



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

ALGUNOS ASPECTOS DE RIESGO DE DAÑO POR INUNDACIONES PLUVIALES
Y FLUVIALES EN LA CUENCA MEDIA DEL RÍO USUMACINTA

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

PRESENTA:
JORGE ALBERTO CORTÉS ALFARO

TUTOR PRINCIPAL
DR. OSCAR ARTURO FUENTES MARILES, INSTITUTO DE INGENIERÍA

CIUDAD DE MÉXICO, DICIEMBRE 2017

JURADO ASIGNADO:

Presidente: DR. RAMÓN DOMÍNGUEZ MORA

Secretario: DR. JESÚS GRACIA SÁNCHEZ

Vocal: DR. OSCAR ARTURO FUENTES MARILES

1^{er}. Suplente: M. EN I. VÍCTOR FRANCO

2^{d o}. Suplente: DRA. MARITZA LILIANA ARGANIS JUÁREZ

Lugar donde se realizó la tesis: Cuernavaca, Morelos

TUTOR DE TESIS:

DR. OSCAR ARTURO FUENTES MARILES

FIRMA

Dedicatorias

A las mujeres de mi vida:

A mi esposa Gabriela: Llega el final de otro viaje que emprendimos juntos, infinitas gracias por todo tu amor y apoyo, sin el cual no estaría escribiendo estas líneas. ¡Te amo!

A mi mamá Martha: Por darme la vida, tu amor y tu ejemplo, este logro no sería tal sin ti.

A mi hermana Eunice: Por tu amor y amistad sincera, por ser siempre un apoyo constante en mi vida. Eres la mejor hermana que pudiera desear.

Son mi fuerza, las amo.

A mi familia:

A mi papá Josué: Por siempre estar ahí para darme un buen consejo, me alegra mucho el reencuentro que hemos tenido, gracias por tu amistad y amor.

A mis abuelas: Eunice y su hermana Evelia que a sus 89 y a 88 años nos siguen dando lecciones de vida y por el profundo cariño que me profesan.

A mis tías: Vico, Charo, Chelo, Chela, segundas madres, que siempre están pendientes de mí, en especial a mi tía Carmelita (QEPD) y Pilar (QEPD) quienes me dejaron un profundo vacío con su partida.

A mis primos: Carlos Víctor, Paco, Anita, León, Laura, Fátima, Rubén, Emilia, Eugenia, Jona, Miri, Eva, que más que primos son hermanos, los quiero.

A mis amigos:

La extensión de mi familia, Víctor, Carlos, Marco, Paco, Cecilia, Diana, Gina, muchas gracias por todo su cariño y apoyo y por todos los momentos que hemos vivido juntos, los quiero mucho.

Todos aquellos familiares y amigos que no recordé al momento de escribir esto. Ustedes saben quiénes son.

Agradecimientos

A mi alma Mater, la Universidad Nacional Autónoma de México, en particular, a la Facultad de Ingeniería por haberme formado académicamente y permitirme ser parte de esta noble institución.

A mi tutor y director de este trabajo, el Dr. Oscar Fuentes Mariles, por darme la oportunidad de dirigir este trabajo, por su paciencia, apoyo y por sus valiosas aportaciones.

A los ilustres investigadores del Instituto de Ingeniería el Dr. Ramón Domínguez Mora, M. en I. Víctor Franco, Dra. Maritza Arganis y Dr. Jesús Gracia, por haber enriquecido el trabajo con sus observaciones.

A mi centro de trabajo en Comisión Federal de Electricidad, lugar que se convirtió en mi segundo hogar y que me ha dado la oportunidad de desarrollar mi gran pasión por el agua y la energía y a través del cual fue posible el desarrollo de este trabajo. En particular a los jefes que me han formado como ingeniero: el ing. Luis Athié Morales, Ing. Juan Francisco Hernández Pérez, Ing. Ma. Magdalena Alday, quién particularmente lideró la expedición al río Usumacinta de agosto de 2016 que derivó en este trabajo y al Ing. Gerardo Román Castañeda, por todo el apoyo proporcionado durante los trámites de titulación. Así como a los compañeros con los que he trabajado codo a codo en los últimos 6 años, tanto ingenieros, biólogos y antropólogos que me han nutrido con sus conocimientos y me han permitido humanizar el quehacer de la ingeniería.

A Renan Velasco, compañero de la maestría, del trabajo, pero sobre todo un gran amigo, por ser un apoyo constante desde animarme a hacer el examen de admisión, aportar su invaluable ayuda en el desarrollo de este trabajo e incluso estar pendiente de mis trámites de titulación. ¡Lo logramos querido amigo!

A Manuel Bañuelos, por su interés en el trabajo, sus consejos y por ser el autor de algunas fotografías tomadas durante la visita de campo de agosto de 2016.

A Daniel Puga, por su invaluable ayuda como diseñador gráfico.

A los pobladores de Frontera Corozal, del bello estado de Chiapas, en particular a Servando Gómez por su valioso apoyo en la realización del trabajo de campo.

Abstract

Since the beginning of the history of mankind the zones bordering the great rivers have attracted human beings for their fertility; however, just as water is source of life, it can also turn against and show its danger due to the damage it would cause. The human settlements located on the edges of the Usumacinta River are not the exception and have been affected by floods since ancient times. In recent years, extraordinary hydrometeorological events have occurred, particularly in the month of October 2008 and 2010. The increase in rainfall and runoff along the Usumacinta River, coupled with the high degree of marginalization in neighboring towns, makes this an area particularly vulnerable to flood damage. In this work a zoning of the susceptible areas to be flooded was carried out, as well as an analysis of the vulnerability and the determination of the expected annual cost for flood damage with relatively little information to finally develop flood risk maps for the population of Frontera Corozal, Chiapas, Mexico, as well as for the Frontera Técnica and Bethel populations in the Petén Department in the Republic of Guatemala.

Resumen

Las zonas aledañas a los grandes ríos han atraído al ser humano por su fertilidad desde el inicio de la historia; sin embargo, así como el agua es fuente de vida, también puede tornarse en contra y mostrar su peligrosidad por daños que causaría. Los asentamientos humanos ubicados en las márgenes del río Usumacinta no son la excepción y han sido afectados por inundaciones desde tiempos remotos. En años recientes se han presentado eventos hidrometeorológicos extraordinarios, particularmente en el mes de octubre del año 2008 y 2010. El aumento en la de la precipitación y el escurrimiento por el río Usumacinta, aunado al alto grado de marginación en que se encuentran las poblaciones vecinas hacen una zona particularmente vulnerable de sufrir daños por inundaciones. En este trabajo se realizó una zonificación de las áreas susceptibles a ser inundadas, así como un análisis de la vulnerabilidad y la determinación de costo anual esperado por daños por inundación con relativamente escasa información, para finalmente elaborar mapas de riesgo por inundación para la población de Frontera Corozal, Chiapas, México, así como para las poblaciones Frontera Técnica y Bethel en el Departamento del Petén en la República de Guatemala.

Índice

1. INTRODUCCIÓN	5
1.1 OBJETIVO DE LA INVESTIGACIÓN	5
1.2 JUSTIFICACIÓN Y ALCANCES	5
1.3 ESTADO DEL ARTE	7
2. SITIO DE ESTUDIO Y ANÁLISIS HIDROLÓGICO	8
2.1 LOCALIZACIÓN DE LA CUENCA.....	8
2.2 DESCRIPCIÓN DE LA CUENCA.....	9
2.3 PERFIL DEL CAUCE PRINCIPAL.....	10
2.4 ESTACIONES HIDROMÉTRICAS SELECCIONADAS.....	10
2.5 CARACTERÍSTICAS FISIográfICAS.....	12
2.6 ANÁLISIS DE FRECUENCIAS.....	13
3. MODELACIÓN MATEMÁTICA HIDRÁULICA.....	20
3.1 INSUMOS PARA LA GENERACIÓN DE LA GEOMETRÍA DEL MODELO.....	20
3.1.1 <i>Interpolación del fondo del río</i>	20
3.2 PREPROCESAMIENTO PARA LA OBTENCIÓN DE LA GEOMETRÍA DEL MODELO.....	23
3.3 MODELACIÓN HIDRÁULICA EN (HEC-RASV5.0@).....	24
3.3.1 <i>Geometría del modelo</i>	24
3.3.2 <i>Condiciones de frontera</i>	25
3.3.3 <i>Condiciones del flujo</i>	26
3.4 CALIBRACIÓN DEL MODELO EN VISITA DE CAMPO	26
4. CÁLCULO DEL DAÑO ANUAL ESPERADO (DAE).....	36
4.1 FRONTERA COROZAL, OCOSINGO, CHIAPAS, MÉXICO	36
4.2 FRONTERA LA TÉCNICA, DEPARTAMENTO DEL PETÉN, GUATEMALA	50
4.3 BETHEL, DEPARTAMENTO DEL PETÉN, GUATEMALA	56
5. ELABORACIÓN Y ENTREGA DE MAPAS DE ZONAS INUNDABLES.....	63
6. CONCLUSIONES	68
7. ANEXO	70
8. BIBLIOGRAFÍA	82

Relación de tablas

Tabla 3.1 Años de registro en las Estaciones Hidrométricas seleccionadas	12
Tabla 3.2 Características fisiográficas de las subcuencas seleccionadas	13
Tabla 3.3 Valores de gastos ordenados, periodo de retorno y probabilidad de no excedencia para los registros de la EH Boca del Cerro.....	14
Tabla 3.4 Resumen de los ajustes a las funciones de distribución de probabilidad para la EH Boca del Cerro.....	15
Tabla 3.5 Límites de confianza al 95% para la distribución LogNormal de 3 parámetros por Máxima Verosimilitud en la EH Boca del Cerro	16
Tabla 3.6. Período de retorno-gasto	18
Tabla 3.7 Gastos extraordinarios en los sitios de interés	19
Tabla 4.1 Gastos y elevaciones en la Pista de aterrizaje Yaxchilán.....	27
Tabla 5.1 Ecuaciones obtenidas de las curvas de daños potenciales directos en zonas habitacionales. (Baró Suárez, Díaz Delgado, Calderón Aragón, Esteller Alberich, & Cadena Vargas, 2011)	40
Tabla 5.2 Cálculo del Daño Anual Esperado máximo para Frontera Corozal, Chiapas, México	46

Tabla 5.3 Cálculo del Daño Anual Esperado mínimo para Frontera Corozal, Chiapas, México	47
Tabla 5.4 Cálculo del Daño Anual Esperado más probable para Frontera Corozal, Chiapas, México ...	47
Tabla 5.5 Cálculo del Daño Anual Esperado máximo para Frontera La Técnica, Petén, Guatemala.....	52
Tabla 5.6 Cálculo del Daño Anual Esperado mínimo para Frontera La Técnica, Petén, Guatemala	53
Tabla 5.7 Cálculo del Daño Anual Esperado más probable para Frontera La Técnica, Petén, Guatemala	54
Tabla 5.8 Cálculo del Daño Anual Esperado máximo para Bethel, Petén, Guatemala	59
Tabla 5.9 Cálculo del Daño Anual Esperado mínimo para Bethel, Petén, Guatemala.....	59
Tabla 5.10 Cálculo del Daño Anual Esperado más probable para Bethel, Petén, Guatemala	60
Tabla 7.1 Resultados del Daño Anual Esperado para las tres poblaciones involucradas.....	68
Tabla 8.1 Gastos máximos instantáneos registrados en las E.E.H.H. Boca del Cerro, EL Tigre, Lacantún y El Colorado	70
Tabla 8.2 Gastos máximos instantáneos registrados en las E.E.H.H. La Catarata, El Jabalí y San Quintín	71
Tabla 8.3 Coeficientes de correlación entre los registros de gastos máximos de las 7 estaciones hidrométricas seleccionadas	72
Tabla 8.4 Coeficientes de correlación entre los registros de gastos máximos normalizados de las 7 estaciones hidrométricas seleccionadas.....	72
Tabla 8.5 Registros ampliados de las E.E.H.H. Boca del Cerro, El Tigre, Lacantún y El Colorado.....	74
Tabla 8.6 Registros ampliados de las E.E.H.H. La Catarata, El Jabalí y San Quintín	75
Tabla 8.7 Valores de gastos ordenados, periodo de retorno y probabilidad de no excedencia para los registros de la EH El Tigre	78
Tabla 8.8 Resumen de los ajustes a las funciones de distribución de probabilidad para la EH EL Tigre registros ampliados	79
Tabla 8.9 Resumen de los ajustes a las funciones de distribución de probabilidad para la EH EL Tigre registros históricos	80
Tabla 8.10 Límites de confianza al 95% para la distribución LogNormal de 3 parámetros por Máxima Verosimilitud en la EH El Tigre.....	81

Relación de figuras

Figura 1.1 Reportes de fenómenos destructivos con gran cantidad de pérdidas materiales y humanas (1980-2006) Fuente: (García, 2010)	5
Figura 3.1 Localización de la cuenca del Río Usumacinta	8
Figura 3.2 Regiones hidrológicas administrativas de CONAGUA (CONAGUA, 2012)	9
Figura 3.3 Perfil del cauce principal	10
Figura 3.4 Localización y cuencas de drenaje de las Estaciones Hidrométricas seleccionas	11
Figura 3.5 Ajuste LogNormal de 3 parámetros por Máxima Verosimilitud, EH Boca del Cerro	16
Figura 3.6. Ajuste a la función lognormal.....	17
Figura 3.7. Ajuste a la función Gumbel	18
Figura 4.1 Estimación del fondo del río.....	21
Figura 4.2 Sección tipo obtenida mediante la interpolación del fondo del río	21
Figura 4.3 Perfil obtenido por GEIC en 1990 comparado con el obtenido en 2015 en el estudio LiDAR (SAP, 2015)	22
Figura 4.4 Generación de la geometría a modelar. Hec-GeoRAS	23
Figura 4.5 Exportación de geometría del modelo a HEC-RAS para cálculo	24
Figura 4.6 Secciones transversales provenientes de Hec-GeoRAS en Hec-RAS	25
Figura 4.7 Condición de frontera aguas abajo.	25
Figura 4.8 Guía especializado Servando López Vázquez	26
Figura 4.9 Levantamiento de puntos de control para georreferenciación en la carretera federal # 307, sobre el cauce del río Usumacinta, en la Zona Arqueológica de Yaxchilán, y en un predio a un costado de una vivienda.	28
Figura 4.10 Entrevistas a los pobladores de Frontera Corozal, márgenes del río Usumacinta, Frontera La Técnica y Bethel en Guatemala	28
Figura 4.11 Curva gastos-elevaciones en la Pista de aterrizaje Yaxchilán	29

Figura 4.12 Puntos levantados en campo en la visita de agosto de 2016	29
Figura 4.13 Puntos levantados en campo en la Zona Arqueológica Yaxchilán en agosto de 2016.....	30
Figura 4.14 Puntos levantados en campo en las poblaciones de Frontera Corozal en México y en Frontera Técnica, Guatemala en agosto de 2016.....	31
Figura 4.15 Puntos levantados en campo en la población Bethel, Guatemala en agosto de 2016	32
Figura 4.16 Curva gastos-elevaciones en la sección +91 019.86, correspondiente a la pista de aterrizaje Yaxchilán, frontera del modelo aguas abajo.	33
Figura 4.17 Curva gastos-elevaciones obtenida en la sección +101 161.8 correspondiente a la casa aislada entre Yaxchilán y Frontera Corozal	34
Figura 4.18 Curva gastos-elevaciones obtenida en la sección +109 592.9 correspondiente al embarcadero en Frontera Técnica, Guatemala	34
Figura 4.19 Curva gastos-elevaciones obtenida en la sección +111 527.9 correspondiente al portón medido en la población Bethel, Guatemala	35
Figura 5.1 Nomenclatura del campo "cvgeo" del shape de manzanas obtenido de INEGI.....	36
Figura 5.2 Trazo de las manzanas urbanas de Frontera Corozal, Chiapas, obtenidas de INEGI, figura de elaboración propia.....	37
Figura 5.3 Tabla de atributos del archivo descargado de la página de INEGI que contiene la traza de manzanas.	37
Figura 5.4 Hoja de datos del ITER de INEGI, que contiene las columnas de interés	38
Figura 5.5 Índice de Marginación Urbana	39
Figura 5.6 Raster de tirantes para el periodo de retorno de 100 años en Frontera Corozal, Chiapas, México	41
Figura 5.7 Herramienta Raster Calculator	41
Figura 5.8 Herramienta "Conversion Tools/From Raster/Raster to point de (ArcGISV10.4®)	42
Figura 5.9 Shape de puntos del logaritmo natural del tirante para el periodo de retorno de 100 años, Frontera Corozal, Chiapas, México.....	42
Figura 5.10 Herramienta geoprocessing/Intersect de (ArcGISV10.4®).....	43
Figura 5.11 Intersección del shape de tirantes con el de manzanas para un periodo de retorno de 100 años en Frontera Corozal, Chiapas, México.....	43
Figura 5.12 Representación del daño anual esperado más probable en Frontera Corozal, Chiapas, México	46
Figura 5.13 Viviendas afectadas en Frontera Corozal para diferentes periodos de retorno	48
Figura 5.14 Población afectada en Frontera Corozal para diferentes periodos de retorno.....	48
Figura 5.15 Daños estimados en Frontera Corozal para diferentes periodos de retorno en millones de pesos de 2017	49
Figura 5.16 Porcentaje de población afectada en Frontera Corozal para diferentes periodos de retorno	49
Figura 5.17 Trazo de las manzanas urbanas de Frontera La Técnica, Petén, Guatemala, digitalizadas a partir de la ortofoto del estudio LIDAR (SAP, 2015), figura de elaboración propia	50
Figura 5.18 Raster de tirantes para el periodo de retorno de 100 años en Frontera La Técnica, Petén, Guatemala.....	51
Figura 5.19 Shape de puntos del logaritmo natural del tirante para el periodo de retorno de 100 años, Frontera La Técnica, Petén, Guatemala	51
Figura 5.20 Intersección del shape de tirantes con el de manzanas para un periodo de retorno de 100 años en Frontera La Técnica, Petén, Guatemala	52
Figura 5.21 Representación del daño anual esperado más probable en Frontera La Técnica, Petén, Guatemala.....	53
Figura 5.22 Viviendas afectadas en Frontera La Técnica para diferentes periodos de retorno	54
Figura 5.23 Población afectada en Frontera La Técnica para diferentes periodos de retorno	55
Figura 5.24 Daños estimados en Frontera La Técnica para diferentes periodos de retorno	55
Figura 5.25 Porcentaje de población afectada en Frontera La Técnica para diferentes periodos de retorno	56
Figura 5.26 Trazo de las manzanas urbanas de Bethel, Petén, Guatemala, digitalizadas a partir de la ortofoto del estudio LIDAR (SAP, 2015), figura de elaboración propia.....	57
Figura 5.27 Raster de tirantes para el periodo de retorno de 100 años en Bethel, Petén, Guatemala... ..	57

Figura 5.28 Shape de puntos del logaritmo natural del tirante para el periodo de retorno de 100 años, Bethel, Petén, México	58
Figura 5.29 Intersección del shape de tirantes con el de manzanas para un periodo de retorno de 100 años en Bethel, Petén, Guatemala	58
Figura 5.30 Representación del daño anual esperado más probable en Bethel, Petén, Guatemala.....	60
Figura 5.31 Viviendas afectadas en Bethel para diferentes periodos de retorno	61
Figura 5.32 Población afectada en Bethel para diferentes periodos de retorno.....	61
Figura 5.33 Daños estimados en Bethel para diferentes periodos de retorno	62
Figura 5.34 Porcentaje de población afectada en Bethel para diferentes periodos de retorno.....	62
Figura 6.1 Exposición de los mapas de zonas inundables a los pobladores de Frontera Corozal	63
Figura 6.2 Reunión con representantes del Sub-Comisariado y Consejo de Vigilancia de Bienes Comunales de Frontera Corozal	64
Figura 6.3 Oficio de aprobación del estudio por parte de la Gerencia de Aguas Superficiales e Ingeniería de Ríos (GASIR) de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA)	65
Figura 6.4 Mapa de zonas inundables de Frontera Corozal, México y Frontera Técnica, Guatemala para un periodo de retorno T_r de 100 años.....	66
Figura 6.5 Mapa de zonas inundables Bethel, Guatemala para un periodo de retorno T_r de 100 años. 67	
Figura 8.1 Correlación lineal entre los registros de gastos máximos la EH Boca del Cerro y la EH El Tigre	73
Figura 8.2 Ajuste LogNormal de 3 parámetros por Máxima Verosimilitud, EH EL Tigre	77

1. Introducción

1.1 Objetivo de la investigación

Generar mapas de riesgo por inundación para las poblaciones de Frontera Corozal, Chiapas; Frontera La Técnica y Bethel, Petén, Guatemala ubicadas en las márgenes del río Usumacinta, con la finalidad de que para la población involucrada se disponga de una herramienta para su planeación urbana, así como para definir zonas seguras en caso de un evento meteorológico extremo origine el desbordamiento del río de su cauce.

Se planteó una metodología para la estimación del daño por inundación a través del uso de modelos matemáticos hidráulicos unidimensionales y sistemas de información geográfica. Para su calibración se usaron referencias físicas de inundaciones ocurridas e información recabada de entrevistas con algunos pobladores afectados.

1.2 Justificación y alcances

Las pérdidas económicas y de vidas debido a las inundaciones constituyen un obstáculo en crecimiento en México y en el mundo. El aumento de fenómenos destructivos asociados al cambio climático ha presentado una clara tendencia a la alza, como puede apreciarse en el siguiente gráfico:

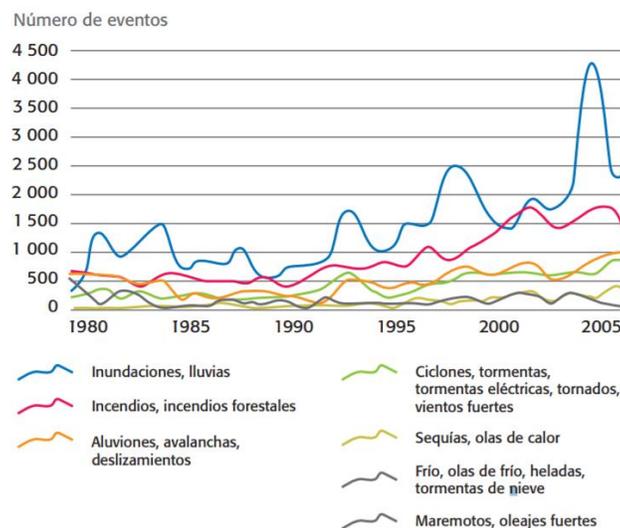


Figura 1.1 Reportes de fenómenos destructivos con gran cantidad de pérdidas materiales y humanas (1980-2006)
Fuente: (García, 2010)

Las pérdidas y los daños han aumentado y la población pobre es la más afectada, por cada persona muerta por desastres naturales en los países desarrollados hay 6 en los países en desarrollo. (García, 2010) Siendo América Latina y particularmente México una zona vulnerable y constantemente azotada por fenómenos meteorológicos extremos.

Las llanuras inundables de los ríos, ricas y fértiles han atraído al humano desde tiempos inmemoriales, es por ello que en el país y en mundo existe una gran cantidad de ciudades y pueblos asentados en las márgenes de los ríos “La falta de estudios de delimitación de áreas de riesgo, la ausencia de reglamentación de uso del espacio y muchas veces la

irresponsabilidad de urbanistas y gobiernos municipales da lugar a la ocupación de áreas inundables que, indefectiblemente, serán afectadas por crecidas extraordinarias.” (Paoli, 2015)

La falta de información, ya sea hidrométrica, climatológica, topográfica, topobatimétrica, es una limitante común en el desarrollo de estudios de ingeniería, en particular en estudios de riesgo por inundación. Existe un gran número de poblaciones marginadas y ubicadas en las márgenes de ríos.

Actualmente, los avances tecnológicos y el aumento en capacidad de procesamiento de datos por parte de las nuevas computadoras han iniciado un auge en el uso de modelos bidimensionales para la estimación de áreas de inundación y han sido utilizadas con éxito en simulaciones de inundaciones en áreas urbanas. Sin embargo, los modelos unidimensionales presentan la ventaja de ser más sencillos y presentar menores incertidumbres. Adicionalmente, las nuevas generaciones de software de simulación unidimensional han incorporado la interacción con modelos digitales de elevación y permiten determinar manchas de inundación bidimensionales tomando en cuenta los resultados del modelo unidimensional.

En el presente trabajo, fue utilizada una topografía obtenida mediante láser aerotransportado (LiDAR) de la zona de estudio de gran precisión, dicha topografía cuenta con una resolución de 1x1 m (SAP, 2015). El uso de dicha topografía en un modelo bidimensional resulta ser extremadamente complicado, aun utilizando las computadoras más robustas disponibles en el mercado. Es por ello que la metodología expuesta utilizando el software de distribución libre (HEC-RASV5.0®) (Hydrologic Engineering Centers - River Analysis System) Versión 5.0 proporciona facilidad de construcción del modelo, tiempos de cálculo significativamente menores en comparación con un modelo bidimensional y en combinación con un modelo digital de alta precisión un acercamiento bastante preciso a la mancha de inundación alcanzada.

Para la calibración del modelo se recurrió a entrevistas con los pobladores afectados tanto en la margen mexicana como en la guatemalteca, con puntos levantados gracias a la memoria de los pobladores de los niveles del agua alcanzados en la máxima crecida del río Usumacinta, la cual ocurrió en el mes de octubre del año 2008, fue posible validar la precisión del modelo y de los resultados alcanzados.

La población de Frontera Corozal en el Estado de Chiapas es una población relativamente joven, fue creada en 1972 mediante la publicación del Decreto Presidencial que restituyó a 66 familias lacandonas con 614,321 ha en la región. Con ello, numerosos poblados choles y tzeltales que previamente habían colonizado espontáneamente el territorio de la Selva Lacandona quedaron incluidos dentro del polígono de los Bienes Comunes de los Lacandonas en calidad de asentamientos irregulares. (Tejeda Cruz, 2004). La población Frontera Corozal fue reubicada a terrenos elevados que no habían sido afectados por el crecimiento del río Usumacinta, según la memoria de los pobladores más ancianos, sin embargo, en los años de 2008 y 2010 se vieron afectados por crecientes extraordinarias.

En la margen derecha del río Usumacinta, ubicada en la República de Guatemala se encuentran las poblaciones de Frontera La Técnica y Bethel, las cuales son poblaciones fronterizas de Guatemala que guardan una cercana relación con Frontera Corozal.

Frontera Corozal, Frontera La Técnica y Bethel son a la fecha poblaciones con alto grado de marginación y un estudio de riesgo de inundación es postergado por las instituciones mexicanas y guatemaltecas. Este trabajo pretende ser herramienta útil y real para los pobladores de las comunidades mencionadas, que en conjunto albergan la vida de unas 9500 personasⁱ

ⁱ La población de Frontera Corozal, Chiapas, México de 5'814 habitantes se obtuvo a partir de información de (INEGI, Censo de población y vivienda, 2010), complementado con fotointerpretación de la imagen satelital del estudio LiDAR (SAP, 2015)

1.3 Estado del arte

Son numerosos los trabajos dedicados a la determinación de zonas inundables y mapas de riesgo y vulnerabilidad. Los esfuerzos de una Universidad Nacional Autónoma de México, a través de su instituto de ingeniería, permitieron la publicación del libro Vulnerabilidad y Riesgo por Inundaciones (Ordaz, Torres, & Domínguez, 2013) En el que se plantea una metodología y una guía, que permitan estimar el riesgo asociado a las inundaciones causadas por el vertido controlado de las aguas excedentes de una presa, aunque también se puede aplicar a las avenidas de un río en un tramo cualquiera, ante diferentes períodos de retorno de las avenidas y con diferentes condiciones de la cuenca y del cauce.

La Comisión Nacional del Agua, a través de su Gerencia de Aguas Superficiales e Ingeniería de Ríos publicó los Lineamientos para la elaboración de mapas de peligro por inundación (CONAGUA, 2013) Dicho documento tiene por objeto establecer los estudios básicos que deben aplicarse para obtención de mapas de peligro por inundación, los cuales se pueden dividir en: información topográfica, estudio hidrológico, estudio hidráulico y análisis de severidad.

En cuanto a la cuantificación de los daños producidos por las inundaciones, el artículo en la Revista Tecnología y Ciencias del Agua, nombrado Costo más probable de daños por inundación en zonas habitacionales de México (Baró Suárez, Díaz Delgado, Calderón Aragón, Esteller Alberich, & Cadena Vargas, 2011) Proporciona una metodología que permite estimar las curvas de daños por inundación en función de la altura de la lámina de agua, caracterizando las zonas habitacionales en función del índice de marginación urbana determinando el porcentaje de afectación de los bienes en función del nivel que alcanzaría el agua dentro de la vivienda. Se presentan curvas de costo mínimo, máximo y más probable para cada tipo de AGEB, finalmente se presenta un modelo matemático de tipo regresivo, el cual permite estimar para cada altura de lámina de agua el daño económico ocasionado en una vivienda.

Adicionalmente, el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua desarrolló una metodología descrita en el artículo: “Estimación de daños económicos en zonas urbanas inundables, con base en el Área Geoestadística Básica para obtención del Daño Anual Esperado” (Solís Alvarado, Lefragua Contreras, & García Hernández, 2015) En dicho documento se describe la metodología de obtención del Daño Anual Esperado (DAE), expresado en unidades monetarias, a partir de la evaluación del daño económico estimado en zonas urbanas, contemplando la severidad del daño para cinco periodos de retorno.

La población de Frontera La Técnica, Petén, Guatemala de 1'416 habitantes se estimó a partir de fotointerpretación de la imagen satelital del estudio LiDAR (SAP, 2015) por no disponer de un censo guatemalteco reciente, el último publicado por instituciones guatemaltecas es del año 2002 (COLEF, 2017)

La población Bethel, Petén, Guatemala de 2'332 habitantes se estimó a partir de fotointerpretación de la imagen satelital del estudio LiDAR (SAP, 2015)

2. Sitio de Estudio y análisis hidrológico

2.1 Localización de la cuenca

El área de estudio del presente trabajo es la cuenca del río Usumacinta. El complejo Grijalva-Usumacinta está conformado por cuatro corrientes principales: Grijalva, Tacotalpa, Tulijá y Usumacinta, los cuales confluyen en una zona de meandros y lagunas en la planicie costera de Tabasco y desembocan juntos en el Golfo de México.

El área de la cuenca del río Usumacinta es de 74 954 km², de los cuales 31,474 km² se localizan dentro de territorio mexicano y 43,480 km² dentro de la República de Guatemala. El escurrimiento anual aproximado del Usumacinta, es de 60,000 millones de m³ (hm³).

La cuenca del río Usumacinta se localiza entre los paralelos (UTM) 2,058,080 y 1,648,040 y entre los meridianos (UTM) 543,050 y 913,480; abarca parte de los estados de Chiapas, Tabasco y Campeche en territorio mexicano. El río Usumacinta forma parte del sistema hidrológico número 30 del mismo nombre y pertenece a la región Sureste de México.



Figura 2.1 Localización de la cuenca del Río Usumacinta

ii Obtenida a través del uso de los Sistemas de Información Geográfica



Figura 2.2 Regiones hidrológicas administrativas de CONAGUA (CONAGUA, 2012)

2.2 Descripción de la cuenca

La Cuenca del Usumacinta es una subregión de Mesoamérica, que abarca parte de los estados de Tabasco y Chiapas en México, así como el departamento del Petén en la porción noreste de Guatemala.

El río Usumacinta se forma en las partes altas de la sierra de los Cuchumatanes, específicamente en el Departamento de Totonicapán, en Guatemala, y desemboca en el golfo de México. Su longitud es de 1,123 km, es el río más caudaloso de México y Centroamérica y el río más largo de Centroamérica.

Su recorrido inicia en Totonicapán en donde corre de sur a norte, marcando el límite departamental del Quiché con Totonicapán y Huehuetenango, para luego girar al este y adentrarse en El Quiché. Luego llega al embalse de la hidroeléctrica Chixoy donde divide las Verapaces con el Quiché y luego vuelve a dirigirse al norte en donde una vez más cambia su curso al este y luego de nuevo al norte en donde sirve de frontera entre Guatemala y México a lo largo de aproximadamente 337 km.

En territorio mexicano, el río Usumacinta nace en los ríos Jataté, Tzanconeja y Santo Domingo, en la confluencia de los ríos Jataté y Santo Domingo se forma el río Lacantún, el cual recibe por margen derecha a los ríos Ixcán, Chajul, Chixoy y Salinas que fluyen del territorio de Guatemala. A partir de la confluencia del Salinas, el río Usumacinta toma su dirección definitiva hasta su confluencia en la zona de meandros; ya sobre la planicie de Tabasco, recibe por la derecha los escurrimientos del río San Pedro, continua su recorrido y se divide para formar en conjunción con la cuenca del río Grijalva, un extenso delta pantoso denominado pantanos de Centla, en el que alcanza un caudal de 5,200 m³/s. Este delta mide alrededor de 50 km de ancho por 70 km de largo, que corresponde al 12,27% de la superficie total del estado Tabasco

Históricamente, al río Usumacinta se le ha dividido en Alto y Bajo Usumacinta, el alto abarca desde su nacimiento en Guatemala hasta "Boca del Cerro", cerca de la ciudad de Tenosique

de Pino Suárez en Tabasco. El bajo Usumacinta inicia en ese mismo lugar y termina en la barra de Frontera, en el municipio de Centla; después de confluir con el río Grijalva para desembocar juntos en el Golfo de México.

2.3 Perfil del cauce principal

El perfil del cauce principal del río Usumacinta se obtuvo utilizando un Modelo Digital de Elevación (NASA, 2011), obteniendo una longitud para el cauce principal del río Usumacinta de 1,137 km desde su nacimiento, con el nombre de río Chixoy en las partes altas de la sierra de los Cuchumatanes, en la República de Guatemala, el río recorre 407 km en territorio Guatemalteco con una pendiente promedio de 0.0012.

Durante un desarrollo de 337 km, el río Usumacinta funge como frontera entre México y Guatemala, en dicho tramo el río Usumacinta tiene una pendiente promedio de 0.0003. Finalmente, el río Usumacinta se adentra en territorio mexicano en un desarrollo de 384 km con una pendiente de 0.0001 hasta desembocar en el Golfo de México.

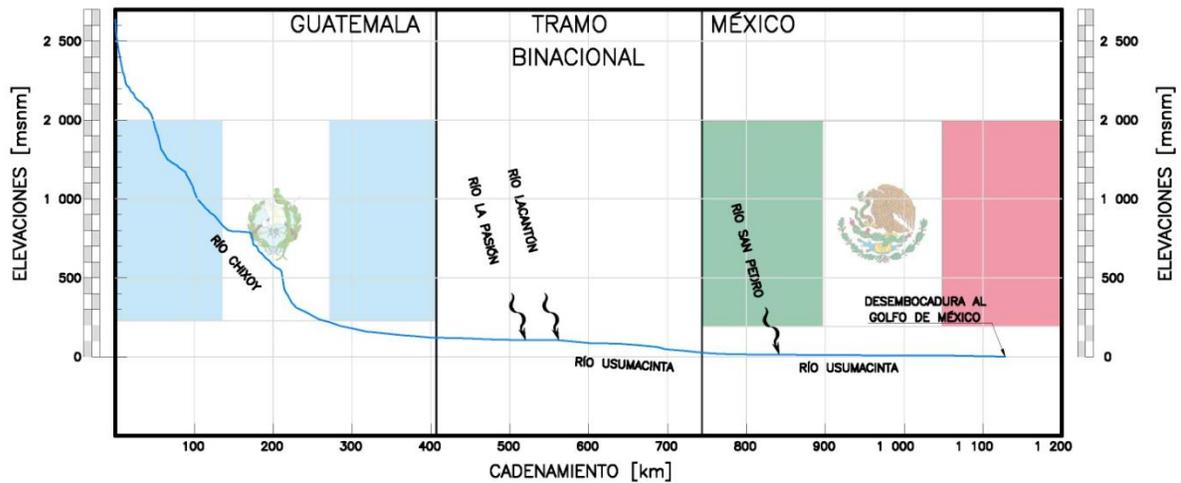


Figura 2.3 Perfil del cauce principal

2.4 Estaciones Hidrométricas seleccionadas

En el presente estudio se eligieron 7 Estaciones Hidrométricas, todas ellas ubicadas en territorio mexicano y operadas por Comisión Federal de Electricidad. Las estaciones elegidas, nombradas de aguas arriba hacia aguas abajo son las siguientes: El Jabalí, San Quintín, La Catarata, El Colorado, Lacantun, El Tigre y Boca del Cero. En la Figura 2.4 se muestra su localización y subcuencas de drenaje, las cuáles fueron obtenidas utilizando herramientas de Sistema de Información Geográficas.

