

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE
HIDALGO**

**INSTITUTO DE CIENCIAS BÁSICAS E
INGENIERÍA**

LICENCIATURA EN INGENIERÍA CIVIL



**“EVALUACIÓN DE DAÑOS POR INUNDACIÓN MEDIANTE LA
TECNOLOGÍA SOURCE-PATHWAY-RECEPTOR-CONSEQUENCE EN
TULA DE ALLENDE, HIDALGO.”**

TESIS

PARA OBTENER EL TÍTULO DE

LICENCIADO EN INGENIERÍA CIVIL

PRESENTA

DIEGO GETSEMANÍ AGUIRRE PÉREZ

BAJO LA DIRECCIÓN DE:

DR. OMAR SALVADOR AREU RANGEL

PACHUCA, HIDALGO, JULIO DE 2025

MÉXICO

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, agradezco profundamente a la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo y al Instituto de Ciencias Básicas e Ingeniería por brindarme los recursos necesarios para la realización de esta investigación. Su apoyo técnico y el acceso a herramientas especializadas resultaron indispensables para el desarrollo de este trabajo.

Extiendo mi gratitud al Dr. Omar Salvador Areu Rangel, mi asesor, por su orientación profesional, paciencia y valiosas recomendaciones, que enriquecieron significativamente esta tesis. Su compromiso y dedicación fueron una fuerte constante de aprendizaje y superación personal.

A mi familia, por ser mi pilar de apoyo durante este proceso. Gracias por su amor, comprensión y palabras de aliento, que me dieron fuerzas para continuar incluso en los momentos más difíciles.

Finalmente, agradezco a todas aquellas personas que, de manera directa o indirecta, contribuyeron al logro de este proyecto. A todos usted, mi más sincera gratitud.

RESUMEN

Las inundaciones han producido históricamente grandes daños a la infraestructura civil debido a factores como el cambio climático, la expansión descontrolada de la mancha urbana y la insuficiente planeación en el manejo de cuencas y ríos. El impacto de las inundaciones no se limita a pérdidas materiales y humanas, sino también a la economía, los servicios básicos, la movilidad y el bienestar de las comunidades.

La metodología Source-Pathway-Receptor-Consequence se utilizó para la evaluación de riesgos por inundación en Tula de Allende de manera integral. En el cual se analizaron las avenidas máximas asociadas a diferentes periodos de retorno, se determinó el flujo de agua a través del cauce y la planicie, se identificó la infraestructura y las zonas pobladas vulnerables, se estimó el daño y se localizaron albergues cercanos para la evacuación de habitantes.

Se obtuvieron mapas de peligrosidad, velocidad y profundidad, los cuales fueron tomados en cuenta para hacer una reclasificación de normas españolas a normas mexicanas y de esta forma medir con más precisión la severidad de daños dentro de las áreas inundadas, así como la infraestructura que sería afectada de acuerdo a las profundidades y velocidades estandarizadas.

Se propusieron vías rápidas de evacuación en caso de inundaciones futuras a albergues cercanos, ya sean centros o instituciones educativas, centros de atención médica, mercados o supermercados, así como el tiempo promedio que se harían las personas en evacuar a estas zonas seguras, lo cual ayuda a la gestión de riesgos y mayor capacidad de respuesta en eventos máximos futuros.

Palabras clave: gestión de riesgos, inundaciones, modelación hidrodinámica, zonas vulnerables, periodos de retorno y metodología SPRC.

ABSTRACT

Floods have historically caused great damage to civil infrastructure due to factors such as climate change, uncontrolled expansion of urban areas and insufficient planning in the management of basins and rivers. The impact of floods is not limited to material and human losses, but also to the economy, basic services, mobility and well-being of communities.

The Source-Pathway-Receptor-Consequence methodology was used to comprehensively assess flood risks in Tula de Allende. The maximum floods associated with different return periods were analyzed, the flow of water through the riverbed and the plain was determined, the infrastructure and vulnerable populated areas were identified, the damage was estimated and nearby shelters were located for the evacuation of inhabitants.

Hazard, speed and depth maps were obtained, which were taken into account to reclassify Spanish standards to Mexican standards and thus measure more accurately the severity of damage within the flooded areas, as well as the infrastructure that would be affected according to the standardized depths and speeds.

Rapid evacuation routes were proposed in case of future floods to nearby shelters, whether educational centers or institutions, medical care centers, markets or supermarkets, as well as the average time that people would take to evacuate to these safe areas, which helps risk management and greater response capacity in future maximum events.

Keywords: risk management, floods, hydrodynamic modeling, vulnerable zones, return periods and SPRC methodology.

ÍNDICE

CAPITULO 1. INTRODUCCIÓN	8
1.1 INTRODUCCIÓN	8
1.2 PROBLEMÁTICA	10
1.3 JUSTIFICACIÓN	11
1.4 PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN.....	11
1.5 HIPÓTESIS	11
1.6 OBJETIVOS DE INVESTIGACIÓN	12
1.6.1 Objetivo general	12
1.6.2 Objetivos específicos	12
CAPITULO 2. MARCO TEÓRICO	13
2.1 Evaluación de Riesgo de Inundación	13
2.1.1 Metodologías Internacionales de evaluación del riesgo de inundación	13
2.1.2. Metodologías nacionales de evaluación de riesgo de inundación	22
2.2 Modelo Numérico IBER	26
2.2.1 Método de Volúmenes Finitos (MVF).	27
2.2.2 Esquema numérico de IBER.....	29
CAPITULO 3. ÁREA DE ESTUDIO	32
3.2 Características geográficas y condiciones ambientales	33
3.3 Hidrografía	33
3.4 Climatología.....	34
3.5 Uso de suelo	35
3.6 Características socio-económicas.....	36
3.6.1 Grado de rezago social	38
CAPITULO 4. METODOLOGÍA	40
4.1 Determinación de avenidas de diseño.....	41
4.1.1 Datos climatológicos	41
4.1.2 Distribución de Gumbel.....	42
4.1.3 Gastos asociados a periodos de retorno	43
4.2 Recopilación de datos: Eventos pasados de inundación, batimetría del canal y topografía de la planicie	44
4.2.1 Source (Fuente): Estimación hidrológica de avenidas máximas para diferentes periodos de retorno.....	45
4.2.2 Pathway (Vía o Trayectoria): Configuración de modelo hidrodinámico: Preparación del dominio, definición de área de estudio y asignación de condiciones	45
4.2.3 Receptor (Receptor): Análisis de áreas expuestas al flujo y posibles puntos críticos	47
4.2.4 Consequence (Consecuencia): Identificación de zonas vulnerables y zonas seguras	47
4.3 Simulación numérica en IBER.....	48
4.3.1 Geometría y malla	48
4.3.2 Condiciones de frontera (Condiciones de entrada y salida del flujo).....	49

