



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

Evaluación del riesgo por inundación en la ciudad de Jojutla, Morelos

TESIS

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:
MAESTRO EN INGENIERÍA

PRESENTA:

Mariana Monserrat Zuñiga Pineda

TUTOR PRINCIPAL

DR. JESÚS GRACIA SÁNCHEZ (INSTITUTO DE INGENIERÍA)

COMITÉ TUTOR

DR. OSCAR ARTURO FUENTES MARILES (INSTITUTO DE INGENIERÍA)

DR. RAMÓN DOMÍNGUEZ MORA (INSTITUTO DE INGENIERÍA)

M.I. VÍCTOR FRANCO (INSTITUTO DE INGENIERÍA)

DR. ÓSCAR POZOS ESTRADA (INSTITUTO DE INGENIERÍA)

Ciudad Universitaria, CD. MX., mayo 2022



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

JURADO ASIGNADO:

Presidente: DR. OSCAR ARTURO FUENTES MARILES

Secretario: DR. RAMÓN DOMÍNGUEZ MORA

1er. Vocal: DR. JESÚS GRACIA SÁNCHEZ

2do. Vocal: M.I. VICTOR FRANCO

3er. Vocal: DR. ÓSCAR POZOS ESTRADA

Lugar donde se realizó la tesis: FACULTAD DE INGENIERÍA

TUTOR DE TESIS:

DR. JESÚS GRACIA SÁNCHEZ

FIRMA

Agradecimientos

A mamá y papá, por su ejemplo de superación y valentía, así como la motivación, el apoyo, la comprensión y el cariño que me han brindado a lo largo de la vida.

A mis hermanas y hermano, por su amor y compañía en las metas planteadas.

Al Dr. Gracia, por la orientación, paciencia y el apoyo brindado durante la realización de la tesis y el proceso de titulación.

A los miembros del Comité Tutor, por su profesionalismo, retroalimentación y apoyo brindado para la culminación de la tesis.

A mis amigos, Gisel, Javier, Oscar, Guadarrama y Daniel, por las experiencias vividas, las risas que nunca faltaron, el apoyo y la compañía.

A la Universidad Nacional Autónoma de México, por brindar las bases para la formación de profesionistas de alta calidad.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por el apoyo brindado.

Índice General

Agradecimientos.....	iii
Índice General.....	iv
Índice de Tablas.....	vi
Índice de Figuras	vii
1 INTRODUCCIÓN	1
1.1 Definición de inundación.....	3
1.1.1 Riesgo por Inundación.....	4
1.2 Estado del Arte.....	7
1.3 Justificación	9
1.4 Objetivos.....	9
1.4.1 Objetivo general	9
1.4.2 Objetivos complementarios	9
1.5 Estructura de la tesis	10
2 DESCRIPCIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO	11
2.1 Ubicación	11
2.2 Fisiografía y Geología.....	11
2.3 Edafología y Uso de suelo y Vegetación	12
2.4 Hidrografía.....	14
2.5 Clima.....	15
2.6 Población y Economía	15
3 ESTUDIO HIDROLÓGICO	17
3.1 Subcuencas de Análisis.....	17
3.1.1 Características morfométricas	19
3.2 Análisis Hidrométrico.....	21
3.2.1 Análisis de frecuencia.....	22
3.2.2 Mayoración de hidrogramas	24

3.2.3	Transporte de información hidrométrica	25
3.3	Precipitación en 24 h asociada a distintos periodos de retorno	27
3.3.1	Precipitación máxima en 24h	27
	Análisis regional CENAPRED	28
	Análisis regional Jojutla	30
	Comparativa del análisis regional	37
	Factor de reducción por área	37
3.3.2	Relación $hp-d-Tr$	39
3.3.3	Precipitación efectiva	42
4	MODELACIÓN HIDRÁULICA	44
4.1	Preproceso de Simulación.....	49
4.1.1	Dominio y geometría.....	49
4.1.2	Malla y elevación.....	50
4.1.3	Condiciones de contorno e iniciales	51
4.1.4	Procesos hidrológicos	52
4.1.5	Rugosidad	53
4.2	Datos del Problema.....	54
4.3	Mapas de Tirantes y Velocidades Máximas	54
5	SEVERIDAD MÁXIMA	63
5.1	Mapas de Severidad Máxima.....	65
6	DAÑO ECONOMICO POR INUNDACIÓN	71
6.1	Daño Económico a Viviendas.....	72
6.1.1	Daño económico potencial en las viviendas de Jojutla	73
6.2	Daño Anual Esperado	80
7	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	82
	REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS	85

Índice de Tablas

Tabla 3-1 Características morfométricas de las subcuencas de estudio.....	21
Tabla 3-2 Error estándar de ajuste para las distintas distribuciones de la estación 18264.....	23
Tabla 3-3 Gastos máximos asociados a distintos periodos de retorno para la estación 18264.....	23
Tabla 3-4 Factor por periodo de retorno para la región homogénea de Morelos.....	29
Tabla 3-5 3-6 Precipitación en 24 h asociada a distintos Tr.....	29
Tabla 3-7 Estaciones climatológicas.....	30
Tabla 3-8 Precipitación máxima anual.....	31
Tabla 3-9 Estadísticos estaciones climatológicas.....	32
Tabla 3-10 Datos modulados.....	33
Tabla 3-11 Estadísticos por estación de los datos modulados.....	34
Tabla 3-12 Error Estándar de Ajuste.....	35
Tabla 3-13 Factores de regionalización para la ciudad de Jojutla.....	35
Tabla 3-14 Precipitación media.....	36
Tabla 3-15 Precipitación en 24 h asociada a distintos Tr para la ciudad de Jojutla.....	36
Tabla 3-16 Comparativa precipitaciones máximas anuales en 24 h.....	37
Tabla 3-17 Precipitación máxima en 24h asociada a distintos Tr para la SC – 03.....	38
Tabla 3-18 Precipitación efectiva y coeficiente de escurrimiento para la SC – 03.....	43
Tabla 4-1 Coeficientes de rugosidad de Manning del modelo.....	53
Tabla 6-1 Ecuaciones de las curvas de daños potenciales directos en zonas habitacionales.....	76
Tabla 6-2 Daño estimado por AGEB en Jojutla para un Tr = 10 años.....	76
Tabla 6-3 Daño estimado por AGEB en Jojutla para un Tr = 20 años.....	77
Tabla 6-4 Daño estimado por AGEB en Jojutla para un Tr = 50 años.....	77
Tabla 6-5 Daño estimado por AGEB en Jojutla para un Tr = 100 años.....	77

Índice de Figuras

Figura 2-1 Zona de estudio.....	11
Figura 2-2 Sistema de topoformas	12
Figura 2-3 Periodos geológicos.....	12
Figura 2-4 Edafología.....	13
Figura 2-5 Uso del suelo y vegetación	13
Figura 2-6 Red hidrográfica, Esc. 1:50,000	14
Figura 2-7 Rangos de precipitación media anual	15
Figura 3-1 Puntos de interés sobre el río Apatlaco	18
Figura 3-2 Delimitación de las subcuencas de análisis	18
Figura 3-3 Correlograma de la estación 18264 (1956 – 1986)	22
Figura 3-4 Ajuste para la función Doble Gumbel a los gastos máximos de la estación 18264	23
Figura 3-5 Hidrograma adimensional obtenido por mayoración en la estación 18264	25
Figura 3-6 Avenidas de diseño para la cuenca de aportación de la ciudad de Jojutla	26
Figura 3-7 Isoyetas de la media de la precipitación máxima anual en la SC-03.....	29
Figura 3-8 Distribución espacial de las estaciones climatológicas	30
Figura 3-9 Isoyetas de la media de la precipitación máxima anual de la zona de estudio.....	36
Figura 3-10 Zonas que cuentan con determinación del Factor de Reducción por Área	38
Figura 3-11 Factor de convectividad para la SC – 03 Fuente: Baeza (2007).....	40
Figura 3-12 Factor K para un R=0.65 (Lozoya et al., 2017).....	41
Figura 3-13 Relación hp-d-Tr para la SC – 03.....	41
Figura 3-14 Hietogramas de intensidades para la SC – 03	42
Figura 4-1 Dominio y geometría del modelo	49
Figura 4-2 Tamaños de malla asignados al modelo	50
Figura 4-3 Esquema de la malla y la elevación del modelo.....	51
Figura 4-4 Procesos hidrológicos ingresados al modelo.....	52
Figura 4-5 Esquema de la rugosidad asignada al modelo	53
Figura 4-6 Tirantes máximos asociados un Tr = 10 años para la ciudad de Jojutla.....	55
Figura 4-7 Velocidades máximas asociadas a Tr = 10 años para la ciudad de Jojutla.....	56
Figura 4-8 Tirantes máximos asociados un Tr = 20 años para la ciudad de Jojutla.....	57

Figura 4-9 Velocidades máximas asociadas a un $Tr = 20$ años para la ciudad de Jojutla.....	58
Figura 4-10 Tirantes máximos asociados un $Tr = 50$ años para la ciudad de Jojutla.....	59
Figura 4-11 Velocidades máximas asociadas a un $Tr = 50$ años para la ciudad de Jojutla.....	60
Figura 4-12 Tirantes máximos asociados un $Tr = 100$ años para la ciudad de Jojutla.....	61
Figura 4-13 Velocidades máximas asociadas a un $Tr = 100$ años para la ciudad de Jojutla.....	62
Figura 5-1 Diagrama de Dorrigo adoptado en México	64
Figura 5-2 Severidad máxima asociada a un $Tr = 10$ años para la ciudad de Jojutla	67
Figura 5-3 Severidad máxima asociada a un $Tr = 20$ años para la ciudad de Jojutla	68
Figura 5-4 Severidad máxima asociada a un $Tr = 50$ años para la ciudad de Jojutla	69
Figura 5-5 Severidad máxima asociada a un $Tr = 100$ años para la ciudad de Jojutla	70
Figura 6-1 Grado de marginación por manzanas en Jojutla.....	75
Figura 6-2 Costo máximo más probable por manzana para distintos Tr en Jojutla	79
Figura 6-3 Curva de los daños estimados contra su probabilidad de excedencia	80
Figura 6-4 Daño anual esperado por manzanas en Jojutla	81

1 INTRODUCCIÓN

Entre los distintos fenómenos naturales potencialmente dañinos se encuentran los hidrometeorológicos, los cuales pueden provocar desde daños materiales significativos hasta pérdidas humanas. Dentro los principales que afectan a México se encuentran las lluvias fuertes, granizadas, nevadas, heladas y sequías (CENAPRED, 2014).

Diferentes autores (Strahaler, 1982; SEDATU, 2014) definen a los fenómenos hidrometeorológicos como aquellos eventos atmosféricos que, por su elevado potencial energético, frecuencia, intensidad y aleatoriedad representan una amenaza para el ser humano y el medio ambiente.

Debido a la ubicación entre los paralelos 16° y 32° latitud norte, la República Mexicana está sujeta a embates de ciclones tropicales en el océano Pacífico y en el Atlántico; principalmente durante la temporada que inicia en la primera quincena de mayo en el Pacífico, y el mes de junio en el Atlántico, terminando en ambos a principio de noviembre; y cuya mayor actividad se presenta durante el mes de septiembre (CENAPRED, 2014). Las fuertes precipitaciones que estos eventos provocan algunas veces inundaciones con consecuencias graves.

De acuerdo con cifras de Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED, 2016) el 86.6% del monto de daños y pérdidas económicas por eventos naturales durante el año 2016 correspondió a los fenómenos hidrometeorológicos; de los cuales 70.5% asociados a inundaciones. Se registraron 135 defunciones, más de 5 millones de personas afectadas, más de 111 000 damnificados, así como daños en 23 155 viviendas (aumento del 69.9% con respecto al 2015), 108 escuelas, 2 unidades de salud, 586 unidades económicas y más de 7 mil hectáreas, lo cual implicó un total de daños de 11 947.9 millones de pesos.

A nivel mundial las inundaciones son posiblemente la causa número uno de pérdidas económicas derivadas de fenómenos naturales y son consideradas el peligro natural más común del mundo (Wang et al., 2011; Vázquez y Palazuelos, 2017). Tal es así, que la Cruz Roja Internacional ha colaborado en 499 eventos de inundaciones y ciclones en el periodo de 1919-2004 (CENAPRED, 2014).

RIESGO POR INUNDACIÓN EN JOJUTLA

De acuerdo con la Organización Meteorológica Mundial (OMM), el crecimiento demográfico y económico ejercen presión sobre los recursos naturales; tal es el caso de las llanuras inundables, las cuales ofrecen óptimas oportunidades para las actividades económicas (agricultura y ganadería), principalmente en países en desarrollo, para quienes la seguridad alimentaria es sinónimo de subsistencia; así como las construcciones e infraestructura asentadas dentro o cerca de ellas que intensifican el riesgo de inundaciones.

Aunado a lo anterior, casi todos los años las planicies de los ríos caudalosos presentan inundaciones derivadas de sus desbordamientos, siendo la causa principal la pérdida de capacidad hidráulica, una vez que dejan la zona de montañas y se adentran en las planicies (Salas y Jiménez, 2019). En contraste, las zonas semidesérticas presentan inundaciones menos frecuentes, sin embargo, cuando estas se presentan causan graves problemas (OMM, 2013). Sin olvidar que, obras hidráulicas como las presas son una fuente de riesgo, ya sea por ruptura o el desfogue en un lapso corto de tiempo, por lo que también es necesario considerar la posibilidad de que se presenten desbordamientos (Ordaz et al., 2013).

Según la plataforma Aqueduct Floods Hazard Maps (2020), los 15 países con más población expuesta al riesgo de inundaciones fluviales son los menos desarrollados o los más poblados, por ejemplo, India (4.84 millones anuales), Bangladesh (3.48), China (3.28), Vietnam (0.93), Pakistán (0.71), Indonesia (0.64), Egipto (0.46), Myanmar (0.39), Afganistán (0.33), Nigeria (0.29), Brasil (0.27), Tailandia (0.25), Congo (0.24), Iraq y Camboya (0.19) respectivamente.

En lo que respecta a nuestro país, aproximadamente 162 000 km² del territorio nacional son propensos a inundarse con un periodo de retorno de 40 años (OMM, 2013). Cifras del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) muestran que cerca de 41% del territorio nacional y 31 millones de personas están expuestas a fenómenos hidrometeorológicos (Cervantes et al., 2012). Al interior de la República Mexicana, los estados más propensos a inundaciones son Nuevo León, Chihuahua y Coahuila debido a las lluvias intensas que provocan daños en las localidades asentadas en cauces secos (CENAPRED, 2016b).

RIESGO POR INUNDACIÓN EN JOJUTLA

1.1 Definición de inundación

El evento no permanente que, debido a la precipitación, oleaje, marea de tormenta, mala operación de una obra hidráulica o falla ella provoca un incremento en el nivel de la superficie libre del agua de los ríos o el mar mismo, generando invasión o penetración de agua en sitios donde usualmente no la hay y cuya consecuencia se presenta como daños en la población, agricultura, ganadería e infraestructura, se define como inundación (Salas y Jiménez, 2019).

El Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC, 2012) define como inundación al “rebase de los límites normales de confinamiento de una corriente u otro cuerpo de agua, o la acumulación de la misma sobre áreas que por lo general no están sumergidas”.

Otros autores (SEDATU, 2017) definen como inundación, al flujo o invasión de agua debida al exceso de escurrimientos superficiales y a su acumulación en terrenos planos, debida a la falta o insuficiencia de drenaje natural o artificial.

La magnitud de una inundación debida a eventos de origen hidrometeorológico es función de, la intensidad de lluvia, su distribución en el espacio y tiempo, el tamaño de las cuencas, las características del suelo y del drenaje natural y artificial de las cuencas (Bremer y Lara, 2001). Además, de factores antropogénicos como son el cambio de uso de suelo, la ocupación de las planicies de inundación y la disminución del área hidráulica (OMM, 2013).

Las clasificación de las inundaciones de acuerdo con su origen pueden ser: Pluviales, consecuencia de la precipitación, se presentan cuando el terreno se encuentra saturado y el agua de lluvia comienza a acumularse, de tipo local; Fluviales, suceden cuando el agua desbordada de los ríos y arroyos queda sobre el terreno, el agua corresponde a precipitaciones registradas en cualquier parte de la cuenca tributaria y no necesariamente a lluvia sobre la zona afectada; Costeras, producidas por el agua marina que penetra al continente por la marea alta, vientos de ciclones tropicales y oleaje. También ocurren inundaciones por una incorrecta descarga de una obra hidráulica o por falla de infraestructura hidráulica (debido a la falta de mantenimiento, término de vida útil o deficiencia en la operación).

Las inundaciones también pueden clasificarse de acuerdo al tiempo de respuesta de la cuenca como inundaciones lentas, con duración de horas o días; y las súbitas, desde unos cuantos minutos a un par de horas (Salas y Jiménez, 2019).

RIESGO POR INUNDACIÓN EN JOJUTLA

Del análisis de varios casos de inundación se ha concluido que, las inundaciones fluviales se relacionan con lluvias intensas de larga duración en cuencas grandes, mientras que, en cuencas pequeñas, lluvias intensas de corta duración pueden causar inundaciones pluviales (Arreguín-Cortés et al., 2016).

1.1.1 Riesgo por Inundación

De acuerdo con la OMM (2013) el riesgo consiste en la posibilidad o probabilidad de que ocurra un suceso y las consecuencias o efectos asociados al mismo. Sin embargo, no todos los eventos de lluvia intensa, extremos o no, constituyen riesgos.

Para fines de Protección Civil, y de acuerdo con la Organización de las Naciones Unidas se define al riesgo como, el grado de pérdida previsto en un sistema debido a un fenómeno natural definido y en función tanto del peligro como de la vulnerabilidad y será mayor en la medida que esta también lo sea (CENAPRED, 2006b).

Según el CENAPRED (2014), la OMM (2013) y Aragón Hernández et al. (2017) los componentes que integran el riesgo (R) son:

$$R = PEV$$

Donde:

P: peligro, relacionado con la probabilidad de ocurrencia de una amenaza de cierta intensidad

E: exposición, fracción comprendida de 0 a 1.

V: vulnerabilidad, susceptibilidad de que el bien expuesto sea dañado en presencia de una amenaza de cierta intensidad. Se mide como la proporción del costo total de los daños a dichos bienes cuando se presenta la amenaza.

La fórmula el riesgo se expresa como:

$$R = \int_0^1 e v dp$$

que corresponde al valor esperado o esperanza matemática del costo de daños ocasionados.

RIESGO POR INUNDACIÓN EN JOJUTLA

El peligro es la probabilidad de ocurrencia de un fenómeno perturbador de cierta magnitud en un determinado periodo de tiempo y un sitio dado.

De acuerdo a la OMM (2009) la vulnerabilidad es la predisposición de los sistemas expuestos a ser afectados; en función de la aptitud de una sociedad para utilizar los bienes a su disposición para hacer frente a los problemas ocasionados por un fenómeno perturbador. La vulnerabilidad es controlable y puede ser medida (CENAPRED, 2017).

Las condiciones que definen la vulnerabilidad se clasifican como físicas/materiales, integradas por infraestructuras débiles y ocupación de área expuesta a riesgo; constitutivas/organizativas, como la falta de estructuras organizativas, deficiencia de recursos de las instituciones nacionales y locales, formación educativa inapropiada, redes de apoyo social deficientes o inexistentes; y las vinculadas a la motivación, desconocimiento de cuestiones sobre desarrollo, derechos y obligaciones, y la fuerte dependencia del apoyo externo. Además de factores sociales como pobreza, oportunidades de subsistencia, creencias culturales, derechos humanos y las necesidades especiales de los grupos sociales más débiles (OMM, 2013).

Por otra parte, la exposición o sistema expuesto se refiere a la cantidad de personas, bienes, valores, infraestructura y sistemas susceptibles a ser dañados o perdidos. El grado de exposición depende del tamaño del sistema expuesto al desastre, en función de la cantidad de población, costo de la infraestructura, pérdida de vidas humanas o cualquier otro índice de valor de las posibles pérdidas (CENAPRED, 2017).

Es común expresar el riesgo en términos monetarios, por lo que es medido como parte del costo total de los sistemas expuestos que son afectados. Los estudios de riesgo son complejos, porque deben considerar la relación entre los fenómenos naturales, el entorno y a su vez la interacción de los sistemas físicos y sociales antropogénicos; lo que requiere que la escala de aplicación sea muy local (DOF, 2016; CENAPRED, 2014).

En el caso de las inundaciones, para estimar el peligro es necesario analizar información topográfica, partir del estudio hidrológico asociado a diferentes periodos de retorno, de modelos hidráulicos para diferentes escenarios y de la severidad. El parámetro de intensidad es el tirante de agua o profundidad de inundación que, junto con la velocidad del flujo definen los niveles de peligrosidad o severidad, para lo cual, se emplea el diagrama de resistencia al vuelco de Dorrigo,

RIESGO POR INUNDACIÓN EN JOJUTLA

que muestra datos de la relación profundidad hidráulica de inundación y la velocidad del flujo. Con los resultados se obtienen los mapas de peligro que constituyen la base para la evaluación de los costos por inundación.

Es de vital importancia que los análisis de peligro y riesgo sigan una metodología común, que utilicen la misma terminología y representación uniforme en la cartografía e informática (CENAPRED, 2014).

RIESGO POR INUNDACIÓN EN JOJUTLA

1.2 Estado del Arte

Los registros históricos de inundaciones son prácticamente inexistentes, por lo que es necesario realizar el análisis de riesgo, que generalmente se basa en métodos indirectos como la modelación físico-matemática. El objetivo de la aplicación de los modelos es documentar la magnitud y probabilidad de daños por inundación a partir de simulaciones basadas en hidrogramas calculados (Uribe-Alcántara et al., 2010).

El conocimiento del funcionamiento hidráulico de un río cuando se presenta una avenida es esencial para la solución de gran variedad de dificultades de ingeniería hidráulica, como la delimitación de zonas inundables, diseño de encauzamientos y estructuras hidráulicas, estabilización de márgenes, estudios de rotura de presa, restauración de ríos, determinación del riesgo asociado a acontecimientos extraordinarios de lluvia. Para ello es necesario el estudio del flujo de agua en lámina libre en régimen variable y con geometrías irregulares (Bladé, 2005). La bibliografía describe varios análisis de este tipo, a continuación, se mencionan algunos.

Hernández-Urbe et al. (2017) presentan una metodología de análisis por inundación para el río Atemajac, Jalisco, México; aplicable en cuencas urbanas, la cual se fundamenta en dos tipos de enfoques complementarios, el determinista que consistente en la modelación numérica unidimensional utilizando el software Hec-RAS y la posterior estimación de daños, en el que generaron mapas de riesgo para diferentes escenarios; y el enfoque paramétrico, que conceptualiza la vulnerabilidad mediante índices adimensionales para cuatro componentes: social, económico, físico y ambiental. Los resultados de ambos enfoques muestran las zonas de riesgo y de alta vulnerabilidad consistentes entre sí, además de proporcionar elementos de juicio para los tomadores de decisiones.

García-Navarro et al. (2003) realizaron el estudio hidráulico del riesgo de inundación en un tramo de meandro del río Ebro, en Zaragoza, España; en el que aplicaron dos modelos numéricos en flujos de lámina libre utilizando el software Hec-RAS para el análisis unidimensional; y un modelo universitario (en desarrollo), para el bidimensional. Los resultados de ambos análisis se compararon, concluyendo que el modelo más apto para representar los diferentes escenarios es la bidimensional, dada la topografía irregular del meandro ya que toma en cuenta las llanuras de inundación como cauce en toda su extensión.

RIESGO POR INUNDACIÓN EN JOJUTLA

Martínez-Cantó y Hidalgo (2016) realizaron modelaciones bidimensionales de inundaciones fluviales con el software Iber en la zona de confluencia del río Luna y el río Omaña, Santiago de Molinillo, León, España; en el cual se plantearon dos escenarios, el primero para la modelación del gasto medio anual de ambos ríos y el segundo correspondiente a la modelación del año de máximo registro de gasto. Se compararon ambos resultados y se identificaron zonas que debían ser reparadas para que no se desbordaran los ríos en situaciones de gastos máximos.

Ochoa et al. (2016) ejecutaron modelaciones hidráulicas unidimensionales con el software Hec-RAS y bidimensionales con el software Iber, para delinear zonas de inundación en 9 km del río Tercero o río Ctalamochita en la Provincia de Córdoba, España; analizaron la velocidad y la profundidad de inundación en función de la forma del cauce, observando que en cauces de curvaturas pronunciadas se representa mejor la realidad en modelos bidimensionales, de acuerdo con registros de campo medidos con instrumentos hidroacústicos ADCP. Se concluyó en la importancia de tomar en cuenta la precisión deseada de acuerdo con la relevancia del proyecto y los resultados que se desean obtener ya que, las mejoras en la representación de un fenómeno de lámina libre aumentan el tiempo computacional.

Arreguín-Cortés et al. (2016) enunciaron los factores que inciden sobre el incremento de las inundaciones, tales como la ausencia de ordenamiento territorial y los efectos del cambio climático sobre el ciclo hidrológico. Además de los tipos de daños que provoca una inundación, directos, indirectos, tangibles e intangibles y la complejidad para ser calculados.

Pinos y Timbe (2019) compararon cuatro modelos hidráulicos bidimensionales para el área de estudio del río Santa Bárbara en los Andes Ecuatorianos; realizados con los softwares Hec-RAS 2D, Iber, Flood Modeller 2D y PCSWMM 2D. Evaluaron el tirante y la extensión de la inundación, y concluyeron que, aun bajo las mismas condiciones de modelación, se presentaron diferencias entre los modelos, debidas principalmente a las ecuaciones para solución de malla de cada software, la representación de obras hidráulicas y los valores de los parámetros para modelación. El modelo con mejor ajuste de resultados fue el obtenido con Iber y el de menor ajuste el obtenido con PCSWMM 2D.

En México, el marco jurídico para la Gestión Integrada de Avenidas (GIA) lo establece la Ley de Aguas Nacionales (LAN), la Ley General de Protección Civil (LGPC), el Plan Nacional Hídrico

RIESGO POR INUNDACIÓN EN JOJUTLA

(PNH) y el Fondo Nacional de Desastres Naturales (FONDEN). Además, las instituciones participantes son la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), los gobiernos de los Estados, Secretarías de Estado, usuarios, medios de comunicación, universidades, etc. (OMM, 2013).

El Programa Nacional Contra Contingencias Hidráulicas (PRONACCH) fue anunciado por el presidente de la República el 14 de enero de 2013, con el objetivo de iniciar una política pública para la reducción del riesgo por inundación y protección a los asentamientos humanos vulnerables, diseñado para pasar de soluciones reactivas a acciones preventivas. Dentro de las cuatro acciones del PRONACCH, la de Intensificar la delimitación de zonas federales y ordenamiento hidráulico para impedir asentamientos humanos en lugares de riesgo, contempla la elaboración de Atlas de Riesgo por Inundación. Además, el PRONACCH tiene como bases directivas internacionales y nacionales: el programa de la ONU, Reducción de Riesgos por Desastre (Disaster Risk Reduction); de la OMM el Programa Asociado para el manejo de crecientes y de CENAPRED los Requerimientos mínimos para elaboración de atlas de riesgo (OMM, 2013; CONAGUA, 2019b).

Organizaciones gubernamentales como la Secretaría de Desarrollo Agrario, Territorial y Urbano (SEDATU, 2014; 2017), el Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED, 2006a; 2014; 2017), y la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA, 2014) han publicado las Bases para la Estandarización en la Elaboración de Atlas de riesgos y Catálogo de Datos Geográficos para Representar el Riesgo; Términos de Referencia para la Elaboración de Atlas de Peligros o Riesgos; Guías Básicas para la Elaboración de Atlas de Peligros y Riesgos de Atlas Estatales y Municipales; Lineamientos para la elaboración de Mapas de Peligro por Inundación; así como la Guía de contenido mínimo para la elaboración del Atlas Nacional de Riesgos (DOF, 2016).

RIESGO POR INUNDACIÓN EN JOJUTLA

1.3 Justificación

El presente trabajo busca analizar el riesgo por inundación del río Apatlaco a la altura de la cabecera municipal de Jojutla, Morelos; a partir de diferentes escenarios asociados para los periodos de retorno de 10, 20, 50 y 100 años. Lo cual, permitirá identificar las zonas aledañas al río que se encuentran expuestas, además de cuantificar el peligro y evaluar la vulnerabilidad para los cuatro escenarios y asignar un costo probable por inundación.

Realizar el diagnóstico de riesgo por inundación del río Apatlaco es un requisito esencial para la puesta en práctica de las acciones de protección civil y ordenamiento territorial.

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo general

Analizar el riesgo de inundación por desbordamiento del río Apatlaco cerca de la cabecera municipal de Jojutla, Morelos.

1.4.2 Objetivos complementarios

Para cumplir el objetivo general planteado para este trabajo se enlistan los siguientes objetivos complementarios:

- Describir la zona de estudio.
- Obtener los hidrogramas del río Apatlaco y los hietogramas de intensidades de la cuenca propia de la ciudad de Jojutla, asociados a los periodos de retorno de 10, 20, 50 y 100 años.
- Realizar la modelación hidráulica para representar el comportamiento del río Apatlaco a su paso por la ciudad de Jojutla para los escenarios de 10, 20, 50 y 100 años.
- Elaborar mapas de tirantes y velocidad máxima para cada escenario.
- Estimar y clasificar la severidad.
- Estimar el daño económico a viviendas y el daño anual esperado por inundación.

RIESGO POR INUNDACIÓN EN JOJUTLA

1.5 Estructura de la tesis

En el primer capítulo de este documento se realiza una introducción al riesgo por las inundaciones: se definen la inundación y los componentes del riesgo y se presenta un estado del arte, así mismo, se incluye la justificación y los objetivos de este trabajo. En el segundo capítulo, se realiza una descripción detallada de la zona de estudio, incluyendo ubicación, fisiografía, geología, edafología, usos de suelo, hidrología, clima y población. En el tercer capítulo se realiza el estudio hidrológico con el cual se obtuvieron los hidrogramas de diseño asociados a distintos periodos de retorno para el río Apatlaco, aguas arriba de la ciudad de Jojutla, así mismo, se obtiene la precipitación de diseño para la cuenca propia de la ciudad. En el cuarto capítulo, se describe la metodología usada para desarrollar el modelo hidráulico bidimensional con el cual se obtuvieron los ráster de tirantes y velocidades máximas asociadas a distintos periodos de retorno. En el quinto capítulo, se realiza el análisis de la severidad o peligrosidad, obteniendo mapas de severidad máxima para la zona de estudio. En el sexto capítulo, se realiza un análisis del daño económico potencial mínimo, máximo y más probable para la ciudad de Jojutla, así mismo, se estima el daño anual esperado para las condiciones actuales. En el séptimo capítulo se presentan las conclusiones obtenidas del trabajo y algunas recomendaciones. Finalmente, se enlistan las referencias bibliográficas que sustentan el presente documento.

2 DESCRIPCIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO

2.1 Ubicación

El municipio de Jojutla, Morelos se ubica entre los paralelos 18°31' y 18°41' latitud norte y los meridianos 99°09' y 99°18' de longitud oeste, a una altitud entre 700 y 1600 msnm. Colinda al norte con los municipios de Puente de Ixtla, Zacatepec y Tlaltizapán; al este con Tlaltizapán y Tlaquilténango; al sur con Tlaquilténango y Puente de Ixtla; al oeste con Puente de Ixtla (Figura 2-1). Está integrado por 65 localidades que conforman una superficie de 143.41 km² representando el 3.14% del estado (INEGI, 2009).

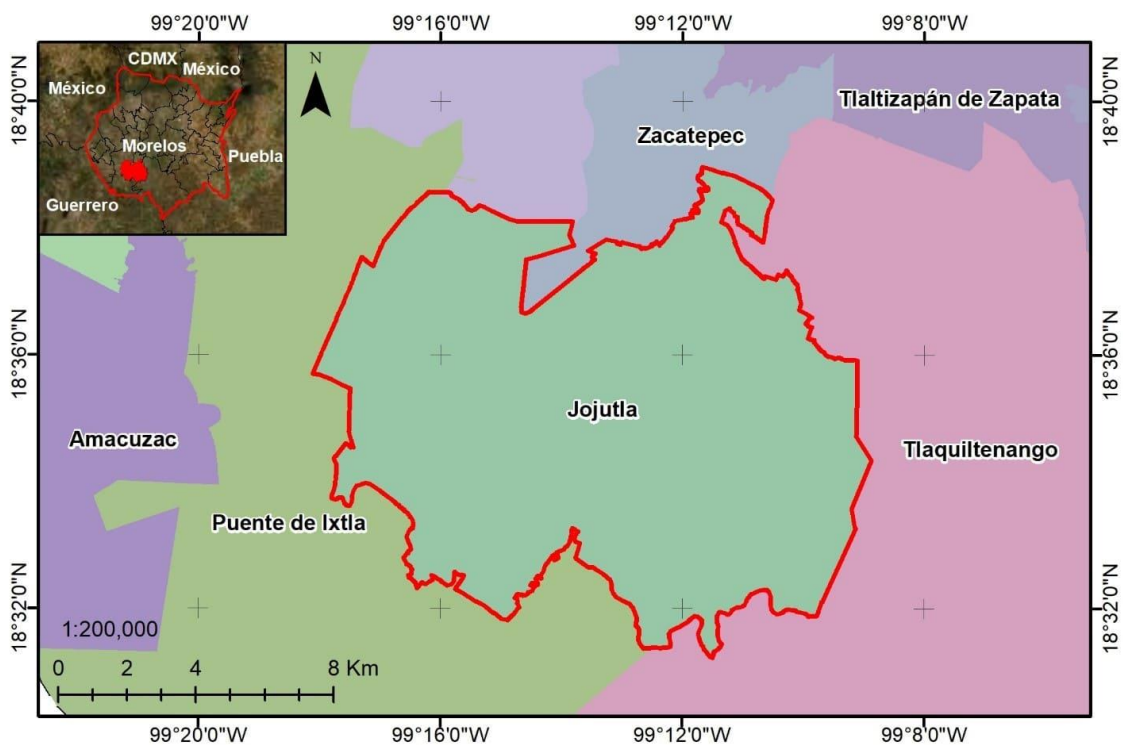


Figura 2-1 Zona de estudio

Fuente: a partir de información de INEGI (2021a)

2.2 Fisiografía y Geología

De acuerdo con el INEGI (2009) el municipio de Jojutla pertenece en su totalidad a la provincia de la Sierra Madre del Sur, en la Subprovincia de Sierras y Valles Guerrerenses y al Sistema de topofomas: Meseta de aluvi6n antiguo con ca6adas (72.17%), Llanura aluvial con lomerío

RIESGO POR INUNDACIÓN EN JOJUTLA

(18.95%), Sierra de laderas escarpadas (6.21%), Sierra alta compleja (2.65%) y Lomerío con cañadas (0.02%), Figura 2-2. El cerro de Jojutla de 1,550 msnm es la única montaña del municipio.