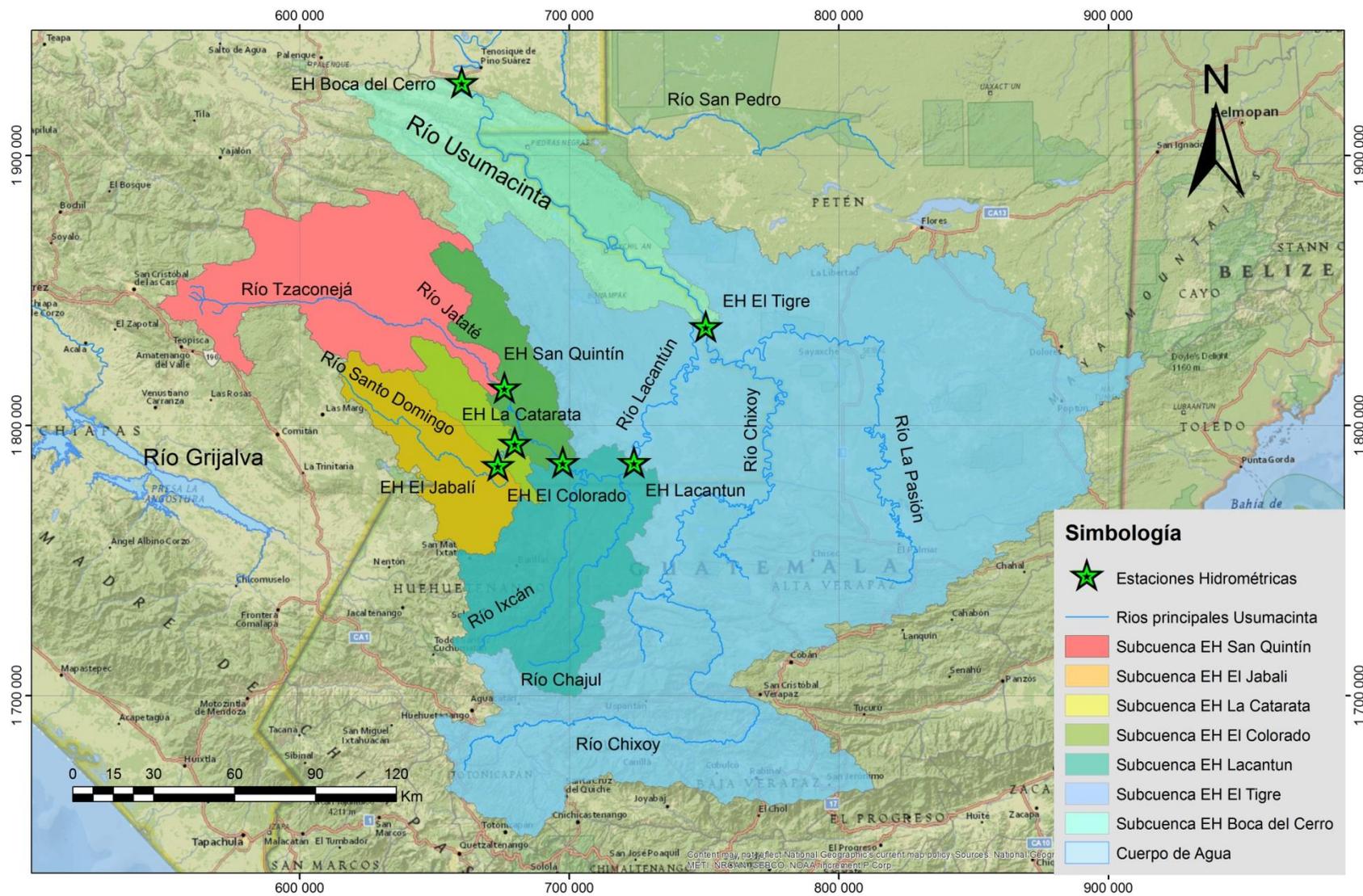


Figura 2.4 Localización y cuencas de drenaje de las Estaciones Hidrométricas seleccionas

En la se muestran las estaciones hidrométricas seleccionadas, su periodo de registros disponibles y el número de años con registros.

Tabla 2.1 Años de registro en las Estaciones Hidrométricas seleccionadas

Estación Hidrométrica	Periodo de registro		Años de registros
	Año Inicial	Año final	
Boca del Cerro	1949	2015	67
El Tigre	1965	1993	29
Lacantún	1974	2012	39
El Colorado	1970	1994	25
La Catarata	1967	1994	28
El Jabalí II	1968	1994	27
San Quintín	1964	1994	31

2.5 Características fisiográficas

Para cada una de las estaciones seleccionadas se calculó: área de la cuenca, longitud del parteaguas, longitud de la cuenca, ancho máximo de la cuenca, elevación máxima, elevación mínima, elevación media, longitud del cauce principal, pendiente media de la cuenca, pendiente media del cauce principal y tiempo de concentración. Para los primeros 10 parámetros fue utilizada la herramienta ArcSWAT, la cual es una extensión del software (ArcGISV10.4®). Para el tiempo de concentración fue utilizada la ecuación de Kirpich:

$$t_c = \frac{0.000325L^{0.77}}{S^{0.385}} \quad (2.1)$$

Los resultados se muestran en la Tabla 2.2(Pág. 13)

Tabla 2.2 Características fisiográficas de las subcuencas seleccionadas

CORRIENTE		Usumacinta	Usumacinta	Río Lacantún	Río Lacantún	Santo Domingo	Santo Domingo	Jataté
AFLUENTE		Río Usumacinta	Río Usumacinta	Río Usumacinta	Río Usumacinta	Río Lacantún	Río Santo Domingo	Río Lacantún
ESTACIÓN		EH Boca del Cerro	EH El Tigre	EH Lacantún	EH El Colorado	EH La Catarata	EH El Jabalí II	EH San Quintín
Área de la cuenca	(km ²)	48,917.84	44,079.16	13,392.39	9,200.70	2,925.82	2,075.24	4,730.41
Longitud del parteaguas	(km)	2,631.00	2,608.00	1,281.70	1,000.80	509.17	423.09	815.96
Ancho máximo de la cuenca	(km)	275.00	275.00	94.00	64.00	68.00	36.50	62.00
Elevación máxima	(msnm)	3,649.00	3,649.00	3,649.00	3,087.00	3,087.00	3,087.00	2,662.00
Elevación mínima	(msnm)	0.00	12.00	100.00	129.00	181.00	307.00	170.00
Elevación media de la cuenca	(msnm)	727	779	1,166	1,139	1,166	1,374.98	1,284.26
Longitud del cauce principal	(km)	845.68	627.69	273.37	229.09	136.46	110.26	181.36
Pendiente media de la cuenca	(adimensional)	0.0018	0.0018	0.0025	0.0023	0.0025	0.0024	0.0022
Pendiente media del cauce principal	(adimensional)	0.0018	0.0018	0.0015	0.0015	0.0015	0.0015	0.0015
Tiempo de concentración	(horas)	134.87	107.21	60.64	52.92	35.51	30.14	44.21

2.6 Análisis de frecuencias

Los registros históricos de las avenidas máximas registradas en las 7 estaciones hidrométricas se presentan en el Anexo.

Se ordenaron los registros y se determinaron sus periodos de retorno. Los gastos ordenados para la EH Boca del Cerro se muestran en la Tabla 2.3.

Se ajustó a las siguientes funciones de distribución de probabilidad: Distribución Gumbel por Momentos, Máxima Verosimilitud y Máxima Entropía; Normal por Momentos; LogNormal de 2 parámetros por Momentos; LogNormal de 3 parámetros por Momentos y por Máxima Verosimilitud; Gamma de 2 parámetros por Momentos y por Máxima Verosimilitud; Gamma de 3 parámetros por Momentos y por la Función general de Valores Extremos por Momentos.

Los cálculos fueron programados en hojas de Excel, las cuáles se presentan en el Anexo.

Se calcularon los eventos de diseño para 2, 5, 10, 20, 50, 100, 500, 1000, 5,000 y 10,000 años. En la Tabla 2.4 se muestra un resumen de los ajustes realizados y sus Errores Estándar de ajuste (EE) En este caso el mejor ajuste es para la distribución **LogNormal de 3 parámetros por Máxima Verosimilitud**.

Tabla 2.3 Valores de gastos ordenados, periodo de retorno y probabilidad de no excedencia para los registros de la EH Boca del Cerro

Orden (m)	Año	Gasto (m ³ /s)	Tr (años)	P=(1-1/T)	Orden (m)	Año	Gasto (m ³ /s)	Tr (años)	P=(1-1/T)
1	2008	9,153	65.00	0.985	33	1984	5,478	1.97	0.492
2	2010	8,984	32.50	0.969	34	1956	5,442	1.91	0.477
3	1999	8,133	21.67	0.954	35	2004	5,390	1.86	0.462
4	2011	8,080	16.25	0.938	36	1968	5,322	1.81	0.446
5	2000	7,435	13.00	0.923	37	1963	5,300	1.76	0.431
6	1982	7,279	10.83	0.908	38	1954	5,252	1.71	0.415
7	1989	7,278	9.29	0.892	39	1983	5,251	1.67	0.400
8	1990	6,798	8.13	0.877	40	1960	5,249	1.63	0.385
9	2005	6,772	7.22	0.862	41	1950	5,163	1.59	0.369
10	1981	6,670	6.50	0.846	42	1953	5,150	1.55	0.354
11	2003	6,601	5.91	0.831	43	1993	5,081	1.51	0.338
12	1967	6,600	5.42	0.815	44	1997	5,045	1.48	0.323
13	1975	6,435	5.00	0.800	45	1976	4,874	1.44	0.308
14	1979	6,376	4.64	0.785	46	1992	4,753	1.41	0.292
15	2001	6,313	4.33	0.769	47	1996	4,745	1.38	0.277
16	1974	6,270	4.06	0.754	48	1977	4,728	1.35	0.262
17	1995	6,257	3.82	0.738	49	1971	4,583	1.33	0.246
18	1969	6,147	3.61	0.723	50	1962	4,576	1.30	0.231
19	1972	6,102	3.42	0.708	51	1987	4,513	1.27	0.215
20	1966	6,074	3.25	0.692	52	1957	4,394	1.25	0.200
21	1965	6,070	3.10	0.677	53	1994	4,384	1.23	0.185
22	1978	6,058	2.95	0.662	54	1958	4,270	1.20	0.169
23	1998	5,986	2.83	0.646	55	1991	4,241	1.18	0.154
24	1988	5,962	2.71	0.631	56	1964	4,133	1.16	0.138
25	2006	5,938	2.60	0.615	57	1949	4,089	1.14	0.123
26	1973	5,909	2.50	0.600	58	2012	4,072	1.12	0.108
27	1955	5,835	2.41	0.585	59	1961	4,024	1.10	0.092
28	1970	5,811	2.32	0.569	60	1951	3,860	1.08	0.077
29	2002	5,783	2.24	0.554	61	1985	3,819	1.07	0.062
30	1980	5,652	2.17	0.538	62	1959	3,614	1.05	0.046
31	1952	5,589	2.10	0.523	63	1986	3,566	1.03	0.031
32	2007	5,566	2.03	0.508	64	2009	3,235	1.02	0.015

Tabla 2.4 Resumen de los ajustes a las funciones de distribución de probabilidad para la EH Boca del Cerro

T (años)	Gumbel			Normal	LogNormal (2 parámetros)	LogNormal (3 parámetros)		Gamma (2 parámetros)		Gama (3 parámetros)	Distribución general de valores extremos
	Momentos	Máxima Verosimilitud	Máxima Entropía	Momentos	Momentos	Momentos	Máxima Verosimilitud	Momentos	Máxima Verosimilitud	Momentos	Momentos
2	5,380	5,387	5,402	5,586	5,451	5,462	5,538	5,493	5,496	5,458	6,516
5	6,490	6,596	6,582	6,643	6,577	6,579	6,675	6,605	6,585	6,586	7,648
10	7,225	7,396	7,363	7,196	7,256	7,244	7,360	7,243	7,208	7,254	8,339
20	7,930	8,164	8,113	7,652	7,869	7,839	7,977	7,799	7,751	7,848	8,961
50	8,842	9,157	9,083	8,166	8,620	8,563	8,736	8,459	8,394	8,563	9,711
100	9,526	9,902	9,810	8,508	9,161	9,079	9,280	8,918	8,842	9,069	10,235
500	11,106	11,622	11,491	9,201	10,361	10,216	10,490	9,899	9,796	10,167	11,331
1,000	11,785	12,362	12,213	9,468	10,863	10,688	11,002	10,294	10,180	10,615	11,758
5,000	13,361	14,079	13,889	10,032	12,009	11,758	12,124	11,166	11,028	11,617	12,655
10,000	14,040	14,818	14,611	10,257	12,498	12,211	12,639	11,527	11,378	12,036	13,004
EE	174.85	153.11	152.32	230.04	152.00	157.64	148.47	167.09	177.43	157.07	1091.26

EE

min= 148,47

Mejor

Ajuste: LogNormal de 3 parámetros por Máxima Verosimilitud

En la Figura 2.5 se muestra el ajuste de menor Error Estándar, mostrando en azul el ajuste a la función de distribución de probabilidad LogNormal de 3 parámetros por Máxima Verosimilitud y en rojo los registros medidos. Finalmente en la Tabla 2.5 se muestran los límites de confianza de la distribución.

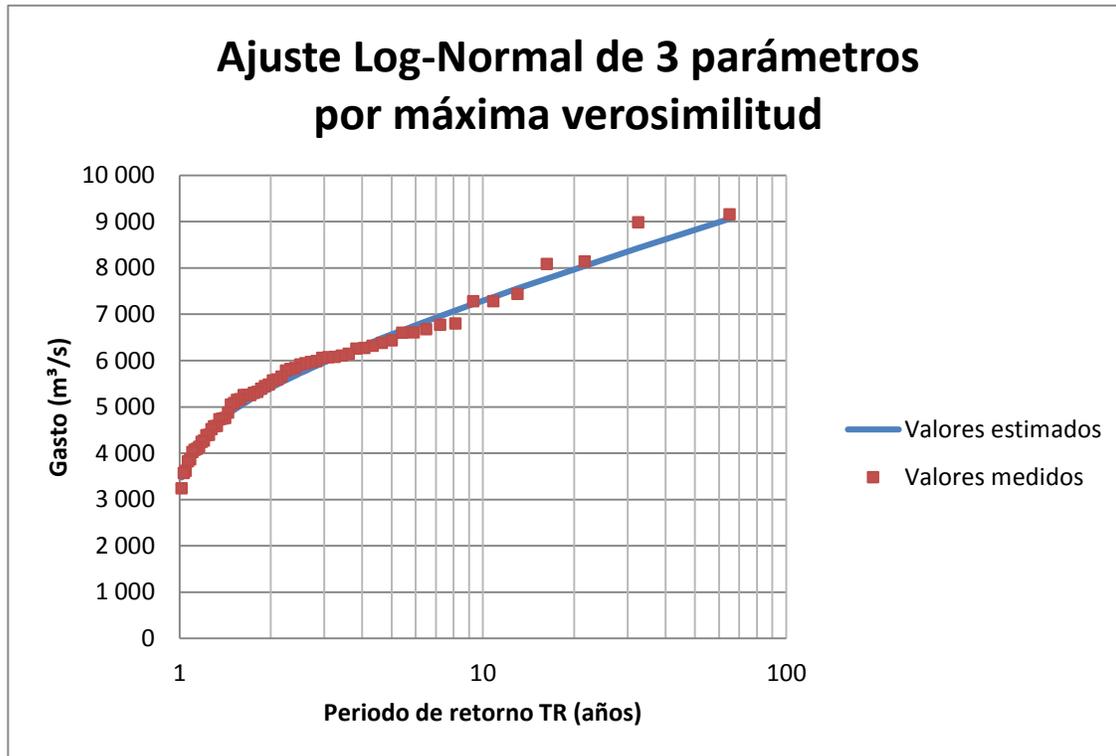


Figura 2.5 Ajuste LogNormal de 3 parámetros por Máxima Verosimilitud, EH Boca del Cerro

Tabla 2.5 Límites de confianza al 95% para la distribución LogNormal de 3 parámetros por Máxima Verosimilitud en la EH Boca del Cerro

T (años)	$Q_{TINFERIOR}$ (m³/s)	Q_T (m³/s)	$Q_{TSUPERIOR}$ (m³/s)
2	5,089.61	5,538	5,726.89
5	6,121.61	6,675	7,006.46
10	6,693.64	7,360	7,891.95
20	7,160.97	7,977	8,778.53
50	7,671.34	8,736	9,974.91
100	7,998.39	9,280	10,904.92
500	8,614.34	10,490	13,163.29
1,000	8,829.37	11,002	14,182.87
5,000	9,231.24	12,124	16,669.00
10,000	9,365.99	12,639	17,793.39

Si bien los resultados muestran que el mínimo Error Estándar estimado es con la función lognormal por el método de máxima verosimilitud para la estimación de los parámetros de ajuste, se decidió utilizar la función Gumbel por el método de máxima

verosimilitud, pues los datos para tal modelo se ajustan mejor para los períodos de retorno mayores, como se ve en la gráfica de la función lognormal de la Figura 2.6 con la gráfica de la función Gumbel de la Figura 2.7 .

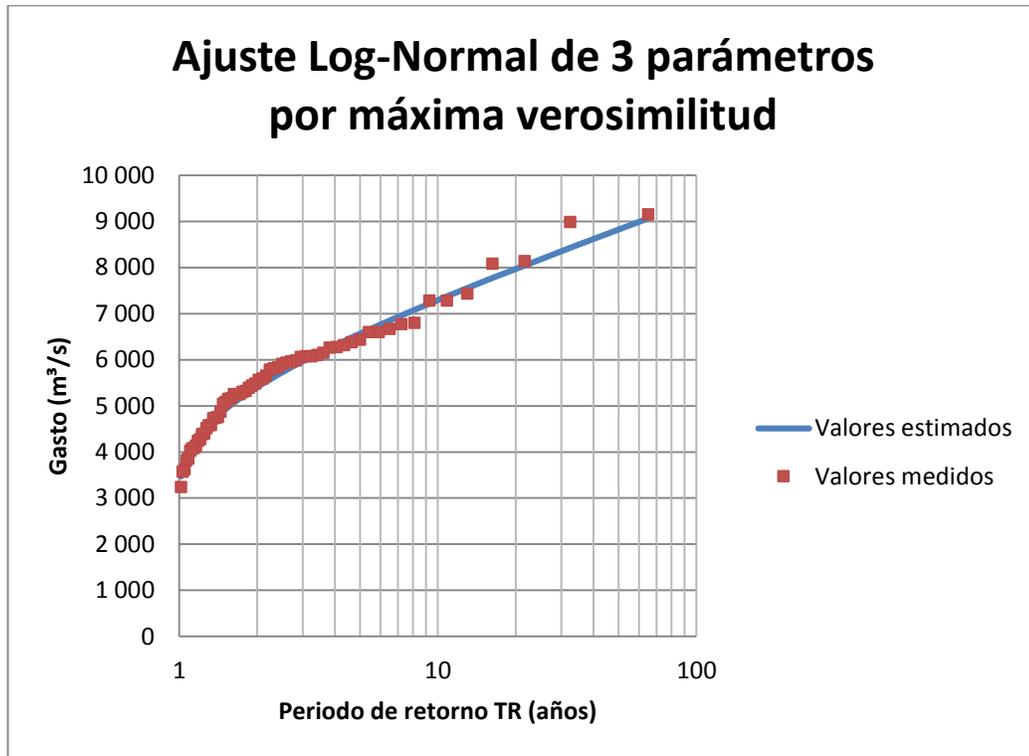


Figura 2.6. Ajuste a la función lognormal

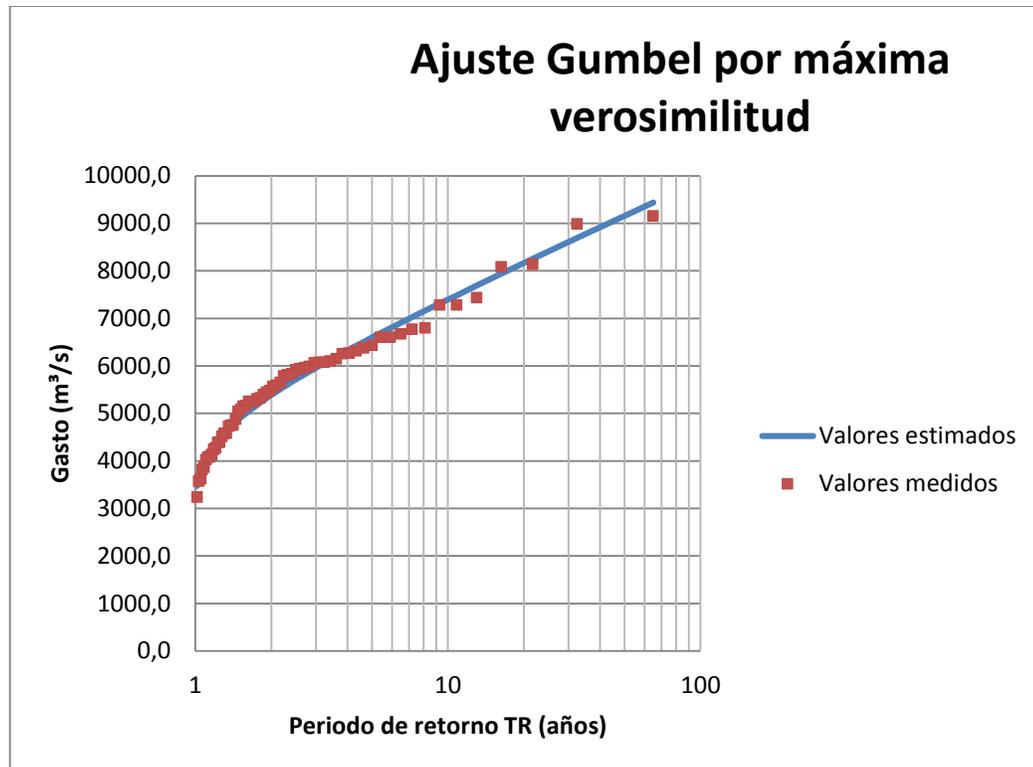


Figura 2.7. Ajuste a la función Gumbel

Se realizó un nuevo ajuste utilizando el software AX, desarrollado para en CENAPRED. Los resultados del ajuste obtenidos por este medio se presentan en la Tabla 2.6, la cual muestra los gastos extrapolados para Boca del Cerro mediante el ajuste a la función Gumbel por el método de máxima verosimilitud para diferentes períodos de retorno (Tr). También se presentan en dicha tabla los resultados de la función lognormal para fines de comparación. Se decidió utilizar los valores obtenidos mediante el software AX por ser más conservadores que el ajuste realizado en Excel.

Tabla 2.6. Período de retorno-gasto

TR	GUMBEL	LOGNORMAL
	GASTO (m³/s)	GASTO (m³/s)
2	5,463	5,538
5	6,708	6,675
10	7,532	7,360
20	8,323	7,977
50	9,346	8,736
100	10,113	9,280
500	11,885	10,490
1,000	12,647	11,002
5,000	14,415	12,124
10,000	15,177	12,639

El gasto de avenida para un período de retorno de 10 000 años es de 15,177m³/s con la función Gumbel por máxima verosimilitud.

A través de factores de área drenada se obtuvieron los gastos extraordinarios en la pista de aterrizaje de la zona arqueológica Yaxchilán y en la EH El Tigre a fin de comparar con el ajuste obtenido para los registros en dicha estación. Los resultados se muestran en la Tabla 2.7. Los registros de gastos máximos de la EH Tigre, así como los ajustes a las funciones de probabilidad se presentan en el Anexo.

Tabla 2.7 Gastos extraordinarios en los sitios de interés

	EH Boca del Cerro	PISTA YAX	EH El Tigre
Área (km ²)	48,918	45,152	44,079
T (años)	,	,	,
2	5,463	5,042	4,923
5	6,708	6,191	6,044
10	7,532	6,952	6,787
20	8,323	7,682	7,499
50	9,153	8,448	8,248
100	10,113	9,335	9,113
500	11,885	10,970	10,710
1,000	12,647	11,674	11,396
5,000	14,415	13,306	12,989
10,000	15,177	14,008	13,676

3. Modelación matemática hidráulica

3.1 Insumos para la generación de la geometría del modelo

3.1.1 INTERPOLACIÓN DEL FONDO DEL RÍO

Para la construcción de la geometría del modelo hidráulico, se cuenta con topografía de detalle, sin embargo, aún existe la limitante de no contar con topobatimetría del fondo del río Usumacinta en el tramo en estudio.

Para el tramo comprendido entre la Estación Hidrométrica Boca del Cerro, y las cascadas de Busilhá, existe un perfil del fondo del río proveniente del “Estudio del Efecto de Remanso y Sedimentos para el PH Boca del Cerro”, elaborado por la Subdirección de Estudios Civiles de la Gerencia de Ingeniería Civil en septiembre de 1990. (GEIC, 1990)

Adicional a la información previamente citada, se cuenta con un perfil de la lámina del agua tomado por vuelos LiDAR (Laser Imaging Detection and Ranging) en un estudio elaborado por Sistemas Avanzados y Proyectos S.A. de C.V. (SAP, 2015) para la Comisión Federal de Electricidad en el año 2016; a lo largo de los 340 km de río contemplados en el estudio. Dicho perfil fue comparado con los perfiles del agua reportados en el estudio de 1990, obteniendo una aceptable correspondencia.

Al analizar el tramo de 50 km en los que se tiene información del fondo del río y comparando con la lámina del agua medida con tecnología LiDAR se aprecia que existe paralelismo. Por lo anterior se decidió que el fondo del río a partir de donde no se cuenta con información mantendría un comportamiento paralelo a la lámina del agua reportada en el estudio LiDAR, partiendo desde la última ubicación en donde se cuenta con información del fondo del río. Lo anterior se muestra en la Figura 3.3 en donde se presenta en color verde los perfiles medidos en campo en el estudio de 1990 y en color azul el perfil obtenido en el estudio LiDAR durante el año 2015.

Para la interpolación del fondo del río, fue utilizado el software Civil 3D de Autodesk siguiendo el siguiente procedimiento y tomando las siguientes consideraciones:

1. Se supuso que a partir del cadenamiento 51+000 y hacía aguas arriba, el fondo del río corre paralelo al perfil obtenido por el estudio LiDAR (SAP, 2015) para la lámina del agua.
2. Se asignaron valores de elevación a una poli línea de Autocad que corre por el centro del cauce, utilizando para ello una herramienta de interpolación en Excel y una hoja de asignación de elevaciones diseñada en el CAPS, la cual permite, a través del teorema de Pitágoras y el uso de la herramienta en Excel “Interpo” buscar en una lista cadenamiento-elevación, obtenida de Autocad, interpolar para cada vértice de la línea central la elevación que le corresponde en el perfil.
3. Una vez asignados los valores de z, es posible dibujar una 3D poly (poli línea en 3 dimensiones) en el programa Autocad, la cual representa el fondo del río al que es posible realizar la interpolación.
4. Se supuso un ancho de cubeta en el fondo de 10 m de longitud, por lo que fueron considerados 3 líneas con elevación siguiendo la misma técnica, nombrados como Centro, Margen derecha y Margen Izquierda.

- Se realizó una interpolación con el programa Civil 3D de Autodesk entre las 3d poly con elevación y las primeras curvas de nivel conocidas de la topografía LiDAR (SAP, 2015). Un ejemplo del resultado obtenido se muestra en planta en la Figura 3.1) y en perfil transversal en la Figura 3.2

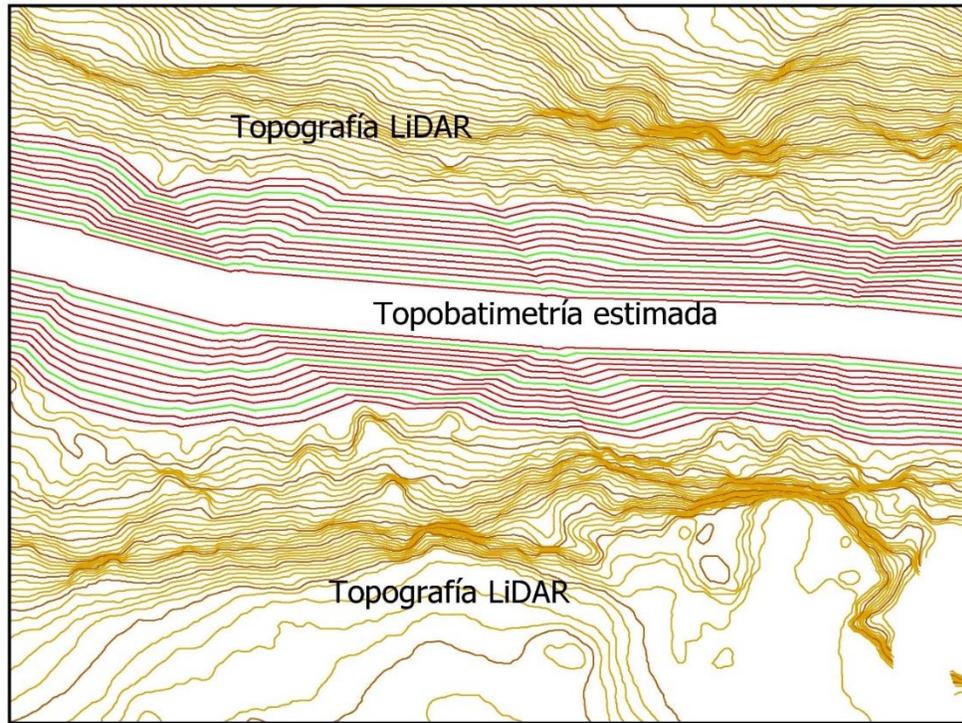


Figura 3.1 Estimación del fondo del río

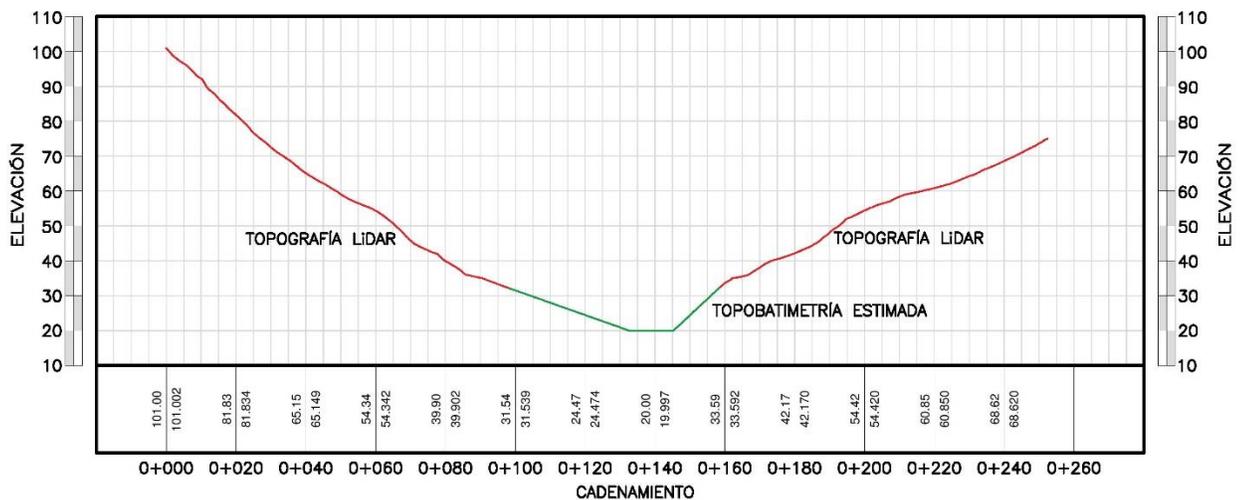


Figura 3.2 Sección tipo obtenida mediante la interpolación del fondo del río

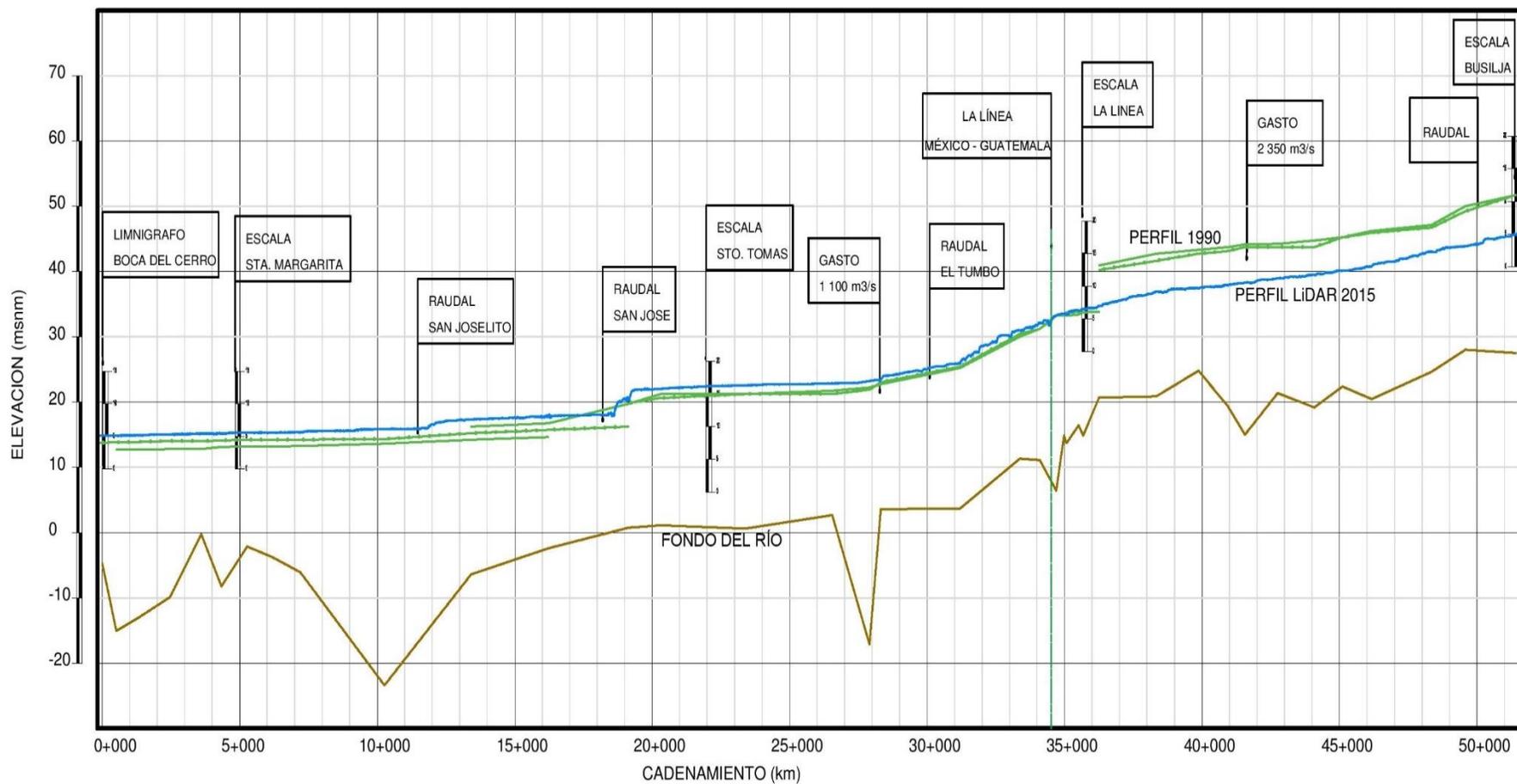


Figura 3.3 Perfil obtenido por GEIC en 1990 comparado con el obtenido en 2015 en el estudio LiDAR (SAP, 2015)

3.2 Preprocesamiento para la obtención de la geometría del modelo

Para la construcción de la geometría del modelo, se utilizó la extensión Hec-GeoRAS, extensión para (ArcGISV10.4®) desarrollada conjuntamente por el Hydrologic Engineering Center (HEC) del United States Army Corps of Engineers y el Environmental System Research Institute (ESRI). Se trata de un conjunto de procedimientos, herramientas y utilidades especialmente diseñadas para procesar datos georreferenciados que permiten bajo el entorno de los Sistemas de Información Geográfica (SIG), facilitar y complementar el trabajo con (HEC-RASV5.0®).