4.3.3 Coeficiente de rugosidad.....	50
4.3.4 Parámetros de simulación.....	51
CAPITULO 5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	52
5.1 Resultados hidrodinámicos de velocidad y profundidad de la inundación	52
5.2 Mapas de peligrosidad de inundación.....	59
5.3 Mapas de profundidad y peligrosidad reclasificados	63
5.4 Identificación de zonas vulnerables y zonas seguras	69
5.5 Discusión	71
5.5.1 Análisis de los resultados obtenidos	71
5.5.2 Interpretación de los hallazgos	71
5.5.3 Comparación con estudios similares.....	71
CAPITULO 6. CONCLUSIÓN	73
REFERENCIAS.....	74

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Tipo de Malla: a) Malla en una dimensión b) Malla estructurada en dos dimensiones c) Malla no estructurada en dos dimensiones. Fuente: Sanz-Ramos et al. (2022).....	30
Figura 2. Mapa ubicación de área de estudio, Tula de Allende.....	32
Figura 3. Mapa hidrográfico, Tula de Allende.....	34
Figura 4. Mapa climatológico, Tula de Allende.....	35
Figura 5. Mapa de grado de rezago social en Tula de Allende. Fuente: (CONEVAL, 2021).....	39
Figura 6. Mapa de grado de rezago social en la zona de estudio.	39
Figura 7. Metodología Source-Pathway-Receptor-Consequence.....	40
Figura 8. Zona de estudio (Colonias más vulnerables y tramo de cauce).	48
Figura 9. Malla de la planicie y batimetría del canal en Iber Model.....	49
Figura 10. Asignación de uso de suelo al modelo hidrodinámico.....	50
Figura 11. Hidrograma del Río Tula, aplicado a diferentes periodos de retorno.	51
Figura 12. Mapas de velocidad a diferentes periodos de retorno: a) 10 años b) 50 años c) 100 años d) 500 años e)1000 años.	55
Figura 13. Mapas de profundidad a diferentes periodos de retorno: a) 10 años b) 50 años c) 100 años d) 500 años e)1000 años.	59
Figura 14. Mapas de peligrosidad a diferentes periodos de retorno: a) 10 años b) 50 años c) 100 años d) 500 años e)1000 años.	62
Figura 15. Mapas reclasificados de peligrosidad a diferentes periodos de retorno: a) 10 años b) 50 años c) 100 años d) 500 años e)1000 años.....	69
Figura 16. Tiempo necesario para evacuar la zona inundada hacia los albergues.	70

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Grado de riesgo para las principales localidades de Tula de Allende.	8
Tabla 2. Cuencas que convergen en el municipio de Tula de Allende.....	33
Tabla 3. Superficie y tipos de uso de suelo y vegetación (2018).	36
Tabla 4. Gastos a diferentes periodos de retorno.	44
Tabla 5. Gastos máximos anuales de la estación hidrométrica “JASSO”.	49
Tabla 6. Parámetros numéricos para la simulación del escurrimiento.	51
Tabla 7. Estándares para la clasificación de severidad.....	63
Tabla 8. Áreas de mapas de peligrosidad reclasificados a diferentes periodos de retorno: a) 10 años b) 50 años c)100 años d) 500 años e) 1000 años.	65
Tabla 9. Diferencia de áreas con respecto a su periodo de retorno consecutivo.	66
Tabla 10. Diferencia de áreas de los periodos de retorno (10 años y 1000 años)	66

CAPITULO 1. INTRODUCCIÓN

1.1 INTRODUCCIÓN

Los desastres por inundación en zonas urbanas pueden surgir de la ocupación de las planicies de inundación o ser generados por el cambio en el uso de la tierra, tales como la urbanización y la deforestación (Tucci, C. E. M., 2004). Sus efectos se ven reflejados generalmente en la ciudadanía e infraestructura más vulnerable y suelen producir severos daños a la población, vías de comunicación, a la infraestructura urbana, hidroagrícola, fauna, así como a diversas actividades económicas e incluso pueden ocasionar pérdida de vidas humanas (Rodríguez Varela et al., 2014).

En Tula de Allende la mayor parte de las afectaciones se presentan por fenómenos hidrometeorológicos, las lluvias torrenciales y por consecuencia la creciente del río Tula e inundaciones. En Hidalgo, el río Tula se considera de mayor riesgo por desbordamiento. Las estaciones hidrométricas de la Comisión Nacional del Agua, ubicadas en dicho río y sus tributarios reportan que los valores alcanzan o superan un gasto de 500 m³/s durante temporada de lluvias. Esto puede ocasionar inundaciones en las localidades situadas sobre el cauce inmediato del río Tula, en la [Tabla 1](#) se muestra el nivel de riesgo a inundaciones, deslizamientos y hundimientos que tienen las localidades más habitadas dentro de Tula de Allende, reportado en el Atlas de Peligros y/o Riesgos del municipio de Tula de Allende (GeoEcoSphera. S.C, 2020).

Tabla 1. Grado de riesgo para las principales localidades de Tula de Allende.

Localidad	Inundaciones	Deslizamiento	Hundimientos
<i>Bomintzha</i>	Muy Alto	Alto	Alto
<i>El Llano</i>	Alto	Muy Alto	Muy Alto
<i>San Marcos</i>	Alto	Muy Alto	Alto
<i>San Miguel Vindho</i>	Alto	Alto	Baja
<i>Santa Ana Ahuhuepan</i>	Muy Alto	Muy Alto	Muy Alto
<i>Santa María Ilucan</i>	Medio	Medio	Baja
<i>Tula de Allende</i>	Muy Alto	Muy Alto	Medio

Fuente: GeoEcoSphera S.C, 2020.