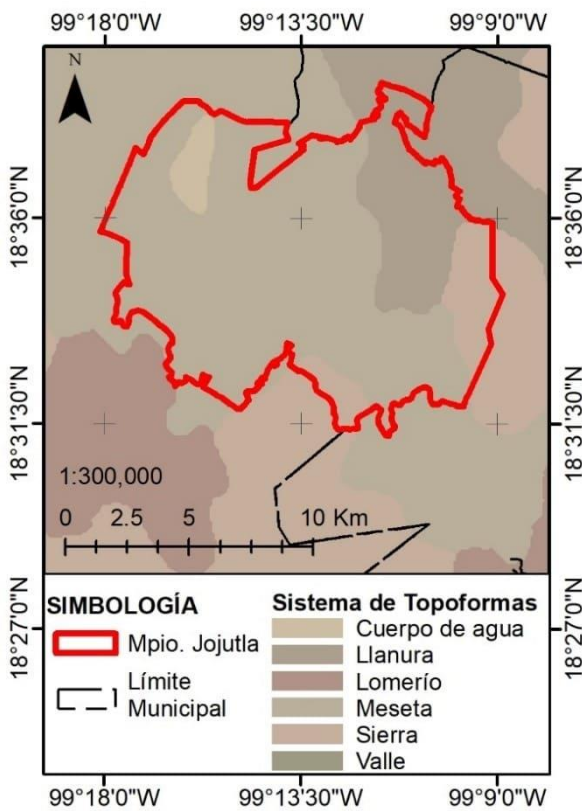


Figura 2-2 Sistema de topoformas

Fuente: a partir de información del INEGI (2001)

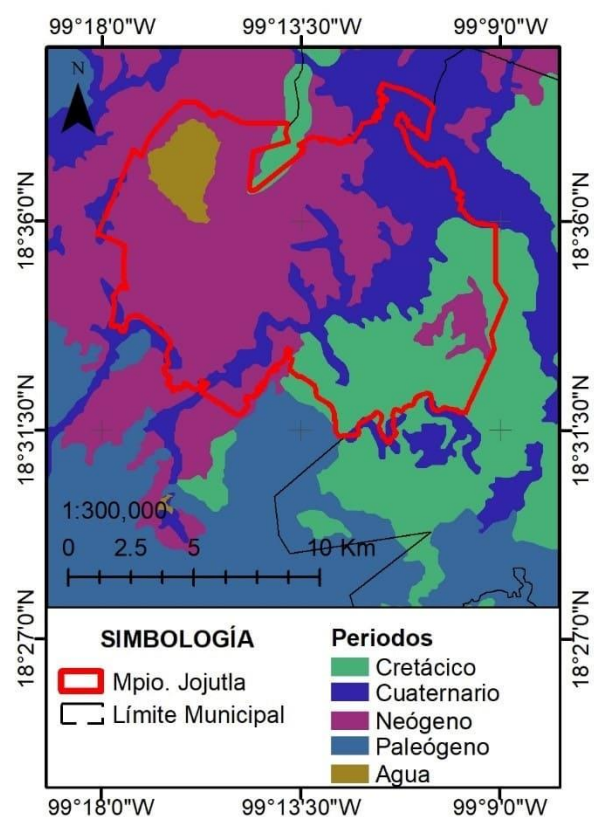


Figura 2-3 Periodos geológicos

Fuente: a partir de información de INEGI (1983)

La superficie del municipio está conformada por rocas sedimentarias, ígneas extrusivas y suelos aluviales; pertenecientes a los periodos Neógeno, Cretácico, Cuaternario y Paleógeno (Figura 2-3).

2.3 Edafología y Uso de suelo y Vegetación

El suelo dominante en el municipio de Jojutla se encuentra dividido en Vertisol (51.26%), Kastañozem (13.69%), Leptosol (8.16%), Regosol (5.95%) y Phaeozem (4.21%), Figura 2-4.

RIESGO POR INUNDACIÓN EN JOJUTLA

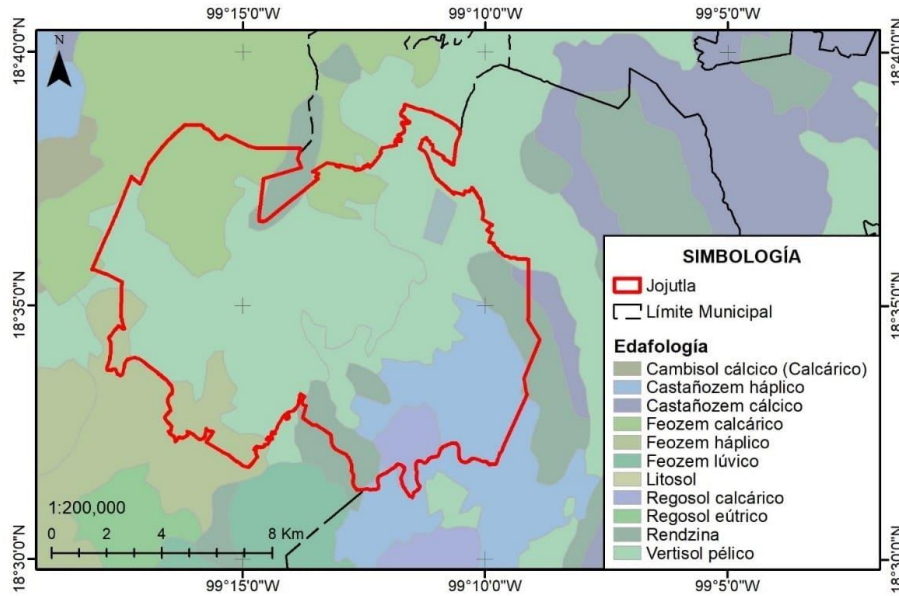


Figura 2-4 Edafología

Fuente: a partir de información del CONABIO (1995)

Según el INEGI (2009) el uso del suelo del municipio se destina principalmente a la Agricultura (62.29%) y zona urbana (12%); la vegetación predominante corresponde a selva (14.52%) y pastizal (2.46%), ver Figura 2-5.

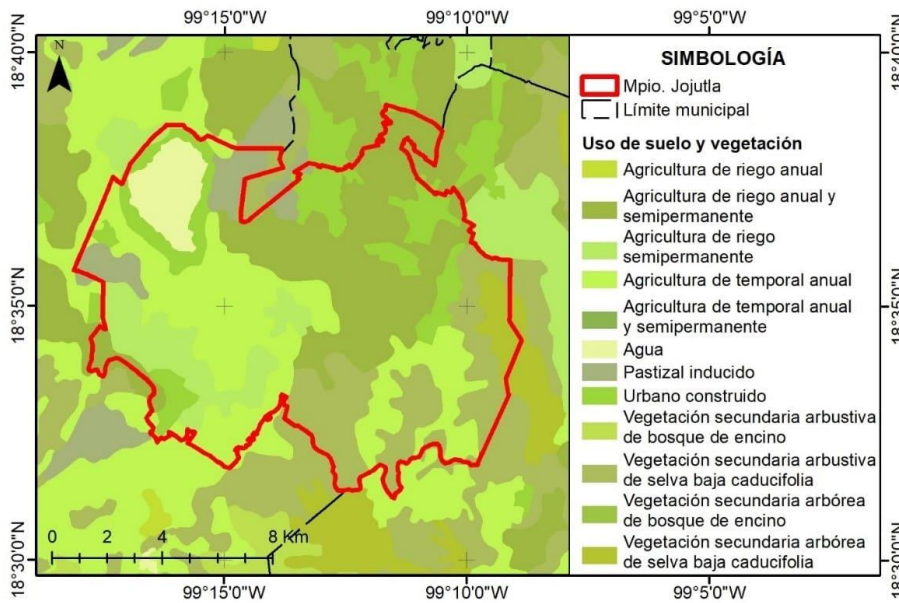


Figura 2-5 Uso del suelo y vegetación

Fuente: a partir de información del INEGI (2016)

RIESGO POR INUNDACIÓN EN JOJUTLA

2.4 Hidrografía

Verificando la red hidrográfica del INEGI (Esc. 1:50,000) disponible en el Simulador de Flujos de Agua de Cuencas Hidrográficas (SIATL) el municipio de Jojutla se ubica en la región hidrológica 18 Balsas, en la cuenca RH18F del Río Grande de Amacuzac, dividido a su vez en las subcuencas del Río Alto Amacuzac (38.70%), Río Yautepec (32.67%), Río Bajo Amacuzac (17.64%), Río Apatlaco (8.23%), Río Coatlán (2.7%) y Río Cuautla (0.06%). Al municipio lo atraviesa el Río Alpuyecá, que recoge los derrames de las cercanías de Xoxocotla y toma el nombre de Río Apatlaco (ver Figura 2-6). Se encuentran los ríos Amacuzac, Apatlaco y Yautepec de condición perenne, así como la Laguna de Tequesquitengo; y Bejuquera, Las Tenerías, Panzacola y Rancho Viejo de condición intermitente (INEGI, 2009; Inafed).

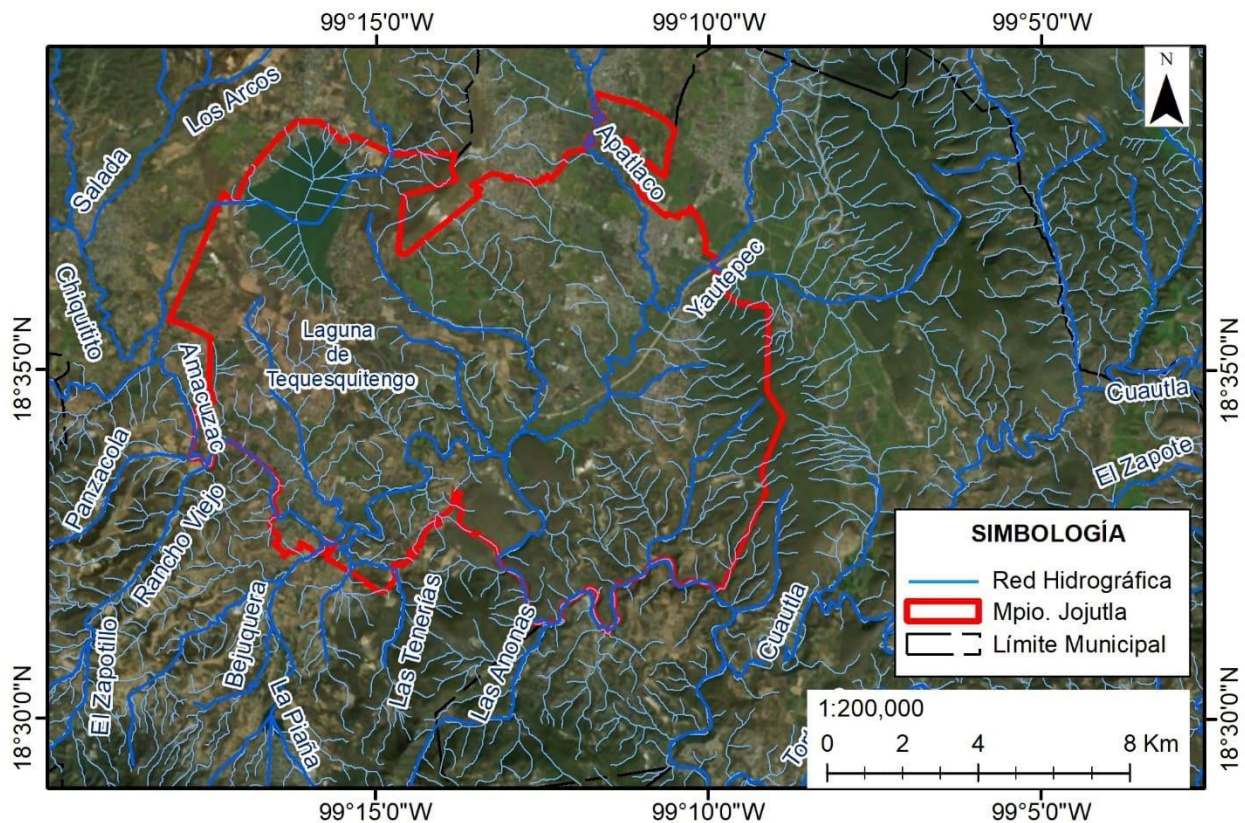


Figura 2-6 Red hidrográfica, Esc. 1:50,000

Fuente: a partir de información del SIATL

RIESGO POR INUNDACIÓN EN JOJUTLA

2.5 Clima

El rango de temperatura de Jojutla se encuentra de 24 a 26°C, con un rango de precipitación de 800-1000 mm (INEGI, 2009; ver Figura 2-7). Con clima Cálido subhúmedo, temperatura media anual mayor a los 22°C y temperatura del mes más frío mayor a 18°C, con base en la clasificación de Köppen, modificada por García para la República Mexicana. Con régimen pluviométrico y distribución de la precipitación de verano con bajo porcentaje de precipitación invernal (García et al., 1990).

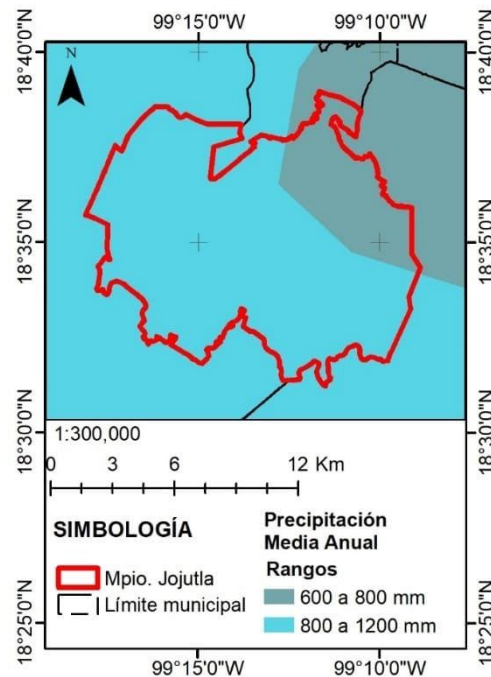


Figura 2-7 Rangos de precipitación media anual

Fuente: creado a partir de Vidal-Zepeda, R. (1990)

2.6 Población y Economía

En 2020 la población total de Jojutla se registraron 57,682 habitantes, siendo 29,862 mujeres y 27,820 hombres, de acuerdo con el Censo de Población y Vivienda 2020 realizado por el INEGI (2021b).

Los rangos de edad con mayor concentración de población fueron: de 15 - 19 años (4,649), 20 - 24 años (4,584) y 10 - 14 años (4,560), equivalente al 23.9% de la población total. Además, al

RIESGO POR INUNDACIÓN EN JOJUTLA

primer trimestre de 2021 se registró el 52.4% de población económicamente activa, según la Secretaría de Economía (2021).

El municipio de Jojutla apoya su economía en actividades consideradas primarias, como la agricultura, basada en el cultivo de la caña de azúcar y arroz, y en menores cantidades de maíz, frijol, jícama, sandía y otros; con ventas internacionales principalmente a Estados Unidos y Canadá en el año 2020. La ganadería es otra actividad de relevancia con la producción de carne, lácteos y sus diversos derivados.

3 ESTUDIO HIDROLÓGICO

Uno de los componentes básicos para estimar el riesgo por inundación es el peligro. Este hace referencia a cuantificar un potencial fenómeno dañino mediante una probabilidad (CENAPRED, 2006a). En el caso de las inundaciones, el peligro se basa en la caracterización de la información hidrométrica para conocer el escurrimiento a partir de un análisis de frecuencia, valores que se utilizarán posteriormente en la simulación hidráulica. Sin embargo, regularmente no se encuentra disponible información hidrométrica para todos los sitios por lo que un método alternativo es aplicar un modelo lluvia escurrimiento.

Para este caso en particular, se detectó una estación hidrométrica sobre el río Apatlaco, aguas arriba de la ciudad de Jojutla, por lo que es posible obtener avenidas máximas asociadas a distintos periodos de retorno en la entrada al dominio de la ciudad mediante un análisis de frecuencia de información hidrométrica. Adicionalmente, y como se explicará más adelante, es posible simular el escurrimiento de la cuenca propia de la ciudad mediante un modelo hidrológico – hidráulico a partir de una tormenta de diseño, por lo que estas también se presentan en este capítulo.

3.1 Subcuencas de Análisis

Sobre el río Apatlaco se detectaron tres puntos de interés: el primero corresponde a la estación hidrométrica denominada Zacatepec (18264), localizada en el municipio de Zacatepec, Morelos, sobre el puente de la carretera Zacatepec – Galeana; el segundo y tercer punto se localizan inmediatamente aguas arriba y aguas abajo de la zona urbana de Jojutla (Ver Figura 3-1) que corresponden con el inicio y final del dominio de la simulación hidráulica.

Para cada uno de los puntos de la Figura 3-1 se delimitó su subcuenca de aportación. Este procedimiento se realizó a partir de un modelo digital de elevaciones (MDE) creado a partir de los mosaicos provenientes de los Modelos Digitales de Elevaciones de Alta Resolución LiDAR del INEGI (2020) y con la ayuda de un Sistema de Información Geográfica (SIG). Las subcuencas delimitadas y su red de drenaje se muestran en la Figura 3-2.

RIESGO POR INUNDACIÓN EN JOJUTLA

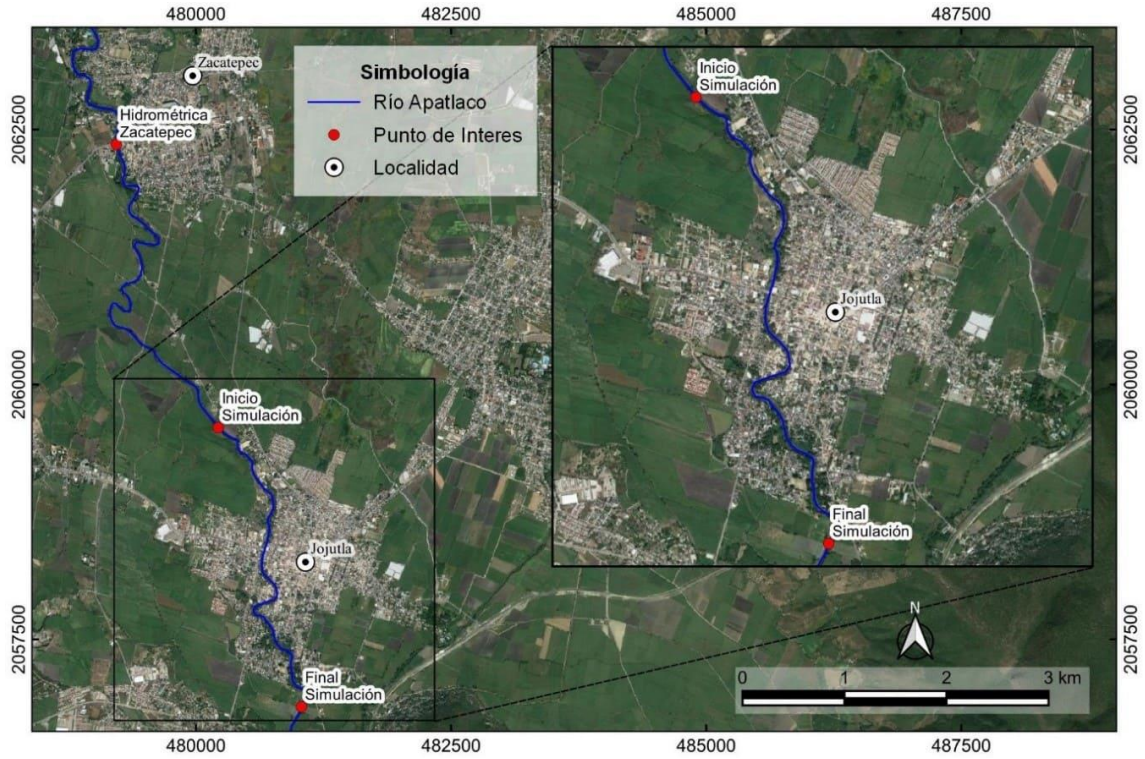


Figura 3-1 Puntos de interés sobre el río Apatlaco

Fuente: elaboración propia

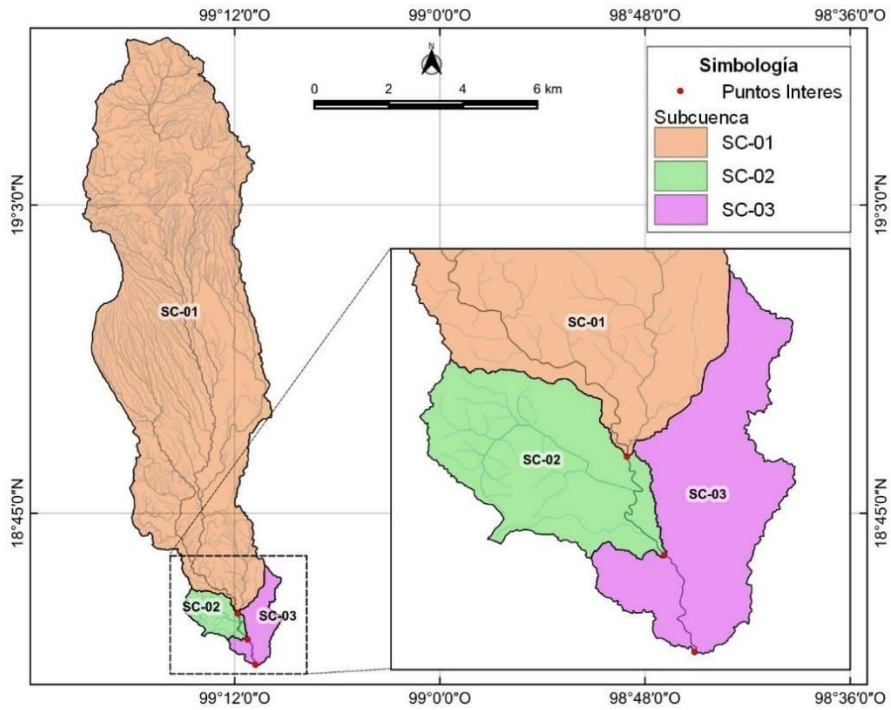


Figura 3-2 Delimitación de las subcuencas de análisis

Fuente: elaboración propia

RIESGO POR INUNDACIÓN EN JOJUTLA

De las subcuencas mostradas en la Figura 3-2, la SC-01 corresponde a la cuenca de aportación de la estación hidrométrica Zacatepec (18264), la SC-02 es la subcuenca entre la estación hidrométrica y el punto de inicio de la zona urbana, mientras que, la SC-03 corresponde con la cuenca propia de la ciudad de Jojutla.

A continuación, se describen las principales características morfométricas de las subcuencas delimitadas.

3.1.1 Características morfométricas

En la bibliografía se describen gran cantidad de parámetros o características morfométricas de una cuenca (e.g. Reyes y Escalante, 2014) las cuales son empleadas en mayor o menor medida en los cálculos hidrológicos. A continuación, se describen brevemente las principales.

Área de la cuenca (A)

Es la superficie delimitada en proyección horizontal por el parteaguas, el cual es la línea imaginaria que une los puntos de mayor elevación de terreno hacia un punto de drenaje. Los valores del área de cada subcuenca se muestran en la columna dos de la Tabla 3-1.

Longitud del cauce principal (L_{cp})

Se define como el cauce de mayor longitud medido desde el punto de salida o drenaje hasta el punto más alejado en la cuenca en el parteaguas. Ver la columna tres de la Tabla 3-1.

Pendiente del cauce principal (S_{cp})

Este valor es uno de los indicadores más importantes de la velocidad de respuesta de la cuenca a una tormenta. Dado que la pendiente varía a lo largo del cauce es necesario definir una pendiente media. Uno de los métodos más utilizados es el de Taylor y Schwarz, que se determina como:

RIESGO POR INUNDACIÓN EN JOJUTLA

$$S_{cp} = \left[\frac{L_{cp}}{\frac{L_1}{\sqrt{S_1}} + \frac{L_2}{\sqrt{S_2}} + \dots + \frac{L_m}{\sqrt{S_m}}} \right]^2 \quad (3.1)$$

Donde:

S_{cp} Pendiente media del cauce principal [m/m].

L_{cp} Longitud del cauce principal [km].

m Número de segmentos en los que se divide el tramo en estudio.

Los valores de la pendiente media fueron obtenidos mediante la ecuación anterior a partir de las curvas de nivel del INEGI a cada 20m y con ayuda del MDE. Ver columna cuatro de la Tabla 3-1.

Tiempo de concentración (t_c)

Se define como el tiempo que tarda una partícula en su recorrido por la superficie desde el punto más distante de la cuenca hasta su salida. Existen varios métodos desarrollados por diferentes autores, sin embargo, en México el más utilizado es la expresión de Kirpich, la cual se define como:

$$t_c = 0.0003245 \left(\frac{L_{cp}}{\sqrt{S_{cp}}} \right)^{0.77} \quad (3.2)$$

Donde:

t_c Tiempo de concentración sobre la superficie natural [h].

L_{cp} Longitud del cauce principal [m].

S_{cp} Pendiente media del cauce principal [m/m].

Los valores obtenidos para cada subcuenca se muestran en la columna cinco de la Tabla 3-1.

Número de curva (CN)

El número de curva (CN) es un factor empírico, desarrollado por el entonces Servicio de Conservación de Suelos (SCS) de Estados Unidos, que permite estimar la capacidad de infiltración

RIESGO POR INUNDACIÓN EN JOJUTLA

que tiene el suelo. Una forma simplificada del método permite estimar este valor a partir del grupo hidrológico del suelo, el uso de suelo y su condición hidrológica.

En el presente trabajo, el suelo hidrológico se determinó a partir de las cartas edafológicas del INEGI, estableciendo una relación entre los suelos de la zona de estudio con los clasificados por el SCS de acuerdo a Domínguez et al. (2018). Por otro lado, el uso de suelo y vegetación de la cuenca se obtuvo de la carta de Uso de Suelo y Vegetación Serie VI del Conjunto Nacional. Mientras que, la condición hidrológica se estimó a partir de las capas de cobertura Arbórea y el desarrollo y fase de la vegetación de acuerdo a Hernández (2014).

Finalmente, se aginaron los valores del CN para los distintos usos de acuerdo a las tablas contenidas en la bibliografía (USDA-SCS, 1986; Domínguez et al., 2018). Para cada subcuenca se ponderaron los distintos valores respecto su área y se obtuvieron los valores medios que se muestran en la columna seis de la Tabla 3-1.

Tabla 3-1 Características morfométricas de las subcuencas de estudio

Subcuenca	A [km ²]	L_{cp} [m]	S_{cp} [m/m]	t_c [h]	CN [adim]
SC-01	768.33	81,122.80	0.015	9.89	69.49
SC-02	22.55	11,169.91	0.006	3.03	82.93
SC-03	26.64	13,221.83	0.004	3.90	89.95

3.2 Análisis Hidrométrico

En la zona de estudio, sobre el río Apatlaco se detectó la presencia de la estación hidrométrica 18264, denominada Zacatepec. De acuerdo al Banco Nacional de Aguas Superficiales (BANDAS, 2021) de la CONAGUA, la estación se localiza en el municipio de Zacatepec, Morelos, sobre el puente de la carretera Zacatepec – Galeana, aproximadamente a 4.3 km aguas arriba del punto propuesto para iniciar la simulación matemática (Figura 3-1).

El objetivo de esta sección es determinar los hidrogramas asociados a distintos periodos de retorno, sobre el cauce Apatlaco, en el punto de inicio del dominio de la simulación hidráulica. Para esto, se busca realizar un análisis de frecuencia con información de la estación hidrométrica, obtener los hidrogramas y transportar estos gastos a la zona de interés.

RIESGO POR INUNDACIÓN EN JOJUTLA

3.2.1 Análisis de frecuencia

El análisis de frecuencias de los gastos máximos anuales se emplea para obtener la magnitud de un evento asociado a un periodo de retorno. Sin embargo, para que se pueda realizar este tipo de análisis es necesario que la muestra de datos sea independiente, es decir, que este compuesta por variables aleatorias (Escalante y Reyes, 2008), esto garantiza que el régimen del gasto no está controlado aguas arriba. Para verificar si la muestra es independiente se utiliza la prueba de Anderson, la cual hace uso del coeficiente de autocorrelación serial.

La estación hidrométrica tiene un registro de gastos instantáneos máximos anuales de 48 años (1956 – 1986, 1991, 1995, 1996, 1998 – 2003 y 2005 – 2014). La prueba de independencia se aplicó al periodo continuo mayor de 1956 – 1986, la cual demuestra que la serie es independiente. En la Figura 3-3 se muestra el correlograma de la prueba.

Una vez verificada la independencia de la serie, se realizó el análisis de frecuencia de los gastos instantáneos máximos anuales, empleando el registro de 48 años. Con la ayuda del software AX (Jiménez, 1992) se ajustaron distintas funciones de distribución de probabilidad. En la

Tabla 3-2 se muestra el error estándar de ajuste (EEA) para las distintas funciones de distribución y métodos de estimación de parámetros, en esta se muestra que el menor EEA se obtiene con la distribución Doble Gumbel, por lo que se eligió como la de mejor ajuste. En la Figura 3-4 se muestra el ajuste de dicha función.

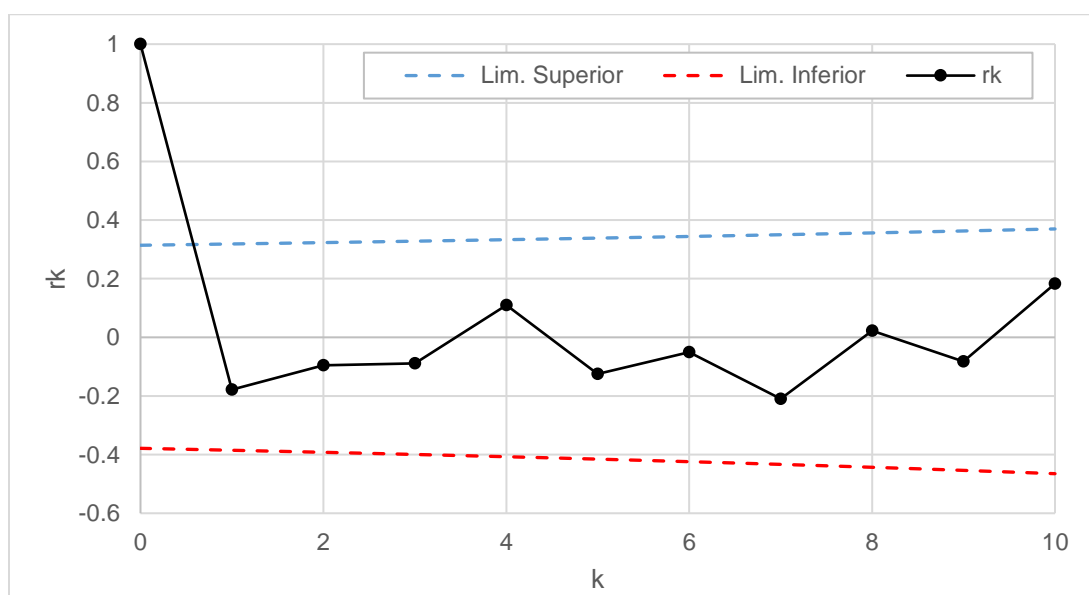


Figura 3-3 Correlograma de la estación 18264 (1956 – 1986)

Fuente: elaboración propia

RIESGO POR INUNDACIÓN EN JOJUTLA

Tabla 3-2 Error estándar de ajuste para las distintas distribuciones de la estación 18264

Función	Momentos		Máxima Verosimilitud	
	2 parámetros	3 parámetros	2 parámetros	3 parámetros
Normal	21.003	--	21.003	--
Lognormal	25.307	17.262	26.868	27.64
Gumbel	22.268	--	20.055	--
Exponencial	38.877	--	141.92	--
Gamma	18.502	17.053	17.586	21.589
Doble Gumbel	13.009			

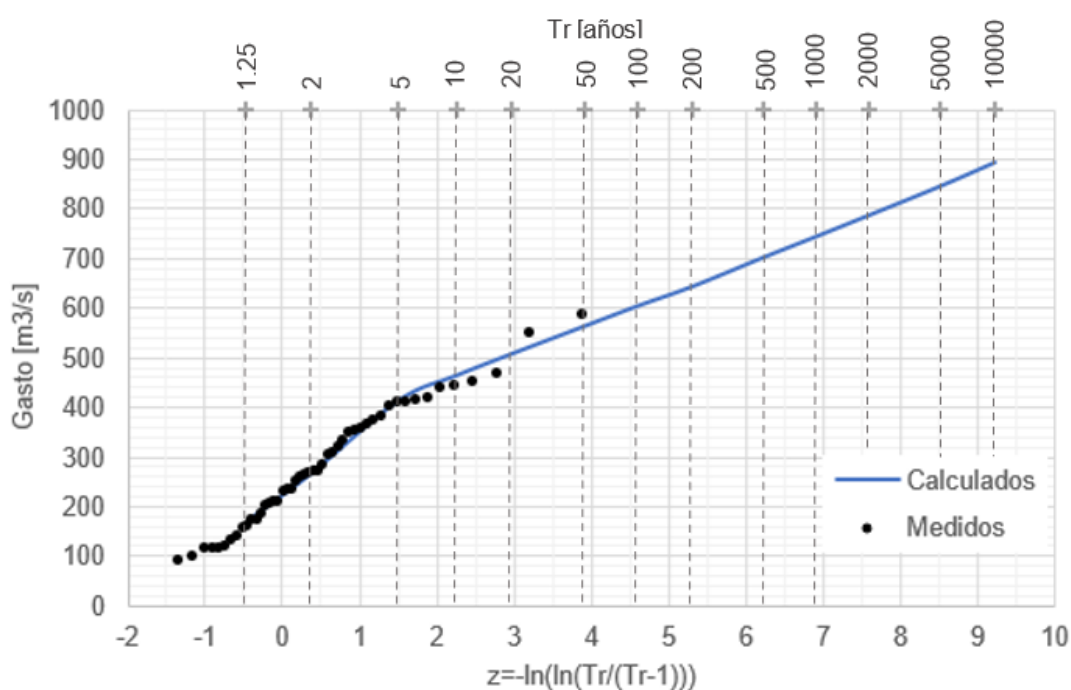


Figura 3-4 Ajuste para la función Doble Gumbel a los gastos máximos de la estación 18264

Fuente: elaboración propia

Una vez elegida la distribución Doble Gumbel (Figura 3-4) como la de mejor ajuste, a partir de esta, se extrapolaron los gastos máximos asociados a distintos periodos de retorno. Estos gastos máximos se muestran en la Tabla 3-3.