La utilización de la extensión HEC-GeoRAS permite importar a (HEC-RASV5.0®) datos de geometría del terreno de la zona a modelar, incluyendo cauce del río, secciones transversales, ubicación de hombros, dirección del flujo. Posteriormente los resultados obtenidos de gastos y velocidades se exportan desde (HEC-RASV5.0®) a (ArcGISV10.4®) y pueden ser procesados para obtener mapas de inundación y riesgo.

Para la generación de la geometría a modelar por medio de la herramienta HEC-GeoRAS, es necesario convertir la topografía de detalle de la zona, a una superficie TIN (Triangulated Irregular Network), trazar la línea central del cauce, y generar secciones transversales que representen de manera adecuada la topografía del terreno. En la Figura 3.4 se puede observar parte del proceso recién descrito.

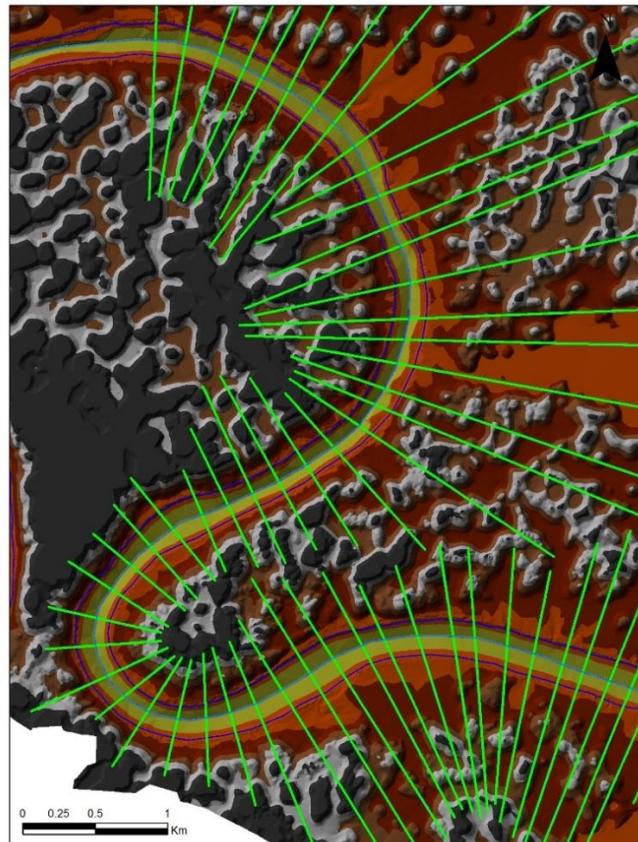


Figura 3.4 Generación de la geometría a modelar. Hec-GeoRAS

3.3 Modelación hidráulica en (HEC-RASV5.0®)

Para la realización y el análisis hidráulico, se utilizó el programa de cómputo (HEC-RASV5.0®). Este software, fue desarrollado por el Centro de Ingeniería Hidrológica (Hydrologic Engineering Center) del cuerpo de ingenieros de la armada de los EE.UU. (US Army Corps of Engineers). Este programa permite realizar el análisis del flujo permanente unidimensional a superficie libre. El programa es capaz de realizar cálculos hidráulicos en una dimensión con régimen permanente para una red completa de cauces abiertos, canales, ríos ya sean naturales o artificiales, en régimen subcrítico, supercrítico y mixto considerando los efectos de puentes, alcantarillas, vertedores y estructuras.

El procedimiento de cómputo básico de (HEC-RASV5.0®) para el flujo constante en el tiempo se basa en la solución de la ecuación unidimensional de conservación de la energía.

3.3.1 GEOMETRÍA DEL MODELO

Con la obtención de la geometría por medio de la extensión Hec-GeoRAS, se procedió a exportar la información al software (HEC-RASV5.0®), como se muestra en la Figura 3.5

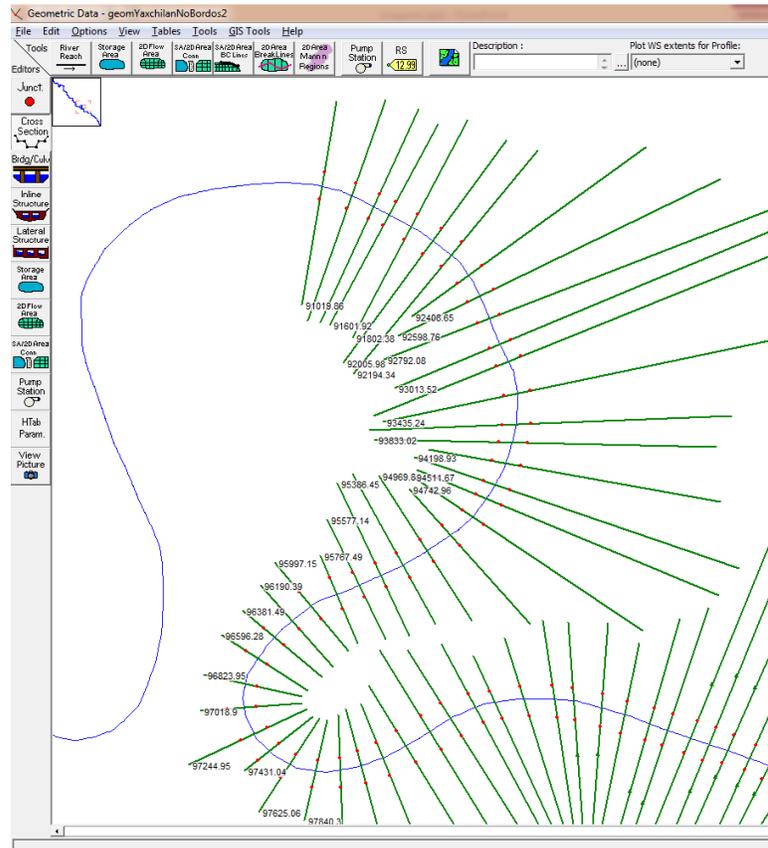


Figura 3.5 Exportación de geometría del modelo a HEC-RAS para cálculo

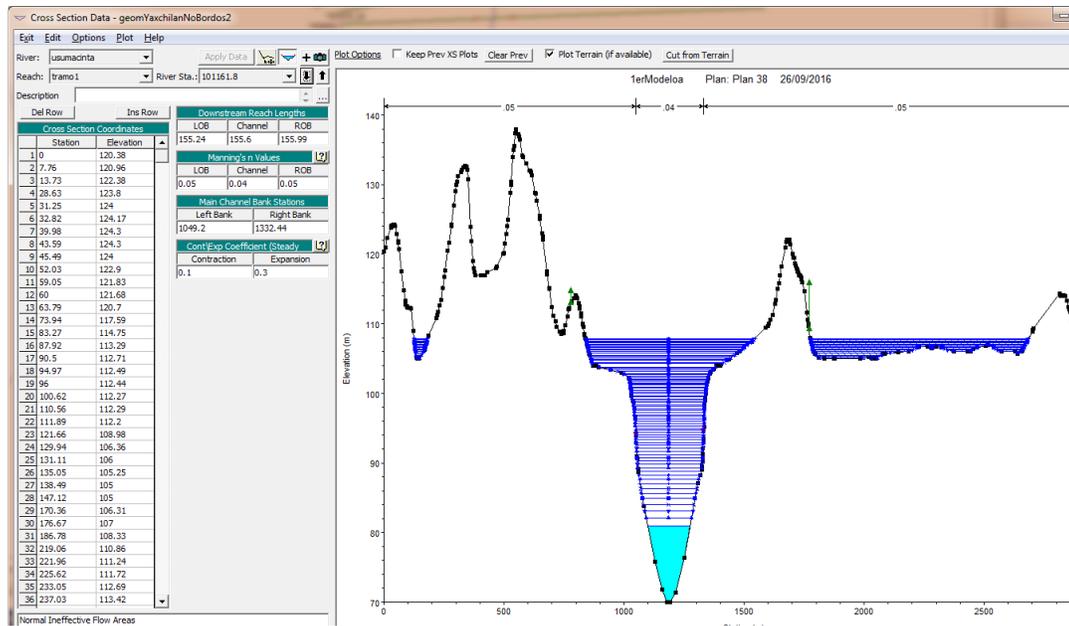


Figura 3.6 Secciones transversales provenientes de Hec-GeoRAS en Hec-RAS

Se observa también en la Figura 3.6, que se adecuaron los hombros de las secciones de tal forma que representarán diferentes valores de rugosidad en la modelación. Los valores de rugosidad fueron variables, a fin de que las curvas se apegaran a los posteriores datos de campo con los que se calibró el modelo. En promedio, el valor de n de Manning fue del orden de 0.05 para las márgenes, y 0.04 para el cauce principal.

3.3.2 CONDICIONES DE FRONTERA

Se utilizó como condición de frontera aguas abajo, una curva de elevaciones gastos del sitio, construida con los valores de elevación de la lámina del agua conocidos relacionados con eventos extraordinarios, y cuyos estragos permanecen en la memoria histórica de los habitantes. Se profundiza sobre la construcción de esta curva, en el Apartado 3.4

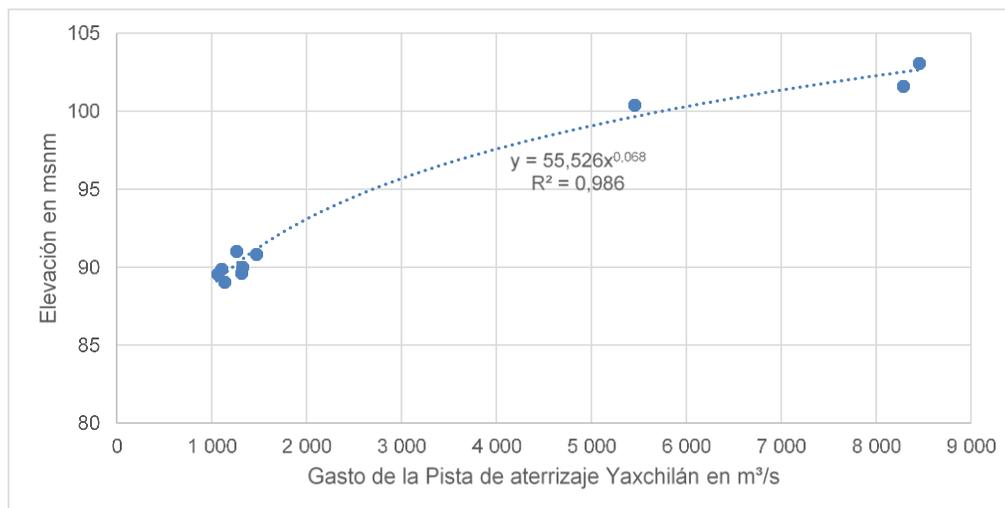


Figura 3.7 Condición de frontera aguas abajo.

3.3.3 CONDICIONES DEL FLUJO

Se realizó la modelación, para un rango de gastos desde 250 m³/s hasta 14,011 m³/s, siendo el gasto mínimo presentado, y la avenida correspondiente a un periodo de retorno de 10,000 años respectivamente. Se realizó la modelación en régimen subcrítico.

3.4 Calibración del Modelo en visita de campo

Los resultados preliminares del modelo en el que se presentaban inundaciones importantes en las poblaciones Frontera Corozal en México y Frontera la Técnica y Bethel en Guatemala, motivaron la ejecución de una visita de campo con el objetivo de entrevistar a los pobladores sobre el nivel que alcanzó el agua durante la avenida máxima histórica registrada en octubre de 2008.

En los primeros días del mes de agosto del año 2016 se realizó una visita de campo a la región que abarca la zona arqueológica de Yaxchilán, ubicada en la característica omega que forma el río Usumacinta, hasta el poblado de Bethel, ubicado 30 kilómetros aguas arriba de este punto medidos sobre el río Usumacinta. Se contó con el apoyo del Sr. Servando Gómez, (guía de turistas certificado, originario y habitante de Frontera Corozal, capacitado en arqueología, biología y desarrollo sustentable, hablante bilingüe ch,ol-español). El Sr. Servando fue entrevistado igual que otro guía en la zona arqueológica de Yaxchilán, quienes colaboraron para la ubicación del nivel alcanzado por el río de la creciente del 2008 y del año 2010 en la pista de aterrizaje de la Zona Arqueológica de Yaxchilán. La valiosa colaboración del Sr. Servando fue clave para el acercamiento a los pobladores ubicados en Frontera Corozal, Frontera La Técnica y Bethel con el fin de realizar entrevistas sobre el nivel alcanzado por el agua en la avenida de octubre de 2008, la máxima histórica hasta el día de hoy.



Figura 3.8 Guía especializado Servando López Vázquez

Originalmente el modelo abarcaba un tramo de 145 km desde la Estación Hidrométrica Boca del Cerro hasta antes de la confluencia de los ríos Lacantún y Salinas. Sin embargo, ante la escasez de información detallada, se acotó el modelo a los 30

kilómetros de río en los que se pudo obtener validación a través de las entrevistas a pobladores.

Durante la visita, fue posible obtener, hasta 3 puntos en la Pista de Aterrizaje en la zona arqueológica Yaxchilán y aunados a los puntos medidos por el vuelo en el Estudio LiDAR (SAP, 2015) fue posible utilizar la sección correspondiente a la pista de aterrizaje como frontera aguas debajo de un nuevo modelo que abarca el tramo Yaxchilán-Confluencia Lacantún y Salinas. En la Tabla 3.1 se muestran los puntos de elevación obtenidos del Estudio LiDAR y en la visita de campo. Los gastos en la Pista de Aterrizaje fueron estimados de los registros hidrométricos en la EH Boca del Cerro utilizando factor de área, considerando que el área de la cuenca hasta la pista es 45,161,84 km² y el área drenada a la EH. Boca del Cerro es 48,917,84 km².

Tabla 3.1 Gastos y elevaciones en la Pista de aterrizaje Yaxchilán

Fecha	Gasto en Boca del Cerro en m ³ /s	Gasto en la Pista YAX en m ³ /s	Elevación en msnm
06-jul-15*	1,223.00	1,129.10	89.07
13-jun-15*	1,142.00	1,054.32	89.59
04-jul-15*	1,420.00	1,310.97	89.60
08-jul-15*	1,198.00	1,106.02	89.90
03-jul-15*	1,428.00	1,318.36	90.04
29-jun-15*	1,590.00	1,467.92	90.84
28-jun-15*	1,363.00	1,258.35	91.04
2008**	9,153.00	8,450.22	103.07
2010**	8,973.00	8,284.04	101.61
2015**	5,910.00	5,456.22	100.43

*Punto obtenido del Estudio Lidar (SAP, 2015)

**Punto medido en campo en la pista de aterrizaje Yaxchilán

En la Figura 3.11 se muestran los puntos graficados y ajustados a una función exponencial con un coeficiente de determinación R² de 0,986. En la Figura 3.12 se muestra la mancha de inundación obtenida para la inundación del 2008 con el modelo calibrado y los puntos medidos en campo.

Como resultado de la compilación de datos se logró levantar 30 puntos de control y se realizaron alrededor de 16 entrevistas (una en el Centro Ecoturístico Nueva Alianza, dos en la Zona Arqueológica de Yaxchilán, una en vivienda próxima a la Zona Arqueológica en territorio guatemalteco, cuatro en Bethel, cuatro en La Técnica y cinco en Frontera Corozal).



Figura 3.9 Levantamiento de puntos de control para georreferenciación en la carretera federal # 307, sobre el cauce del río Usumacinta, en la Zona Arqueológica de Yaxchilán, y en un predio a un costado de una vivienda.



Figura 3.10 Entrevistas a los pobladores de Frontera Corozal, márgenes del río Usumacinta, Frontera La Técnica y Bethel en Guatemala

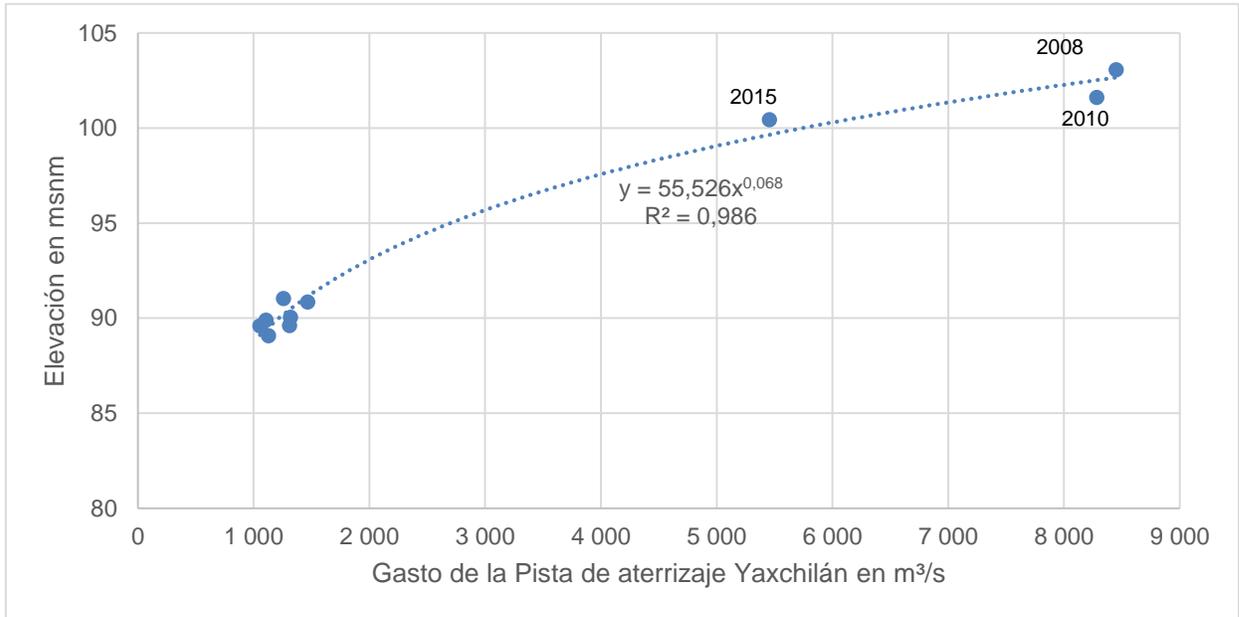


Figura 3.11 Curva gastos-elevaciones en la Pista de aterrizaje Yaxchilán

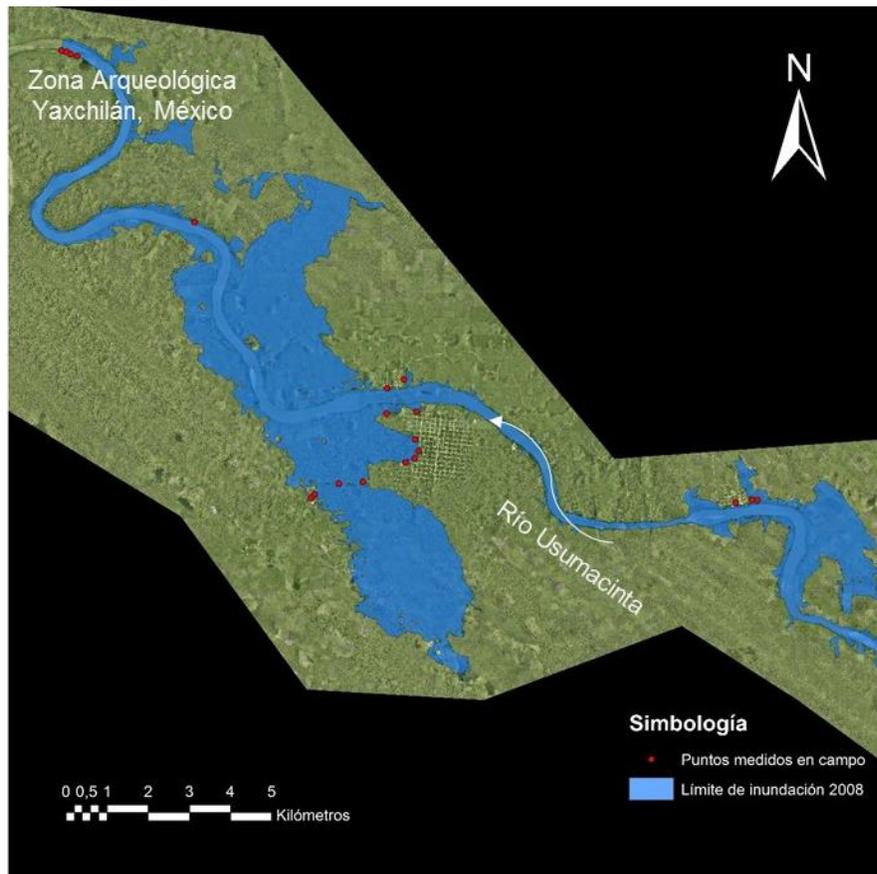


Figura 3.12 Puntos levantados en campo en la visita de agosto de 2016

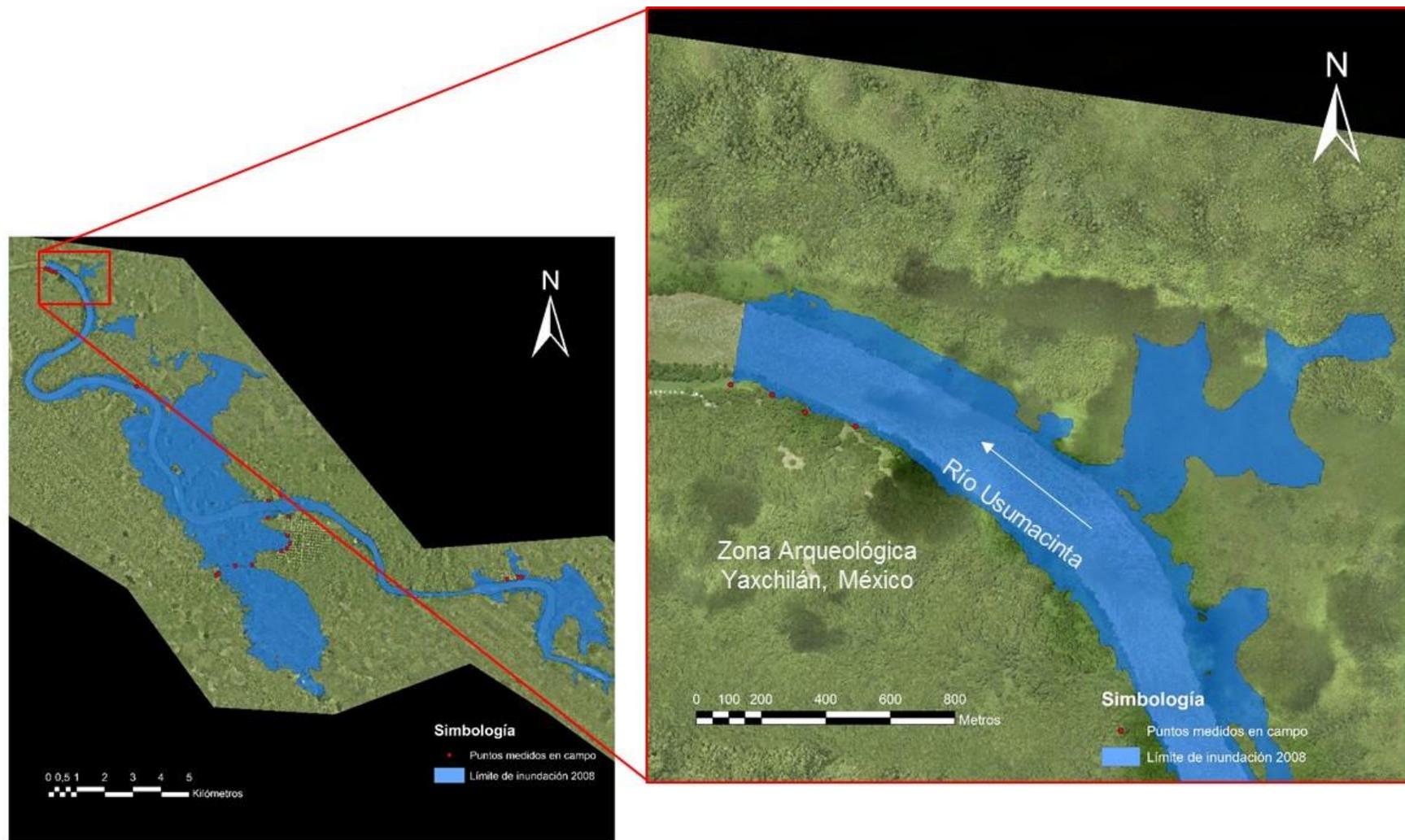


Figura 3.13 Puntos levantados en campo en la Zona Arqueológica Yaxchilán en agosto de 2016

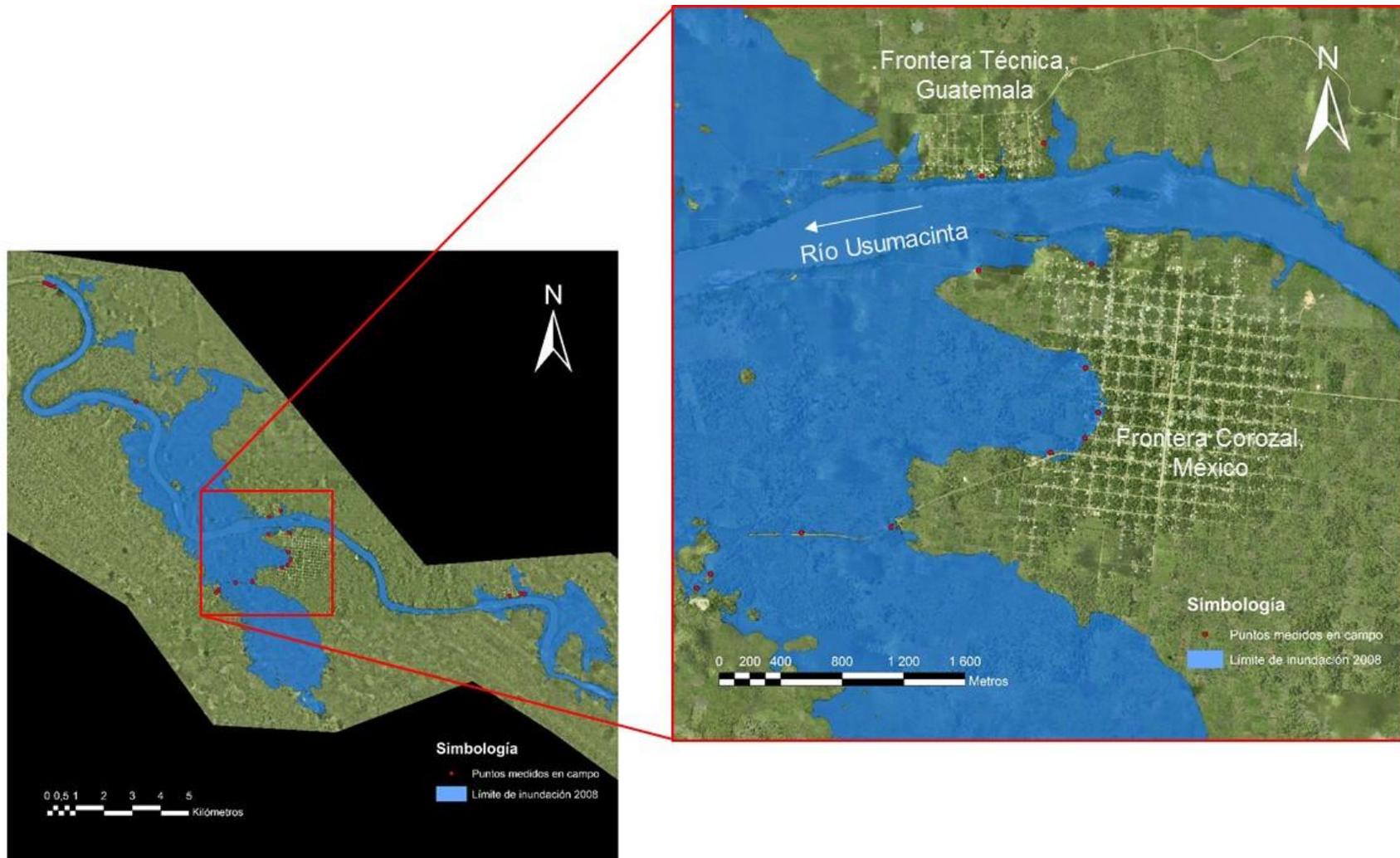


Figura 3.14 Puntos levantados en campo en las poblaciones de Frontera Corozal en México y en Frontera Técnica, Guatemala en agosto de 2016

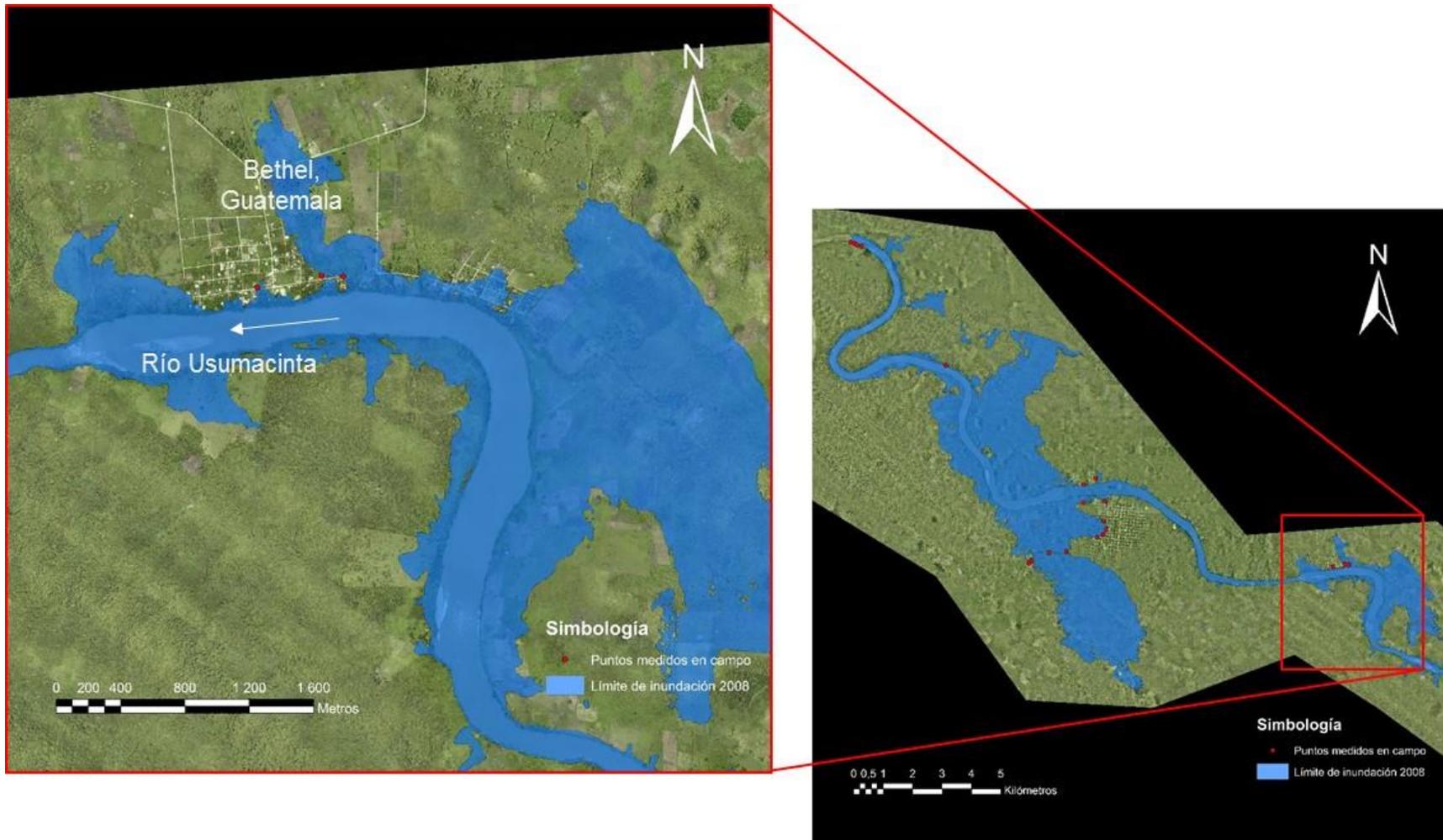


Figura 3.15 Puntos levantados en campo en la población Bethel, Guatemala en agosto de 2016

Fueron elegidas 4 secciones con 4 de los puntos medidos en campo para calibrar el modelo para el gasto estimado de 8 450 m³/s en la pista de aterrizaje Yaxchilán:

1. La Pista de aterrizaje Yaxchilán que sirvió como frontera aguas abajo del modelo.
2. Casa de Doña Juana, una mujer guatemalteca que vivía en una casa aislada a medio camino de Yaxchilán a Frontera Corozal.
3. En Frontera Corozal y Frontera Técnica fue elegido el punto medido en el embarcadero de Frontera Técnica Guatemala señalado por quién entonces fue alcalde de la población guatemalteca.
4. En Bethel se utilizó un punto medido en un Portón de una vivienda.

Adicionalmente fueron utilizadas secciones intermedias con medidas de puntos LiDAR de puntos con gastos bajos. En las siguientes figuras se muestran las curvas gastos-elevaciones obtenidas con el modelo en las 4 secciones seleccionadas. Se muestran en color negro los puntos levantados en campo y puntos LiDAR. El resto de los puntos medidos en campo fueron utilizados para validación de los resultados una vez obtenida la mancha de inundación para el gasto de 8 450 m³/s, estos puntos fueron: 3 puntos adicionales en la Zona Arqueológica de Yaxchilán (Figura 3.13), 11 puntos adicionales en las poblaciones Frontera Corozal, México y Frontera Técnica, Guatemala (Figura 3.14) y 2 puntos adicionales en la población Bethel, Guatemala (Figura 3.15). En total fueron validados 20 puntos medidos en campo, producto del testimonio de pobladores de la zona.