La inundación más devastadora hasta la fecha en Tula de Allende ocurrió el 6 y 7 de septiembre de 2021, su principal causa fueron las lluvias intensas y el desfogue de presas como la presa el Requena, para evitar que alcanzara niveles críticos, sin embargo, esto aumentó el caudal del río Tula provocando el desbordamiento, más de 70 calles y varias colonias, por ejemplo, La Mora, San Marco, El Carmen, San Lorenzo, la Unidad Habitacional Pemex, entre otras. A consecuencia de esto, se reportó la muerte de 17 personas, alrededor de 10,000 personas tuvieron que evacuar y más de 35,000 personas fueron afectadas directamente, con miles de viviendas, comercios y edificios (Gutiérrez, 2022, Guillén, 2024).

Las metodologías de evaluación de riesgo, lo definen en términos cualitativos o cuantitativos. Dentro de las metodologías cuantitativas se encuentra el análisis de costo-beneficio (CBA por sus siglas en inglés), el análisis multicriterio (MCA por sus siglas en inglés), el índice de vulnerabilidad costera (CVI por sus siglas en inglés) y el modelo fuente-ruta-receptor-consecuencias (SPRC por sus siglas en inglés). Los métodos cuantitativos son más precisos para determinar el riesgo, siendo el método SPRC uno de los más aplicados (DNP, s.f.). Sayers et al., (2002) menciona que para que surja un riesgo, debe haber un peligro que consiste en una "fuente" o evento iniciador (por ejemplo, fuertes lluvias); un "receptor" (por ejemplo, cimas de acantilados o propiedades de llanura aluvial); y una ruta entre la fuente y el receptor (por ejemplo, rutas de inundación que incluyan defensas, flujo superficial o deslizamientos de tierra). La metodología SPRC es un modelo conceptual que permite representar mediante un sistema el proceso de inundación para calcular daños específicos (Nicholls & Brampton, 1998). El modelo conceptual SPRC se utilizó por primera vez en el campo de la ingeniería ambiental a fines de la década de 1970 para describir el flujo de contaminantes ambientales desde una fuente, a través de diferentes vías hasta receptores potenciales (Holdgate, 1979). En México, un estudio de evaluación de riesgo costero realizado en dos zonas socioeconómicamente diferentes en el estado de Quintana Roo, sirvió para identificar las variables socioeconómicas que permiten la estimación de las posibles consecuencias que traería una inundación costera. La metodología aplicada se basa en el modelo SPRC, en donde las consecuencias en el receptor fueron evaluadas en términos de pérdidas de acuerdo a la clasificación, el cual las considera como tangibles (materiales) e intangibles (no materiales) en función de si se pueden o no evaluar monetariamente (Fernández et al.). Otra aplicación de la metodología SPRC fue en un estudio en el balneario costero de Zihuatanejo, México. El cual se basó en un modelo de inundación por tsunami en la costa de Zihuatanejo y la caracterización socioeconómica de las viviendas de la zona, con base en curvas de daños. Los resultados permiten caracterizar el daño económico en las principales calles en múltiplos del Salario Mínimo Diario Mexicano (SMD) de 2020 (Morgado et al., 2023).

En relación con esto, las simulaciones numéricas, incluidas las nuevas metodologías pueden utilizarse de forma eficaz para desarrollar medidas preventivas y estrategias de gestión de desastres (Yavuz, Kentel y Aral 2020). La evaluación de amenazas de inundación es entender la probabilidad de que una inundación

de una intensidad particular ocurra en un período extendido. La evaluación de amenazas apunta a estimar esta probabilidad durante períodos que van desde años hasta décadas para apoyar las actividades de gestión de riesgos (Wright, 2016).

El modelo Iber consta de diferentes módulos de cálculo acoplados entre sí, en los cuales se incluye un módulo hidrodinámico, un módulo de turbulencia y un módulo de transporte de sedimentos (Bladé et al., 2014). El módulo hidrodinámico resuelve las ecuaciones de St. Venant bidimensionales, incorporando los efectos de la turbulencia y rozamiento superficial por viento. La fricción de fondo se evalúa mediante la fórmula de Manning.

Esta investigación aplicará la metodología Source-Pathway-Receptor-Consequence, incluyendo las características de Tula de Allende, la cual abarca desde la fuente del fenómeno hasta las consecuencias de los daños (Morgado et al. 2023). El mapeo del riesgo de inundaciones se puede utilizar para realizar una gestión del riesgo de inundaciones más eficiente y sostenible, útil para la protección contra inundaciones actual y para las generaciones futuras (Kefi et al., 2018). Se podrá utilizar para zonas con características similares, apoyando a las autoridades a definir medidas de evacuación en casos de desastres naturales en las zonas susceptibles a inundaciones, así como el reconocimiento de zonas seguras para la población en caso de fenómeno natural. Se espera que la metodología sea útil para la toma de decisiones efectivas y rentables para gestionar un evento de inundación.

1.2 PROBLEMÁTICA

A pesar de la importancia como recurso hídrico y eje económico de la región, el río Tula ha experimentado eventos de inundación severos en los últimos años, debido a fenómenos naturales con el manejo inadecuado del territorio. Estos eventos no solo son consecuencia de fenómenos naturales, sino también a una gestión inadecuada del territorio. Como resultado, se han registrado pérdidas económicas significativas, el desplazamiento de poblaciones vulnerables y daños graves a la infraestructura pública y privada.

Este problema es agravado por una combinación de factores interrelacionados:

- Lluvias intensas y cambios en los patrones climáticos.
- Desbordamiento del río Tula.
- Crecimiento urbano descontrolado.
- Infraestructura insuficiente y deteriorada.
- Falta de mapas de riesgo actualizados y precisos.

1.3 JUSTIFICACIÓN

En México existen estudios sobre inundación, sin embargo, carecen investigaciones específicas tomando en cuenta el contexto de Tula de Allende y el impacto socioeconómico que sus afectaciones tendrían en el sitio.

Las inundaciones en el municipio de Tula de Allende han sido una de las principales problemáticas durante los últimos años, causando daños económicos, ambientales y sociales. A pesar de las medidas de mitigación que se han tomado se siguen presentando inundaciones con alto nivel de daño. Entre los eventos más recientes se destaca la inundación de septiembre de 2021, donde el desbordamiento del río Tula resultó en pérdidas humanas y daños materiales.

