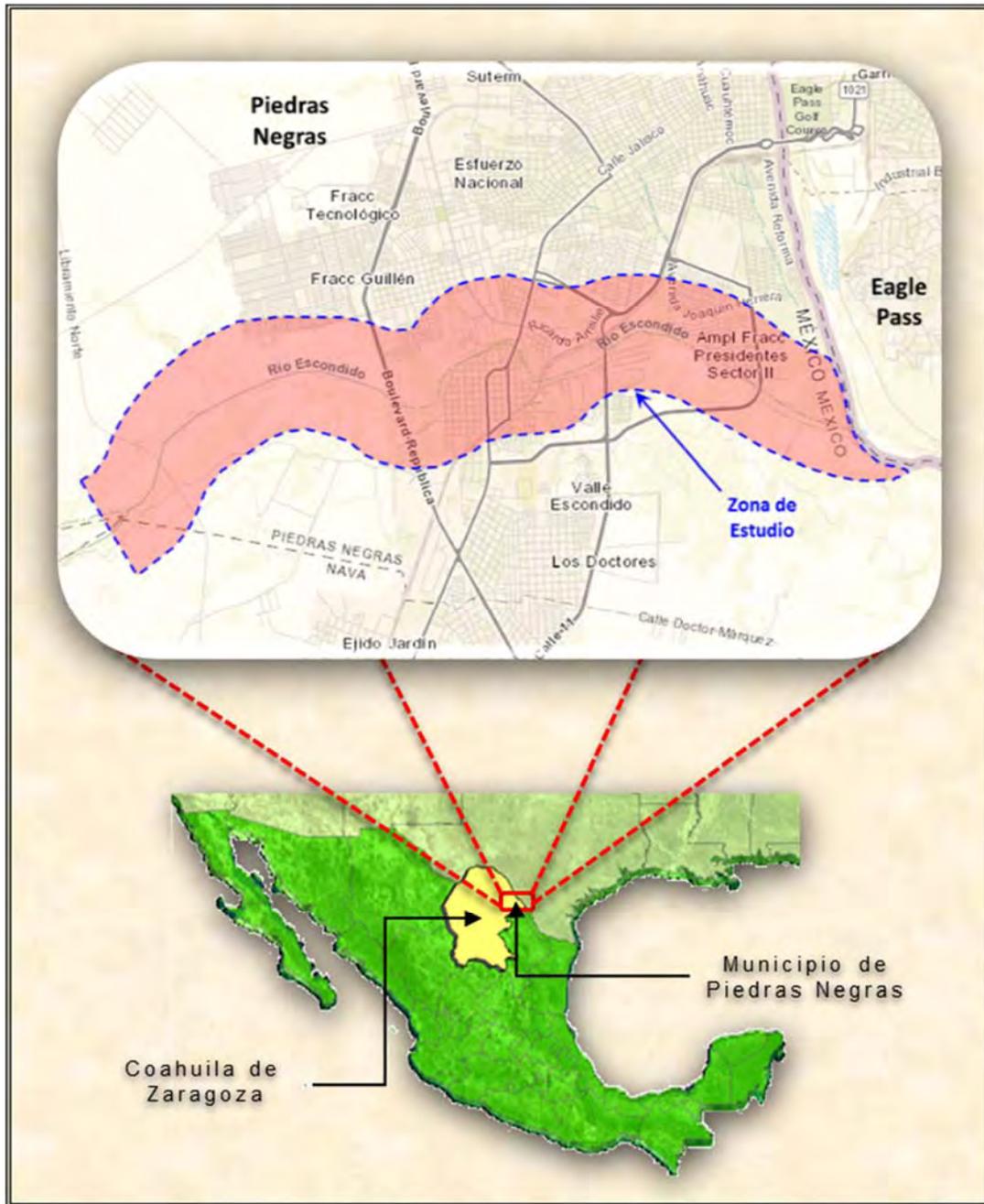


Imagen 4.1 – Localización de la zona de estudio.

4.2 – ANTECEDENTES

Debido a su cercanía al río Bravo y a los escurrimientos del Escondido (Figura 4.1), la ciudad de Piedras Negras históricamente ha estado sujeta a sufrir inundaciones; la primera de la que se tiene registró, aconteció el 2 de septiembre de 1932 y la segunda el 28 de

junio de 1954, en este último se estimó la pérdida de al menos 60 vidas; en fechas relativamente recientes, el día 4 de abril de 2004, la ciudad sufrió una gran inundación, así mismo, en abril y junio del año 2010, a consecuencia de las lluvias torrenciales provocadas por el huracán “Alex” y la depresión tropical número 2, respectivamente, la ciudad volvió a sufrir los efectos de las inundaciones. Otros eventos se presentan en la tabla 4.1.

Tabla 4.1 – Cronología histórica de inundaciones en Piedras Negras, Coahuila, (“El Zócalo”, 2009; “La Jornada”, 2004).

| Número de inundación | Año | Fenómeno presentado | Muertes ocasionadas, damnificados o desaparecidos | Daños ocasionados | Datos relevantes |
|-----------------------------|------------|---|--|---|--|
| 1ra. | 1890 | Lluvias torrenciales en Nuevo México y Estados Unidos | ----- | ----- | Fenómeno presentado sobre el río Pecos que es afluente del río Bravo |
| 2da. | 1908 | Lluvias intensas en la Cuenca del río Bravo | ----- | ----- | ----- |
| 3ra. | 1932 | Lluvias intensas en la Cuenca del río Conchos en el lado Mexicano | ----- | ----- | ----- |
| 4a. | 1954 | Lluvias torrenciales en la cuenca de los ríos Pecos, Diablo, Devil, el arroyo Johnson, “Las Vacas”, tributarios del río Bravo | 70 personas muertas y 10,000 damnificados | ----- | Desastre desbastador |
| ----- | 1968 | Fuertes tormentas en los mes de mayo y septiembre | ----- | Se inundan partes bajas de la ciudad. | Esto se presentó debido a las bandas del huracán Naomi. |
| ----- | 1974 | El huracán Charlie azota Cd. Acuña y Del Río, río arriba de la Presa “La Amistad” | ----- | Pérdida de cosechas y muerte de animales. | La presa la Amistad, evitó la quinta inundación de Piedras Negras |
| ----- | 1988 | El huracán Gilberto produce inundaciones fuertes | Evacuación de familias | ----- | ----- |

| Número de inundación | Año | Fenómeno presentado | Muertes ocasionadas, damnificados o desaparecidos | Daños ocasionados | Datos relevantes |
|----------------------|------|---|---|---|--|
| ----- | 1998 | Fuertes lluvias ocasionadas por bandas de la depresión tropical Charlie | ----- | ----- | Desbordamiento de los arroyos "El Soldado y "Primavera" |
| 5a. | 2004 | El frente frío No. 49, ocasiona una tormenta atípica en las partes altas de la sierra del burro en el municipio de Zaragoza, Coahuila | 40 personas muertas, 50 desaparecidos y entre 2,500 y 4,000 damnificados. | Afectación de 6,700 pobladores en las colonias Villa de Fuente, el Vergel, Periodistas, Presidentes, etc. | Se tuvo una precipitación de 560 mm en cinco horas, produciendo una avenida catastrófica en el Río Escondido y en el San Antonio. La inundación alcanzó 2 mts. de altura |
| 6a. | 2010 | Esta inundación fue el resultado del desbordamiento de varios ríos y arroyos causados por una tormenta que azotó el norte de la ciudad. | ----- | Daños a 750 viviendas | ----- |
| 7a. | 2013 | La inundación fue resultado de fuertes lluvias. | 3,000 damnificados; 1,500 viviendas afectadas | 40 colonias anegadas | ----- |

Continuación Tabla 4.1

4.3 – ANÁLISIS HIDROLÓGICO

La zona de estudio, se localiza dentro de la región hidrológica 24, Bravo-Conchos, que abarca la parte mexicana de toda la cuenca del río Bravo, la cual comprende siete subregiones hidrológicas: 24A río Conchos, 24B presa Amistad-Ojinaga, 24C río Salado y Sabinas, 24D río Medio Bravo, 24E río Álamo, 24F río San Juan y 24G río Bajo Bravo, de tal manera que la zona de estudio se ubica en la subregión hidrológica (24D Medio Bravo).

La cuenca del río Escondido, cuenta con un área de 3,172.39 km², su cauce tiene una longitud de 82.47 km, y posee una pendiente media de 0.00305. Para el análisis hidrológico se identificaron las estaciones climatológicas e hidrométricas de influencia en la cuenca del río Escondido, mismas que se muestran en la Imagen 4.2.

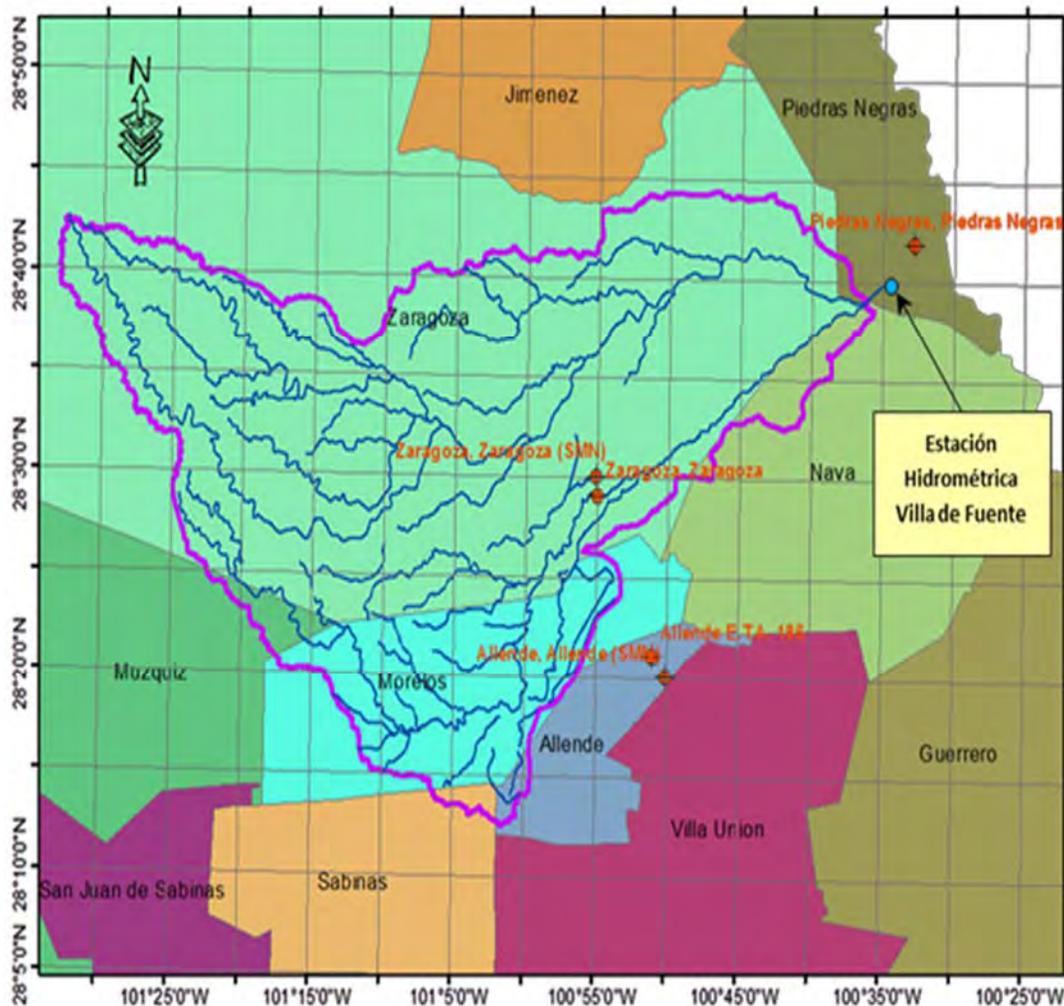
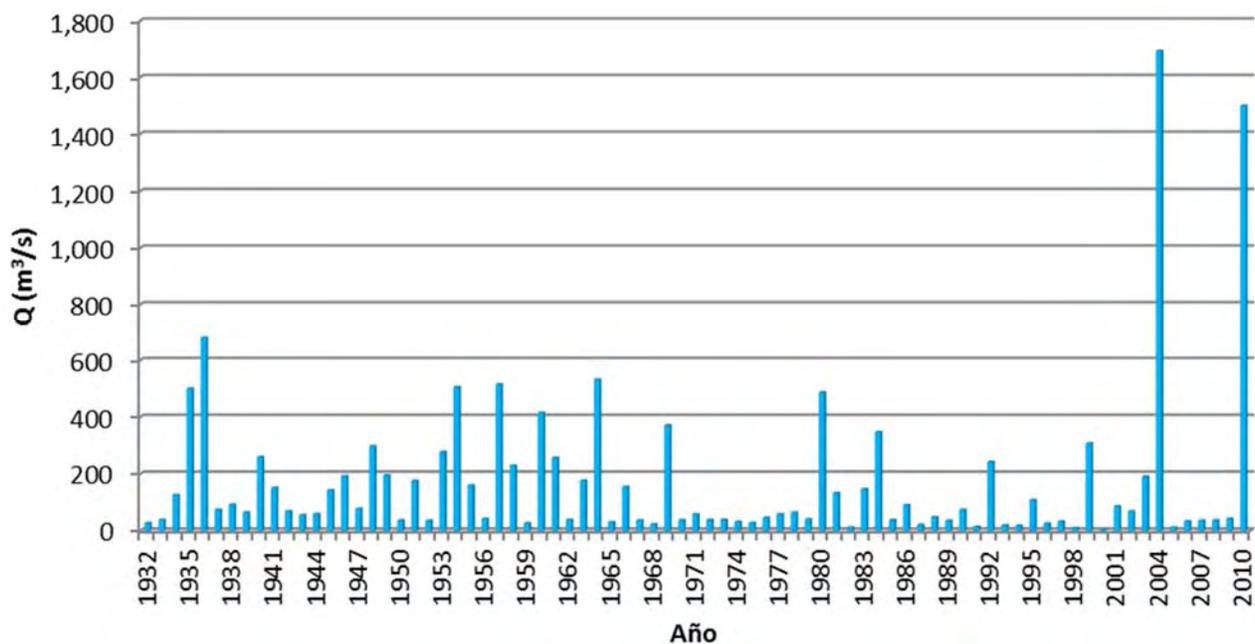


Imagen 4.2 – Cuenca del río Escondido y ubicación de estaciones climatológicas e hidrométrica.

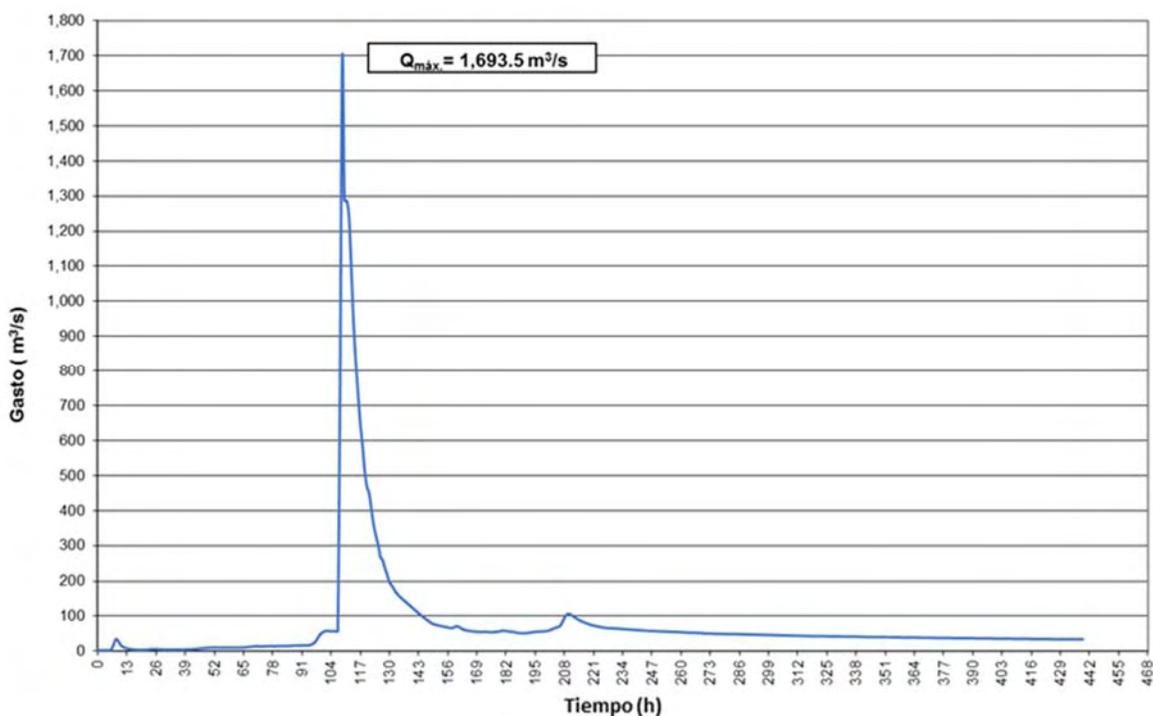
Se identificaron cinco estaciones climatológicas (Tabla 4.2) y la estación hidrométrica Villa de Fuentes. Respecto a las primeras, se observó que están localizadas en la parte media-baja de la cuenca y en la parte superior de ésta no se localiza estación alguna que pueda ser empleada para el análisis lluvia-escorrentía, por lo que al contarse con la estación hidrométrica Villa de Fuentes, se procedió al análisis de la información disponible; para ello, se consultó el BANDAS y en el conjunto de datos, se identificó que no se incluían los registros de gastos instantáneos, razón por la que se procedió a consultar el boletín hidrométrico publicado por la Comisión Internacional de Límites y Aguas (CILA), donde fue posible identificar los gastos máximos anuales y el hidrograma asociado al gasto máximo registrado, como se muestra en las Gráficas 4.1 y 4.2.

Tabla 4.2 – Estaciones climatológicas de influencia para la zona de estudio.

| Clave | Nombre | Longitud (°) | Latitud (°) | Altitud (m) | Período de registro | Años de registro |
|-------|--------------------------------|--------------|-------------|-------------|--|------------------|
| 5002 | Allende, Allende (smn) | -100.833 | 28.333 | 374 | 1907-1912, 1943-1989 | 51 |
| 5025 | Piedras Negras, Piedras Negras | -100.517 | 28.700 | 220 | 1955-1960, 1977 | 6 |
| 5042 | Zaragoza, Zaragoza (smn) | -100.917 | 28.500 | 400 | 1932-1936, 1941-1950, 1960-1977, 1985-1986 | 33 |
| 5063 | Allende e.t.a. 186 | -100.850 | 28.350 | 375 | 1975-2002 | 27 |
| 5074 | Zaragoza, Zaragoza | -100.917 | 28.483 | 370 | 1977-1999 | 22 |



Gráfica 4.1 – Gastos máximos registrados en la estación hidrométrica Villa de Fuente.

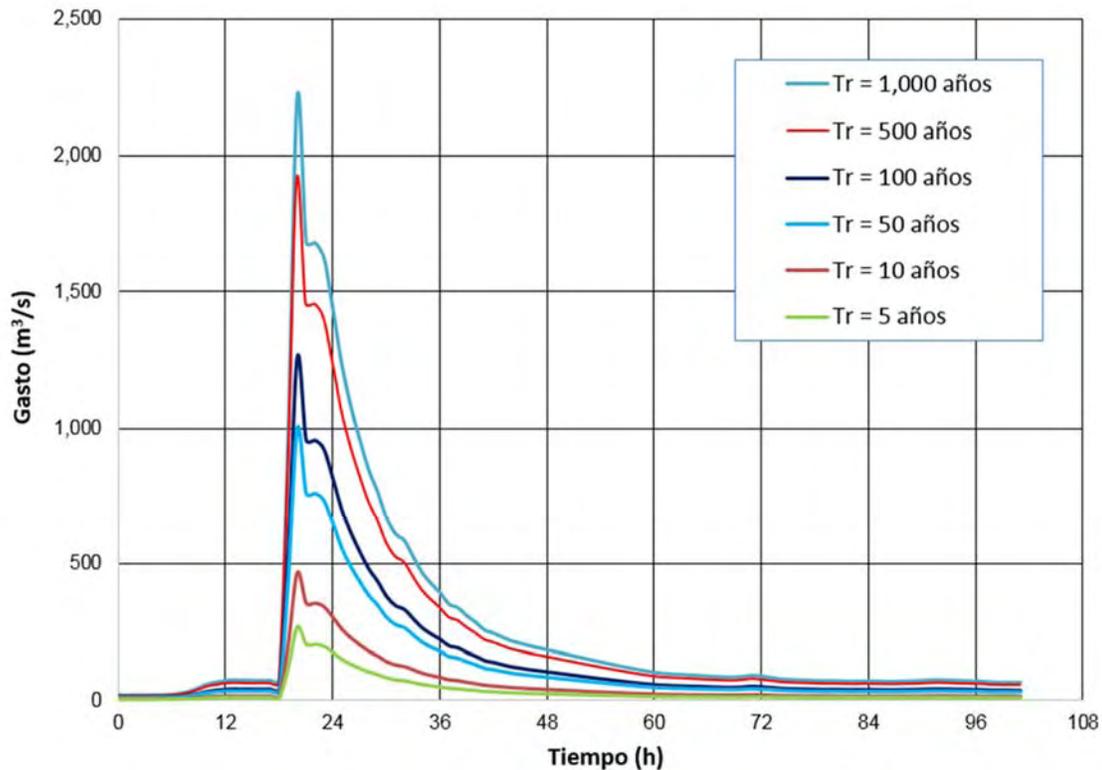


Gráfica 4.2 – Hidrograma asociado al gasto máximo registrado el 04 de abril de 2004, en la estación hidrométrica Villa de Fuente.

Como se tiene disponibilidad de datos hidrométricos, la estimación de los gastos asociados a diversos periodos de retorno se efectuó mediante el análisis de frecuencias, en el cual, la función de probabilidad Doble Gumbel, presentó el menor error cuadrático ($E = 84.026$), junto con el hidrograma proporcionado por la CILA; los gastos máximos e hidrogramas asociados a distintos periodos de retorno se muestran en la Tabla 4.3 y en la Gráfica 4.3.

Tabla 4.3 – Distribución de gastos asociados a distintos periodos de retorno.

| Tr | Gasto (m³/s) |
|-------|--------------|
| 5 | 269.04 |
| 10 | 464.48 |
| 50 | 1,001.71 |
| 100 | 1,261.00 |
| 500 | 1,915.29 |
| 1,000 | 2,217.04 |



Gráfica 4.3 – Hidrogramas asociados a los periodos de retorno de interés.

4.4 – MODELACIÓN COMPUTACIONAL

Como parte del desarrollo de la presente investigación sobre el peligro, la vulnerabilidad y el riesgo de inundaciones fluviales, fue necesario disponer de las características hidráulicas del río Escondido, su geomorfología y las características fisiográficas de la zona de estudio; razón por la que se recurrió a distintas fuentes de información oficiales, como lo son el Gobierno del Municipio de Piedras Negras, Estado de Coahuila, el Instituto Nacional de Estadística y Geografía, La Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO), por citar algunas.

Una vez obtenida la información necesaria, se procedió a su procesamiento en el sistema de información geográfica ArcGIS, en su versión 10.1, desarrollado por ESRI, en cuya primera acción se delimitó la zona de interés, la cual se consideró a partir de la confluencia de los ríos San Antonio y Escondido, localizada, aproximadamente a 4.5 km aguas arriba de la estación hidrométrica Villa de Fuente, como se muestra en la Figura 4.3, resultando la zona de estudio mostrada en la Figura 4.4.

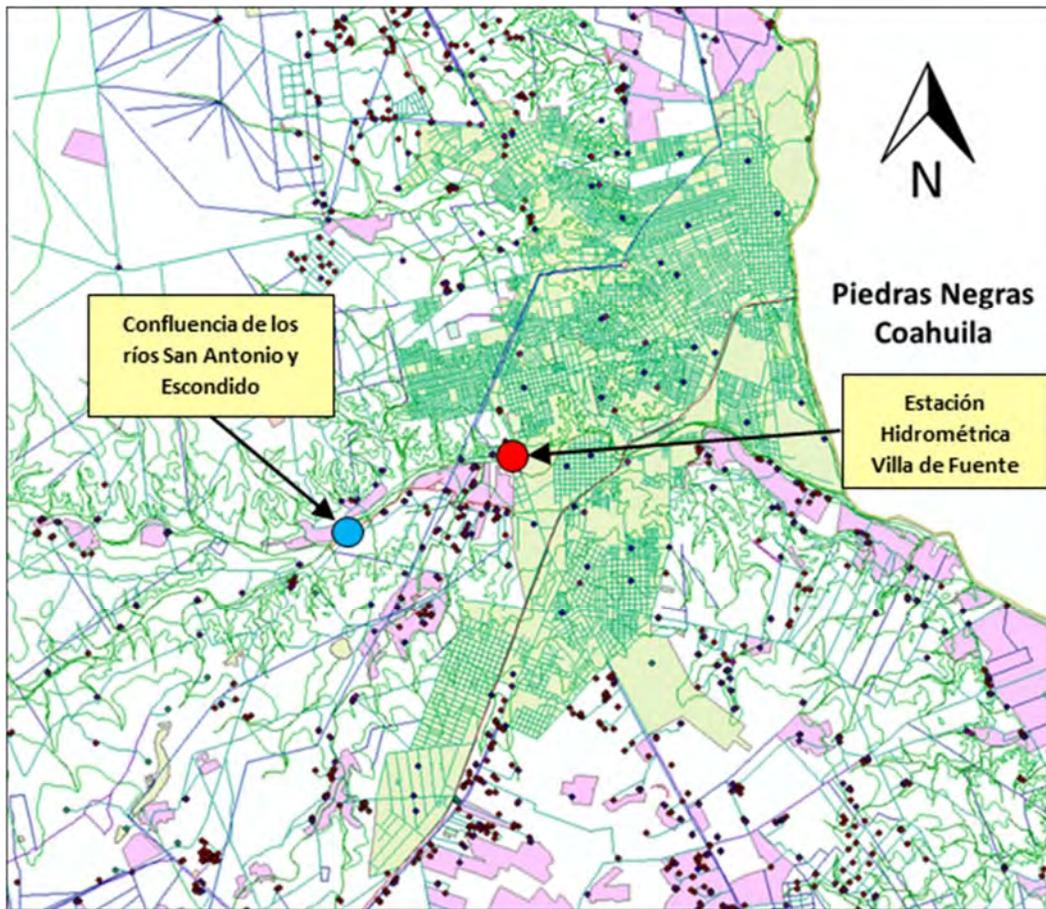


Imagen 4.3 – Procesamiento de la información geoestadística en el programa ArcGis, en su versión 10.1.

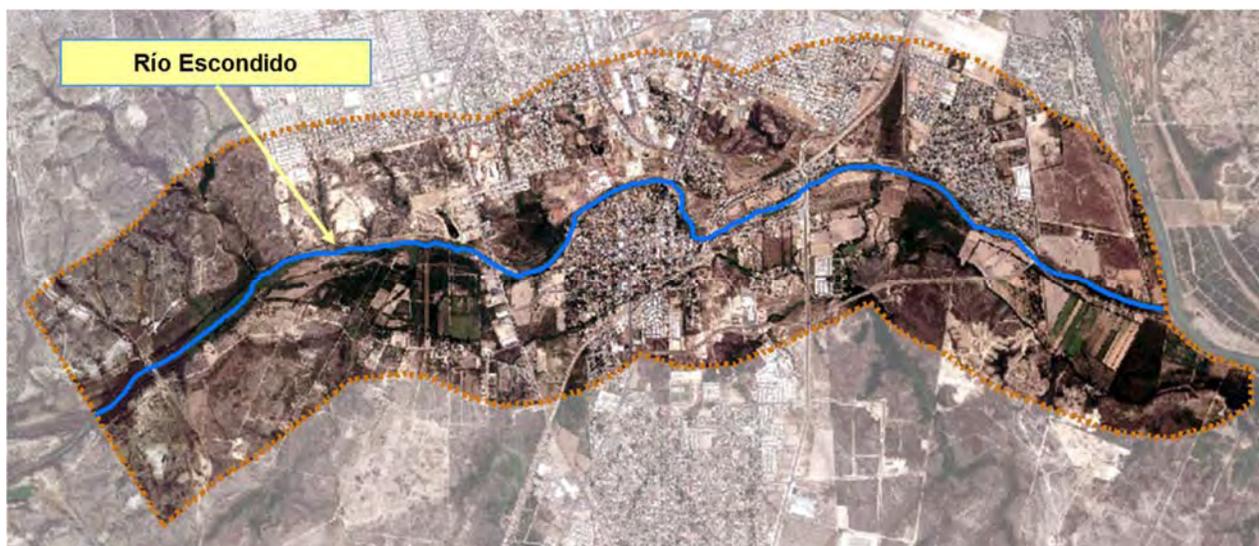


Imagen 4.4 – Delimitación de la zona de estudio.