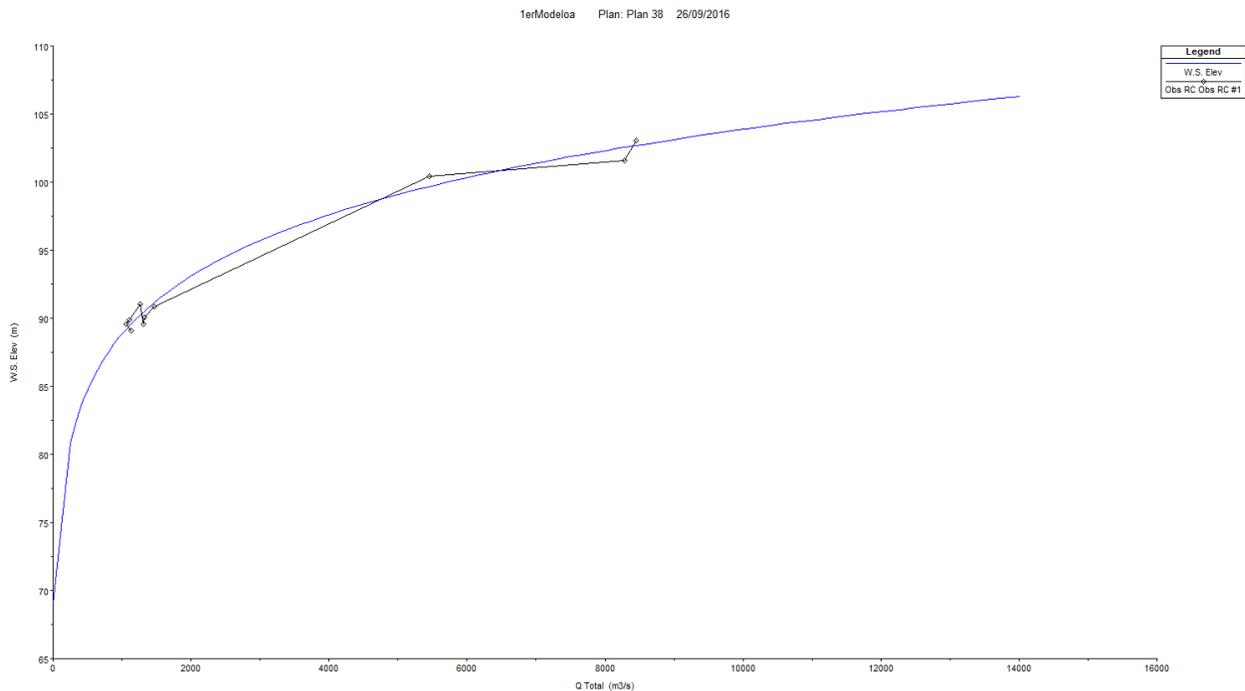


Figura 3.16 Curva gastos-elevaciones en la sección +91 019.86, correspondiente a la pista de aterrizaje Yaxchilán, frontera del modelo aguas abajo.

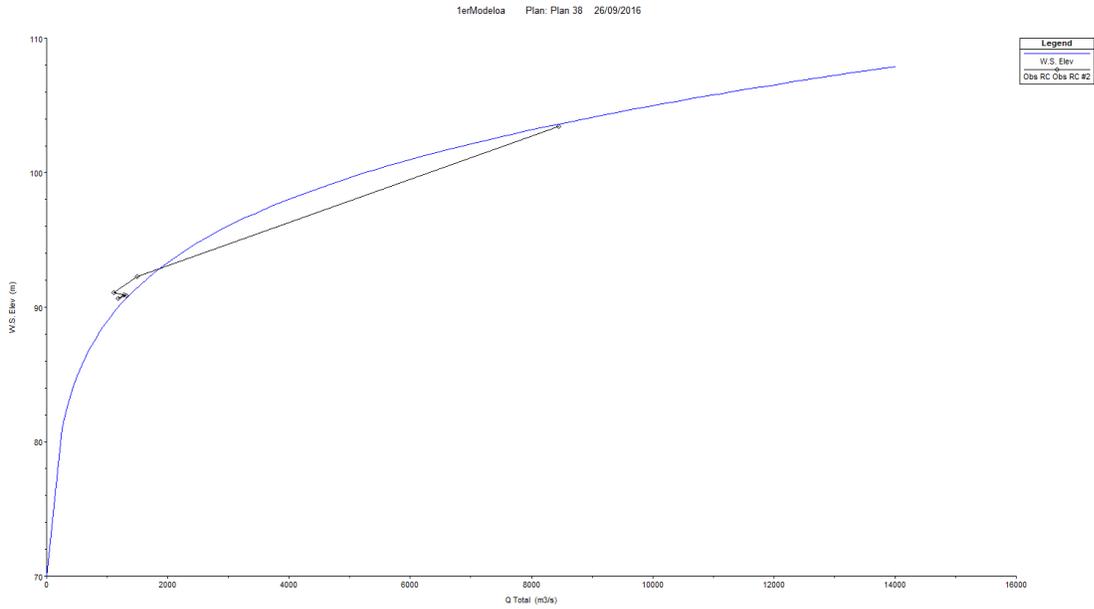


Figura 3.17 Curva gastos-elevaciones obtenida en la sección +101 161.8 correspondiente a la casa aislada entre Yaxchilan y Frontera Corozal

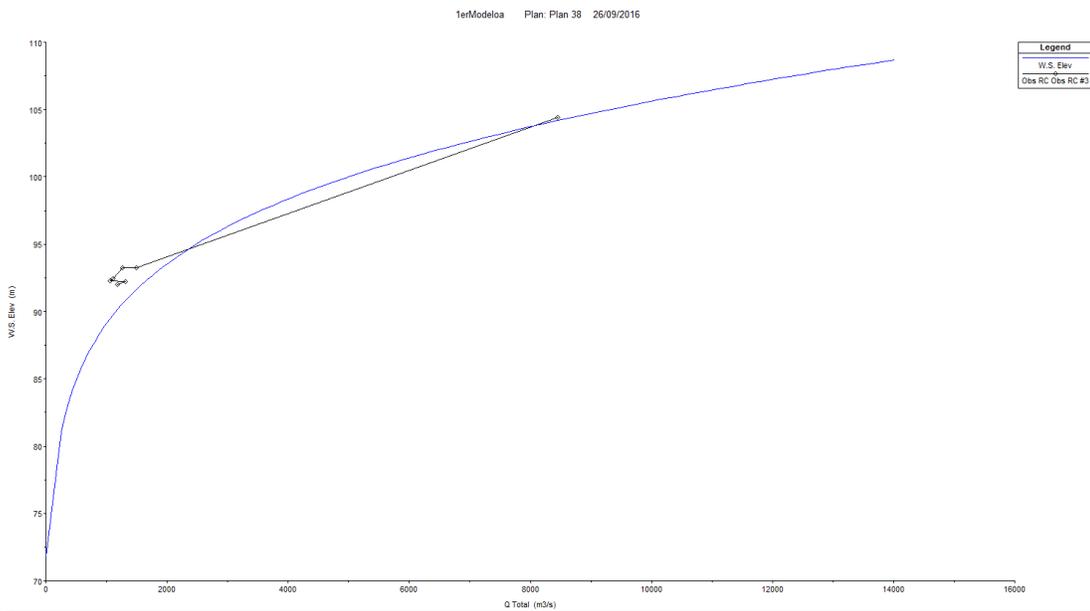


Figura 3.18 Curva gastos-elevaciones obtenida en la sección +109 592.9 correspondiente al embarcadero en Frontera Técnica, Guatemala

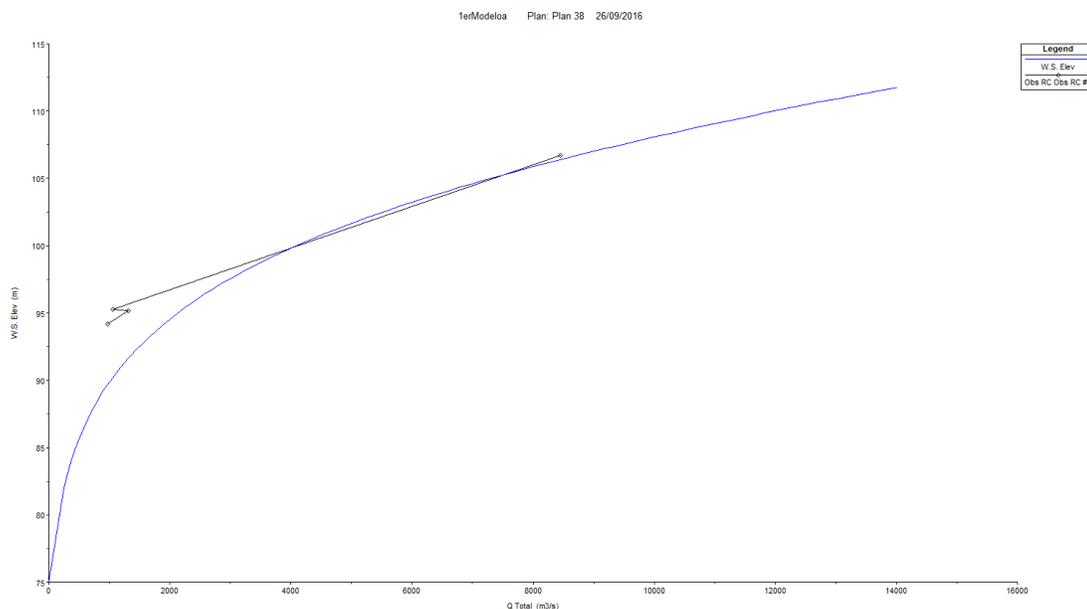


Figura 3.19 Curva gastos-elevaciones obtenida en la sección +111 527.9 correspondiente al portón medido en la población Bethel, Guatemala

4. Cálculo del daño anual esperado (DAE)

4.1 Frontera Corozal, Ocosingo, Chiapas, México

La zona de influencia del modelo hidráulico calibrado abarca 3 poblaciones, la primera y la más importante por su número de habitantes y extensión territorial es Frontera Corozal. Dicha población se encuentra ubicada en la margen izquierda del río Usumacinta en territorio mexicano y pertenece al municipio de Ocosingo en el estado de Chiapas.

De la página de (INEGI, cartografía geoestadística urbana, 2014) en la siguiente liga, es posible descargar un archivo en formato shape que contiene la traza urbana de las manzanas de todas las poblaciones por estado:

http://buscador.inegi.org.mx/search?q=cartograf%C3%ADa+geoestad%C3%ADstica+urbana+2014&spell=1&client=ProductosR&proxystylesheet=ProductosR&num=10&getfields=*&sort=meta:edicion:D:E::D&entsp=a_inegi_politica_p72&lr=lang_es%7Clang_en&oe=UTF-8&ie=UTF-8&ip=10.66.209.12&entqr=3&filter=0&site=ProductosBuscador&tlen=260&as_sfid=AAAAX_q_JsrttQlhdp1HtQVXOeZfILHDdbGUzAP5byxYnrtoBKFuLiKPXQwOf19oCI32Py_iEKelLc1_aksXwEkPkaxl0ILkU_5b4hIDp_Krp6uw%3D%3D&as_fid=ISS5-VLykgRP3deZPPdd&ulang=es&start=30

Se filtra en este caso la información correspondiente a la población Frontera Corozal.

Una vez desplegado el archivo en el Software ArcMap de (ArcGISV10.4®) es posible apreciar la tabla de atributos, la cual contiene 6 columnas con datos. El más relevante es aquel nombrado "cvgeo", la nomenclatura de dicho campo es el siguiente:



Figura 4.1 Nomenclatura del campo "cvgeo" del shape de manzanas obtenido de INEGI

En la Figura 4.2 se aprecia la traza de las manzanas urbanas del poblado Frontera Corozal, Chiapas, obtenida de la página de INEGI y en la Figura 4.3 se muestra la tabla de atributos en el que se resalta el campo "cvgeo"

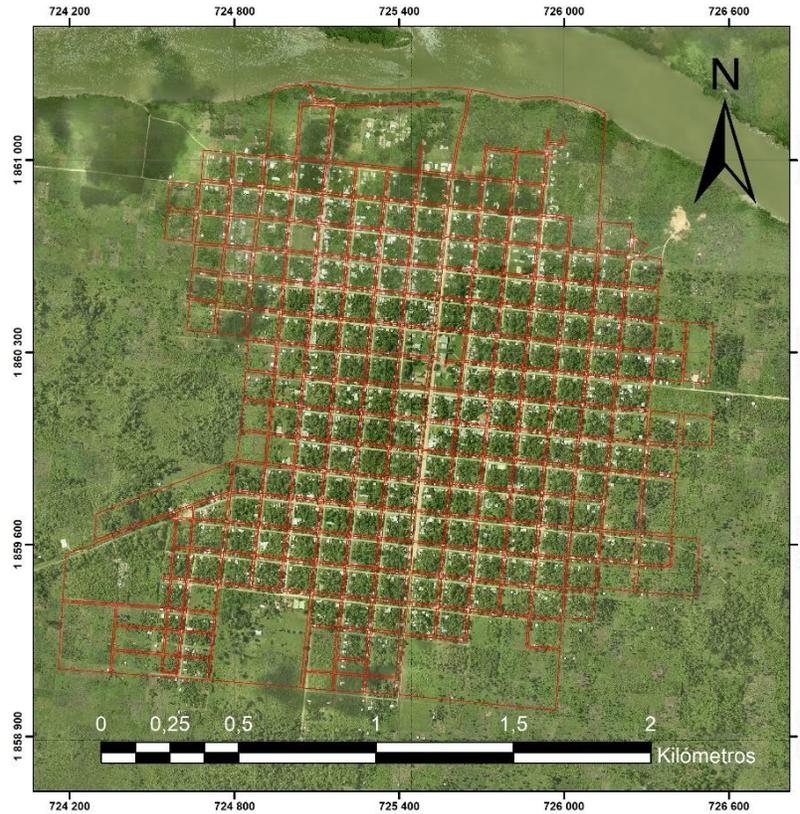


Figura 4.2 Traza de las manzanas urbanas de Frontera Corozal, Chiapas, obtenidas de INEGI, figura de elaboración propia

FID	Shape *	cvegeo	tipomza	geografico	fechaact
0	Polygon	0700100010052024	4	Manzana	12/2007
1	Polygon	0700100010052015	4	Manzana	08/2014
2	Polygon	0700100010052016	4	Manzana	12/2007
3	Polygon	0700100010052017	4	Manzana	12/2007
4	Polygon	0700100010052018	4	Manzana	06/2010
5	Polygon	0700100010052019	4	Manzana	12/2007
6	Polygon	0700100010052021	4	Manzana	12/2007
7	Polygon	0700100010052044	4	Manzana	12/2007
8	Polygon	0700100010052053	4	Manzana	12/2007
9	Polygon	0700100010052054	4	Manzana	12/2007
10	Polygon	0700100010052055	4	Manzana	12/2007
11	Polygon	0700100010052056	4	Manzana	12/2007
12	Polygon	0700100010052057	4	Manzana	08/2014
13	Polygon	0700100010052058	4	Manzana	08/2014
14	Polygon	0700100010067011	4	Manzana	12/2007
15	Polygon	0700100010067012	4	Manzana	12/2007
16	Polygon	0700100010067013	4	Manzana	12/2007
17	Polygon	0700200010083036	4	Manzana	12/2007
18	Polygon	0700100010067022	4	Manzana	12/2007
19	Polygon	0700100010067023	4	Manzana	12/2007
20	Polygon	0700100010067024	4	Manzana	12/2007
21	Polygon	0700100010067025	4	Manzana	12/2007
22	Polygon	0700100010071001	4	Manzana	12/2007
23	Polygon	0700100010071002	4	Manzana	12/2007
24	Polygon	0700100010071003	4	Manzana	12/2007
25	Polygon	0700100010071004	4	Manzana	12/2007
26	Polygon	0700100010071005	4	Manzana	12/2007
27	Polygon	0700100010071006	4	Manzana	12/2007
28	Polygon	0700100010071017	4	Manzana	12/2007
29	Polygon	0700100010071018	4	Manzana	12/2007
30	Polygon	0700100010071037	4	Manzana	12/2007
31	Polygon	0700100010071038	4	Manzana	12/2007
32	Polygon	0700100010071039	4	Manzana	12/2007
33	Polygon	0700100010071040	4	Manzana	12/2007

Figura 4.3 Tabla de atributos del archivo descargado de la página de INEGI que contiene la traza de manzanas.

De la página de (INEGI, Censo de población y vivienda, 2010):

<http://www3.inegi.org.mx/sistemas/ageburbana/>

Se obtienen los Principales Resultados por Localidad (ITER) Es posible descargar la información a nivel estatal y una vez obtenido, filtrar por la localidad a la que se realiza el análisis. De dicha tabla son relevantes las primeras 9 columnas de izquierda a derecha de información:

- ENTIDAD: Clave de la entidad
- NOM_ENT: Nombre de la entidad
- MUN: Clave del municipio
- NOM_MUN: Nombre del municipio
- LOC: Clave de la localidad
- NOM_LOC: Nombre de la localidad
- AGEB: Clave del Área Geoestadística Básica
- MZA: Clave de la manzana
- POBTOT: Población total

Así como la columna correspondiente al número total de viviendas por manzana VIVTOT, la cual se encuentra en la columna FH de la hoja de Excel.

	NOM_MUN	LOC	NOM_LOC	AGEB	MZA	POBTOT	VIVTOT
17916	Ocosingo	0431	Frontera Corozal	1455	001	38	7
17917	Ocosingo	0431	Frontera Corozal	1455	002	27	8
17918	Ocosingo	0431	Frontera Corozal	1455	003	24	7
17919	Ocosingo	0431	Frontera Corozal	1455	004	31	8
17920	Ocosingo	0431	Frontera Corozal	1455	005	34	8
17921	Ocosingo	0431	Frontera Corozal	1455	006	50	9
17922	Ocosingo	0431	Frontera Corozal	1455	007	17	4
17923	Ocosingo	0431	Frontera Corozal	1455	008	63	14
17924	Ocosingo	0431	Frontera Corozal	1455	009	18	7
17925	Ocosingo	0431	Frontera Corozal	1455	010	33	8
17926	Ocosingo	0431	Frontera Corozal	1455	011	38	7
17927	Ocosingo	0431	Frontera Corozal	1455	012	0	0
17928	Ocosingo	0431	Frontera Corozal	1455	013	27	5
17929	Ocosingo	0431	Frontera Corozal	1455	014	27	9
17930	Ocosingo	0431	Frontera Corozal	1455	015	29	9
17931	Ocosingo	0431	Frontera Corozal	1455	016	40	7
17932	Ocosingo	0431	Frontera Corozal	1455	017	27	7
17933	Ocosingo	0431	Frontera Corozal	1455	018	22	4
17934	Ocosingo	0431	Frontera Corozal	1455	019	38	7
17935	Ocosingo	0431	Frontera Corozal	1455	020	28	5
17936	Ocosingo	0431	Frontera Corozal	1455	021	23	6
17937	Ocosingo	0431	Frontera Corozal	1455	022	0	1
17938	Ocosingo	0431	Frontera Corozal	1455	023	0	0
17939	Ocosingo	0431	Frontera Corozal	1455	024	42	10
17940	Ocosingo	0431	Frontera Corozal	1455	025	29	7
17941	Ocosingo	0431	Frontera Corozal	1455	026	23	6
17942	Ocosingo	0431	Frontera Corozal	1455	027	29	12
17943	Ocosingo	0431	Frontera Corozal	1455	028	25	5
17944	Ocosingo	0431	Frontera Corozal	1455	029	16	4

Figura 4.4 Hoja de datos del ITER de INEGI, que contiene las columnas de interés

Una vez obtenidas las columnas necesarias, se crea una concatenación con los siguientes elementos:

ENTIDAD-MUN-LOC-AGEB

Con la finalidad de obtener el Índice de Marginación Urbana (IMU) se consultó la página de (CONAPO, 2010):

http://www.conapo.gob.mx/en/CONAPO/Indice_de_marginacion_urbana_2010

De dicha página se descarga el Anexo C la base de datos por entidad federativa

Clave de AGEB	Población total	% Población de 0 a 14 años que no asiste a la escuela (I ₁)	% Población de 15 años o más sin asistencia a la secundaria (I ₂)	% Población sin derecho a los servicios de salud (I ₃)	% Mayores fallecidos de las mujeres de 15 a 45 años (I ₄)	% Viviendas particulares sin agua entubada dentro de la vivienda (I ₅)	% Viviendas particulares sin drenaje conectado a la red pública o fosa séptica (I ₆)	% Viviendas particulares sin excusado con conexión de agua (I ₇)	Viviendas particulares con algún nivel de hacinamiento (I ₈)	Viviendas particulares sin refrigerador (I ₉)	Clave SUN	Ciudad	
7 0700100010051	2 560	5 753	62 337	31 563	4 765	23 966	3 633	50 501	5 621	61 246	33 391	0	No STATE
8 0700100010067	1 857	2 381	53 602	31 196	3 351	44 206	2 784	87 554	3 011	49 251	28 694	0	No STATE
9 0700100010071	2 303	4 511	34 375	32 276	3 108	45 026	2 967	81 326	6 283	54 974	27 400	0	No STATE
10 0700100010084	792	8 696	63 209	49 838	3 390	65 934	7 143	86 133	5 485	59 890	41 111	0	No STATE
11 0700200010011	2 223	5 988	53 172	23 556	3 219	29 795	0 514	61 644	3 431	47 069	17 384	0	No STATE
12 0700200010081	1 514	18 333	49 849	28 050	5 640	44 920	3 489	83 188	26 377	69 565	35 390	0	No STATE
13 0700200010096	646	19 339	49 444	23 714	5 205	51 372	6 143	86 792	23 899	71 069	37 342	0	No STATE
14 0700200010122	2 733	8 159	45 871	25 451	4 100	16 361	1 682	76 698	10 229	63 988	29 284	0	No STATE
15 0700200010134	2 899	3 486	52 156	25 155	3 981	34 339	0 394	48 294	4 579	51 857	15 445	0	No STATE
16 0700200010141	2 293	10 448	59 272	19 413	4 094	23 143	1 423	70 245	14 094	63 604	29 610	0	No STATE
17 0700200010151	1 088	11 927	63 881	22 120	3 756	87 739	1 154	83 462	10 853	75 290	22 868	0	No STATE
18 0700200010161	194	19 565	82 051	25 258	2 752	79 070	11 628	83 023	41 860	76 744	51 163	0	No STATE
19 0700200010187	149	26 216	78 049	29 859	2 941	91 667	25 000	97 222	55 778	83 233	69 444	0	No STATE
20 0700200010198	2 137	3 826	56 993	36 330	3 253	36 989	3 154	79 702	13 569	56 200	19 216	0	No STATE
21 0700200010211	2 424	1 750	53 719	31 118	3 227	41 628	4 992	63 726	7 009	46 384	22 188	0	No STATE
22 0700300010081	1 352	7 177	38 283	41 596	5 316	54 979	4 762	83 015	24 908	49 265	24 265	0	No STATE
23 0700300010101	2 236	4 847	46 337	31 920	3 480	58 940	1 495	85 664	13 531	64 644	21 689	0	No STATE
24 0700300010111	2 603	3 140	41 963	32 051	4 576	43 621	2 599	79 781	9 766	39 617	16 506	0	No STATE
25 0700300010141	769	10 000	45 490	33 026	4 301	100 000	6 341	93 237	20 773	47 115	28 365	0	No STATE
26 0700300010151	694	6 870	57 377	49 120	4 808	99 495	5 191	89 144	15 402	37 113	16 062	0	No STATE
27 0700300010161	1 039	12 308	73 534	63 619	4 971	98 921	10 432	84 964	18 345	52 518	29 242	0	No STATE
28 0700400010121	2 882	5 231	62 666	47 419	4 136	54 269	2 294	71 450	4 871	50 610	52 141	0	No STATE
29 0700400010131	3 442	6 498	54 239	34 822	4 893	53 836	0 780	89 750	4 818	42 913	41 384	0	No STATE
30 0700400010141	874	18 224	79 012	88 047	6 287	29 114	23 750	90 000	18 125	70 625	79 375	0	No STATE
31 0700400010151	835	11 340	75 047	70 813	4 460	76 216	19 459	82 973	14 054	60 541	71 739	0	No STATE
32 0700400010161	1 050	7 819	62 698	71 484	2 754	60 181	60 315	80 990	7 423	37 848	60 638	0	No STATE
33 0700500010047	1 242	4 198	44 704	39 937	7 179	66 773	49 882	97 444	7 029	54 140	49 201	0	No STATE
34 0700500010044	282	12 500	66 667	30 142	7 483	21 875	100 000	12 500	50 000	59 375	59 375	0	No STATE
35 0700500010071	2 359	5 070	43 847	34 892	5 345	52 495	41 738	84 236	5 751	57 590	48 614	0	No STATE
36 0700600010044	441	4 478	42 779	38 182	3 247	49 544	1 941	71 945	4 684	49 515	12 421	0	No STATE

Figura 4.5 Índice de Marginación Urbana

Se asocia la información del Índice de Marginación Urbana con la concatenación realizada previamente a la información descargada del Censo Nacional de Vivienda, obteniendo de esta manera el IMU para cada manzana analizada

Se crea una nueva concatenación con la siguiente información:

ENTIDAD-MUN-LOC-AGEB-MZA

Una vez realizada la concatenación, se realiza la operación “join” en (ArcGISV10.4®) entre el archivo shape de manzanas obtenido de INEGI y la información relevante obtenida hasta el momento. Posteriormente se agregan las siguientes columnas: área de la manzana [m²], densidad de población [habitantes/m²] y densidad de vivienda [viviendas/m²]. Adicionalmente, debido a que el censo disponible es de 2010, se verificaron el número de viviendas mencionadas por INEGI con las que se muestran en la ortofoto del Estudio LiDAR (SAP, 2015) de Comisión Federal de Electricidad de 2015. Se corrigieron varias manzanas que INEGI marcaba como deshabitadas y en los casos en los que se agregaron viviendas, se consideró el promedio de habitantes por vivienda de Chiapas de 4,2 habitantes por vivienda. (INEGI, 2016)

Para la obtención del costo anual esperado fueron utilizadas las ecuaciones (Tabla 4.1) determinadas por (Baró Suárez, Díaz Delgado, Calderón Aragón, Esteller Alberich, & Cadena Vargas, 2011). Las cuales relacionan el costo anual esperado para tres condiciones: mínimo, máximo y más probable con la altura de la lámina del agua alcanzada.

La ecuación del modelo logarítmico de (Baró Suárez, Díaz Delgado, Calderón Aragón, Esteller Alberich, & Cadena Vargas, 2011) permite calcular los daños potenciales directos, en número de salarios mínimos, para una altura de lámina de agua dada. Esto tiene la ventaja de que no se pierde validez con el tiempo y basta con multiplicar por el salario mínimo actualizado. Para este trabajo se consideró el salario mínimo general de \$80,04 pesos establecido por la Comisión Nacional de los Salarios Mínimos (SAT, 2016) mediante resolución publicada en el Diario Oficial de la Federación del 19 de diciembre de 2016. Vigente a partir del 1 de enero de 2017.

Tabla 4.1 Ecuaciones obtenidas de las curvas de daños potenciales directos en zonas habitacionales. (Baró Suárez, Díaz Delgado, Calderón Aragón, Esteller Alberich, & Cadena Vargas, 2011)

Índice de Marginación	Ecuación	R ²
Muy Alto	$DDH_{máx} = 247.63 \cdot Ln(h) + 668.44$	0.82
	$DDH_{mín} = 141.36 \cdot Ln(h) + 382.45$	0.72
	$DDH_{mp} = 156.92 \cdot Ln(h) + 424.33$	0.74
Alto	$DDH_{máx} = 289.63 \cdot Ln(h) + 801.56$	0.85
	$DDH_{mín} = 228.58 \cdot Ln(h) + 637.93$	0.80
	$DDH_{mp} = 280.51 \cdot Ln(h) + 777.60$	0.84
Medio, una planta	$DDH_{máx} = 709.63 \cdot Ln(h) + 1\,976.04$	0.88
	$DDH_{mín} = 544.93 \cdot Ln(h) + 1\,546.60$	0.83
	$DDH_{mp} = 685.51 \cdot Ln(h) + 1\,913.15$	0.87
Bajo, una planta	$DDH_{máx} = 877.28 \cdot Ln(h) + 2\,479.23$	0.88
	$DDH_{mín} = 797.24 \cdot Ln(h) + 2\,233.19$	0.85
	$DDH_{mp} = 865.56 \cdot Ln(h) + 2\,443.20$	0.85
Bajo, dos plantas	$DDH_{máx} = 666.15 \cdot Ln(h) + 1\,632.94$	0.85
	$DDH_{mín} = 595.33 \cdot Ln(h) + 1\,409.03$	0.82
	$DDH_{mp} = 605.70 \cdot Ln(h) + 1\,441.82$	0.82
Muy bajo, una planta	$DDH_{máx} = 1,521.80 \cdot Ln(h) + 4\,051.63$	0.92
	$DDH_{mín} = 1,210.14 \cdot Ln(h) + 3\,321.20$	0.87
	$DDH_{mp} = 1,255.78 \cdot Ln(h) + 3\,428.17$	0.87
Muy bajo, dos plantas	$DDH_{máx} = 1,230.35 \cdot Ln(h) + 2\,850.34$	0.92
	$DDH_{mín} = 939.78 \cdot Ln(h) + 2\,221.33$	0.87
	$DDH_{mp} = 1,187.79 \cdot Ln(h) + 2\,758.22$	0.91

Donde:

- R² Coeficiente de determinación, adimensional
- $DDH_{máx}$ Daños directos en zona habitacional. Costo máximo, en unidades de salario mínimo por vivienda
- $DDH_{mín}$ Daños directos en zona habitacional. Costo mínimo, en unidades de salario mínimo por vivienda
- DDH_{mp} Daños directos en zona habitacional. Costo más probable, en unidades de salario mínimo por vivienda

h Altura de lámina de agua, en m

Del software (HEC-RASV5.0®) son exportados los archivos en formato raster (imagen) de las manchas de inundación para los diferentes periodos de retorno estudiados. Dichos archivos cuentan con un tamaño de pixel de 5x5 [m]

Debido que las ecuaciones de (Baró Suárez, Díaz Delgado, Calderón Aragón, Esteller Alberich, & Cadena Vargas, 2011) se encuentran en función del logaritmo natural del tirante, se debe realizar la operación a través de la herramienta “raster calculator” (Figura 4.7) en el apartado “map algebra” en el ArcToolbox de (ArcGISV10.4®) Dicha herramienta permite calcular el logaritmo natural para cada pixel del raster de tirantes.

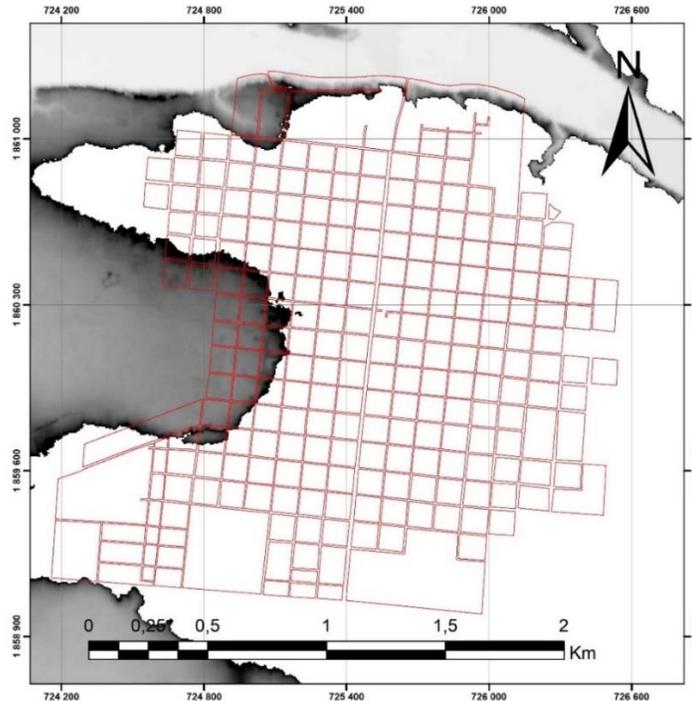


Figura 4.6 Raster de tirantes para el periodo de retorno de 100 años en Frontera Corozal, Chiapas, México

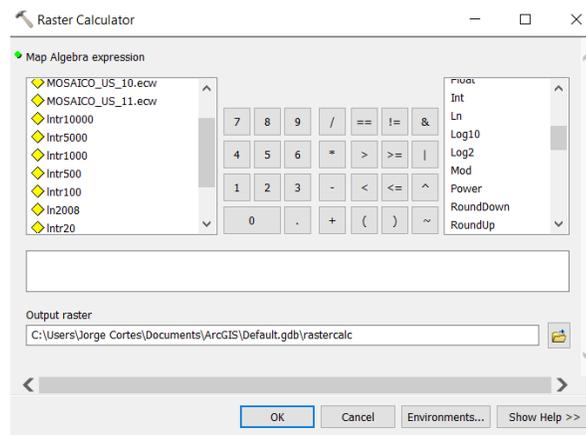


Figura 4.7 Herramienta Raster Calculator

Una vez calculado el raster de $\ln(h)$ se convierte a un shape de puntos con la herramienta "Raster to point" la cual se encuentra en el apartado "Conversion tools/From raster" del ArcToolbox de (ArcGISV10.4®)

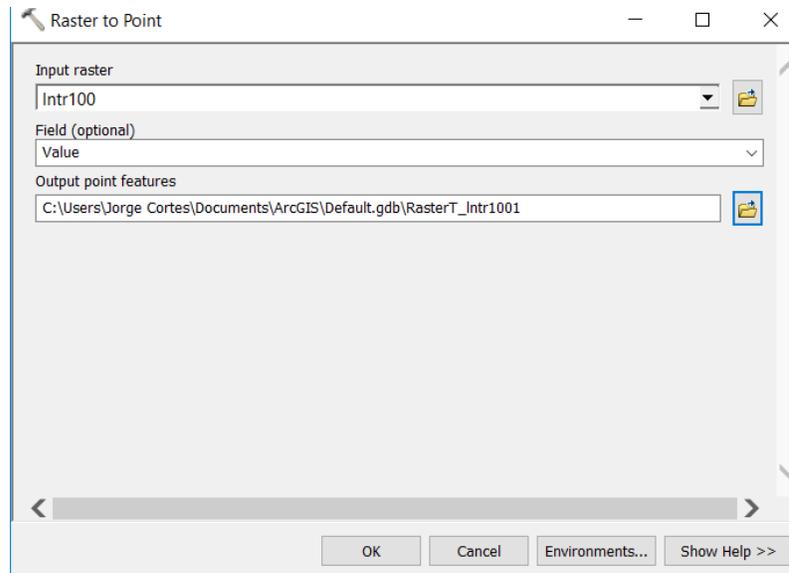


Figura 4.8 Herramienta "Conversion Tools/From Raster/Raster to point de (ArcGISV10.4®)

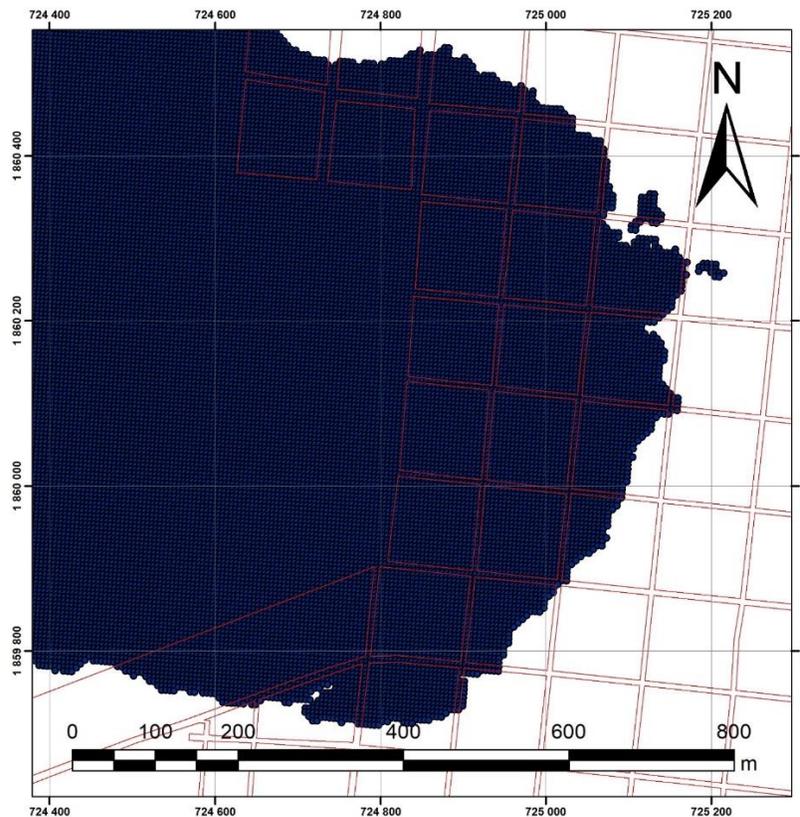


Figura 4.9 Shape de puntos del logaritmo natural del tirante para el periodo de retorno de 100 años, Frontera Corozal, Chiapas, México

Llegado a este punto, es posible realizar una intersección entre el shape de puntos del logaritmo natural del tirante con el shape de manzanas urbanas previamente preparado, a través de la herramienta “intersect” que se encuentra en la pestaña “geoprocessing” de (ArcGISV10.4®). El resultado es un shape de puntos de las zonas afectadas por la inundación en el área urbana de Frontera Corozal, Chiapas, para el periodo de retorno de 100 años.