Tabla 3-3 Gastos máximos asociados a distintos periodos de retorno para la estación 18264

Tr [años]	10	20	50	100
Q _{máx} [m^3/s]	464.1	508.09	563.39	604.76

RIESGO POR INUNDACIÓN EN JOJUTLA

3.2.2 *Mayoración de hidrogramas*

Para algunas situaciones de diseño, basta con obtener el valor del gasto máximo para un cierto periodo de retorno, como los estimados en la Tabla 3-3, sin embargo, para el caso del presente estudio es necesario contar con la forma completa del hidrograma.

Existen distintos métodos para obtener la forma completa del hidrograma a partir de los registros hidrométricos, sin embargo, el más utilizado en México es la técnica de mayoración de hidrogramas (Rivera y Escalante, 1999). Esta consiste en que, a partir de los registros hidrométricos de la estación, se obtiene la forma del hidrograma histórico registrado que presenta el mayor gasto o volumen.

Si bien, la técnica de Mayoración de hidrogramas tiene el inconveniente de no guardar la proporción entre los volúmenes de los hidrogramas de distinto periodo de retorno, se utilizó en el presente trabajo dada su simplicidad y al no ser la parte principal del objetivo de esta tesis obtener la forma de los hidrogramas.

Una vez detectado y aislado el hidrograma de mayor gasto o volumen (en el presente se consideró el de mayor gasto), se obtiene un hidrograma adimensional como:

$$q_t = Q_t/Q_p \quad (3.3)$$

Donde:

- q_t Ordenadas del hidrograma adimensional.
- Q_t Ordenadas del hidrograma seleccionado como el más adverso.
- Q_p Valor del gasto máximo en el hidrograma seleccionado.

Del hidrograma adimensional, se multiplica cada una de sus ordenadas por los gastos máximos asociados a distintos periodos de retorno obtenidos en el análisis de frecuencia, logrando así las avenidas de diseño para dichos periodos de retorno.

Para el caso de la estación 18264 se localizó el hidrograma de mayor gasto presentado en los registros disponibles de los gastos instantáneos, registrado el 06/07/2005 03:00:00 a. m. En la Figura 3-5 se muestra el hidrograma adimensional obtenido por la técnica de mayoración. Para obtener las avenidas de diseño para la estación 18264 se multiplican los gastos de la Tabla 3-3 por las ordenadas del hidrograma adimensional de la Figura 3-5.

RIESGO POR INUNDACIÓN EN JOJUTLA

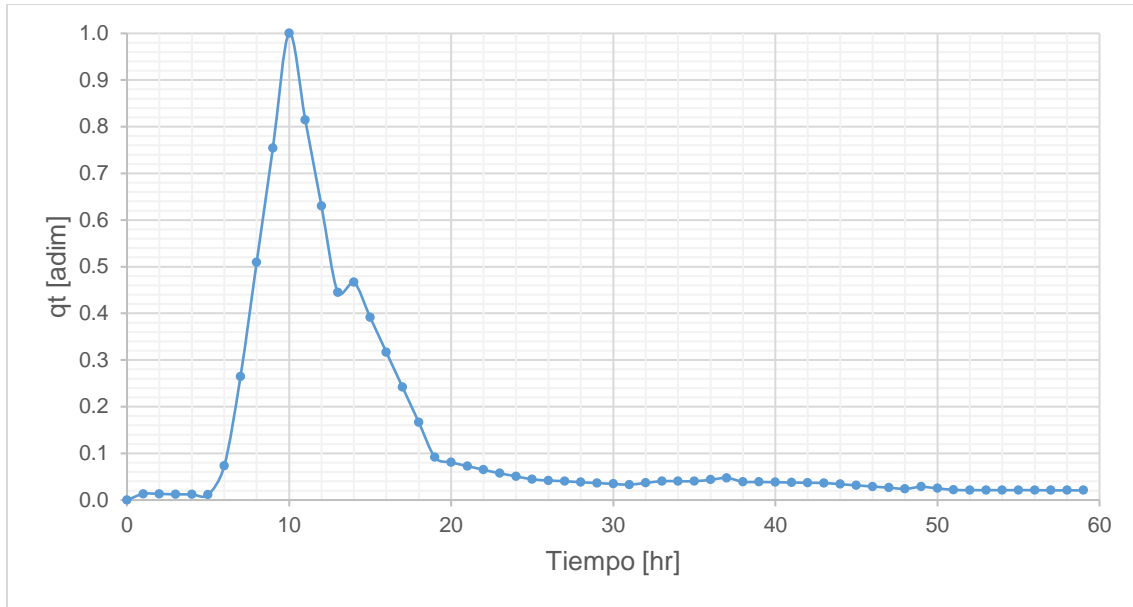


Figura 3-5 Hidrograma adimensional obtenido por mayoración en la estación 18264

Fuente: elaboración propia

3.2.3 Transporte de información hidrométrica

Las avenidas de diseño obtenidas con el procedimiento anterior corresponden al punto donde se localiza la estación hidrométrica 18264 (Figura 3-1); sin embargo, el sitio de interés del presente estudio se localiza aproximadamente a 4.3 km sobre el mismo cauce aguas abajo de dicha estación hidrométrica. Por lo anterior, es necesario realizar el transporte de información hidrométrica, en este caso avenidas de diseño, al sitio de interés.

De acuerdo al TWRI (1999) se han empleado distintos métodos para transferir información de sitios aforados a sitios sin aforar. Uno de los más simples y mayormente aplicado es el método de razón de áreas de aportación, en este el escurrimiento por unidad de área es supuesto constante. Bajo esta suposición, el escurrimiento en el sitio no aforado se determina como:

$$Q_e = Q_H \left(\frac{A_e}{A_H} \right) \quad (3.4)$$

Donde:

RIESGO POR INUNDACIÓN EN JOJUTLA

Q_e Gasto del sitio no aforado [m^3/s].

Q_H Gasto del sitio aforado [m^3/s].

A_e Área de aportación de la cuenca del sitio no aforado [km^2].

A_H Área de aportación de la cuenca del sitio aforado [km^2].

Para el caso del presente, Q_H y A_H corresponden a los gastos y el área de la cuenca de la estación hidrométrica 18264, respectivamente, mientras que, Q_e y A_e a los gastos y el área de la cuenca del sitio de interés (inicio de la simulación hidráulica). De acuerdo con la Figura 3-2 y la Tabla 3-1 $A_H = 768.33 \text{ km}^2$ (SC – 01), mientras que, $A_e = 790.88 \text{ km}^2$ (SC – 01 más SC – 02).

A partir de lo anterior y tomando en cuenta los gastos de la Tabla 3-3 y el hidrograma adimensional de la Figura 3-5 es posible estimar las avenidas de diseño para distintos periodos de retorno en el sitio del inicio de la simulación, es decir, para la cuenca de aportación de la ciudad de Jojutla. Estas se muestran en Figura 3-6, las cuales fueron ajustadas a una duración de 24h.

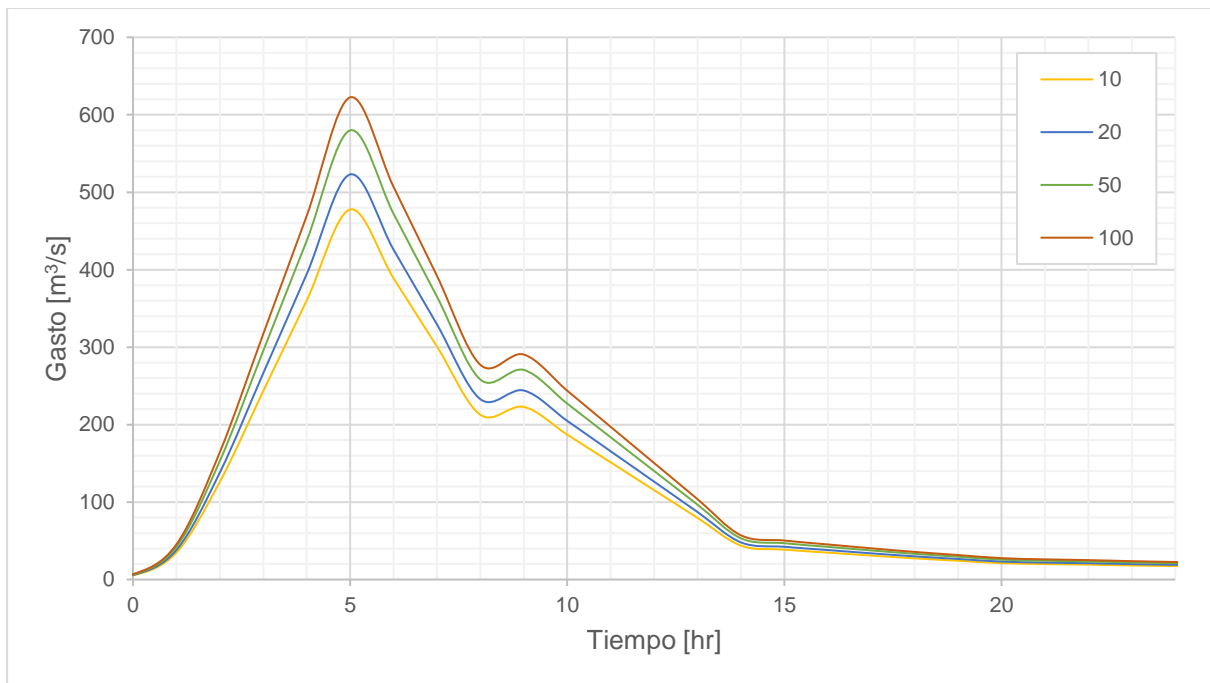


Figura 3-6 Avenidas de diseño para la cuenca de aportación de la ciudad de Jojutla

Fuente: elaboración propia

RIESGO POR INUNDACIÓN EN JOJUTLA

3.3 Precipitación en 24 h asociada a distintos periodos de retorno

Las avenidas de diseño estimadas en la sección anterior corresponden a la cuenca de aportación a la ciudad de Jojutla, es decir, de acuerdo con la Figura 3-2, corresponden a la SC – 01 y SC – 02, por lo cual, es necesario considerar las aportaciones de la SC – 03.

La subcuenca SC – 03 corresponde a la cuenca propia de la ciudad de Jojutla por lo que gran parte de esta se encuentra urbanizada y no cuenta con un cauce natural definido a partir del cual considerar escurrimientos de aportación, por lo anterior es necesario otro enfoque para tomar en cuenta los escurrimientos de dicha subcuenca.

El software Iber (Bladé et al., 2014) tiene la capacidad de realizar modelación hidrológica distribuida, esto con base en esquemas de volúmenes finitos (Caro-Camargo, 2015). Entre sus funciones incluye la simulación de los procesos lluvia – escurrimiento y perdidas. Además, esta herramienta permite simular de forma conjunta procesos hidrológico – hidráulicos, quedando así cubiertas todas las aportaciones a la zona de estudio.

Para que el modelo hidrológico – hidráulico sea válido, el dominio de la simulación queda delimitado por la cuenca propia de la ciudad. Por una parte, se consideran los escurrimientos de la cuenca alta mediante un hidrograma de entrada al dominio y por otra, las aportaciones de la cuenca propia mediante la modelación distribuida de los procesos lluvia – escurrimiento.

La entrada al software de la precipitación se realiza mediante un hidrograma de intensidades, por lo que en esta sección se presenta la determinación de dichas tormentas de diseño para la cuenca propia de la ciudad (SC – 03).

3.3.1 Precipitación máxima en 24h

En México, la información pluviográfica tiene baja resolución temporal y espacial por lo que los análisis de precipitación se realizan a partir de la precipitación registrada en los pluviómetros, actualmente, la CONAGUA proporciona datos diarios de la red de estaciones climatológicas convencionales de poco más de 3 000 estaciones operando (SMN, 2016).

Un análisis común para obtener la precipitación máxima en 24h asociada a un periodo de retorno para una cuenca, consiste en (Lozoya et al., 2017): 1) elegir el periodo de retorno de análisis; 2) obtener la precipitación máxima anual en 24h para cada una de las estaciones climatológicas dentro

RIESGO POR INUNDACIÓN EN JOJUTLA

de la cuenca y en el entorno; 3) se ajusta una función de distribución para cada serie y se extrapola el valor de precipitación máxima anual en 24h para dicho periodo de retorno; 4) se obtiene la precipitación media de la cuenca, por ejemplo, mediante isoyetas o polígonos de Thiessen; y 5) se multiplica dicho valor por un Factor de Reducción por Área.

En algunas ocasiones, el registro de los datos es escaso por lo que el análisis estadístico realizado de forma individual no necesariamente es confiable (Domínguez et al., 2018b), por lo que un análisis regional es más adecuado. El Instituto de Ingeniería de la UNAM con el apoyo del Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED) realizó un análisis regional con precipitaciones diarias máximas anuales, donde, primeramente, crearon regiones homogéneas de precipitación y para cada una realizaron dicho análisis regional. De dicho análisis generaron para la República Mexicana isoyetas de la media de la precipitación máxima anual, además, para cada una de las 59 regiones delimitadas, obtuvieron factores que al multiplicarse por la media de la precipitación máxima anual de la cuenca se obtiene las precipitaciones máximas anuales en 24h asociadas a dichos periodos de retorno.

Para el presente trabajo se realizó la comparativa del análisis regional del CENAPRED y el análisis regional para la ciudad de Jojutla empleando 8 estaciones climatológicas cercanas a la zona de estudio.

Análisis regional CENAPRED

En la Figura 3-7 se muestra las isoyetas de la media de la precipitación máxima anual en la SC-03 (Domínguez et al., 2018b). Mediante el método de la precipitación media de las isoyetas (Aparicio, 2017) se obtuvo un valor medio para la cuenca de $\overline{hp} = 58.8 \text{ mm}$.

hp	Área	A * hp
62	--	--
60	61	1.363
58	59	21.184
56	57	4.109
$\Sigma=$	26.656	1567.212
hp media		58.8

RIESGO POR INUNDACIÓN EN JOJUTLA

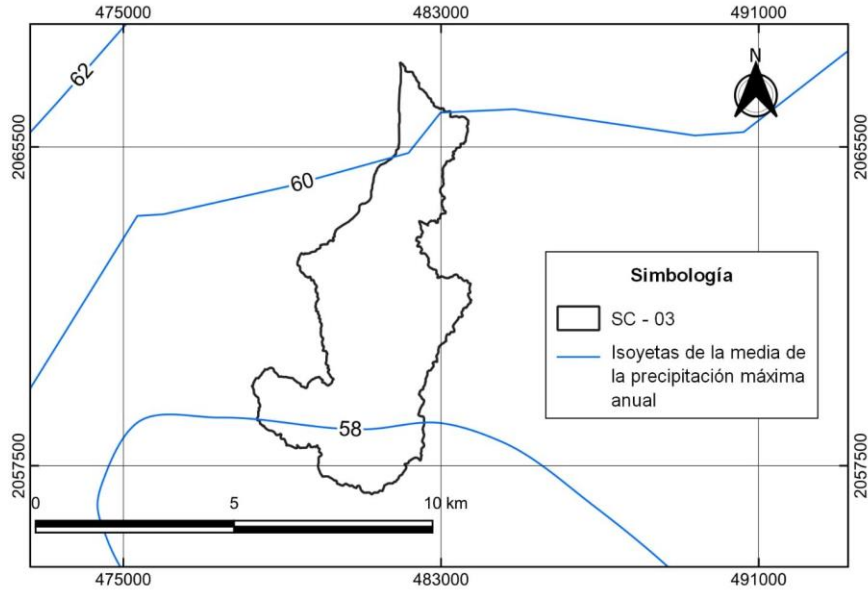


Figura 3-7 Isoyetas de la media de la precipitación acumulada en 24 horas máxima anual en la SC-03.

Fuente: Domínguez et al., 2018b

De acuerdo a la localización geográfica, la zona de estudio forma parte de la región homogénea número 29 denominada Morelos. Los factores por periodo de retorno que le corresponden a esta región se muestran en la Tabla 3-4.

Tabla 3-4 Factor por periodo de retorno para la región homogénea de Morelos

Tr [años]	10	20	50	100
Factor	1.39	1.56	1.77	1.93

Fuente: Domínguez et al. 2017

Tabla 3-5 3-6 Precipitación en 24 h asociada a distintos Tr

Tr [años]	10	20	50	100
hp 24h [mm]	81.7	91.7	104.1	113.5

RIESGO POR INUNDACIÓN EN JOJUTLA

Análisis regional Jojutla

En el análisis regional para estimar las precipitaciones de diseño en la ciudad de Jojutla se emplearon ocho estaciones climatológicas en operación (Tabla 3-7) cercanas a la zona de estudio, como se aprecia en la Figura 3-8.

Tabla 3-7 Estaciones climatológicas

Estación			
17013	Temilpa	17031	Jojutla (DGE)
17016	Tequesquitengo	17072	Alpuyeca
17018	Ticuman	17076	Puente de Ixtla
17026	CAE La Victoria	17077	Xoxocotla

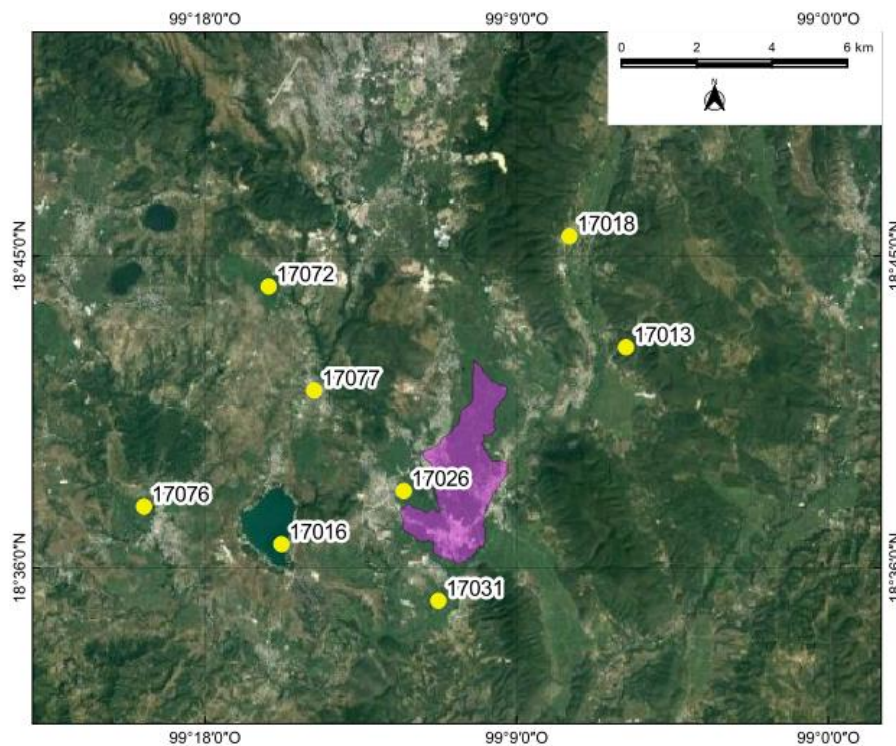


Figura 3-8 Distribución espacial de las estaciones climatológicas

Fuente: Elaboración propia

Para cada estación se obtuvieron los datos de precipitación máxima anual, y en primer lugar, se realizó un control de calidad de datos, donde únicamente se consideraron aquellos registros en los que en la temporada de lluvia (junio-septiembre) no se presentaron datos faltantes, como se puede apreciar en la Tabla 3-8.

RIESGO POR INUNDACIÓN EN JOJUTLA

Tabla 3-8 Precipitación máxima anual

Año	Estación							
	17013	17016	17018	17026	17031	17072	17076	17077
1955	65	44.5						
1956		39.8	42					
1957	37.1	42	33					
1958	65.5	52	59					
1959	52.2	57	62					
1960	40.1	98.5						
1961	43.8	46.5	30	47.2				
1962	60.9	52	45	58.8				
1963	49	61	48.5	38.9				
1964	62	39	30	34.8				
1965	41	45	46	91.3				
1966	45.2	41	53	36.6				
1967	58	42.4	52	47.1				
1968	41.5	39	71.5	36				
1969	45	67	81	65.9		48		
1970	31	42	35	53.1				
1971	74	49	75	47				
1972	70	47	59	74.3				
1973	45	57		48.2				
1974	64	60.1	57	49.9			40	
1975	43.7	61	41.5				39	
1976	54	37.2	78.2	61.8			47.5	
1977	87	46.5	41.6	76.3	38	49	51	
1978	68.4	75.5	65.5	63.4	50.5		54	
1979	65.6	36.5	58.8	43.9	60		49.5	
1980	64.3	55	76.1	65.5	74	34	39	
1981	71.8	71.5	66.9	57.1	63.8	82		
1982	64.9	81	63.2	60.6	52	77.2	40	
1983	89.8			90	66.5		53.5	
1984	48.5		68.2	64.7	55		55	
1985	59.6		62	67.4	55	44.2	57	75
1986			59.6	74.2	54.5	44.2	45.5	65.9
1987			69.6	51.3	52.2	40	55	50.2
1988	41.4		73.4	69.9	76		60	96
1989	32		42.6	99	98		63	43.2
1990	46		48.2	44.4	70		56.5	59.6
1991	65.1		73.8	56.3	47.5		70	54
1992			79.4	58.9	53.5		73	57.3
1993	49		55.5	54.3	53.2		66	47.6
1994	79.7		89.8	49.9	45.6		32.3	95
1995	85.5		89.2	57.5	55		44.3	61.3
1996	75		60.8	71.2	37			64.9

RIESGO POR INUNDACIÓN EN JOJUTLA

Año	Estación							
	17013	17016	17018	17026	17031	17072	17076	17077
1997	58.2		55.8	50.1	32.4		50	48.2
1998	69.1	60	67.7	62.3	63.3	56.2	67	60
1999	89	68.8	40	66.7	49.5	52.2	60.3	48
2000	41.7	43.9	63	65.9	45.4	65.6	63.7	50
2001	73	80	80	57.5	60.1	76.5	88.9	
2002	65	66.3	67.4	60.5	76.2	57.1		58.6
2003	76	54.2	75	64.6	70.1	50		92.2
2004	82		82	64	56.5	36.4	66.8	59.7
2005	68.7	53.4	85	54.2	53.5	37	45.8	53.2
2006	48	43.3	78	72.1	50.5	64.9	73.8	
2007	61.5			60	47.5	73	55.5	40.2
2008	62		68	71.3	69.4		90.2	65.2
2009	66		86	48.4	60	70	106.8	58.4
2010	68		57	60.7	54.3	65.2	80.8	58.6
2011	66		77	109	51.2	63.5	76.8	
2012	52.3	47.5	58	45.6	52.2	76.3	104.5	
2013	36.3		34	62.2	52.1	61.3		
2014	63.2	66	92		42.6			
2015		56	53		40.4	53.5	60	
2016		74	96		86.5	60	71.5	
2017						113.5		63.1

Con los datos depurados se calcularon los estadísticos respectivos para cada estación, como se puede observar en la Tabla 3-9.

Tabla 3-9 Estadísticos estaciones climatológicas

	Estación							
	17013	17016	17018	17026	17031	17072	17076	17077
No. Registros	56	40	57	52	40	26	37	25
Media	59.42	54.99	62.42	60.42	56.77	59.65	60.91	61.02
Desviación Estándar	14.89	14.19	16.79	14.99	13.30	17.54	17.54	14.80
Coefficiente de Variación	0.25	0.26	0.27	0.25	0.23	0.29	0.29	0.24
Máximo	89.8	98.5	96	109	98	113.5	106.8	96
Mínimo	31	36.5	30	34.8	32.4	34	32.3	40.2

Los registros de precipitaciones diarias máximas anuales de cada estación se modularon, dividiéndolos entre su media,

Tabla 3-10.

RIESGO POR INUNDACIÓN EN JOJUTLA

Tabla 3-10 Datos modulados

Año	Estación							
	17013	17016	17018	17026	17031	17072	17076	17077
1955	1.09	0.81						
1956		0.72	0.67					
1957	0.62	0.76	0.53					
1958	1.10	0.95	0.95					
1959	0.88	1.04	0.99					
1960	0.67	1.79						
1961	0.74	0.85	0.48	0.78				
1962	1.02	0.95	0.72	0.97				
1963	0.82	1.11	0.78	0.64				
1964	1.04	0.71	0.48	0.58				
1965	0.69	0.82	0.74	1.51				
1966	0.76	0.75	0.85	0.61				
1967	0.98	0.77	0.83	0.78				
1968	0.70	0.71	1.15	0.60				
1969	0.76	1.22	1.30	1.09		0.80		
1970	0.52	0.76	0.56	0.88				
1971	1.25	0.89	1.20	0.78				
1972	1.18	0.85	0.95	1.23				
1973	0.76	1.04		0.80				
1974	1.08	1.09	0.91	0.83			0.66	
1975	0.74	1.11	0.66				0.64	
1976	0.91	0.68	1.25	1.02			0.78	
1977	1.46	0.85	0.67	1.26	0.67	0.82	0.84	
1978	1.15	1.37	1.05	1.05	0.89		0.89	
1979	1.10	0.66	0.94	0.73	1.06		0.81	
1980	1.08	1.00	1.22	1.08	1.30	0.57	0.64	
1981	1.21	1.30	1.07	0.95	1.12	1.37		
1982	1.09	1.47	1.01	1.00	0.92	1.29	0.66	
1983	1.51			1.49	1.17		0.88	
1984	0.82		1.09	1.07	0.97		0.90	
1985	1.00		0.99	1.12	0.97	0.74	0.94	1.23
1986			0.95	1.23	0.96	0.74	0.75	1.08
1987			1.12	0.85	0.92	0.67	0.90	0.82
1988	0.70		1.18	1.16	1.34		0.99	1.57
1989	0.54		0.68	1.64	1.73		1.03	0.71
1990	0.77		0.77	0.73	1.23		0.93	0.98
1991	1.10		1.18	0.93	0.84		1.15	0.89
1992			1.27	0.97	0.94		1.20	0.94
1993	0.82		0.89	0.90	0.94		1.08	0.78
1994	1.34		1.44	0.83	0.80		0.53	1.56
1995	1.44		1.43	0.95	0.97		0.73	1.00

RIESGO POR INUNDACIÓN EN JOJUTLA

Año	Estación							
	17013	17016	17018	17026	17031	17072	17076	17077
1996	1.26		0.97	1.18	0.65			1.06
1997	0.98		0.89	0.83	0.57		0.82	0.79
1998	1.16	1.09	1.08	1.03	1.11	0.94	1.10	0.98
1999	1.50	1.25	0.64	1.10	0.87	0.88	0.99	0.79
2000	0.70	0.80	1.01	1.09	0.80	1.10	1.05	0.82
2001	1.23	1.45	1.28	0.95	1.06	1.28	1.46	
2002	1.09	1.21	1.08	1.00	1.34	0.96		0.96
2003	1.28	0.99	1.20	1.07	1.23	0.84		1.51
2004	1.38		1.31	1.06	1.00	0.61	1.10	0.98
2005	1.16	0.97	1.36	0.90	0.94	0.62	0.75	0.87
2006	0.81	0.79	1.25	1.19	0.89	1.09	1.21	
2007	1.03			0.99	0.84	1.22	0.91	0.66
2008	1.04		1.09	1.18	1.22		1.48	1.07
2009	1.11		1.38	0.80	1.06	1.17	1.75	0.96
2010	1.14		0.91	1.00	0.96	1.09	1.33	0.96
2011	1.11		1.23	1.80	0.90	1.06	1.26	
2012	0.88	0.86	0.93	0.75	0.92	1.28	1.72	
2013	0.61		0.54	1.03	0.92	1.03		
2014	1.06	1.20	1.47		0.75			
2015		1.02	0.85		0.71	0.90	0.99	
2016		1.35	1.54		1.52	1.01	1.17	
2017						1.90		1.03

Tabla 3-11 Estadísticos por estación de los datos modulados

	Estación							
	17013	17016	17018	17026	17031	17072	17076	17077
No. Registros	56	40	57	52	40	26	37	25
Media	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
Desviación Estándar	0.25	0.26	0.27	0.25	0.23	0.29	0.29	0.24
Coefficiente de Variación	0.25	0.26	0.27	0.25	0.23	0.29	0.29	0.24
Máximo	1.51	1.79	1.54	1.80	1.73	1.90	1.75	1.57
Mínimo	0.52	0.66	0.48	0.58	0.57	0.57	0.53	0.66

Como se observa en la Tabla 3-11, los datos modulados tienen una media igual a 1 y una desviación estándar similar, por lo que se considera que las estaciones pertenecen a una misma región homogénea.

Los valores modulados de la

RIESGO POR INUNDACIÓN EN JOJUTLA

Tabla 3-10 se agruparon para formar una muestra ampliada de 333 datos, y empleando el software AX (Jiménez, 1992) se ajustaron diversas funciones de distribución de probabilidad, de las cuales Gumbel por Momentos, Gumbel Máxima Verosimilitud y Doble Gumbel presentaron el menor error estándar de ajuste, como se observa en la Tabla 3-12.

Tabla 3-12 Error Estándar de Ajuste

Gumbel Momentos	Gumbel Máxima Verosimilitud	Doble Gumbel
0.026	0.032	0.028

Para el presente trabajo se eligió la función de distribución de probabilidad Gumbel por momentos, al presentar el menor error de ajuste.

Posteriormente, se extrapolaron los valores asociados para distintos periodos de retorno dando como resultados los denominados Factores de regionalización de la Tabla 3-13.

Tabla 3-13 Factores de regionalización para la ciudad de Jojutla

Tr [años]	10	20	50	100
Factor	1.33	1.48	1.67	1.81

Con la media de las estaciones de la Tabla 3-9 y un software de procesamiento de información se generaron las isoyetas de la Figura 3-9.

RIESGO POR INUNDACIÓN EN JOJUTLA

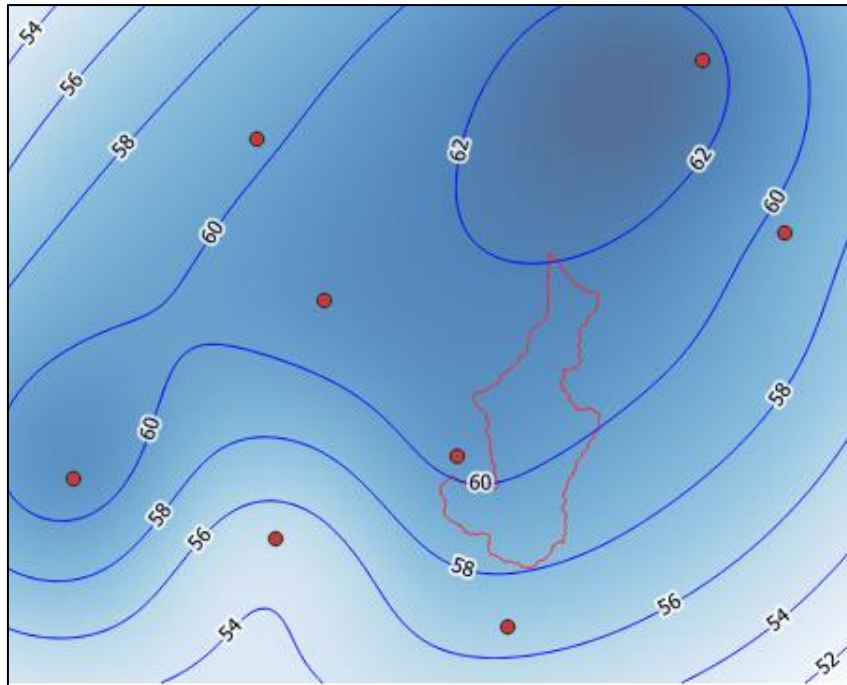


Figura 3-9 Isoyetas de la media de la precipitación máxima anual de la zona de estudio

Mediante el método de la precipitación media de las isoyetas (Aparicio, 2017) se obtuvo un valor medio para la cuenca de $\overline{hp} = 60.2 \text{ mm}$, como se observa en la Tabla 3-14.