Posteriormente, el modelo digital de terreno (MDT), se obtuvo a partir de información tipo LIDAR (*Light Detection and Ranging* o *Laser Imaging Detection and Ranging*), con resolución de 5 metros (Imagen 4.5), con la cual se le dio elevación a la malla de cálculo, necesaria para efectuar el análisis bidimensional del comportamiento del cauce.



Imagen 4.5 – Modelo digital de terreno de la zona de estudio.

Para el mallado de la zona de estudio, se procedió a efectuar una diferenciación entre la zona del cauce y las márgenes envolventes de éste, en las cuales se definió un tamaño de malla de 5 m (en correlación al tamaño de celda del modelo digital de elevaciones) y de 10 m, respectivamente; situación que se consideró efectuar con dicha configuración, por razones del tiempo computacional que implicaría considerar una malla más fina en la totalidad de la superficie, obteniéndose a partir de la implementación de dichas consideraciones una malla de cálculo de 780,663 elementos, misma que se presenta en la Imagen 4.6.

Así mismo, se analizó el uso de suelo y vegetación en la zona de estudio, la cual está caracterizada por la presencia de la zona urbana que define la ciudad de Piedras Negras, Coahuila, zonas agrícolas, así como pastizales y matorrales, cuya distribución se plasma en la Figura 4.7.

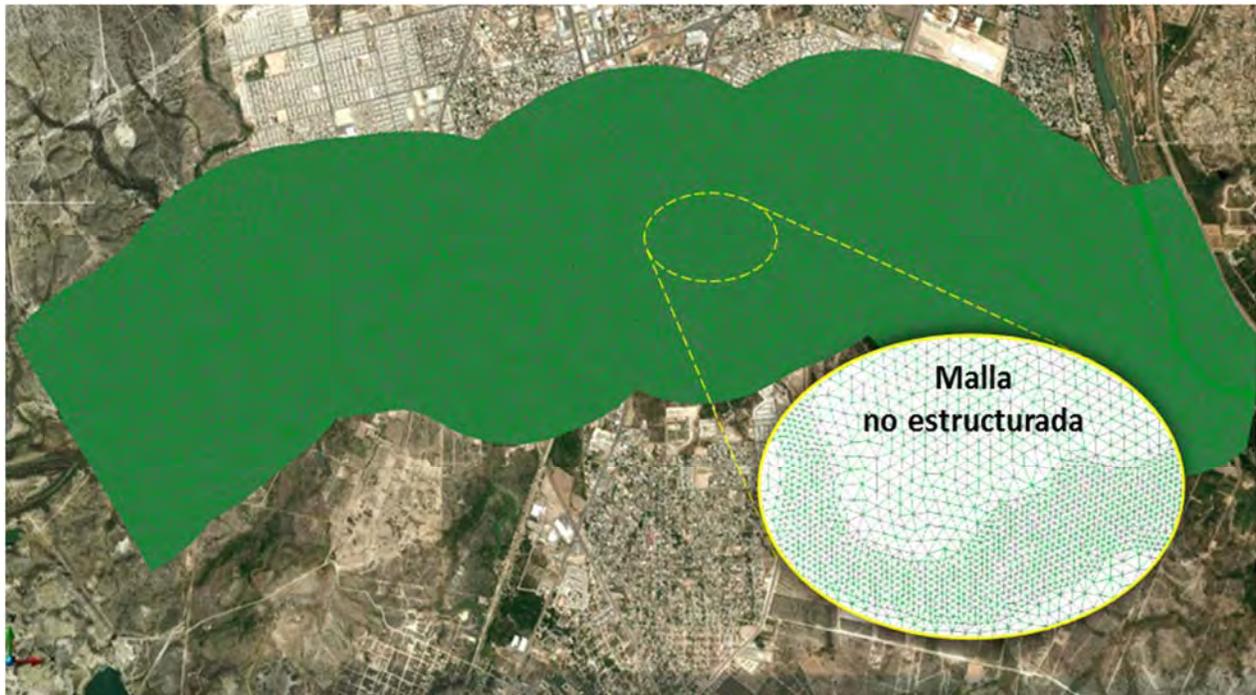


Imagen 4.6 – Malla triangular no estructurada, en el área de influencia para efectuar el análisis y asignación de elevaciones mediante archivo de datos ASCII.

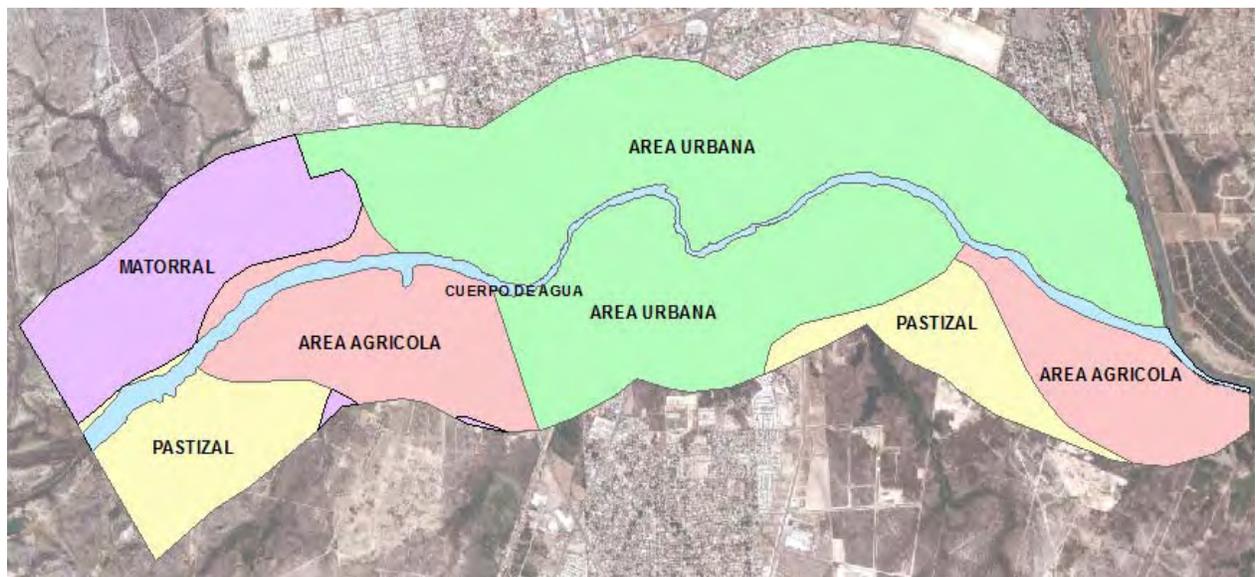


Imagen 4.7 – Distintos usos de suelo y vegetación en la zona de estudio.

Con relación a la rugosidad de los distintos tipos de suelo en la zona de estudio, se consideraron los coeficientes de Manning, que se presentan en la Tabla 4.4 (Chow, 2004), su asignación en el modelo Iber se presenta en la Imagen 4.8.

Tabla 4.4 – Coeficientes de rugosidad de Manning, para los distintos tipos de suelo en la zona de estudio.

| Superficie | Rugosidad (Manning) |
|------------|---------------------|
| Agrícola | 0.050 |
| Pastizal | 0.040 |
| Urbana | 0.070 |
| Matorral | 0.045 |
| Río | 0.030 |

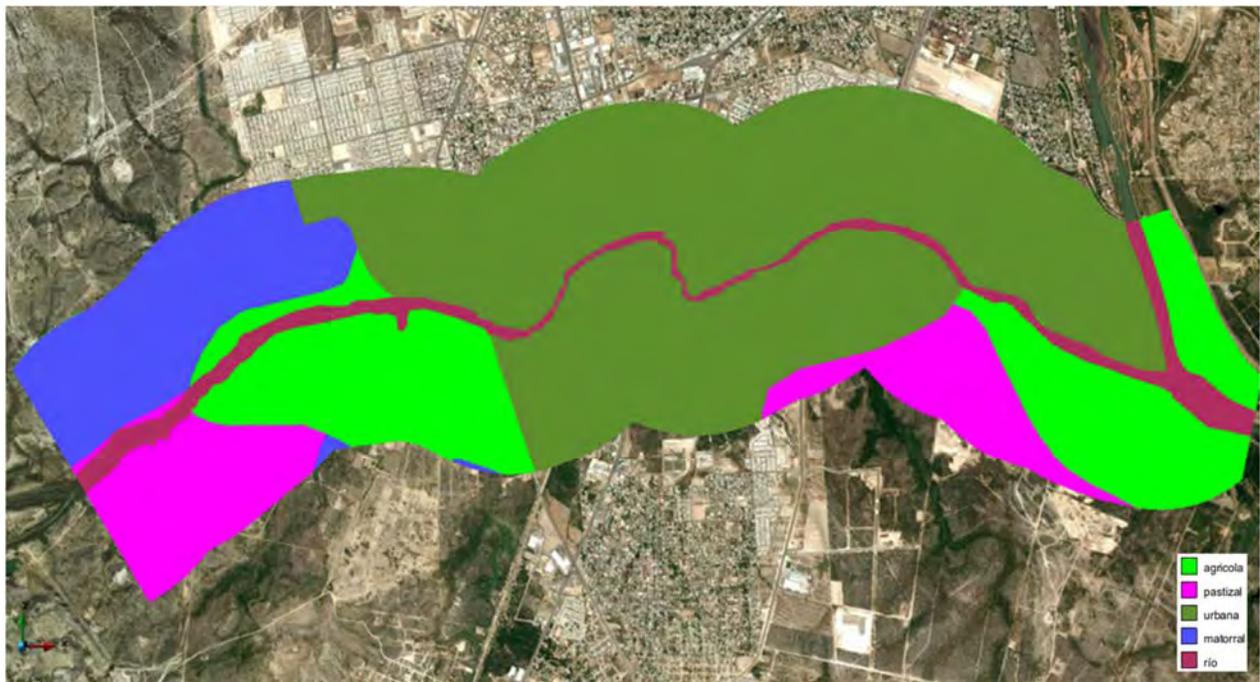


Imagen 4.8 – Asignación de coeficientes de rugosidad en la zona de estudio, mediante archivo de datos ASCII.

Una vez configurada la información necesaria, se realizó la modelación, con el sistema Iber, para ello inicialmente se cargó el área de estudio o marco geométrico de referencia en la que se delimita la zona de estudio a analizar, posteriormente se configuraron los parámetros correspondientes a las características del terreno, como los distintos tipos de coeficientes de rugosidad, los hidrogramas de entrada al modelo, asociados a los periodos

de retorno de 5, 10, 50, 100, 500 y 1,000 años, la zona de entrada de dichos hidrogramas, la salida del tránsito de los mismos por el cauce. Así como los tiempos de duración de la simulación, la cual se estableció en 157 horas (Figura 4.9).

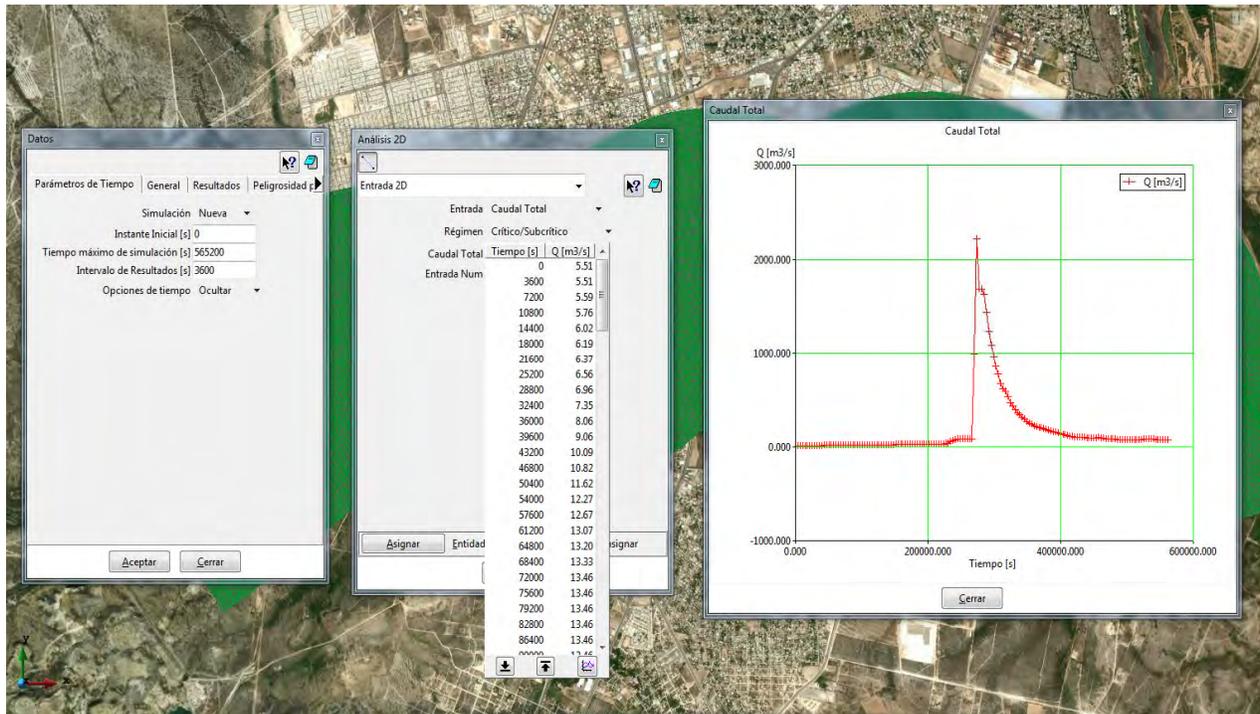


Imagen 4.9 – Configuración del tiempo de duración de la simulación, pasos de tiempo para el almacenamiento de resultados y parámetros hidráulicos.

Como se observa, particularmente en la representación del hidrograma, se puede distinguir que se consideró un tiempo considerable previo a la incidencia del gasto máximo, esto con objeto de establecer un caudal base en el tramo del río Escondido, del orden de $2.60 \text{ m}^3/\text{s}$, para de esta forma, contribuir a resultados más confiables que a su vez permitieran conocer el comportamiento hidráulico en la descarga del río Escondido, en el río Bravo.

Para la definición de las condiciones de frontera, se consideró que al ser el río Escondido un tributario del río Bravo, era necesario considerar el comportamiento hidráulico que se originaría en dicha confluencia y su efecto hacia aguas arriba en el río escondido; de ahí que se consideraron dos condiciones de entrada una definida inmediatamente aguas abajo de la confluencia de los ríos Escondido y San Antonio y la otra sobre el río Bravo, aguas arriba de su confluencia con el río Escondido, como se presenta en la Imagen 4.10. Así

mismo la condición de salida se estableció en la sección aguas abajo del tramo de río Bravo representado, mismo que se presenta en dicha imagen.

Es preciso mencionar que el modelo digital de elevaciones, representa un plano horizontal sobre la sección del cauce del río Bravo, mismo que se estima, constituye el nivel del agua en dicho cuerpo, al momento de efectuar el levantamiento satelital de la zona, por lo que para el desarrollo del presente análisis y con objeto de identificar el probable efecto de remanso que dicho escurrimiento ocasionaría en la sección aguas arriba de la confluencia de éste con el río Escondido, se consideró llevar a cabo la simulación, considerando un tirante de 1 m en todo el ancho de la sección hidráulica del río Bravo.



Imagen 4.10 – Determinación de condiciones de frontera en el modelo Iber.

Una vez efectuadas las configuraciones asociadas a cada uno de los escenarios propuestos para análisis, se realizó la simulación bidimensional (Imagen 4.11), empleado en promedio para cada uno de ellas, 5 días de cálculo.

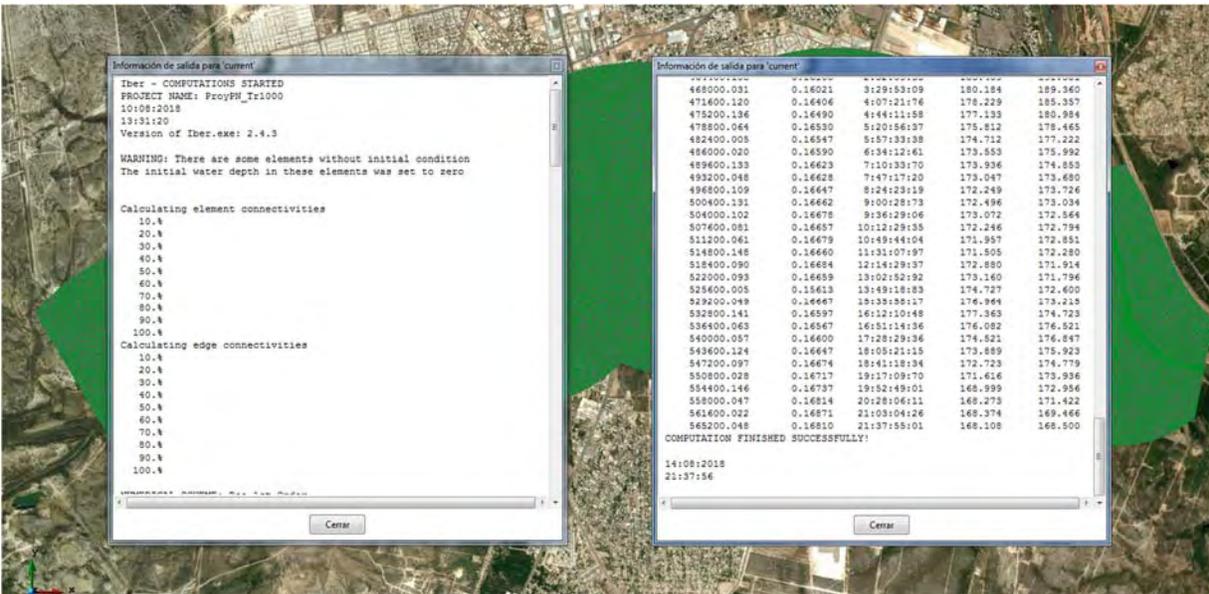


Imagen 4.11 – Ventanas estadísticas del proceso de ejecución de simulación en Iber.

4.5 – RESULTADOS

Como parte del postprocesamiento de los resultados obtenidos de la simulación bidimensional del río Escondido desarrollado en el modelo Iber, en las Imágenes 4.12 a la 4.23, se presentan los valores, máximos de tirantes y velocidades, de los escenarios asociados a los periodos de retorno de 5, 10, 50, 100, 500 y 1,000 años.

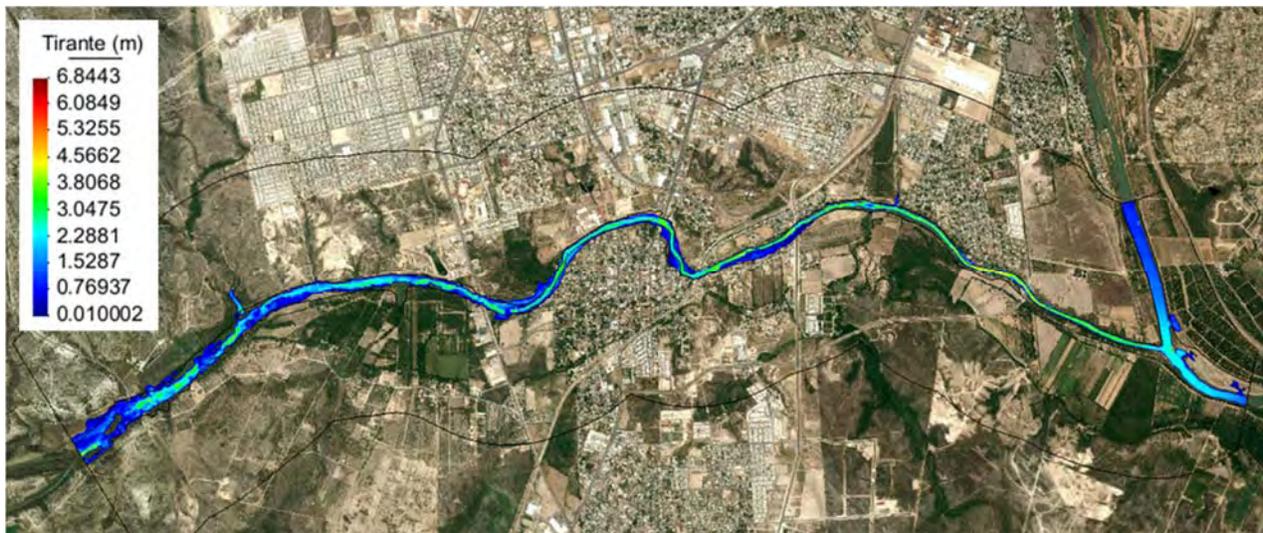


Imagen 4.12 – Tirantes máximos, correspondientes al tránsito de la avenida asociada a un periodo de retorno de 5 años.

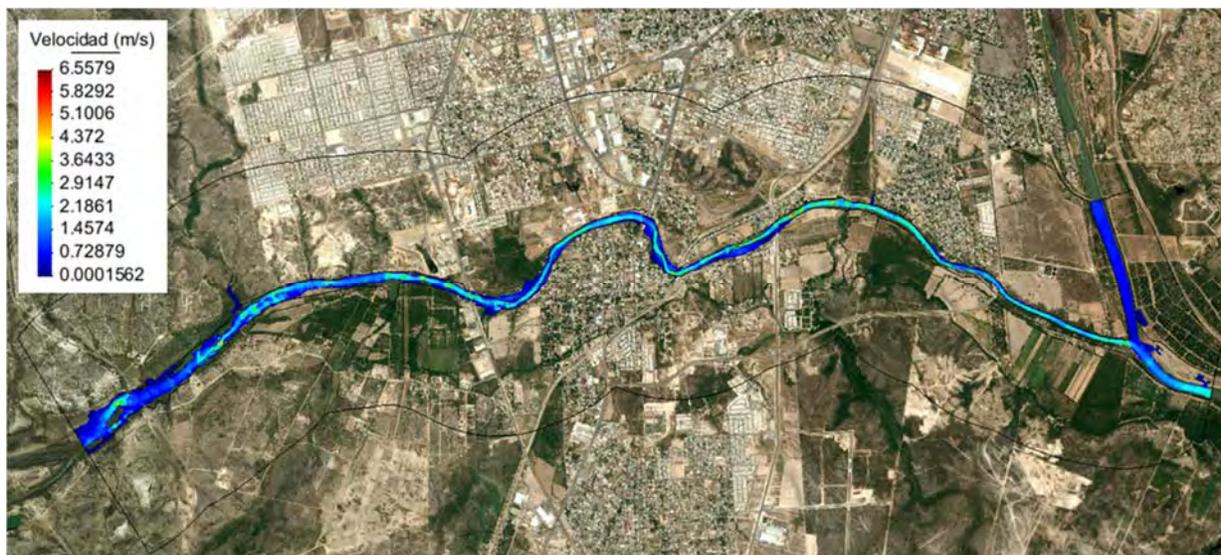


Imagen 4.13 – Velocidades máximas, correspondientes al tránsito de la avenida asociada a un periodo de retorno de 5 años.

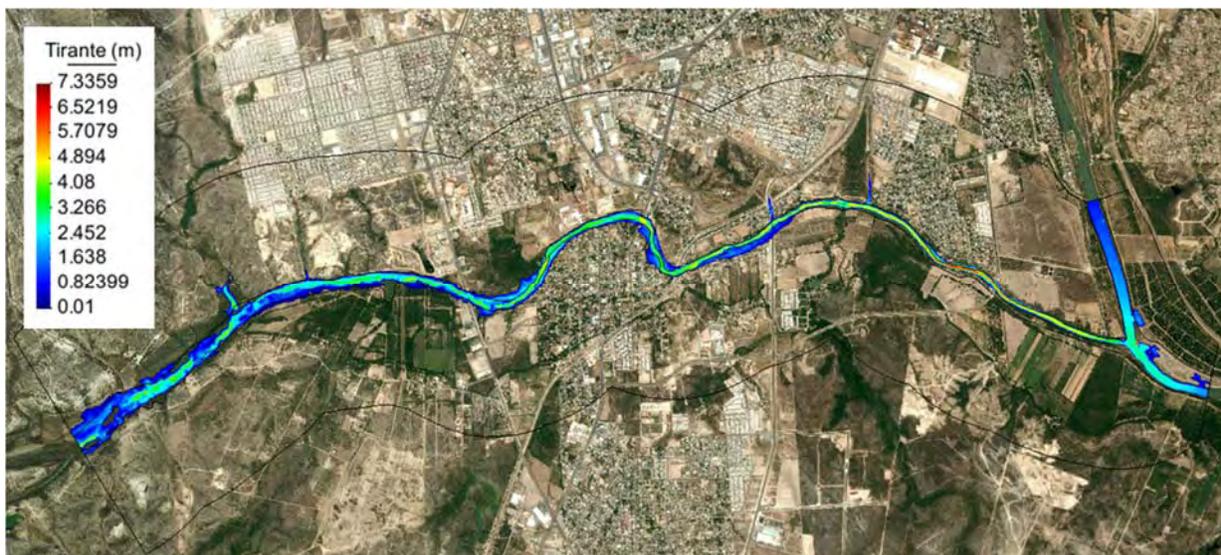


Imagen 4.14 – Tirantes máximos, correspondientes al tránsito de la avenida asociada a un periodo de retorno de 10 años.



Imagen 4.15 – Velocidades máximas, correspondientes al tránsito de la avenida asociada a un periodo de retorno de 10 años.



Imagen 4.16 – Tirantes máximos, correspondientes al tránsito de la avenida asociada a un periodo de retorno de 50 años.

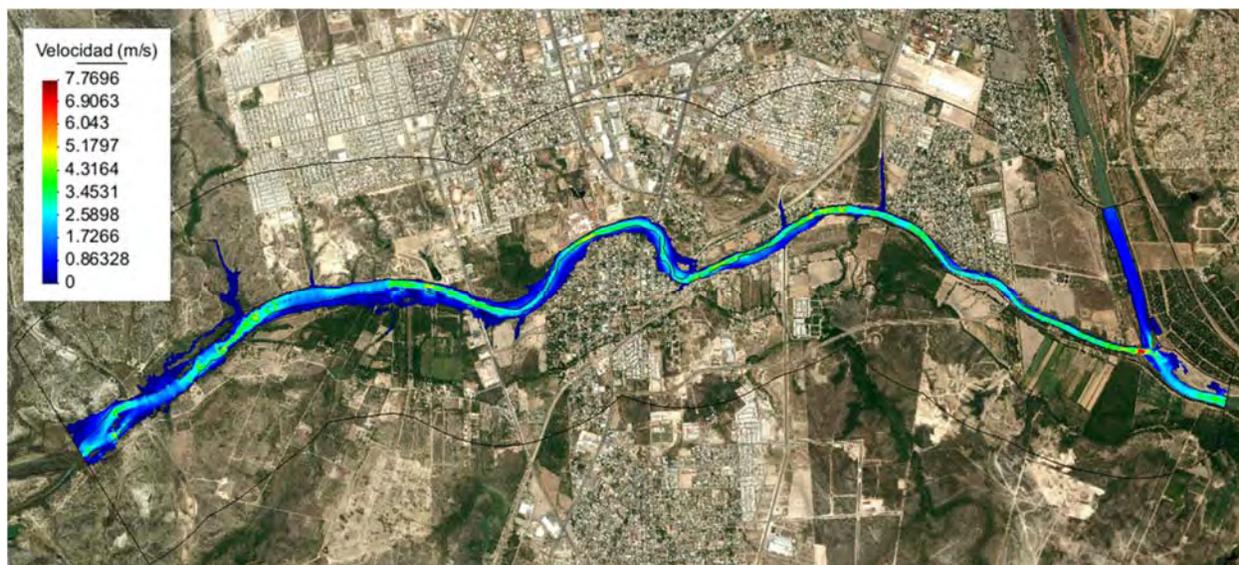


Imagen 4.17 – Velocidades máximas, correspondientes al tránsito de la avenida asociada a un periodo de retorno de 50 años.

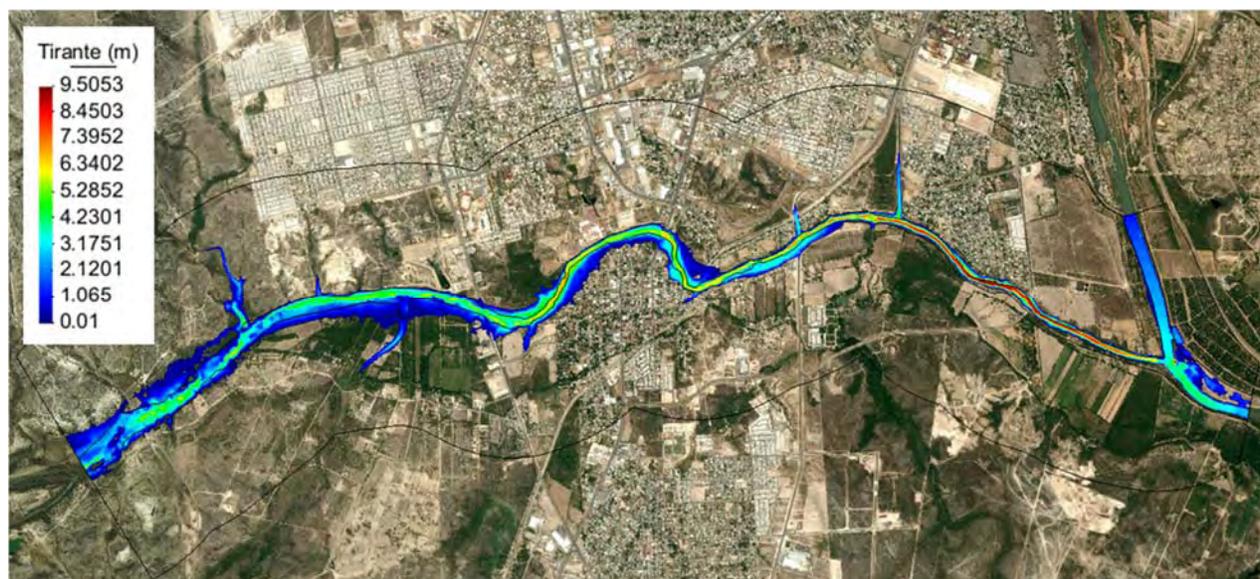


Imagen 4.18 – Tirantes máximos, correspondientes al tránsito de la avenida asociada a un periodo de retorno de 100 años.