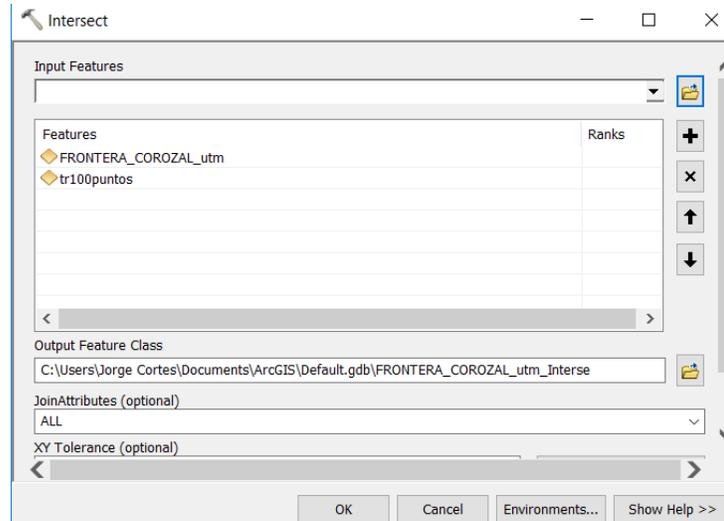


Figura 4.10 Herramienta geoprocessing/Intersect de (ArcGISV10.4®)

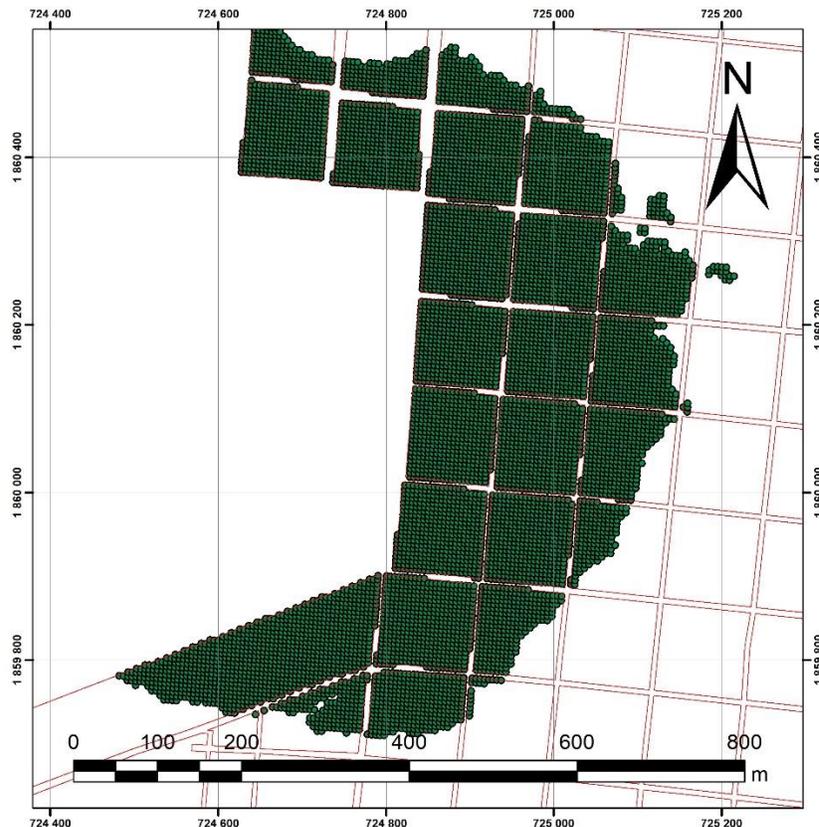


Figura 4.11 Intersección del shape de tirantes con el de manzanas para un periodo de retorno de 100 años en Frontera Corozal, Chiapas, México

Una vez obtenida la intersección es posible exportar los datos a una tabla de Excel para realizar el cálculo del daño estimado utilizando las ecuaciones de (Baró Suárez, Díaz Delgado, Calderón Aragón, Esteller Alberich, & Cadena Vargas, 2011). Para la exportación se utiliza la herramienta Conversion Tools/Excel/Table To Excel del ArcToolbox de (ArcGISV10.4®).

Una vez en Excel, para cada punto analizado, se identifica el grado de marginación para elegir la ecuación a utilizar de la Tabla 4.1 (pág. 40). En este caso, la totalidad de la localidad Frontera Corozal se encuentra en un grado de marginación muy alta, por lo que se utilizan las ecuaciones:

$$DDH_{m\acute{a}x} = 247.63 \cdot \ln(h) + 668.44 \quad (4.1)$$

$$DDH_{m\acute{i}n} = 141.36 \cdot \ln(h) + 382.45 \quad (4.2)$$

$$DDH_{mp} = 156.92 \cdot \ln(h) + 424.33 \quad (4.3)$$

Donde:

- $DDH_{m\acute{a}x}$ Daños directos en zona habitacional. Costo máximo, en unidades de salario mínimo por vivienda
- $DDH_{m\acute{i}n}$ Daños directos en zona habitacional. Costo mínimo, en unidades de salario mínimo por vivienda
- DDH_{mp} Daños directos en zona habitacional. Costo más probable, en unidades de salario mínimo por vivienda
- h Altura de lámina de agua, en m

Debido a que las ecuaciones de (Baró Suárez, Díaz Delgado, Calderón Aragón, Esteller Alberich, & Cadena Vargas, 2011) se encuentran en función al logaritmo natural del tirante existe un valor mínimo del tirante, por debajo del cual el valor de daño se obtiene en valores negativos. Dichos valores son para las tres ecuaciones aproximadamente equivalentes a un tirante de 6,7 cm. Dicho problema se soluciona sumando únicamente los valores positivos, despreciando tirantes inferiores a dicho valor.

El daño estimado máximo para un periodo de retorno dado se calcula con la siguiente expresión:

$$DE_{max} = \sum_{i=1}^n DDH_{m\acute{a}x_i} \cdot \frac{N^{\circ}viviendas_i}{Amzn_i} \cdot A_{PXL} \cdot SMG \quad (4.4)$$

Donde:

- DE_{max} Daño estimado máximo para un periodo de retorno dado en pesos de 2017

$DDHmáx_i$	Daño directo en zona habitacional para el punto evaluado i calculado con la ecuación 5.1 en unidades de salario mínimo por vivienda.
$\frac{N^\circ viviendas_i}{Amzn_i}$	Densidad de viviendas en la manzana a la que pertenece el punto evaluado i en viviendas/m ²
A_{PXL}	Área de pixel de 25 m ²
SMG	Salario mínimo general del año 2017, el cual puede ser actualizado (SAT, 2016) en pesos de 2017

De idéntica forma se obtienen los daños estimados mínimo (ecuación 6.5) y más probable (ecuación 6.6)

$$DEmín = \sum_{i=1}^n DDHmín_i \cdot \frac{N^\circ viviendas_i}{Amzn_i} \cdot A_{PXL} \cdot SMG \quad (4.5)$$

$$DEmp = \sum_{i=1}^n DDHmp_i \cdot \frac{N^\circ viviendas_i}{Amzn_i} \cdot A_{PXL} \cdot SMG \quad (4.6)$$

Una vez obtenido el daño estimado para los periodos de retorno analizados de 2, 5, 10, 20, 65, 100, 500, 1,000, 5,000 y 10,000 años se calcula el daño anual esperado de la siguiente manera:

$$\overline{DAE} = \sum_{i=1}^n D_i \cdot \Delta P_i \quad (4.7)$$

Donde:

\overline{DAE}	Daño Anual Estimado, en pesos de 2017
D_i	Daño promedio de dos eventos de probabilidad de excedencia i , en pesos de 2017
ΔP_i	Intervalo de probabilidad entre las probabilidades de excedencia de ambos eventos, adimensional

En la Tabla 4.2 se muestra el cálculo del daño anual esperado máximo para la población Frontera Corozal, Chiapas, el cual resultó de \$168,824 pesos. El daño anual esperado más probable, corresponde al área bajo la curva representada en la Figura 4.12. En la Tabla 4.3 se muestra el cálculo del daño anual esperado mínimo, el cual resultó de \$96,611 pesos y en la Tabla 4.4 se muestra el cálculo para el daño anual esperado más probable para la población de Frontera Corozal, Chiapas, México, el cual resultó ser de \$107,186 pesos.

Tabla 4.2 Cálculo del Daño Anual Esperado máximo para Frontera Corozal, Chiapas, México

Período de retorno (Tr), años	Daño estimado	No. de puntos evaluados	Área inundada, m ²	Viviendas afectadas	Población afectada	Probabilidad de ocurrencia	$D[i]=\frac{(dp_{i-1})+(dp_i)}{2}$ $\Delta p_i= p_i-p_{i-1} $
10 000	\$21,920,751.33	38,245	956,125.00	331	1,517	0.0001	,
5 000	\$19,295,487.23	35,508	887,700.00	299	1,370	0.0002	\$2,060.81
1 000	\$12,911,961.75	28,791	719,775.00	223	1,027	0.0010	\$12,882.98
500	\$9,946,869.04	24,429	610,725.00	184	846	0.0020	\$11,429.42
100	\$4,013,571.09	14,516	362,900.00	90	404	0.0100	\$55,841.76
65	\$1,720,266.02	9,398	234,950.00	44	193	0.0154	\$15,437.25
20	\$388,342.28	5,540	138,500.00	15	65	0.0500	\$36,495.14
10	\$69,210.10	2,140	53,500.00	1	5	0.1000	\$11,438.81
5	\$60,642.89	1,759	43,975.00	1	5	0.2000	\$6,492.65
2	\$50,994.24	1,415	35,375.00	1	4	0.5000	\$16,745.57
Daño, Anual, Esperado, (máximo)							\$168,824.39

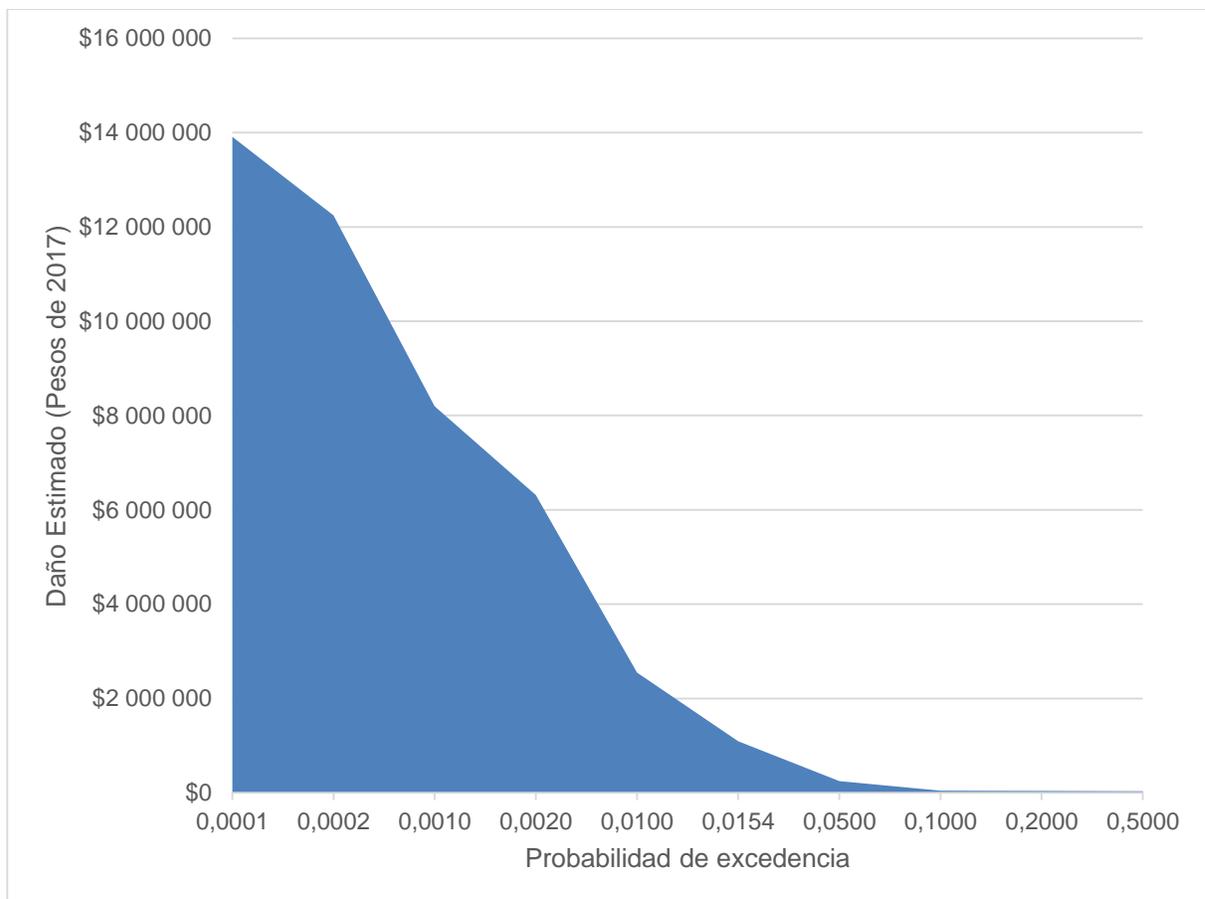


Figura 4.12 Representación del daño anual esperado más probable en Frontera Corozal, Chiapas, México

Tabla 4.3 Cálculo del Daño Anual Esperado mínimo para Frontera Corozal, Chiapas, México

Período de retorno (Tr), años	Daño estimado	No. de puntos evaluados	Área inundada, m ²	Viviendas afectadas	Población afectada	Probabilidad de ocurrencia	$D[i]=\frac{(dp_{i-1})+(dp_i)}{2}$ $\Delta p_i= p_i-p_{i-1} $
10,000	\$12,536,244.06	38,245	956,125.00	331	1,517	0,0001	
5,000	\$11,035,417.67	35,508	887,700.00	299	1,370	0,0002	\$1 178,58
1,000	\$7,386,078.56	28,791	719,775.00	223	1,027	0,0010	\$7 368,60
500	\$5,690,630.59	24,429	610,725.00	184	846	0,0020	\$6 538,35
100	\$2,297,074.33	14,516	362,900.00	90	404	0,0100	\$31 950,82
65	\$984,896.27	9,398	234,950.00	44	193	0,0154	\$8 836,07
20	\$222,607.41	5,540	138,500.00	15	65	0,0500	\$20 899,10
10	\$39,569.01	2,140	53,500.00	1	5	0,1000	\$6 554,41
5	\$34,668.45	1,759	43,975.00	1	5	0,2000	\$3 711,87
2	\$29,152.59	1,415	35,375.00	1	4	0,5000	\$9 573,16
Daño,Anual,Esperado,(mínimo)							\$96,610.97

Tabla 4.4 Cálculo del Daño Anual Esperado más probable para Frontera Corozal, Chiapas, México

Período de retorno (Tr), años	Daño estimado	No. de puntos evaluados	Área inundada, m ²	Viviendas afectadas	Población afectada	Probabilidad de ocurrencia	$D[i]=\frac{(dp_{i-1})+(dp_i)}{2}$ $\Delta p_i= p_i-p_{i-1} $
10,000	\$13,910,462.39	38,245	956,125.00	331	1,517	0,0001	
5,000	\$12,244,982.59	35,508	887,700.00	299	1,370	0,0002	\$1 307,77
1,000	\$8,195,271.69	28,791	719,775.00	223	1,027	0,0010	\$8 176,10
500	\$6,313,905.39	24,429	610,725.00	184	846	0,0020	\$7 254,59
100	\$2,548,440.21	14,516	362,900.00	90	404	0,0100	\$35 449,38
65	\$1,092,586.90	9,398	234,950.00	44	193	0,0154	\$9 802,77
20	\$246,880.04	5,540	138,500.00	15	65	0,0500	\$23 183,08
10	\$43,909.42	2,140	53,500.00	1	5	0,1000	\$7 269,74
5	\$38,471.93	1,759	43,975.00	1	5	0,2000	\$4 119,07
2	\$32,350.90	1,415	35,375.00	1	4	0,5000	\$10 623,43
Daño,Anual,Esperado,(más,probable)							\$107,185.92

En la Figura 4.13 se muestra el número de viviendas afectadas en la población de Frontera Corozal, Chiapas, México para los diferentes periodos de retorno analizados; en la Figura 4.14 se muestra la población afectada para cada periodo de retorno; la Figura 4.15 muestra la progresión de los daños estimados para la población a medida que aumenta el periodo de retorno de la inundación y finalmente en la Figura 4.16 se muestra el porcentaje de la población afectada en proporción a la población total de Frontera Corozal de 5,814 habitantes para cada periodo de retorno analizado.

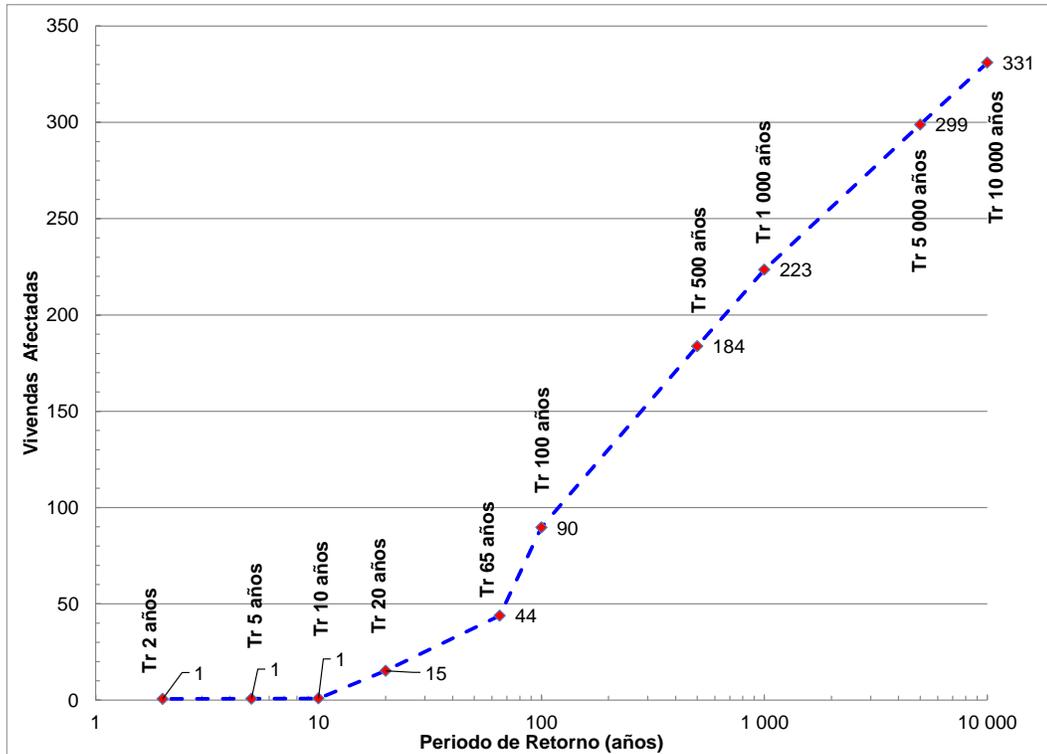


Figura 4.13 Viviendas afectadas en Frontera Corozal para diferentes periodos de retorno

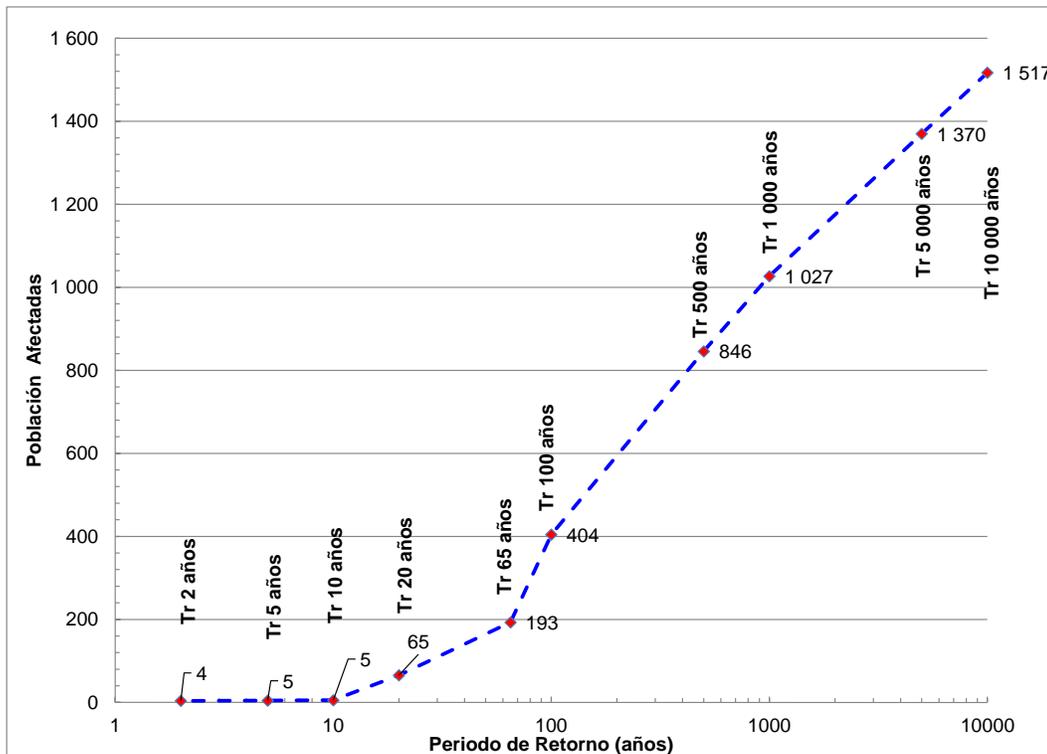


Figura 4.14 Población afectada en Frontera Corozal para diferentes periodos de retorno

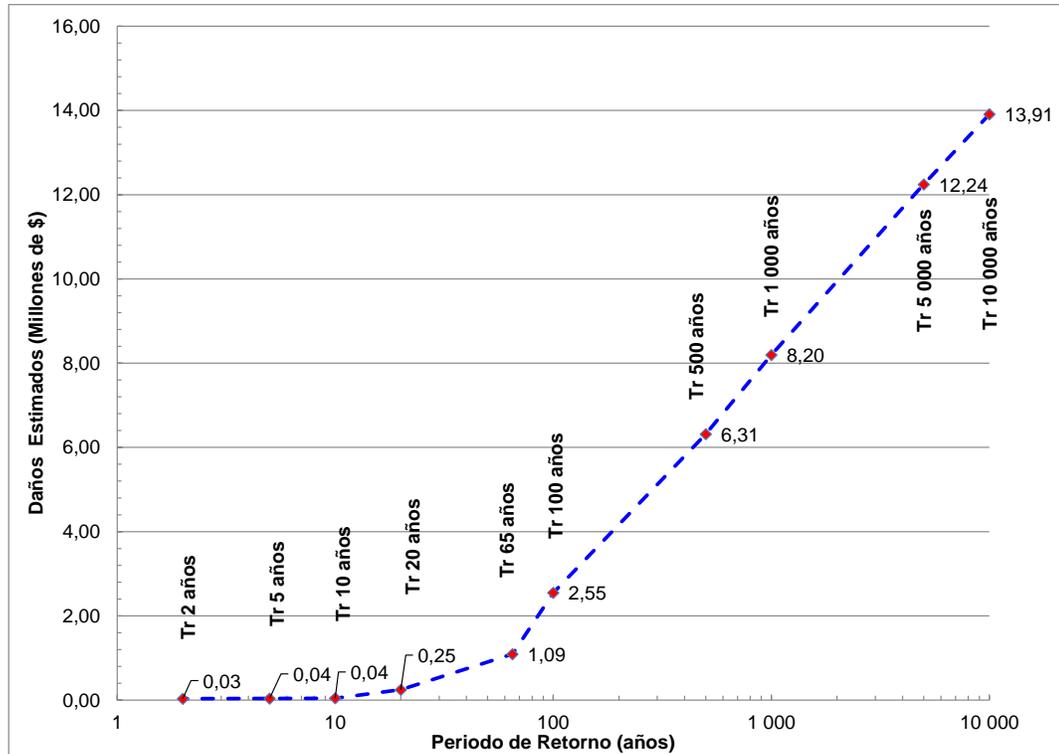


Figura 4.15 Daños estimados en Frontera Corozal para diferentes periodos de retorno en millones de pesos de 2017

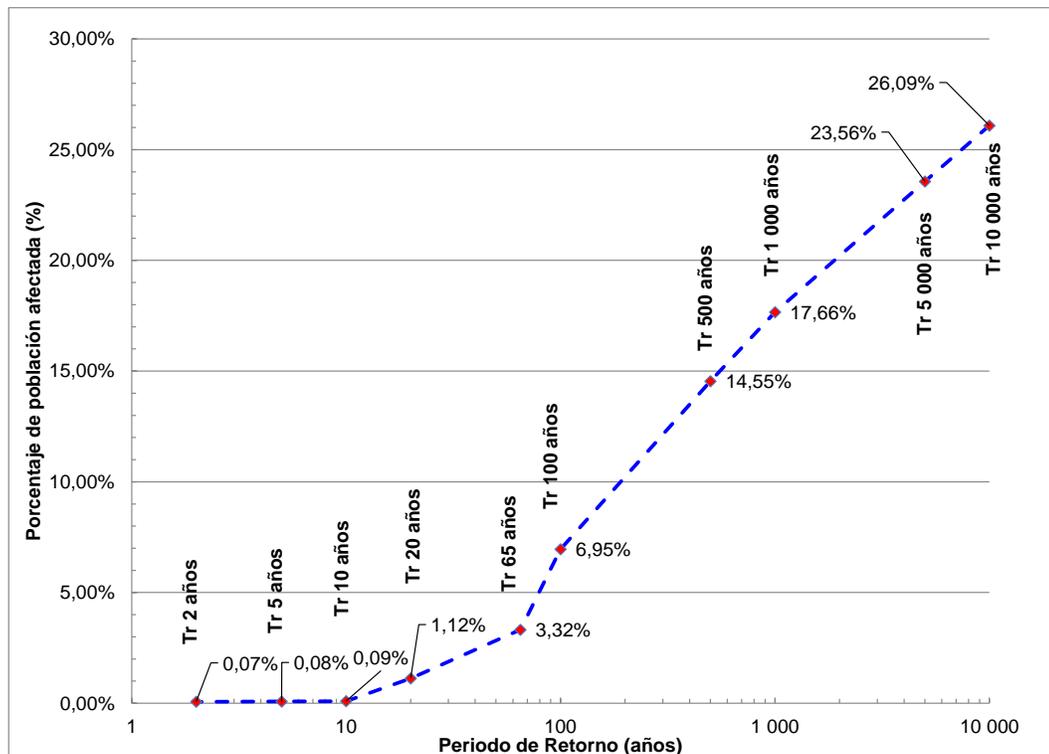


Figura 4.16 Porcentaje de población afectada en Frontera Corozal para diferentes periodos de retorno

4.2 Frontera La Técnica, Departamento del Petén, Guatemala

En la margen derecha del río Usumacinta, al atravesar el río desde Frontera Corozal, se encuentra una población llamada Frontera La Técnica, en el municipio La Libertad en el departamento del Petén en la República de Guatemala.

El censo más reciente disponible de Guatemala es del año 2002 (COLEF, 2017) y debido al tiempo excesivo desde que se levantó, se estimó el número de pobladores por vivienda con idéntico criterio con el que se complementaron algunas manzanas en Frontera Corozal, México, es decir se consideraron 4.2 habitantes por vivienda. (INEGI, 2016)

En este caso, se digitalizó el shape de manzanas y se asignaron los valores de número de viviendas que se pudieron contar en la ortofoto del poblado Frontera La Técnica en Guatemala. El número de pobladores se obtiene al multiplicar el número de viviendas por 4,2. En la Figura 4.17 se muestra la traza de manzanas dibujada a partir de la ortofoto digital del estudio LiDAR (SAP, 2015) Siguiendo este método se estimó una población total para Frontera La Técnica de 1,416 habitantes.

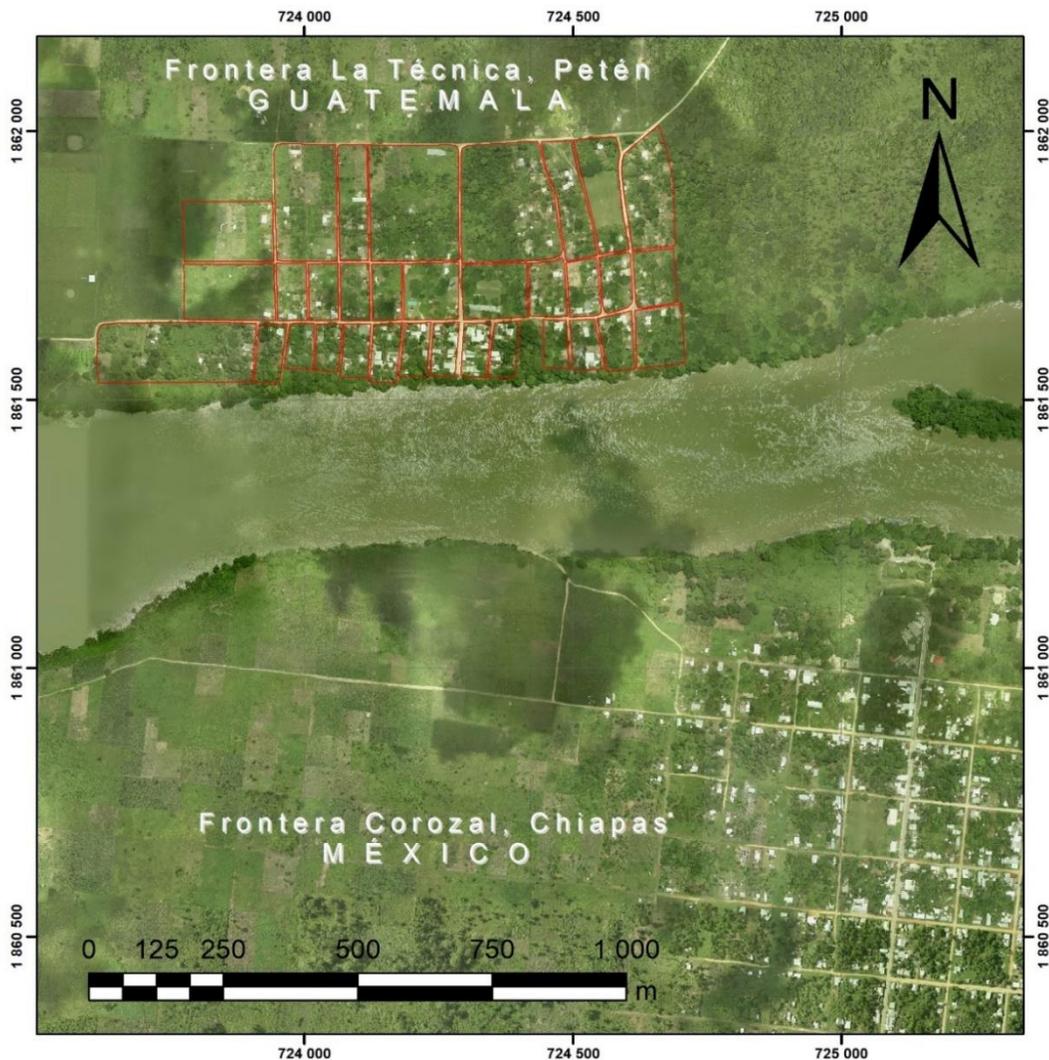


Figura 4.17 Traza de las manzanas urbanas de Frontera La Técnica, Petén, Guatemala, digitalizadas a partir de la ortofoto del estudio LIDAR (SAP, 2015), figura de elaboración propia

Fue obtenido el shape de puntos (Figura 4.19) a partir del raster de tirantes (Figura 4.18), dichos archivos son idénticos para las tres poblaciones, debido a que se encuentran en la misma área de influencia del modelo hidráulico construido.

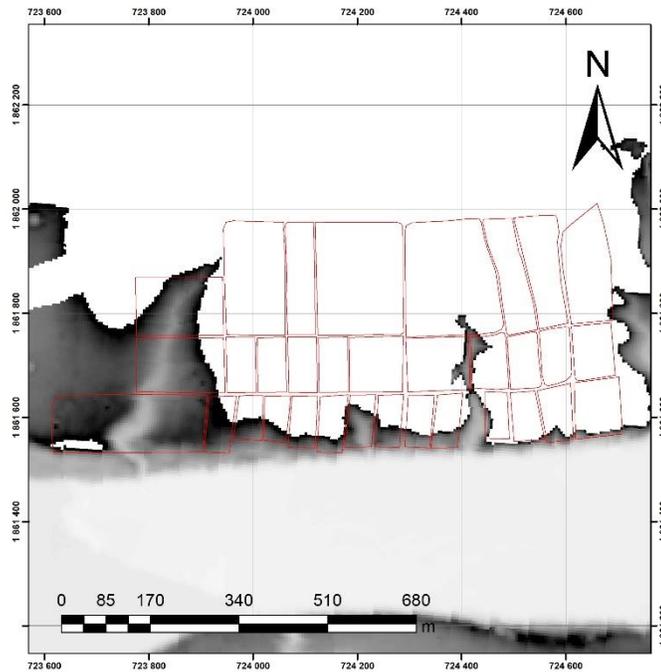


Figura 4.18 Raster de tirantes para el periodo de retorno de 100 años en Frontera La Técnica, Petén, Guatemala

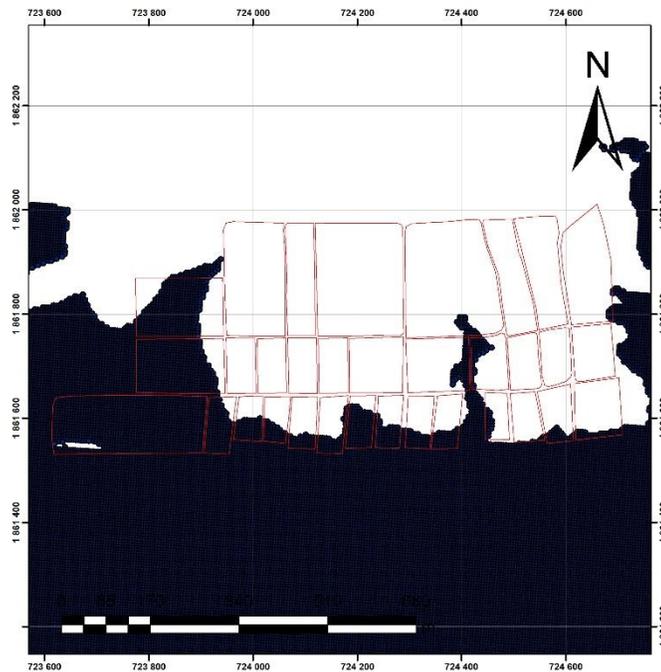


Figura 4.19 Shape de puntos del logaritmo natural del tirante para el periodo de retorno de 100 años, Frontera La Técnica, Petén, Guatemala

Posteriormente se realiza la intersección entre el shape de puntos y el de manzanas (Figura 4.20, pág. 52) una vez obtenido, se exportan los datos a Excel para realizar los cálculos del Daño Anual Esperado con las ecuaciones de (Baró Suárez, Díaz Delgado, Calderón Aragón, Esteller Alberich, & Cadena Vargas, 2011)

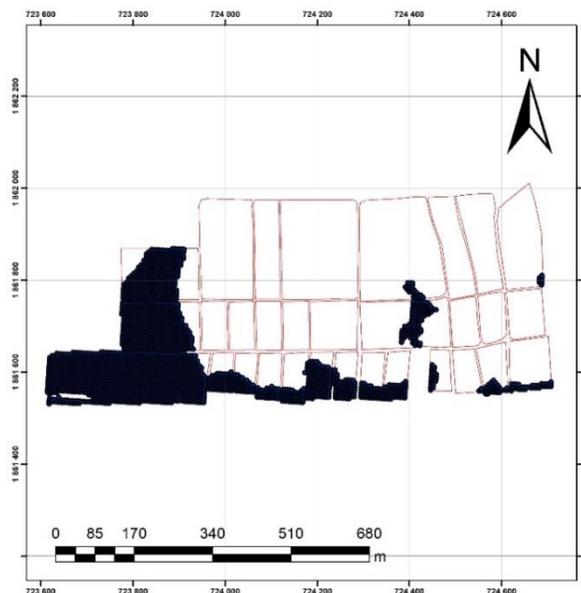


Figura 4.20 Intersección del shape de tirantes con el de manzanas para un periodo de retorno de 100 años en Frontera La Técnica, Petén, Guatemala

Al igual que Frontera Corozal, Chiapas, se consideró un grado de marginación muy alta para la población de Frontera La Técnica, en Guatemala, por lo que se utilizaron las ecuaciones 6.1, 6.2 y 6.3 para obtener el Daño Anual Esperado.