Este estudio busca evaluar los daños directos utilizando simulaciones hidrodinámicas y la metodología SPRC para conocer las zonas más vulnerables en eventos de inundaciones. Los resultados obtenidos ayudarán a mejorar la gestión de riesgos en eventos futuros. Los resultados no solo serán de ayuda para la región de Tula de Allende, sino también podrá replicarse en más regiones con el mismo problema de inundaciones en contextos similares.

1.4 PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN

¿Cuáles son las zonas más vulnerables y seguras en caso de una inundación en la cuenca del río Tula, considerando diferentes escenarios hidrológicos?

1.5 HIPÓTESIS

El uso de simulaciones, mediante los métodos de volúmenes finitos, para el análisis de inundación en Tula de Allende, Hidalgo, permitirá identificar con efectividad las zonas más vulnerables y estimar daños potenciales, empleando la metodología Source-Pathway-Receptor-Consequence (SPRC).

1.6 OBJETIVOS DE INVESTIGACIÓN

1.6.1 Objetivo general

Evaluar los daños directos ocasionados por inundaciones en las zonas más vulnerables del municipio de Tula de Allende, Hidalgo, mediante simulaciones hidrodinámicas, con el fin de identificar áreas críticas y determinar los niveles de exposición al riesgo, para orientar estrategias de mitigación y planificación territorial.

1.6.2 Objetivos específicos

- Aplicar un modelo hidrodinámico (IBER) integrando datos topográficos, climáticos y de uso de suelo, para simular escenarios de inundación asociados a distintos periodos de retorno.
- Diseñar una metodología para la evaluación de daños directos por inundación, integrando variables hidrodinámicas (profundidad y velocidad) y reclasificando los niveles de riesgo conforme a normativas mexicanas.
- Analizar los resultados de las simulaciones para categorizar áreas críticas (alto riesgo) y seguras (bajo riesgo), considerando la interacción entre variables hidrodinámicas, infraestructura y densidad poblacional.
- Validar el modelo hidrodinámico mediante la comparación entre resultados simulados y datos históricos de inundaciones en Tula de Allende, utilizando métricas de precisión (RMSE, Nash-Sutcliffe).

CAPITULO 2. MARCO TEÓRICO

2.1 Evaluación de Riesgo de Inundación

2.1.1 Metodologías Internacionales de evaluación del riesgo de inundación

Las metodologías de evaluación de riesgo, se definen en términos cualitativos o cuantitativos. Dentro de éstas se encuentran: Análisis de Costo-Beneficio (CBA por sus siglas en inglés), Análisis Multicriterio (MCA por sus siglas en inglés), Índice de Vulnerabilidad Costera (CVI por sus siglas en inglés), Índice de Vulnerabilidad Ante Inundaciones (FVI por sus siglas en inglés), Análisis de Peligro, Vulnerabilidad y Riesgo (PVR), Modelación Hidrológica e Hidráulica, Análisis de Eventos Extremos y el Modelo Fuente-Ruta-Receptor-Consecuencias (SPRC por sus siglas en inglés). Los métodos cuantitativos son más precisos para determinar el riesgo, siendo el método SPRC uno de los más aplicados (Fernández et al.).

Análisis de Costo-Beneficio (ACB)

Es una herramienta económica fundamental en la gestión del riesgo de desastres, especialmente en la evaluación de medidas de mitigación contra inundaciones. Este método compara los costos asociados con la implementación de dichas medidas con los beneficios esperados en términos de reducción de riesgos y daños. Su objetivo principal es determinar la rentabilidad y viabilidad económica de las intervenciones propuestas, facilitando la toma de decisiones informadas sobre inversiones destinadas a minimizar el impacto de eventos adversos.

Se emplea para evaluar diversas estrategias de mitigación, como la construcción de infraestructuras de protección, la restauración de ecosistemas naturales y la implementación de sistemas de alerta temprana. Al cuantificar tanto los costos de estas intervenciones como los beneficios derivados de la reducción de daños a propiedades, infraestructuras y vidas humanas, permite priorizar aquellas acciones que ofrecen un mayor retorno sobre la inversión. Un proyecto se considera rentable cuando la relación beneficio-costos es de 1.0 o mayor (FEMA,2024).

El **Departamento Nacional de Planeación (DPN) (2019)** nos habla de la estructura que sigue esta metodología la cual se desarrolla en los siguientes pasos:

- Identificación de alternativas de mitigación: Se determinan las posibles medidas a implementar para reducir el riesgo de inundación en una zona específica.
- Estimación de costos: Incluye los gastos iniciales de implementación, costos de operación y mantenimiento a lo largo del tiempo, y posibles costos indirectos asociados.

- Estimación de beneficios: Se calculan las pérdidas evitadas gracias a la implementación de la medida, considerando daños a infraestructuras, pérdidas económicas, afectaciones a la salud y al medio ambiente, entre otros.
- Análisis temporal: Se aplican técnicas de descuento para comparar costos y beneficios a lo largo del horizonte temporal del proyecto, obteniendo indicadores como el Valor Actual Neto (VAN) y la Tasa Interna de Retorno (TIR).
- Evaluación de rentabilidad: Se determina la relación beneficio-costos. Un proyecto se considera rentable si esta relación es igual o superior a uno.
- Análisis de sensibilidad: Se examina cómo variaciones en los supuestos clave afectan la rentabilidad del proyecto, evaluando la robustez de los resultados ante diferentes escenarios.

Diversas investigaciones han demostrado la eficacia de esta metodología en la evaluación de medidas de mitigación de inundaciones, algunos de estos casos son:

- Restauración de arrecifes de coral en Florida y Puerto Rico: Un estudio del Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS) evaluó la restauración de 1,000 kilómetros de arrecifes de coral como barreras naturales contra inundaciones costeras. Los resultados indicaron que, con una inversión aproximada de \$3 millones por kilómetro, se podrían proteger propiedades y actividades económicas valoradas en más de \$391 millones anuales, además de salvaguardar a cerca de 3,000 personas cada año (CEPREDENAC, et al., 2019).
- Medidas de retención natural de agua en Alto Vicentino, Italia: En esta región, se implementaron intervenciones para mitigar inundaciones mediante soluciones basadas en la naturaleza. Un análisis costo-beneficio reveló que los beneficios de estas medidas superaban en más del doble a los costos, con una relación beneficio-costos de 2.3 y una tasa interna de retorno del 14.1% (GIZ, 2018).
- Evaluación de obras de mitigación en Centroamérica: Un estudio regional analizó proyectos de mitigación de inundaciones en países centroamericanos, aplicando el ACB para determinar su rentabilidad. Los hallazgos destacaron que, en múltiples casos, las inversiones en infraestructura de mitigación resultaron altamente beneficiosas en comparación con los costos, justificando la implementación de dichas obras (OEA, 2007).