Imagen 4.19 – Velocidades máximas, correspondientes al tránsito de la avenida asociada a un periodo de retorno de 100 años.



Imagen 4.20 – Tirantes máximos, correspondientes al tránsito de la avenida asociada a un periodo de retorno de 500 años.



Imagen 4.21 – Velocidades máximas, correspondientes al tránsito de la avenida asociada a un periodo de retorno de 500 años.



Imagen 4.22 – Tirantes máximos, correspondientes al tránsito de la avenida asociada a un periodo de retorno de 1000 años.



Imagen 4.23 – Velocidades máximas, correspondientes al tránsito de la avenida asociada a un periodo de retorno de 1000 años.

4.6 – ANÁLISIS Y PROCESAMIENTO DE RESULTADOS

Una vez extraídos del modelo de simulación bidimensional Iber los resultados asociados a tirantes y velocidades máximas, correspondientes a los distintos escenarios considerados para el desarrollo del caso de aplicación, se procedió a efectuar su análisis y procesamiento, aplicando primeramente la normatividad vigente para la delimitación de la zona federal y subsecuentemente la implementación de los criterios y metodologías para la determinación del peligro, la vulnerabilidad y el riesgo de inundación para cada uno de ellos.

4.6.1 – Delimitación de la zona federal

De acuerdo con la legislación que, en materia de delimitación de la zona federal, se dispone a nivel nacional, en la cual se define y establece que **“La ribera o zona federal, serán las fajas de diez metros de anchura contiguas al cauce de las corrientes o al vaso de los depósitos de propiedad nacional, medidas horizontalmente a partir del nivel de aguas máximas ordinarias”**. (Ley de Aguas Nacionales). Así mismo, en el Reglamento del citado instrumento legal, se establece que, para la delimitación de la zona

federal, **“La creciente máxima ordinaria estará asociada a un período de retorno de cinco años”**.

Como parte del presente análisis de peligro, vulnerabilidad y riesgo de inundaciones fluviales y en particular para este caso de ampliación, se han analizado dichos criterios, respecto a los cuales, en primera instancia, el establecido en el Reglamento de la Ley de Aguas Nacionales, se cumple satisfactoriamente, lo que denota que se ha tomado en cuenta para evitar los asentamientos en las proximidades del cauce y por ende propiciar con ello una localización más propicia para los nuevos desarrollos habitacionales, como se muestra en la Imagen 4.24.

Adicionalmente, de acuerdo a la reciente actualización de los periodos de retorno aplicables para diferentes obras hidráulicas, emitida por la Subdirección General Técnica, de la Comisión Nacional del Agua, el pasado 13 de septiembre de 2017, en la cual se ha determinado que para la delimitación de zonas federales, en zonas áridas con régimen de escurrimiento errático, se debe considerar un periodo de retorno de 10 años o superior; razón por la cual se procedió a analizar dicho criterio, cuyo resultado de análisis geoespacial, se presenta en la Imagen 4.25; donde se observa que de implementarse la delimitación de dicha zona, serian mínimas las viviendas involucradas para su posible reubicación, así como la infraestructura pública-urbana, las cuales en conjunto se encuentran ubicadas en la margen derecha del río Escondido.



Imagen 4.24 – Análisis del efecto de inundación en la delimitación de la zona federal, asociada a un periodo de retorno de 5 años.



Imagen 4.25 – Análisis del efecto de inundación en la delimitación de la zona federal, asociada a un periodo de retorno de 10 años.

De forma tal que de acuerdo a los criterios y normatividad vigentes para la delimitación de la zona federal, esta debe estar delimitada por la mancha de inundación de la avenida asociada al periodo de retorno mínimo de 10 años, situación que para el caso de estudio no representa mayor complicación; sin embargo esto no siempre es posible de efectuar, puesto que en sitios que representan condiciones más críticas tanto para el funcionamiento hidráulico de los cauces y por ende en la seguridad de la población, es difícil de establecer, esto debido a la problemática social que la reubicación implícita ocasionaría.

Efectuada la delimitación de la zona federal en las inmediaciones del tramo del río Escondido bajo análisis, es posible efectuar una comparativa entre la normatividad aplicada, respecto a las que se implementan tanto en España, como en Estados Unidos, descritas en los apartados 2.3.2 y 2.3.3, respectivamente. De forma que, para el primer país citado, resulta evidente, de acuerdo a lo mostrado en la Imagen 4.25, que la zona federal determinada, no cumpliría con la denominada zona de policía, establecida en 100 m de ancho hacia cada una de las márgenes, puesto que se cuenta con asentamientos humanos en dichas franjas. Respecto a la comparación con la legislación de los Estados Unidos, resulta evidente que no está desarrollada para la implementación de criterios de aplicación generales, como sucede en México, de ahí que no sea posible efectuar una comparación consistente. Sin embargo pese a ello, resulta interesante su formulación, ya que considera una serie de factores hidrológicos, morfológicos y de uso del agua, que podrían en un futuro ser incorporados a la normatividad para la delimitación de la zona federal en México.

4.6.2 – Determinación del peligro

Con relación a la distribución de velocidades y tirantes, derivados del análisis bidimensional del río Escondido, efectuado mediante el empleo del programa Iber, cuya breve representación gráfica de los resultados se ha presentado en el apartado 4.5, se procedió a identificar la zona urbana o núcleo poblacional en donde se presenta de acuerdo a los citados resultados obtenidos, dichos parámetros máximos, mediante los cuales, es posible la determinación de la peligrosidad a la que estaría expuesta la zona de estudio, ante la incidencia de avenidas asociadas a los distintos periodos de retorno consideradas para el análisis.

Posteriormente, a partir del análisis de la evolución de los valores máximos en dicha zona, representada a través de las diferentes curvas de progreso del tiempo de simulación, correspondiente a 157 horas, se identificaron los valores correspondientes a profundidad (h) y velocidad (v), los cuales se presentan en la Tabla 4.4.

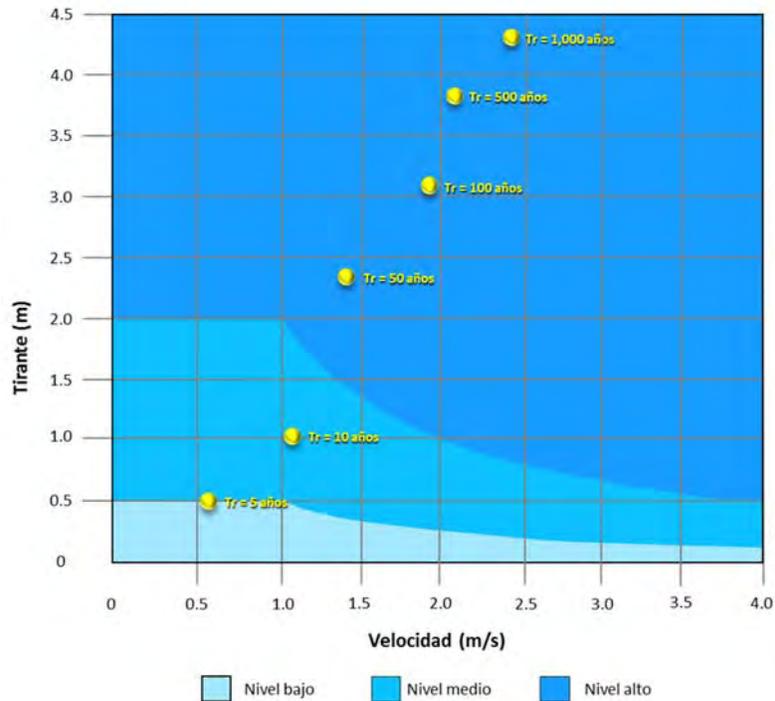
Tabla 4.4 – Valores máximos de profundidad y velocidad en la zona urbana, susceptible al efecto de inundación.

| Periodo de retorno (Años) | Tirante máximo (m) | Velocidad máxima (m/s) |
|------------------------------|-----------------------|---------------------------|
| 5 | 0.50 | 0.60 |
| 10 | 1.00 | 1.10 |
| 50 | 2.30 | 1.40 |
| 100 | 3.10 | 1.90 |
| 500 | 3.80 | 2.10 |
| 1,000 | 4.30 | 2.40 |

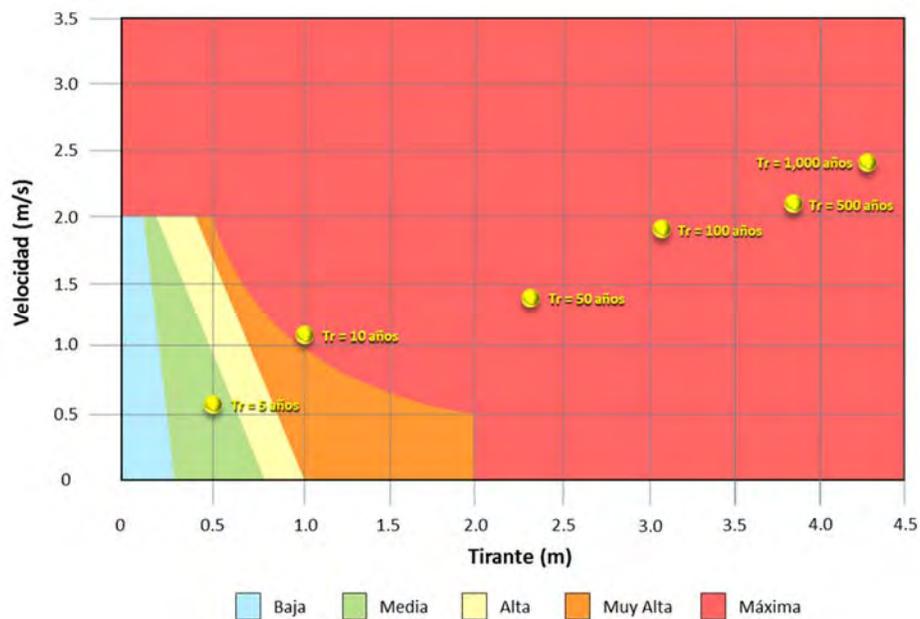
Por otra parte, a partir de los valores máximos de velocidades y profundidad del agua en la zona urbana enmarcada dentro del área de estudio, se efectuó la evaluación del peligro al que está expuesta dicha zona, para ello, se efectuó la representación gráfica de los valores máximos de referencia para cada uno de los eventos probabilísticos considerados, obteniéndose el comportamiento descrito en las Gráfica 4.4, 4.5 y 4.6. De esta manera y solamente para el $T_r = 1,000$ años, con aplicación del criterio de Dórrigo, en la imagen 4.26, se presenta la combinación de h_{max} y v_{max} y en la figura 4.27 el mapa de peligro correspondiente.

A partir de lo anterior, se infiere que la peligrosidad a la que está expuesta la ciudad de Piedras Negras, Coahuila, es de nivel alto de acuerdo a los criterios Francés y del FEMA,

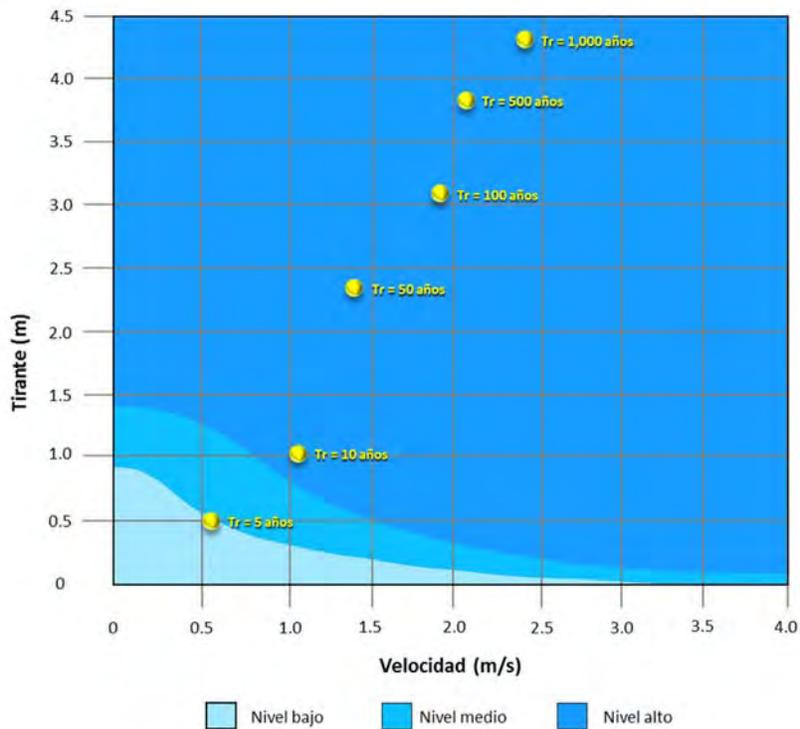
y máxima de acuerdo al criterio Australiano, lo que refleja la constante incidencia de inundaciones, como se ha referido en el apartado 4.2.



Gráfica 4.4 – Estimación de la peligrosidad de inundación, asociadas a distintos periodos. Criterio desarrollado por el gobierno Francés. Adaptada de Loat y Petrascheck (1997).



Gráfica 4.5 – Estimación de la peligrosidad, empleando el criterio desarrollado por el Gobierno de Australia, implementado en la Ciudad de Dórrigo.



Gráfica 4.6 – Estimación de la peligrosidad de inundación, asociadas a distintos periodos. Criterio desarrollado por la Agencia Federal para el Manejo de Emergencias de los Estados Unidos.

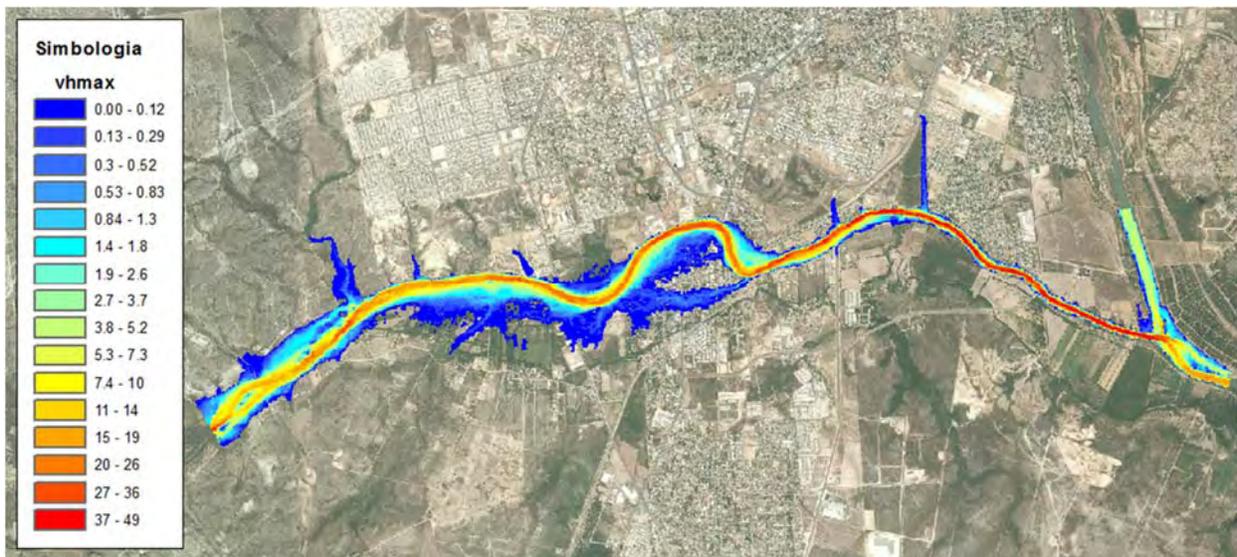


Imagen 4.26 – Distribución de la relación profundidad-velocidad máximas, resultantes del tránsito de la avenida asociada al periodo de retorno de 1,000 años; implementado el criterio de la Ciudad de Dórrigo.

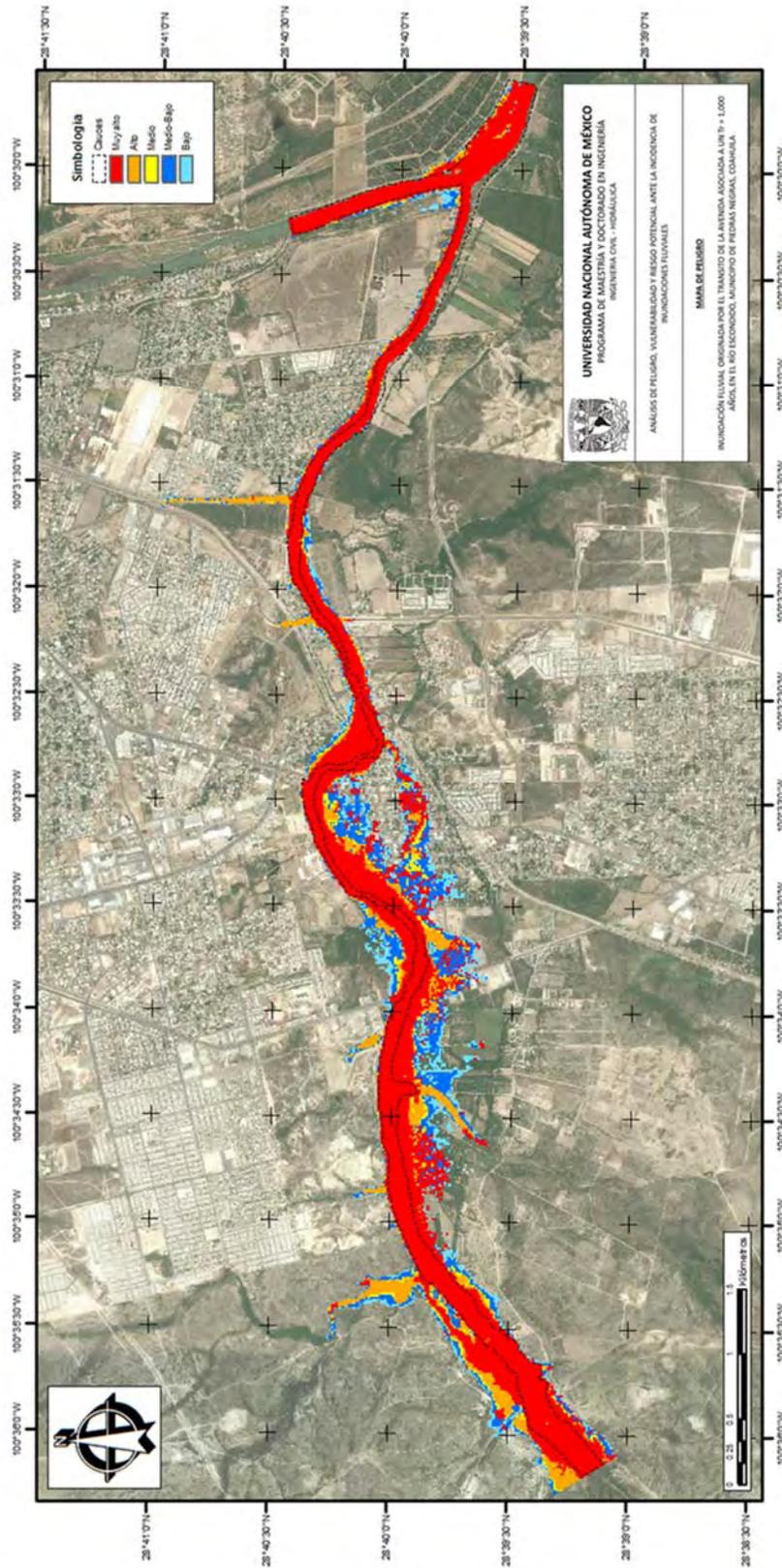


Imagen 4.27 – Mapa de peligro de la inundación fluvial originada por el tránsito de la avenida asociada a un $T_r = 1,000$ años, en el río Escondido, Piedras Negras, Coahuila.

4.6.3 – Determinación de la vulnerabilidad y riesgo

De acuerdo al análisis de la información geoestadística, obtenida a través del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) y la desarrollada y procesada en este trabajo, se procedió a efectuar su contraste con las manchas de inundación asociadas a los periodos de retorno de referencia del presente caso de aplicación, con objeto de estimar la vulnerabilidad, asociada a cada uno de ellos. Para tal efecto, se consideraron las probables afectaciones a la infraestructura pública, privada, de servicios, comunicaciones y enseres domésticos, cuyo proceso de estimación, se describe a continuación para la condición más crítica, la cual está asociada a un $Tr = 1,000$ años, siendo reiterativo para los demás escenarios analizados.

4.6.3.1 – Viviendas

Para la determinación de la localización y tipo de vivienda predominante en la zona de estudios, misma que no se incluye particularizada en la información que se encuentra disponible en el (INEGI), se procedió a efectuar el levantamiento mediante recorridos virtuales con la herramienta Street View del programa Google Earth Pro, en su versión 7.3.2, con lo cual se contabilizó un total de 9,200 viviendas en el área de influencia de la zona en estudio, como se observa en la Imagen 4.28.

De acuerdo a la identificación visual de las características de las casas, se consideró que la vivienda predominante en la zona de estudio corresponde a la Tipo V, clasificada como residencial, construida con acabados y elementos decorativos que incrementan sustancialmente su valor (Imagen 4.29). El menaje está formado por artículos de buena calidad y con muchos elementos de comodidad (CENAPRED, 2006); el grado de afectación de acuerdo a diferentes tirantes de agua se presenta en la Figura 4.1, la cual está asociada a la curva de daño mostrada en la Gráfica 2.9.

A partir de la superposición de la mancha de inundación y el conjunto de viviendas en la zona de estudio, mostrada en la Imagen 4.30, se logró determinar la cantidad de viviendas potenciales a ser afectadas con la inundación asociada a un $Tr = 1,000$ años, las cuales ascienden a 907; a partir de ello, en base a la curva de vulnerabilidad (Gráfica 2.9) y el monto asociado al tipo de menaje en la vivienda (CENAPRED, 2006), actualizado a precios de 2018, correspondiente a \$525,115.87, se procedió a llevar a cabo la estimación de los potenciales daños como se presenta en la Tabla 4.5.



Imagen 4.28 – Distribución de viviendas en la zona de estudio.



Imagen 4.29 – Caracterización del tipo de vivienda predominante en la zona de estudio.



Figura 4.1 – Menaje para la vivienda tipo V (dos plantas) (CENAPRED, 2006).

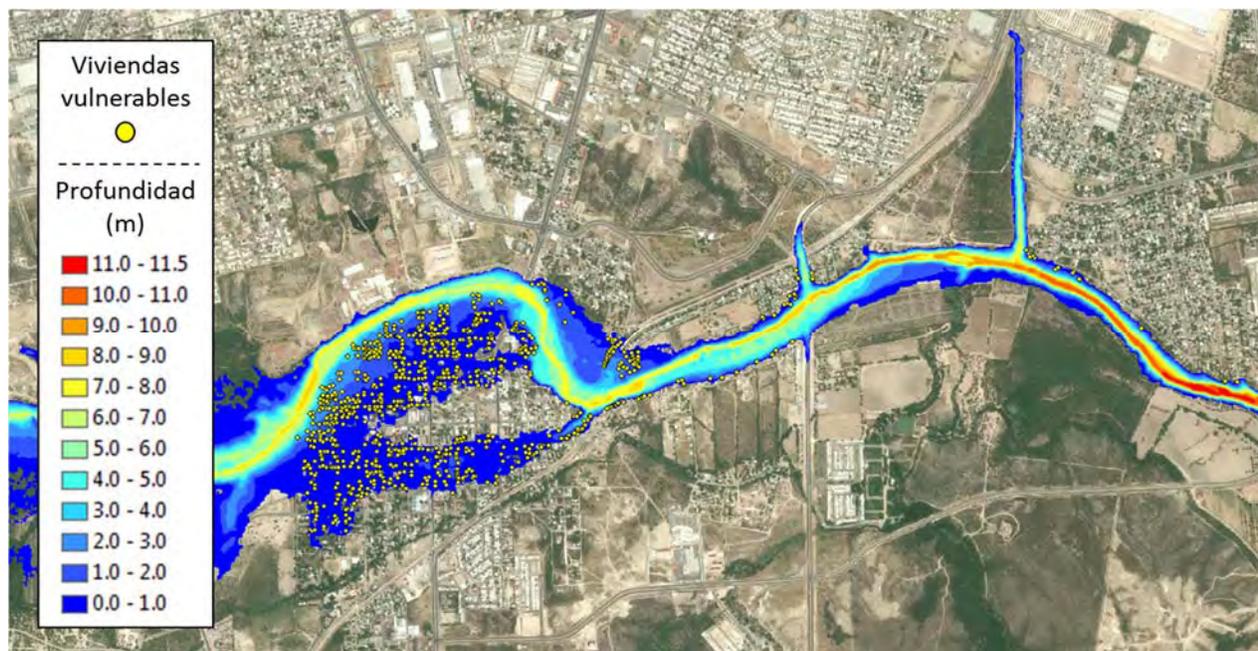


Imagen 4.30 – Viviendas afectadas con el tránsito de la avenida asociada a un $Tr = 1,000$ años.

Tabla 4.5 – Estimación de la vulnerabilidad y daño en viviendas.

| Vivienda | Tipo | Inundación | | Vulnerabilidad | Índice de vulnerabilidad | Monto del daño estimado (\$) |
|--------------|------|-----------------|-----------------|----------------|--------------------------|------------------------------|
| | | Profundidad (m) | Velocidad (m/s) | | | |
| 1 | V | 3.40 | 1.50 | Alta | 0.95 | \$498,860.08 |
| 2 | V | 4.40 | 2.10 | Alta | 1.00 | \$522,490.29 |
| 3 | V | 3.50 | 1.70 | Alta | 0.95 | \$498,860.08 |
| 4 | V | 3.10 | 1.60 | Alta | 0.95 | \$498,860.08 |
| 5 | V | 2.90 | 1.60 | Alta | 0.52 | \$273,060.25 |
| 6 | V | 2.70 | 1.40 | Alta | 0.52 | \$273,060.25 |
| 7 | V | 2.70 | 1.40 | Alta | 0.52 | \$273,060.25 |
| 8 | V | 2.50 | 1.90 | Alta | 0.48 | \$249,430.04 |
| 9 | V | 1.70 | 1.70 | Alta | 0.48 | \$249,430.04 |
| 10 | V | 2.40 | 1.50 | Alta | 0.48 | \$249,430.04 |
| . | . | . | . | . | . | . |
| . | . | . | . | . | . | . |
| . | . | . | . | . | . | . |
| 905 | V | 2.50 | 1.70 | Alta | 0.48 | \$249,430.04 |
| 906 | V | 1.80 | 0.70 | Alta | 0.48 | \$249,430.04 |
| 907 | V | 1.40 | 0.40 | Alta | 0.48 | \$249,430.04 |
| Total | | | | | | \$125,560,456.40 |

4.6.3.2 – Bodegas y comercios

Respecto a la cuantificación de los negocios en la zona de estudio, susceptibles a ser afectados por la incidencia de la avenida asociada al periodo de retorno de 1,000 años, se desarrolló el mismo procedimiento empleado con las viviendas, a partir de lo cual se identificaron un total de 32 bodegas y/o comercios, distribuidos como se muestra en la Imagen 4.31.

Partiendo de la cuantificación, se efectuó la estimación de la vulnerabilidad en bodegas y/o comercios y su impacto en términos de daños, se consideraron montos índices de inversión vía financiamiento, establecidos en el Programa de Financiamiento para el Emprendedor a través de la Banca Comercial, implementado por la Secretaria de Economía, a partir de lo cual se distinguen dos tipos de negocios tradicionales: de tecnología intermedia y los de alta tecnología, cuyos montos de inversión requeridos para su puesta en operación oscilan entre los \$ 50,000 – \$ 500,000 pesos y los \$ 200,000 - 1.5 millones de pesos, respectivamente. (Secretaria de Economía, 2018).