Tabla 3-14 Precipitación media

Entre Isoyetas	hp	Área	A * hp
64 - 62	63	0.05	3.09
62 - 60	61	15.75	960.52
60 - 58	59	10.86	640.86
	$\Sigma=$	26.66	1,604.47
	hp media		60.2

Finalmente, se obtuvo la precipitación máxima en 24 horas asociada a los diferentes periodos de retorno, para lo cual se multiplicó la precipitación media de la Tabla 3-14 por los factores de regionalización de la Tabla 3-13.

Tabla 3-15 Precipitación en 24 h asociada a distintos Tr para la ciudad de Jojutla

RIESGO POR INUNDACIÓN EN JOJUTLA

Tr [años]	10	20	50	100
hp 24h [mm]	80.1	89.1	100.5	108.9

Comparativa del análisis regional

Una vez calculadas las precipitaciones máximas anuales en 24h asociadas a los diferentes periodos de retorno para la ciudad de Jojutla empleando las 8 estaciones climatológicas y los factores de regionalización del CENAPRED se observa que, estos son muy similares, quedando ligeramente por encima los obtenidos por el CENAPRED, por lo que se considera adecuado su uso al ser más conservadores.

Tabla 3-16 Comparativa precipitaciones máximas anuales en 24 h

Tr [años]	10	20	50	100
CENAPRED hp 24h [mm]	81.7	91.7	104.1	113.5
Análisis Jojutla hp 24h [mm]	80.1	89.1	100.5	108.9

Factor de reducción por área

En cuencas de tamaño considerable no es frecuente que se presenten eventos de precipitación máximos simultáneos a lo largo de toda la cuenca debido a su extensión. Entonces, dado que las isoyetas de la Figura 3-7 corresponden a estimaciones puntuales de precipitación que tienden a sobrestimar los eventos de diseño es recomendable aplicar un factor de reducción por área (Domínguez et al., 2017). Sin embargo, los estudios para determinar las expresiones para determinar el FRA no se han realizado en toda la República Mexicana. En la Figura 3-10 se muestran las zonas en México que cuentan con el estudio para la determinación del FRA, donde se aprecia que para Jojutla no existe dicho estudio.

RIESGO POR INUNDACIÓN EN JOJUTLA

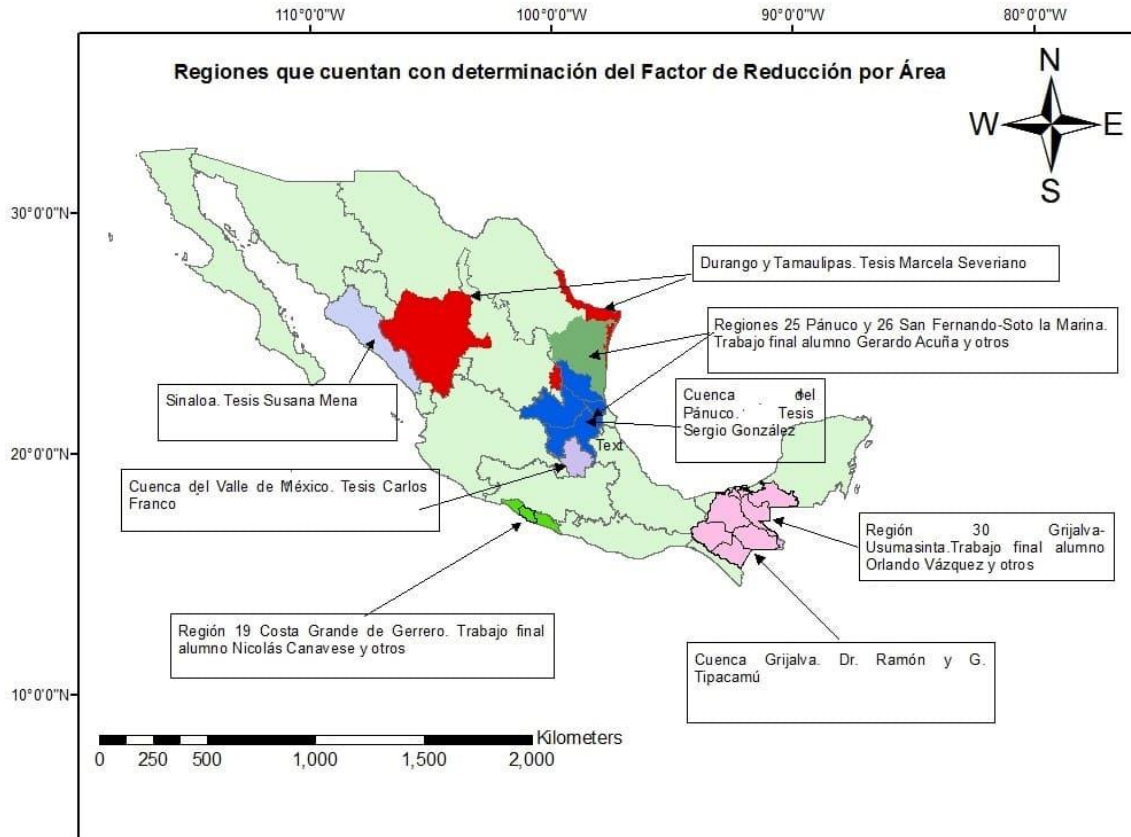


Figura 3-10 Zonas que cuentan con determinación del Factor de Reducción por Área

Fuente: Domínguez et al., 2017

Por otra parte, cercano a la zona de estudio se localiza la cuenca del Valle de México, la cual cuenta con este tipo de estudio. Bajo la suposición de cercanía y que ambos sitios cuentan con un clima similar, se adoptó la expresión $-0.052 \cdot \ln(A) + 0.9782$ para estimar el FRA de dicho sitio (Domínguez et al. 2017), obteniendo un $FRA = 0.744$ para la SC – 03.

Finalmente, al multiplicar los factores de la Tabla 3-4 por la media de la precipitación máxima anual de la cuenca y el FRA se obtiene la precipitación máxima en 24h asociada a distintos periodos de retorno para la SC-03. Esta se muestra en la Tabla 3-17.

Tabla 3-17 Precipitación máxima en 24h asociada a distintos Tr para la SC – 03

Tr [años]	10	20	50	100
hp 24h [mm]	60.8	68.3	77.5	84.5

RIESGO POR INUNDACIÓN EN JOJUTLA

3.3.2 Relación $hp-d-Tr$

La precipitación estimada en la Tabla 3-17 corresponde con la precipitación acumulada en 24h, sin embargo, es necesario conocer está para duraciones menores.

Existen varios métodos para obtener la altura de precipitación para diferentes duraciones a partir de la precipitación en 24h. Baeza (2007) definió para la República Mexicana un factor denominado factor de conectividad R , que relaciona la precipitación en 1h con la de 24h y es independiente del periodo de retorno. La relación se define como:

$$R = \frac{hp_{1hr}^{Tr}}{hp_{24hr}^{Tr}} \quad (3.5)$$

Donde:

R : Factor de conectividad [adim].

hp_{1hr}^{Tr} : Precipitación con duración de 1h y asociada a un Tr [mm].

hp_{24hr}^{Tr} : Precipitación con duración de 24h y asociada a un Tr [mm].

En la Figura 3-11 se muestra el factor de conectividad para la República Mexicana estimado por Baeza (2007). De acuerdo a este, a la zona de estudio le corresponde un $R = 0.65$. A partir de este valor es posible estimar la precipitación en 1h para los distintos periodos de retorno.

RIESGO POR INUNDACIÓN EN JOJUTLA

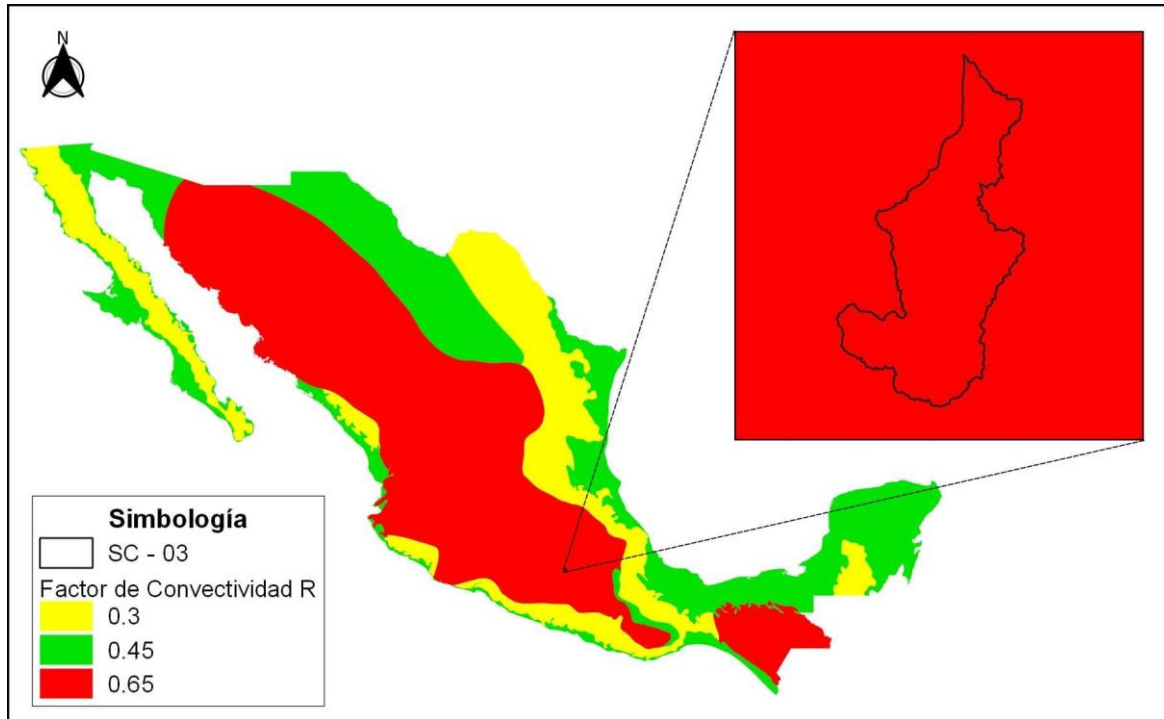


Figura 3-11 Factor de convectividad para la SC – 03

Fuente: Baeza (2007)

Así mismo, Lozoya et al. (2017) determinaron una serie de valores K asociados a R para diferentes duraciones con los cuales es posible obtener la precipitación para diferentes duraciones menores a 24h (Figura 5). Entonces, la altura de precipitación, para una duración d y un periodo de retorno Tr , se define como:

$$hp_d^{Tr} = K_d^R hp_{1hr}^{Tr} \quad (3.6)$$

Donde:

hp_d^{Tr} : Altura de precipitación para una duración d y un periodo de retorno Tr [mm].

K_d^R : Factor K en función del factor R y la duración d [adim].

hp_{1hr}^{Tr} : Altura de precipitación en una hora y un periodo de retorno Tr [adim].

RIESGO POR INUNDACIÓN EN JOJUTLA

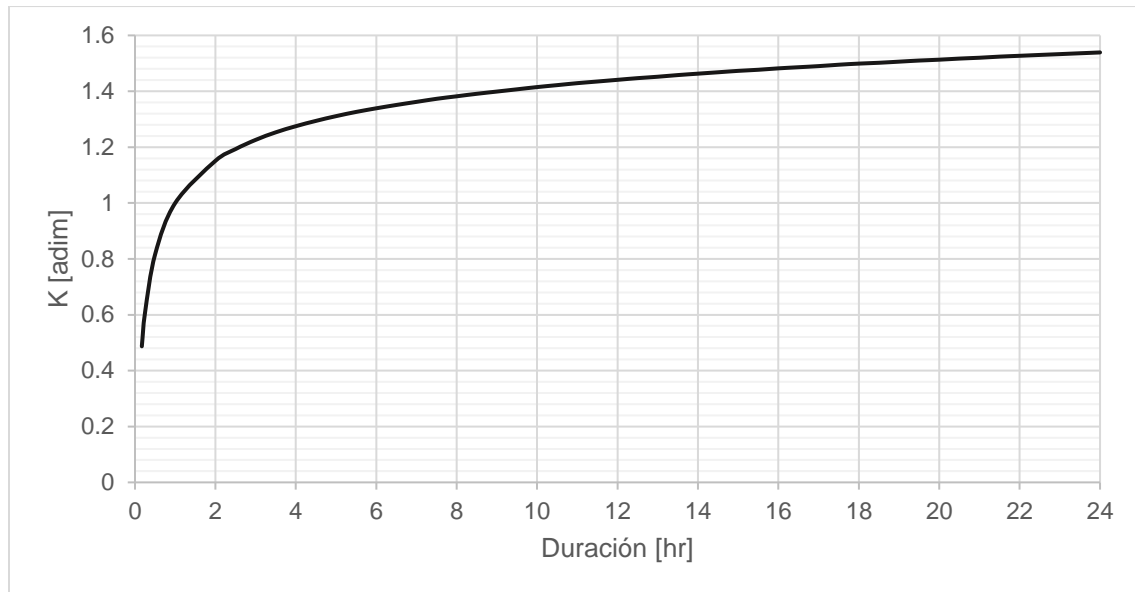


Figura 3-12 Factor K para un $R=0.65$ (Lozoya et al., 2017)

A partir del procedimiento anterior es posible estimar las relaciones $hp-d-Tr$ que se muestran en la Figura 3-13. A partir de estas, se pueden determinar tormentas de diseño en forma de hietograma de altura de precipitación y de intensidades, las cuales se centran, por ejemplo, mediante el método del bloque alterno (Chow, 1994).

En la Figura 3-14 se muestran los hietogramas de intensidades para la SC – 03 asociados a distintos periodos de retorno, los cuales tienen una duración total de 24h con intervalo de bloques igual a 1h.

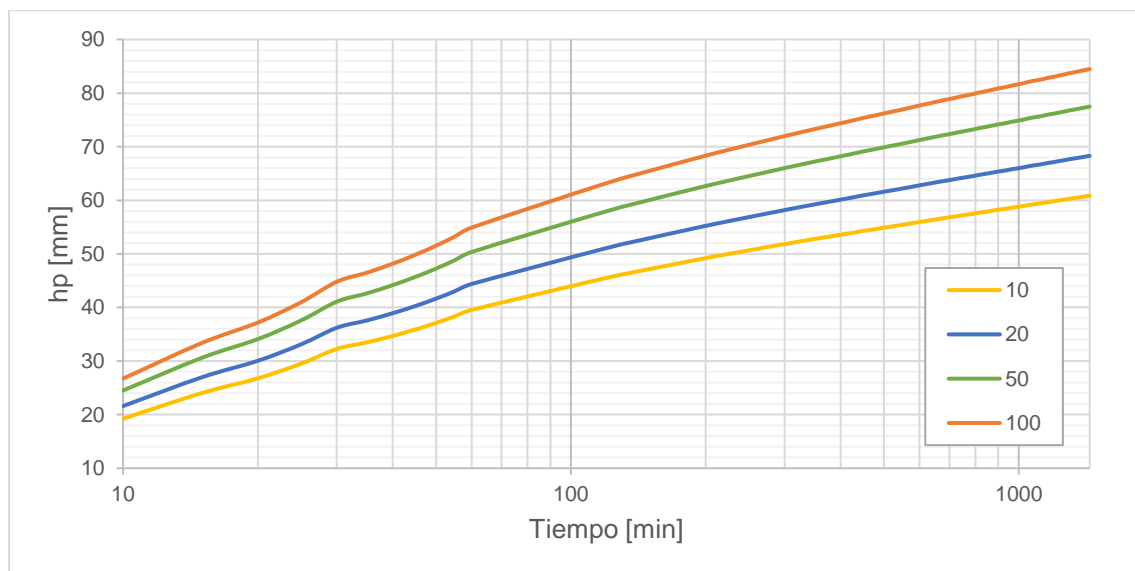


Figura 3-13 Relación $hp-d-Tr$ para la SC – 03

RIESGO POR INUNDACIÓN EN JOJUTLA

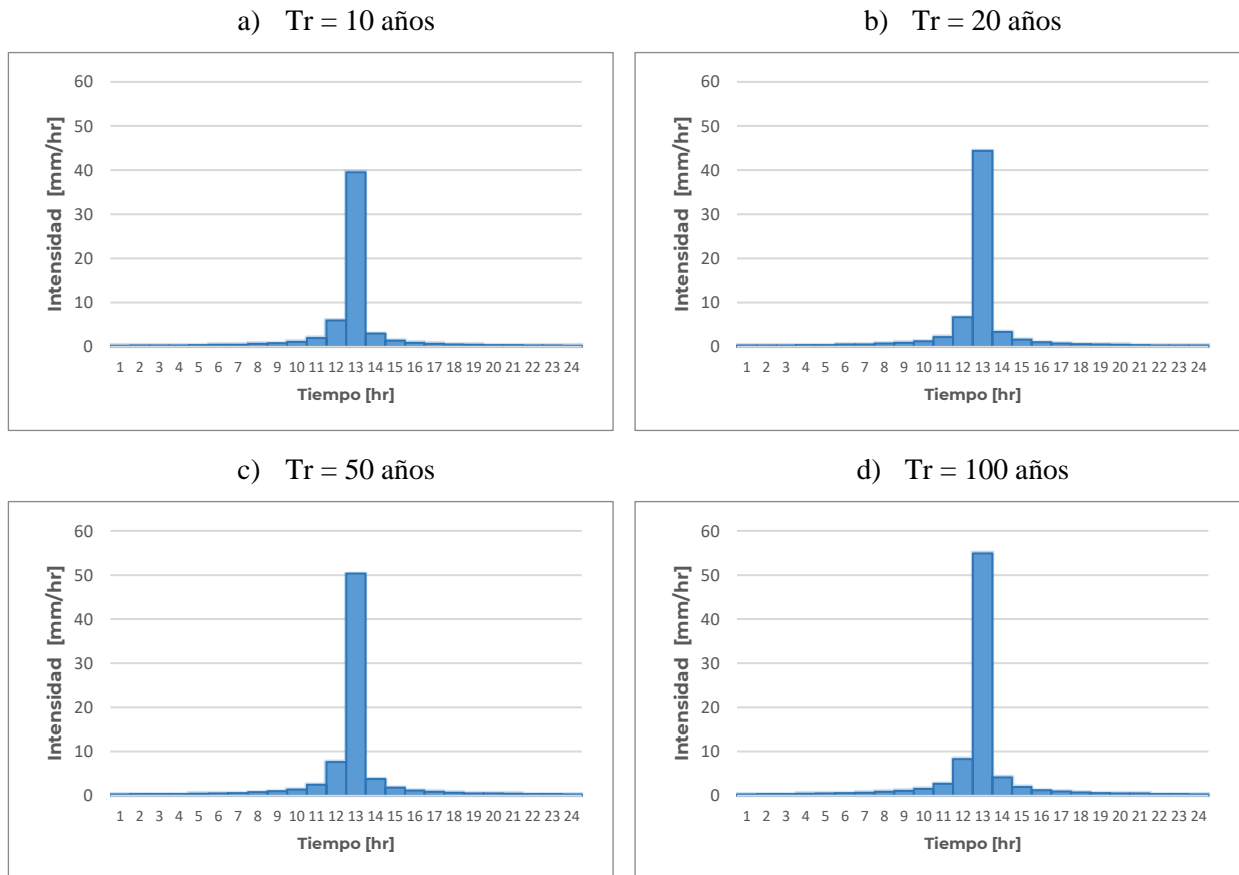


Figura 3-14 Hietogramas de intensidades para la SC – 03

Fuente: elaboración propia

3.3.3 Precipitación efectiva

La parte de la lluvia que provoca el escurrimiento directo se denomina precipitación efectiva (hpe); esta se obtiene separando de la precipitación total, las denominadas pérdidas. Uno de los métodos más utilizados en cuencas no aforadas es el método del número de curva (CN) desarrollado por el Servicio de Conservación de Suelos (SCS) de Estados Unidos. A partir de la altura de precipitación y el valor del número de curva (CN) se obtiene la precipitación efectiva como (Aparicio, 2017):

$$hpe = \frac{\left[hp - \frac{508}{CN} + 5.08 \right]^2}{hp + \frac{2032}{CN} - 20.32} \quad (3.7)$$

Donde:

RIESGO POR INUNDACIÓN EN JOJUTLA

hpe : Precipitación efectiva [cm].

hp : Precipitación total [cm].

La ecuación anterior se aplica cuando la hp supera el umbral de las pérdidas iniciales, definidas como el 20% de la máxima infiltración posible (S), es decir: $I_a = 0.20S$. Cuando la precipitación es menor que este umbral, la precipitación efectiva es igual a cero. Para el presente estudio se estimó un CN de 89.95. Además, el coeficiente de escurrimiento se define con la relación $C_e = hpe/hp$.

En la Tabla 3-18 se muestra la precipitación efectiva para una duración de 24h, así mismo, se muestra el coeficiente de escurrimiento. El programa Iber tiene la capacidad de estimar la precipitación efectiva tomando en cuenta la distribución temporal de la lluvia utilizando el método del número de curva, entre otros (Caro-Camargo, 2015).

Tabla 3-18 Precipitación efectiva y coeficiente de escurrimiento para la SC – 03

Tr [años]	hp (24h) [mm]	hpe (24h) [mm]	Ce [adim]
10	60.8	36.4	0.599
20	68.3	43.1	0.631
50	77.5	51.4	0.664
100	84.5	57.9	0.686

4 MODELACIÓN HIDRÁULICA

Se entiende por Modelo a la representación de un hecho, fenómeno o sistema real, como ideal a seguir, con cierto grado de precisión y de la forma más completa posible, mostrando las características generales de su estructura, explicando sus elementos, mecanismos y procesos, la interrelación y los aspectos teóricos que le dan sustento, permitiendo el estudio de su comportamiento cuando es imposible trabajar directamente en el (RAE, s.f.; FAO, 1997; Sesento, 2008).

Los modelos se elaboran con diferentes objetivos tales como buscar comprender y explicar procesos, la intención de que un sistema se comporte de la forma deseada, así como para visualizar dinámicas de procesos y elementos. Los requisitos fundamentales son: propósito definido; identificar las consideraciones esenciales y las innecesarias para incorporar o desechar; representar de forma simple la realidad. Puede estar basado en elementos descriptivos, gráficos, analógicos, matemáticos, conceptuales, etc.; sujetos a pruebas, verificaciones, refutaciones e hipótesis. Se pueden clasificar como materiales o formales (físicos o matemáticos), los primeros son costosos y de aplicabilidad limitada, mientras que los segundos son flexibles y de aplicación ilimitada (uso libre o de pago) (Echávez, 1996; FAO, 1997).

El modelo matemático es una herramienta cuyo objetivo es simular un sistema formado por ecuaciones que representan un proceso y en el que la calidad de los resultados depende de la precisión de los datos de entrada y del grado en el que la estructura del modelo representa de forma adecuada el problema en estudio. Un modelo de tipo distribuido toma en cuenta la variabilidad de las características físicas mediante una discretización espacial (Guerrera-Cobián et al., 2013).

Cuando el objetivo del modelo matemático es comprender un proceso, se juzga por qué tan productivo es; y cuando la finalidad es anticipar un proceso con fines prácticos, la importancia está en la precisión. Algunas de las ventajas son: la reducción del tiempo y costo del estudio; capacidad para estudiar procesos difíciles o imposibles de realizar en la práctica; el nivel de detalle de los resultados es ilimitado. Las desventajas son: la pérdida de información relevante sobre el fenómeno y calidad de la información; interpretación de los resultados; inversión para adquisición de

RIESGO POR INUNDACIÓN EN JOJUTLA

hardware y software especializado, la necesidad de personal capacitado (Maldonado y Gómez, 2010; Versteeg y Malalasekera, 2007; Caro-Camargo, 2015).

La mayoría de casos de interés para la ingeniería hidráulica consisten en la delimitación de zonas inundables, diseño de encauzamientos y estructuras hidráulicas, estabilización de márgenes, rotura de presas, rehabilitación de ríos y determinación del riesgo asociado a episodios extraordinarios de lluvia; ahí la importancia de la comprensión del flujo y la dinámica del movimiento, la cual es sumamente compleja (Bladé, 2005; Echávez, 1996; Vásquez, 2003).

La modelación hidráulica consiste en un procedimiento técnico que busca reproducir un fenómeno natural, con el objetivo de determinar la dinámica del agua, mediante modelos físicos y/o matemáticos; aplicando la teoría hidráulica del flujo en lámina libre y métodos numéricos para resolver las ecuaciones de conservación, buscando el control sobre las variables hidráulicas relevantes en diversos puntos de interés, de forma espacial y temporal a medida que se transita un evento desde la entrada hasta la salida del sistema (IDEAM, 2018; Bladé et al., 2014).

La base fundamental de los modelos de flujo en ríos es la topografía del cauce y de las llanuras, las avenidas de diseño asociadas a diferentes periodos de retorno y el uso de suelo y vegetación de la zona de estudio; mediante los cuales se estiman los valores que toman el tirante, velocidad, gasto, etc.; a partir de una serie de hipótesis. En los estudios de riesgo por inundación, la finalidad es la generación de mapas de peligro para los distintos escenarios, mediante los resultados de tirante y velocidad máximas, ya que el adecuado conocimiento de la dinámica fluvial permite implementar acciones correctoras cuando se produce el desbordamiento (Ochoa et al., 2016; García-Navarro et al., 2003; Bladé et al., 2014; Martínez-Cantó y Hidalgo, 2016).

La Dinámica de Fluidos Computacional o CFD (por sus siglas en inglés) es el análisis de sistemas que involucran flujo de fluidos por medio de simulaciones computacionales, estructurados por algoritmos numéricos y una interfaz que permite ingresar los parámetros del problema, analizar y exportar los resultados. Buscan desarrollar soluciones a las ecuaciones de Saint Venant que describen el comportamiento del flujo basado en términos de principios de continuidad (balance de masa) e impulso (balance de energía, segunda ley de Newton), considerando suposiciones y simplificaciones que permiten su aplicación. Generalmente están conformados por tres elementos: el preproceso, solucionador y postproceso. Los resultados de la modelación obtenidos mediante

RIESGO POR INUNDACIÓN EN JOJUTLA

gráficos en el postproceso, han favorecido el entendimiento del fenómeno para personas que no son especialistas (Versteeg y Malalasekera, 2007; IDEAM, 2018).

Algunas situaciones hidráulicas pueden ser descritas mediante un modelo unidimensional, ya sea porque no es necesaria la solución a detalle del flujo o porque su naturaleza es marcadamente unidimensional, como el flujo en un canal. En el caso de geometrías irregulares con contracciones y expansiones abruptas o ríos con curvatura importante, es necesario el uso de un modelo bidimensional, que consideran la influencia de las componentes transversales del flujo (García-Navarro et al., 2003).

Existen diferentes herramientas de modelación numérica que permiten realizar simulaciones; la selección de una u otra dependerá de la precisión deseada, tiempo de elaboración y la capacidad del equipo de cómputo, principalmente. Entre las técnicas más utilizadas para la discretización del problema destaca el esquema implícito de cuatro puntos o de Preissmann y el esquema implícito de Abbott-Ionescu de seis puntos; estas técnicas se caracterizan por su eficiencia, logrando pasos de tiempo largos y espaciados no uniformes con estabilidad. Las más utilizadas son, Mike-21, Sobek o TufLOW2D, que utilizan esquemas en diferencias finitas, implicando limitaciones en la flexibilidad de la malla y en el cálculo de soluciones con discontinuidades. Otras, como Telemac2D que, junto con los módulos de cálculo de SMS y FLOW-2D, utilizan elementos finitos, permitiendo más flexibilidad en la malla de cálculo al ser no estructurada. Actualmente se emplea la metodología de volúmenes finitos, aprovechando el desarrollo de los esquemas para las ecuaciones de las aguas someras; algunas herramientas son Infoworks, Guad2D, las últimas versiones de Mike-21 e Iber (Ochoa et al., 2016; Hernández-Urbe et al., 2017; Bladé et al., 2014; García-Navarro et al., 2003).

En el presente trabajo, para obtener los tirantes y velocidades máximas, se recrean los escenarios de las avenidas de diseño correspondientes a los periodos de retorno de 10, 20, 50 y 100 años; mediante la simulación hidrológica-hidráulica, considerando las características topográficas del río Apatlaco, la cuenca de aportación de la ciudad de Jojutla y el uso de suelo y vegetación; empleando el software Iber, dada la facilidad para plantear el problema geoméricamente, la disponibilidad del módulo hidrológico para la simulación de la lluvia y escurrimiento; y a que es un software de uso libre y gratuito. A continuación, se describe el origen y funcionamiento del software.

RIESGO POR INUNDACIÓN EN JOJUTLA

El Centro de Estudios Hidrográficos, órgano del Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (CEDEX) del Gobierno de España, en colaboración con el Instituto Flumen (Universidad Politécnica de Cataluña y Centro Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería), los Grupos de Ingeniería Matemática (Universidade de Santiago de Compostela) y de Ingeniería del Agua y del Medio Ambiente, GEAMA (Universidad de Coruña), desarrollaron el software Iber para disponer de una herramienta flexible y adaptable para facilitar las leyes en materia de aguas en España (Bladé, et al., 2014).

Iber es un modelo numérico de simulación hidráulica bidimensional para flujo no permanente en lámina libre, cuyo principio teórico hidráulico son las ecuaciones de Saint Venant bidimensionales, o ecuaciones de aguas someras, resueltas a través de esquemas numéricos en volúmenes finitos que permite una gran flexibilidad geométrica para definir el problema, y por lo tanto adecuado para problemas de hidráulica fluvial con geometrías irregulares. Consta de diferentes módulos de cálculo acoplados entre sí, hidrodinámico, hidrológico, de turbulencia y transporte de sedimentos. Por todo lo anterior puede ser aplicado en problemas de simulación de rotura de presas, evaluación de zonas inundables, cálculo de transporte de sedimentos y flujo de marea en estuarios (Caro-Camargo, 2015; Bladé et al., 2014).

Las ecuaciones de St. Venant bidimensionales, no pueden ser resueltas analíticamente en un problema real, por lo cual con el método de volúmenes finitos se realiza el balance de masa y cantidad de movimiento mediante el uso de celdas. Las celdas son definidas como elementos triangulares o cuadriláteros denominados malla, la cual, tiene una gran repercusión en el proceso de cálculo y en la precisión de los resultados, pudiendo ser estructurada o no estructurada, y en la que los valores de las diferentes variables hidráulicas y cálculos son almacenados en el centro de cada celda (Bladé et al., 2014; González-Aguirre et al.; 2016).

El software Iber realiza una discretización espacial y temporal; para la primera evalúa el flujo entre dos elementos utilizando el esquema de Roe, esquema descentrado de primer orden, que toma en cuenta la velocidad y dirección de propagación del flujo según el régimen del mismo, utilizando información del nodo aguas arriba, haciéndolo muy estable, pero poco preciso, para obtener buenos resultados se requiere utilizar una malla con elementos pequeños. Para mejorar la precisión de los resultados sin modificar el tamaño de la malla, Iber permite utilizar el esquema de Minmod, el cual es un esquema descentrado de orden dos, que interpola el flujo entre dos elementos usando

RIESGO POR INUNDACIÓN EN JOJUTLA

información de varios nodos situados aguas arriba, mejorando la precisión de la interpolación, pero haciéndolo menos estable que el de orden uno.

Para la discretización temporal de las ecuaciones de flujo Iber utiliza un esquema explícito, que evalúa el flujo en el instante de tiempo en el nodo situado aguas arriba, un paso de tiempo pequeño implica mayor precisión en el cálculo de la evolución de tirante y velocidad, pero significa un mayor tiempo de cálculo; un paso de tiempo grande implica menor tiempo de cálculo, pero menor precisión. La principal limitación de este tipo de esquema es que está limitado por razones de estabilidad numérica, conocida como condición CFL la cual debe ser menor a 1, cuanto mayor sea el valor, menos tiempo tardará en ejecutarse el cálculo, pero pueden aparecer problemas de convergencia.

Aunque Iber es una herramienta de cálculo en alta resolución para la propagación de avenidas y su origen es hidráulico, por su conformación matemática y carácter distribuido, puede ser utilizado como modelo hidrológico, el cual permite modelar de forma eficiente y precisa los procesos de lluvia y su transformación a escurrimiento, pérdidas por evapotranspiración e infiltración con modelos de uso común, la recarga y almacenamiento en acuíferos y su posterior aportación al flujo superficial. Los métodos de estimación de pérdidas por infiltración empleados son: modelo de pérdidas lineales, método de Horton, modelo de Green Amt y el método de número de curva o Soil Conservation Center (Caro-Camargo, 2015).

El flujo de trabajo en Iber consta de tres componentes: 1) Preproceso, donde se ingresa toda la información que conforma el modelo, dominio, mallado, topografía, datos generales, parámetros de tiempo, condiciones de entrada, salida e internas, para que se ejecute de forma correcta; 2) Cálculo, el cual depende de los métodos numéricos y los recursos computacionales; y 3) Postproceso, donde se pueden visualizar y extraer los resultados. A continuación, se describen a detalle los componentes de la modelación.