Análisis de Multicriterio (AMC)

Es una metodología empleada para evaluar y priorizar diversas alternativas en la toma de decisiones, considerando múltiples criterios que pueden ser tanto cuantitativos como cualitativos. En el ámbito de la

gestión del riesgo de inundaciones, el AMC se utiliza para identificar y clasificar áreas susceptibles, facilitando la implementación de medidas preventivas y de mitigación.

Este enfoque se aplica en la gestión del riesgo de inundaciones mediante la integración de diferentes variables que influyen en la susceptibilidad de una zona a inundarse. Estas variables pueden incluir la pendiente del terreno, el uso del suelo, la proximidad a cuerpos de agua, la cobertura vegetal y las características del drenaje, entre otras. Al asignar pesos específicos a cada criterio según su relevancia, el AMC permite generar mapas de riesgo que identifican áreas con diferentes niveles de susceptibilidad a inundaciones (Sener et al., 2015).

La implementación del AMC en la evaluación del riesgo de inundaciones sigue los siguientes pasos:

- Selección de criterios: Identificación de las variables relevantes que afectan la susceptibilidad a inundaciones, como la pendiente del terreno, el tipo de suelo, la cobertura vegetal y la distancia a cuerpos de agua.
- Asignación de pesos: Determinación de la importancia relativa de cada criterio mediante técnicas como el Proceso Analítico Jerárquico (AHP), que facilita la comparación entre pares de criterios.
- Normalización de datos: Estandarización de las unidades de medida de los diferentes criterios para permitir su comparación y combinación.
- Integración de criterios: Combinación de los criterios ponderados para obtener un índice compuesto de susceptibilidad a inundaciones, generalmente utilizando Sistemas de Información Geográfica (SIG) para la superposición de capas de información.
- Clasificación de zonas de riesgo: Generación de mapas que categorizan las áreas en diferentes niveles de riesgo (muy alto, alto, medio, bajo, muy bajo), facilitando la visualización y priorización de zonas críticas.

Esta metodología fue aplicada en la Cuenca del Arroyo Napostá Grande, Argentina, en la cual investigadores utilizaron el AMC para determinar áreas expuestas al peligro de eventos de exceso hídrico, integrando variables geomorfológicas, hidrográficas y edáficas en un entorno SIG. Los resultados permitieron zonificar la cuenca según su susceptibilidad a inundaciones, proporcionando información valiosa para la planificación territorial y la gestión del riesgo (García Bu Bucogen et al., 2020). De igual forma en el Municipio de Sucre, Colombia, se desarrolló un mapa de riesgo de inundación utilizando AMC y SIG, considerando factores como la topografía, la densidad de drenaje y la cobertura del suelo. El estudio identificó áreas con diferentes niveles de riesgo, sirviendo como herramienta para la planificación urbana y la implementación de medidas de mitigación (Sánchez Ortiz & Perea Carabali, 2024).

Índice de vulnerabilidad costera (IVC)

Es una metodología ampliamente utilizada para evaluar la susceptibilidad de las zonas costeras ante fenómenos como el aumento del nivel del mar, la erosión y las inundaciones. Este índice integra diversas variables físicas y, en algunas adaptaciones, socioeconómicas, proporcionando una visión cuantitativa de la vulnerabilidad costera.

Se emplea para identificar áreas costeras que presentan mayor riesgo frente a amenazas naturales, facilitando la planificación y gestión del territorio. Al cuantificar factores como la geomorfología, la tasa de cambio de la línea de costa, la pendiente costera, el rango mareal, la altura significativa de las olas y la tasa de cambio relativo del nivel del mar, el IVC permite priorizar intervenciones en zonas más vulnerables.

La implementación del IVC sigue una serie de pasos estructurados:

- Selección de variables clave: Identificación de factores que influyen significativamente en la vulnerabilidad costera. Las variables comúnmente consideradas incluyen:
 - Geomorfología: Tipo de formación costera y su resistencia a la erosión.
 - Tasa de cambio de la línea de costa: Velocidad a la que la línea de costa avanza o retrocede.
 - Pendiente costera: Inclinación del terreno en la zona costera.
 - Tasa relativa de cambio del nivel del mar: Variación del nivel del mar en relación con la tierra.
 - Altura significativa de las olas: Promedio del tercio superior de las alturas de las olas registradas.
 - Rango mareal medio: Diferencia promedio entre las mareas altas y bajas.
- Cuantificación de variables: Asignación de puntuaciones a cada variable en una escala, generalmente de 1 a 5, donde 1 indica baja vulnerabilidad y 5 alta vulnerabilidad. Esta clasificación se basa en umbrales específicos definidos para cada variable.
- Cálculo del IVC: Integración de las puntuaciones asignadas a través de una fórmula matemática que combina las variables, obteniendo un valor único de vulnerabilidad para cada segmento costero analizado.
- Clasificación de resultados: Los valores obtenidos se categorizan en diferentes niveles de vulnerabilidad (baja, media, alta) utilizando percentiles o rangos predefinidos.

Diversos estudios han aplicado el IVC para evaluar la vulnerabilidad costera en diferentes regiones:

Litoral de Tabasco, México: Investigadores adaptaron la metodología del IVC para evaluar la vulnerabilidad del litoral tabasqueño, considerando variables como geomorfología, tasa de erosión, pendiente costera, cambio en el nivel del mar, altura de oleaje y rango mareal. Los resultados identificaron áreas con alta susceptibilidad a inundaciones y erosión, proporcionando información clave para la gestión costera en la región (Ojeda Zújar et al.,2009).

Costa Andaluza, España: Se aplicó el IVC utilizando Tecnologías de la Información Geográfica (TIG) para evaluar la vulnerabilidad de la costa andaluza ante un posible aumento del nivel del mar. El estudio integró variables físicas en un Sistema de Información Geográfica (SIG), generando mapas detallados que identifican zonas de alta vulnerabilidad y facilitando la planificación de medidas de adaptación (Ramos et al., 2016).