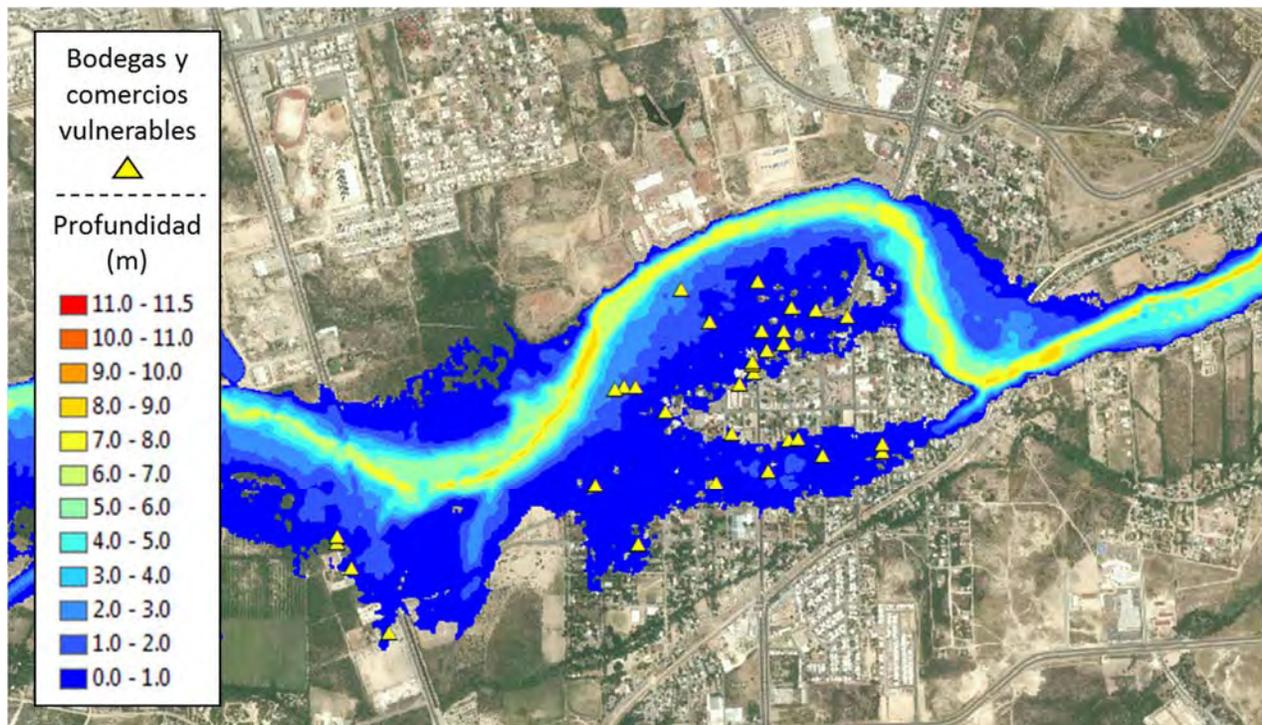


Imagen 4.31 – Bodegas y comercios afectados a consecuencia de la eventual inundación.

Dada la imposibilidad referencial de conocer la disposición de las mercancías en los distintos locales comerciales y bodegas localizados en la zona, para la formulación de una gráfica o función de vulnerabilidad representativa para su estimación, en base a la recopilación de información, se identificó que la mayoría de los negocios son del tipo tradicional (abarrotes principalmente) y algunas bodegas de diversos materiales, por lo que para llevar a cabo la estimación monetaria de los potenciales daños, se ha considerado un valor ponderado, que asciende a un monto por establecimiento comercial de \$ 360,000.00, el cual se ubica por arriba de la media de los valores contemplados para el tipo de negocio de referencia en el citado programa implementado por la Secretaria de Economía.

De esta forma, a partir de la superposición de la mancha de inundación y la capa de identificación y localización de las bodegas y/o comercios, se estimó que para la inundación que origina el tránsito de la avenida asociada a un periodo de retorno de 1,000 años, el monto de la afectación potencial es del orden de \$ 11,520,000.00.

4.6.3.3 – Planteles escolares

En la zona de influencia del presente análisis, se identificaron instalaciones educativas tan solo correspondientes al nivel de educación básica (preescolar y primaria), por lo que para llevar a cabo la estimación de las afectaciones producidas por la inundación ocasionada por la avenida extraordinaria considerada para el análisis, se recurrió al empleo de la curva de vulnerabilidad mostrada en la Grafica 2.10

A partir de la identificación de afectaciones que se originan con el tránsito de la avenida asociada al periodo de retorno de referencia para el desarrollo del presente caso de análisis, se determinó que son afectadas en total dos escuelas, de los niveles preescolar y primaria, distribuidas como se muestra en la Imagen 4.32. Por otra parte, los índices de vulnerabilidad asociados a los niveles de elevación del agua en cada una de ellas, se presentan en la Tabla 4.6; a partir de los cuales se han efectuado la estimación de los daños potenciales al mobiliario.

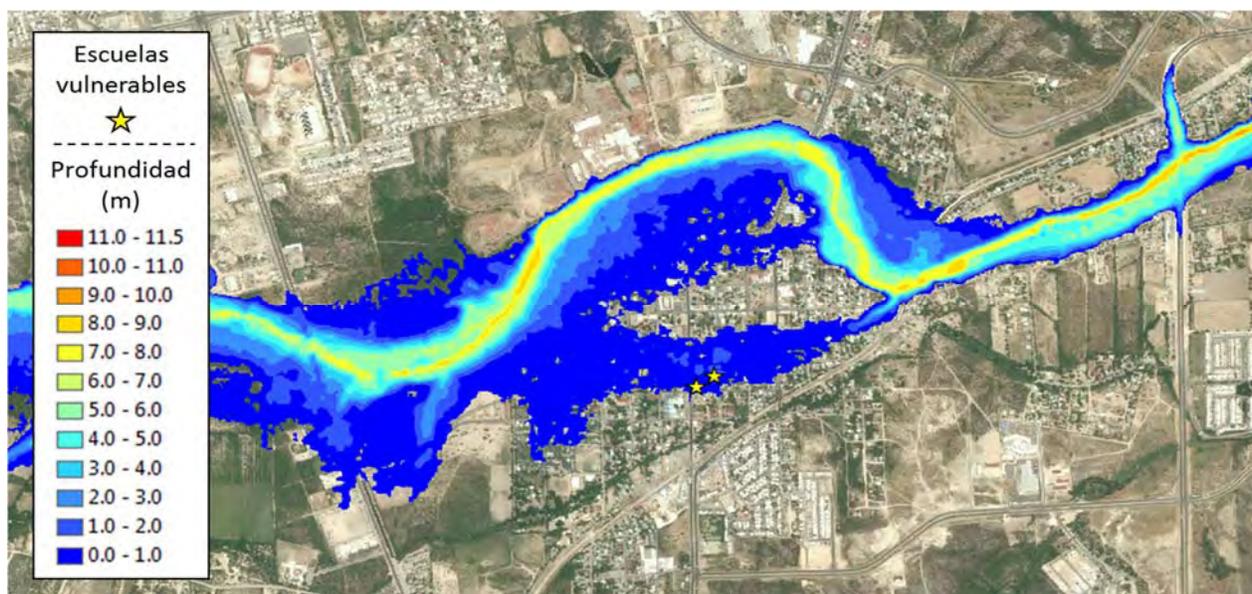


Imagen 4.32 – Localización de las escuelas de educación básica, afectadas con la inundación.

Es pertinente mencionar que para la determinación del daño, se consideró el monto de referencia emitido por la Secretaria de Educación Pública para la rehabilitación y equipamiento de aulas a nivel nacional, el cual de acuerdo a dicha fuente oficial, se ha considerado del orden de \$ 180,000.00 a precios de 2018, por aula (SEP, 2018).

Tabla 4.6 – Estimación de la vulnerabilidad y daño en escuelas de educación básica.

| Topo de escuela | Número de aulas | Inundación | | Índice de vulnerabilidad | Monto del daño estimado (\$) |
|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|--------------------------|------------------------------|
| | | Profundidad (m) | Velocidad (m/s) | | |
| Preescolar | 5 | 0.45 | 0.20 | 0.42 | \$88,219.47 |
| Primaria | 18 | 0.70 | 0.40 | 0.62 | \$130,228.74 |
| Total | | | | | \$233,151.45 |

4.6.3.4 – Centros socio-culturales y religiosos

Para la determinación de la vulnerabilidad en estos centros, orientados básicamente a la asistencia social y profesión de culto, se ha recurrido a la Gráfica 2.15, asociada a la estimación de la vulnerabilidad para infraestructura urbana, determinada o establecida por el Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino, de España, en la cual se refiere que se considera o catalogan como daño a mobiliario urbano que incluye a los bancos, oficinas de gobierno y demás instituciones públicas.

Para la determinación de las afectaciones se procedió a efectuar el cruce de la información raster de la mancha de inundación asociada a la avenida correspondiente al periodo de retorno de 1,000 años, con el correspondiente conjunto de datos vectoriales, que representan dichos centros, por medio de lo cual fue posible identificar que 10 centros son susceptibles a sufrir afectaciones, tal como se muestra en la Imagen 4.33.

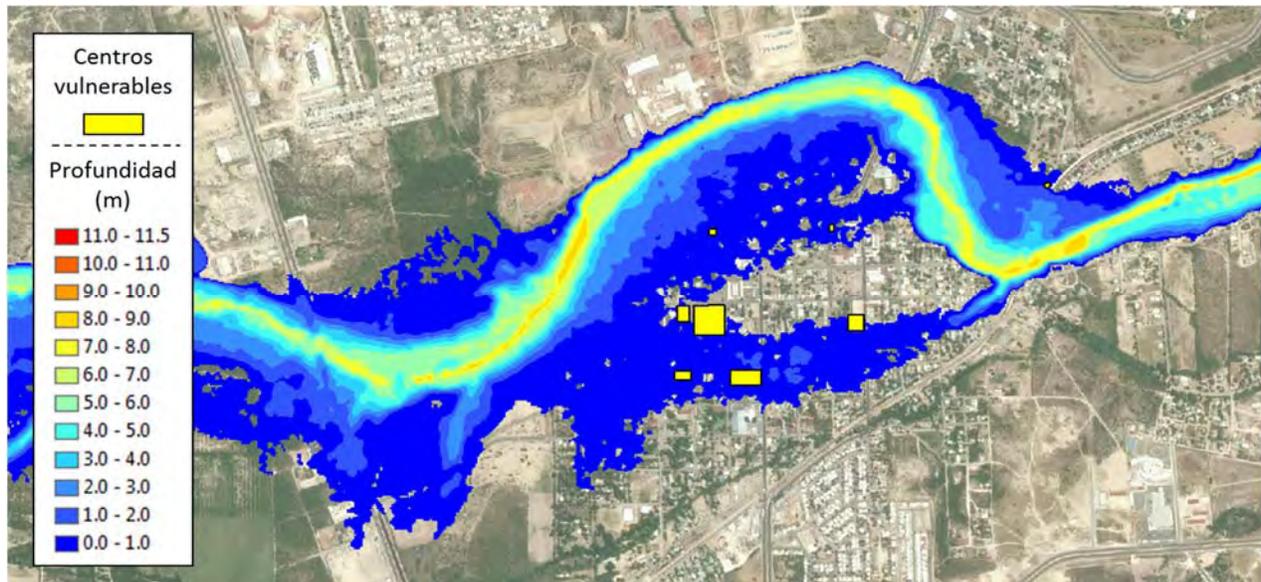


Imagen 4.33 – Distribución de los centros socio-culturales y religiosos, susceptibles a ser afectados.

Como los datos requeridos de acuerdo a los criterios para la estimación de la vulnerabilidad, establecidos por el citado Ministerio, están representados en unidades de €/m², se procedió a estimar el área de afectación, asociada al tirante que se presenta en ella, de acuerdo al siguiente procedimiento:

1. Se efectuó la extracción de información raster ya fuera del correspondiente a tirantes o velocidades, en base a la capa vectorial que representa la infraestructura con potencial de sufrir afectación. Es preciso mencionar que para el caso de la infraestructura representada por líneas, fue necesario generar un buffer del ancho representativo de la infraestructura, no siendo menor al ancho de la celda del modelo digital de elevaciones, para que la representación sea consistente con el trazo.
2. La porción del raster extraído, que representa el área de afectación, se convirtió a puntos, como se muestra en la secuencia mostrada en la Imagen 4.34.

- Una vez generada la nube de puntos, se procedió a la extracción de valores máximos de profundidad y velocidad del raster, para su respectiva asignación a cada uno de los puntos que representan las celdas.

Nota: Para el caso de la infraestructura cuyo ancho fue inferior o mayor al de la celda del modelo digital de elevación (5 m x 5 m), se procedió a la estimación de la superficie en hoja de cálculo de Microsoft Excel, considerando el ancho correspondiente y preservando como longitud, la dimensión que de origen presenta cada una de las celdas.

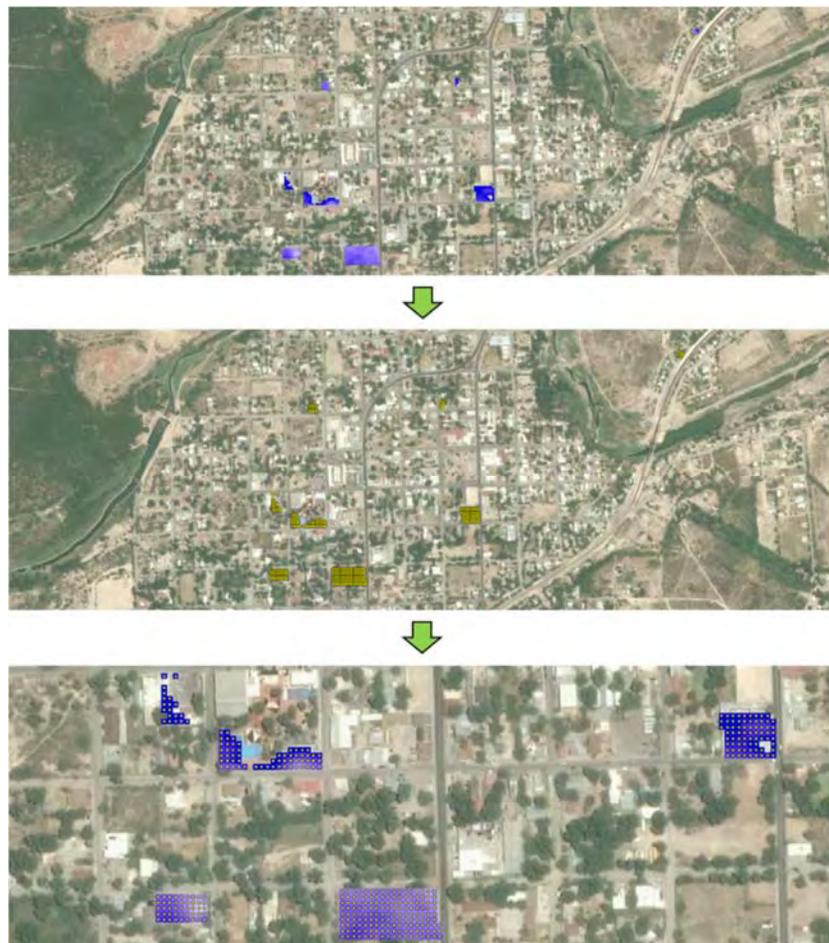


Imagen 4.34 – Secuencia del proceso para la determinación de la superficie afectada, correspondiente a centros socio-culturales y religiosos, en función de la profundidad del agua.

A partir de la realización del procedimiento descrito, se estimó la superficie de afectación y en correlación, de acuerdo a la metodología empleada, se considera que el costo unitario

de afectación asciende a 2.5 €/m² (\$ 54.58/m²; considerando 1€ = \$ 21.83); con lo que, a partir de dicho monto en moneda nacional, fue posible llevar a cabo la estimación del daño potencial a dichos centros, ante la incidencia de la avenida considerada para el análisis, como se muestra en la Tabla 4.7.

Tabla 4.7 – Estimación de la vulnerabilidad y daño a centros socio-culturales y religiosos.

| Punto | Inundación | | Superficie (m ²) | Índice de vulnerabilidad | Monto del daño estimado (\$) |
|--------------|-----------------|-----------------|------------------------------|--------------------------|------------------------------|
| | Profundidad (m) | Velocidad (m/s) | | | |
| 1 | 0.30 | 0.20 | 25.00 | 0.10 | \$136.45 |
| 2 | 0.60 | 0.40 | 25.00 | 0.20 | \$272.90 |
| 3 | 0.40 | 0.30 | 25.00 | 0.10 | \$136.45 |
| 4 | 0.20 | 0.30 | 25.00 | 0.05 | \$68.23 |
| 5 | 0.80 | 0.50 | 25.00 | 0.30 | \$409.35 |
| 6 | 0.60 | 0.40 | 25.00 | 0.20 | \$272.90 |
| 7 | 0.40 | 0.40 | 25.00 | 0.10 | \$136.45 |
| 8 | 0.80 | 0.50 | 25.00 | 0.30 | \$409.35 |
| 9 | 0.20 | 0.30 | 25.00 | 0.05 | \$68.23 |
| 10 | 0.20 | 0.20 | 25.00 | 0.05 | \$68.23 |
| . | . | . | . | . | . |
| . | . | . | . | . | . |
| . | . | . | . | . | . |
| 379 | 0.20 | 0.20 | 25.00 | 0.05 | \$68.23 |
| 380 | 0.60 | 0.60 | 25.00 | 0.20 | \$272.90 |
| 381 | 0.60 | 0.60 | 25.00 | 0.20 | \$272.90 |
| Total | | | 9,525.00 | ----- | \$93,468.25 |

4.6.3.5 – Calles

El Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino, de España, señala que toda inundación lleva consigo el arrastre de gran cantidad de materiales; por ello es importante en la estimación de la vulnerabilidad y daños, considerar además de los posibles daños a la infraestructura, el proceso de limpieza de vialidades.

Para la estimación de la vulnerabilidad a la cual estarían expuestas las calles de las colonias Delicias, Periodistas y Villa de Fuentes, se procedió a efectuar el traslape de la mancha de inundación sobre la capa vectorial del trazo de las calles en dichas colonias, a partir de lo cual, mediante el análisis y procesamiento de la información geoestadística, se

determinó el grado de afectación que dicha inundación asociada al periodo de retorno de referencia provocaría a las calles, como se observa en la Imagen 4.35.

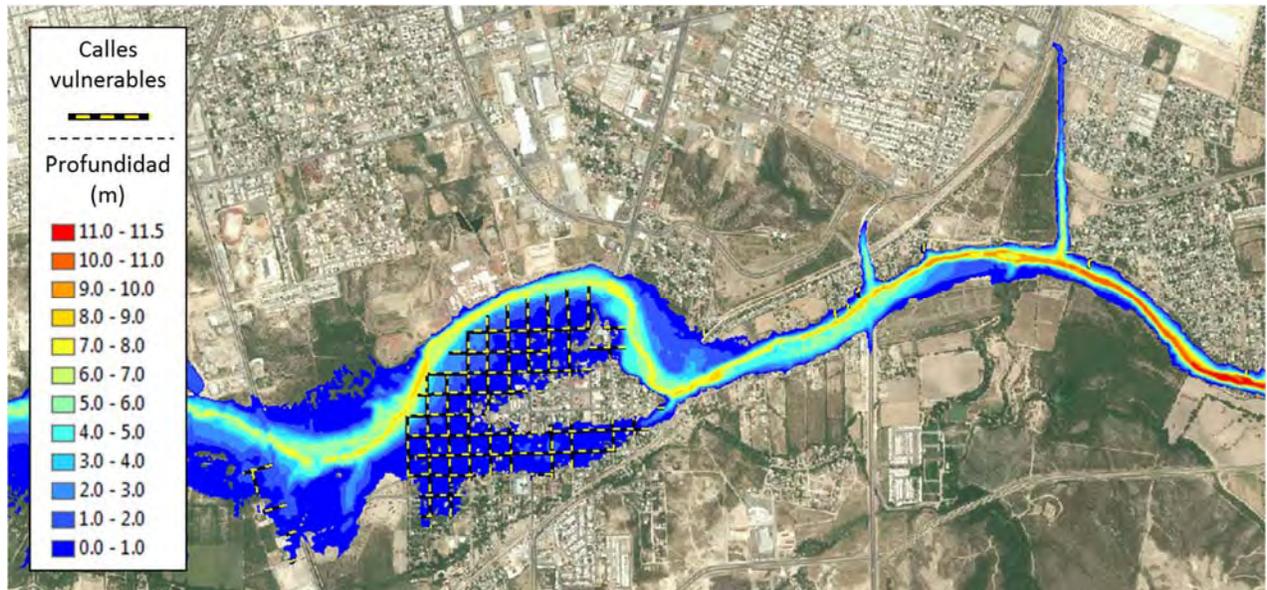


Imagen 4.35 – Localización de las calles, con probabilidad de ser afectada, ante la incidencia de la inundación.

Como primera estimación del grado de afectación, se procesó la estimación lineal de las afectaciones, sin embargo de acuerdo a la metodología del Ministerio del Medio Ambiente de España, la forma de evaluar la vulnerabilidad de las calles, es base a la superficie de afectación, expresada en m^2 . Es por ello, que se aplicó el mismo procedimiento empleado para la estimación de la vulnerabilidad a centros socio-culturales y religiosos, descrito en el apartado 4.6.3.4 y cuya secuencia gráfica para la determinación de la superficie de afectación en calles, se presenta en la Imagen 4.36.



Imagen 4.36 – Proceso para la determinación de la superficie de calles afectadas.

A partir de la determinación de la superficie de afectación, la cual asciende a 119,875 m², se generó la Tabla 4.8, donde de acuerdo a la función de vulnerabilidad para vialidades, representada en la Gráfica 2.14, fue posible determinar el índice respectivo; base para la determinación de los potenciales daños a este componente de infraestructura urbana.

De acuerdo a la metodología del citado Ministerio, se consideró un monto por concepto de limpieza de las calles de 1.5 €/m² (\$ 33.45/m²).

Tabla 4.8 – Estimación de la vulnerabilidad y daño en calles.

| Punto | Inundación | | Superficie (m ²) | Índice de vulnerabilidad | Monto del daño estimado (\$) |
|--------------|-----------------|-----------------|------------------------------|--------------------------|------------------------------|
| | Profundidad (m) | Velocidad (m/s) | | | |
| 1 | 0.20 | 0.10 | 25.00 | 0.05 | \$41.81 |
| 2 | 0.30 | 0.10 | 25.00 | 0.10 | \$83.63 |
| 3 | 0.20 | 0.10 | 25.00 | 0.05 | \$41.81 |
| 4 | 0.50 | 0.00 | 25.00 | 0.20 | \$167.25 |
| 5 | 0.80 | 0.50 | 25.00 | 0.30 | \$250.88 |
| 6 | 0.90 | 0.00 | 25.00 | 0.40 | \$334.50 |
| 7 | 1.30 | 0.70 | 25.00 | 0.60 | \$501.75 |
| 8 | 1.20 | 0.50 | 25.00 | 0.50 | \$418.13 |
| 9 | 1.60 | 1.10 | 25.00 | 0.80 | \$669.00 |
| 10 | 2.20 | 1.10 | 25.00 | 1.00 | \$836.25 |
| . | . | . | . | . | . |
| . | . | . | . | . | . |
| . | . | . | . | . | . |
| 4793 | 0.60 | 0.00 | 25.00 | 0.20 | \$167.25 |
| 4794 | 0.80 | 0.00 | 25.00 | 0.30 | \$250.88 |
| 4795 | 0.20 | 0.00 | 25.00 | 0.05 | \$41.81 |
| Total | | | 119,875.00 | ----- | \$1,332,815.25 |

4.6.3.6 – Carreteras

De igual forma que para la determinación de la vulnerabilidad en las calles, se procedió de acuerdo a lo establecido por el Ministerio del Medio Ambiente de España, con las carreteras que comprenden el Libramiento Norte, Boulevard Republica, Boulevard Mendoza Berrueto, Libramiento Venustiano Carranza y el Boulevard Centenario.

La vulnerabilidad a estimar, está enfocada a la incidencia de potenciales daños mayores en la base, sub-base, carpeta asfáltica y en la infraestructura conexas, que potencialmente podría ser afectada con el tránsito de la avenida asociada al periodo de retorno de 1,000 años. De forma tal que se procedió de acuerdo al conjunto de datos vectoriales, a la identificación de las carreteras existentes en la zona de estudio y de influencia en la zona potencial de inundación, identificándose los que se muestran en la Imagen 4.37.

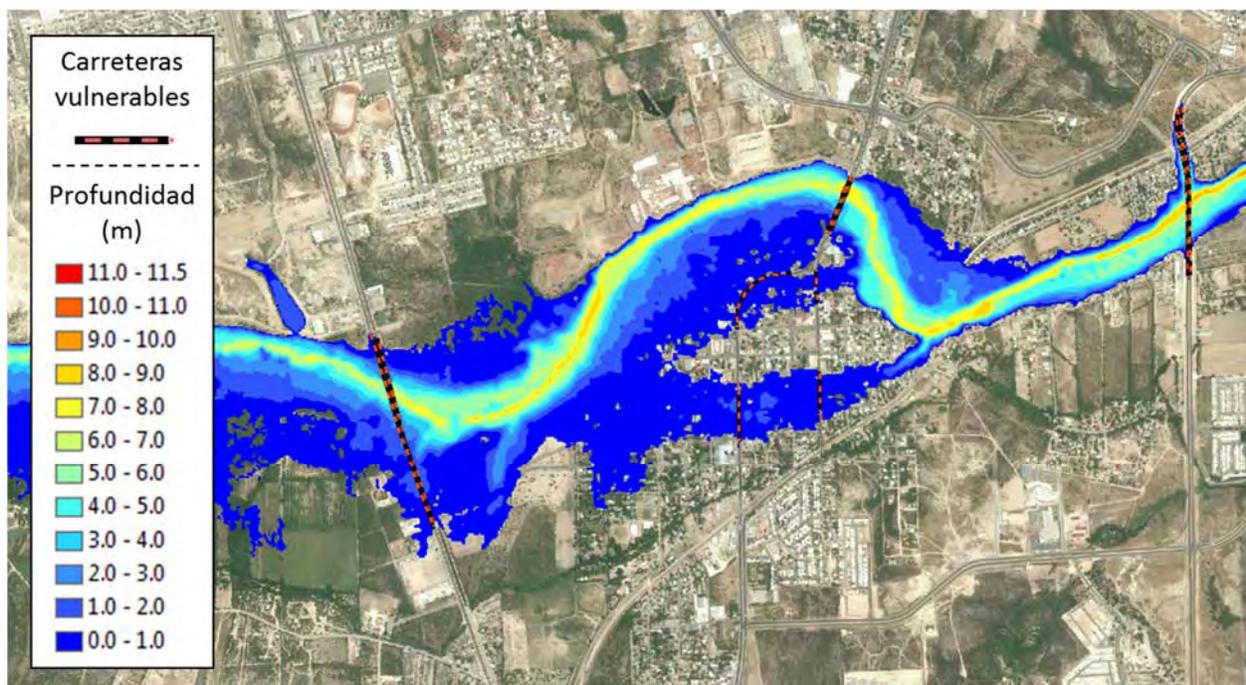


Imagen 4.37 – Identificación de carreteras vulnerables en la zona de estudio.

Para la determinación de la superficie de afectación, se empleó de igual forma el procedimiento descrito, cuya representación se muestra en la Imagen 4.38, a partir del cual, se estimó una superficie de afectación que asciende a 44,000.00 m².

Una vez determinada la superficie de afectación, se procedió a la estimación del índice de vulnerabilidad, para ello se recurrió a la Gráfica 2.15, que representa la función de vulnerabilidad, a partir de ello, se consideró de acuerdo a la metodología implementada, un costo unitario de 15.00 €/m², el cual, convertido a moneda nacional, se estima en \$ 334.59/m², por lo que a partir de éste se efectuó la estimación de los daños potenciales a las carreteras (Tabla 4.9).



Imagen 4.38 – Proceso para la determinación de la superficie de carreteras afectadas.

Tabla 4.9 – Estimación de la vulnerabilidad y daño en carreteras.

| Punto | Inundación | | Superficie (m ²) | Índice de vulnerabilidad | Monto del daño estimado (\$) |
|--------------|-----------------|-----------------|------------------------------|--------------------------|------------------------------|
| | Profundidad (m) | Velocidad (m/s) | | | |
| 1 | 0.20 | 0.20 | 25.00 | 0.05 | \$418.24 |
| 2 | 0.50 | 0.30 | 25.00 | 0.20 | \$1,672.95 |
| 3 | 0.30 | 0.50 | 25.00 | 0.10 | \$836.48 |
| 4 | 0.20 | 0.30 | 25.00 | 0.05 | \$418.24 |
| 5 | 0.30 | 0.30 | 25.00 | 0.10 | \$836.48 |
| 6 | 0.20 | 0.40 | 25.00 | 0.05 | \$418.24 |
| 7 | 0.50 | 0.30 | 25.00 | 0.20 | \$1,672.95 |
| 8 | 0.20 | 0.30 | 25.00 | 0.05 | \$418.24 |
| 9 | 0.60 | 0.40 | 25.00 | 0.20 | \$1,672.95 |
| 10 | 0.70 | 0.40 | 25.00 | 0.30 | \$2,509.43 |
| . | . | . | . | . | . |
| . | . | . | . | . | . |
| . | . | . | . | . | . |
| 1758 | 1.10 | 0.30 | 25.00 | 0.50 | \$4,182.38 |
| 1759 | 1.00 | 0.20 | 25.00 | 0.40 | \$3,345.90 |
| 1760 | 1.30 | 0.30 | 25.00 | 0.60 | \$5,018.85 |
| Total | | | 44,000.00 | | \$9,748,697.89 |

4.6.3.7 – Caminos de terracería

Los caminos de terracería son de suma importancia para la comunicación entre poblados, así mismo, en la agricultura representan una de los principales vías de comunicación para el ingresos de insumos, operación y retiro de cosecha de las áreas productivas, de ahí la importancia de su cuantificación, ya que de ello dependen los potenciales impactos en diversos procesos económicos en la zona de influencia de éstos.