RIESGO POR INUNDACIÓN EN JOJUTLA

4.1 Preproceso de Simulación

4.1.1 Dominio y geometría

En Iber es posible ingresar la geometría del modelo de distintas formas, una de las más prácticas es crear esta en forma de vectores en un software especializado en el manejo de este tipo de datos para luego importarlo al programa.

La extensión de los vectores queda definida por el dominio de la simulación, es decir, aquella área en el espacio donde se estimarán los parámetros hidráulicos. Como se mencionó anteriormente, el dominio de simulación del presente trabajo está limitado por la cuenca de la ciudad de Jojutla, como se muestra en la Figura 4-1. Al vector del dominio se le agregaron otros dos más, los cuales representan el cauce y la zona urbana. La finalidad de dividir el dominio es asignar un tamaño distinto de la malla de cálculo según la zona donde se requiera mayor detalle de cálculo, realizando un equilibrio entre tiempo y detalle en de los resultados.

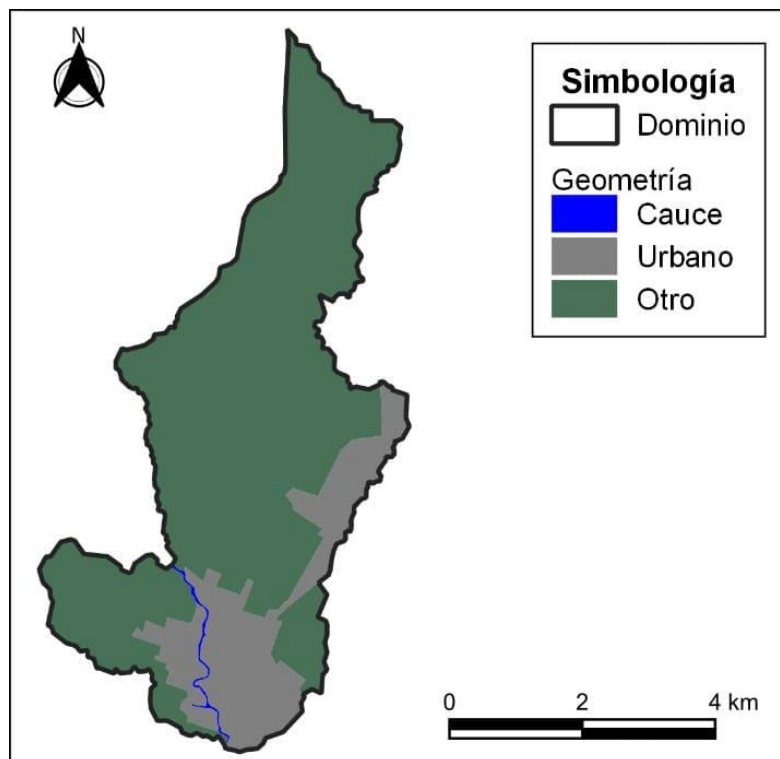


Figura 4-1 Dominio y geometría del modelo

Fuente: elaboración propia

RIESGO POR INUNDACIÓN EN JOJUTLA

4.1.2 Malla y elevación

Como se describió a detalle en la sección anterior, el elemento fundamental de cálculo en Iber son los elementos de la malla del modelo ya que sobre esta se define la elevación topográfica del terreno.

Iber 2D trabaja con mallas estructuradas y no estructuradas formadas por elementos de tres o cuatro lados; lo cual permite la combinación de elementos irregulares dentro de la misma malla. Al modelo de Jojutla se le asignó una malla no estructurada, con un tamaño distinto de acuerdo al nivel de detalle requerido en el espacio; para el cauce, se asignó un tamaño de malla de 5, para la zona urbana de 10 y para el resto del dominio de 50. Ver Figura 4-2.

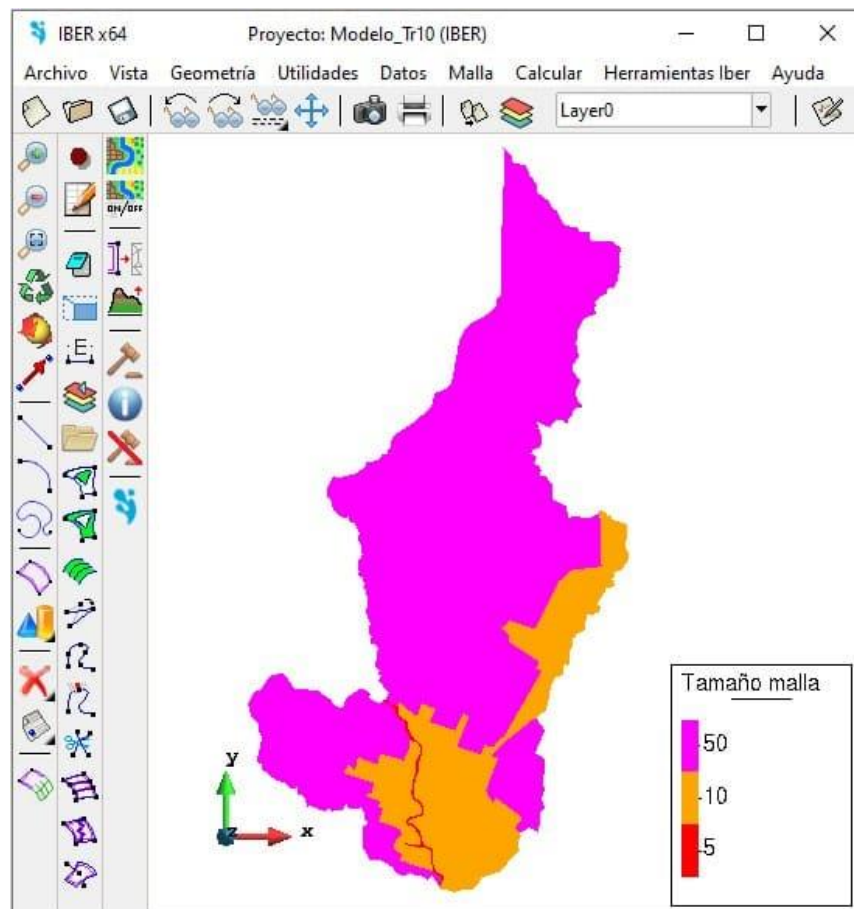


Figura 4-2 Tamaños de malla asignados al modelo

Fuente: elaboración propia

RIESGO POR INUNDACIÓN EN JOJUTLA

Una vez creada la malla se le asignó la elevación a cada elemento a partir de un modelo digital de elevaciones LiDAR de alta resolución (5m) del INEGI (2020). La malla con la elevación del modelo se muestra de forma esquemática en la Figura 4-3.

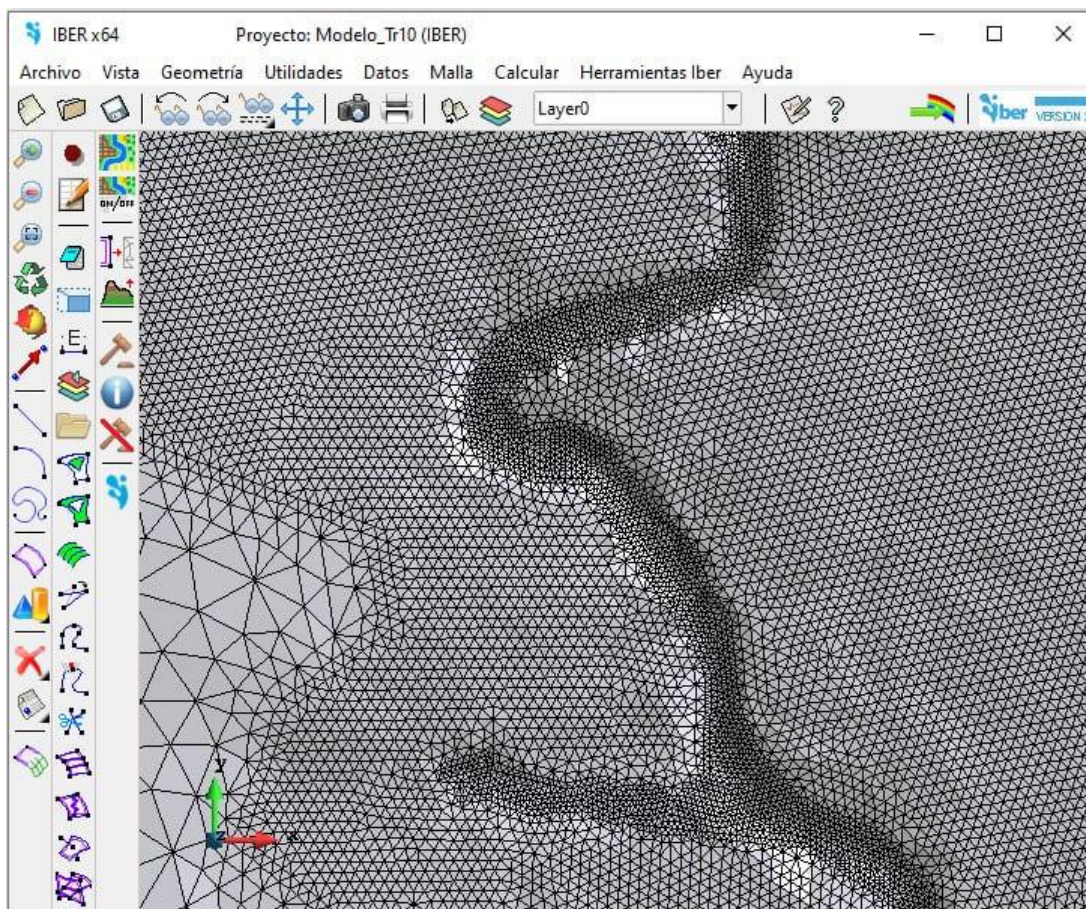


Figura 4-3 Esquema de la malla y la elevación del modelo

Fuente: elaboración propia

4.1.3 Condiciones de contorno e iniciales

Para que el esquema numérico se encuentre definido y sea aplicable a un problema real, es necesario establecer condiciones de contorno (Fernández-Pato y García-Navarro, 2016). Estas pueden ser de entrada o de salida.

La condición de contorno de entrada, corresponde al hidrograma de entrada al dominio resultado de la aportación de la cuenca aguas arriba. Esta se indica en el límite del dominio, en las celdas

RIESGO POR INUNDACIÓN EN JOJUTLA

correspondientes al cauce. Por otro lado, la condición de contorno de salida se estableció a todo el contorno del dominio, excluyendo únicamente la zona donde se estableció la condición de entrada.

4.1.4 Procesos hidrológicos

Los hidrogramas establecidos como condición de contorno de entrada representan el escurrimiento superficial de la cuenca alta, sin embargo, es necesario considerar también los escurrimientos de la cuenca propia de la ciudad, la cual está delimitada por el dominio de la simulación. Para esto, Iber permite ingresar una precipitación en forma de hietograma de intensidades, así como un modelo para simular las perdidas, a partir de estos dos elementos estima y simula el escurrimiento superficial en el dominio. En la Figura 4-4 a) y b) se muestra los procesos hidrológicos de precipitación y perdidas, respectivamente, ingresados al modelo.

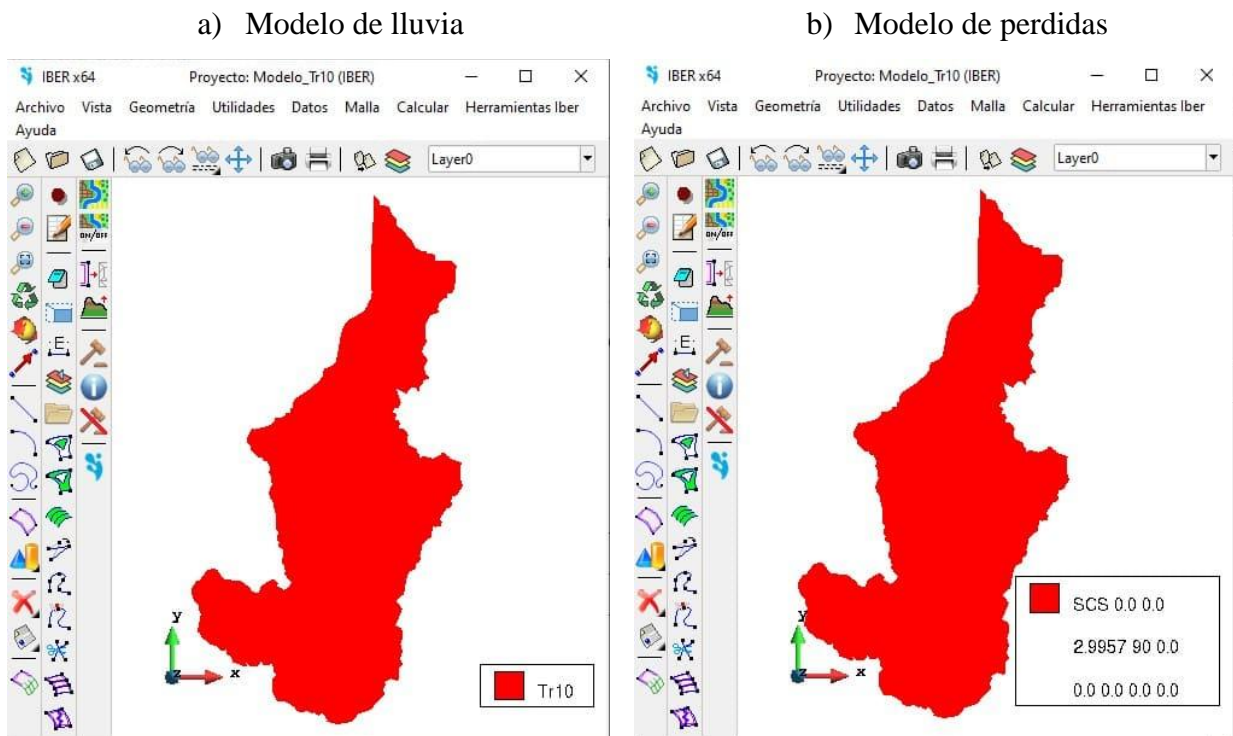


Figura 4-4 Procesos hidrológicos ingresados al modelo

Fuente: elaboración propia

RIESGO POR INUNDACIÓN EN JOJUTLA

4.1.5 Rugosidad

El coeficiente de rugosidad de Manning se asignó de acuerdo con la clasificación de uso de suelo y vegetación como se muestra en la Figura 4-5. Los valores que se asignaron a cada uso corresponden con los valores incluidos en el software Iber, estos se muestran en la Tabla 4-1.

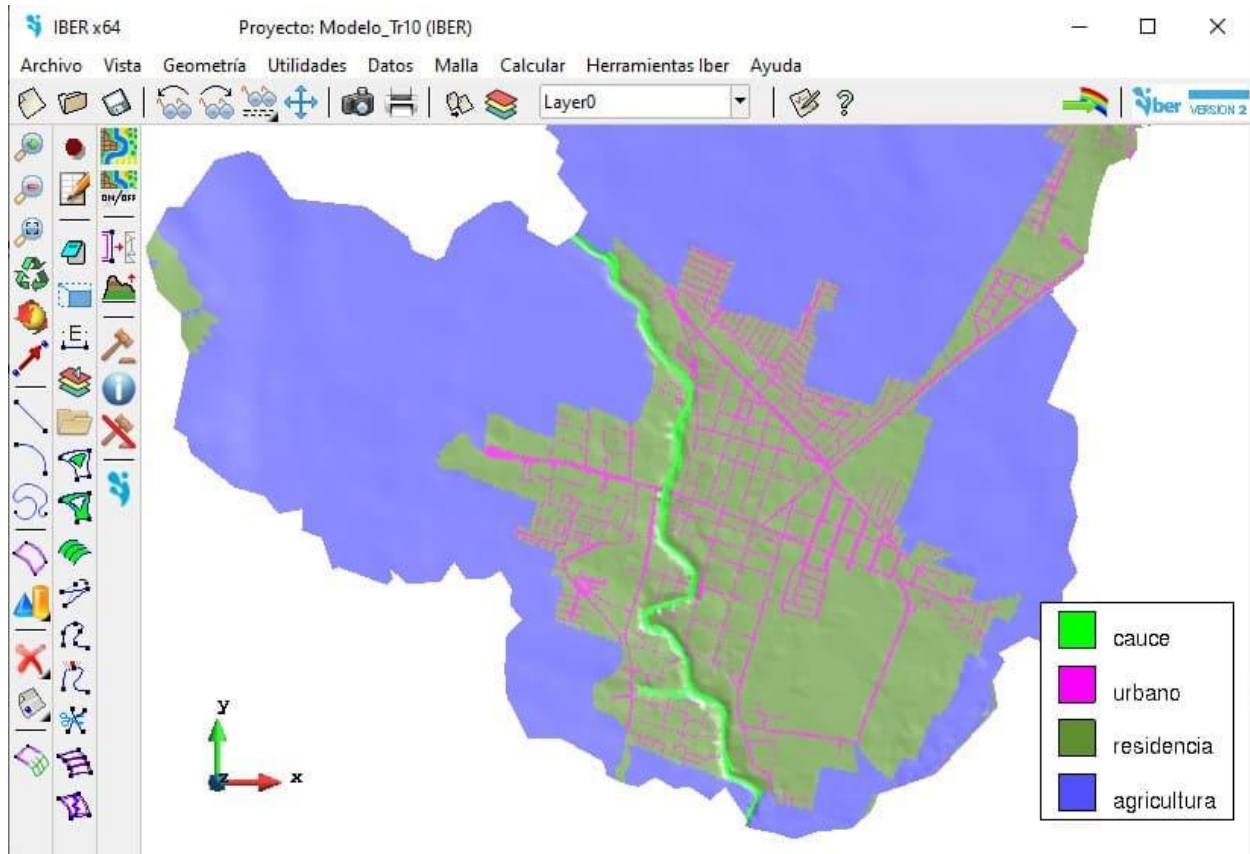


Figura 4-5 Esquema de la rugosidad asignada al modelo

Fuente: elaboración propia

Tabla 4-1 Coeficientes de rugosidad de Manning del modelo

Uso de Suelo	Alias	n
Cauce	cauce	0.025
Calles	urbano	0.02
Manzanas	residencia	0.15
Agricultura	agricultura	0.3

RIESGO POR INUNDACIÓN EN JOJUTLA

4.2 Datos del Problema

Una vez generada la geometría y la malla e indicadas las condiciones de contorno de entrada y salida, iniciales y los modelos de lluvia y pérdidas, es necesario configurar los parámetros de cálculo, entre ellos el tiempo total de simulación y el paso de tiempo para guardar los resultados.

Para definir el tiempo total de simulación se realizó una simulación de prueba con el escenario más adverso, tomando aquel para el cual el modelo ya no mostraba gasto de salida. Se tomó un tiempo total de 216000 segundos (2.5 días), con un paso de tiempo a cada 3600 segundos (1 hora), lo anterior para todos los modelos.

4.3 Mapas de Tirantes y Velocidades Máximas

Los resultados de la modelación numérica son cuantiosos e imposibles de mostrar totalmente, por lo que se emplean medios visuales para representarla a través de mapas.

Se simuló cada uno de los escenarios establecidos (Tr 10, 20, 50 y 100 años), obtenido así los valores de tirantes y velocidades máximas para cada celda y para todo el tiempo de cálculo.

En la Figura 4-6 y Figura 4-7 se muestran los tirantes máximos y las velocidades máximas, respectivamente, asociadas a un periodo de retorno de 10 años; en la Figura 4-8 y Figura 4-9 los tirantes y velocidades máximas, respectivamente, para un periodo de 20 años; en la Figura 4-10 y Figura 4-11 los tirantes y velocidades máximas, respectivamente, para un periodo de retorno de 50 años; y en la Figura 4-12 y Figura 4-13 los tirantes máximos y velocidades máximas, respectivamente, asociadas a un periodo de retorno de 100 años.

RIESGO POR INUNDACIÓN EN JOJUTLA

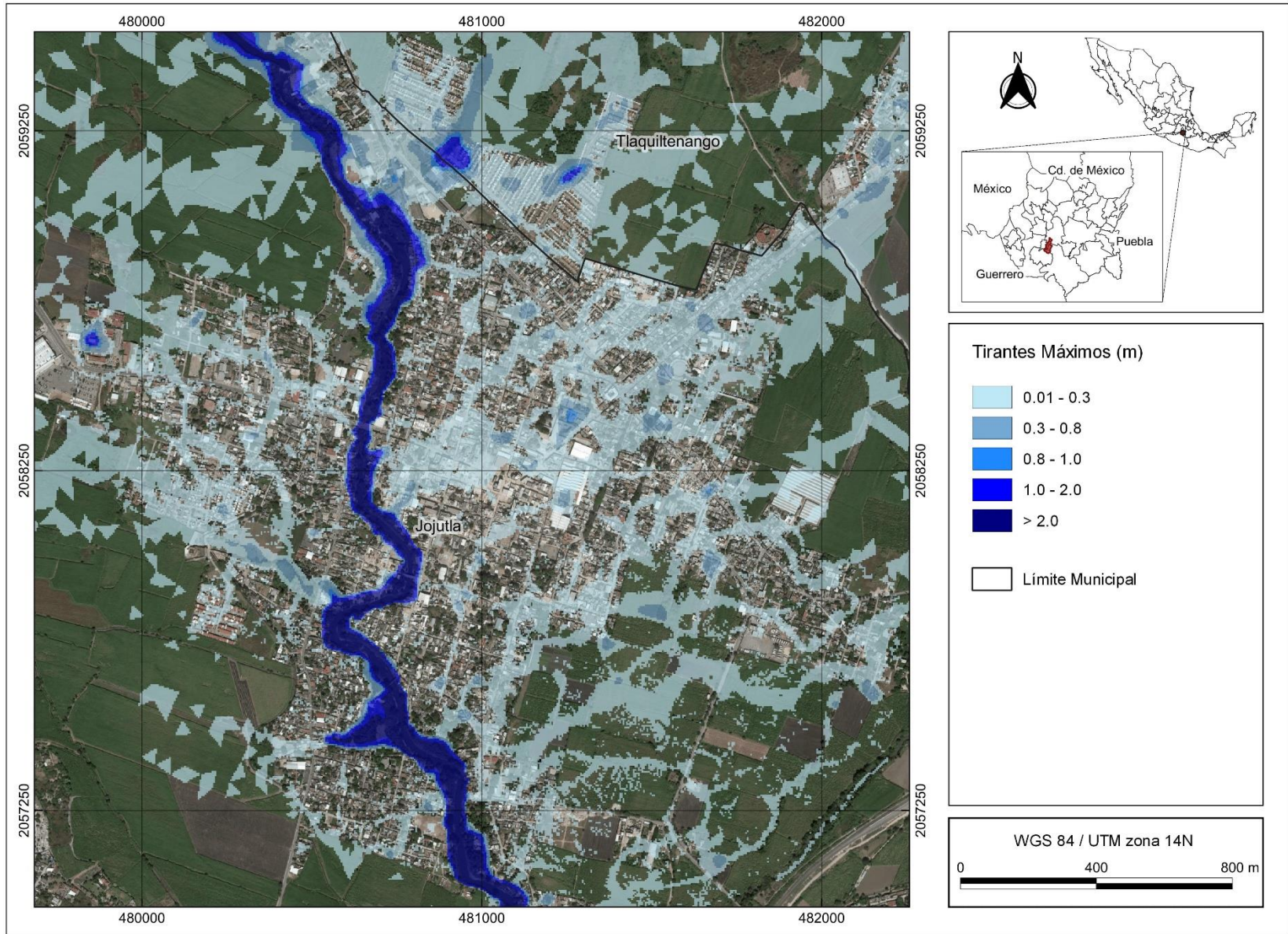


Figura 4-6 Tirantes máximos asociados un Tr = 10 años para la ciudad de Jojutla

RIESGO POR INUNDACIÓN EN JOJUTLA

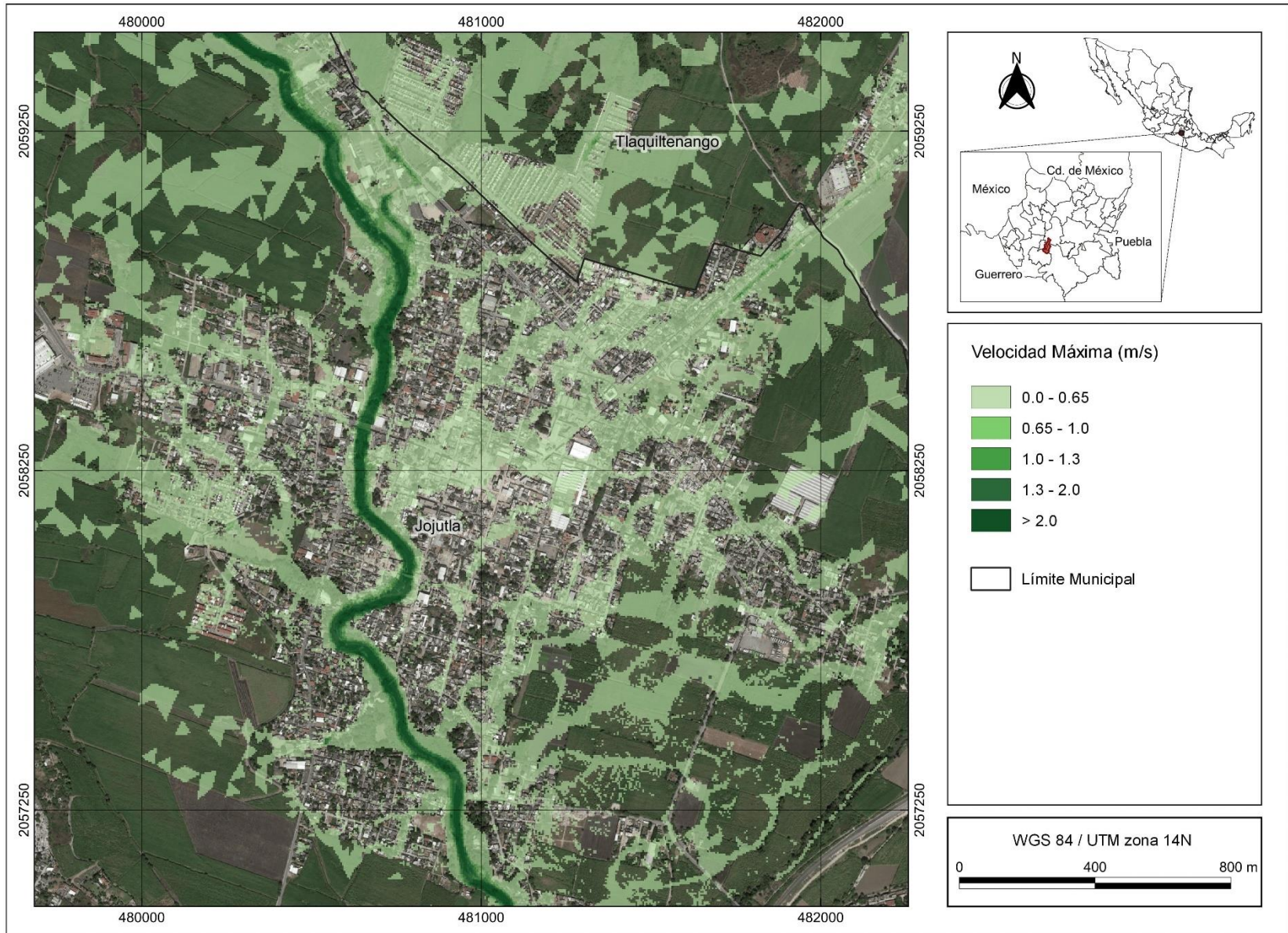


Figura 4-7 Velocidades máximas asociadas a Tr = 10 años para la ciudad de Jojutla

RIESGO POR INUNDACIÓN EN JOJUTLA

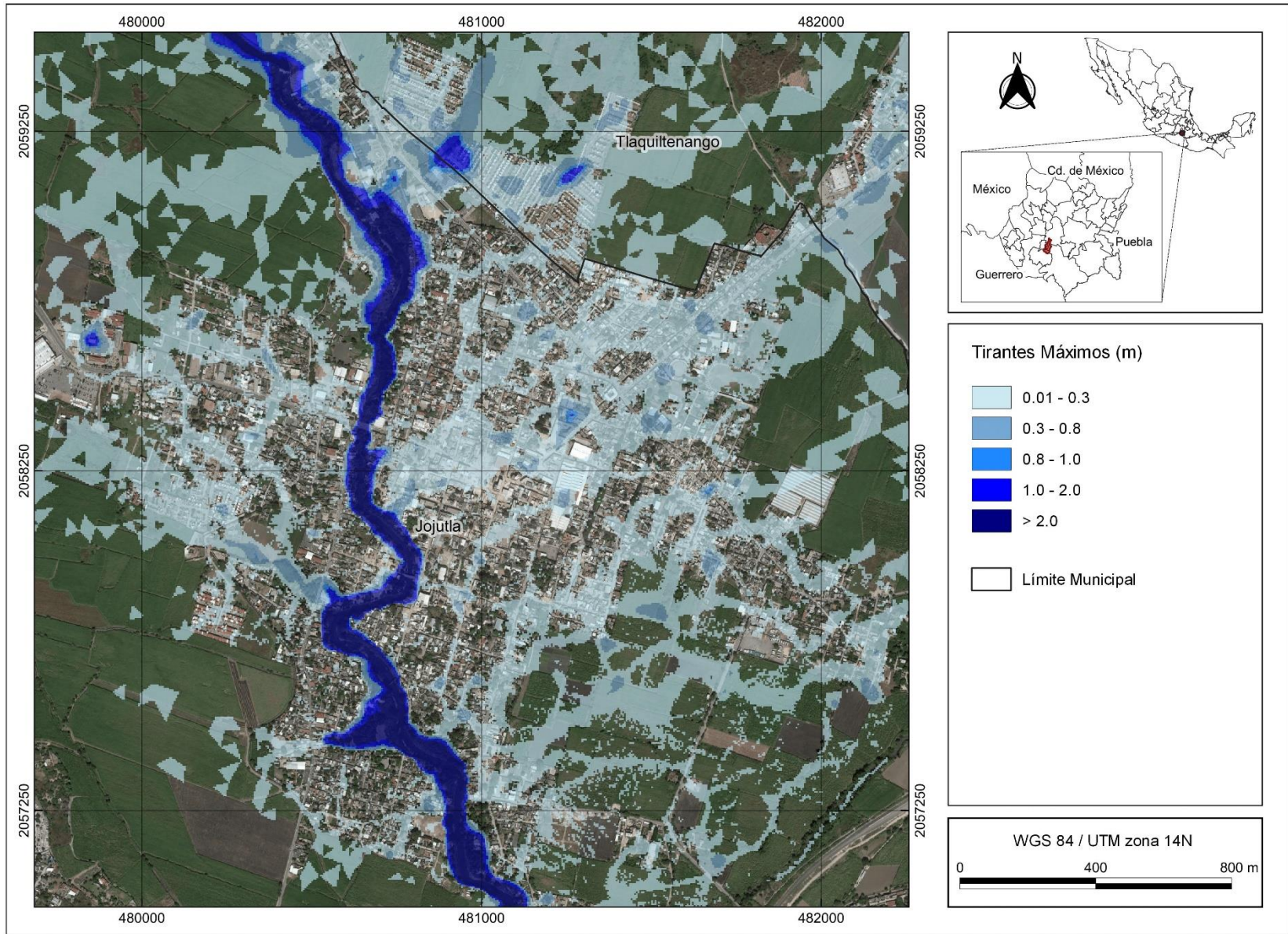


Figura 4-8 Tirantes máximos asociados un Tr = 20 años para la ciudad de Jojutla

RIESGO POR INUNDACIÓN EN JOJUTLA

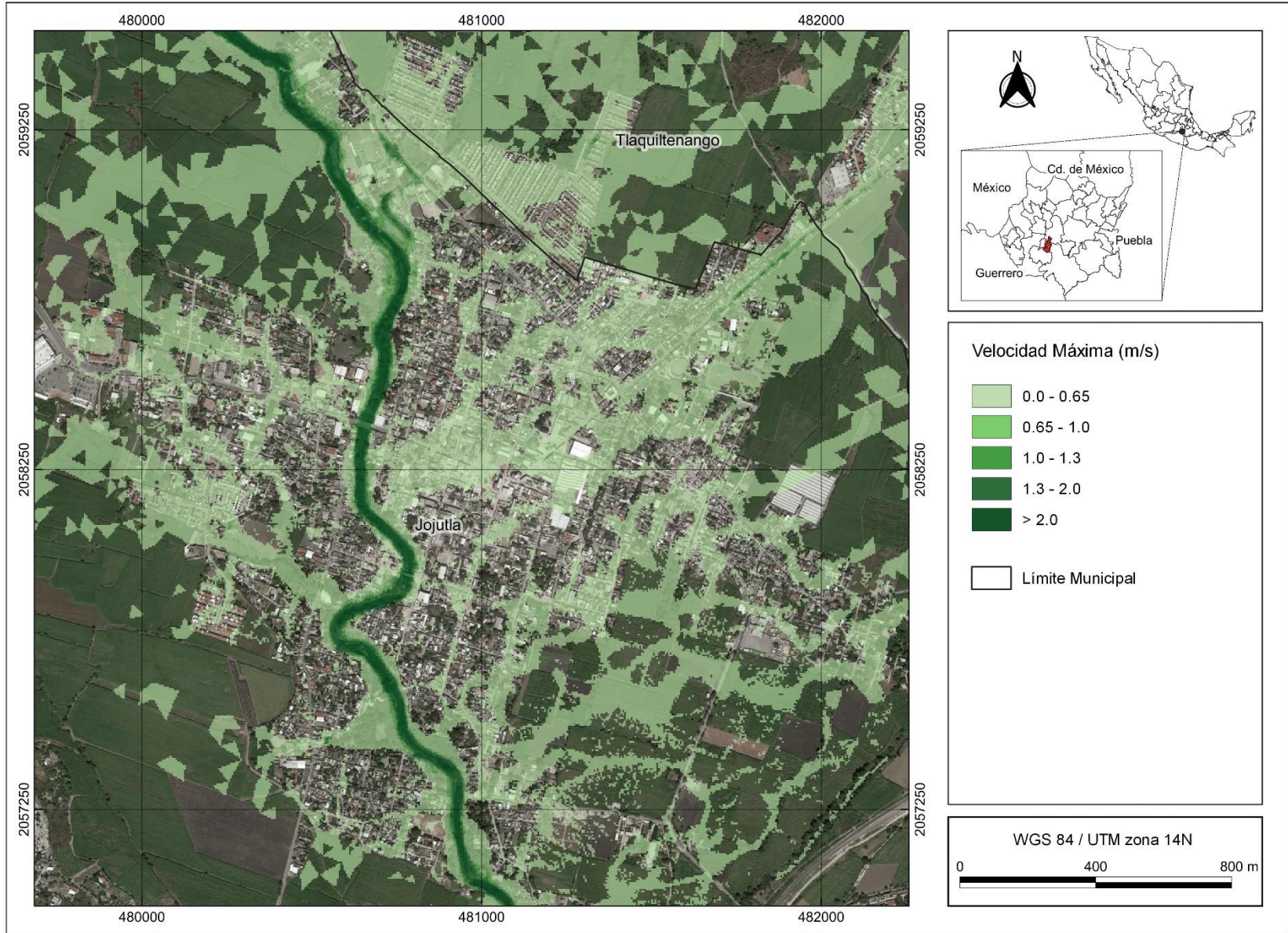


Figura 4-9 Velocidades máximas asociadas a un Tr = 20 años para la ciudad de Jojutla