Índice de vulnerabilidad ante inundaciones (IVI)

Es una herramienta analítica diseñada para evaluar la susceptibilidad de comunidades y regiones frente a eventos de inundación. Este índice integra diversas variables que reflejan las dimensiones física, social y económica de la vulnerabilidad, proporcionando una visión integral del riesgo asociado a las inundaciones.

Se utiliza para identificar áreas y poblaciones con mayor vulnerabilidad a inundaciones, facilitando la priorización de intervenciones y la asignación eficiente de recursos en la gestión del riesgo. Al considerar factores como la exposición geográfica, las condiciones socioeconómicas y la capacidad de respuesta de la comunidad, el IVI ofrece una perspectiva holística que es esencial para el desarrollo de estrategias efectivas de mitigación y adaptación (Lozano Cortijo, O, 2008).

La elaboración del IVI implica una serie de pasos metodológicos estructurados:

- Selección de variables relevantes: Identificación de factores que contribuyen a la vulnerabilidad, tales como la densidad poblacional en zonas inundables, la calidad de las infraestructuras, el nivel educativo, los ingresos económicos y la disponibilidad de sistemas de alerta temprana.
- Recolección y normalización de datos: Obtención de datos cuantitativos y cualitativos de fuentes confiables, seguidos de un proceso de normalización para asegurar la comparabilidad entre diferentes variables.
- Asignación de ponderaciones: Determinación de la importancia relativa de cada variable mediante técnicas como el Proceso Analítico Jerárquico (AHP), lo que permite reflejar adecuadamente la influencia de cada factor en la vulnerabilidad total.
- Cálculo del índice compuesto: Integración de las variables ponderadas en una fórmula matemática que produce un valor único de vulnerabilidad para cada unidad de análisis, ya sea una comunidad, municipio o región.
- Clasificación y mapeo de resultados: Categorización de los valores del IVI en niveles de vulnerabilidad (bajo, medio, alto) y representación geoespacial mediante Sistemas de Información Geográfica (SIG) para visualizar las áreas de mayor riesgo.

Diversas investigaciones han aplicado el IVI para evaluar la vulnerabilidad ante inundaciones en diferentes contextos:

- Estudio en México: Se desarrolló una metodología para medir la vulnerabilidad municipal por inundaciones, integrando indicadores socioeconómicos y ambientales. Este enfoque permitió identificar municipios con mayor susceptibilidad, proporcionando una base sólida para la planificación y gestión del riesgo a nivel local.
- Análisis en Colombia: Se diseñaron metodologías cualitativas y heurísticas para analizar la vulnerabilidad ante inundaciones en centros urbanos. Estas metodologías consideraron variables críticas y asignaron ponderaciones específicas, facilitando la identificación de áreas de mayor riesgo y la implementación de medidas preventivas (Morales-Novelo, J.A., 2019).

Análisis de peligro, vulnerabilidad y riesgo (PVR)

Es una metodología integral utilizada para evaluar y gestionar los riesgos asociados a desastres naturales y tecnológicos. Este enfoque permite identificar las amenazas potenciales, determinar las vulnerabilidades de los elementos expuestos y estimar el nivel de riesgo, facilitando la implementación de medidas efectivas de prevención y mitigación.

Se aplica en diversos contextos para abordar riesgos como inundaciones, sismos, deslizamientos de tierra y accidentes tecnológicos. Su objetivo principal es proporcionar una base científica y técnica para la toma de decisiones en la planificación territorial, el diseño de infraestructuras y la formulación de políticas públicas orientadas a la reducción del riesgo de desastres.

La implementación del PVR sigue una serie de etapas estructuradas:

- Evaluación del peligro:
 - Identificación de Amenazas: Determinación de los eventos potenciales que pueden afectar una zona específica, como huracanes, inundaciones, terremotos o accidentes industriales.
 - Análisis de Frecuencia y Magnitud: Estudio de la recurrencia histórica y la intensidad de los eventos identificados para establecer escenarios probables.
- Evaluación de la vulnerabilidad:
 - Análisis de Exposición: Identificación de los elementos susceptibles de ser afectados, incluyendo población, infraestructuras, servicios esenciales y ecosistemas.
 - Determinación de Fragilidades: Evaluación de las debilidades intrínsecas de los elementos expuestos que aumentan su susceptibilidad al daño.

- Estimación del riesgo:
 - Integración de peligro y vulnerabilidad: Combinación de los resultados de las evaluaciones anteriores para estimar el nivel de riesgo, considerando la probabilidad de ocurrencia y el impacto potencial de los eventos adversos.
 - Mapeo de riesgos: Representación geoespacial de las áreas con diferentes niveles de riesgo, facilitando la visualización y priorización de zonas críticas.

La metodología PVR ha sido aplicada en diversos contextos para fortalecer la gestión del riesgo de desastres:

- Cuba: El país ha implementado estudios de PVR para diferentes tipos de desastres, incluyendo inundaciones por intensas lluvias, penetraciones del mar y fuertes vientos. Estos estudios han sido fundamentales para la planificación territorial y la reducción de vulnerabilidades en comunidades expuestas (PNUD, 2015).
- Evaluación de riesgos tecnológicos: En instalaciones que manejan sustancias químicas peligrosas, se han realizado estudios de PVR para identificar posibles escenarios de accidentes, evaluar las vulnerabilidades asociadas y establecer medidas de seguridad adecuadas (Ríos Saldaña et al., 2023).

Modelación hidrológica e hidráulica

Es una metodología esencial en la ingeniería y gestión de recursos hídricos, utilizada para simular y analizar el comportamiento de sistemas acuáticos bajo diversas condiciones. Esta técnica permite comprender y predecir cómo responden las cuencas hidrográficas y las infraestructuras hidráulicas ante eventos naturales y actividades humanas, facilitando la toma de decisiones informadas en la planificación y mitigación de riesgos asociados al agua (IDEAM, 2024).

Esta metodología se aplica en múltiples contextos, entre los que destacan:

- Gestión de inundaciones: Simulación de eventos de crecidas para identificar áreas susceptibles a inundaciones y diseñar medidas de protección adecuadas.
- Diseño de infraestructuras hidráulicas: Evaluación del desempeño de presas, canales, alcantarillados y otras estructuras bajo diferentes escenarios hidrológicos.
- Planificación de recursos hídricos: Análisis de la disponibilidad y demanda de agua en una cuenca para una gestión sostenible.
- Calidad del agua: Estudio de la dispersión de contaminantes en cuerpos de agua superficiales y subterráneos.