Para determinar su probable afectación, se procedió a la estimación mediante la superposición de la mancha de inundación con su capa vectorial, la cual se construyó mediante digitalización del trazo de dichos caminos con apoyo de imágenes satelitales de reciente captura, como se puede apreciar en la Imagen 4.39.

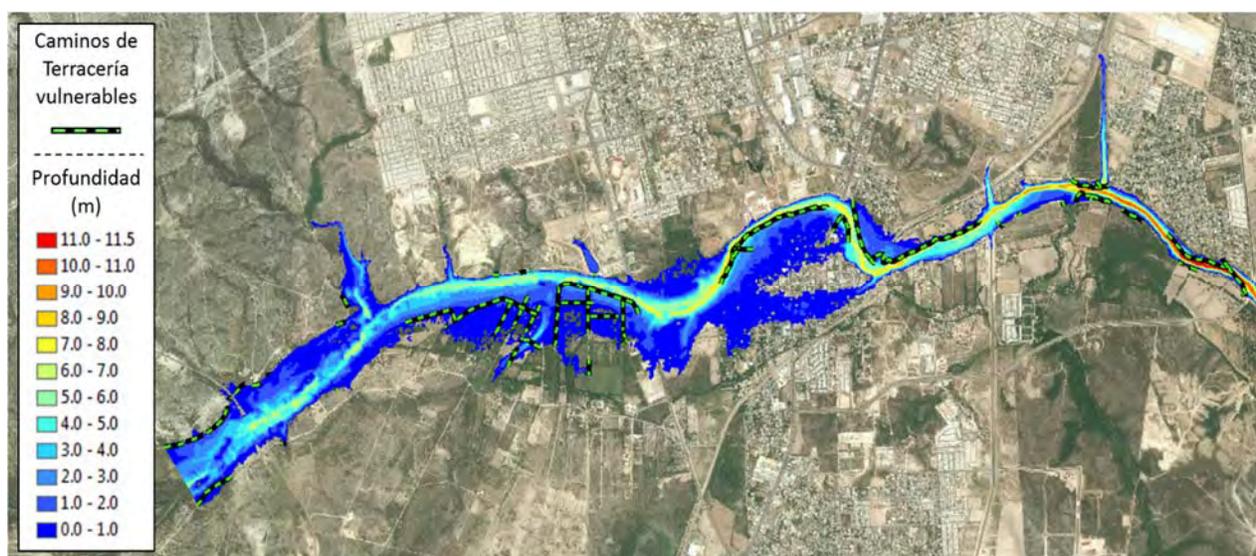


Imagen 4.39 – Localización de caminos de terracería susceptibles a ser afectados por la inundación.

Al igual que en la estimación de la vulnerabilidad para calles y carretas, se empleó dicho procedimiento ya descrito, a partir de lo cual, se estimó un área de afectación en caminos de terracería del orden de 120,600.00 m², como se muestra en la Imagen 4.40.

De forma similar, para la estimación de la vulnerabilidad y los potenciales daños, se recurrió a la implementación de la Grafica 2.15., por medio de la cual fue posible determinar el índice de vulnerabilidad para cada una de las celdas consideradas en el

análisis. A partir de dicho índice, y considerando el costo unitario de 1.00 €/m², monto que convirtiendo a moneda nacional, representa un costo de \$22.31/m², cantidad a partir de la cual se efectuó la estimación de los daños potenciales en caminos de terracería, por el tránsito de la avenida asociada a un periodo de retorno de 1,000 años, como se plasma en la Tabla 4.10.

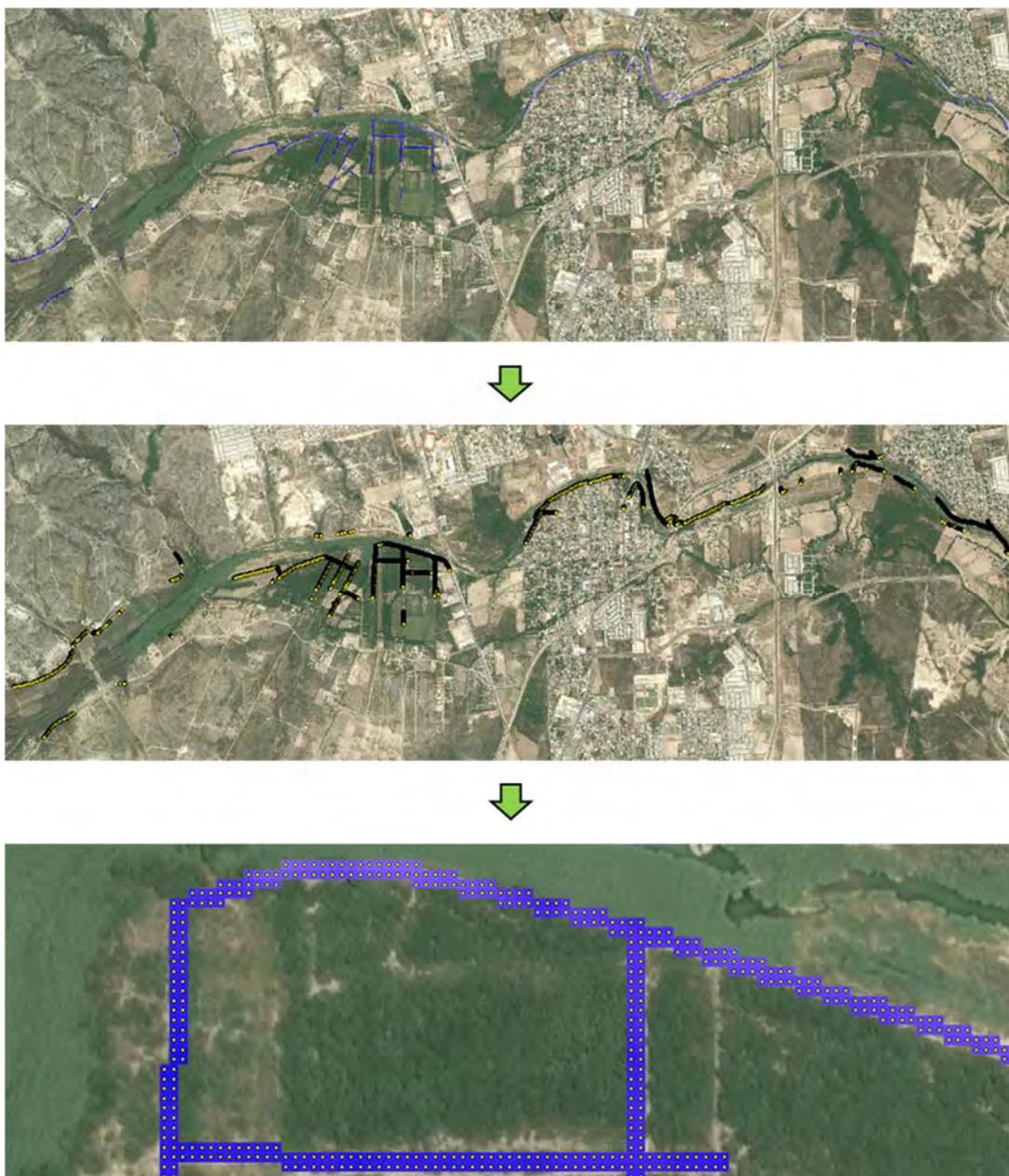


Imagen 4.40 – Proceso para la determinación de la superficie de caminos de terracería afectados.

Tabla 4.10 – Estimación de la vulnerabilidad y daño en caminos de terracería.

| Punto | Inundación | | Superficie (m ²) | Índice de vulnerabilidad | Monto del daño estimado (\$) |
|--------------|-----------------|-----------------|------------------------------|--------------------------|------------------------------|
| | Profundidad (m) | Velocidad (m/s) | | | |
| 1 | 0.40 | 1.20 | 25.00 | 0.10 | \$55.78 |
| 2 | 0.50 | 1.30 | 25.00 | 0.20 | \$111.55 |
| 3 | 1.00 | 1.80 | 25.00 | 0.40 | \$223.10 |
| 4 | 1.20 | 1.60 | 25.00 | 0.50 | \$278.88 |
| 5 | 2.00 | 2.00 | 25.00 | 0.80 | \$446.20 |
| 6 | 2.20 | 1.90 | 25.00 | 1.00 | \$557.75 |
| 7 | 0.20 | 0.00 | 25.00 | 0.05 | \$27.89 |
| 13 | 0.20 | 0.20 | 25.00 | 0.05 | \$27.89 |
| 15 | 0.40 | 0.10 | 25.00 | 0.10 | \$55.78 |
| 16 | 2.20 | 2.70 | 25.00 | 1.00 | \$557.75 |
| . | . | . | . | . | . |
| . | . | . | . | . | . |
| . | . | . | . | . | . |
| 4822 | 0.40 | 0.10 | 25.00 | 0.10 | \$55.78 |
| 4823 | 0.40 | 0.10 | 25.00 | 0.10 | \$55.78 |
| 4824 | 0.40 | 0.10 | 25.00 | 0.10 | \$55.78 |
| Total | | | 120,600.00 | | \$1,567,165.95 |

4.6.3.8 – Vía férrea

Para la determinación de la vulnerabilidad de la vía férrea que conecta principalmente a los municipios de Monclova y Saltillo, así como con los estados de Durango y Nuevo Leon, así como su interacción en el transporte de mercancías con Eagle Pass, Texas, Estados Unidos, se consideró como costo índice la rehabilitación de la misma, indistintamente del tirante, esto con objeto de que se garantice para una condición crítica, una adecuada operación, condiciones estructurales y de seguridad; por lo que tomando como referencia el costo índice de la citada acción, de proyectos desarrollados en el sur, sureste del país, propiamente de las acciones emprendidas en el periodo comprendido entre los años 2014 a 2017, en la infraestructura ferroviaria a cargo del Ferrocarril del Istmo de Tehuantepec, S.A. de C.V. donde para el rubro de rehabilitación, se efectuó una inversión de \$1,948.00 millones de pesos, para una longitud de 252 kilómetros. Por lo que a partir de dicha

inferencia se estimó un costo unitario por kilómetro de rehabilitación de vía férrea, cuyo monto asciende a \$ 7,737,850.00, a precios corrientes. Derivado de dicha estimación, se procedió a la cuantificación de la longitud de vía férrea que sería vulnerable ante la incidencia de la avenida asociada el periodo de retorno de 1,000 años, la cual corresponde a 0.42 km, como se muestra en la siguiente Imagen 4.41. A partir de dicha longitud y en base al costo índice determinado, se procedió a estimar el monto del daño probable que podría ser ocasionado, como se puede observar en el Tabla 4.11.

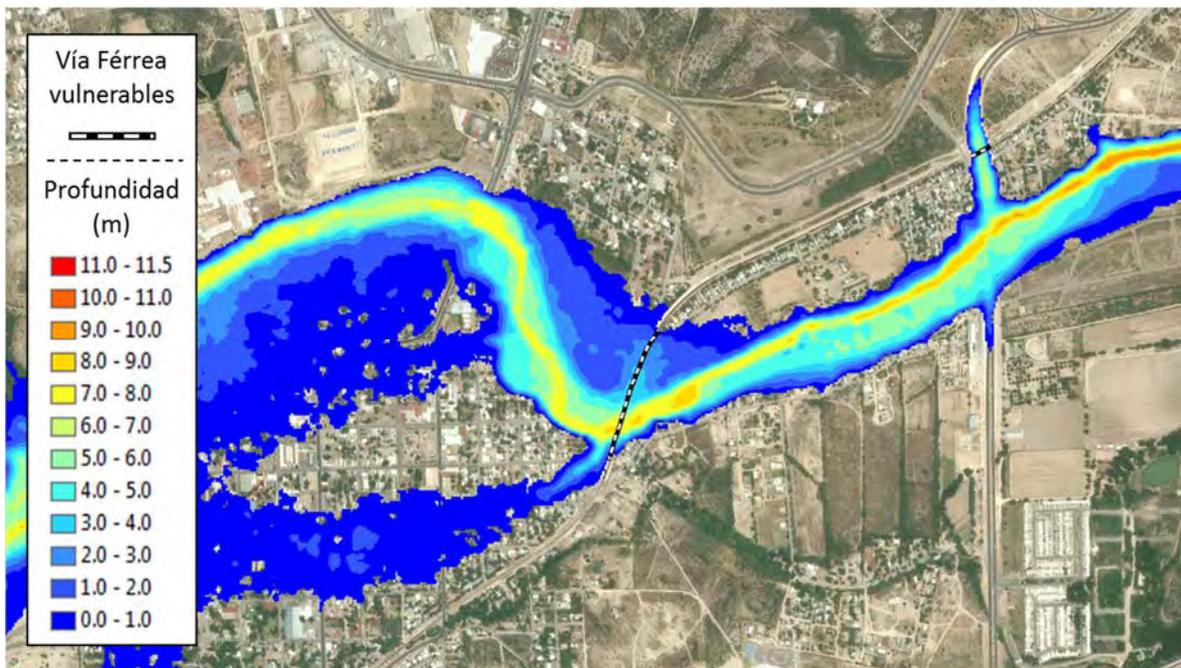


Imagen 4.41 – Identificación del tramo de vía férrea, susceptible a ser afectados por la inundación.

Tabla 4.11 – Estimación de la vulnerabilidad y daño en vía férrea.

| Longitud Total (Km) | Índice de Vulnerabilidad | Monto del daño estimado (\$) |
|---------------------|--------------------------|------------------------------|
| 0.42 | 1.00 | \$3,221,682.03 |

4.6.3.9 – Equipo de servicio eléctrico

A grandes rasgos, la infraestructura eléctrica durante una inundación, se ve poco afectada, y máxime como en este caso, en el que, de acuerdo al rango de velocidades,

no es probable que se provoque algún daño mayor en la infraestructura que compone al sistema de distribución de energía eléctrica, pero si son susceptibles de considerar algunos daños mínimos, lo cual refiere el Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino, de España. Sin embargo, existe un elemento que ante una probable inundación quedará expuesto al efecto del agua, y este es el medidor electrónico de energía eléctrica, cuya elevación estándar de instalación se ubica a aproximadamente 1.60 m, como se observa en la Figura 4.2.

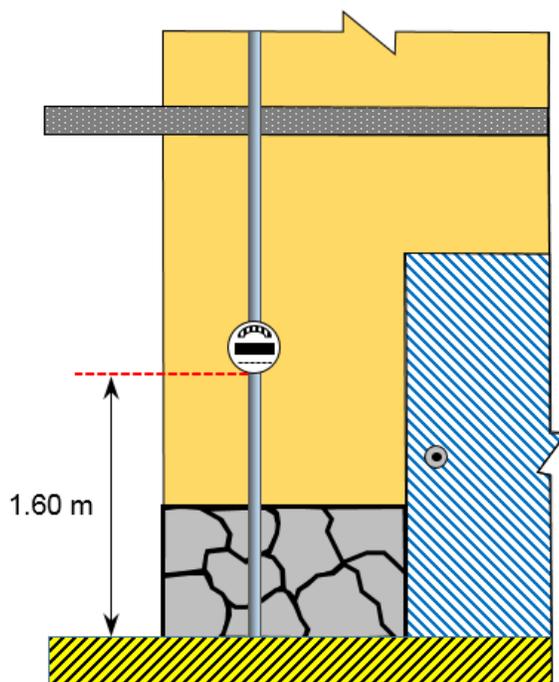


Figura 4.2 – Altura de elevación generalmente adoptada para la instalación de medidores de energía eléctrica (CFE).

De acuerdo con el Programa de Desarrollo del Sistema Eléctrico Nacional (PRODESEN), en el periodo 2016-2030, se instalarán 2.6 millones de nuevos medidores tipo AMI (*Advanced Metering Infrastructure*), para poder determinar los consumos de energía en 17 estados del país (incluyendo al estado de Coahuila) y la ciudad de México; para ello, el Gobierno que recién ha concluido funciones, ha efectuado una inversión de 30 mil 242 millones de pesos a través de la Comisión Federal de Electricidad.

El AMI consiste en un sistema de medición de energía bi-direccional con la capacidad de lectura, corte y reconexión remota desde el sistema comercial de la CFE, ayudan tanto a

mejorar hábitos de consumo como a evitar el desperdicio de energía y tiene como objetivo principal evitar el robo de energía eléctrica. (El Financiero, 2015).

De acuerdo con al citado programa, en promedio cada uno de estos medidores domiciliarios tendrá un costo de 9 mil 438 pesos, cuyo valor actualizado a precios corrientes, asciende a \$ 10,419.60, el cual incluye adquisición, instalación y puesta en servicio.

Para la determinación de la cantidad de medidores susceptibles a ser afectados por la incidencia de la inundación ocasionada por el tránsito de la avenida asociada a un periodo de retorno de 1,000 años, se consideró como base la capa que representa las viviendas con potencial de afectación, a partir de la cual se clasificó a aquellas en las que el tirante del agua fuera superior a 1.60 m, puesto que dicha elevación es generalmente empleada para su instalación, a partir de lo cual se contabilizó un total de 184 medidores vulnerables, como puede observarse en la Imagen 4.42.

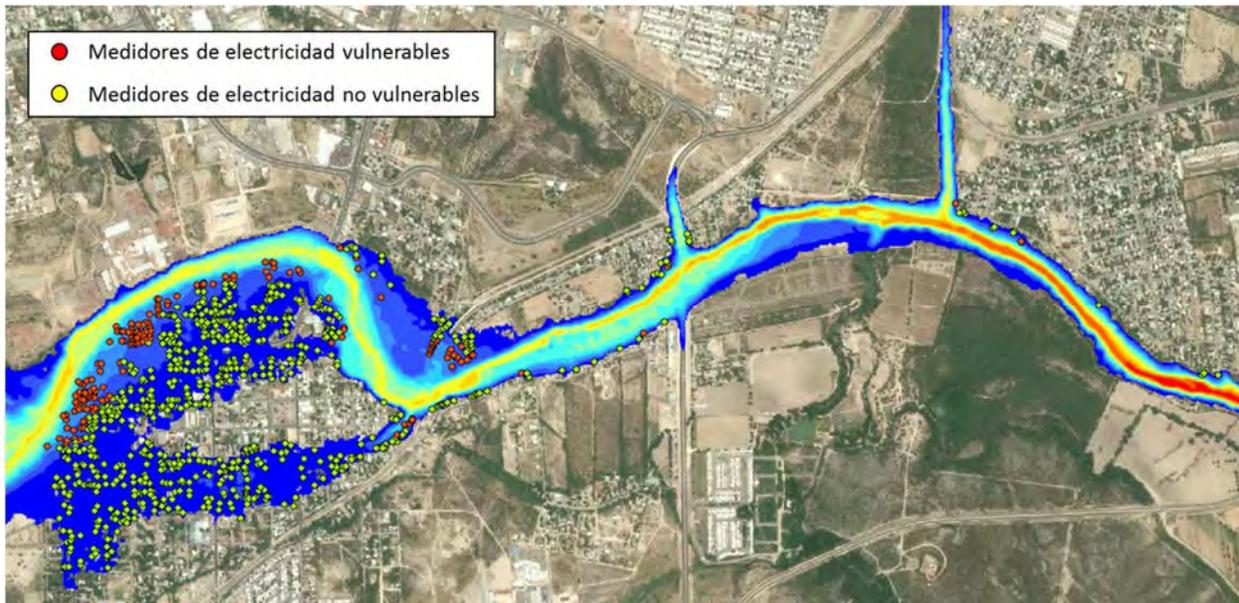


Imagen 4.42 – Identificación de medidores de energía eléctrica que son susceptibles a ser afectados por la inundación.

Para este caso se consideró un índice de vulnerabilidad de 1.0, puesto que generalmente los componentes eléctricos de dicha índole no se someten a reparación, sino que se remplazan por nuevos dispositivos.

A partir de dicha cuantificación y la consideración del índice de vulnerabilidad, se procedió a la estimación del monto del daño potencial por concepto de componentes eléctricos con probabilidad de ser afectados por la inundación, tal como se plasma en la Tabla 4.12.

Tabla 4.12 – Estimación de la vulnerabilidad y daño en equipo de servicio eléctrico.

| Medidor | Inundación | | Índice de vulnerabilidad | Monto del daño estimado (\$) |
|--------------|-----------------|-----------------|--------------------------|------------------------------|
| | Profundidad (m) | Velocidad (m/s) | | |
| 1 | 3.40 | 1.50 | 1.00 | \$10,419.60 |
| 2 | 4.40 | 2.10 | 1.00 | \$10,419.60 |
| 3 | 3.50 | 1.70 | 1.00 | \$10,419.60 |
| 4 | 3.10 | 1.60 | 1.00 | \$10,419.60 |
| 5 | 2.90 | 1.60 | 1.00 | \$10,419.60 |
| 6 | 2.70 | 1.40 | 1.00 | \$10,419.60 |
| 7 | 2.70 | 1.40 | 1.00 | \$10,419.60 |
| 8 | 2.50 | 1.90 | 1.00 | \$10,419.60 |
| 9 | 1.70 | 1.70 | 1.00 | \$10,419.60 |
| 10 | 2.40 | 1.50 | 1.00 | \$10,419.60 |
| . | . | . | . | . |
| . | . | . | . | . |
| . | . | . | . | . |
| 182 | 2.40 | 1.50 | 1.00 | \$10,419.60 |
| 183 | 2.20 | 1.50 | 1.00 | \$10,419.60 |
| 184 | 2.10 | 1.40 | 1.00 | \$10,419.60 |
| Total | | | | \$1,917,205.55 |

4.6.3.10 – Infraestructura y equipos de telecomunicaciones

De acuerdo a lo plasmado en la metodología del Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino, de España, los daños en infraestructura y equipos de telecomunicaciones, no se espera que sean elevados, puesto que se concentraran en las cajas de distribución telefónica de maniobra, más que en el cableado.

De acuerdo a lo antes expuesto, en la zona de estudio se identificó que la mancha de inundación, incide en una caja de distribución telefónica y en la zona de desplante de una torre de telecomunicaciones, como se muestre en la Imagen 4.43.

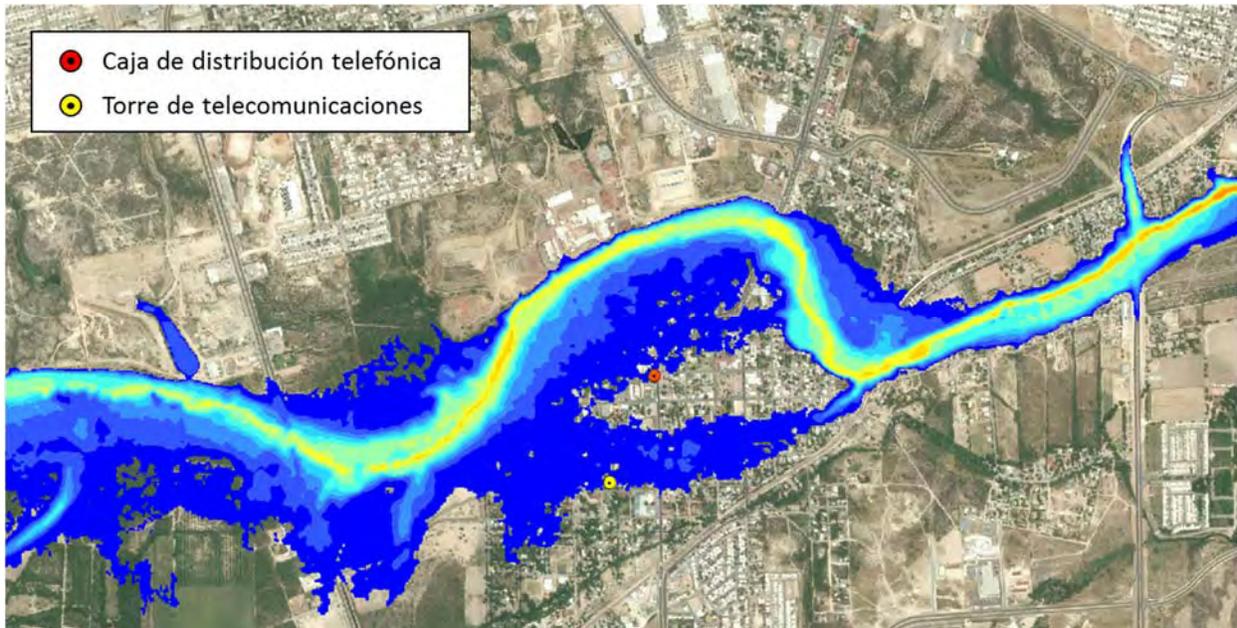


Imagen 4.43 – Localización de infraestructura y equipos de telecomunicaciones.

De acuerdo a la Gráfica 2.15., y como se puede observar en la Tabla 4.13, la elevación de los tirantes asociados a este tipo de infraestructura y equipos de telecomunicación, representa una vulnerabilidad nula, por lo que, se considera que no se encuentran en peligro o vulnerables ante la incidencia de la inundación asociada al periodo de retorno de 1,000 años. Dicho análisis, se ha incluido, con objeto de hacer evidente que no necesariamente lo que se ubica aparentemente afectado por la mancha de inundación, implica un daño potencial a su integridad.

Tabla 4.13 – Estimación de la vulnerabilidad y daño en infraestructura y equipos de telecomunicaciones.

| Componente | Inundación | | Índice de vulnerabilidad |
|---------------------------------|-----------------|-----------------|--------------------------|
| | Profundidad (m) | Velocidad (m/s) | |
| Caja de distribución telefónica | 0.10 | 0.10 | 0.00 |
| Torre de telecomunicaciones | 0.10 | 0.20 | 0.00 |

4.6.3.11 – Sistema de distribución de agua potable

Para la determinación de la vulnerabilidad en el sistema de agua potable que abastece las comunidades o colonias Delicias, Periodistas y Villa de Fuentes, si bien se considera de

acuerdo a la metodología del Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino, de España, que durante una inundación el sistema las tuberías válvulas y demás dispositivos de control, no resultan afectados considerablemente, siempre hay que implementar un programa de limpieza y manteniendo principalmente de los sistemas de válvulas ya que el material fino que trasporta el flujo de inundación, suele acumularse en los registros de operación de éstas e introducirse en los mecanismos, de ahí la importancia de brindar un mantenimiento y calibración de las válvulas.

Por tal razón dicha instancia estimó, en base a su experiencia, que dichas acciones conllevarán un gasto del orden de 0.5 €/m^2 , razón por la que fue necesario determinar el área que representa la red de distribución de agua potable, esto con objeto de efectuar la estimación del daño potencial o mejor dicho, el monto de inversión necesario para las labores de limpieza y calibración de dichos dispositivos de control. Para ello, con objeto de estimar la longitud de la red, se empleó como base la capa que representa las calles, misma que se muestra en la Imagen 4.44.

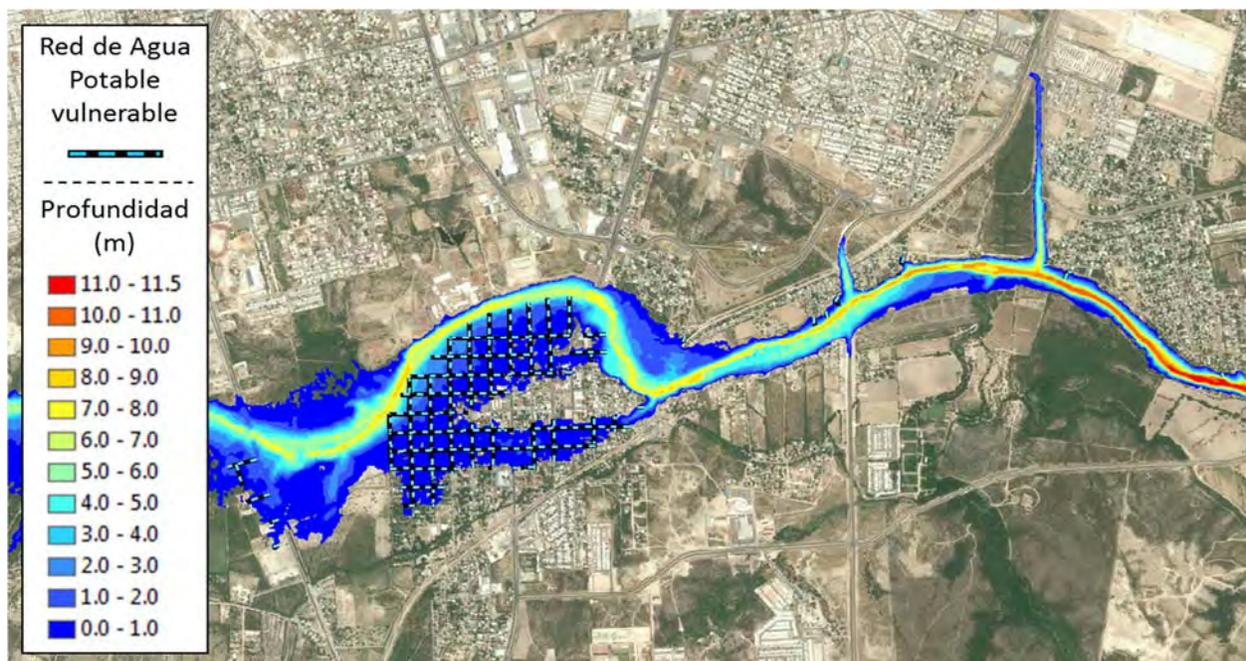


Imagen 4.44 – Distribución de la red de agua potable cuyos componentes de control y operación son susceptibles a ser afectados con la inundación.