En la Tabla 4.5 se muestra el cálculo del daño anual esperado máximo para la población Frontera La Técnica, Petén, el cual resultó de \$204,042 pesos. El daño anual esperado, corresponde al área bajo la curva representada en la Figura 4.21. En la Tabla 4.5 Cálculo del Daño Anual Esperado máximo para Frontera La Técnica, Petén, Guatemala (pág. 52) se muestra el cálculo del daño anual esperado mínimo, el cual resultó de \$116,762 pesos y en la Tabla 4.6 (pág. 53) se muestra el cálculo para el daño anual esperado más probable para la población de Frontera La Técnica, Petén, Guatemala, el cual resultó ser de \$129,544 pesos.

Tabla 4.5 Cálculo del Daño Anual Esperado máximo para Frontera La Técnica, Petén, Guatemala

Período de retorno (Tr), años	Daño estimado	No. de puntos evaluados	Área inundada, m ²	Viviendas afectadas	Población afectada	Probabilidad de ocurrencia	$D[i]=\frac{(dp_{i-1})+(dp_i)}{2}$ $\Delta p_i= p_i-p_{i-1} $
10,000	\$16,782,589.49	9,840	246,000.00	247	988	0.0001	
5,000	\$14,973,050.22	8,814	220,350.00	226	902	0.0002	\$1,587.78
1,000	\$10,391,676.00	6,291	157,275.00	175	700	0.0010	\$10,145.89
500	\$8,262,099.84	5,314	132,850.00	146	584	0.0020	\$9,326.89
100	\$3,560,046.01	3,329	83,225.00	75	301	0.0100	\$47,288.58
65	\$1,710,990.19	1,546	38,650.00	37	147	0.0154	\$14,191.25
20	\$836,504.53	798	19,950.00	20	79	0.0500	\$44,091.25
10	\$347,087.52	394	9,850.00	8	31	0.1000	\$29,589.80
5	\$134,499.39	187	4,675.00	3	12	0.2000	\$24,079.35
2	\$23,772.92	52	1,300.00	1	3	0.5000	\$23,740.85
Daño, Anual, Esperado, (máximo)							\$204,041.64

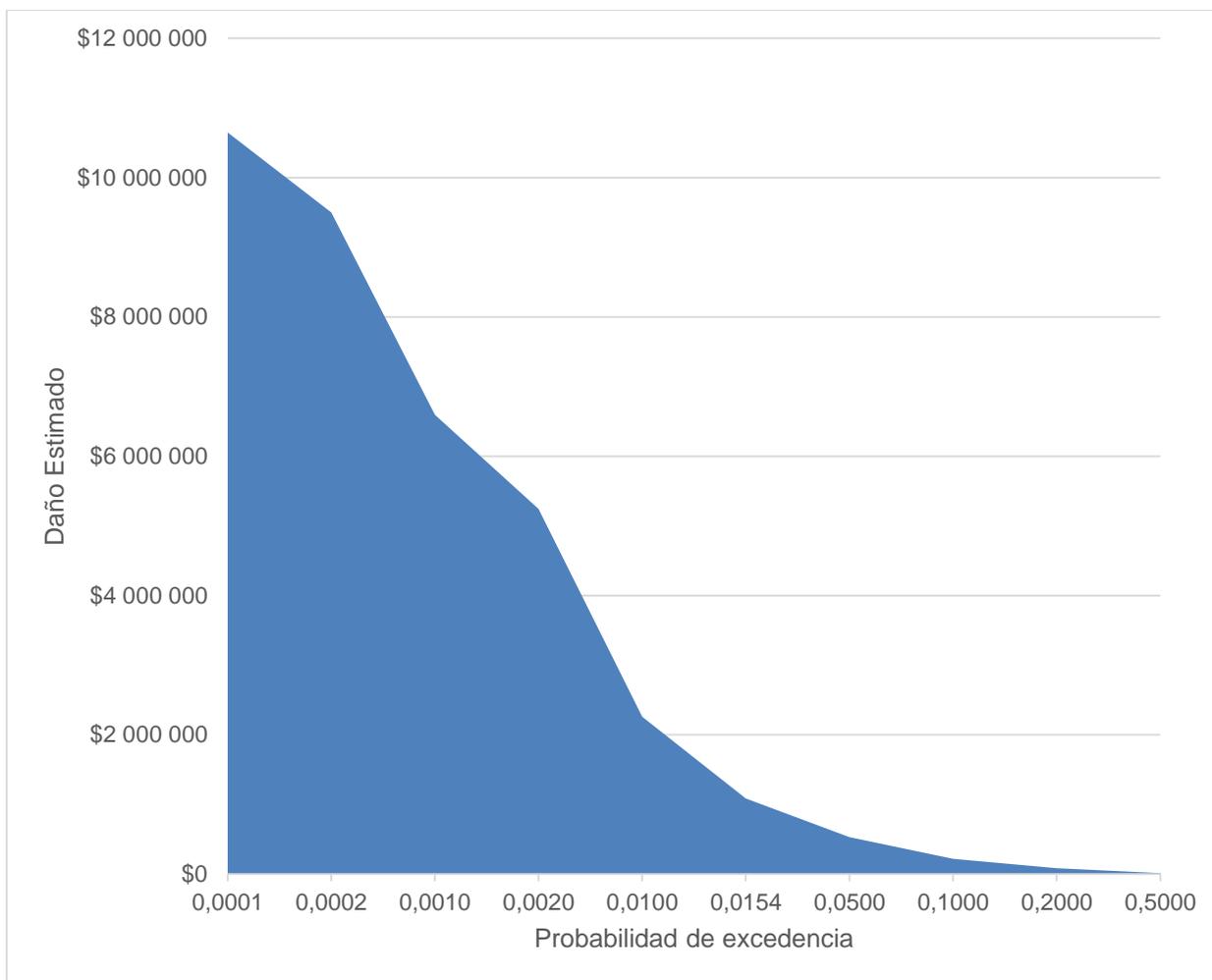


Figura 4.21 Representación del daño anual esperado más probable en Frontera La Técnica, Petén, Guatemala

Tabla 4.6 Cálculo del Daño Anual Esperado mínimo para Frontera La Técnica, Petén, Guatemala

Período de retorno (Tr), años	Daño estimado	No. de puntos evaluados	Área inundada, m ²	Viviendas afectadas	Población afectada	Probabilidad de ocurrencia	$D[i]=\frac{(dp_{i-1})+(dp_i)}{2}$ $\Delta p_i= p_i-p_{i-1} $
10,000	\$9,597,334.95	9,840	246,000.00	247	988	0.0001	
5,000	\$8,562,910.42	8,814	220,350.00	226	902	0.0002	\$908.01
1,000	\$5,944,124.95	6,291	157,275.00	175	700	0.0010	\$5,802.81
500	\$4,726,361.95	5,314	132,850.00	146	584	0.0020	\$5,335.24
100	\$2,037,278.49	3,329	83,225.00	75	301	0.0100	\$27,054.56
65	\$979,151.75	1,546	38,650.00	37	147	0.0154	\$8,121.16
20	\$478,781.39	798	19,950.00	20	79	0.0500	\$25,233.46
10	\$198,644.88	394	9,850.00	8	31	0.1000	\$16,935.66
5	\$76,984.33	187	4,675.00	3	12	0.2000	\$13,781.46
2	\$13,615.38	52	1,300.00	1	3	0.5000	\$13,589.96
Daño,Anual,Esperado,(mínimo)							\$116,762.32

Tabla 4.7 Cálculo del Daño Anual Esperado más probable para Frontera La Técnica, Petén, Guatemala

Período de retorno (Tr), años	Daño estimado	No. de puntos evaluados	Área inundada, m ²	Viviendas afectadas	Población afectada	Probabilidad de ocurrencia	$D[i]=\frac{(dp_i + dp_{i-1})}{2}$ $\Delta p_i = p_i - p_{i-1} $
10 000	\$10 649 503.34	9 840	246 000.00	247	988	0.0001	
5 000	\$9 501 576.89	8 814	220 350.00	226	902	0.0002	\$1,007.55
1 000	\$6 595 408.97	6 291	157 275.00	175	700	0.0010	\$6,438.79
500	\$5 244 125.55	5 314	132 850.00	146	584	0.0020	\$5,919.77
100	\$2 260 272.96	3 329	83 225.00	75	301	0.0100	\$30,017.59
65	\$1 086 322.49	1 546	38 650.00	37	147	0.0154	\$9,010.06
20	\$531 166.97	798	19 950.00	20	79	0.0500	\$27,995.01
10	\$220 382.99	394	9 850.00	8	31	0.1000	\$18,788.75
5	\$85 406.95	187	4 675.00	3	12	0.2000	\$15,289.50
2	\$15 102.93	52	1 300.00	1	3	0.5000	\$15,076.48
Daño Anual Esperado (más probable)							\$129 543.51

En la Figura 4.22 se muestra el número de viviendas afectadas en la población de Frontera La Técnica, Petén, Guatemala para los diferentes periodos de retorno analizados; en la Figura 4.23 se muestra la población afectada para cada periodo de retorno; la Figura 4.24 muestra la progresión de los daños estimados para la población a medida que aumenta el periodo de retorno de la inundación y finalmente en la Figura 4.25 (pág. 56) se muestra el porcentaje de la población afectada en proporción a la población total estimada de Frontera La Técnica de 1 416 habitantes para cada periodo de retorno analizado.

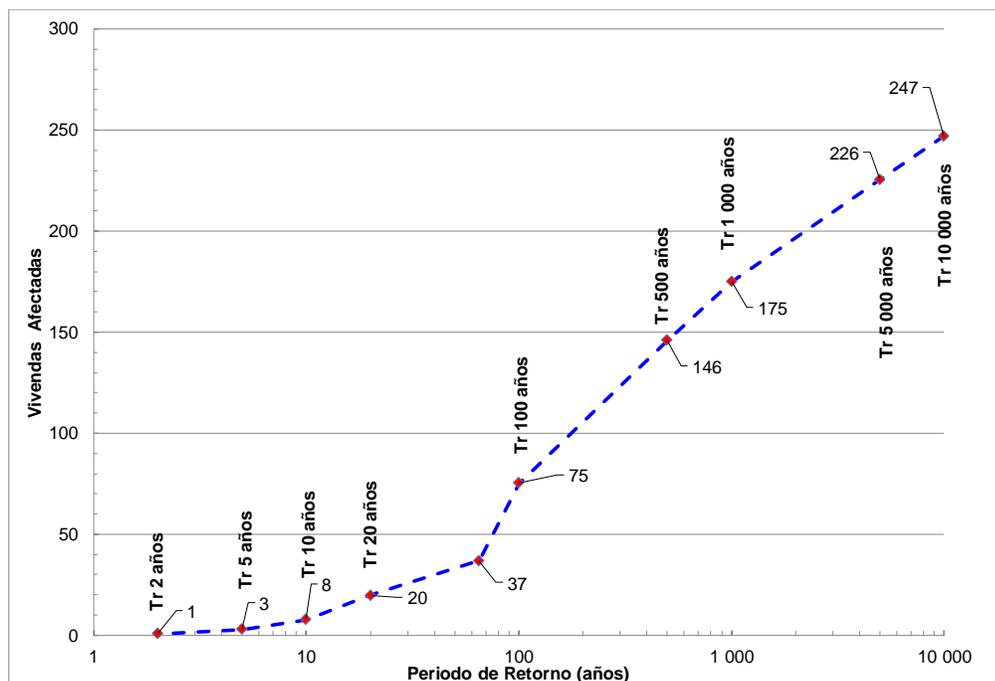


Figura 4.22 Viviendas afectadas en Frontera La Técnica para diferentes periodos de retorno

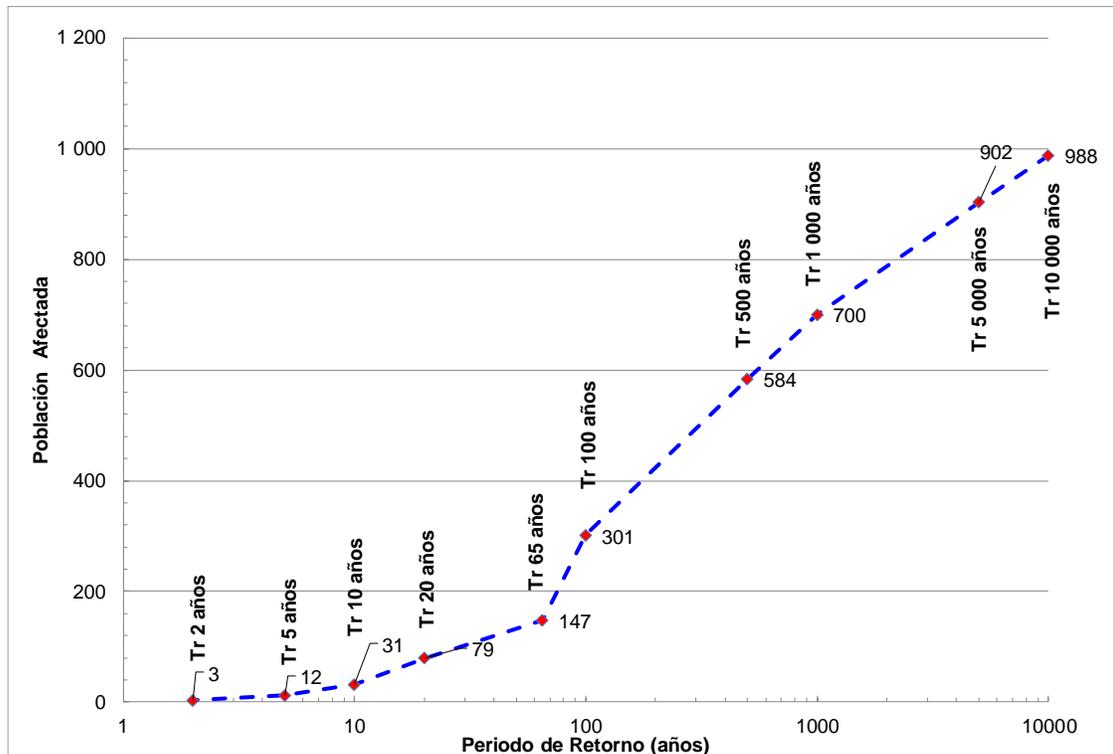


Figura 4.23 Población afectada en Frontera La Técnica para diferentes periodos de retorno

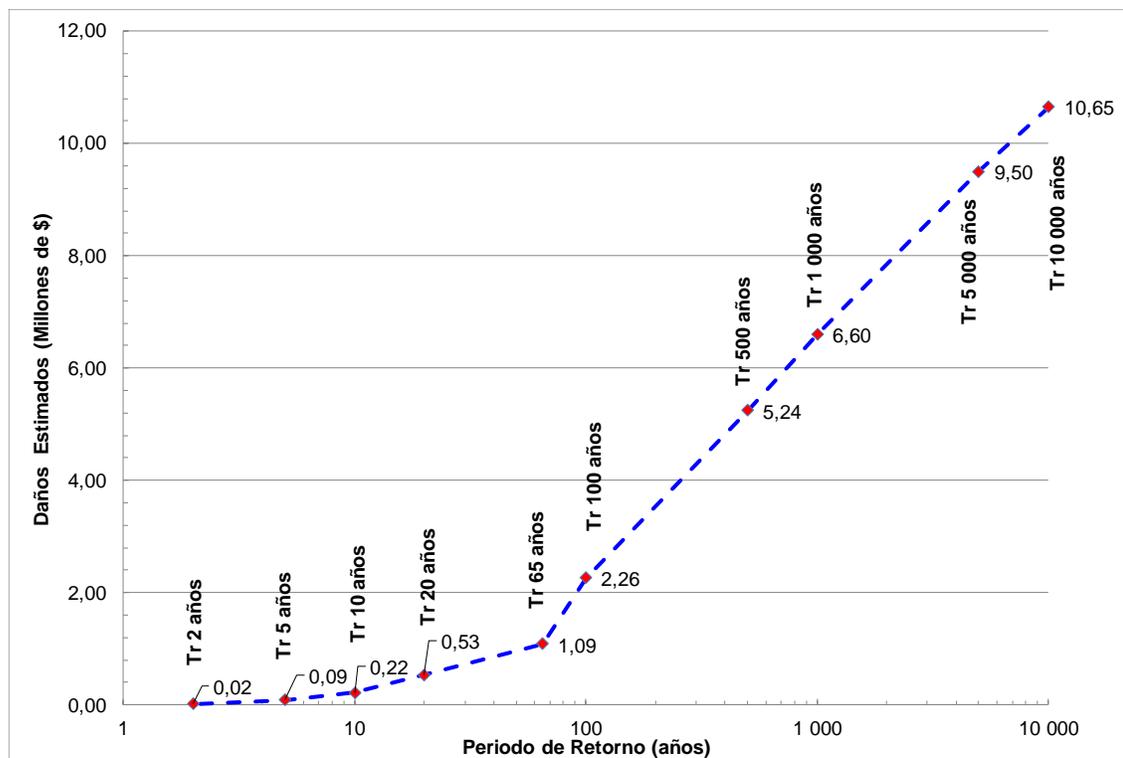


Figura 4.24 Daños estimados en Frontera La Técnica para diferentes periodos de retorno

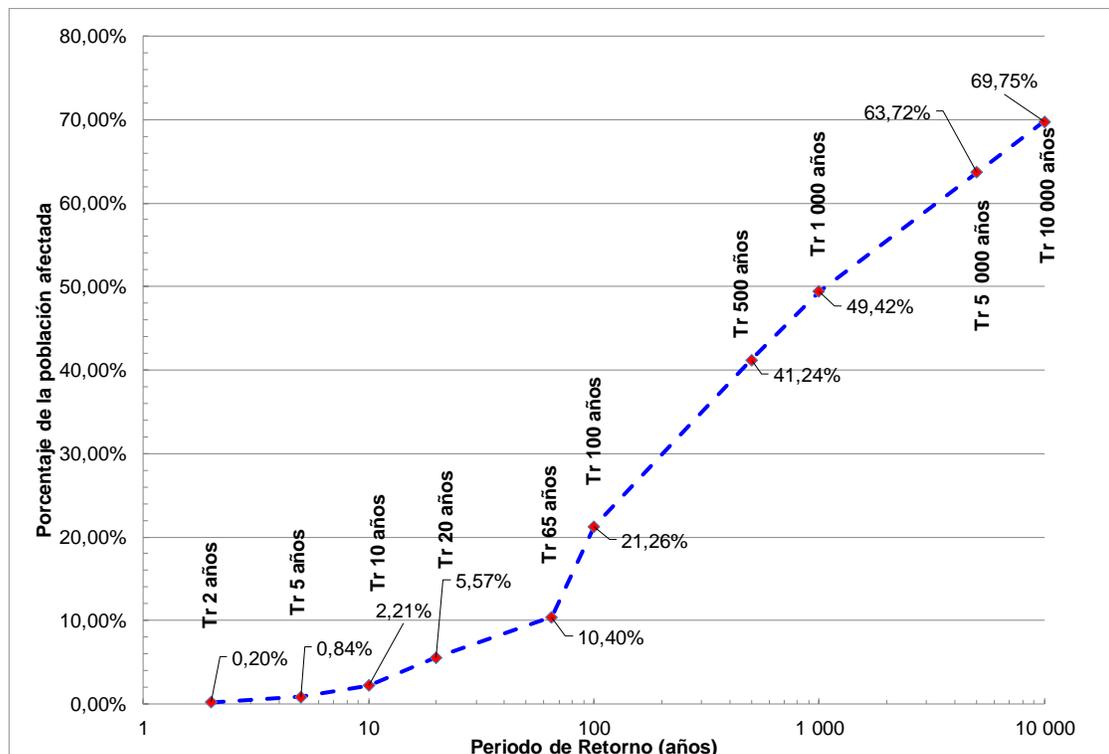


Figura 4.25 Porcentaje de población afectada en Frontera La Técnica para diferentes periodos de retorno

4.3 Bethel, Departamento del Petén, Guatemala

Partiendo de Frontera Corozal, recorriendo el río Usumacinta hacia aguas arriba 9,5 km, en la margen derecha del río, en la República de Guatemala se encuentra ubicada Bethel, una población fronteriza de Guatemala que guarda una intrínseca relación con las 2 poblaciones previamente descritas: Frontera Corozal, México y Frontera La Técnica en Guatemala. En el caso de Bethel, se tomaron las mismas consideraciones que en la primera población guatemalteca analizada se digitalizó el shape de manzanas y se asignaron los valores de número de viviendas que se pudieron contar en la ortofoto del poblado Bethel en Guatemala. El número de pobladores se obtiene al multiplicar el número de viviendas por 4,2. En la Figura 4.26 (pág. 57) se muestra la traza de manzanas dibujada a partir de la ortofoto digital del estudio LiDAR (SAP, 2015) Siguiendo este método se estimó una población total para Bethel de 2 322 habitantes.

Fue obtenido el shape de puntos (Figura 4.28) a partir del raster de tirantes (Figura 4.27) dichos archivos son idénticos para las tres poblaciones, debido a que se encuentran en la misma área de influencia del modelo hidráulico construido.

Posteriormente se realiza la intersección entre el shape de puntos y el de manzanas (Figura 4.29) una vez obtenido, se exportan los datos a Excel para realizar los cálculos del Daño Anual Esperado con las ecuaciones de (Baró Suárez, Díaz Delgado, Calderón Aragón, Esteller Alberich, & Cadena Vargas, 2011).

Al igual que Frontera Corozal, Chiapas y en Frontera La Técnica, Guatemala se consideró un grado de marginación muy alta para la población de Bethel, en Guatemala, por lo que se utilizaron las ecuaciones 5.1, 5.2 y 5.3 para obtener el Daño Anual Esperado.

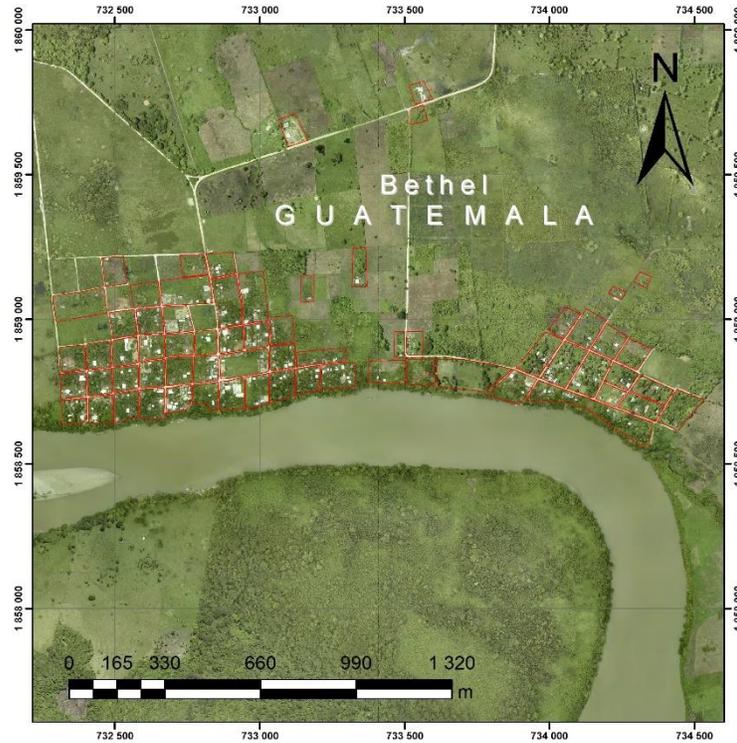


Figura 4.26 Trazas de las manzanas urbanas de Bethel, Petén, Guatemala, digitalizadas a partir de la ortofoto del estudio LIDAR (SAP, 2015), figura de elaboración propia

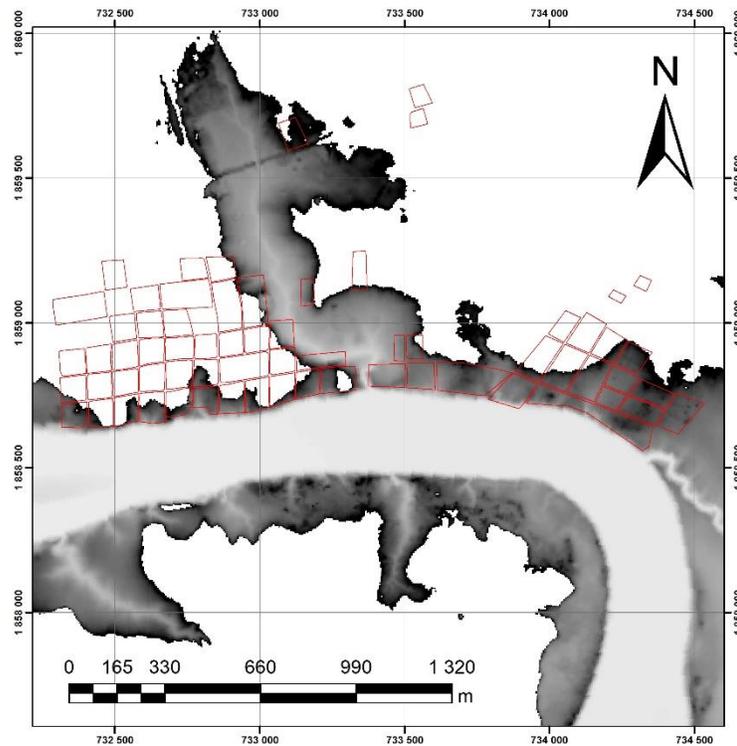


Figura 4.27 Raster de tirantes para el periodo de retorno de 100 años en Bethel, Petén, Guatemala

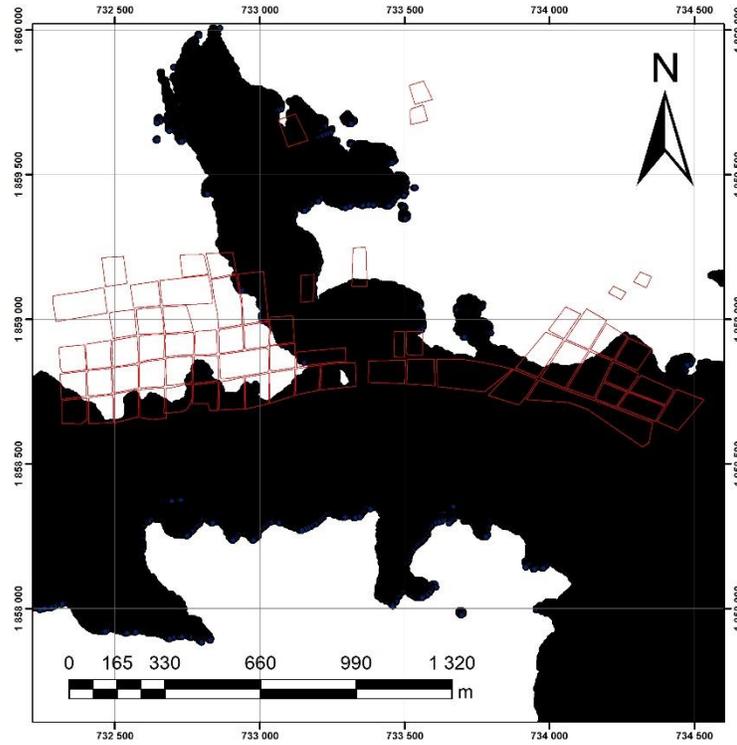


Figura 4.28 Shape de puntos del logaritmo natural del tirante para el periodo de retorno de 100 años, Bethel, Petén, México

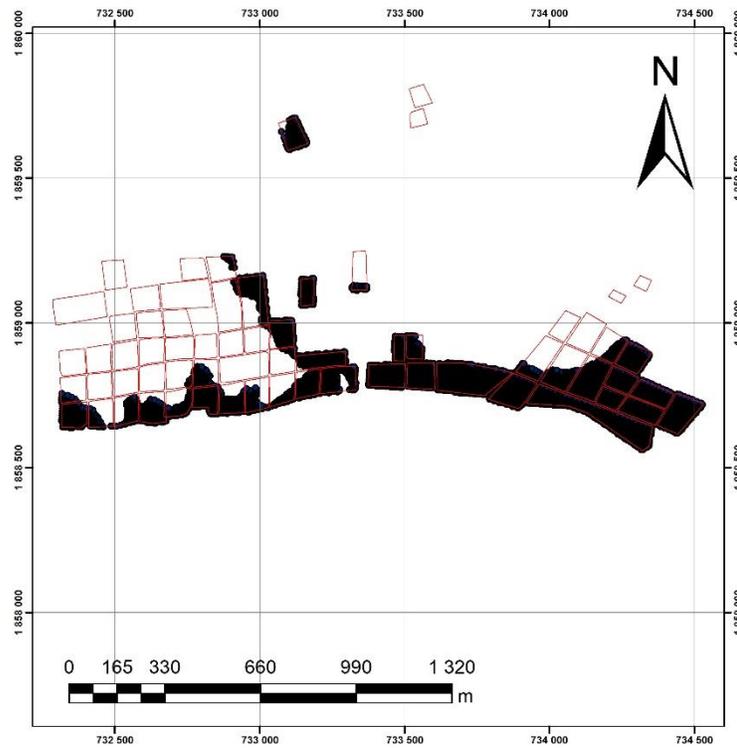


Figura 4.29 Intersección del shape de tirantes con el de manzanas para un periodo de retorno de 100 años en Bethel, Petén, Guatemala

En la Tabla 4.8 se muestra el cálculo del daño anual esperado máximo para la población Bethel, Petén, el cual resultó de \$486 852.15 pesos. El daño anual esperado, corresponde al área bajo la curva representada en la Figura 4.30. En la Tabla 4.9 se muestra el cálculo del daño anual esperado mínimo, el cual resultó de \$278,540 pesos y en la Tabla 4.10 (pág. 60) se muestra el cálculo para el daño anual esperado más probable para la población Bethel, Petén, Guatemala, el cual resultó ser de \$309 045 pesos.