La implementación de esta metodología sigue una serie de pasos estructurados:

- Definición del objetivo del estudio: Clarificar el propósito de la modelación, ya sea para prevención de inundaciones, diseño de infraestructuras o gestión de recursos.
- Recopilación de datos: Reunir información relevante, como registros de precipitación, caudales de ríos, topografía, uso del suelo y características del suelo.
- Selección del modelo apropiado: Elegir el tipo de modelo que mejor se adapte a los objetivos y datos disponibles, pudiendo ser modelos determinísticos basados en procesos físicos o modelos estocásticos que emplean técnicas probabilísticas.
- Calibración del modelo: Ajustar los parámetros del modelo para que sus salidas reproduzcan con precisión los datos observados, asegurando su fiabilidad.
- Validación del modelo: Verificar la capacidad del modelo para predecir condiciones diferentes a las utilizadas en la calibración, evaluando su robustez.
- Simulación de escenarios: Ejecutar el modelo bajo diversas condiciones hipotéticas para analizar posibles respuestas del sistema y planificar acciones.
- Análisis y comunicación de resultados: Interpretar los resultados obtenidos y presentarlos de manera comprensible para los responsables de la toma de decisiones y otras partes interesadas.

La modelación hidrológica e hidráulica ha sido aplicada en diversos estudios, entre los cuales se destacan:

- Evaluación de inundaciones en la Cuenca del Río Magdalena, Colombia: Se desarrolló un modelo acoplado hidrológico-hidráulico para simular el comportamiento del río Magdalena, proporcionando información clave para la gestión del riesgo de inundaciones en la región (Sánchez Lozano, J.L., 2017).
- Análisis de redes de distribución de agua en sistemas urbanos: Utilizando software especializado como WaterCAD, se modelaron redes de distribución de agua potable para optimizar su diseño y operación, asegurando un suministro eficiente y seguro (Bentley Systems Incorporated, s.f.).

Análisis de eventos extremos

Es una metodología estadística empleada para evaluar la probabilidad y magnitud de sucesos inusuales, como inundaciones severas, que pueden tener impactos significativos en comunidades y ecosistemas. Este enfoque es esencial para la gestión del riesgo de desastres, ya que permite anticipar y mitigar los efectos de fenómenos naturales extremos.

En el contexto de las inundaciones, el análisis de eventos extremos se utiliza para:

- Estimación de caudales máximos probables: Determinar los caudales de río que podrían alcanzarse durante eventos de precipitación extrema, información crucial para el diseño de infraestructuras hidráulicas y la planificación urbana.
- Evaluación de frecuencia y magnitud de inundaciones: Analizar registros históricos de precipitaciones y niveles de agua para establecer patrones y prever la ocurrencia de futuras inundaciones.
- Desarrollo de mapas de riesgo: Identificar áreas geográficas con mayor susceptibilidad a inundaciones extremas, facilitando la implementación de medidas preventivas y de respuesta.

La implementación de esta metodología implica los siguientes pasos:

- Recopilación de datos: Reunir registros históricos de precipitaciones, caudales de ríos y niveles de agua en la región de interés.
- Selección de modelos estadísticos: Aplicar distribuciones de probabilidad adecuadas, como la distribución de Gumbel o la Generalizada de Valores Extremos (GEV), para modelar los datos recopilados.
- Estimación de parámetros: Calcular los parámetros de las distribuciones seleccionadas que mejor se ajusten a los datos observados.
- Cálculo de períodos de retorno: Determinar la frecuencia con la que se espera que ocurran eventos de una magnitud específica, como inundaciones que se presentan una vez cada 100 años.
- Análisis de incertidumbre: Evaluar la confiabilidad de las estimaciones realizadas y considerar posibles variaciones en los datos y modelos utilizados.

Diversos estudios han aplicado el análisis de eventos extremos para abordar riesgos de inundación:

- Evaluación de riesgo de inundaciones en China: Investigadores utilizaron modelos de valores extremos para analizar pérdidas económicas relacionadas con inundaciones y precipitaciones extremas, proporcionando bases para el diseño de seguros y bonos catastróficos (Ling et al., 2021).
- Simulación de eventos de inundación en el Reino Unido: Se desarrolló un marco basado en componentes principales extremos para generar eventos sintéticos de flujo fluvial extremo, mejorando la planificación y gestión de riesgos en regiones propensas a inundaciones (Rohrbeck et al., 2021).

Modelo Fuente-Ruta-Receptor-Consecuencias (SPRC)

Es un enfoque estructurado para evaluar el riesgo de inundaciones y otros peligros ambientales. Su objetivo es analizar la relación entre la fuente del problema, la forma en que se propaga, los elementos expuestos y las posibles consecuencias. Este modelo es ampliamente utilizado en estudios de gestión de riesgos en el Reino Unido y otros países europeos (Ramsbottom et al., 2006).

Componentes del modelo SPRC

1. Source (Fuente):

Representa el origen del problema, que en el caso de las inundaciones puede ser la precipitación extrema, el desbordamiento de un río o el aumento del nivel del mar (Samuels et al., 2006).

2. Pathway (Camino):

Se refiere a la vía por la cual el fenómeno se propaga, como la topografía del terreno, el drenaje deficiente o la falta de infraestructura adecuada (Narayan et al., 2012).

3. Receptor (Receptor):

Son los elementos expuestos al riesgo, como viviendas, infraestructuras, personas y ecosistemas vulnerables (Teng et al., 2017).

4. Consequence (Consecuencia):

Evalúa los impactos resultantes del evento, incluyendo pérdidas económicas, daños materiales y efectos sociales y ambientales (Koks et al., 2015).

En estudios realizados en México, se ha adaptado el modelo SPRC para evaluar la vulnerabilidad de comunidades expuestas a inundaciones y calcular daños económicos potenciales (Moreno et al., 2021). Esta metodología ha sido utilizada en cuencas hidrográficas como la del río Tula, donde se han identificado caminos de propagación de las aguas y los impactos en infraestructura crítica.

2.1.2. Metodologías nacionales de evaluación de riesgo de inundación

La metodología que utiliza CENAPRED (Centro Nacional de Prevención de Desastres de México) para la evaluación de riesgos está orientada a identificar, analizar y reducir los riesgos naturales y antropogénicos en el país. Esta metodología se utiliza para generar mapas de riesgos que ayuden en la toma de decisiones,

la planificación territorial y el diseño de políticas públicas para mitigar los efectos de desastres naturales (CENAPRED, 2010).