Para la determinación del área que ocupa la red de distribución de agua potable, se consideró inicialmente la extracción de las celdas de ancho 5 m, ya que como se ha referido, es el tamaño estándar del raster empleado y una vez extraídos, se procedió a

reducir el área, de acuerdo al ancho de zanja (se consideró 1.5 m, considerando implícitamente la excavación la construcción de estructuras para alojar los dispositivos de control) donde está alojada e instala la tubería de la red del sistema de abastecimiento, estimando con ello el área de la densidad de la red de distribución de agua potable en la zona susceptible a ser afectada (Imagen 4.45).

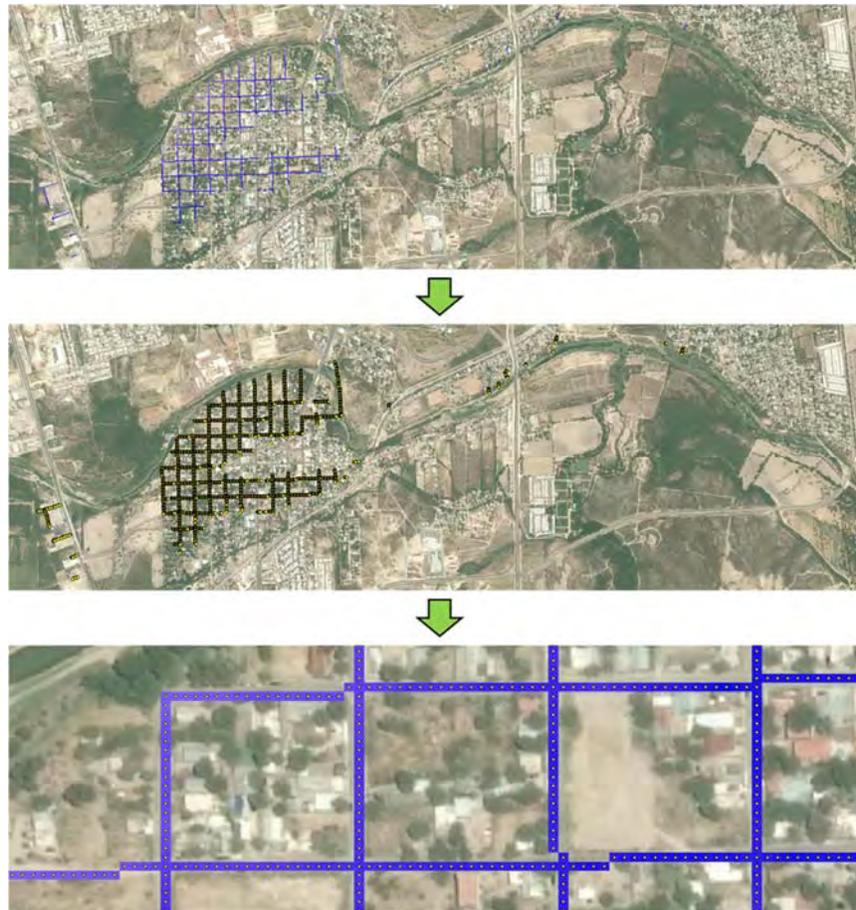


Imagen 4.45 – Proceso para la determinación de la superficie de la red de agua potable, cuyos dispositivos de control de agua potable se verían afectados con la inundación.

Una vez determinada la superficie de afectación, se procedió a la estimación del índice de vulnerabilidad, para ello se recurrió a la Gráfica 2.15, que representa la función de vulnerabilidad, a partir de ello, se consideró de acuerdo a la metodología implementada, un costo unitario de 0.7 €/m², el cual convertido a moneda nacional, se estima en \$ \$11.26/m², por lo que a partir de este monto, se efectuó la estimación de los daños potenciales en los dispositivos de control de la red de agua potable, ante la incidencia de la avenida de referencia, como se muestra en la Tabla 4.14.

Tabla 4.14 – Estimación de la vulnerabilidad y daño en dispositivos de control de agua potable.

| Punto | Inundación | | Superficie (m ²) | Índice de vulnerabilidad | Monto del daño estimado (\$) |
|--------------|-----------------|-----------------|------------------------------|--------------------------|------------------------------|
| | Profundidad (m) | Velocidad (m/s) | | | |
| 1 | 2.80 | 0.40 | 7.50 | 1.00 | \$118.05 |
| 2 | 1.60 | 0.40 | 7.50 | 0.80 | \$94.44 |
| 3 | 0.70 | 0.40 | 7.50 | 0.30 | \$35.42 |
| 4 | 0.20 | 0.10 | 7.50 | 0.05 | \$5.90 |
| 5 | 0.30 | 0.10 | 7.50 | 0.10 | \$11.81 |
| 6 | 0.40 | 0.30 | 7.50 | 0.10 | \$11.81 |
| 7 | 0.30 | 0.10 | 7.50 | 0.10 | \$11.81 |
| 8 | 0.20 | 0.10 | 7.50 | 0.05 | \$5.90 |
| 9 | 0.80 | 0.50 | 7.50 | 0.30 | \$35.42 |
| 10 | 0.90 | 0.00 | 7.50 | 0.40 | \$47.22 |
| . | . | . | . | . | . |
| . | . | . | . | . | . |
| . | . | . | . | . | . |
| 2544 | 1.30 | 0.70 | 7.50 | 0.60 | \$70.83 |
| 2545 | 1.60 | 1.10 | 7.50 | 0.80 | \$94.44 |
| 2546 | 3.20 | 1.80 | 7.50 | 1.00 | \$118.05 |
| Total | | | 95,745.00 | | \$103,872.19 |

4.6.3.12 – Alcantarillado sanitario

Para fines de estimación de la vulnerabilidad del drenaje sanitario, se consideró de igual forma como base para la determinación de la longitud de la red, la retícula que define las calles, que de acuerdo a la macha de inundación resultarían susceptibles a sufrir afectaciones por el tránsito de la avenida asociada al periodo de retorno de 1,000 años, como se muestra en la Imagen 4.35.

De acuerdo al Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino, de España, el cual refiere que en el caso del drenaje sanitario, en la mayoría de los casos, dada la cantidad de sólidos que arrastra el flujo de la avenida durante el tránsito de ésta, con un alto grado de probabilidad será susceptible de presentarse acumulación y deposición de azolves en los conductos que integran el sistema de drenaje, cuya localización y remoción para brindarle condiciones de operación adecuada como lo eran antes de la presencia del evento, significaría un costo que se podría equiparar con la propia sustitución del sistema de alcantarillado, a partir de dicha consideración es que para el presente análisis, se

consideró que la vulnerabilidad asociada al sistema de alcantarillado de las colonias Delicias, Periodistas y Villa de Fuentes, susceptible a presentar afectaciones por el paso de la avenida de referencia, sea igual a 1.0.

Para la estimación del daño potencial que se originaría en el sistema de alcantarillado, se recurrió al costo índice por kilómetro para sustitución de drenaje sanitario, el cual se determinó tomando como base, el proyecto de inversión para sustitución de alcantarillado en la ciudad de Mazatlán, Sinaloa, publicado en la Unidad de Inversiones de la Secretaria de Hacienda y Crédito Público, mediante el cual se pretende sustituir 63.84 km, por lo que, para tal efecto, se considera un monto de inversión de \$ 395 millones de pesos, de forma que, considerando que se estima una afectación de 12.54 km; aplicando la superposición entre la capa vectorial que representa dicha longitud y el raster de inundaciones asociada al periodo de retorno de 1,000 años, se obtiene que el costo unitario por kilómetro de sustitución de alcantarillado asciende a un monto de \$ 6,187,845.80, con lo cual se ha efectuado la estimación del daño, mismo que se muestra desglosado en la Tabla 4.15.

Tabla 4.15 – Estimación de la vulnerabilidad y daño en alcantarillado sanitario.

| Tramo | Longitud (Km) | Monto del daño estimado (\$) |
|--------------|---------------|------------------------------|
| 1 | 0.29 | \$1,816,362.53 |
| 2 | 0.69 | \$4,292,804.63 |
| 3 | 0.71 | \$4,422,312.61 |
| 4 | 0.67 | \$4,118,186.27 |
| 5 | 0.36 | \$2,250,167.06 |
| 6 | 0.64 | \$3,946,132.31 |
| 7 | 0.25 | \$1,564,523.87 |
| 8 | 0.71 | \$4,365,401.64 |
| 9 | 0.48 | \$2,972,763.15 |
| 10 | 0.74 | \$4,600,305.21 |
| . | . | . |
| . | . | . |
| . | . | . |
| 39 | 0.37 | \$2,284,286.68 |
| 40 | 1.12 | \$6,923,737.57 |
| 41 | 0.45 | \$2,800,367.32 |
| Total | 12.54 | \$77,598,476.15 |

4.6.3.13 – Zona agrícola

Para la determinación de la vulnerabilidad a la que estaría expuesta el área agrícola localizada en las inmediaciones del río Escondido, por la incidencia de la avenida asociada a un periodo de retorno de 1,000 años, se consideró el área de afectación producto de la superposición y contraste de la mancha de inundación estimada mediante la modelación computacional bidimensional, realizada con el programa Iber y la capa vectorial de las áreas productivas en la zona de estudio, mismas que fueron obtenidas del INEGI, la cuales se presentan en la Imagen 4.46.

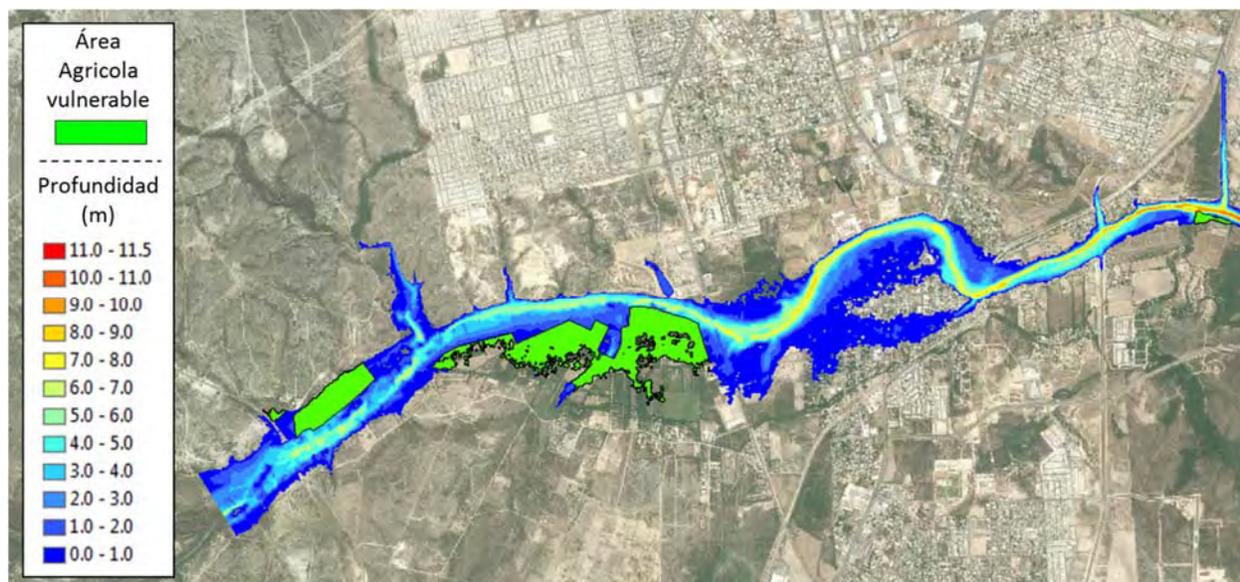


Imagen 4.46 – Distribución de la superficie agrícola en el área de estudio, con probabilidad de ser afectada por la inundación.

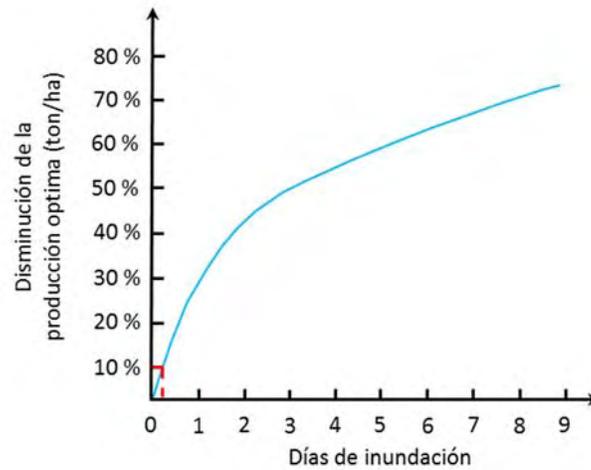
Considerando para ello las estadísticas agrícolas del periodo 2007 – 2017, publicadas en el Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP) de la Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (SAGARPA), en donde fue posible identificar que el cultivo predominante en la zona de influencia, es el Nogal; por lo que dicho cultivo fue considerado como base para el desarrollo del presente análisis, cuyas estadísticas de producción histórica se presenta en la Tabla 4.46.

Tabla 4.16 – Estadísticas de producción agrícola de cultivo de nogal en Piedras Negras, Coahuila (SIAP-SAGARPA, 2018).

| Año | Rendimiento (Ton/has) | Precio Medio Rural (\$/Ton) |
|-----------------|-----------------------|-----------------------------|
| 2007 | 1.09 | \$33,250.17 |
| 2008 | 1.29 | \$28,916.32 |
| 2009 | 0.93 | \$33,286.80 |
| 2010 | 1.13 | \$32,608.34 |
| 2011 | 0.71 | \$35,428.59 |
| 2012 | 1.53 | \$29,959.16 |
| 2013 | 0.79 | \$44,425.54 |
| 2014 | 1.11 | \$59,864.72 |
| 2015 | 1.24 | \$43,547.43 |
| 2016 | 1.11 | \$45,216.25 |
| 2017 | 1.14 | \$44,739.04 |
| Promedio | 1.10 | \$39,203.85 |

Para la determinación de la vulnerabilidad que se traduce en términos de pérdida de rendimiento del cultivo, para este caso se cuenta con dos tipos de análisis, uno de acuerdo a la pérdida asociada por la temporalidad de la permanencia del agua sobre el cultivo y la otra en función de la lámina que el agua alcanza sobre el terreno agrícola, de ellos se desprende que para la permanencia de la inundación, se ha estimado en base a los resultados de la simulación bidimensional que la permanencia del anegamiento en las inmediaciones de las zonas agrícolas, varía entre 5 y 6 horas, por lo que, a partir de la estimación de dicho tiempo de duración, se procedió al empleo de la Grafica 2.13, correspondiente al criterio de análisis de disminución de producción óptima.

Como puede observarse en la Grafica 4.7, debido a la duración del anegamiento, se estima que la pérdida de producción o rendimiento, será de un 10%; a partir de lo cual, se procedió a contrastar dicho valor estimado, respecto a la pérdida en el rendimiento considerando el criterio del Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino, de España. Para este propósito, se empleó el procedimiento descrito para la determinación de la superficie de afectación, descrito en el apartado 4.6.3.4, cuya representación gráfica para la superficie productiva, se presenta en la Imagen 4.47.



Gráfica 4.7 – Curva de disminución de la producción de nogal, por la inundación originada por el tránsito de la avenida asociada a un periodo de retorno de 1,000 años.

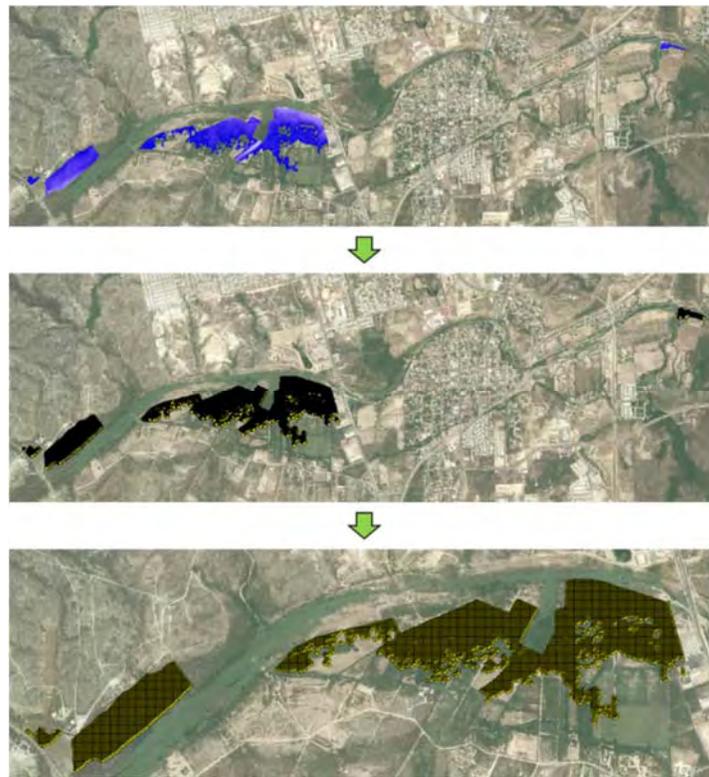


Imagen 4.47 – Proceso para la determinación de la superficie de afectación en la zona agrícola.

Para la estimación de la vulnerabilidad en el área productiva se empleó la curva de vulnerabilidad para cultivos arbolados desarrollada por el citado ministerio, representada por la Gráfica 2.11, a partir de lo cual se efectuó la estimación de la pérdida de cultivo en

base al tirante de agua sobre el terreno de cultivo, cuyos resultados obtenidos, se muestran en la Tabla 4.17:

Tabla 4.17 – Estimación de la vulnerabilidad y daño en la zona agrícola.

| Punto | Inundación | | Superficie Unitaria (m ²) | Superficie acumulada (has) | Producción Unitaria (Ton/ha) | Índice de vulnerabilidad | Monto del daño estimado (\$) |
|--------------|-----------------|-----------------|---------------------------------------|----------------------------|------------------------------|--------------------------|------------------------------|
| | Profundidad (m) | Velocidad (m/s) | | | | | |
| 1 | 2.60 | 0.90 | 25.00 | 0.003 | 0.00274 | 1.00 | \$107.49 |
| 2 | 2.00 | 0.90 | 25.00 | 0.005 | 0.00274 | 0.70 | \$75.24 |
| 3 | 1.40 | 0.80 | 25.00 | 0.008 | 0.00274 | 0.50 | \$53.74 |
| 4 | 1.10 | 0.80 | 25.00 | 0.010 | 0.00274 | 0.30 | \$32.25 |
| 5 | 0.90 | 0.80 | 25.00 | 0.013 | 0.00274 | 0.10 | \$10.75 |
| 6 | 0.80 | 1.00 | 25.00 | 0.015 | 0.00274 | 0.08 | \$8.60 |
| 7 | 0.70 | 1.20 | 25.00 | 0.018 | 0.00274 | 0.08 | \$8.60 |
| 8 | 0.70 | 1.40 | 25.00 | 0.020 | 0.00274 | 0.08 | \$8.60 |
| 9 | 1.10 | 1.40 | 25.00 | 0.023 | 0.00274 | 0.30 | \$32.25 |
| 10 | 1.40 | 1.30 | 25.00 | 0.025 | 0.00274 | 0.50 | \$53.74 |
| . | . | . | . | . | . | . | . |
| . | . | . | . | . | . | . | . |
| . | . | . | . | . | . | . | . |
| 24525 | 1.10 | 2.70 | 25.00 | 61.313 | 0.00274 | 0.30 | \$32.25 |
| 24526 | 1.30 | 2.80 | 25.00 | 61.315 | 0.00274 | 0.50 | \$53.74 |
| 24527 | 1.70 | 2.80 | 25.00 | 61.318 | 0.00274 | 0.70 | \$75.24 |
| Total | | | | 61.318 | | | \$526,313.21 |

Del análisis efectuado mediante la profundidad, se ha determinado que la disminución del rendimiento del cultivo de nogal es de 20 %, la cual resulta mayor a la estimada mediante la temporalidad del anegamiento en la zona productiva, correspondiente a 10 %, por lo que se considera a la estimación efectuada por medio del tirante, como el efecto más crítico para la condición de inundación; aunque no hay que demeritar la condición de permanencia del anegamiento ya que existen cultivos como los no arbolados, cuyas propiedades de fisiología vegetal, los hacen vulnerables a la duración del agua, ya que les provocan estrés hídrico y asfixia radicular.

4.6.3.14 – Vulnerabilidad económica y social

Con relación a la vulnerabilidad económica, se consideraron los factores que impactaran en el desarrollo de la economía local mientras persistan las condiciones de emergencia ante la probable incidencia de una avenida, por lo que se consideraron tres aspectos fundamentales, los cuales se representan en la Tabla 4.19.

Tabla 4.19 – Vulnerabilidad económica, asociada a distintos periodos de retorno.

| Vulnerabilidad económica | Concepto | Unidad | Cantidad | | | | | |
|--|-----------|-----------|----------|---------|---------|----------|----------|-----------|
| | | | Tr = 5 | Tr = 10 | Tr = 50 | Tr = 100 | Tr = 500 | Tr = 1000 |
| Servicios médicos para atender la emergencia | Población | Habitante | 0 | 17 | 565 | 870 | 2,820 | 4,535 |
| Pérdida de días hombre de trabajo en la inundación | Población | Día | 0 | 68 | 2,260 | 3,480 | 11,280 | 18,140 |
| Puesta en marcha de albergues para la atención de damnificados | Albergues | Albergue | 0 | 1 | 1 | 2 | 3 | 4 |

Respecto a la vulnerabilidad social, se ha considerado que el impacto en la zona de estudio, está asociada a la cantidad de habitantes que al igual que en la estimación de la vulnerabilidad económica demandaran atención médica, por lo que se consideran los habitantes susceptibles a ser damnificados, Tabla 4.20.

Tabla 4.20 – Vulnerabilidad social, asociada a distintos periodos de retorno.

| Vulnerabilidad social | Concepto | Unidad | Cantidad | | | | | |
|-----------------------|-----------|-----------|----------|---------|---------|----------|----------|-----------|
| | | | Tr = 5 | Tr = 10 | Tr = 50 | Tr = 100 | Tr = 500 | Tr = 1000 |
| Población damnificada | Población | Habitante | 0 | 17 | 565 | 870 | 2,820 | 4,535 |

4.6.4 - Resumen del análisis de vulnerabilidad

Como se describió en el apartado 2.5.4, la evaluación de la vulnerabilidad física, está orientada a la estimación de la susceptibilidad a la que estarán expuestos los elementos estructurales y no estructurales, que ante la probable incidencia de avenidas asociadas a periodos de retorno de 5, 10, 50, 100, 500 y 1,000, pueden ocasionar inundaciones fluviales que a su vez pueden propiciar daños en los bienes y servicios en las inmediaciones del cauce del río Escondido, ubicado en el Municipio de Piedras Negras Coahuila.

De acuerdo a lo anterior, y en base a las metodologías, los procedimientos y criterios plasmados y empleados en el desarrollo del presente caso de análisis, se efectuó la estimación de la vulnerabilidad física, en los escenarios correspondiente a los periodos de retorno citados, obteniendo de esta forma, el resumen de la cuantificación de dicha vulnerabilidad, el cual se muestra en la Tabla 4.18.

Tabla 4.18 – Vulnerabilidad física, asociada a distintos periodos de retorno.

| Vulnerabilidad física | Concepto | Unidad | Cantidad | | | | | |
|---|-----------------|-----------------|----------|---------|---------|----------|----------|------------|
| | | | Tr = 5 | Tr = 10 | Tr = 50 | Tr = 100 | Tr = 500 | Tr = 1,000 |
| Viviendas | Vivienda | Menaje | 0 | 3 | 113 | 174 | 564 | 907 |
| Bodegas o comercios | Bodegas | Establecimiento | 0 | 0 | 2 | 3 | 11 | 32 |
| Planteles escolares | Preescolar | Escuela | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 |
| | Primaria | Escuela | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 |
| | Secundaria | Escuela | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Centros de culto | Centro | Centro | 0 | 0 | 0 | 0 | 3 | 10 |
| Caminos | Carreteras | m ² | 9,975 | 15,550 | 21,775 | 25,125 | 35,500 | 44,000 |
| | Calles | m ² | 2,425 | 4,525 | 15,475 | 23,225 | 76,075 | 119,875 |
| | Terracerías | m ² | 20,625 | 25,075 | 42,975 | 49,850 | 71,600 | 120,600 |
| Vías ferroviarias | Vía ferroviaria | km | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Infraestructura y equipos eléctrico (CFE) | Equipos | Equipos | 0 | 0 | 7 | 26 | 135 | 184 |
| Red de agua potable | Infraestructura | m ² | 345 | 675 | 2,303 | 3,465 | 11,438 | 19,095 |
| Red de drenaje y alcantarillado | Infraestructura | km | 0 | 0 | 2 | 2 | 8 | 13 |
| Zonas agrícolas | Producción | Hectáreas | 0 | 2 | 12 | 21 | 46 | 61 |

Es importante reiterar que para la estimación de los daños físicos, se empleó el criterio, de la profundidad a la que estaría expuestos los bienes y/o servicios, ante la incidencia de una avenida, a partir de lo cual, se identifica y asocia el índice de vulnerabilidad; a grandes rasgos corresponde al porcentaje de probabilidad al que, ante el efecto de la lámina de agua, esta ocasionaría daños a dichos bienes; en la estimación también se considera como factor, el entorno socioeconómico de la zona de influencia en la que está inmerso.

Comentarios finales de la estimación de vulnerabilidad a la infraestructura.

- Cabe destacar que en el presente análisis no se incide en probables afectaciones que pongan en riesgo la vulnerabilidad de los centros de salud u hospitales ya que se encuentran localizados todos ellos, en zonas donde una inundación fluvial, ocasionada por el tránsito de la avenida asociada un periodo de retorno de 1,000 años, no representa un peligro potencial para dichas estructuras.
- Por otra parte, respecto a los puentes que se localizan a lo largo de la longitud que describe la trayectoria del río Escondido, es pertinente mencionar que en el presente trabajo de investigación y de acuerdo a lo establecido en la metodología del Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino, de España, no han sido

contabilizados, ni estimado su monto, ya que no hay forma de determinar probabilísticamente el grado de afectación que pueden tener por la presencia u ocurrencia de la inundación fluvial.

4.6.5 - Resumen de la estimación del riesgo

De acuerdo a la vulnerabilidad y el peligro estimado para la zona de estudio ante la incidencia de avenidas extraordinarias, debe de identificarse el riesgo, el cual se traduce como el efecto de ambos aspectos, exteriorizado o representado en función de los impactos económicos, que pueden derivarse ante la presencia de una inundación, por tal razón, una vez estimados y cuantificados los aspectos físicos, económicos y sociales, es preciso estimar el monto de los daños que se generarían para las avenidas correspondiente a cada uno de los periodos de retorno considerados en el análisis del caso de aplicación, respecto de los cuales, a continuación se presenta el correspondiente al periodo de retorno de 1,000 años, en la Tabla 4.21.

Tabla 4.21 – Estimación del daño, ocasionado por la incidencia de una inundación asociada a un periodo de retorno de 1,000 años.