RIESGO POR INUNDACIÓN EN JOJUTLA

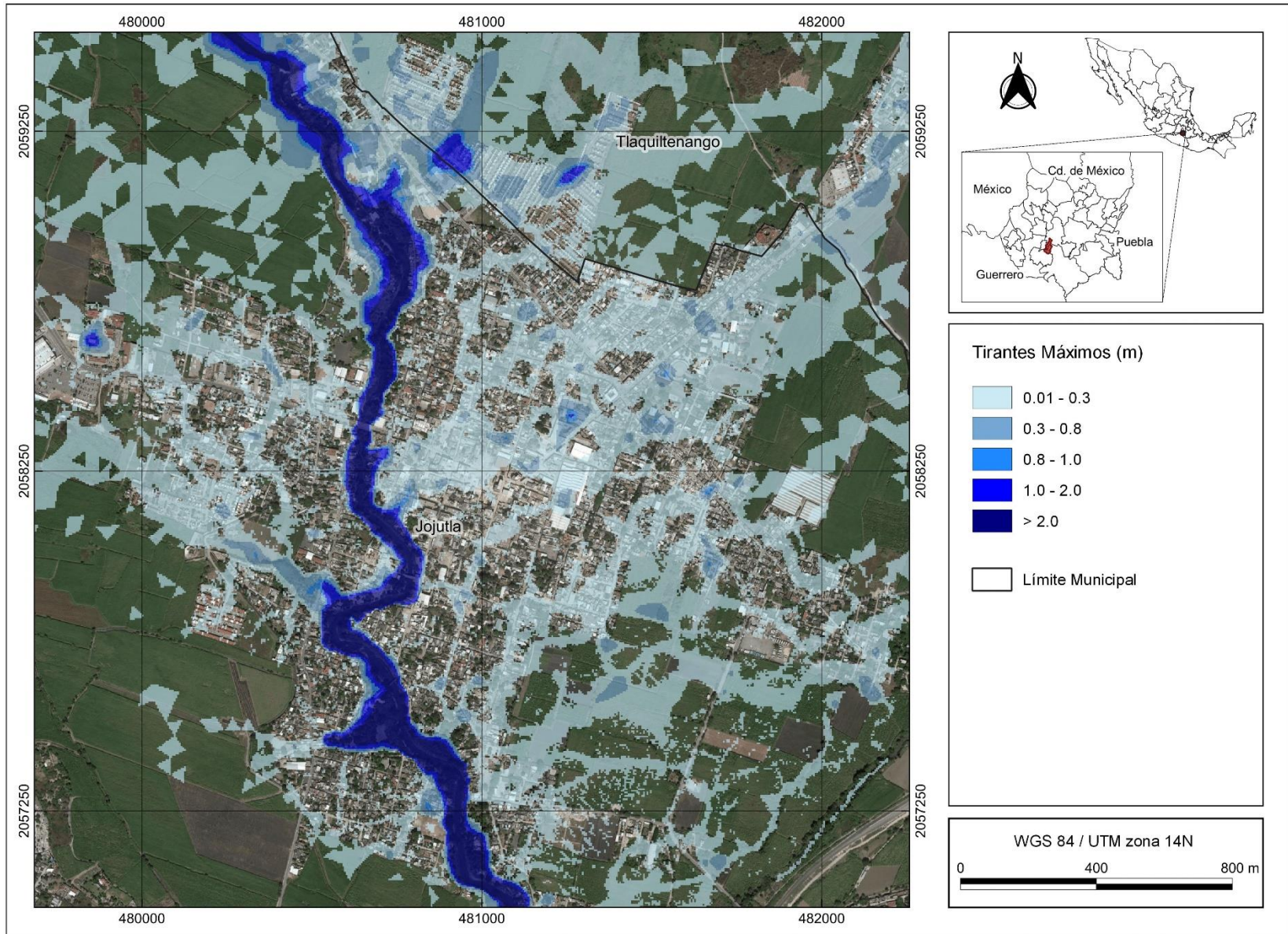


Figura 4-10 Tirantes máximos asociados un Tr = 50 años para la ciudad de Jojutla

RIESGO POR INUNDACIÓN EN JOJUTLA

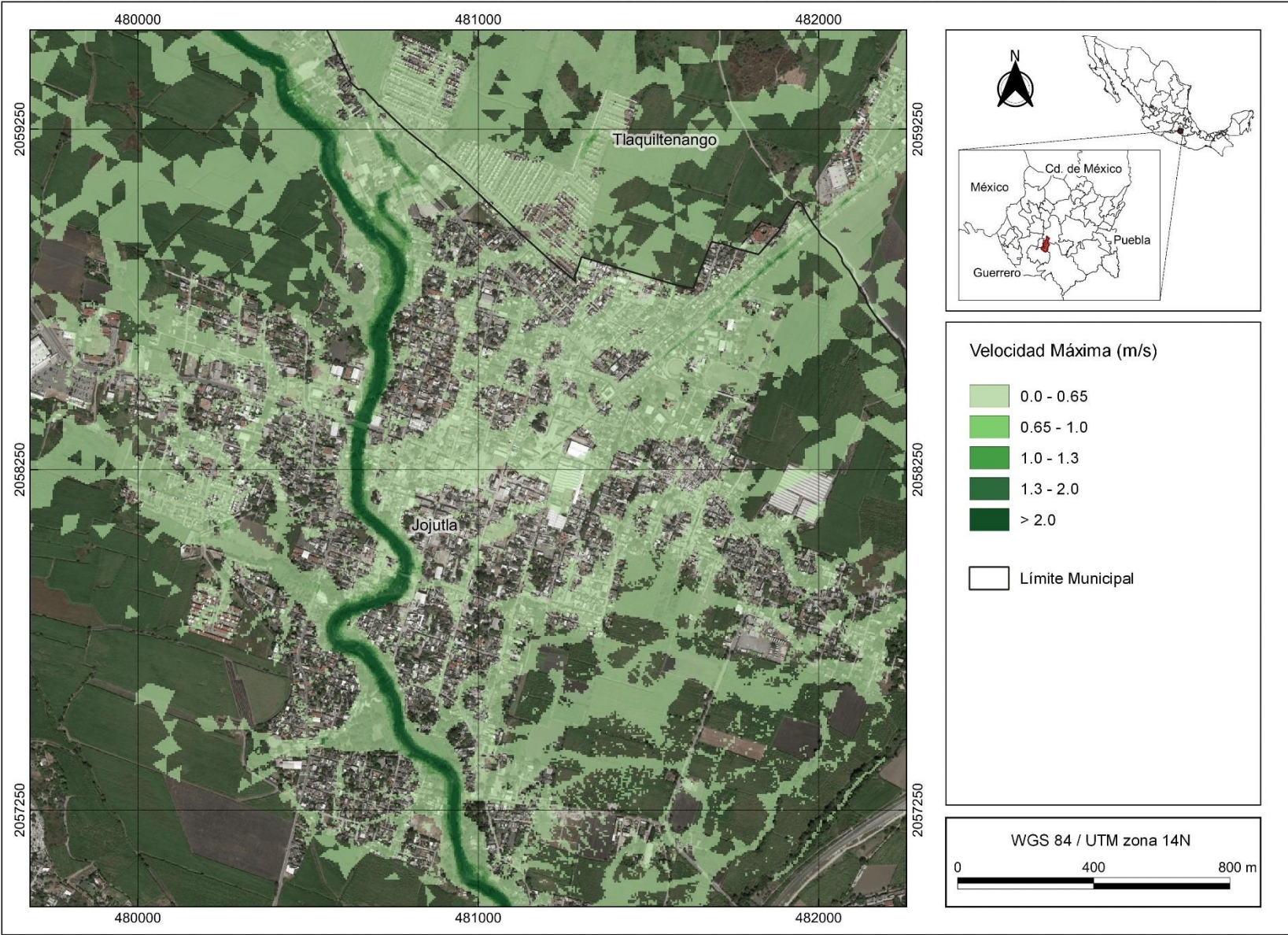


Figura 4-11 Velocidades máximas asociadas a un Tr = 50 años para la ciudad de Jojutla

RIESGO POR INUNDACIÓN EN JOJUTLA

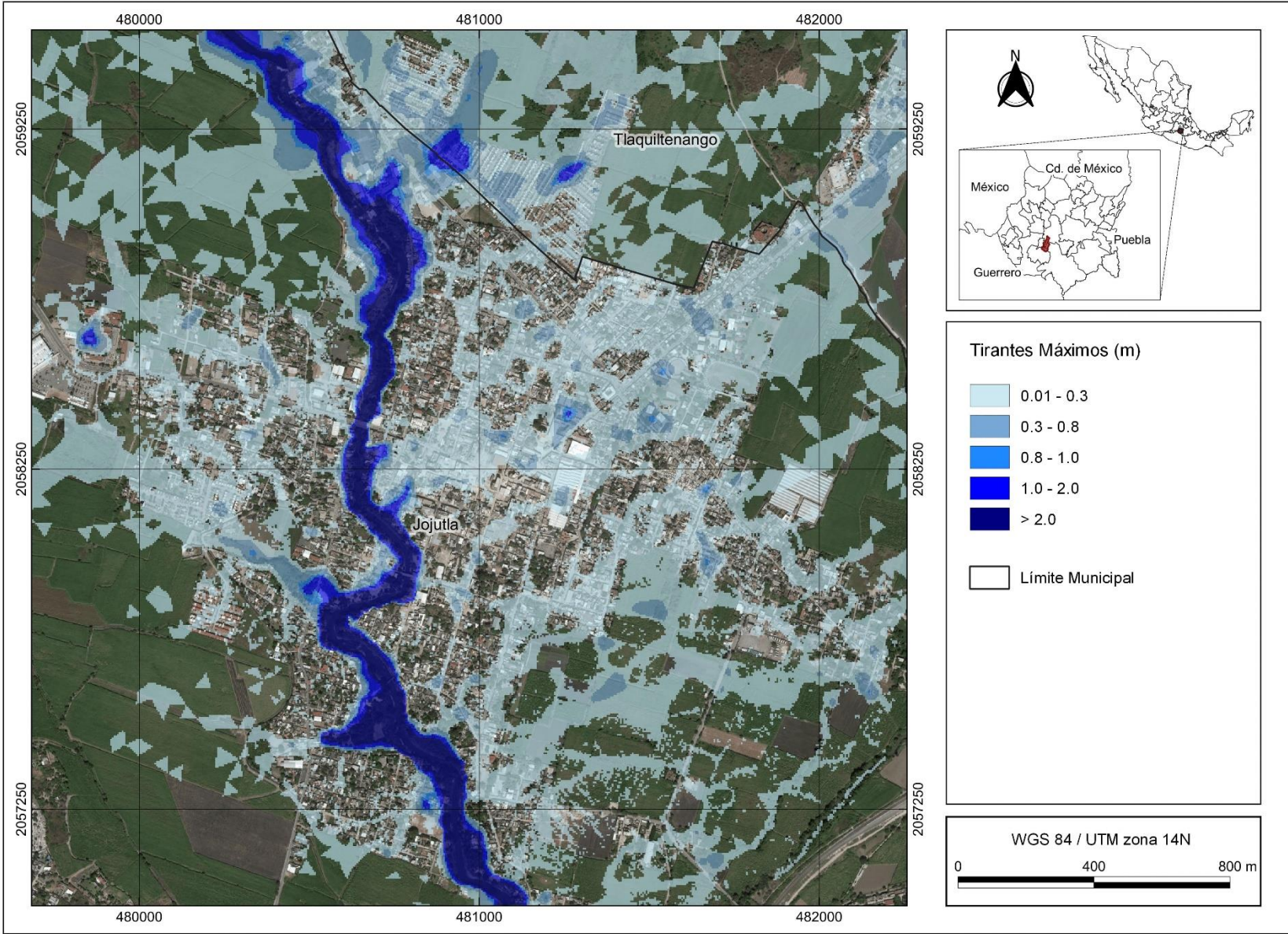


Figura 4-12 Tirantes máximos asociados un Tr = 100 años para la ciudad de Jojutla

RIESGO POR INUNDACIÓN EN JOJUTLA

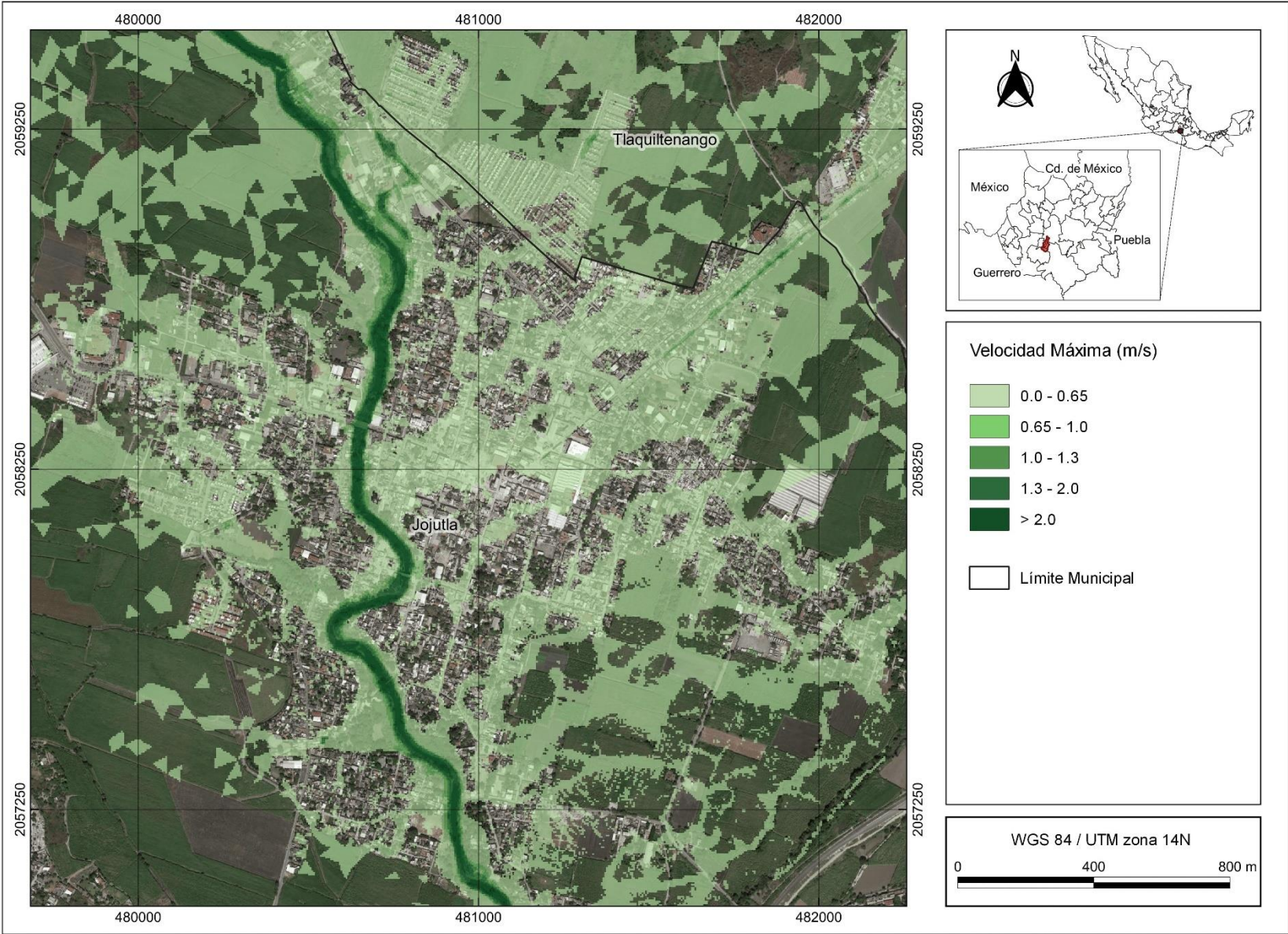


Figura 4-13 Velocidades máximas asociadas a un Tr = 100 años para la ciudad de Jojutla

5 SEVERIDAD MÁXIMA

La severidad o peligrosidad, por su traducción del inglés del término Hazard, es el parámetro con el que se clasifica una avenida, consiste en el conjunto de tres o más categorías establecidas a partir de los resultados de tirantes y velocidades máximas estimados en la modelación hidráulica; para cada punto (o celda) analizado se obtiene un valor de severidad en cada instante de tiempo, el valor máximo al que se le denomina severidad máxima, es con el que se elabora el mapa para cada escenario.

La finalidad de un mapa de severidad es contar con los estudios técnicos que permitan elaborar medidas de protección, delimitar las áreas que no deben urbanizarse, así como determinar el uso de suelo con menor peligro de inundación (Conagua, 2019a).

En la actualidad se encuentran disponibles diversos métodos con el objetivo de cuantificar y parametrizar las variables que intervienen en el peligro por inundación como: tirante de inundación, velocidad del flujo, vuelco y deslizamiento; a partir de los cuales se construyen los mapas de peligro por inundación, en los que, las categorías de severidad más utilizadas en la literatura generalmente son: baja, media y alta; sin embargo, se encuentran en función del criterio empleado para dicho análisis; algunos de los cuales se comentan a continuación.

La Agencia Federal para el Manejo de Emergencias (por sus siglas en inglés FEMA) de los Estados Unidos generó mapas de peligro, relacionando el tirante máximo con la velocidad máxima, dividida en tres zonas de peligro: de amenaza nivel bajo, medio y alto. En la primera no hay afectación a la población, pero sí daños ligeros en las edificaciones; en la última, la vida de las personas puede estar en peligro y se tienen afectaciones estructurales en las edificaciones.

En Francia, la Oficina Federal de Economía del Agua (por sus siglas en Francés, OFEE) en 1997 estableció un criterio para la evaluación de peligros aplicables en tres casos: inundación, erosión de taludes en ríos y deslaves provocados por lluvias torrenciales; divididos en tres niveles. Para el caso de los peligros generados por las inundaciones, en el nivel bajo las edificaciones pueden sufrir daños leves, la inundación y arrastre de sedimentos pueden llegar al interior de las mismas; en el nivel alto, la población está en riesgo dentro y fuera de las viviendas y las edificaciones en peligro de colapsar.

RIESGO POR INUNDACIÓN EN JOJUTLA

En Australia, el gobierno de Nueva Gales del Sur, publicó en el año 2007, el estudio del Río Bielsdown en la ciudad de Dorrigo con el objetivo de afrontar los problemas de inundación y la planeación urbana; con el cual se desarrolló un criterio en función de la relación profundidad-velocidad para categorizar el peligro. El resultado del estudio fue la definición de cinco zonas plasmadas en el diagrama de Dorrigo.

En la Figura 5-1 se presenta el diagrama de Dorrigo adoptado para su uso en México; el nivel muy alto implica una evacuación con vehículos difícil, en la que personas adultas tienen problemas para cruzar las calles con seguridad, además, existe un potencial de daño estructural en las construcciones; en contraparte, el nivel muy bajo establece que de ser necesario se pueden realizar evacuaciones de personas en vehículos y los adultos tendrían inconvenientes para cruzar calles con seguridad; como punto intermedio la zona de transición entre estas, se encuentra en función de las condiciones del lugar (Paterson, 2007; Alcocer-Yamanaka et al., 2016).

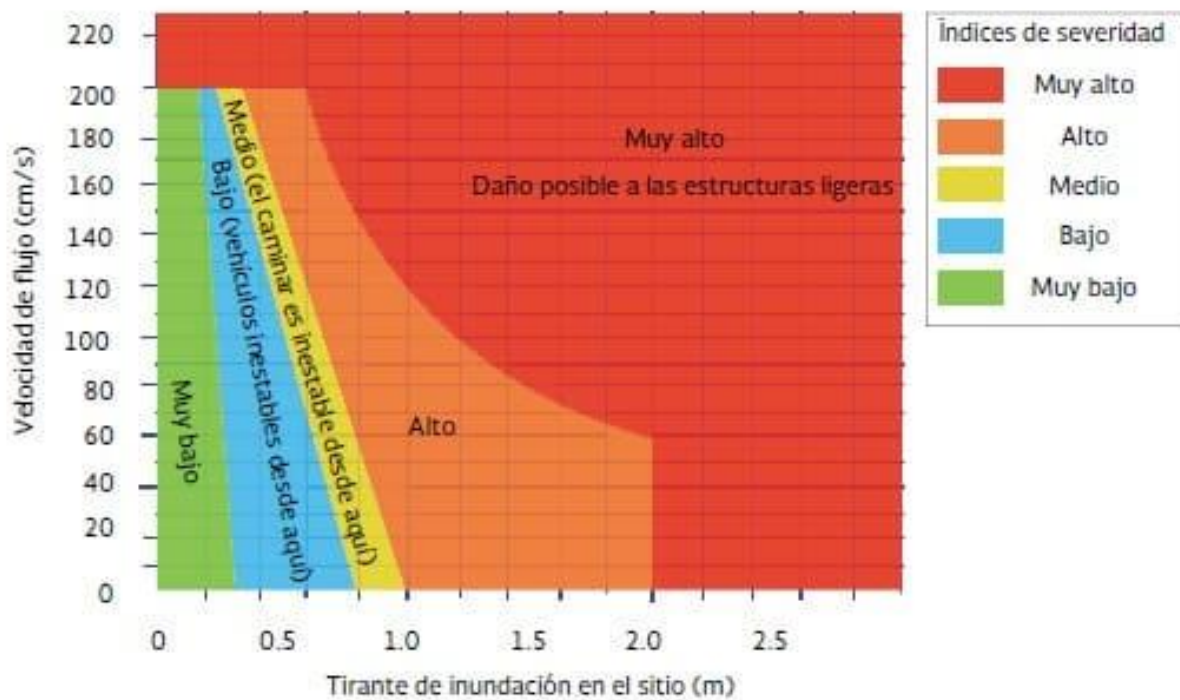


Figura 5-1 Diagrama de Dorrigo adoptado en México

Fuente: tomado de Conagua, 2019a

RIESGO POR INUNDACIÓN EN JOJUTLA

En México, el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA) propuso una metodología mediante la cual es posible obtener mapas de peligro de forma económica y en tiempo de cálculo accesible; mediante el manejo de las aguas pluviales definidos en cuatro componentes: identificación de la problemática de las inundaciones, análisis hidrológico e hidrográfico, herramientas de cálculo para la generación del modelo de simulación y la generación de los escenarios para la mitigación; haciendo énfasis en la caracterización y determinación de las subcuencas y microcuencas de la zona urbanizada y la consideración de la infraestructura pluvial urbana existente, además de los arroyos y ríos. Para tirantes menores a 0.30 m se considera un nivel de peligro nulo; en rangos de 0.30 a 0.50 m un nivel bajo; de 0.50 a 1.5 m el nivel de peligro es medio; para tirantes mayores a 1.5 m el peligro se define como alto (Alcocer-Yamanaka et al., 2016).

A grandes rasgos, la diferencia entre las metodologías antes descritas se encuentra en los límites establecidos por los autores para los niveles de peligro y las consecuencias que estos conllevan. Sin embargo, tienen en común las escalas de aplicabilidad, velocidad máxima de 0 a 4.0 m/s y tirante máximo de 0 a 2.5 m.

En México se han realizado diferentes estudios con aplicaciones en cuencas urbanas, en ciudades medias y aguas abajo de presas como son: Análisis de riesgo por inundación: metodología y aplicación a la cuenca Atemajac (Hernández-Uribe et al., 2017); La modelación numérica en hidráulica. Una Herramienta en la planeación del territorio. Aplicación en la Cuenca del Rio Palizada (Aragón Hernández et al., 2017). Alcocer-Yamanaka et al. (2016) desarrollaron una Metodología para la generación de mapas de riesgo por inundación en zonas urbanas para la estimación de costos por daños estructurales y de menaje de las viviendas con base en el tirante y la velocidad del agua, así como los factores de resistencia al vuelco y deslizamiento; aplicada en la ciudad de Tuxtla Gutiérrez, Chiapas.

5.1 Mapas de Severidad Máxima

Para el presente estudio se eligió la metodología del gobierno de Nueva Gales del Sur, denominada como de Dorrigo, debido a que se cuenta con los tirantes y velocidades máximas para los distintos

RIESGO POR INUNDACIÓN EN JOJUTLA

escenarios, dada la practicidad del método y su amplia aplicación a nivel mundial en diversos estudios.

Se estimó la severidad de acuerdo con el nomograma de la Figura 5-1, para lo cual se cruzaron los valores de tirantes y velocidades máximas obtenidos en la modelación hidráulica para cada celda y periodo de retorno. Los resultados obtenidos se almacenaron en formato ráster, constituidos por una matriz de celdas, en la que cada celda contiene el valor calculado.

Los resultados se clasificaron de acuerdo con los cinco índices de severidad, muy baja, baja, media, alta y muy alta, plasmándolos en mapas según el código de color para pronta identificación. A continuación, se presentan los mapas de severidad máxima para la ciudad de Jojutla correspondientes a los escenarios de 10 años (Figura 5-2), 20 años (Figura 5-3), 50 años (Figura 5-4) y 100 años (Figura 5-5).