Tabla 4.8 Cálculo del Daño Anual Esperado máximo para Bethel, Petén, Guatemala

Período de retorno (Tr), años	Daño estimado	No. de puntos evaluados	Área inundada, m ²	Viviendas afectadas	Población afectada	Probabilidad de ocurrencia	$D[i]=\frac{(dp_{i-1})+(dp_i)}{2}$ $\Delta p_i= p_i-p_{i-1} $
10,000	\$36,868,566.14	20,498	512,450.00	481	2,115	0.0001	
5,000	\$34,151,315.82	19,630	490,750.00	462	2,032	0.0002	\$3,550.99
1,000	\$26,219,549.52	16,566	414,150.00	401	1,763	0.0010	\$24,148.35
500	\$21,302,090.54	14,656	366,400.00	357	1,573	0.0020	\$23,760.82
100	\$9,941,313.78	9,782	244,550.00	203	893	0.0100	\$124,973.62
65	\$3,439,552.71	4,782	119,550.00	92	405	0.0154	\$36,025.41
20	\$1,239,252.30	1,505	37,625.00	25	110	0.0500	\$80,979.32
10	\$681,466.48	646	16,150.00	12	54	0.1000	\$48,017.97
5	\$420,309.50	322	8,050.00	7	31	0.2000	\$55,088.80
2	\$181,736.34	164	4,100.00	4	16	0.5000	\$90,306.88
Daño, Anual, Esperado, (máximo)							\$486,852.15

Tabla 4.9 Cálculo del Daño Anual Esperado mínimo para Bethel, Petén, Guatemala

Período de retorno (Tr), años	Daño estimado	No. de puntos evaluados	Área inundada, m ²	Viviendas afectadas	Población afectada	Probabilidad de ocurrencia	$D[i]=\frac{(dp_{i-1})+(dp_i)}{2}$ $\Delta p_i= p_i-p_{i-1} $
10,000	\$21,079,829.44	20,498	512,450.00	481	2,115	0.0001	
5,000	\$19,527,333.55	19,630	490,750.00	462	2,032	0.0002	\$2,030.36
1,000	\$14,995,122.54	16,566	414,150.00	401	1,763	0.0010	\$13,808.98
500	\$12,184,644.18	14,656	366,400.00	357	1,573	0.0020	\$13,589.88
100	\$5,688,765.86	9,782	244,550.00	203	893	0.0100	\$71,493.64
65	\$1,969,245.33	4,782	119,550.00	92	405	0.0154	\$20,617.72
20	\$709,063.85	1,505	37,625.00	25	110	0.0500	\$46,355.35
10	\$389,837.27	646	16,150.00	12	54	0.1000	\$27,472.53
5	\$240,413.56	322	8,050.00	7	31	0.2000	\$31,512.54
2	\$103,982.49	164	4,100.00	4	16	0.5000	\$51,659.41
Daño, Anual, Esperado, (mínimo)							\$278,540.41

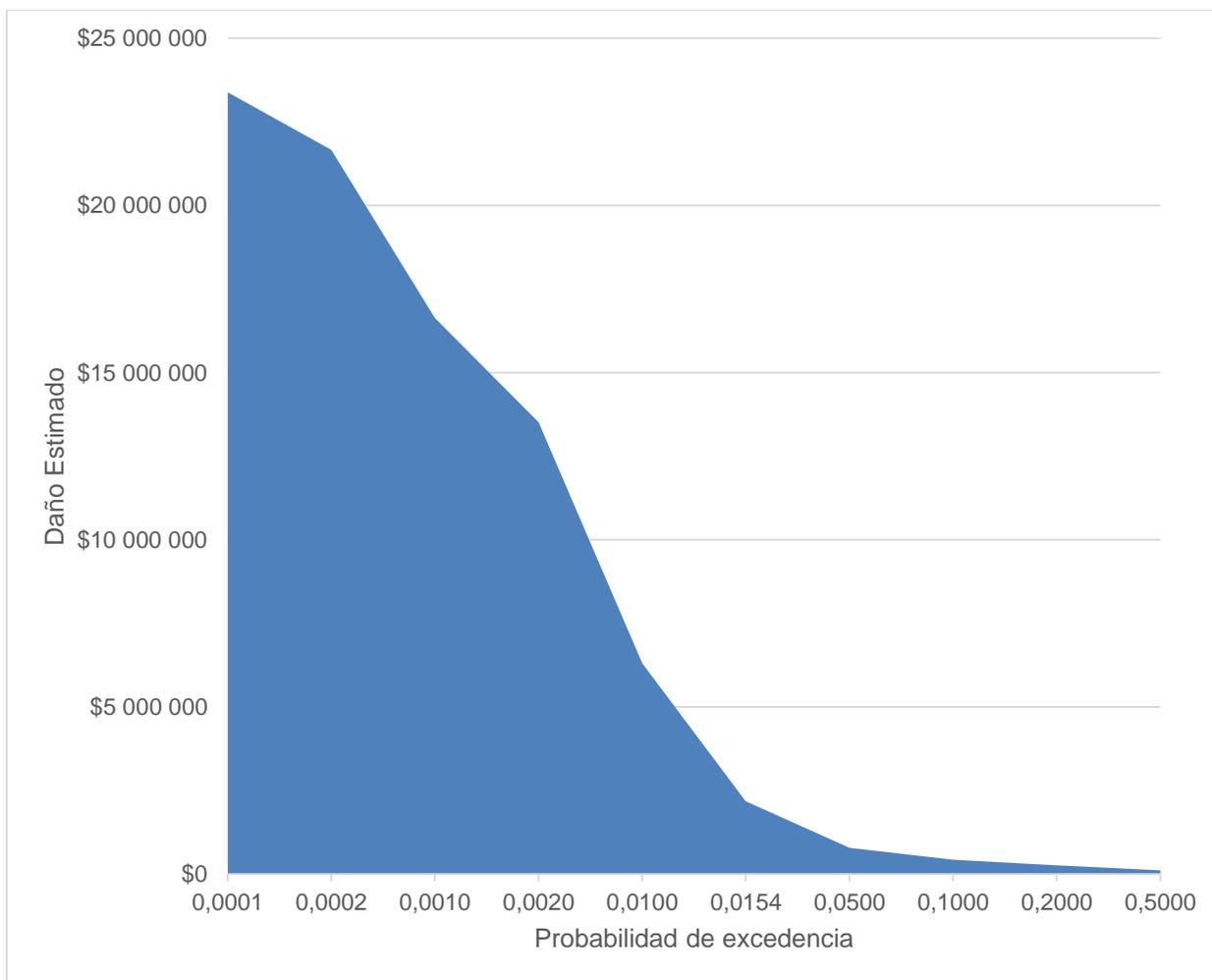


Figura 4.30 Representación del daño anual esperado más probable en Bethel, Petén, Guatemala

Tabla 4.10 Cálculo del Daño Anual Esperado más probable para Bethel, Petén, Guatemala

Período de retorno (Tr), años	Daño estimado	No. de puntos evaluados	Área inundada, m ²	Viviendas afectadas	Población afectada	Probabilidad de ocurrencia	$D[i]=\frac{(dp_{i-1})+(dp_i)}{2}$ $\Delta p_i= p_i-p_{i-1} $
10,000	\$23,391,818.68	20,498	512,450.00	481	2,115	0.0001	
5,000	\$21,668,771.55	19,630	490,750.00	462	2,032	0.0002	\$2,253.03
1,000	\$16,638,771.92	16,566	414,150.00	401	1,763	0.0010	\$15,323.02
500	\$13,519,768.91	14,656	366,400.00	357	1,573	0.0020	\$15,079.27
100	\$6,311,508.53	9,782	244,550.00	203	893	0.0100	\$79,325.11
65	\$2,184,563.29	4,782	119,550.00	92	405	0.0154	\$22,874.04
20	\$786,704.08	1,505	37,625.00	25	110	0.0500	\$51,425.78
10	\$432,542.66	646	16,150.00	12	54	0.1000	\$30,481.17
5	\$266,756.86	322	8,050.00	7	31	0.2000	\$34,964.98
2	\$115,368.67	164	4,100.00	4	16	0.5000	\$57,318.83
Daño, Anual, Esperado, (más, probable)							\$309,045.22

En la Figura 4.31 se muestra el número de viviendas afectadas en la población Bethel, Petén, Guatemala para los diferentes periodos de retorno analizados; en la Figura 4.32 se muestra la población afectada para cada periodo de retorno; la Figura 4.33 muestra la progresión de los daños estimados para la población a medida que aumenta el periodo de retorno de la inundación y finalmente en la Figura 4.34 se muestra el porcentaje de la población afectada en proporción a la población total estimada de Bethel de 2 332 habitantes para cada periodo de retorno analizado.

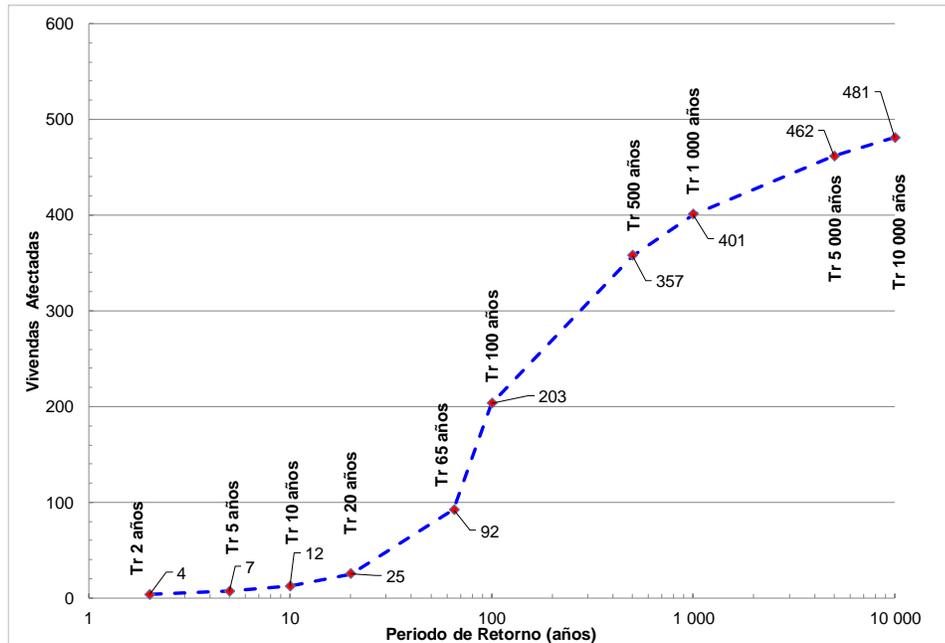


Figura 4.31 Viviendas afectadas en Bethel para diferentes periodos de retorno

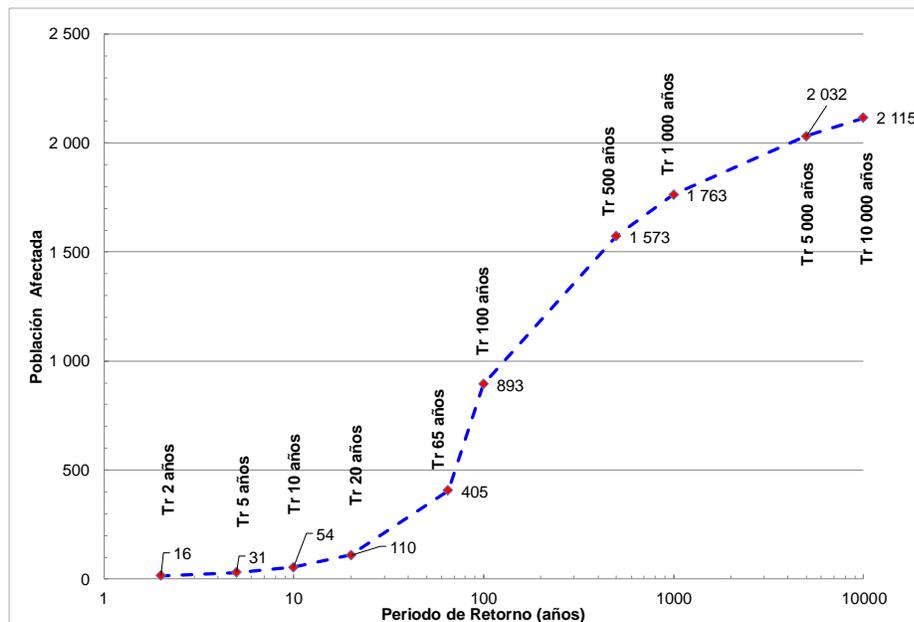


Figura 4.32 Población afectada en Bethel para diferentes periodos de retorno

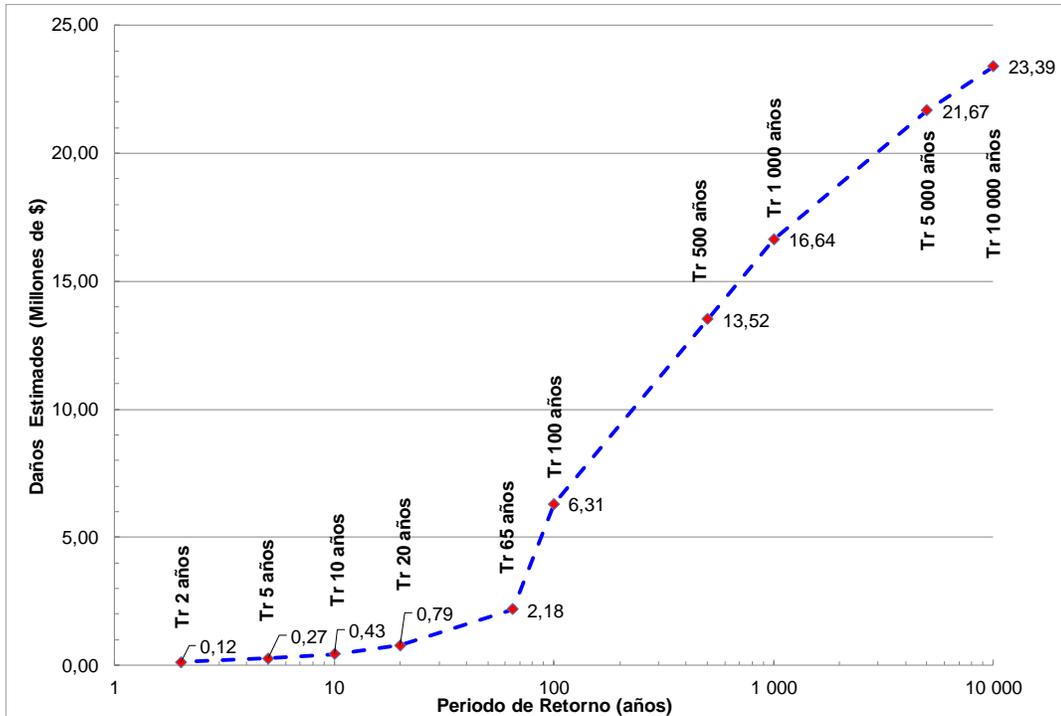


Figura 4.33 Daños estimados en Bethel para diferentes periodos de retorno

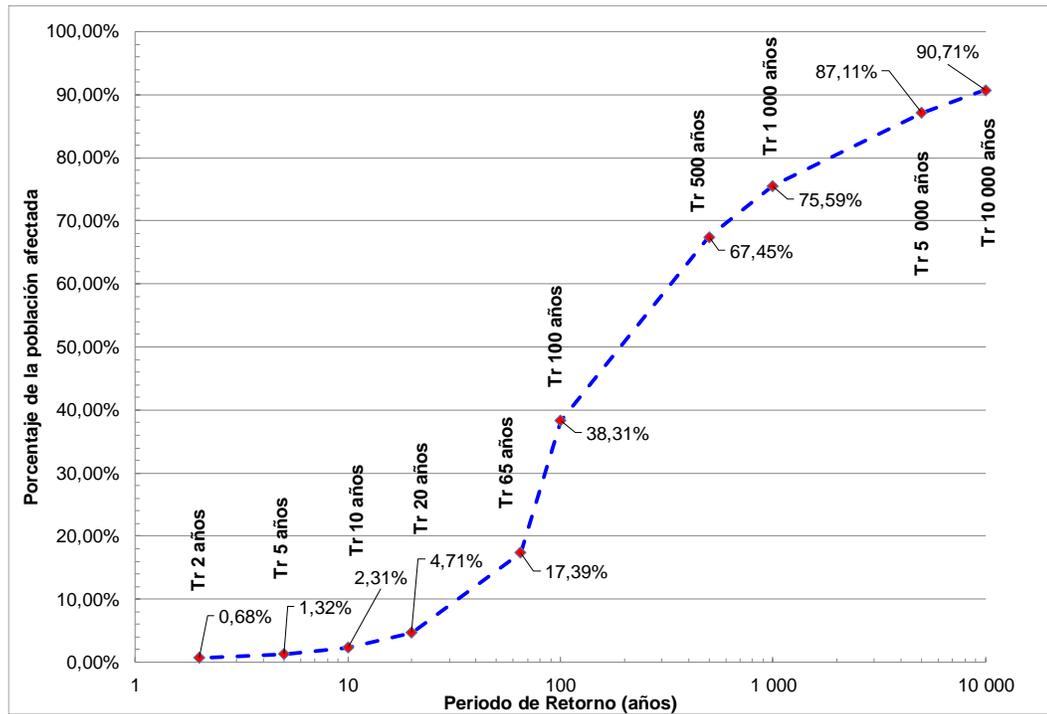


Figura 4.34 Porcentaje de población afectada en Bethel para diferentes periodos de retorno

5. Elaboración y entrega de mapas de zonas inundables

La nueva versión del software (HEC-RASV5.0®) permite la interacción del modelo de flujo unidimensional con un modelo digital de elevaciones del terreno tridimensional, permitiendo obtener manchas de inundación en 3 dimensiones, lo que compite con modelos bidimensionales pues la precisión de los resultados son similares, con la ventaja de mantener la simplicidad de un modelo unidimensional y la precisión que el modelo bidimensional puede proporcionar sin requerir un potente procesamiento de computo. Cabe mencionar que para este trabajo se intentó utilizar el modelo bidimensional IBER®, (Bladé, y otros, 2014); sin embargo, el nivel de detalle del modelo digital de elevaciones, no permitió generar el mallado triangular que requiere el programa.

En el caso de estudio de este trabajo, la precisión del modelo digital de elevaciones es muy elevado, con una resolución de 2 m por pixel.

Un subproducto inmediato de la elaboración del modelo hidráulico es la posibilidad de generar mapas de zonas inundables de las poblaciones Frontera Corozal en México, así como Frontera Técnica y Bethel en Guatemala.

En la Figura 5.4 se muestra el mapa generado para las poblaciones de Frontera Corozal y Frontera Técnica en Guatemala para un periodo de retorno de 100 años. En la Figura 5.5 se muestra el mapa generado para la población de Bethel en Guatemala.

El 22 de marzo de 2017 fueron entregados y explicados mapas de riesgo por inundación de las poblaciones Frontera Corozal, Chiapas, Frontera Técnica y Betel, Guatemala para los periodos de retorno de 2, 5, 10, 20, y 100 años, así como un mapa que marca los límites de la inundación de octubre de 2008, la máxima histórica y la cual permanece grabada en la memoria de los pobladores.



Figura 5.1 Exposición de los mapas de zonas inundables a los pobladores de Frontera Corozal



Figura 5.2 Reunión con representantes del Sub-Comisariado y Consejo de Vigilancia de Bienes Comunales de Frontera Corozal



Los resultados del estudio de riesgo de inundación fueron entregados a la población involucrada en amparo al Oficio B.00.7.02.-060 dirigido al Coordinador de Proyectos Hidroeléctricos de la Comisión Federal de Electricidad por parte de la Gerencia de Aguas Superficiales e Ingeniería de Ríos (GASIR) de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) (Figura 5.3) en el que dicha dependencia avala los resultados hidráulicos e hidrológicos del estudio.

La reunión de entrega se llevó a cabo en instalaciones del Palacio de Gobierno de Frontera Corozal el 22 de marzo de las 18:00 h a las 19:30 h con la participación de 14 asistentes miembros del Sub-Comisariado y Consejo de Vigilancia de Bienes Comunales de Frontera Corozal. En la reunión se expusieron los antecedentes, las características e importancia de los 18 mapas impresos y digitales así como, el oficio de validación de CONAGUA entregados a los representantes agrarios, los asistentes expusieron sus dudas, opiniones y agradecimiento, así mismo se elaboró una Minuta

de Trabajo y un Acta de Entrega Recepción, se recabaron firmas y sellos y se obtuvo evidencia del desarrollo de la reunión en foto y video.

El estudio hidroeléctrico en el tramo internacional del río Usumacinta proporcionó como un subproducto mapas de riesgo de inundación, los cuáles serán muy útiles para las poblaciones en las márgenes del río Usumacinta, tanto para mantenerse seguros en caso de una contingencia o bien para la planeación de su desarrollo urbano.

"Año del Centenario de la Promulgación de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos"

CONAGUA
COMISIÓN NACIONAL DEL AGUA

**SUBDIRECCIÓN GENERAL TÉCNICA
GERENCIA DE AGUAS SUPERFICIALES
E INGENIERÍA DE RÍOS**

Oficio No. B00.7.02.-060

Ing. Javier A. García de la Merced
Coordinador de Proyectos Hidroeléctricos
Comisión Federal de Electricidad
Presente

Ciudad de México, a 22 de febrero de 2017

Me refiero al similar JAGM/7A/063, de fecha 20 de febrero del presente, con el cual envía disco DVD con archivos mpk correspondientes a 10 escenarios analizados para la inundación en la población de Frontera Corozal, Chis., así como nos informa sobre la generación de los metadatos para cada uno de los archivos en comento.

A ese respecto, tengo a bien reiterarle que una vez revisados y cotejados con el Acuerdo por el que se emite la guía de contenido mínimo para la elaboración del Atlas Nacional de Riesgos, del Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED) y publicado en el Diario Oficial de la Federación con fecha 21 de diciembre de 2016, el cual contiene en su Anexo 10, los Lineamientos para la elaboración de mapas de peligro por inundación, generados por esta Subdirección General Técnica, así como analizar los archivos que conformaron el modelo hidráulico y el conjunto de archivos mpk, con sus respectivos metadatos, esta Subdirección, no tiene inconveniente técnico, desde el punto de vista hidrológico e hidráulico, para validar los atlas de inundación.

Cabe mencionar, que dichos atlas, formarán parte del Atlas Nacional de Riesgo por Inundación, que forma parte del Atlas Nacional de Riesgo del CENAPRED y que puede ser consultado en la liga: <http://www.anr.gob.mx>

Sin otro particular, le envío un cordial saludo.

Atentamente


Mtro. Horacio Rubio Gutiérrez
El Gerente

C.c.e.p. Dr. Víctor Hugo Alcócer Yamahaka, Subdirector General Técnico.-Pte.
Mtro. José Bautista Ramos, Encargado de la Subgerencia de Anteproyectos, CFE.-Pte.
Mtro. Gerardo Román Castañeda, Encargado del Centro de Anteproyectos del Pacífico Sur, CFE.-Pte.
Ing. Zurizaday García Sánchez, Secretaria Particular de la SGT.-Pte.
Archivo

HRG/EBL/2017

"El agua nos une, cuidarla es compromiso de todos"
Av. Insurgentes Sur # 2416, Col. Copilco el Bajo, Del. Coyoacán CP. 04340, Ciudad de México.
Tel. (55) 51.74.40.00 www.conagua.gob.mx

Figura 5.3 Oficio de aprobación del estudio por parte de la Gerencia de Aguas Superficiales e Ingeniería de Ríos (GASIR) de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA)

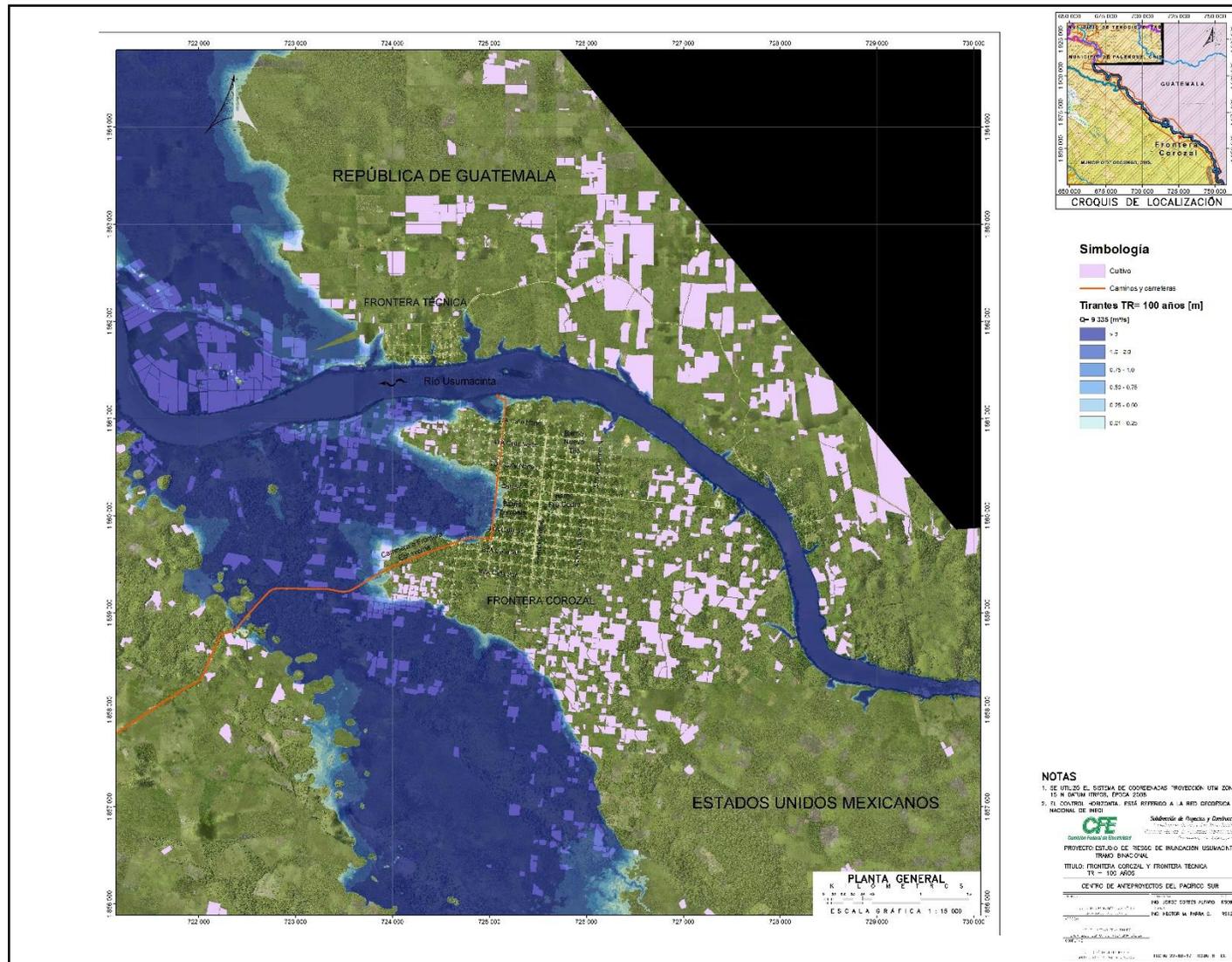


Figura 5.4 Mapa de zonas inundables de Frontera Corozal, México y Frontera Técnica, Guatemala para un periodo de retorno T_r de 100 años

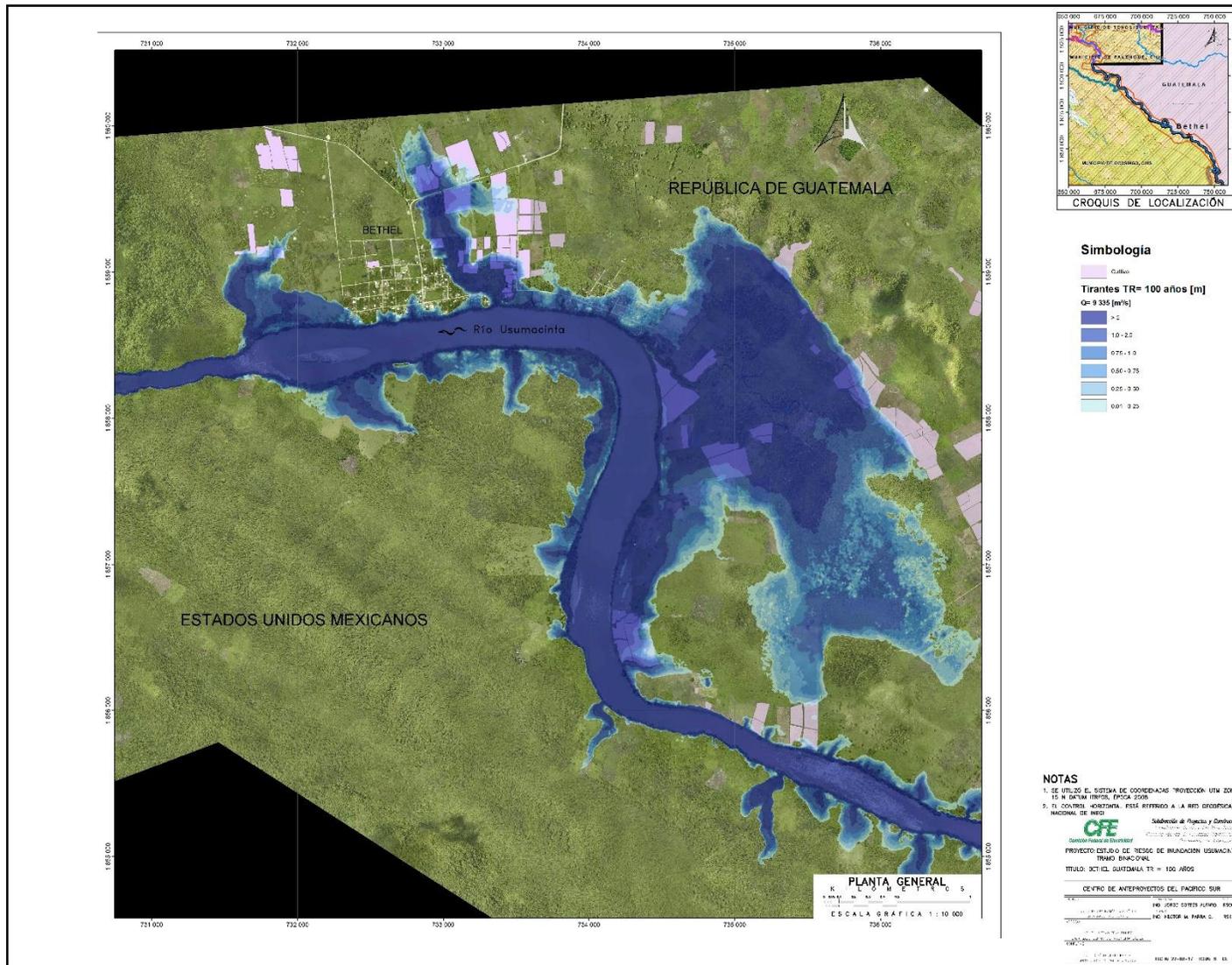


Figura 5.5 Mapa de zonas inundables Bethel, Guatemala para un periodo de retorno Tr de 100 años

6. Conclusiones

El modelo unidimensional combinado con la topografía de alta precisión proporcionó resultados satisfactorios en la recreación de la avenida de octubre de 2008.

Fueron validados 20 puntos levantados en campo mediante entrevistas a los habitantes de las poblaciones Frontera Corozal, México, Frontera Técnica y Bethel en Guatemala.

Se cuenta con un estudio validado desde el punto de vista hidrológico e hidráulico por CONAGUA a través del oficio B00.7.02.-060 y que formará parte del Atlas Nacional de Riesgo del CENAPRED y que estará disponible en línea en la página www.anr.gob.mx

En marzo de 2017 fueron entregados mapas de zonas inundables para diferentes periodos de retorno a la población Frontera Corozal, Chiapas, que serán de utilidad para las poblaciones involucradas para planear su desarrollo urbano y para mantenerse a salvo en caso de una nueva creciente del río Usumacinta.

Se obtuvieron valores de Daño Anual Esperado más probable para tres poblaciones que en conjunto albergan la vida de 9,500 personas. Los resultados obtenidos para el Daño Anual Esperado máximo, mínimo y más probable para las tres poblaciones se presentan en la Tabla 6.1.

Tabla 6.1 Resultados del Daño Anual Esperado para las tres poblaciones involucradas

Poblado	País	Habitantes	DAE máx	DAE min	DAE mp
Frontera Corozal	México	5 814	\$168 824	\$96 611	\$107 186
Frontera La Técnica	Guatemala	1 416	\$204 042	\$116 762	\$129 544
Bethel	Guatemala	2 332	\$486 852	\$278 540	\$309 045
TOTAL		9 562	\$859 718	\$491 914	\$545 775

La población de Frontera Corozal, en comparación con las dos poblaciones guatemaltecas, Frontera La Técnica y Bethel, es la que se encuentra ubicada en un terreno más seguro.

La avenida con un periodo de retorno de 10,000 años pone en riesgo a un 26% de los 5,814 habitantes (Figura 4.16). Además, a pesar de ser la población más poblada es la que presenta un menor daño anual estimado. Adicionalmente, el poblado de Frontera Corozal se encuentra completamente a salvo en avenidas con periodos de retorno menores a 10 años, los daños considerables comienzan a ser vistos a partir de la avenida con periodo de retorno de 20 años. (Figura 4.13 a Figura 4.15).

En contraste la población que se encuentra en mayor riesgo es la guatemalteca Bethel, a la cual la avenida diezmilenaria afectaría el 90% de sus 2 332 habitantes (Figura 4.34, pág. 62) Es la población a la cual se calculó el mayor valor de Daño Anual Esperado a pesar de tener menos de la mitad de la población de Frontera Corozal y existen viviendas en la población que son dañadas con periodos de retorno bajos, incluso avenidas con periodo de retorno de 2 y 5 años ya representan daños menores a la población. (Figura 4.31 a Figura 4.33).

La población guatemalteca Frontera La Técnica se encuentra en el punto medio entre las dos mencionadas, cabe destacar el alto valor obtenido de Daño Anual Esperado, tomando en cuenta de que es la población con menor número de habitantes.

Si se considera la suma de las personas afectadas por la avenida con periodo de retorno de 10,000 años de las 3 poblaciones, Frontera Corozal (1,517) Frontera La Técnica (988) y Bethel

(2,115) se obtiene un total de 4,620 personas en potencial riesgo por inundaciones fluviales, lo que es el 48% de la población combinada de las 3 poblaciones rivereñas.

Este trabajo podría ser ampliado y complementado hacía aguas arriba abarcando numerosas poblaciones tanto del lado mexicano como del guatemalteco que por cuestiones de presupuesto y tiempo se dejaron fuera. El estudio LiDAR elaborado en el tramo internacional del río Usumacinta puede y debe ser una herramienta para mejorar las condiciones de vida de los pobladores y un medio para el gobierno mexicano y guatemalteco pueda identificar a población asentada en zonas de peligro y tomar medidas de prevención y realizar planes de manejo adecuados.