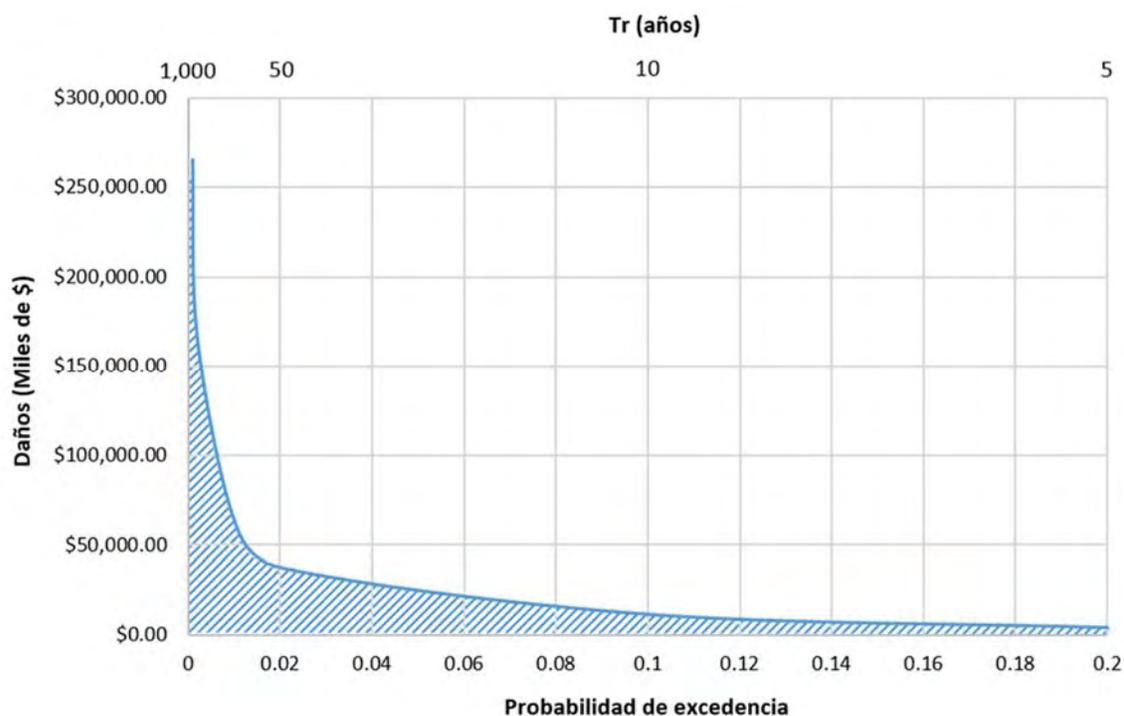
| Estimación de daños | Concepto | Unidad | Cantidad | Costo total (Miles de \$) |
|---|-----------------|-----------------|----------|---------------------------|
| Viviendas | Vivienda | Menaje | 907 | \$125,560.46 |
| Bodegas o comercios | Bodegas | Establecimiento | 32 | \$11,520.00 |
| Planteles escolares | Preescolar | Escuela | 1 | \$31.51 |
| | Primaria | Escuela | 1 | \$130.23 |
| Centros socio-culturales y religiosos | Centro | Centro | 10 | \$93.47 |
| Caminos | Carreteras | m ² | 44,000 | \$9,748.70 |
| | Calles | m ² | 119,875 | \$1,332.82 |
| | Terracerías | m ² | 120,600 | \$1,567.17 |
| Vías ferroviarias | Vía ferroviaria | km | 0 | \$3,221.68 |
| Infraestructura y equipos eléctrico (CFE) | Equipos | Equipos | 184 | \$1,998.85 |
| Red de agua potable | Infraestructura | m ² | 19,095 | \$103.87 |
| Red de drenaje y alcantarillado | Infraestructura | km | 13 | \$77,598.48 |
| Zonas agrícolas | Producción | Hectáreas | 61 | \$526.31 |
| Costo por la pérdida de días hombre de trabajo en la inundación | Población | Días - hombre | 18,140 | \$3,205.70 |
| Costos incurridos por servicios médicos para atender la emergencia | Población | Habitante | 4,535 | \$12,698.00 |
| Costo por la puesta en marcha de albergues para la atención de damnificados | Albergues | Albergues | 4 | \$16,000.00 |
| TOTAL | | | | \$265,337.24 |

- Estimación de la curva de daños.

Como resultado del análisis de las afectaciones y del riesgo al que es propensa la zona de estudio ante la incidencia de avenidas asociadas a los periodos de retorno de 5, 10, 50, 100, 500 y 1,000 años, es posible la construcción de la curva de daños representativa para la zona de estudio, la cual puede ser a la postre tomada como parámetro para la evaluación socioeconómica de proyectos de obras de protección para dicho centro de población; de acuerdo a lo anterior, primeramente se presenta la Tabla 4.22, en la cual se plasma la estimación de daños asociada a cada uno de los periodos de retorno citados, considerados como referencia para el desarrollo del presente análisis, a partir de los cuales y en correlación con las probabilidades de excedencia asociados a ellos, se ha desarrollado la citada curva, misma que se muestra en la Grafica 4.8.

Tabla 4.22 – Estimación del daño, ocasionado por la incidencia de una inundación asociada a un periodo de retorno de 1,000 años.

| Estimación de daños | Costo total (Miles de \$) | | | | | |
|---|------------------------------|--------------------|--------------------|--------------------|---------------------|---------------------|
| | Tr = 5 | Tr = 10 | Tr = 50 | Tr = 100 | Tr = 500 | Tr = 1,000 |
| Viviendas | \$0.00 | \$223.17 | \$12,852.21 | \$27,334.91 | \$73,587.11 | \$125,560.46 |
| Bodegas y/o comercios | \$0.00 | \$0.00 | \$720.00 | \$1,080.00 | \$3,960.00 | \$11,520.00 |
| Planteles escolares | \$0.00 | \$0.00 | \$0.00 | \$0.00 | \$0.00 | \$31.51 |
| | \$0.00 | \$0.00 | \$0.00 | \$0.00 | \$0.00 | \$130.23 |
| Centros socio-culturales y religiosos | \$0.00 | \$0.00 | \$0.00 | \$0.00 | \$2,025.00 | \$93.47 |
| Caminos | \$1,982.86 | \$3,300.73 | \$5,473.89 | \$6,142.24 | \$8,757.89 | \$9,748.70 |
| | \$31.99 | \$80.49 | \$223.03 | \$358.83 | \$856.65 | \$1,332.82 |
| | \$234.92 | \$361.34 | \$670.53 | \$704.41 | \$980.52 | \$1,567.17 |
| Vías férreas | \$609.80 | \$951.48 | \$2,037.58 | \$2,468.93 | \$2,941.01 | \$3,221.68 |
| Infraestructura eléctrica (CFE) | \$0.00 | \$0.00 | \$90.13 | \$312.64 | \$1,592.74 | \$1,998.85 |
| Red de agua potable | \$2.00 | \$5.47 | \$15.03 | \$23.73 | \$59.11 | \$103.87 |
| Red de drenaje y alcantarillado | \$1,257.80 | \$2,516.24 | \$9,499.89 | \$14,394.45 | \$49,251.33 | \$77,598.48 |
| Zonas agrícolas | \$1.22 | \$5.93 | \$52.28 | \$146.49 | \$379.75 | \$526.31 |
| Costo por la pérdida de días hombre de trabajo en la inundación | \$0.00 | \$12.02 | \$399.39 | \$614.99 | \$1,993.40 | \$3,205.70 |
| Costos incurridos por servicios médicos para atender la emergencia | \$0.00 | \$47.60 | \$1,582.00 | \$2,436.00 | \$7,896.00 | \$12,698.00 |
| Costo por la puesta en marcha de albergues para la atención de damnificados | \$0.00 | \$4,000.00 | \$4,000.00 | \$8,000.00 | \$12,000.00 | \$16,000.00 |
| TOTAL | \$4,120.60 | \$11,504.47 | \$37,615.96 | \$64,017.61 | \$166,280.54 | \$265,337.24 |



Gráfica 4.8 – Curva de daños asociada a distintos periodos de retorno.

- Estimación de daño anual esperado.

A partir de la curva de daños, se determinó el daño anual esperado (\$/año), el cual, de acuerdo al procedimiento y expresión matemática, descritos en el apartado 2.6.3, está representado por el área bajo dicha curva, obteniendo a partir de ello, el valor mostrado en la Tabla 4.23.

Tabla 4.23 – Determinación del daño anual esperado, asociado a los periodos de retorno analizados.

| Periodo de retorno (años) | Probabilidad de excedencia | Daño (Miles de \$) | DAE (Miles de \$/año) |
|---------------------------|----------------------------|--------------------|-----------------------|
| 5 | 0.2 | \$4,120.60 | \$2,472.36 |
| 10 | 0.1 | \$11,504.47 | \$1,107.58 |
| 50 | 0.02 | \$37,615.96 | \$1,566.69 |
| 100 | 0.01 | \$64,017.61 | \$396.02 |
| 500 | 0.002 | \$166,280.54 | \$613.58 |
| 1000 | 0.001 | \$265,337.24 | \$148.59 |
| Total | | | 6,304.82 |

4.6.6 – Análisis comparativo con infraestructura de protección.

Como parte complementaria al análisis del peligro, vulnerabilidad y riesgo de inundación efectuado en el caso de aplicación, se implementó infraestructura de protección a centros de población, la cual comprende por una parte bordos de protección de forma independiente y subsecuentemente la combinación de dichas obras de protección con una presa rompecicos. Así para el primer escenario de comparación, se utilizó un periodo de retorno de 500 años y para el segundo escenario se empleó el periodo de retorno de 1,000 años, ambos, fundamentados en la normatividad vigente para el diseño de infraestructura de protección a centros de población, establecida por la Comisión Nacional del Agua.

4.6.6.1 – Bordos de protección

Para el desarrollo de este escenario, se tomó como base la configuración geométrica del modelo de simulación asociado al periodo de retorno de 500 años como se ha referido, partiendo de ello, y en base a los resultados de las elevaciones derivadas de la simulación de funcionamiento hidráulico bajo dicho escenario probabilístico, cuya profundidad máxima en las inmediaciones de la infraestructura público urbana, asciende a los 4.30 m, como se ha referido en la Tabla 4.4. A partir de ello, se procedió al empleo de la herramienta disponible en Iber, para la consideración de diques, lo cual, para el presente análisis, permitió la definición de una sección rectangular para la corona, obteniéndose con la elevación de las cota que definen sus vértices, los taludes representativos de los bordos de protección trapezoidales, cuyo esquema tipo de su sección geométrica se muestra en la Figura 4.3.

De acuerdo a los resultados obtenidos, fue posible identificar que en el tramo del río Escondido, en donde se encuentra la zona urbana de mayor densidad, se presenta un estrechamiento del cauce, provocando en combinación con la reducción de la sección hidráulica en los cruces con carreteras, que se presente una cuña de almacenamiento, lo que potencia el efecto de anegamiento en dicha zona; por tal razón, se procedió con la citada herramienta a definir una rectificación de la sección hidráulica del río, respetando la rasante del cauce, de acuerdo al modelo digital de elevaciones, el resultado de dicho procedimiento puede observarse en la Imagen 4.48.

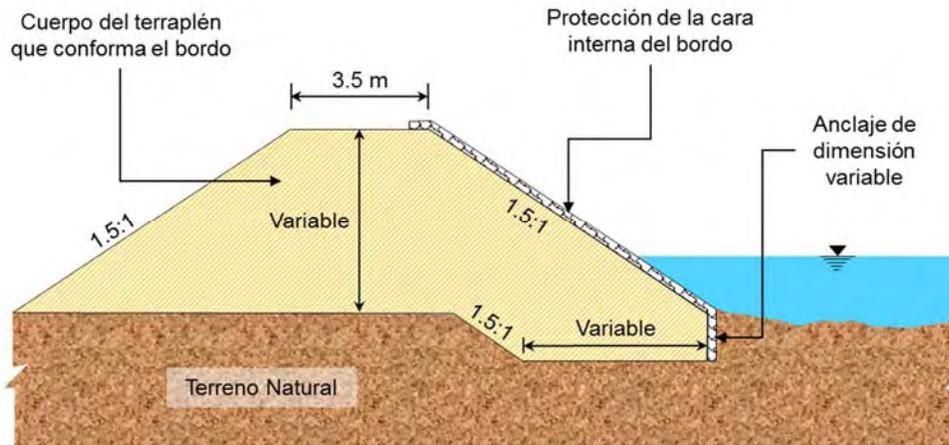


Figura 4.3 – Sección tipo de los bordos de protección.

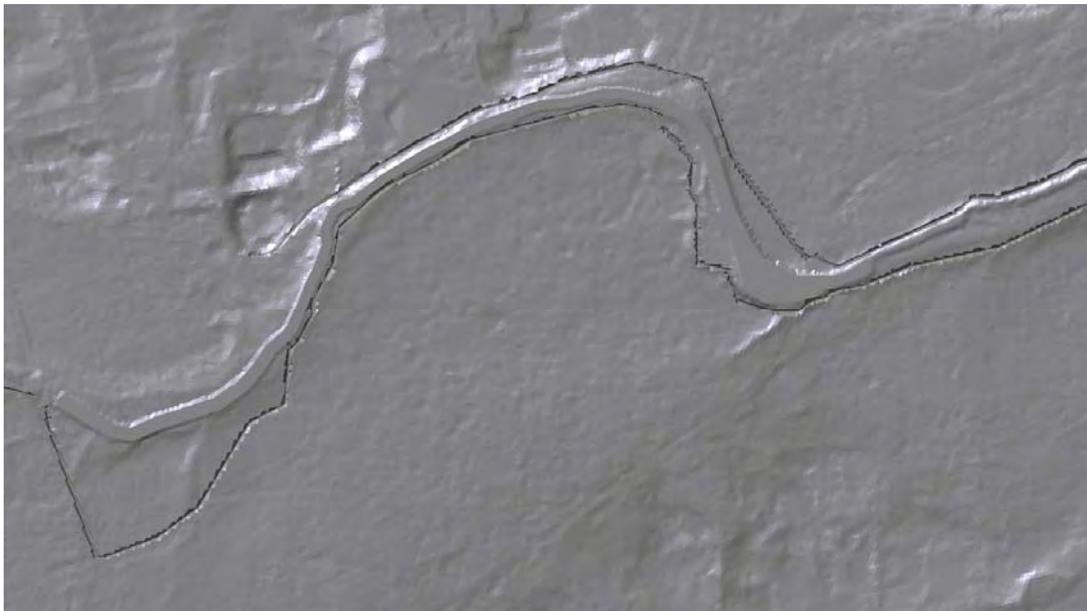


Imagen 4.48 – Rectificación del cauce del río Escondido, efectuada mediante la edición de la malla no estructurada.

Efectuada la rectificación del cauce en las inmediaciones de la zona urbana en una longitud de 2.74 km, se procedió al trazado de los bordos de protección Imagen 4.49, estimando para ello, una longitud de 16.49 km. Es pertinente mencionar que, en dicha edición de la geometría, se respetaron las cotas de elevación en las inmediaciones de los puentes vehiculares y ferroviario, localizados a lo largo de la trayectoria del río Escondido.



Imagen 4.49 – Distribución de bordos de protección, efectuados mediante la edición de la malla no estructurada.

Una vez efectuadas dichas adecuaciones en el modelo geométrico, se procedió a ejecutar la simulación de funcionamiento hidráulico, desprendiéndose a partir de los resultados obtenidos, las siguientes apreciaciones:

- Se observa en la mancha de inundación máxima, mostrada en la Imagen 4.50, que las obras de protección marginal (bordos) y su interacción con las estructuras de cruce con el río Escondido, no son suficientes para brindar protección a la infraestructura público-urbana en las colonias Delicias, Periodistas y Villa de Fuentes, del municipio de Piedras Negras, Coahuila y por ende de la población que en ellas habita. Acentuando con ello, los efectos de inundación en zonas que con el escenario sin obras de protección, representaba un impacto de menor proporción, como se puede observar al contrastar dichos resultados con la Imagen 4.20.

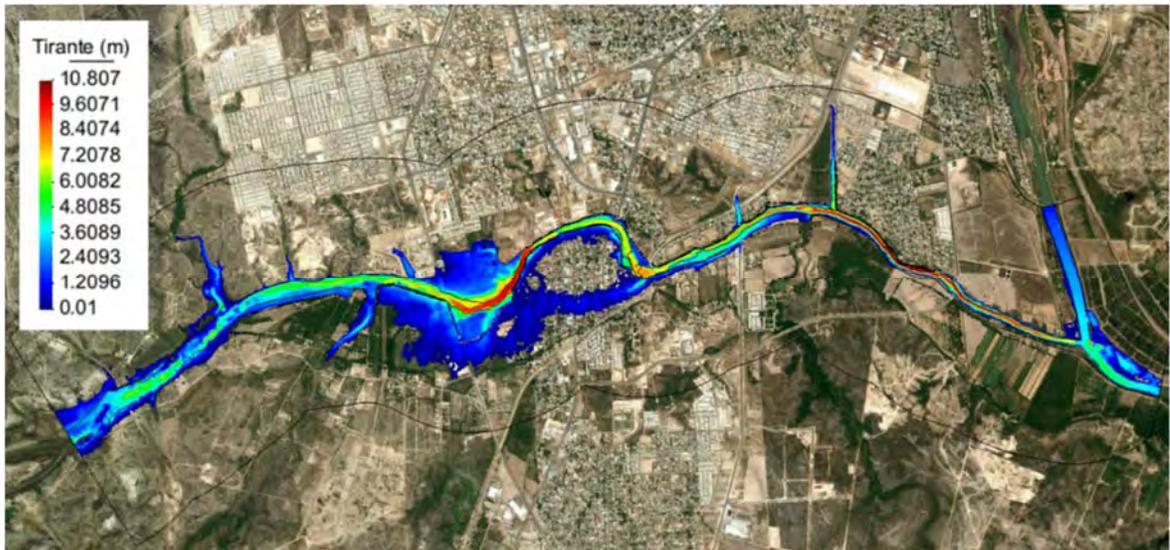


Imagen 4.50 – Resultado del tránsito de la avenida asociada a un $Tr = 500$ años, considerando bordos de protección.

- Como se ha referido, la interacción de los bordos considerados, con las cotas de elevación de las estructuras de cruce de las vialidades principalmente, propician que en la geometría se formen escotaduras, por las cuales el agua se propaga por la parte interna de los bordos, como se muestra en la secuencia mostrada en la Imagen 4.51, para reconocer su cauce e inundar la zona urbana.

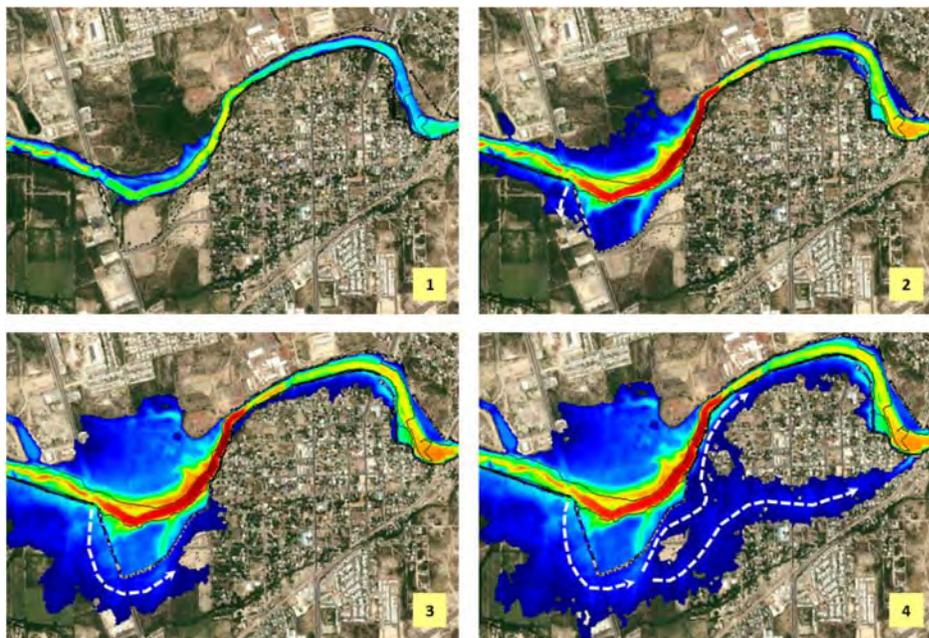


Imagen 4.51 – Secuencia de propagación de la avenida asociada a un $Tr = 500$ años, considerando bordos de protección.

De acuerdo a lo anterior, en la Tabla 4.23, se presenta la cuantificación a partir de la estimación de la vulnerabilidad física derivada de la probable incidencia de dicho evento extraordinario, además del riesgo potencial asociada a éste y su respectivo contraste con los resultados asociados sin la consideración de infraestructura de protección.

Tabla 4.23 – Comparación de cuantificación y potenciales daños, entre los escenarios con obras de protección y sin ellas, para la incidencia de una inundación asociada a un periodo de retorno de 500 años.

| Estimación de daños (Tr = 500 años) | Concepto | Unidad | Cuantificación | | Costo total de daños (Miles \$) | |
|---|-----------------|-----------------|----------------|------------|------------------------------------|---------------------|
| | | | Sin Bordos | Con Bordos | Sin Bordos | Con Bordos |
| Viviendas | Vivienda | Vivienda | 564.00 | 674.00 | \$73,587.11 | \$71,909.37 |
| Bodegas o comercios | Bodegas | Establecimiento | 11.00 | 30.00 | \$3,960.00 | \$10,800.00 |
| Planteles escolares | Preescolar | Escuela | 0.00 | 1.00 | \$0.00 | \$14.70 |
| | Primaria | Escuela | 0.00 | 1.00 | \$0.00 | \$109.22 |
| | Secundaria | Escuela | 0.00 | 1.00 | \$0.00 | \$31.51 |
| Centros socio-culturales y religiosos | Centro | Centro | 3.00 | 5.00 | \$2,025.00 | \$61.76 |
| Caminos | Carreteras | m ² | 35,500.00 | 55,483.33 | \$8,757.89 | \$12,193.30 |
| | Calles | m ² | 76,075.00 | 94,700.00 | \$856.65 | \$805.10 |
| | Terracerías | m ² | 71,600.00 | 52,500.00 | \$980.52 | \$681.51 |
| Vías ferroviarias | Vía ferroviaria | km | 0.38 | 0.36 | \$2,941.01 | \$2,788.63 |
| Infraestructura y equipos eléctrico (CFE) | Equipos | Equipos | 135.00 | 35.00 | \$1,592.74 | \$799.54 |
| Red de agua potable | Infraestructura | m ² | 11,437.50 | 28,410.00 | \$59.11 | \$113.65 |
| Red de drenaje y alcantarillado | Infraestructura | km | 7.96 | 9.93 | \$49,251.33 | \$61,448.08 |
| Zonas agrícolas | Producción | Hectáreas | 46.06 | 34.18 | \$379.75 | \$404.62 |
| Costo por la pérdida de días hombre de trabajo en la inundación | Población | Días - hombre | 11,280.00 | 13,480.00 | \$1,993.40 | \$2,382.19 |
| Costos incurridos por servicio médico para atender la emergencia | Población | Habitante | 2,820.00 | 3,370.00 | \$7,896.00 | \$9,436.00 |
| Costo por la puesta en marcha de albergues para la atención de damnificados | Albergues | Albergues | 3.00 | 3.00 | \$12,000.00 | \$12,000.00 |
| TOTAL | | | | | \$166,280.54 | \$185,979.17 |

Como puede observarse, la consideración de bordos de protección, bajo las condiciones actuales de interacción con las estructuras de cruce existente en la zona de estudio, no representa una ventaja respecto a prescindir de ellas, de hecho, de acuerdo a los resultados gráficos mostrados en la Imagen 4.50, se puede evidenciar, respecto al resultado obtenido en la situación sin bordos de protección Imagen 4.20, que se acentúan los efectos de la inundación en la parte sur, a causa de las escotaduras que se generan entre los puentes y los bordos de protección considerados, ello debido a que, se identificó

que para que los bordos trabajen hidráulicamente de forma adecuada, su corona debe localizarse por encima de la cota de elevación de la carpeta asfáltica de las carreteras localizadas en las inmediaciones del río Escondido.

Muestra del efecto descrito con anterioridad, se refleja en la cuantificación y estimación de daños, donde resulta más crítico el escenario en el que se consideran dichos bordos, por lo que su consideración demuestra que técnicamente no representa una alternativa adecuada para ser implementada.

4.6.6.2 – Presa rompepicos - bordos

Respecto al escenario cuya configuración planteada consiste en la consideración de una presa rompepicos en combinación con bordos de protección, cuyo evento probabilístico asociado, de acuerdo a la normatividad vigente es el correspondiente a un periodo de retorno de 1,000 años, como se ha referido con antelación; primeramente se procedió a estimar en base al modelo digital de elevaciones (Imagen 4.52), la curva de elevaciones-áreas-capacidades (Grafica 4.9), de la zona aguas arriba de la confluencia de los ríos Escondido y San Antonio, esto con objeto de determinar las características morfológicas para la citada presa, cuyo perfil transversal respecto al eje de la boquilla considerada, localizada en el sitio de referencia indicado en la Imagen 4.53, se representa en la Gráfica 4.10.

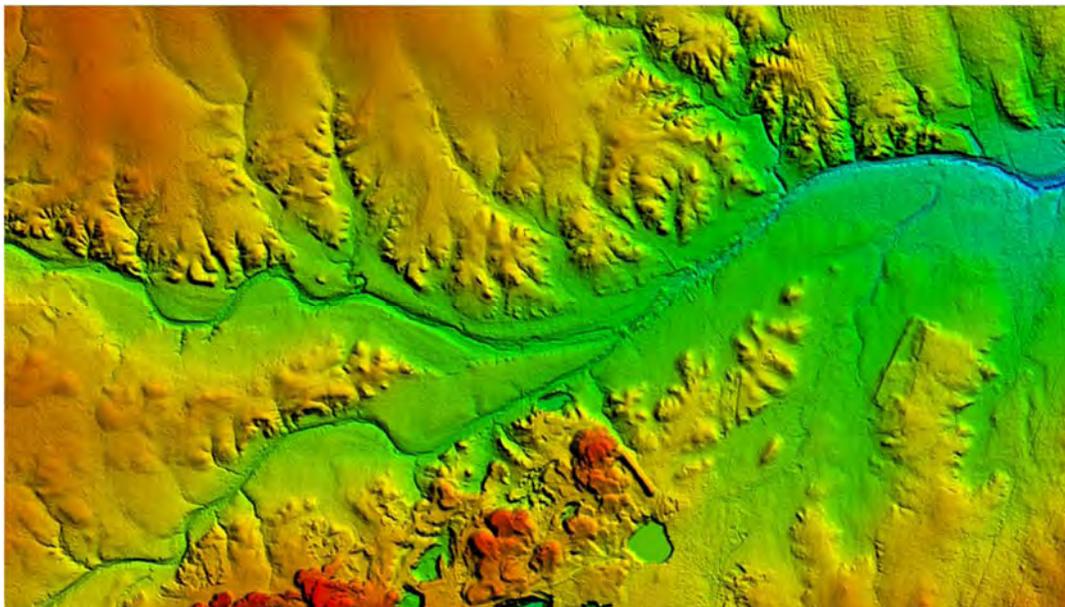
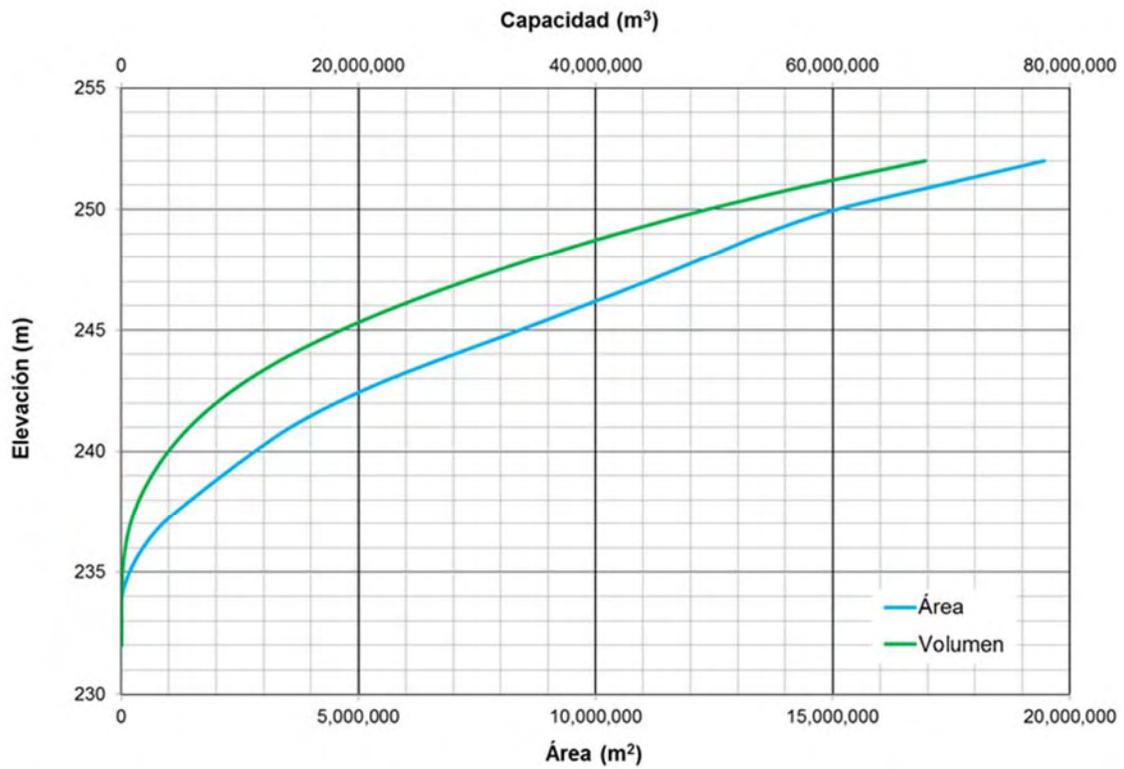


Imagen 4.52 – Modelo digital de elevaciones, con resolución de 5 m (INEGI).