RIESGO POR INUNDACIÓN EN JOJUTLA

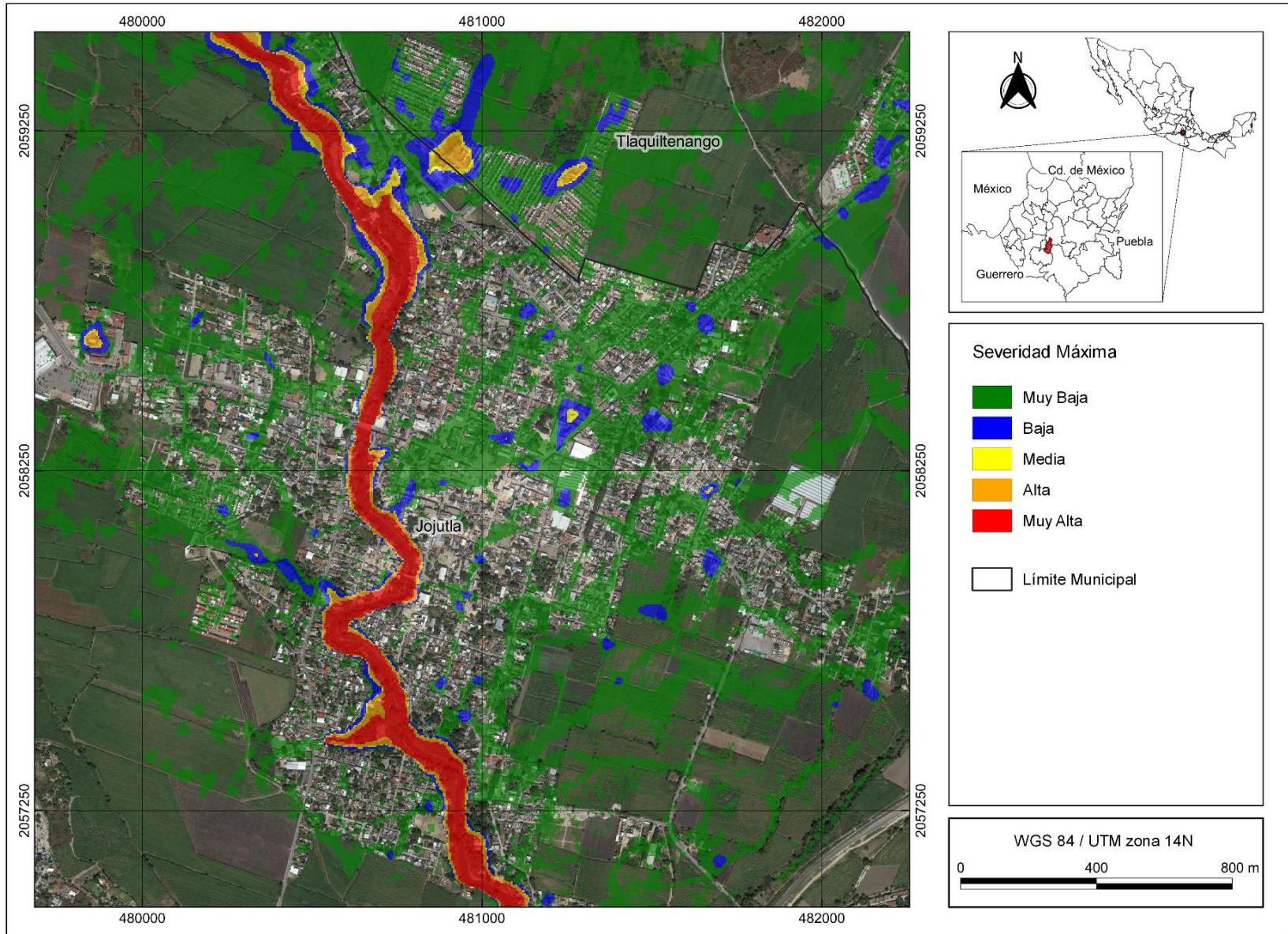


Figura 5-2 Severidad máxima asociada a un Tr = 10 años para la ciudad de Jojutla

RIESGO POR INUNDACIÓN EN JOJUTLA

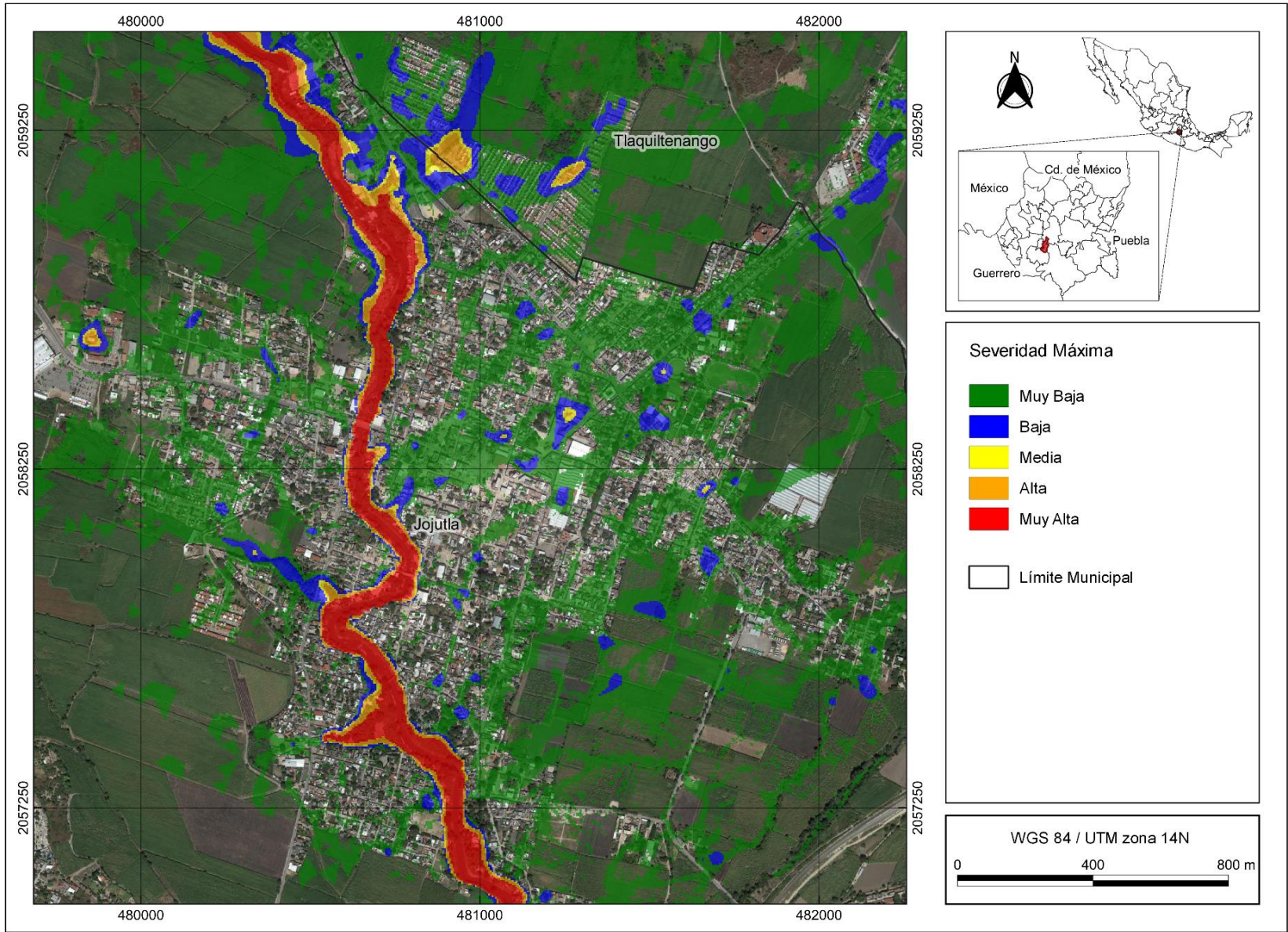


Figura 5-3 Severidad máxima asociada a un Tr = 20 años para la ciudad de Jojutla

RIESGO POR INUNDACIÓN EN JOJUTLA

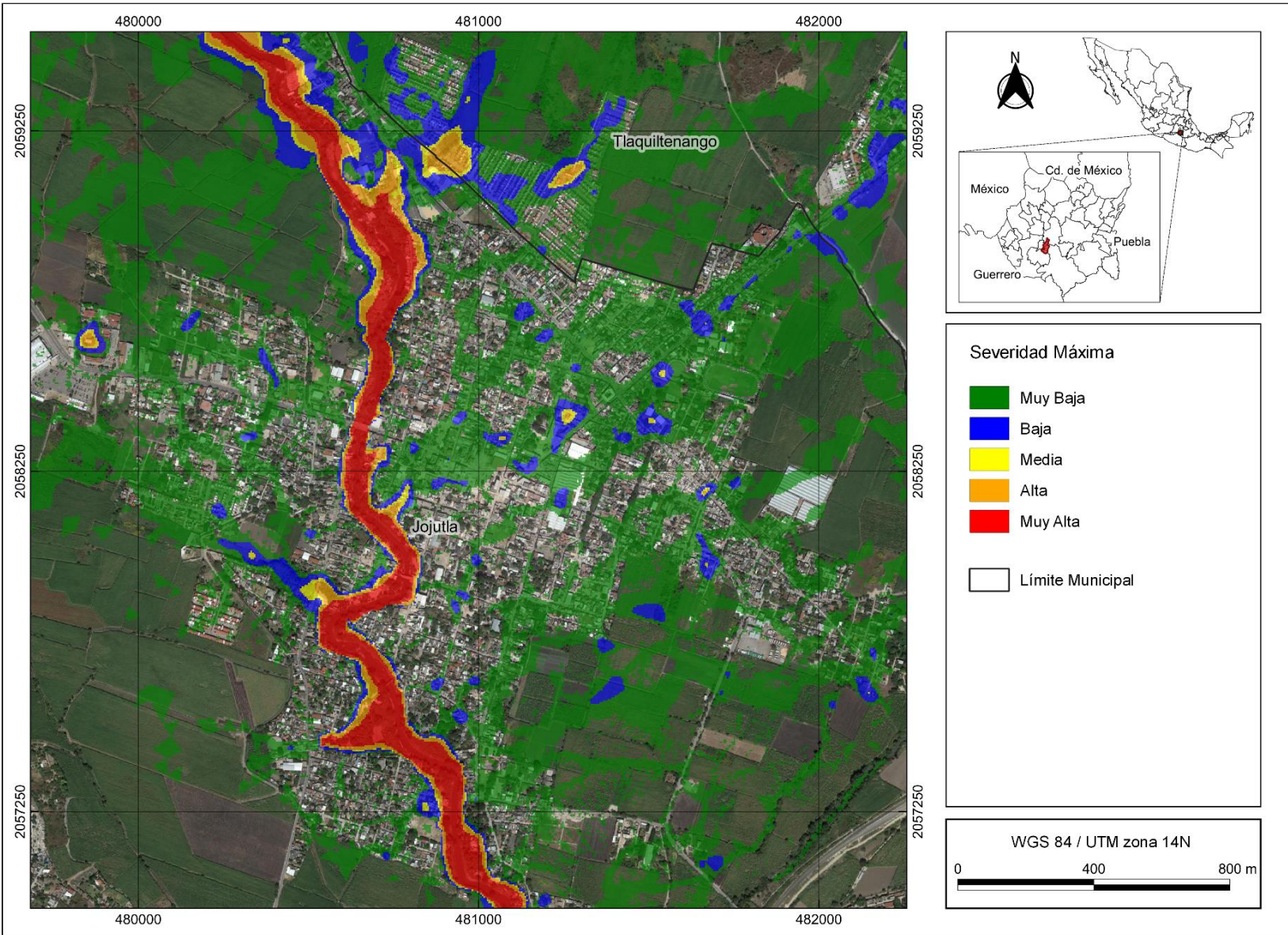


Figura 5-4 Severidad máxima asociada a un Tr = 50 años para la ciudad de Jojutla

RIESGO POR INUNDACIÓN EN JOJUTLA

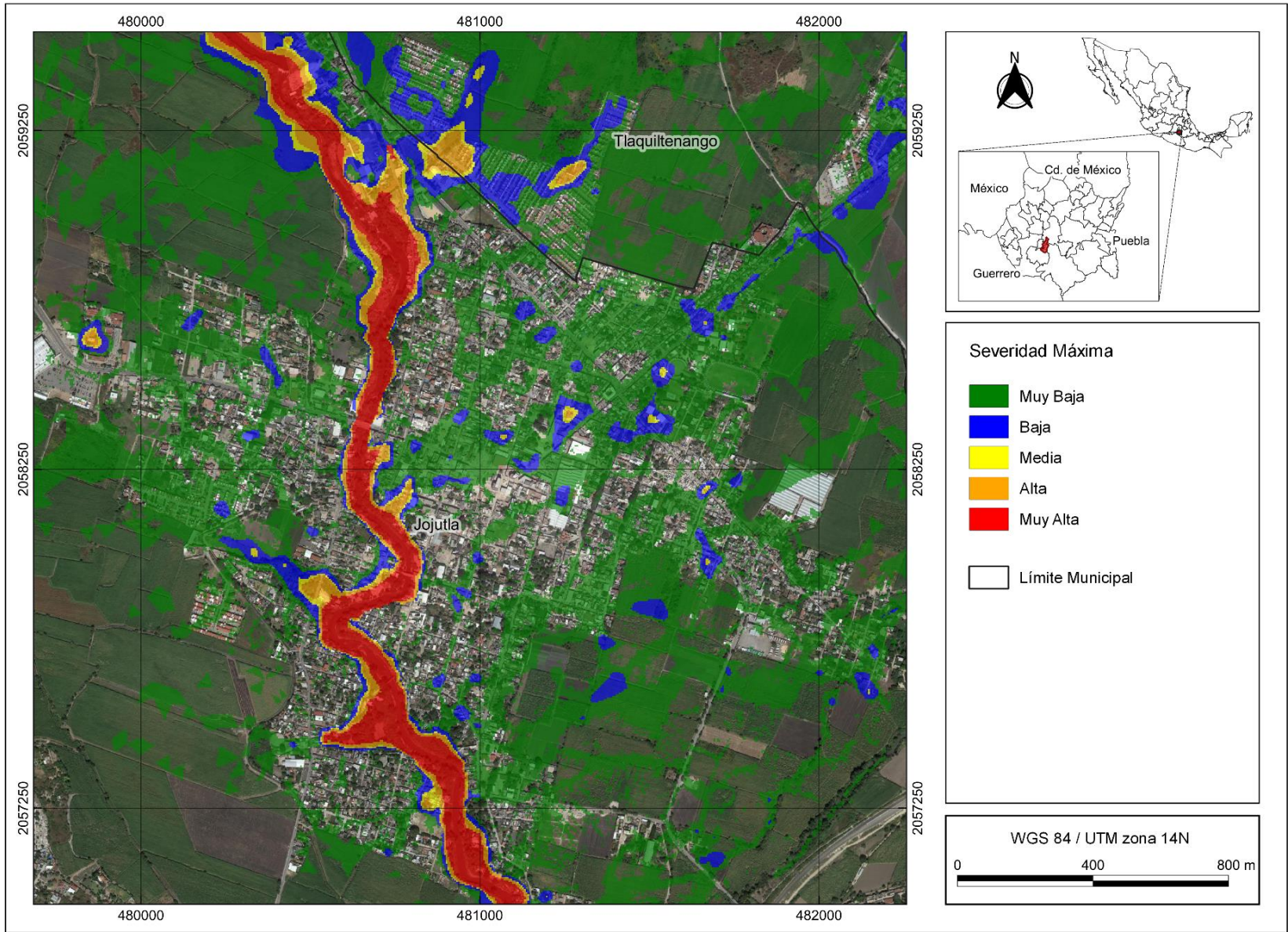


Figura 5-5 Severidad máxima asociada a un Tr = 100 años para la ciudad de Jojutla

6 DAÑO ECONOMICO POR INUNDACIÓN

Como se mencionó, entre los principales fenómenos hidrometeorológicos que afectan a la población se encuentran las inundaciones, las cuales se traducen en grandes daños y pérdidas económicas, así como otras situaciones desafortunadas como las defunciones. En vista de esto, es necesario implementar medidas de protección contra estos eventos para proteger los bienes públicos, privados y la vida misma de la población.

Las medidas de protección contra inundaciones se pueden catalogar en dos tipos: estructurales y no estructurales (Salas, 2014). Las medidas estructurales consisten en construir obras de infraestructura hidráulica que ayuden a controlar las inundaciones; estas obras pueden ser de regulación (e.g. las presas rompe-pico), rectificación (e. g. canalización de ríos) u obras de protección (e. g. bordos longitudinales). Por otro lado, las medidas no estructurales consisten en la gestión de la cuenca, un conjunto de acciones que permitan disminuir los efectos provocados por las inundaciones, por ejemplo, el ordenamiento territorial y usos de suelo, programas de protección civil ante contingencias, entre otros.

Para mitigar los efectos producidos por una inundación de forma correcta es necesario elegir de entre los tipos de medidas mencionadas anteriormente. Para esto, es común realizar un análisis económico de los daños potenciales causados por la inundación (Baró – Suárez et al., 2012) el cual permite evaluar la efectividad de los proyectos propuestos, así como su viabilidad económica, comparando de forma directa los daños potenciales evitados con los costos que tendrán las medidas.

De forma general, los daños a causa de una inundación pueden ser tangibles o intangibles. La diferencia principal en esta clasificación es que a los primeros se les puede asignar un valor monetario a diferencia de los intangibles (Baró-Suárez et al., 2012) ya que estos últimos son, por ejemplo, la pérdida de vidas humanas, el estrés y otros problemas de salud ocasionado por el evento, entre otros (Nascimento et al., 2007). Los daños tangibles a su vez se pueden dividir en directos o indirectos, siendo el primer caso aquellos producidos por contacto con el agua, por ejemplo, el daño físico a la estructura habitacional o industrial y su contenido, pérdida de cultivo, entre otros; por otro lado, los indirectos son los producidos por la interrupción del desarrollo

RIESGO POR INUNDACIÓN EN JOJUTLA

económico a causa de la inundación, por ejemplo, costos de limpieza, pérdida de beneficios, entre otros (Nascimento et al., 2007).

Una de las metodologías más usadas en el mundo para evaluar los daños tangibles directos es la denominada evaluación directa (Baró-Suárez et al., 2011). Esta evalúa de forma precisa y detallada los impactos causados, realizando un inventario de daños en las áreas afectadas o mediante la construcción de escenarios de daños. Estos procedimientos relacionan los daños con las variables hidráulicas asociadas a las inundaciones, por ejemplo, el daño económico en función del tirante de agua alcanzado en la zona inundada.

6.1 Daño Económico a Viviendas

En la bibliografía se proponen distintas metodologías para estimar el daño económico a viviendas debido a una inundación. Todas las anteriores parten, principalmente, del tirante de agua alcanzado en la vivienda, ya sea el registrado por un evento histórico o el obtenido en un escenario de una simulación hidrológica – hidráulica. Los métodos propuestos, generalmente son aplicables para el país en donde los desarrollan (Baró-Suárez et al., 2011), a continuación, se describen de forma breve algunos de los estudios aplicables en la República Mexicana.

El CENAPRED (Salas, 2011) propone una metodología para estimar el daño económico en zonas habitacionales urbanas en México. Esta técnica estima el daño económico mediante la definición del riesgo, que, como se mencionó, es la interacción del peligro, la vulnerabilidad y el valor de los bienes expuestos. De los componentes del riesgo, el peligro es la probabilidad de ocurrencia del evento; la vulnerabilidad, se obtiene a partir de un conjunto de funciones de vulnerabilidad (vulnerabilidad en función del tirante de agua) que representan el porcentaje de daños del menaje promedio que podría encontrarse en un grupo de viviendas, que, a su vez, el grupo es función del tipo de los materiales con los que está construida la casa. Al ser adimensional la probabilidad y la vulnerabilidad, el riesgo toma las unidades del valor de los bienes expuestos (unidades monetarias) y se pueden estimar como un valor asociado a un periodo de retorno o mediante el valor esperado de los daños anuales.

Por otra parte, el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA; Alcocer-Yamanaka et al., 2016) propone una metodología para generar mapas de riesgo por una inundación en zonas urbanas.

RIESGO POR INUNDACIÓN EN JOJUTLA

De igual forma que la metodología del CENAPRED, parte la definición del riesgo. El peligro es estimado a partir de los resultados obtenidos en una simulación hidráulica bidimensional, mientras que, la vulnerabilidad se obtiene a nivel manzana de acuerdo al tipo de vivienda, que se obtiene en función del número de cuartos y la población económicamente activa estableciendo rangos de acuerdo al costo de menaje de las viviendas. Finalmente, el riesgo se presenta de forma cartográfica mediante cuatro rangos ascendentes en función del peligro, la vulnerabilidad y el porcentaje de pérdida del costo del menaje.

Baró-Suárez et al. (2011) propusieron una metodología para el cálculo de los daños tangibles directos a partir de curvas de daños potenciales (máximo, mínimo, más probable) por inundación para una vivienda. Las curvas se construyeron en función del Índice de Marginación (IM) urbana del Área Geoestadística Básica (AGEB) del INEGI donde se localiza la vivienda, realizando un inventario de los bienes existentes en promedio para cada IM, para luego asignarles un porcentaje de pérdidas en función del tirante de agua; así, las curvas de los costos máximos y mínimos se crearon con un modelo regresivo y el costo más probable con ayuda de una función de distribución beta como modelo probabilístico. Las curvas resultantes (ecuaciones) para cada IM, relacionan los daños económicos como salarios mínimos, en función de la altura del tirante de agua alcanzado y se pueden emplear en la República Mexicana.

6.1.1 Daño económico potencial en las viviendas de Jojutla

De las metodologías mencionadas para estimar el daño económico a viviendas, en el presente trabajo se eligió la técnica propuesta por Baró-Suárez et al., (2011). Este método tiene la ventaja de que el daño se estima como número de salarios mínimos y se puede actualizar de forma sencilla a las condiciones presentes. Así mismo, es el método que se incluye los “Lineamientos para la Elaboración de Mapas de Peligro por Inundación” emitido por la CONAGUA (2014).

Primeramente, se obtuvo el índice de marginación (IM) urbana para la zona de estudio a partir del inventario del 2010 del Consejo Nacional de Población (CONAPO, 2020), el cual es el más reciente a la hora de realizar este trabajo. El IM es una medida resumen de las carencias que padece la población, creado a partir de indicadores con dimensiones de educación, salud, vivienda y bienestar (CONAPO, 2010). Toma valores positivos y negativos, donde los valores positivos más

RIESGO POR INUNDACIÓN EN JOJUTLA

altos corresponden con los mayores niveles de marginación. A partir de una agrupación de estos, es posible determinar un Grado de Marginación como: Muy alto, Alto, Medio, Bajo y Muy Bajo.

Por otro lado, el análisis se discretizó a nivel manzana, asignando a cada una su GM de acuerdo al AGEB a la que pertenecen. En la Figura 6-1 se muestra el GM por manzana y viviendas aisladas correspondientes a la zona de estudio.

En seguida, se realizó el cálculo de los daños potenciales máximo, mínimo y más probable mediante las ecuaciones (Tabla 6-1) que representan las curvas de daños potenciales directos en zonas habitaciones obtenidas por Baró-Suárez et al. (2011). Los tres costos se estimaron para cada escenario (periodo de retorno) de la simulación hidrológico – hidráulica.

Es importante mencionar que, en el presente trabajo los daños se estimaron solamente cuando los tirantes superaron el umbral de 20 centímetros. Lo anterior, debido a que dicho valor corresponde con la altura promedio de la banquetta de una vivienda y para tirantes menores a esta cifra, regularmente no existe daño a la vivienda.

Entonces, la zona potencialmente inundada se representa con el ráster de tirantes máximos (asociado a un periodo de retorno). La ecuación correspondiente en cada manzana se elige de acuerdo a su grado de marginación. El número de viviendas afectadas se estima sobreponiendo el ráster de tirantes con la cartografía de las manzanas, bajo la idealización de que el número de viviendas habitadas están distribuidas uniformemente sobre el área de dicha manzana. El cálculo se realizó para cada pixel “i” del ráster, el cual tiene una resolución de 5x5 metros; para cada pixel, se obtuvo el número de salarios mínimos para cada tipo de daño. Estos últimos se multiplicaron por el salario mínimo vigente al momento de realizar este estudio, el cual tiene un monto de \$141.7 pesos mexicanos (CONASAMI, 2021). Finalmente, se sumaron los costos para cada una de la AGEB.

En la Tabla 6-2, Tabla 6-3, Tabla 6-4 y Tabla 6-5 se muestra el daño estimado resumido por AGEB en Jojutla para los periodos de retorno de 10, 20, 50 y 100 años, respectivamente. Se muestra su IM, el total de viviendas, el porcentaje de área y número de viviendas afectadas y los costos máximos, mínimos y más probables.

RIESGO POR INUNDACIÓN EN JOJUTLA

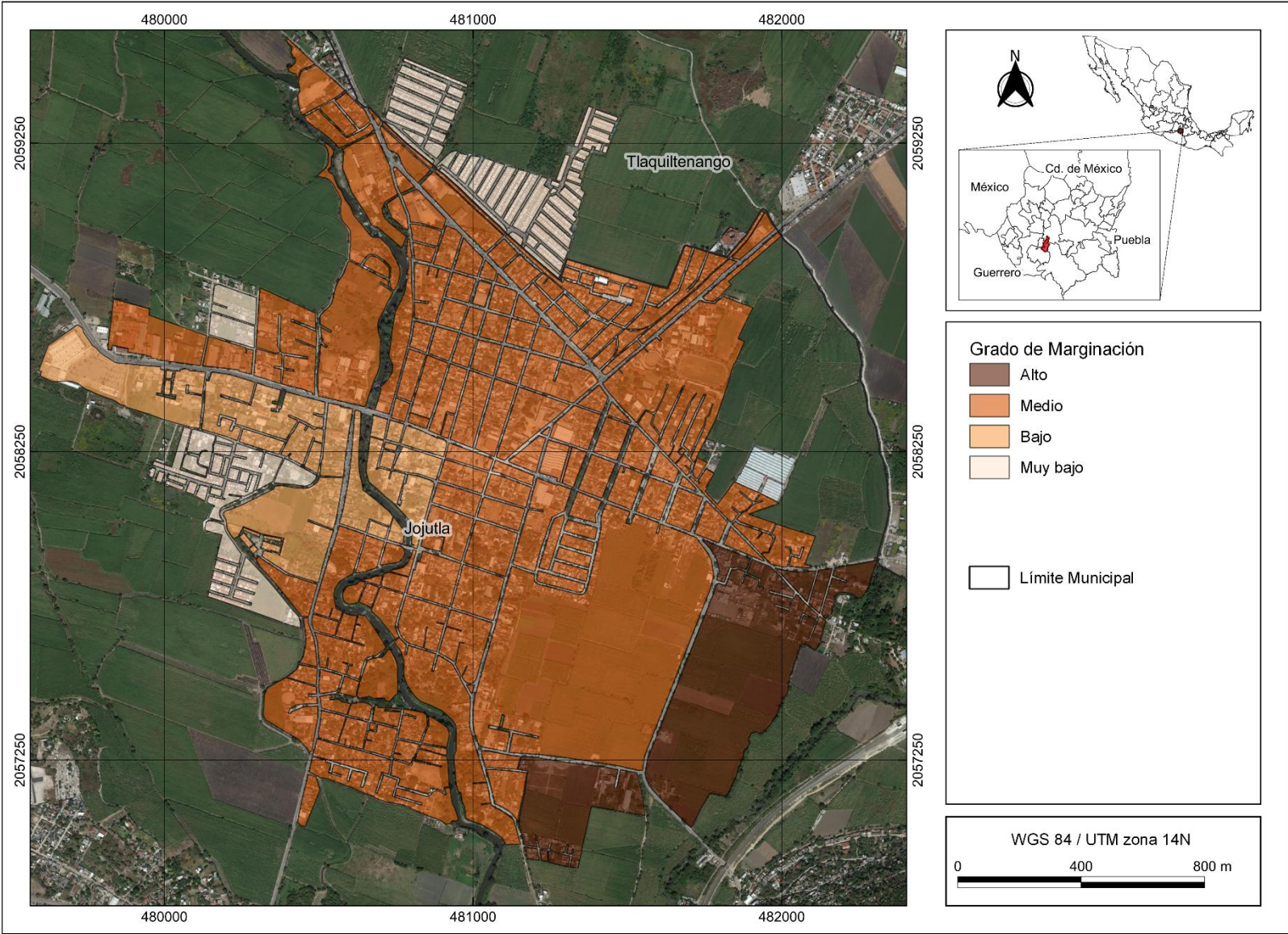


Figura 6-1 Grado de marginación por manzanas en Jojutla

RIESGO POR INUNDACIÓN EN JOJUTLA

Tabla 6-1 Ecuaciones de las curvas de daños potenciales directos en zonas habitacionales

Índice de Marginación	Ecuación
Muy Alto	$DDH_{máx} = 247.63 \ln(h) + 668.44$
	$DDH_{mín} = 141.36 \ln(h) + 382.45$
	$DDmp = 156.92 \ln(h) + 424.33$
Alto	$DDH_{máx} = 289.63 \ln(h) + 801.56$
	$DDH_{mín} = 228.58 \ln(h) + 637.93$
	$DDmp = 280.51 \ln(h) + 777.60$
Media	$DDH_{máx} = 709.63 \ln(h) + 1976.04$
	$DDH_{mín} = 544.93 \ln(h) + 1546.6$
	$DDmp = 685.51 \ln(h) + 1913.15$
Bajo	$DDH_{máx} = 877.28 \ln(h) + 2479.23$
	$DDH_{mín} = 797.24 \ln(h) + 2233.19$
	$DDmp = 865.56 \ln(h) + 2443.20$
Muy Bajo	$DDH_{máx} = 1521.80 \ln(h) + 4051.63$
	$DDH_{mín} = 1210.14 \ln(h) + 3321.20$
	$DDmp = 1255.78 \ln(h) + 3428.17$

Fuente: Baró-Suárez et al., (2011)

Tabla 6-2 Daño estimado por AGEB en Jojutla para un $Tr = 10$ años

AGEB	IM	SMG [\$ MXN]	Total Viviendas	Área Afectada [%]	Viviendas Afectadas	Costo Máx [\$ Mill. MXN]	Costos Mín [\$ Mill. MXN]	Costos MP [\$ Mill. MXN]
1701200010045	Medio	141.7	1328	18.39	120	23.576	18.602	22.848
170120001005A	Medio	141.7	1432	8.26	111	21.338	16.846	20.680
1701200010100	Medio	141.7	1390	7.11	109	30.400	23.795	29.433
1701200010219	Muy Bajo	141.7	572	1.77	9	2.844	2.392	2.458
1701200010238	Medio	141.7	211	17.04	23	5.429	4.262	5.258
1701200010295	Alto	141.7	160	2.42	2	0.132	0.106	0.129
1701200010365	Bajo	141.7	865	13.05	121	41.302	37.194	40.701
170120001037A	Medio	141.7	726	20.94	126	39.417	30.789	38.153
1701200010702	Muy Bajo	141.7	27	5.45	2	0.478	0.401	0.412
1702500840109	Muy Bajo	141.7	1642	29.77	446	159.187	132.860	136.715
TOTAL			8353		1069	324.103	267.248	296.787

RIESGO POR INUNDACIÓN EN JOJUTLA

Tabla 6-3 Daño estimado por AGEB en Jojutla para un Tr = 20 años

AGEB	IM	SMG [\$ MXN]	Total Viviendas	Área Afectada [%]	Viviendas Afectadas	Costo Máx [\$ Mill. MXN]	Costos Mín [\$ Mill. MXN]	Costos MP [\$ Mill. MXN]
1701200010045	Medio	141.7	1328	21.94	150	29.199	23.041	28.297
170120001005A	Medio	141.7	1432	10.01	135	25.321	20.001	24.542
1701200010100	Medio	141.7	1390	8.51	129	34.831	27.280	33.726
1701200010219	Muy Bajo	141.7	572	2.04	11	3.329	2.795	2.874
1701200010238	Medio	141.7	211	19.95	32	7.153	5.623	6.929
1701200010295	Alto	141.7	160	3.06	3	0.179	0.144	0.174
1701200010365	Bajo	141.7	865	15.24	140	47.699	42.952	47.004
170120001037A	Medio	141.7	726	22.89	144	44.855	35.038	43.418
1701200010702	Muy Bajo	141.7	27	5.88	2	0.538	0.451	0.463
1702500840109	Muy Bajo	141.7	1642	37.47	573	203.963	170.257	175.193
TOTAL			8353		1319	397.067	327.583	362.619

Tabla 6-4 Daño estimado por AGEB en Jojutla para un Tr = 50 años

AGEB	IM	SMG [\$ MXN]	Total Viviendas	Área Afectada [%]	Viviendas Afectadas	Costo Máx [\$ Mill. MXN]	Costos Mín [\$ Mill. MXN]	Costos MP [\$ Mill. MXN]
1701200010045	Medio	141.7	1328	25.99	191	37.1585	29.3248	36.0112
170120001005A	Medio	141.7	1432	12.63	169	31.2880	24.7251	30.3269
1701200010100	Medio	141.7	1390	10.22	153	40.7239	31.9040	39.4322
1701200010219	Muy Bajo	141.7	572	2.39	13	4.1561	3.4871	3.5851
1701200010238	Medio	141.7	211	22.64	39	8.8873	6.9851	8.6087
1701200010295	Alto	141.7	160	4.04	4	0.2435	0.1953	0.2366
1701200010365	Bajo	141.7	865	18.3	174	57.7343	51.9788	56.8915
170120001037A	Medio	141.7	726	26.09	174	53.7138	41.9657	51.9934
1701200010702	Muy Bajo	141.7	27	6.43	2	0.6032	0.5047	0.5191
1702500840109	Muy Bajo	141.7	1642	43.37	674	244.8458	204.1892	210.1434
TOTAL			8353		1593	479.3543	395.2598	437.7481

Tabla 6-5 Daño estimado por AGEB en Jojutla para un Tr = 100 años

AGEB	IM	SMG [\$ MXN]	Total Viviendas	Área Afectada [%]	Viviendas Afectadas	Costo Máx [\$ Mill. MXN]	Costos Mín [\$ Mill. MXN]	Costos MP [\$ Mill. MXN]
1701200010045	Medio	141.7	1328	28.82	224	43.717	34.498	42.367
170120001005A	Medio	141.7	1432	15.06	201	36.738	29.041	35.611
1701200010100	Medio	141.7	1390	11.62	172	45.297	35.496	43.862
1701200010219	Muy Bajo	141.7	572	2.66	15	4.767	3.999	4.111
1701200010238	Medio	141.7	211	24.23	42	9.936	7.806	9.624
1701200010295	Alto	141.7	160	4.74	5	0.299	0.240	0.291
1701200010365	Bajo	141.7	865	21.17	207	67.595	60.846	66.607
170120001037A	Medio	141.7	726	28.38	196	60.547	47.303	58.607
1701200010702	Muy Bajo	141.7	27	6.53	2	0.631	0.527	0.542
1702500840109	Muy Bajo	141.7	1642	47.23	740	273.273	227.729	234.399
			8353		1804	542.801	447.486	496.022

RIESGO POR INUNDACIÓN EN JOJUTLA

Para el periodo de retorno de 10 años (Tabla 6-2) se tendrían afectaciones en un total de 1,069 viviendas con un costo máximo de \$ 324.103 millones, un costo mínimo de \$ 267.248 millones y un costo más probable de \$ 296.787 millones de pesos. Con el periodo de retorno de 20 años (Tabla 6-3) se afectarían 1,319 viviendas con un costo máximo de \$ 397.067 millones, un costo mínimo de \$ 327.583 millones y un costo más probable de \$ 362.619 millones. Con los tirantes alcanzados en el periodo de retorno de 50 años (Tabla 6-4) se afectarían 1,593 viviendas con un costo máximo de \$ 479.354 millones, un costo mínimo de \$ 395.260 millones y un costo más probable de \$ 437.748 millones. Finalmente, con el periodo de retorno de 100 años (Tabla 6-5) se afectarían 1,804 viviendas con un costo máximo de \$ 542.801 millones, un costo mínimo de \$ 447.486 millones y un costo más probable de \$ 496.022 millones de pesos.

Por otra parte, en la Figura 6-2 se muestra la distribución espacial del costo más probable por inundación a escala de manzanas, lo anterior para distintos periodos de retorno. En esta se muestra que conforme aumenta los periodos de retorno, naturalmente, existe mayor número de manzanas con daños, así mismo, estos valores aumentan también.

RIESGO POR INUNDACIÓN EN JOJUTLA

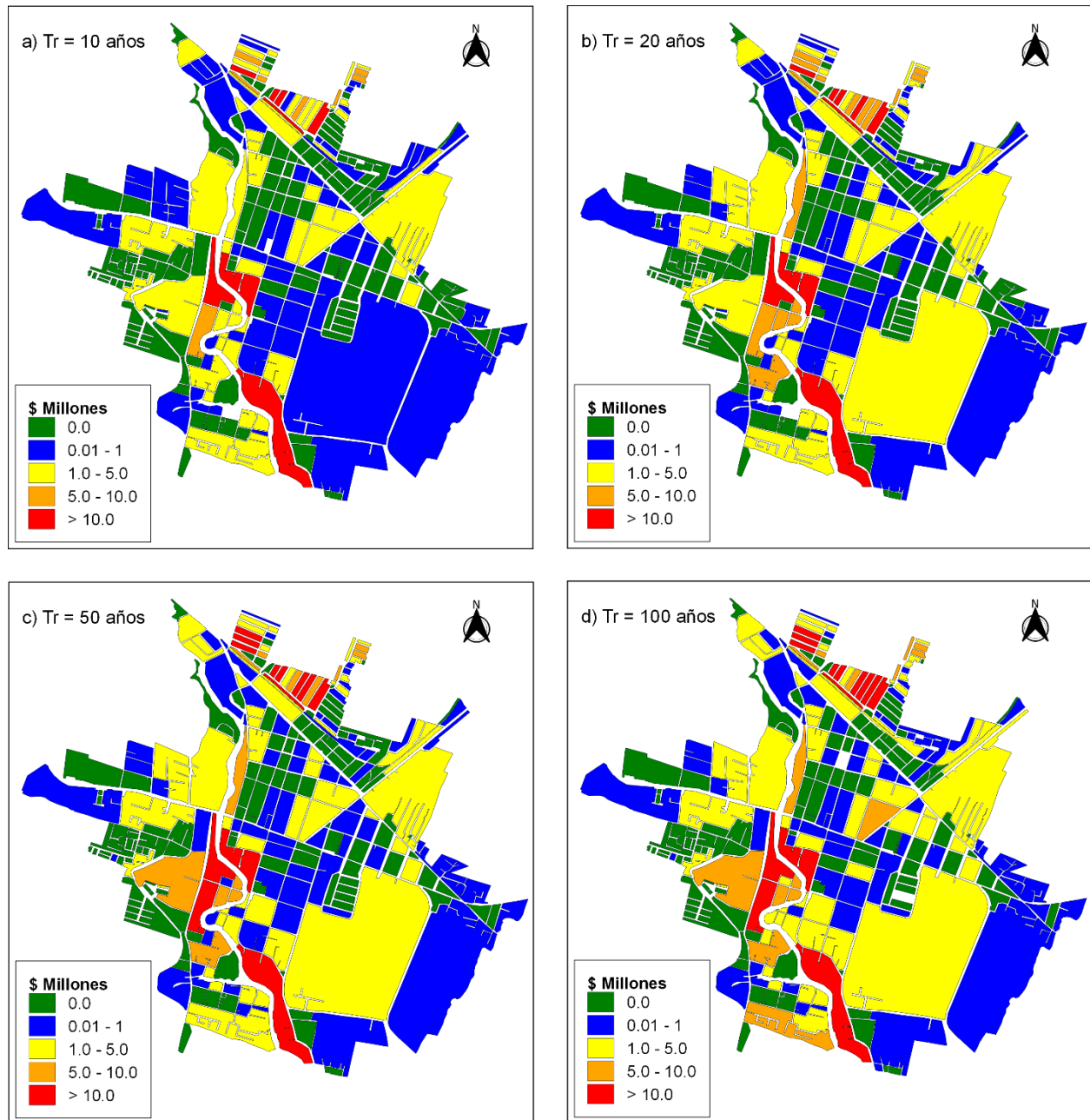


Figura 6-2 Costo máximo más probable por manzana para distintos Tr en Jojutla

RIESGO POR INUNDACIÓN EN JOJUTLA

6.2 Daño Anual Esperado

Bajo la idea de que la evaluación de riesgo sigue una perspectiva principalmente económica, el Daño Anual Esperado (DAE) se puede estimar con la integración del área bajo la curva que se forma al graficar la probabilidad de ocurrencia de los escenarios contra el monto económico de daños estimados. Entonces, el DAE se define como (Meyer et al., 2011):

$$DAE = \sum_{i=1}^k D [i] \Delta P_i \quad (6.1)$$

$$D[i] = \frac{D(P_{i-1}) + D(P_i)}{2} \quad (6.2)$$

$$\Delta P_i = |P_i - P_{i-1}| \quad (6.3)$$

Donde:

$D[i]$ Media del daño de dos eventos o escenarios.