7. Anexo

Tabla 7.1 Gastos máximos instantáneos registrados en las E.E.H.H. Boca del Cerro, EL Tigre, Lacantún y El Colorado

CORRIENTE	Usumacinta		Usumacinta		Río Lacantún		Río Lacantún	
AFLUENTE	Río Usumacinta		Río Usumacinta		Río Usumacinta		Río Usumacinta	
ESTACIÓN	EH Boca del Cerro		EH El Tigre		EH Lacantún		EH El Colorado	
Año	Gasto máximo (m³/s)	Fecha						
1949	4,089	03-oct-49	,	,	,	,	,	,
1950	5,163	09-oct-50	,	,	,	,	,	,
1951	3,860	11-oct-51	,	,	,	,	,	,
1952	5,589	09-oct-52	,	,	,	,	,	,
1953	5,150	06-oct-53	,	,	,	,	,	,
1954	5,252	10-jul-54	,	,	,	,	,	,
1955	5,835	04-nov-55	,	,	,	,	,	,
1956	5,442	16-oct-56	,	,	,	,	,	,
1957	4,394	01-oct-57	,	,	,	,	,	,
1958	4,270	21-jul-58	,	,	,	,	,	,
1959	3,614	24-jun-59	,	,	,	,	,	,
1960	5,249	27-sep-60	,	,	,	,	,	,
1961	4,024	03-nov-61	,	,	,	,	,	,
1962	4,576	01-nov-62	,	,	,	,	,	,
1963	5,300	18-sep-63	,	,	,	,	,	,
1964	4,133	08-oct-64	,	,	,	,	,	,
1965	6,070	08-nov-65	6,284	08-nov-65	,	,	,	,
1966	6,074	28-sep-66	6,347	26-sep-66	,	,	,	,
1967	6,600	23-oct-67	6,323	22-oct-67	,	,	,	,
1968	5,322	25-oct-68	5,754	24-oct-68	,	,	,	,
1969	6,147	13-sep-69	6,384	12-sep-69	,	,	,	,
1970	5,811	05-oct-70	5,769	13-sep-70	,	,	1,789	12-sep-70
1971	4,583	11-sep-71	4,855	12-nov-71	,	,	1,645	09-sep-71
1972	6,102	02-ago-72	6,906	3/Aug/72	,	,	2,087	28-jul-72
1973	5,909	13-oct-73	6,383	11-oct-73	,	,	2,238	31-ago-73
1974	6,270	09-oct-74	5,860	07-oct-74	4,614	05-oct-74	1,951	04-oct-74
1975	6,435	05-nov-75	7,142	03-nov-75	,	31-oct-75	2,105	31-oct-75
1976	4,874	03-jul-76	5,287	02-jul-76	3,085	01-jul-76	1,705	01-jul-76
1977	4,728	24-sep-77	4,881	23-sep-77	3,315	21-jun-77	1,597	10-ago-77
1978	6,058	11-sep-78	6,736	09-sep-78	3,484	06-sep-78	2,051	06-sep-78
1979	6,376	12-oct-79	6,670	25-sep-79	5,050	21/Aug/79	2,414	21-ago-79
1980	5,652	19-sep-80	5,889	20-sep-80	3,739	17-jun-80	1,831	16-jun-80
1981	6,670	31-ago-81	6,950	29/Aug/81	5,464	29-jun-81	2,602	29-jun-81
1982	7,279	05-oct-82	7,743	07-oct-82	5,236	23-sep-82	2,452	23-sep-82
1983	5,251	28-jul-83	6,529	02-oct-83	4,254	23-jul-83	1,710	23-jul-83
1984	5,478	08-oct-84	7,633	06-oct-84	4,444	03-oct-84	2,799	12-sep-84
1985	3,819	08-oct-85	6,305	07-oct-85	3,422	05-oct-85	1,846	25-ago-85
1986	3,566	01-oct-86	5,059	30-sep-86	3,415	28-sep-86	1,517	28-sep-86
1987	4,513	26-jul-87	6,060	25-jul-87	5,006	22-jul-87	2,057	22-jul-87
1988	5,962	06-sep-88	7,083	03-sep-88	4,162	05-oct-88	2,594	05-oct-88
1989	7,278	06-oct-89	8,141	03-oct-89	3,920	01-oct-89	1,858	01-oct-89
1990	6,798	06-dic-90	6,798	5/Dec/90	5,989	2/Dec/90	2,586	02-dic-90
1991	4,241	09-oct-91	4,782	26-sep-91	3,360	24-sep-91	1,262	24-sep-91
1992	4,753	03-oct-92	5,322	01-oct-92	2,933	30-sep-92	1,752	30-sep-92
1993	5,081	22-ago-93	5,214	20/Aug/93	4,546	02-jul-93	2,449	18-ago-93
1994	4,384	01-oct-94	,	,	2,585	28-sep-94	693	22-jul-94
1995	6,257	15-sep-95	,	,	5,000	30/Aug/95	,	,
1996	4,745	21-nov-96	,	,	4,424	29-jul-96	,	,
1997	5,045	09-oct-97	,	,	3,679	13-jul-97	,	,

CORRIENTE	Usumacinta		Usumacinta		Río Lacantún		Río Lacantún	
	Río Usumacinta		Río Usumacinta		Río Usumacinta		Río Usumacinta	
	EH Boca del Cerro		EH El Tigre		EH Lacantún		EH El Colorado	
Año	Gasto máximo (m³/s)	Fecha	Gasto máximo (m³/s)	Fecha	Gasto máximo (m³/s)	Fecha	Gasto máximo (m³/s)	Fecha
1998	5,986	08-nov-98	,	,	2,124	28-jul-98	,	,
1999	8,133	06-oct-99	,	,	3,998	19-sep-99	,	,
2000	7,435	17-oct-00	,	,	4,608	12-oct-00	,	,
2001	6,313	21-oct-01	,	,	3,400	29-sep-01	,	,
2002	5,783	06-sep-02	,	,	4,287	03-sep-02	,	,
2003	6,601	16-nov-03	,	,	3,387	19-oct-03	,	,
2004	5,390	10-oct-04	,	,	4,048	06-oct-04	,	,
2005	6,772	04-oct-05	,	,	3,503	29-sep-05	,	,
2006	5,938	12-oct-06	,	,	4,156	22-jul-06	,	,
2007	5,566	28-sep-07	,	,	2,517	25-sep-07	,	,
2008	9,153	24-oct-08	,	,	4,223	20-sep-08	,	,
2009	3,235	28-sep-09	,	,	2,534	26-sep-09	,	,
2010	8,984	01-oct-10	,	,	6,120	23-ago-10	,	,
2011	8,080	17-oct-11	,	,	4,760	06-oct-11	,	,
2012	4,072	29-jun-12	,	,	2,970	17-ago-12	,	,
2013	8,192	31-oct-13	,	,				
2014	7,040	20-oct-14						
2015	5,995	26-nov-15						

Tabla 7.2 Gastos máximos instantáneos registrados en las E.E.H.H. La Catarata, El Jabalí y San Quintín

CORRIENTE	Santo Domingo		Santo Domingo		Jataté	
	Río Lacantún		Río Santo Domingo		Río Lacantún	
	EH La Catarata		EH El Jabalí II		EH San Quintín	
Año	Gasto máximo (m³/s)	Fecha	Gasto máximo (m³/s)	Fecha	Gasto máximo (m³/s)	Fecha y hora
1964		,		,	560	06-oct-64
1965		,		,	787	16-oct-65
1966		,		,	921	29-jun-66
1967	844	19-oct-67		,	1,473	19-oct-67
1968	945	06-jun-68	720	06-jul-68	830	06-jul-68
1969	1,417	05-sep-69	1,307	05-sep-69	1,241	05-sep-69
1970	1,189	15-jul-70	1,071	14-jul-70	1,107	28-ago-70
1971	851	05-sep-71	624	05-sep-71	905	15-sep-71
1972	1,398	21-jun-72	1,181	28-jul-72	985	28-jul-72
1973	1,300	31-ago-73	1,433	31-ago-73	1,148	27-ago-73
1974	982	25-oct-74	870	25-oct-74	1,148	20-sep-74
1975	1,512	14-sep-75	1,366	30-oct-75	982	31-oct-75
1976	1,031	29-jun-76	1,141	28-jun-76	539	04-sep-76
1977	929	10-ago-77	836	10-ago-77	541	22-sep-77
1978	974	10-jul-78	1,024	10-jul-78	926	20-sep-78
1979	1,247	21-ago-79	1,104	20-ago-79	971	11-sep-79
1980	962	16-jun-80	657	16-sep-80	666	13-sep-80
1981	1,193	29-jun-81	762	25-jun-81	1,262	14-jul-81
1982	1,291	20-sep-82	905	20-sep-82	1,178	21-sep-82
1983	1,104	20-jul-83	866	20-jul-83	641	28-sep-83
1984	1,903	11-sep-84	1,462	11-sep-84	1,063	26-sep-84
1985	907	24-ago-85	828	05-oct-85	904	28-ago-85
1986	1,088	27-jun-86	978	27-jun-86	640	31-may-86
1987	1,527	22-jul-87	1,122	22-jul-87	886	08-sep-87
1988	1,047	28-sep-88	875	28-sep-88	1,485	05-oct-88
1989	1,186	01-oct-89	1,094	01-oct-89	1,008	19-sep-89
1990	1,165	02-dic-90	1,207	01-dic-90	1,557	02-dic-90
1991	968	24-sep-91	931	24-sep-91	536	23-oct-91

CORRIENTE AFLUENTE	Santo Domingo Río Lacantún		Santo Domingo Río Santo Domingo		Jataté Río Lacantún		
	EH La Catarata		EH El Jabalí II		EH San Quintín		
ESTACIÓN	Año	Gasto máximo (m³/s)	Fecha	Gasto máximo (m³/s)	Fecha	Gasto máximo (m³/s)	Fecha y hora
	1992	866	10-ago-92	717	12-jul-92	814	29-sep-92
	1993	1,815	02-jul-93	1,281	02-jul-93	898	18-ago-93
	1994	610	22-jul-94	535	22-jul-94	454	16-ago-94

Se calcularon los coeficientes de correlación entre los registros de las diferentes estaciones en sus periodos comunes para determinar cuáles presentaban una mejor correlación. Los resultados se muestran en la Tabla 7.3

Tabla 7.3 Coeficientes de correlación entre los registros de gastos máximos de las 7 estaciones hidrométricas seleccionadas

	Boca del C	El Tigre	Lacantún	El Colorado	La Catarata	El Jabalí	San Quintín
Boca del C	1.00	0.91	0.60	0.33	0.29	0.28	0.58
El Tigre	0.91	1.00	0.56	0.43	0.40	0.37	0.56
Lacantún	0.60	0.56	1.00	0.49	0.56	0.47	0.84
El Colorado	0.33	0.43	0.49	1.00	0.71	0.61	0.46
La Catarata	0.29	0.40	0.56	0.71	1.00	0.88	0.42
El Jabalí	0.28	0.37	0.47	0.61	0.88	1.00	0.42
San Quintín	0.58	0.56	0.84	0.46	0.42	0.42	1.00

Se realizó una normalización de los registros aplicando el logaritmo natural a cada uno de los registros y se realizó la misma tabla de correlación con los registros normalizados, los resultados se presentan en la Tabla 7.4

Tabla 7.4 Coeficientes de correlación entre los registros de gastos máximos normalizados de las 7 estaciones hidrométricas seleccionadas

	Boca del C	El Tigre	Lacantún	El Colorado	La Catarata	El Jabalí	San Quintín
Boca del C	1.00	0.73	0.53	0.58	0.32	0.34	0.70
El Tigre	0.73	1.00	0.56	0.70	0.43	0.37	0.62
Lacantun	0.53	0.56	1.00	0.78	0.68	0.48	0.77
El Colorado	0.58	0.70	0.78	1.00	0.74	0.59	0.80
La Catarata	0.32	0.43	0.68	0.74	1.00	0.84	0.39
El Jabalí	0.34	0.37	0.48	0.59	0.84	1.00	0.42
San Quintín	0.70	0.62	0.77	0.80	0.39	0.42	1.00

Al comparar los valores de correlación, se observa que los valores de la Tabla 7.3 son mayores que los de la Tabla 7.4, por lo que se decide hacer la extrapolación con los registros naturales de gastos máximos.

Los registros de la E.H. El Tigre fueron ampliados mediante la correlación lineal con los registros de la E.H. Boca del Cerro. En la Figura 7.1 se muestra la correlación existente entre ambas estaciones.

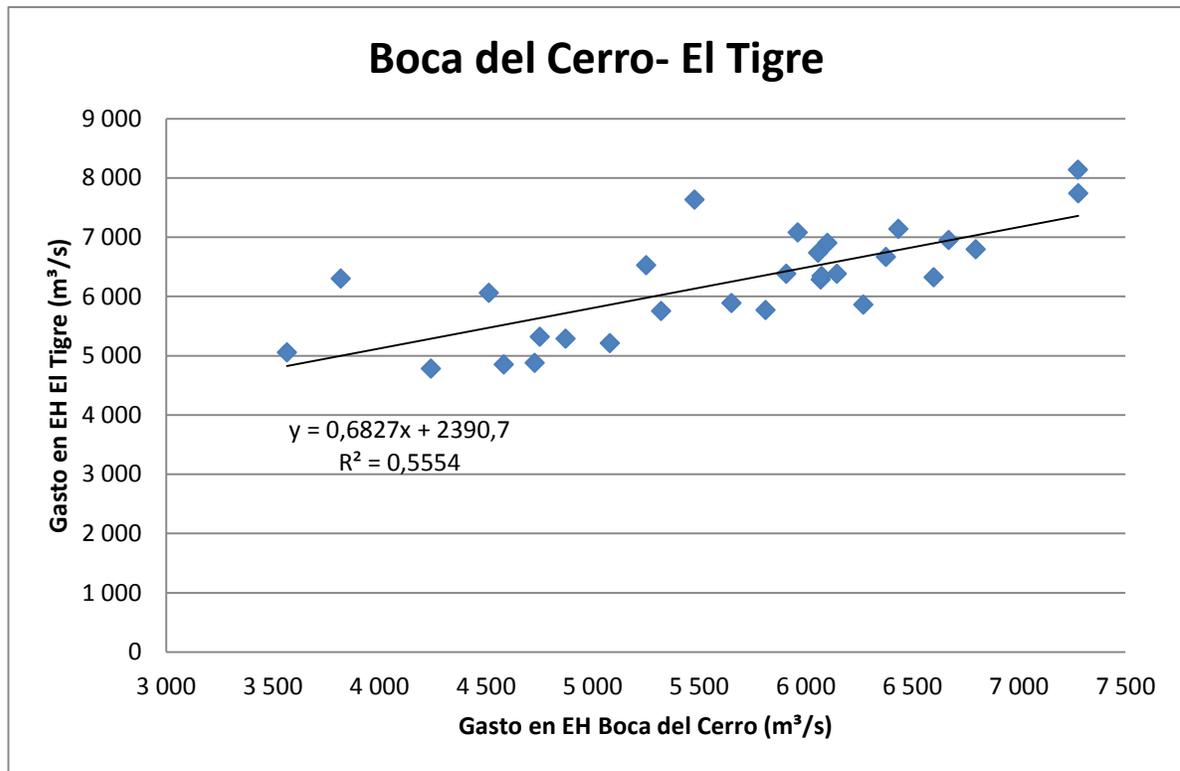


Figura 7.1 Correlación lineal entre los registros de gastos máximos la EH Boca del Cerro y la EH El Tigre

La expresión utilizada para completar los registros de la EH EL Tigre, utilizando los registros en la EH Boca del Cerro es la siguiente:

$$Q_{TIGRE} = 0.6827Q_{BC} + 2,390.7 \quad (7.1)$$

Donde

Q_{TIGRE} Es el gasto máximo estimado en la EH EL Tigre en (m³/s)

Q_{BC} Es el gasto máximo registrado en la EH Boca del Cerro en (m³/s)

En la Tabla 7.5 (Pág. 74) y en la Tabla 7.6 (Pág. 75) se muestran los registros ampliados de las 7 estaciones seleccionadas, los registros históricos se muestran en color negro y los ampliados en rojo.

Tabla 7.5 Registros ampliados de las E.E.H.H. Boca del Cerro, El Tigre, Lacantún y El Colorado

CORRIENTE	Usumacinta	Usumacinta	Río Lacantún	Río Lacantún
AFLUENTE	Río Usumacinta	Río Usumacinta	Río Usumacinta	Río Usumacinta
ESTACIÓN	EH Boca del Cerro	EH El Tigre	EH Lacantún	EH El Colorado
Año	Gasto máximo (m ³ /s)			
1949	4,089	5,182	3,348	1,660
1950	5,163	5,915	3,733	1,834
1951	3,860	5,026	3,266	1,623
1952	5,589	6,206	3,885	1,903
1953	5,150	5,907	3,728	1,832
1954	5,252	5,976	3,765	1,848
1955	5,835	6,374	3,974	1,943
1956	5,442	6,106	3,833	1,879
1957	4,394	5,390	3,457	1,709
1958	4,270	5,306	3,413	1,689
1959	3,614	4,858	3,178	1,583
1960	5,249	5,974	3,764	1,848
1961	4,024	5,138	3,325	1,650
1962	4,576	5,515	3,522	1,739
1963	5,300	6,009	3,782	1,856
1964	4,133	5,212	3,326	1,493
1965	6,070	6,284	3,836	1,794
1966	6,074	6,347	4,137	1,972
1967	6,600	6,323	5,377	2,704
1968	5,322	5,754	3,932	1,851
1969	6,147	6,384	4,855	2,396
1970	5,811	5,769	3,797	1,789
1971	4,583	4,855	3,597	1,645
1972	6,102	6,906	4,212	2,087
1973	5,909	6,383	4,421	2,238
1974	6,270	5,860	4,614	1,951
1975	6,435	7,142	4,237	2,105
1976	4,874	5,287	3,085	1,705
1977	4,728	4,881	3,315	1,597
1978	6,058	6,736	3,484	2,051
1979	6,376	6,670	5,050	2,414
1980	5,652	5,889	3,739	1,831
1981	6,670	6,950	5,464	2,602
1982	7,279	7,743	5,236	2,452
1983	5,251	6,529	4,254	1,710
1984	5,478	7,633	4,444	2,799
1985	3,819	6,305	3,422	1,846
1986	3,566	5,059	3,415	1,517
1987	4,513	6,060	5,006	2,057
1988	5,962	7,083	4,162	2,594
1989	7,278	8,141	3,920	1,858
1990	6,798	6,798	5,989	2,586
1991	4,241	4,782	3,360	1,262
1992	4,753	5,322	2,933	1,752
1993	5,081	5,214	4,546	2,449
1994	4,384	5,384	2,585	693
1995	6,257	6,662	5,000	2,406
1996	4,745	5,630	4,424	2,146
1997	5,045	5,835	3,679	1,810
1998	5,986	6,477	2,124	1,107
1999	8,133	7,943	3,998	1,954
2000	7,435	7,467	4,608	2,229
2001	6,313	6,701	3,400	1,684
2002	5,783	6,339	4,287	2,084
2003	6,601	6,897	3,387	1,678

CORRIENTE	Usumacinta	Usumacinta	Río Lacantún	Río Lacantún
AFLUENTE	Río Usumacinta	Río Usumacinta	Río Usumacinta	Río Usumacinta
ESTACIÓN	EH Boca del Cerro	EH El Tigre	EH Lacantún	EH El Colorado
Año	Gasto máximo (m ³ /s)			
2004	5,390	6,070	4,048	1,976
2005	6,772	7,014	3,503	1,730
2006	5,938	6,445	4,156	2,025
2007	5,566	6,191	2,517	1,285
2008	9,153	8,639	4,223	2,055
2009	3,235	4,599	2,534	1,293
2010	8,984	8,524	6,120	2,912
2011	8,080	7,907	4,760	2,298
2012	4,072	5,171	2,970	1,489

Tabla 7.6 Registros ampliados de las E.E.H.H. La Catarata, El Jabalí y San Quintín

CORRIENTE	Santo Domingo	Santo Domingo	Jataté
AFLUENTE	Río Lacantún	Río Santo Domingo	Río Lacantún
ESTACIÓN	EH La Catarata	EH El Jabalí II	EH San Quintín
Año	Gasto máximo (m ³ /s)	Gasto máximo (m ³ /s)	Gasto máximo (m ³ /s)
1949	1,014	891	775
1950	1,085	941	858
1951	999	880	758
1952	1,113	961	891
1953	1,084	940	857
1954	1,091	945	865
1955	1,130	972	910
1956	1,104	954	880
1957	1,034	905	799
1958	1,026	899	789
1959	983	869	739
1960	1,091	945	865
1961	1,010	888	770
1962	1,046	914	813
1963	1,094	947	869
1964	946	843	560
1965	1,069	930	787
1966	1,141	981	921
1967	844	771	1,473
1968	945	720	830
1969	1,417	1,307	1,241
1970	1,189	1,071	1,107
1971	851	624	905
1972	1,398	1,181	985
1973	1,300	1,433	1,148
1974	982	870	1,148
1975	1,512	1,366	982
1976	1,031	1,141	539
1977	929	836	541
1978	974	1,024	926
1979	1,247	1,104	971
1980	962	657	666
1981	1,193	762	1,262
1982	1,291	905	1,178
1983	1,104	866	641

CORRIENTE	Santo Domingo	Santo Domingo	Jataté
AFLUENTE	Río Lacantún	Río Santo Domingo	Río Lacantún
ESTACIÓN	EH La Catarata	EH El Jabalí II	EH San Quintín
Año	Gasto máximo (m ³ /s)	Gasto máximo (m ³ /s)	Gasto máximo (m ³ /s)
1984	1,903	1,462	1,063
1985	907	828	904
1986	1,088	978	640
1987	1,527	1,122	886
1988	1,047	875	1,485
1989	1,186	1,094	1,008
1990	1,165	1,207	1,557
1991	968	931	536
1992	866	717	814
1993	1,815	1,281	898
1994	610	535	454
1995	1,318	1,106	1,131
1996	1,212	1,031	1,007
1997	1,075	934	847
1998	789	732	512
1999	1,134	975	915
2000	1,246	1,055	1,047
2001	1,024	898	787
2002	1,187	1,013	978
2003	1,022	896	784
2004	1,143	982	926
2005	1,043	911	809
2006	1,163	996	950
2007	861	783	596
2008	1,175	1,005	964
2009	865	785	600
2010	1,524	1,251	1,373
2011	1,274	1,074	1,080
2012	945	842	694

Se ordenaron los registros y se determinaron sus periodos de retorno. Los gastos ordenados para la EH El Tigre se muestran en la Tabla 7.7 (Pág. 78)

Se ajustó a las siguientes funciones de distribución de probabilidad: Distribución Gumbel por Momentos, Máxima Verosimilitud y Máxima Entropía; Normal por Momentos; LogNormal de 2 parámetros por Momentos; LogNormal de 3 parámetros por Momentos y por Máxima Verosimilitud; Gamma de 2 parámetros por Momentos y por Máxima Verosimilitud; Gamma de 3 parámetros por Momentos y por la Función general de Valores Extremos por Momentos. Los cálculos fueron programados en hojas de Excel. Se calcularon los eventos de diseño para 2, 5, 10, 20, 50, 100, 500, 1000, 5 000 y 10 000 años. En la Tabla 7.8 (Pág. 79) se muestra un resumen de los ajustes realizados y sus Errores Estándar de ajuste (EE) En este caso el mejor ajuste es para la distribución **LogNormal de 3 parámetros por Máxima Verosimilitud**.

En la Figura 7.2 se muestra el ajuste de menor Error Estándar, mostrando en azul el ajuste a la función de distribución de probabilidad LogNormal de 3 parámetros por Máxima Verosimilitud y en rojo los registros medidos.

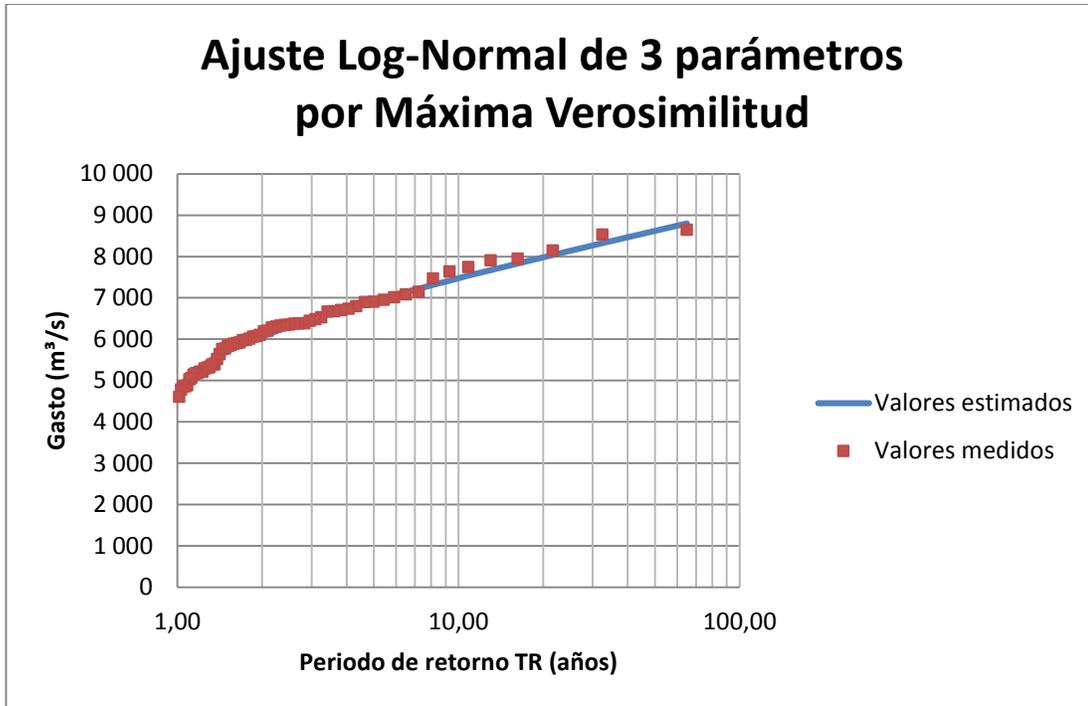


Figura 7.2 Ajuste LogNormal de 3 parámetros por Máxima Verosimilitud, EH EL Tigre

Tabla 7.7 Valores de gastos ordenados, periodo de retorno y probabilidad de no excedencia para los registros de la EH El Tigre

Orden (m)	Año	Gasto (m ³ /s)	Tr (años)	P=(1-1/T)	Orden (m)	Año	Gasto (m ³ /s)	Tr (años)	P=(1-1/T)
1	2008	8,640	65.00	0.985	33	1956	6,106	1.97	0.492
2	2010	8,524	32.50	0.969	34	2004	6,071	1.91	0.477
3	1989	8,141	21.67	0.954	35	1987	6,060	1.86	0.462
4	1999	7,943	16.25	0.938	36	1963	6,009	1.81	0.446
5	2011	7,907	13.00	0.923	37	1954	5,976	1.76	0.431
6	1982	7,743	10.83	0.908	38	1960	5,974	1.71	0.415
7	1984	7,633	9.29	0.892	39	1950	5,916	1.67	0.400
8	2000	7,467	8.13	0.877	40	1953	5,907	1.63	0.385
9	1975	7,142	7.22	0.862	41	1980	5,889	1.59	0.369
10	1988	7,083	6.50	0.846	42	1974	5,860	1.55	0.354
11	2005	7,014	5.91	0.831	43	1997	5,835	1.51	0.338
12	1981	6,950	5.42	0.815	44	1970	5,769	1.48	0.323
13	1972	6,906	5.00	0.800	45	1968	5,754	1.44	0.308
14	2003	6,897	4.64	0.785	46	1996	5,630	1.41	0.292
15	1990	6,798	4.33	0.769	47	1962	5,515	1.38	0.277
16	1978	6,736	4.06	0.754	48	1957	5,391	1.35	0.262
17	2001	6,701	3.82	0.738	49	1994	5,384	1.33	0.246
18	1979	6,670	3.61	0.723	50	1992	5,322	1.30	0.231
19	1995	6,662	3.42	0.708	51	1958	5,306	1.27	0.215
20	1983	6,529	3.25	0.692	52	1976	5,287	1.25	0.200
21	1998	6,477	3.10	0.677	53	1993	5,214	1.23	0.185
22	2006	6,445	2.95	0.662	54	1964	5,212	1.20	0.169
23	1969	6,384	2.83	0.646	55	1949	5,182	1.18	0.154
24	1973	6,383	2.71	0.631	56	2012	5,171	1.16	0.138
25	1955	6,374	2.60	0.615	57	1961	5,138	1.14	0.123
26	1966	6,347	2.50	0.600	58	1986	5,059	1.12	0.108
27	2002	6,339	2.41	0.585	59	1951	5,026	1.10	0.092
28	1967	6,323	2.32	0.569	60	1977	4,881	1.08	0.077
29	1985	6,305	2.24	0.554	61	1959	4,858	1.07	0.062
30	1965	6,284	2.17	0.538	62	1971	4,855	1.05	0.046
31	1952	6,206	2.10	0.523	63	1991	4,782	1.03	0.031
32	2007	6,191	2.03	0.508	64	2009	4,599	1.02	0.015

Tabla 7.8 Resumen de los ajustes a las funciones de distribución de probabilidad para la EH EL Tigre registros ampliados

T (años)	Gumbel			Normal	LogNormal (2 parámetros)	LogNormal (3 parámetros)	Gamma (2 parámetros)		Gama (3 parámetros)	Distribución general de valores extremos	
	Momentos	Máxima Verosimilitud	Máxima Entropía	Momentos	Momentos	Momentos	Máxima Verosimilitud	Momentos	Máxima Verosimilitud	Momentos	Momentos
2	6,049	6,049	6,041	6,204	6,136	6,116	6,069	6,157	6,159	6,113	6,902
5	6,883	6,935	6,918	6,998	6,957	6,954	6,930	6,981	6,963	6,959	7,754
10	7,436	7,521	7,498	7,414	7,429	7,449	7,475	7,440	7,410	7,456	8,268
20	7,965	8,084	8,054	7,757	7,843	7,891	7,982	7,834	7,794	7,896	8,728
50	8,651	8,813	8,774	8,143	8,336	8,425	8,622	8,294	8,241	8,425	9,277
100	9,165	9,359	9,314	8,400	8,682	8,805	9,094	8,610	8,548	8,798	9,657
500	10,352	10,620	10,561	8,921	9,427	9,638	10,175	9,274	9,193	9,604	10,444
1,000	10,862	11,162	11,098	9,121	9,730	9,982	10,641	9,538	9,450	9,932	10,746
5,000	12,047	12,421	12,342	9,545	10,405	10,759	11,730	10,114	10,009	10,664	11,373
10,000	12,557	12,963	12,878	9,714	10,687	11,087	12,206	10,350	10,237	10,969	11,615
EE	123.26	104.65	107.27	171.67	121.38	108.67	101.30	130.46	139.08	105.93	812.77

EE

min= 101,30

Mejor

Ajuste: LogNormal de 3 parámetros por Máxima Verosimilitud

Tabla 7.9 Resumen de los ajustes a las funciones de distribución de probabilidad para la EH EL Tigre registros históricos

T (años)	Gumbel			Normal	LogNormal (2 parámetros)	LogNormal (3 parámetros)		Gamma (2 parámetros)		Gama (3 parámetros)	Distribución general de valores extremos
	Momentos	Máxima Verosimilitud	Máxima Entropía	Momentos	Momentos	Momentos	Máxima Verosimilitud	Momentos	Máxima Verosimilitud	Momentos	Momentos
2	6,099	6,105	6,082	6,244	6,183	6,227	6,171	6,203	6,204	6,146	6,878
5	6,883	7,008	6,954	6,991	6,977	6,985	6,961	6,976	6,966	7,999	7,666
10	7,401	7,606	7,532	7,381	7,432	7,391	7,422	7,404	7,389	9,026	8,080
20	7,899	8,179	8,086	7,704	7,830	7,732	7,829	7,771	7,751	9,905	8,413
50	8,544	8,921	8,802	8,066	8,304	8,121	8,318	8,199	8,172	10,927	8,766
100	9,026	9,477	9,340	8,308	8,635	8,384	8,663	8,492	8,461	11,628	8,984
500	10,142	10,763	10,581	8,797	9,347	8,925	9,412	9,107	9,066	13,097	9,366
1,000	10,622	11,315	11,115	8,985	9,636	9,136	9,719	9,351	9,306	13,680	9,489
5,000	11,735	12,597	12,353	9,384	10,279	9,588	10,407	9,883	9,830	14,949	9,708
10,000	12,214	13,150	12,887	9,543	10,546	9,771	10,696	10,100	10,043	15,467	9,779
EE	200.31	178.21	178.87	139.60	135.74	139.30	146.49	136.91	142.55	1090.85	693.63

EE
min= 101,30

Mejor
Ajuste: LogNormal de 3 parámetros por Máxima Verosimilitud

Finalmente en la Tabla 7.10 se muestran los límites de confianza de la distribución.

Tabla 7.10 Límites de confianza al 95% para la distribución LogNormal de 3 parámetros por Máxima Verosimilitud en la EH El Tigre

T (años)	$Q_{\text{TINFERIOR}}$ (m ³ /s)	Q_{T} (m ³ /s)	$Q_{\text{TSUPERIOR}}$ (m ³ /s)
2	5,831.77	6,068.77	6,305.78
5	6,599.91	6,930.24	7,260.57
10	7,026.65	7,474.91	7,923.18
20	7,375.82	7,981.75	8,587.68
50	7,757.74	8,621.76	9,485.79
100	8,002.80	9,093.85	10,184.89
500	8,464.97	10,175.25	11,885.54
1 000	8,626.50	10,640.51	12,654.53
5 000	8,928.57	11,730.45	14,532.32
10 000	9,029.88	12,206.29	15,382.71

8. Bibliografía

- ArcGISV10.4®. (s.f.). Environmental Systems Research Institute (ESRI). Redlands, California, EUA. Recuperado el 15 de agosto de 2016, de <http://www.esri.com/about-esri>
- Baró Suárez, J. E., Díaz Delgado, C., Calderón Aragón, G., Esteller Alberich, M. V., & Cadena Vargas, E. (2011). Costo más probable de daños por inundación en zonas habitacionales de México. *Tecnología y Ciencias del Agua, antes Ingeniería hidráulica en México*, vol. II, núm. 3, julio-septiembre, pp 201-218.
- Bladé, E., Cea, L., Corestein, G., Escolano, E., Puertas, J., Vázquez-Cendón, M., . . . Coll, A. (2014). Iber: herramienta de simulación numérica del flujo en ríos. *Revista Internacional de Métodos Numéricos para Cálculo y Diseño en Ingeniería*, 30, 1-10. Obtenido de <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0213131512000454>
- COLEF. (agosto de 2017). *Colegio de la Frontera Norte*. Recuperado el 18 de octubre de 2017, de Encuestas sobre Migración en las Fronteras Norte y Sur de México: [https://www.colef.mx/emif/metodologia/catalogos/emifsur/2014/CATALOGO%20DE%20DEPARTAMENTOS%20MUNICIPIOS%20Y%20LUGARES%20POBLADOS%20DE%20GUATEMALA%20%20\(CENSO%202002\).pdf](https://www.colef.mx/emif/metodologia/catalogos/emifsur/2014/CATALOGO%20DE%20DEPARTAMENTOS%20MUNICIPIOS%20Y%20LUGARES%20POBLADOS%20DE%20GUATEMALA%20%20(CENSO%202002).pdf)
- CONAGUA. (agosto de 2012). *Atlas del agua en México*. Ciudad de México: Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales. Obtenido de <https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/260109/AAM2012.pdf>
- CONAGUA. (2013). *Lineamientos para la elaboración de mapas de peligro por inundación*. Ciudad de México: Gerencia de Aguas Superficiales e Ingeniería de Ríos.
- CONAPO. (2010). *Índice de Marginación Urbana*. Recuperado el 14 de septiembre de 2017, de http://www.conapo.gob.mx/en/CONAPO/Indice_de_marginacion_urbana_2010
- García, J. E. (2010). Marco internacional y discusión de los conceptos. *Lecciones Aprendidas de la Gestión del Riesgo en Procesos de Planificación e Inversión para el Desarrollo* (pág. 141). Perú: Taller Internacional.
- GEAMA, Universidad de A Coruña, UDC, & Universitat Politècnica de Catalunya. (s.f.). IBER® Software. España. Obtenido de <http://iberaula.es/aula-iber/presentacion>
- GEIC. (1990). *Estudio del Efecto de Remanso y Sedimentos para el PH Boca del Cerro*. Comisión Federal de Electricidad.
- HEC-RASV5.0®. (s.f.). Hydrologic Engineering Center, US Army Corps of Engineers, River Analysis System, Institute for Water Resources. *Software*. Davis, California, EUA. Recuperado el 20 de Agosto de 2016, de <http://www.hec.usace.army.mil/software/hec-ras/>
- INEGI. (2010). *Censo de población y vivienda*. Recuperado el 14 de septiembre de 2017, de Principales Resultados por Localidad (ITER): <http://www3.inegi.org.mx/sistemas/ageburbana/>

- INEGI. (2014). *cartografía geoestadística urbana*. Recuperado el 10 de septiembre de 2017, de http://buscador.inegi.org.mx/search?q=cartograf%C3%ADa+geoestad%C3%ADstica+urbana+2014&spell=1&client=ProductosR&proxystylesheet=ProductosR&num=10&getfields=*&sort=meta:edicion:D:E::D&entsp=a__inegi_politica_p72&lr=lang_es%7Clang_en&oe=UTF-8&ie=UTF-8&ip=
- INEGI. (2016). *Principales resultados de la Encuesta Intercensal 2015 Chiapas*. Recuperado el 16 de septiembre de 2017, de Instituto Nacional de Estadística y Geografía: http://internet.contenidos.inegi.org.mx/contenidos/Productos/prod_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/nueva_estruc/inter_censal/estados2015/702825079727.pdf
- NASA. (17 de octubre de 2011). Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer. (ASTER). (J. P. Laboratory, Ed.) Recuperado el 15 de agosto de 2016, de <https://asterweb.jpl.nasa.gov/gdem.asp>
- Ordaz, M., Torres, M. A., & Domínguez, R. (2013). *Vulnerabilidad y Riesgo por Inundaciones*. Ciudad de México: Instituto de Ingeniería UNAM.
- Paoli, C. U. (2015). *Gestión Integrada de Crecidas, Guía y Casos de Estudio*. Luxemburgo: European Commission.
- SAP. (2015). *Levantamiento Topográfico mediante Láser Aerotrasportado (LiDAR) para los proyectos hidroeléctricos binacionales en el río Usumacinta*. Para Comisión Federal de Electricidad.
- SAT. (19 de Diciembre de 2016). *Servicio de Administración Tributaria*. Recuperado el 15 de septiembre de 2017, de Secretaría de Hacienda y Crédito Público: http://www.sat.gob.mx/informacion_fiscal/tablas_indicadores/paginas/salarios_minimos.aspx
- Solís Alvarado, Y., Lefragua Contreras, J., & García Hernández, J. (8 de diciembre de 2015). *Estimación de daños económicos en zonas urbanas inundables con base en el Área Geoestadística Básica para obtención del Daño Anual Esperado*. Obtenido de Atl, El Portal del agua desde México, El Agua en la sociedad del conocimiento: http://www.atl.org.mx/index.php?option=com_content&view=article&id=8559:estimacion-de-danos-economicos-en-zonas-urbanas-inundables-con-base-en-el-area-geoestadistica-basica-para-obtencion-del-dano-anual-esperado-&catid=171:proyectos-imta&Itemid=863
- Tejeda Cruz, C. (2004). *Apropiación Territorial y Aprovechamiento de Recursos Forestales en la Comunidad Frontera Corozal, Selva Lacandona, Chiapas, México*. Obtenido de Digital Library of the Commons Universidad de Indiana: http://dlc.dlib.indiana.edu/dlc/bitstream/handle/10535/1695/TejedaCruz_Apropiacion_040525_Paper167a.pdf?sequence=1