Gráfica 4.9 – Curva elevaciones – áreas – capacidades.

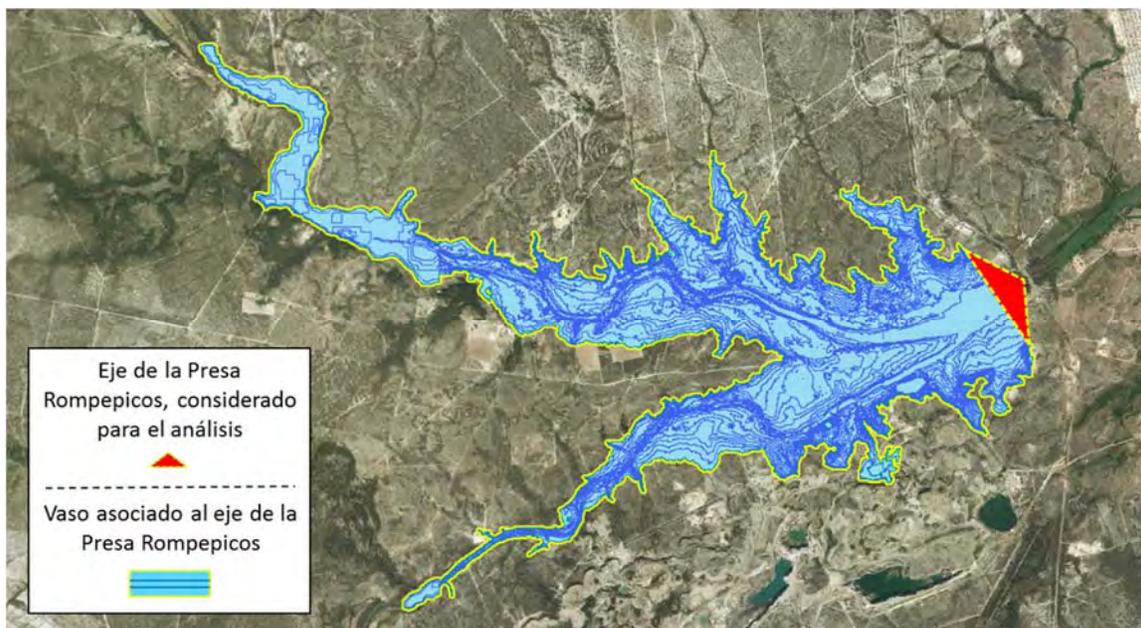
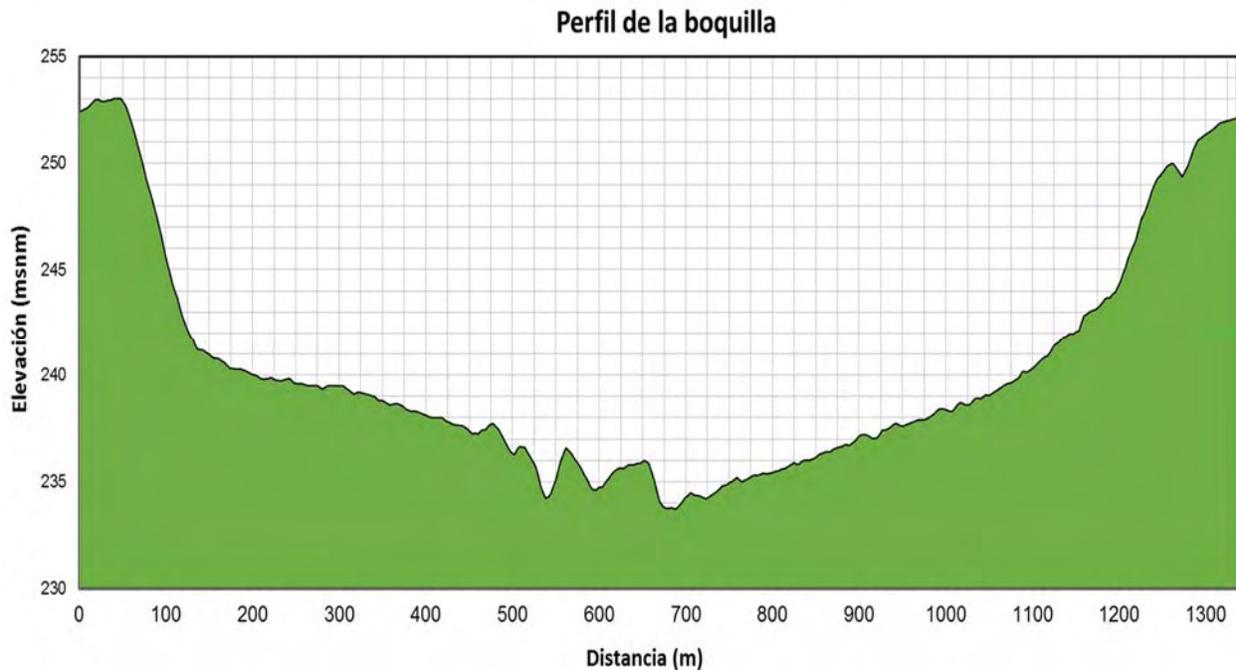


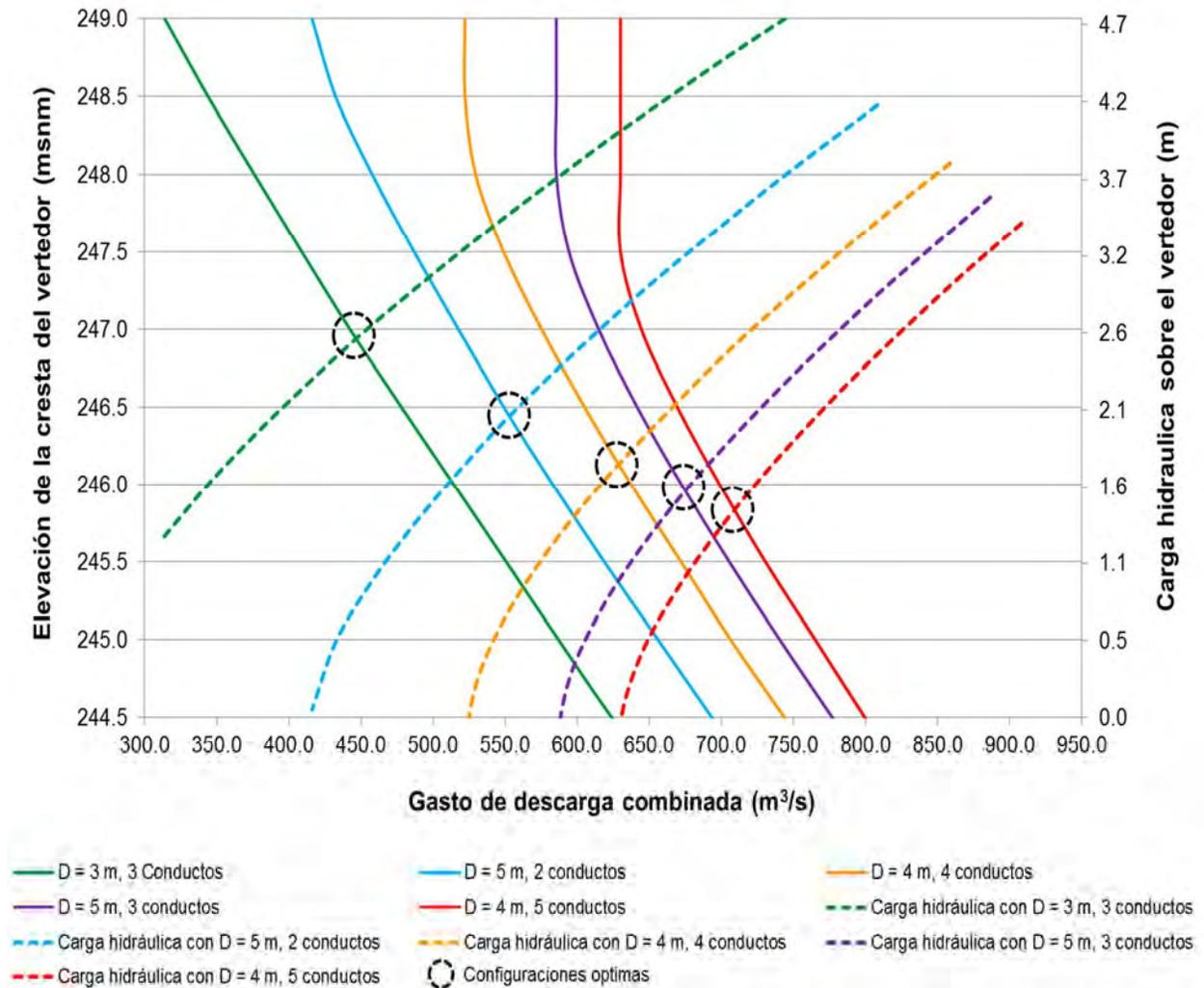
Imagen 4.53 – Representación del vaso de regulación de la presa rompepicos.



Gráfica 4.10 – Sección transversal de la boquilla considerada para la presa rompepicos.

Una vez definida la curva de elevaciones-áreas-capacidades, se procedió a efectuar el tránsito de la avenida por el vaso, mediante el empleo del procedimiento analítico, desarrollado por medio de la implementación de métodos de aproximación numérica. Para ello y con el fin de simplificar el análisis, se consideró una longitud de cresta en 25 m, situación que bajo el análisis con objeto de elaboración de un análisis para estudio de factibilidad y/o desarrollo de un proyecto ejecutivo, no debe acotarse de tal manera, si no en base a la determinación de la longitud óptima de cresta.

Subsecuentemente a dicha consideración, se procedió al planteamiento de diversos escenarios de configuración de conductos de fondo y de elevación de la cresta de la obra de excedencias, a partir de cuyos resultados, fue posible la construcción de la Gráfica 4.11, en la cual se ha identificado la configuración óptima para cada una de las alternativas analizadas.



Gráfica 4.11 – Variantes de dimensionamiento para conducto de fondo y altura de vertedor para presa rompepicos, con longitud de cresta = 25 m.

Para el desarrollo comparativo, se seleccionó la configuración de 2 conductos de 5 m de diámetro, con una cresta de 25 metros de longitud como se ha mencionado, ubicada a una elevación de 246.50 m.s.n.m.; arreglo, cuyo gasto máximo de descarga combinada corresponde a 553.32 m³/s, como se observa en el hidrograma que se muestra en la Gráfica 4.12, obteniendo con ello una elevación al N.A.M.E., en la cota 248.56 m.s.n.m.; características que se aprecian gráficamente en la Figura 4.4.

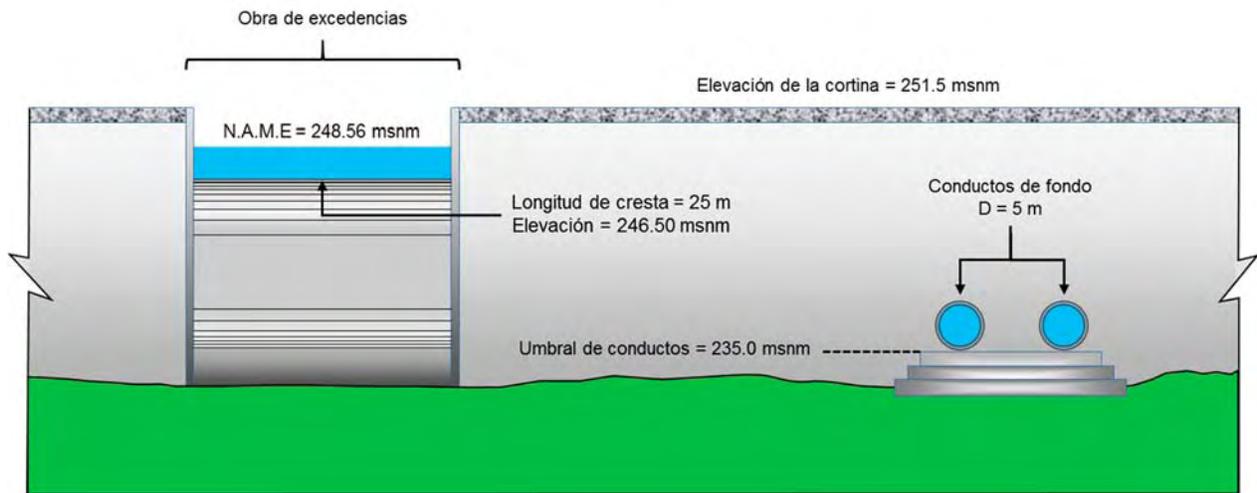
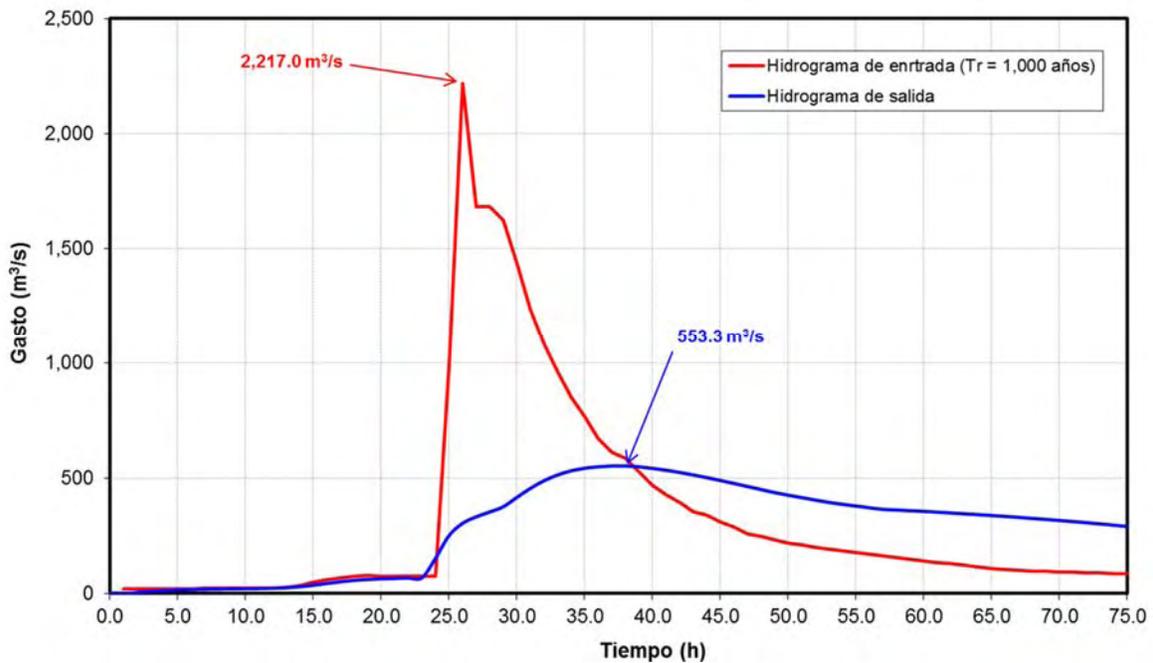


Figura 4.4 – Esquema del arreglo de componentes que integran la presa rompepicos.



Gráfica 4.12 – Hidrogramas de entrada y salida de la presa rompepicos.

A partir de los resultados obtenidos del tránsito de la avenida asociada al periodo de retorno de 1,000 años, se procedió a la configuración de los parámetros hidráulicos del modelo de simulación desarrollado en el programa Iber, propiamente, al establecimiento del nuevo hidrograma y a la adecuación del tiempo de simulación. Así mismo, como se ha considerado el análisis en combinación con infraestructura de protección marginal

(bordos), se procedió a la edición del trazo (Imagen 4.54), siguiendo el procedimiento descrito en el escenario donde únicamente se analizaron dichas obras de forma independiente, considerando de igual forma la rectificación de las sección hidráulica del cauce en las inmediaciones de la zona urbana.



Imagen 4.54 – Distribución de bordos de protección, efectuados mediante la edición de la malla no estructurada, para la combinación con presa rompepicos.

Es preciso mencionar que para este escenario de análisis, se consideró para los bordos de protección el dimensionamiento y sección geométrica, representada en la Figura 4.3, cuya elevación máxima, se estimó en 2.30 m.

Posteriormente a la edición y configuración del modelo de análisis bidimensional, se procedió a la ejecución del mismo, obteniéndose a partir de ello, los siguientes resultados:

- El tránsito de la avenida asociada al periodo de retorno de 1,000 años, con la interacción de una presa rompepicos y bordos de protección, arroja un resultado favorable para la protección de la población del municipio de Piedras Negras, localizada en las inmediaciones de las márgenes del río Escondido, como se puede observar en la Imagen 4.55, en contraste con la mancha de inundación representativa para dicho escenario probabilístico sin la consideración de obras de protección mostrada en la Imagen 4.56.



Imagen 4.55 – Resultado del tránsito de la avenida asociada a un $Tr = 1,000$ años, con interacción de infraestructura de la presa rompepicos y bordos.

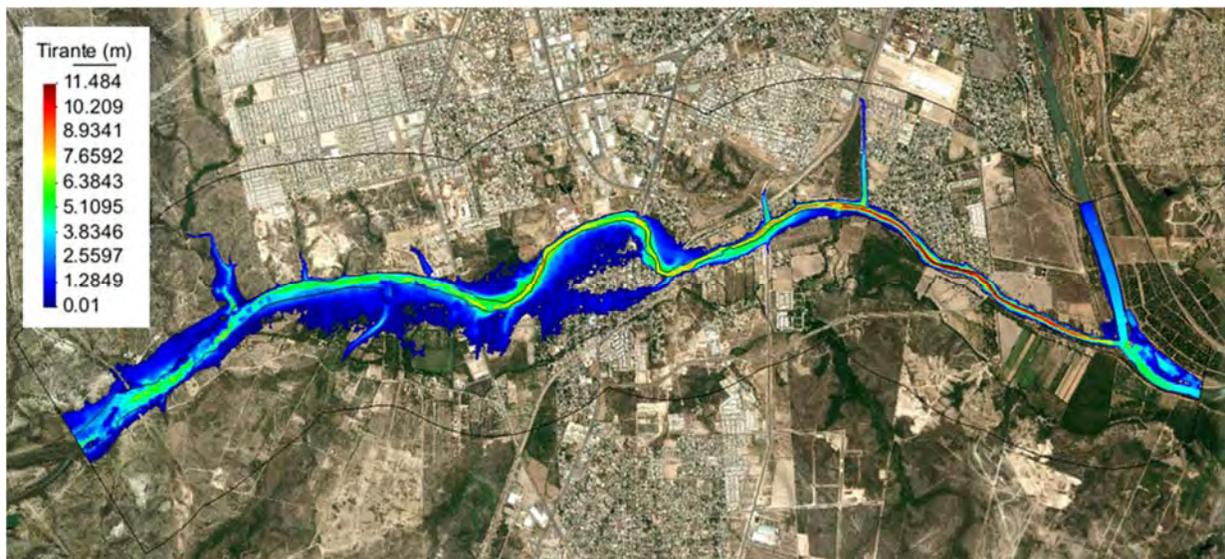


Imagen 4.56 – Resultado del tránsito de la avenida asociada a un $Tr = 1,000$ años, sin obras de control y protección.

A partir de lo identificado en la representación gráfica de la mancha de inundación derivada de la simulación bidimensional del tránsito de la avenida asociada a dicho periodo de retorno, se presenta en la Tabla 4.24, la cuantificación derivada del análisis de vulnerabilidad y el riesgo y su respectiva comparación con los resultados asociados al periodo de retorno de 1,000 años, sin la consideración de obras de protección.

Tabla 4.24 – Comparación de cuantificación y potenciales daños, entre los escenarios con obras de control y protección, y sin ellas, para una inundación asociada a un periodo de retorno de 1,000 años.

| Estimación de daños (Tr = 1,000 años) | Concepto | Unidad | Cuantificación | | Costo total de daños (Miles \$) | |
|---|-----------------|-----------------|----------------|--------------|------------------------------------|-------------------|
| | | | Sin Obras | Presa-Bordos | Sin Obras | Presa-Bordos |
| Viviendas | Vivienda | Vivienda | 907.00 | 3.00 | \$125,560.46 | \$13.13 |
| Bodegas o comercios | Bodegas | Establecimiento | 32.00 | 0.00 | \$11,520.00 | \$0.00 |
| Planteles escolares | Preescolar | Escuela | 1.00 | 0.00 | \$31.51 | \$0.00 |
| | Primaria | Escuela | 1.00 | 0.00 | \$130.23 | \$0.00 |
| Centros socio-culturales y religiosos | Centro | Centro | 10.00 | 0.00 | \$93.47 | \$0.00 |
| Caminos | Carreteras | m ² | 44,000.00 | 4,375.00 | \$9,748.70 | \$949.40 |
| | Calles | m ² | 119,875.00 | 2,525.00 | \$1,332.82 | \$27.85 |
| | Terracerías | m ² | 120,600.00 | 0.00 | \$1,567.17 | \$0.00 |
| Vías ferroviarias | Vía ferroviaria | km | 0.42 | 0.00 | \$3,221.68 | \$0.00 |
| Infraestructura y equipos eléctrico (CFE) | Equipos | Equipos | 184.00 | 0.00 | \$1,998.85 | \$0.00 |
| Red de agua potable | Infraestructura | m ² | 19,095.00 | 757.50 | \$103.87 | \$3.93 |
| Red de drenaje y alcantarillado | Infraestructura | km | 12.54 | 0.27 | \$77,598.48 | \$1,650.41 |
| Zonas agrícolas | Producción | Hectáreas | 61.32 | 0.00 | \$526.31 | \$0.00 |
| Costo por la pérdida de días hombre de trabajo en la inundación | Población | Días - hombre | 18,140.00 | 28.00 | \$3,205.70 | \$4.95 |
| Costos incurridos por servicio médico para atender la emergencia | Población | Habitante | 4,535.00 | 7.00 | \$12,698.00 | \$19.60 |
| Costo por la puesta en marcha de albergues para la atención de damnificados | Albergues | Albergues | 4.00 | 0.00 | \$16,000.00 | \$0.00 |
| TOTAL | | | | | \$265,337.24 | \$2,669.27 |

De acuerdo al contraste de resultados gráficos y numéricos, resulta evidente que la combinación de una presa rompepicos y bordos de protección, resulta una configuración técnicamente adecuada para proveer de seguridad a la población de la ciudad de piedras Negras, Coahuila, ante la incidencia del tránsito de una avenida asociada a un periodo de retorno de 1,000 años, contribuyendo con ello a minimizar el peligro, la vulnerabilidad y riesgo, de las condiciones actuales a las que está expuesta.

5 – CONCLUSIONES

- El desarrollo de la presente investigación ha permitido conocer y analizar diversos criterios y metodologías, empleadas tanto a nivel nacional, como en el contexto internacional, enfocadas en la estimación del peligro, la vulnerabilidad y riesgo de inundaciones. En ellas, se aprecia que es indispensable desarrollar un vasto conjunto de análisis de índole hidráulica, geoespacial, estadística, económica e incluso social, para su implementación y obtención de resultados confiables.
- Respecto a los criterios y normatividad vigentes para la delimitación de la zona federal en nuestro país, y en particular para su consideración en la zona de estudio, se vió que cumple satisfactoriamente, lo que refleja la experiencia adquirida ante la incidencia de eventos hidrometeorológicos que han ocasionado inundaciones en la zona.
- De acuerdo a los resultados obtenidos con el desarrollo del caso de aplicación, es posible establecer que la ciudad de Piedras Negras, Coahuila, se encuentra en situación de riesgo latente: Prueba de ello, lo reflejan la peligrosidad y la vulnerabilidad ante la probable incidencia de avenidas extraordinarias que pueden ocasionar inundaciones, puesto que se ha identificado que para avenidas asociadas a un periodo de retorno de 50 años o superior, el cauce no tiene la capacidad para su adecuado tránsito, propiciando con ello su potencial desbordamiento.
- Es de llamar la atención que en general las correlaciones entre los valores de tirante y velocidades máximas, en las inmediaciones de la zona urbana de la Ciudad de Piedras Negras, cuyos valores obtenidos se encuentran en los rangos de 0.50 – 4.30 m y 0.60 – 2.40 m/s, respectivamente, se concentren en la generalidad de los criterios en la zona de máxima peligrosidad y vulnerabilidad, lo cual refleja el alto riesgo que corre dicha población ante la incidencia de avenidas en el río Escondido.
- Con relación a los daños estimados y su contraste con los derivados de los respectivos escenarios, en los que se consideraron bordos de protección y una combinación de estos en interacción con una presa rompepicos, estos pueden fungir como referente para la análisis y posterior gestión de proyectos de infraestructura de protección a

centros de población, que contribuya a garantizar la protección y seguridad de la población localizada en las inmediaciones de la Ciudad de Piedras Negras, Coahuila. No siendo limitativas dichas alternativas de configuración de obras de protección, incluidas en la presente investigación, ya que la consideración de ellas o algunas otras estarán en función de sus respectivos indicadores de rentabilidad.

6 – BIBLIOGRAFÍA Y FUENTES DE INFORMACIÓN

- Alcocer-Yamanaka, V. H., Rodríguez-Varela, J. M., Bourguett-Ortiz, V. J., Llaguno-Guilberto, O. J., & Albornoz-Góngora, P. M. (2016). *Metodología para la generación de mapas de riesgo por inundación en zonas urbanas. Tecnología y ciencias del agua* (Vol. 7). Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
- Bladé E., Cea L., & Corestein G. (2014). Modelización numérica de inundaciones fluviales. *Ingeniería Del Agua*, 18(1), 71-81.
- Diario Crónica, (2010). *Un millón de veracruzanos damnificados*. Fotografía tomada de Notimex <http://www.cronica.com.mx/notas/2010/533201.html>.
- Diario El Universal, (2015). *Realiza SCT recuento de daños por Ingrid y Manuel sobre Guerrero*. <https://www.eluniversal.com.mx/articulo/estados/2015/09/16/realiza-sct-recuento-de-danos-por-ingrid-y-manuel-sobre-guerrero>.
- CENAPRED. (2004). *Fascículo - Inundaciones*. (Marco Antonio Salas Salinas y Martín Jiménez Espinosa), 5-45.
- CENAPRED. (2006). (Héctor Eslava Morales, Héctor Eslava Morales, Martín Jiménez Espinosa, Marco Antonio Salas Salinas, Fermín García Jiménez, María Teresa Vázquez Conde, Carlos Baeza Ramírez y David R. Mendoza Estrada). *Guía básica para la elaboración de atlas estatales y municipales de peligros y riesgos.*, volumen 39, 55-70.
- Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos, Secretaria de Gobernación, vigésima primera edición impresa 2014, artículo 27°.
- FAO. (2009). (Baas S., Ramasamy S., Dey de Pryck J. Battista F. *Análisis de sistemas de gestión del riesgo de desastres - una guía*. Version electronica, 5-28.
- Fuentes Ó., (2011). *Estimación del peligro y la vulnerabilidad por inundaciones en zonas urbanas*. Semana de riesgos naturales y antropogenicos, Instituto de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México, 6-14.
- Fuentes Ó., (2013). Seminario internacional de potamología, Mesa redonda “Gestión de riesgo de inundación, Subdirección de Hidráulica y Ambiental, Instituto de Ingeniería; UNAM.
- Gómez, M., Macchione, F., & Russo, B. (2011). *Modelo físico para el estudio de los criterios de riesgo en zonas urbanas*. XXIV Congreos Latinoamericano de Hidráulica, 1–13.

González J. A., & Peñalosa X. (2015). *Delimitación de riberas de ríos y arroyos*. Instituto Mexicano de Tecnología Del Agua, 1–6.

Gracia, J., (2002). Introducción al diseño de zonas de riego y drenaje. Serie del Instituto de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México. Clave C-26. Versión electrónica. 33.

Ley de Aguas Nacionales, Diario Oficial de la Federación, última reforma 24-03-2016. Artículos 113° y 114°.

Ministerio de Agricultura Alimentación y Medio Ambiente de España. Real Decreto 849/1986, de 11 de abril, por el que se aprueba el Reglamento del Dominio Público Hidráulico , 3–4.

Peñalosa X. & González J. A. Delimitación de riberas de ríos y arroyos, Postal interactivo agua.org.mx., 1-6.

Reglamento de la Ley de Aguas Nacionales, Diario Oficial de la Federación, última reforma 25-08-2014, artículo 4°.

Rodríguez-Varela J. M., Alcocer-Yamanaka V. H., Albornoz-Góngora P. M., Llaguno-Guilberto O. J. & Maldonado-Silvestre J. (2007). Problemática de inundaciones en zonas urbanas y propuestas de solución desde un enfoque matemático. *Instituto Mexicano de Tecnología del Agua*, 1–7.

SEMARNAT-CONAGUA. (2014). Construcción de curvas de costos por daños por inundación a las zonas agrícolas e infraestructura urbana y red carretera del país, 2-40.

Valdés-Martínez, O. (2014). Peligro, vulnerabilidad y riesgo en la región del Caribe - EcuRed. Retrieved November 29, 2018.