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

A partir de los costos más probables totales para cada escenario y su respectiva probabilidad de excedencia ($1/Tr$) se creó la gráfica que se muestra en la Figura 6-3. Entonces, con las ecuaciones anteriores se estimó un $DAE = \$ 33,159,497$ MXN. La distribución espacial por manzanas se muestra en la Figura 6-4.

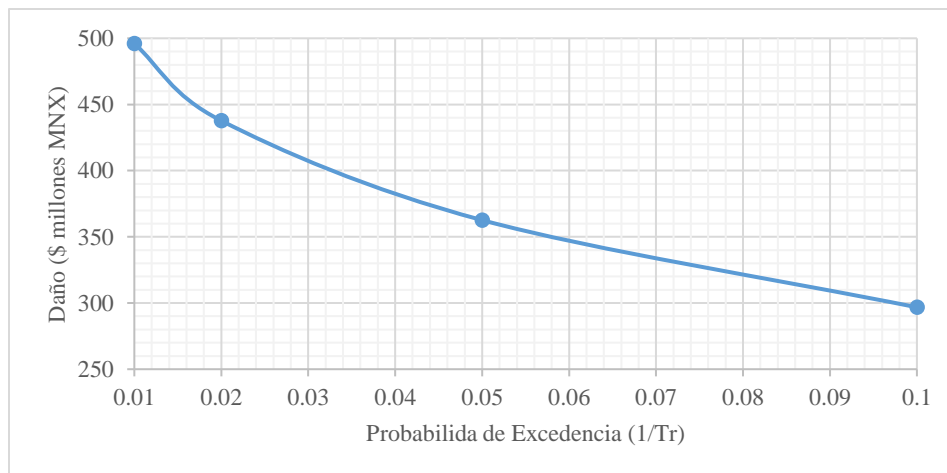


Figura 6-3 Curva de los daños estimados contra su probabilidad de excedencia

RIESGO POR INUNDACIÓN EN JOJUTLA

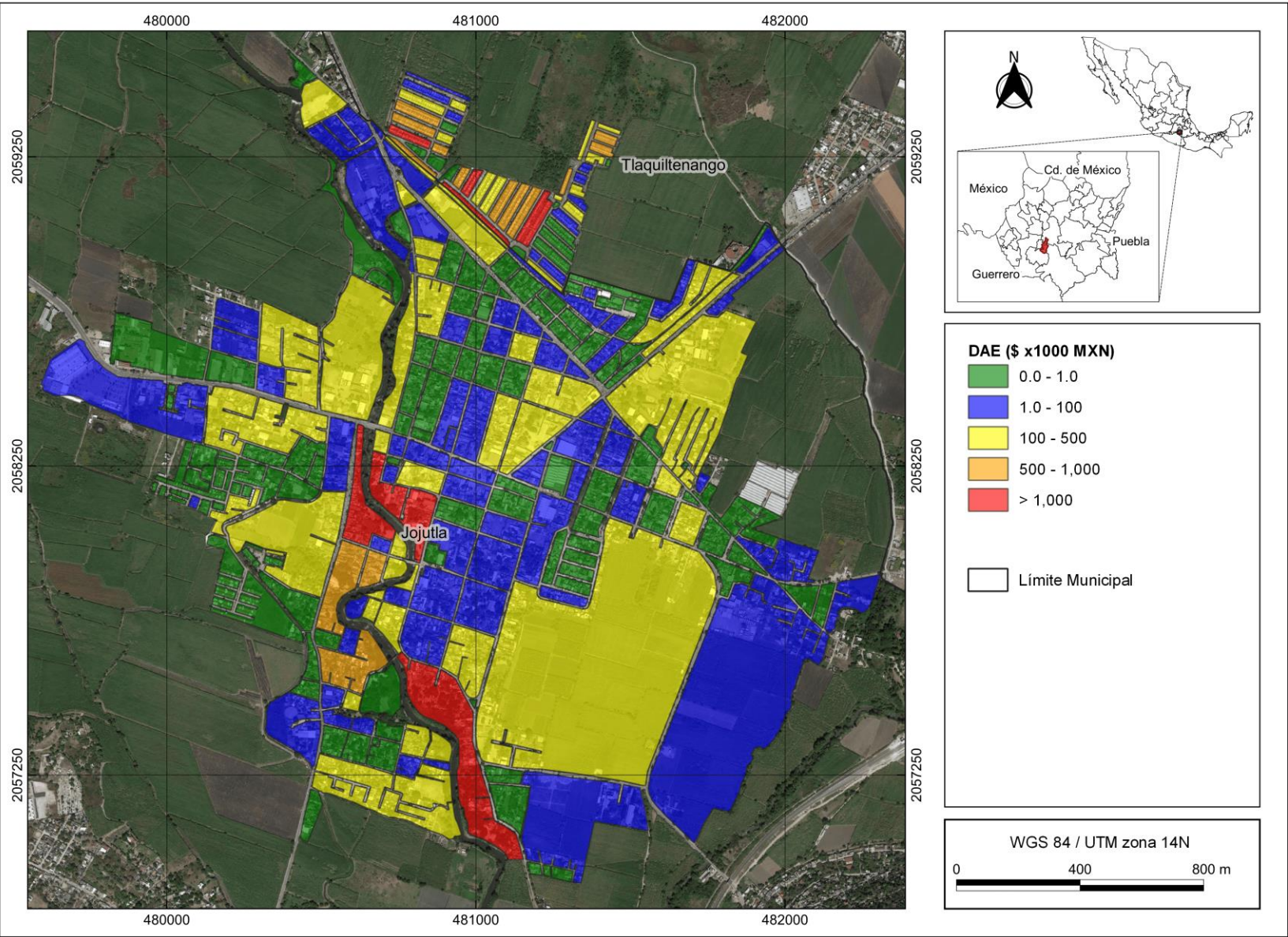


Figura 6-4 Daño anual esperado por manzanas en Jojutla

7 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Los eventos hidrometeorológicos son uno de los fenómenos naturales que representan una amenaza para los seres humanos y sus bienes materiales debido, entre otras cosas, a su intensidad y su característica aleatoria. Entre los efectos que traen consigo estos eventos destacan las fuertes precipitaciones que muchas veces se traducen en inundaciones. Los efectos de estas últimas se agravan con el crecimiento demográfico, principalmente con los asentamientos en las planicies de inundación de los cauces, así como el aumento del escurrimiento de la cuenca a consecuencia de cambios en el uso de suelo y su permeabilidad.

Un aspecto generalizado del riesgo por inundación se describe como la interacción del peligro, la vulnerabilidad y la exposición. El peligro es la probabilidad de ocurrencia de un fenómeno perturbador, la vulnerabilidad es la predisposición de los sistemas expuestos a ser dañados y la exposición son todos los bienes que pueden ser dañados. Por su carácter aleatorio, el peligro no puede ser controlado; sin embargo, la vulnerabilidad y la exposición se pueden reducir al incrementar la resiliencia de los sistemas y reduciendo la exposición de los bienes con una correcta planeación territorial u otras medidas estructurales que reduzcan el riesgo.

Para el caso de las inundaciones, el peligro se evalúa con la probabilidad de ocurrencia de las precipitaciones y avenidas potenciales, regularmente en función de un periodo de retorno, que se obtienen mediante un estudio hidrológico; en seguida, mediante un modelo matemático y con la información topográfica, se determinan las magnitudes hidráulicas como los tirantes y velocidades máximas alcanzadas en la zona de estudio. Por otra parte, la vulnerabilidad y la exposición se determinan a partir de datos espaciales obtenidos de censos realizados por el INEGI y mediante inventarios, efectuados en estudios anteriores, de los bienes en función de la misma vulnerabilidad. Lo anterior se traduce en curvas de daños potenciales en función de la vulnerabilidad y de los tirantes hidráulicos alcanzados. Estas curvas determinan el riesgo de forma directa (en unidades monetarias), ya que toman en cuenta el peligro con los tirantes alcanzados, la vulnerabilidad de forma espacial de acuerdo a la zona de estudio, y la exposición como un porcentaje de daños en función del tirante de agua.

RIESGO POR INUNDACIÓN EN JOJUTLA

El riesgo por inundación para la ciudad de Jojutla es alto debido, principalmente, a su posición geográfica. La presencia del río Apatlaco, que cruza por la ciudad, hace que gran parte de la localidad este altamente expuesta a eventos de inundaciones fluviales. Mientras que, la vulnerabilidad, varía espacialmente a lo largo del municipio.

En el estudio hidrológico se determinaron las avenidas de diseño para el río Apatlaco en un punto aguas arriba de Jojutla, es decir, para la cuenca de aportación. Mediante un análisis de frecuencia de los gastos máximos instantáneos anuales, se determinaron los gastos máximos de 464.1 m³/s, 508.09 m³/s, 563.39 m³/s y 604.76 m³/s para los periodos de retorno de 10, 20, 50 y 100 años. Por otra parte, para modelar la precipitación de diseño de la cuenca propia de la ciudad se utilizaron una serie de factores asociados a distintos periodos de retorno obtenidos mediante un análisis de frecuencia de las precipitaciones regionalizadas; las precipitaciones acumuladas en 24h se corrigieron por un factor de reducción por área y se distribuyeron en el tiempo mediante un factor regional de convektividad y la técnica del bloque alterno. Las pérdidas se obtuvieron por el método del número de curva del SCS.

A partir de las avenidas y precipitaciones de diseño obtenidas en el estudio hidrológico y mediante topografía LiDAR, se realizó una modelación hidráulica bidimensional en el software Iber, el cual resuelve numéricamente las ecuaciones de aguas someras a través de un esquema en volúmenes finitos. Tomando como dominio o extensión la cuenca propia de la ciudad de Jojutla, se realizó un modelo hidráulico para cada uno de los periodos de retorno de análisis (10, 20, 50 y 100 años) tomando en cuenta su respectiva avenida de diseño como condición de contorno de entrada al modelo e ingresando un modelo hidrológico distribuido para considerar la precipitación de diseño y las perdidas por infiltración. A partir de los resultados obtenidos en la modelación se crearon mapas de tirante y velocidades máximas para cada escenario o periodo de retorno. Estos nos muestran de forma espacial la extensión de la mancha de inundación, determinando las zonas inundables y los tirantes alcanzados.

Mediante los tirantes y velocidades máximas obtenidas en la modelación hidráulica se determinó la severidad o peligrosidad máxima. En el presente trabajo, se adoptó el nomograma del estudio auspiciado por el gobierno de Nueva Gales del Sur denominado Dorrigo. Este tiene cinco grados de peligrosidad de acuerdo a la combinación de la velocidad y el tirante alcanzado en cada celda del ráster. En los mapas de severidad máxima para la ciudad de Jojutla quedaron identificadas

RIESGO POR INUNDACIÓN EN JOJUTLA

las zonas de mayor y menor peligro en cada uno de los escenarios, en los cuales se aprecia que la mayor peligrosidad se presenta en el cauce mismo y sus márgenes, no obstante, existen otras zonas alejado del río en las cuales de forma aislada presenta cierto grado de peligrosidad. Naturalmente, con forme aumenta el periodo de retorno se extiende también las zonas con mayor peligro. Estos mapas desarrollados para Jojutla pueden ayudar a los planeadores y tomadores de decisiones a la hora de proponer medidas no estructurales que apoyen a mitigar el riesgo como, por ejemplo, la planeación territorial la cual deberá dar prioridad de crecimiento a las zonas que muestran una severidad Muy Baja (verde), así mismo, en los programas de protección civil ante contingencias se deberá priorizar a las zonas con peligrosidad Muy Alta (rojo), entre otros.

Para mitigar los efectos producidos por una inundación se toman medidas estructurales o no estructurales. Para elegir qué tipo de medida es más adecuada regularmente se realiza un análisis económico de los daños potenciales que podrían causar la inundación para ayudar a los tomadores de decisiones. Tales análisis se centran principalmente en la estimación de los daños tangibles directos, como tal es el caso de la técnica adoptada en el presente trabajo, la cual consiste un conjunto de curvas de daños potenciales en zonas habitaciones aplicables en la República Mexicana. Para el caso de Jojutla, se estimaron costos más probables totales de \$296, \$362, \$437 y \$496 millones de pesos para los periodos de retorno de 10, 20, 50 y 100 años, respectivamente, donde el daño se presenta principalmente en las manzanas aledañas al cauce y en la zona norte de la ciudad. Así mismo, se estimó el daño anual esperado como la integración de la curva de los costos respecto a cada probabilidad de excedencia del evento, estimando un DAE = \$33 159 495 pesos totales para Jojutla.

Los daños económicos mencionados anteriormente corresponden únicamente al daño a las viviendas, se recomienda que en estudios posteriores se incluya otro tipo de daños como aquellos producidos a las carreteras, la industria, cultivos, etc.

Por otra parte, se recomienda que este tipo de análisis se actualice periódicamente con el objetivo de incluir información más reciente, por ejemplo, la topografía conforme vaya cambiando el terreno para que represente las condiciones actuales con mayor precisión. Así mismo, mayor información hidrométrica y climatológica, ya que, por ejemplo, si se presenta un evento máximo histórico de caudal, este sesgará el ajuste de distribución y los eventos extrapolados serán mayores lo cual significará mapas con peligrosidad mayor y estimaciones de daños económicos mayores.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

Alcocer-Yamanaka, V. H., Rodríguez-Varela, J. M., Bourguett-Ortiz, V. J., Llaguno-Guilberto, O. J., y Albornoz-Góngora, P. M. (septiembre-octubre, 2016). Metodología para la generación de mapas de riesgo por inundación en zonas urbanas. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 7(5), 33-55. ISSN 0187-8336.

Aparicio Mijares, F. J. (2017). Fundamentos de Hidrología de Superficie. México: Limusa.

Aqueduct Floods Hazard Maps. (s. f.). World Resources Institute. Recuperado 13 de diciembre de 2020, de <https://www.wri.org/data/aqueduct-floods-hazard-maps>

Aragón Hernández, J. L., De Luna Cruz, F., Vélez Morales, L., Fuentes Mariles, O. A., y Rubio Gutierrez, H. (2017). La Modelación Numérica en Hidráulica. Una Herramienta en la Planeación del Territorio. *L'esprit Ingénieur*, 7(1). Recuperado a partir de <http://revistas.ustatunja.edu.co/index.php/lingenieur/article/view/1370>

Arreguín-Cortés, Felipe Ignacio, López-Pérez, Mario, y Marengo-Mogollón, Humberto (2016). Las inundaciones en un marco de incertidumbre climática. *Tecnología y Ciencias del Agua*, VII (5),5-13. [fecha de Consulta 29 de Agosto de 2021]. ISSN: 0187-8336.

Baeza Ramírez, C. (2007). Estimación regional de factores de conectividad para el cálculo de las relaciones intensidad-duración-frecuencia. Tesis de Maestría. Programa de Maestría y Doctorado en Ingeniería Civil-Hidráulica. UNAM.

Banco Nacional de Datos de Aguas Superficiales (BANDAS). (2021). Bases de datos hidrométricas. Comisión Nacional del Agua.

Baró-Suárez, J. E., Díaz-Delgado, C., Calderón-Aragón, G., Esteller-Alberich, V., Cadena-Vargas, E. y Franco-Plata, R. (2012). Metodología para la Valoración Económica de Daños Potenciales Tangibles Directos por Inundación. Universidad Autónoma del Estado de México. 1ª Ed.

Baró-Suárez, José Emilio, Díaz-Delgado, Carlos, Calderón-Aragón, Georgina, Esteller-Alberich, María Vicenta, y Cadena-Vargas, Edel. (2011). Costo más probable de daños por inundación en zonas habitacionales de México. *Tecnología y ciencias del agua*, 2(3), 201-218. Recuperado en 17 de noviembre de 2021, de

RIESGO POR INUNDACIÓN EN JOJUTLA

http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-24222011000300013&lng=es&tlng=es.

Bladé, E. (2005). *Modelación del flujo en lámina libre sobre cauces naturales. Análisis integrado con esquemas en volúmenes finitos en una y dos dimensiones* [Tesis de doctorado, Universitat Politècnica de Catalunya. Departament d'Enginyeria Hidràulica, Marítima i Ambiental]. <http://hdl.handle.net/10803/6394>

Bladé, E., Cea, L., Corestein, G., Escolano, E., Puertas, J., Vázquez-Cendón, E., Dolz, J. y 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): 1-10. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rimni.2012.07.004>.

Bremer, M.H. y Lara C.A. (2001). Proyecto de Atlas de Riesgo de Inundación de la Ciudad de Monterrey. Reporte ITESM Campus Monterrey. México, 6 pp.

Caro-Camargo, C. A. (2015). *Modelación Hidrológica Distribuida Basada en Esquemas de Volúmenes Finitos*. Universitat Politècnica De Catalunya. Tesis Doctoral.

Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED). 2006a. *Guía Básica para la Elaboración de Atlas Estatales y Municipales de Peligros y Riesgos*.

Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED). 2006b. *Conceptos Básicos sobre Peligros, Riesgos y su Representación Geográfica*.

Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED). 2014. *Diagnóstico de Peligros e Identificación de Riesgos de Desastres en México*.

Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED). 2016. *Impacto Socioeconómico de los Desastres en México durante 2016, Resumen Ejecutivo*.

Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED). 2016b. Índice de peligro por inundación (IPI).

Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED). 2017. Atlas Nacional de Riesgos como herramienta para la identificación de fenómenos perturbadores y elaboración de escenarios de riesgo.

RIESGO POR INUNDACIÓN EN JOJUTLA

- Cervantes-Jaimes, C., Alcocer-Yamanaka, V., Arreguín-Cortés, F., Saavedra-Horita, R., y Rubio-Gutiérrez, H. (2012). Generación de mapas de riesgo de inundación. XXII Congreso Nacional de Hidráulica, 7-9 de noviembre, Acapulco, Guerrero, México.
- Chow, V. T., et al. (1994). Hidrología Aplicada. McGRAW-HILL INTERAMERICANA, S.A. Transversal 42B No. 19-77. Santafé de Bogotá, Colombia.
- Comisión Nacional de los Salarios Mínimos (CONASAMI). (2021). Salarios Mínimos 2021. Secretaria del Trabajo y Previsión Social.
- Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). (2019b, 6 octubre). *Programa Nacional Contra Contingencias Hidráulicas (PRONACCH)*. Recuperado de: <https://www.gob.mx/conagua/acciones-y-programas/programa-nacional-de-prevencion-contra-contingencias-hidraulicas-pronacch>
- Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). 2014. *Lineamientos para la elaboración de Mapas de Peligro por Inundación*. Recuperado de <https://www.gob.mx/conagua/articulos/programa-nacional-contra-contingencias-hidraulicas-pronacch-204987>
- Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). 2019a. *Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento, Libro 19 Drenaje Pluvial Urbano*. Recuperado de: <https://www.gob.mx/conagua/documentos/biblioteca-digital-de-mapas>
- Consejo Nacional de Población (CONAPO). (2010). Índice de Marginación Urbana 2010.
- Consejo Nacional de Población (CONAPO). (2020). Datos Abiertos del Índice de Marginación: Índice de marginación por AGEB urbana 2000-2010. Consultado en noviembre del 2020. https://www.conapo.gob.mx/es/CONAPO/Datos_Abiertos_del_Indice_de_Marginacion
- Diario Oficial de la Federación de México (DOF). (2016, 21 de diciembre). *Acuerdo por el que se emite la guía de contenido mínimo para la elaboración de Atlas Nacional de Riesgos*. Ciudad de México. Centro Nacional de Prevención de Desastres de la Secretaría de Gobernación.
- Domínguez, M. R., Huerta, S., Camargo, J., y Franco, V. (2018b). Pérdidas, Cap. A.1.4, Manual de diseño de obras civiles, Comisión Federal de Electricidad e Instituto de Ingeniería, UNAM, México.

RIESGO POR INUNDACIÓN EN JOJUTLA

- Domínguez, R., Carrizosa, E., Fuentes, G. E., Arganis, M. L., Osnaya, J., y Galván-Torres, A. E. (2018). Análisis regional para estimar precipitaciones de diseño en la república mexicana. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 9(1), 5-29. DOI: 10.24850/j-tyca-2018-01-01.
- Domínguez, R., et al. (2017). Estudio para regionalizar los gastos generados por avenidas máximas, como base para la elaboración de mapas de peligro por inundaciones fluviales en todas las cuencas de la república mexicana. Elaborado para el Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED), convenio no. iisconv-103-2016.
- Echávez Aldape, G. (1996). Introducción a los Modelos Hidráulicos de Fondo Fijo y a la Ingeniería Experimental. Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM); Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT); Asociación Mexicana de Hidráulica (AMH).
- Escalante Sandoval, C. A. y Reyes Chávez, L. (2008). Técnicas estadísticas en la hidrología. 2ª. ed., primera reimpresión, México, UNAM, Facultad de Ingeniería, 2008, 298p.
- Fernández-Pato, J. y García-Navarro, P. (2016). Simulación numérica de inundación de valles fluviales mediante un modelo difusivo implícito; *Ingeniería del Agua*, 20.3.
- García Navarro, P., Brufau, P., Murillo, J., y Zorraquino, C. (2003). Estudio hidráulico del riesgo de inundación en el meandro de ranillas: modelos de simulación numérica. *Ingeniería del agua*, 10(2), 115. <https://doi.org/10.4995/ia.2003.2578>.
- García, E., Reyna-Trujillo, T. y Hernández, Ma. E. (1990). Regímenes pluviométricos y Distribución de la precipitación. Extraído de Canícula, sequía intraestival o de medio verano. IV.5.1. Atlas Nacional de México. Vol. II. Escala 1:8000000. Instituto de Geografía, UNAM. México.
- González-Aguirre, J.C., Vázquez-Cendón, M.E., Alavez-Ramírez, J. (2016). Simulación numérica de inundaciones en Villahermosa México usando el código IBER. *Ingeniería del Agua*, 20.4.
- Guerra-Cobián, Víctor Hugo, Bâ, Khalidou M., Díaz-Delgado, Carlos, y Quentin, Emmanuelle. (2013). Efecto de la discretización espacial sobre las simulaciones de caudal con el modelo distribuido CEQUEAU. *Tecnología y ciencias del agua*, 4(5), 33-53. Recuperado en 02 de octubre de 2021, de http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-24222013000500003&lng=es&tlng=es.

RIESGO POR INUNDACIÓN EN JOJUTLA

Hernández, F. J. (2014). Obtención del Número de Curva (NC) para la República Mexicana Mediante el Uso de Sistemas de Información Geográfica Aplicando la Metodología del TR-55. Tesis, UNAM.

Hernández-Uribe, R. E., Barrios-Piña, H., y Ramírez, A. I. (2017, mayo-junio). Análisis de riesgo por inundación: metodología y aplicación a la cuenca Atemajac. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 8(3), 5-25.

Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM). 2018. *Protocolo de modelación hidrológica e hidráulica*, 59 páginas. Bogotá, D.C.

Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (1983). Conjunto de datos Geológicos vectoriales E14-5. Escala 1:250 000 Serie I. Consultado en: <https://datos.gob.mx/busca/dataset/conjunto-de-datos-geologicos-vectoriales-escala-1-250-000-serie-i-puebla/resource/671960d0-69c9-4202-83d9-fb4ca6de8900>.

Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2001). Conjunto de datos vectoriales Fisiográficos. Continuo Nacional serie I., Sistema topofomas, Escala 1:1,000,000. Consultado en: <https://datos.gob.mx/busca/dataset/conjunto-de-datos-vectoriales-fisograficos-continuo-nacional-escala-1-1-000-000-serie-i/resource/b14b1a10-41ba-42ef-be33-690772e0fc40>.

Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2009). Prontuario de información geográfica municipal de los Estados Unidos Mexicanos, Jojutla, Morelos, Clave geoestadística 17012.

Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2016). Conjunto de Datos Vectoriales de Uso de Suelo y Vegetación. Escala 1:250 000. Serie VI (Capa Unión), escala: 1:250 000 Edición: 1. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. Aguascalientes, México. Consultado en: <https://www.inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.html?upc=889463173359>

Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2020). Relieve continental. Modelos Digitales de Elevación de Alta Resolución LiDAR, con resolución de 5m. Terreno. Consultado en: <https://www.inegi.org.mx/temas/relieve/continental/#Descargas>.

Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2021a). Áreas geoestadísticas municipales, escala: 1:250000. Edición: 1. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. Extraído de:

RIESGO POR INUNDACIÓN EN JOJUTLA

<https://www.inegi.org.mx/temas/mg/#Descargas> Aguascalientes, México. Fecha de publicación: 10-02-2021; Nombre del producto: División política municipal, 1:250000.

Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2021b). *Población total*. Censo de Población y Vivienda 2020. <https://www.inegi.org.mx/sistemas/Olap/Proyectos/bd/censos/cpv2020/pt.asp>

Instituto Nacional de Investigaciones Forestales y Agropecuarias (INIFAP) - Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO), (1995). 'Edafología'. Escalas 1:250000 y 1:1000000. México. Fecha de publicación 10-07-2001.

Instituto Nacional para el Federalismo y el Desarrollo Municipal (Inafed). H. Ayuntamiento de Jojutla, Enciclopedia de Los Municipios y Delegaciones de México, Estado de Morelos. Consultado en: <http://www.inafed.gob.mx/work/enciclopedia/EMM17morelos/municipios/17012a.html>

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). 2012. *Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance, Climate Change Adaptation Special Report of the IPCC*. Cambridge: Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press.

Jiménez, M (1992) Manual de operación del programa Ax.EXE, Centro Nacional de Prevención de Desastres, México.

Lozoya, C. J. O., Domínguez, M. R., Arganis, J. M. L. (2017). Tormentas de diseño, Cap. A.1.7, Manual de diseño de obras civiles, Comisión Federal de Electricidad e Instituto de Ingeniería, UNAM, México.

Maldonado, C.E., Gómez Cruz, N. A. (2010). *Modelamiento y simulación de sistemas complejos*. Documento de Investigación No. 66. Universidad del Rosario.

Martínez Cantó, Raquel y Hidalgo, Arturo. (2016). Modelización de inundaciones fluviales con Iber. Caso práctico de Santiago del Molinillo (León). *Revista de las Ciencias Geomáticas*. 34. 7-12.

Meyer, V., Priest, S. y Kuhlicke, C. (2012). Economic evaluation of structural and non-structural flood risk management measures: examples from the Mulde River. *Nat Hazards* 62: 301 – 324. Springer.

RIESGO POR INUNDACIÓN EN JOJUTLA

- Nascimento, N., Léa Machado, M., Baptista, M. y De Paula E Silva, A. (2007). The assessment of damage caused by floods in the Brazilian context. *Urban Water Journal* 4 (3): 195 – 210.
- Ochoa, S., Reyna, T., Reyna, S., García, M., Labaque, M., y Díaz, J. M. (2016). Modelación Hidrodinámica del tramo Medio del río Ctalamochita, Provincia de Córdoba. *Revista De La Facultad De Ciencias Exactas, Físicas Y Naturales*, 3(2), 95–101. Recuperado a partir de <https://revistas.unc.edu.ar/index.php/FCEFYN/article/view/11847>
- Ordaz, M., Torres, M., Domínguez, R. (2013). Vulnerabilidad y riesgo por inundaciones. Instituto de Ingeniería, UNAM, México. DOI: 10.13140/RG.2.1.3180.3769.
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). 1997. Análisis de Sistemas de Producción Animal - Tomo 2: las Herramientas Básicas. Estudio FAO Producción y Sanidad Animal 140/2. <http://www.fao.org/3/w7452s/w7452s00.htm#Contents>
- Organización Meteorológica Mundial (OMM). 2009. Gestión integrada de crecidas: Documento conceptual, N°1047.
- Organización Meteorológica Mundial (OMM). 2013. Conceptualización del Programa Nacional de Prevención contra Contingencias Hidráulicas. Consultor: Aparicio Mijares, F. J. Acuerdo de Cooperación Técnica SEMARNAT / CNA – OMM 2005.
- Paterson Consultants Pty Limited. (2007, diciembre). *DORRIGO FLOOD STUDY* (Versión No. 6). <https://www.bellingen.nsw.gov.au/development/planning-policies/dorrigo-flood-study>.
- Pinos, J., y Timbe, L. (2019). Performance assessment of two-dimensional hydraulic models for generation of flood inundation maps in mountain river basins. *Water Science and Engineering*, 12(1), 11–18. <https://doi.org/10.1016/j.wse.2019.03.001>
- Real Academia Española (RAE). (s. f.). modelo | *Diccionario de la lengua española*. «Diccionario de la lengua española» - Edición del Tricentenario. Recuperado 8 de septiembre de 2021, de <https://dle.rae.es/modelo>
- Reyes Chávez, L., Escalante Sandoval, C. A. (2014). Hidrología básica. *Instituto Mexicano de Tecnología del Agua*, Universidad Autónoma de México, 2014, 766p.

RIESGO POR INUNDACIÓN EN JOJUTLA

Rivera Trejo, F. y Escalante Sandoval, C. (1999). Análisis comparativo de técnicas de estimación de avenidas de diseño. *Ingeniería del Agua*. Vol. 6 núm. 1. 49-54.

Salas Salinas, M. A. (2011). Metodología para la elaboración de mapas de riesgo por inundaciones en zonas urbanas. Fenómenos Hidrometeorológicos. Centro Nacional de Prevención de Desastres. Dirección de Investigación – Subdirección de Riesgos Hidrometeorológicos.

Salas Salinas, M. A. (2014). Obras de Protección Contra Inundaciones. Centro Nacional de Prevención de Desastres. Dirección de Investigación – Subdirección de Riesgos Hidrometeorológicos.

Salas Salinas, Marco A. y Jiménez Espinosa, Martín. (2019). Inundaciones. Elaborado para el Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED).

Secretaría de Desarrollo Agrario Territorial y Urbano (SEDATU). 2014. Bases para la Estandarización en la Elaboración de Atlas de Riesgos y Catálogo de Datos Geográficos para Representar el Riesgo.

Secretaría de Desarrollo Agrario Territorial y Urbano (SEDATU). 2017. Términos de referencia para la Elaboración de Atlas de Peligros y/o Riesgos.

Secretaría de Economía (SE). 2021. Jojutla: Economía, empleo, equidad, calidad de vida, educación, salud y seguridad pública. Data México. Recuperado 15 de mayo de 2021, de <https://datamexico.org/es/profile/geo/jojutla?occupationMetrics=workforceOption#economia>

Servicio Meteorológico Nacional (SMN). 2016. Servicio meteorológico nacional, tiempo y clima.

Sesento García, Leticia. (2008). *Modelo sistémico basado en competencias para instituciones educativas públicas* [Tesis de doctorado, Centro de Investigación y Desarrollo del Estado de Michoacán]. <https://www.eumed.net/tesis-doctorales/2012/lsg/indice.htm>

Simulador de Flujos de Agua de Cuencas Hidrográficas (SIATL). Consultado en: https://antares.inegi.org.mx/analisis/red_hidro/siatl/

Strahler A. (1982). Geografía Física. Ed. Omega.

RIESGO POR INUNDACIÓN EN JOJUTLA

- Texas Water Resources Institute (TWRI). (1999). Comparative Evaluation of Methods for Distributing Naturalized Streamflows from Gauge to Ungauged Sites. Technical Report No. 179.
- Uribe-Alcántara, E.M., Montes-León, M.A.L. y García-Celis, E. (2010, abril-junio). Mapa Nacional de Índice de Inundación. *Tecnología y Ciencias del Agua, antes Ingeniería hidráulica en México*. Vol. I, no. 2, pp. 73-85.
- USDA-SCS (1986) Urban Hydrology for Small Watersheds. Technical Release No. 55 (TR-55). USDASCS, Washington DC.
- Vásquez Ojeda, J.A. (2003). Modelación numérica en hidráulica. <https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwjy66mol4DzAhVykmofHas5B4EQFnoECB0QAQ&url=https%3A%2F%2Fwww.oocities.org%2Fhidropiura%2FModelNum.pdf&usq=AOvVaw2fX40V2MfaveCULnFgypjw>
- Vázquez Correa Lorena; Palazuelos Covarrubias Israel. (2017). Principales retos y pendientes ante las inundaciones en México. Mirada Legislativa, No. 138. Ciudad de México. Instituto Belisario Domínguez. Senado de la República. 21p.
- Versteeg, H. K., y Malalasekera, W. (2007). *An introduction to computational fluid dynamics: The finite volume method*. Harlow, England: Pearson Education Ltd.
- Vidal-Zepeda, R. (1990), 'Precipitación media anual' en Precipitación, IV.4.6. Atlas Nacional de México. Vol II. Escala 1 :4000000. Instituto de Geografía, UNAM. México; Fecha de publicación: 22-08-2001; Shapefile.
- Wang, Y. Li, Z. Tang, Z., Zeng, G., (2011). A GIS-Based Spatial Milti-Criteria Approach for Flood Risk Assessment in the Dongting Lake Region, Hunan, Central China. *Water Resources Management*, 25(13), pp. 3465-3484.