Es un enfoque integral que evalúa el riesgo de desastres naturales a través de la combinación de datos sobre amenazas, vulnerabilidad y capacidad de respuesta. Este enfoque está basado en los principios del análisis de riesgos, adaptado a las condiciones de México, y se centra principalmente en fenómenos naturales como terremotos, inundaciones, huracanes y deslizamientos.

Es posible plantear un procedimiento general para la elaboración de un Atlas de Riesgo el cual puede resumirse en los siguientes pasos:

a) Identificación de los fenómenos naturales y antrópicos que pueden afectar una zona en estudio.

El riesgo depende de las condiciones específicas de un sitio en estudio, según su ubicación, y de los fenómenos que pueden manifestarse con mayor o menor intensidad. Asimismo, las condiciones de vulnerabilidad de los sistemas expuestos de una región condicionan los niveles de riesgo a que está sometida. Por ello el primer paso para la construcción de un atlas de riesgos es la identificación de los fenómenos que han afectado a un área geográfica.

En México, el Sistema Nacional de Protección Civil reconoce, de acuerdo con su origen, los siguientes agentes perturbadores (CENAPRED, 2010):

- Fenómenos geológicos;
- Fenómenos hidrometeorológicos;
- Fenómenos químicos;
- Fenómenos sanitario-ambientales;
- Socio-organizativos.

Para identificar los fenómenos que afectan una zona en estudio, se debe recurrir a diferentes fuentes de información tales como fuentes bibliográficas, hemerográficas y/o comunicación verbal.

La información histórica puede ser representada en mapas temáticos que pueden aprovechar las autoridades de protección civil para tener conocimiento de los sitios que son susceptibles de ser afectados por un fenómeno determinado.

b) Determinación del peligro asociado a los fenómenos identificados.

Una vez identificados los fenómenos que pueden afectar una zona en estudio, se procede a la evaluación del peligro, que consiste en obtener una descripción probabilística de la posible ocurrencia de dichos eventos perturbadores con distintas intensidades. Esto deberá calcularse para cada medida de la intensidad que sea

significativa según el tipo de sistema y los modos de falla o daño que se deban incluir en el análisis de riesgo. Dos medidas clásicas asociadas al peligro son el periodo de retorno o bien, la tasa de excedencia. La tasa de excedencia es el número de eventos por unidad de tiempo (generalmente por año) que sobrepasan un cierto nivel de intensidad; el periodo de retorno es el inverso de la tasa de excedencia y se define como el lapso que, en promedio, hay que esperar para que ocurra un evento con intensidad superior a una especificada. En lo que se refiere a las medidas de intensidad, éstas son propias de cada fenómeno y están relacionadas con los parámetros con los que se evalúa la vulnerabilidad.

c) Identificación de los sistemas expuestos y su vulnerabilidad.

Este punto consiste en la evaluación de la vulnerabilidad de los sistemas expuestos, los que, en la mayoría de los casos, son obras construidas por el hombre, sin embargo, también se cubren los casos de formaciones geológicas naturales, como laderas que pueden deslizarse o mantos de suelo blando que pueden agrietarse y que pueden ocasionar algún tipo de daño.

Para evaluar la vulnerabilidad se pueden utilizar métodos cuantitativos que requieren el empleo de expresiones matemáticas llamadas funciones de vulnerabilidad, que relacionan las consecuencias probables de un fenómeno sobre una construcción, una obra de ingeniería, o un conjunto de bienes o sistemas expuestos con la intensidad del fenómeno que podría generarlas. Desde el punto de vista preventivo, en el caso de la vivienda es importante estimar el nivel de daño esperado para un nivel de intensidad dado, de manera que se puedan tomar las medidas preventivas para disminuir su vulnerabilidad. Si se tratara de una obra civil, como por ejemplo de un hospital, las consecuencias se podrían medir en términos del servicio que dejaría de prestar. En el caso de construcciones destinadas al comercio, las consecuencias tendrían que calcularse, no solamente en términos del daño físico, sino también en términos de las pérdidas indirectas. Para generar las funciones de vulnerabilidad correspondientes, se deberá hacer una selección de los parámetros de intensidad generados por un fenómeno. Asimismo, se debe realizar una clasificación de los sistemas expuestos, por ejemplo, de acuerdo a su sistema estructural un grupo de construcciones puede clasificarse como sigue (CENAPRED, 2015):

- ✓ Tipo I. Casas para habitación unifamiliar, construidas con muros de mampostería simple o reforzada, adobe, madera o sistemas prefabricados.
- ✓ Tipo II. Edificios para vivienda, oficinas y escuelas, construidos con concreto reforzado, acero, mampostería reforzada o sistemas prefabricados.
- ✓ Tipo III. Construcciones especiales: teatros y auditorios, iglesias, naves industriales, construcciones antiguas.
- ✓ Tipo IV. Sistemas de gran extensión o con apoyos múltiples: puentes.
- ✓ Tipo V. Tuberías superficiales o enterradas

d) Evaluación de los diferentes niveles de riesgo asociado a cada tipo de fenómeno, tanto natural como antropogénico.

En términos generales, el riesgo es una función matemática denominada “convolución” del peligro y la vulnerabilidad. Para fines de protección civil una de las herramientas de mayor utilidad para la toma de decisiones es la construcción de escenarios en los que se detecten las zonas con niveles elevados de riesgo, en términos. Otras medidas de riesgo pueden ser, los metros cuadrados perdidos de construcción, el número de vidas humanas perdidas, etc.

e) Integración sistemática de la información sobre los fenómenos naturales y antropogénicos, peligro, vulnerabilidad y riesgo considerando los recursos técnicos y humanos.

Idealmente, un atlas de riesgos se debe concebir como un ente dinámico que sea un sistema integral de información del riesgo de desastres. Bajo ese concepto, la integración de la información que conforma un atlas de riesgo y su elaboración, requiere de tres elementos fundamentales:

- Metodologías para la identificación de los fenómenos que afectan una zona determinada para la evaluación del peligro, vulnerabilidad y riesgo;
- Criterios para la selección de la cartografía adecuada que permita representar los resultados de un análisis de riesgo;
- Criterios para la selección de un sistema en el que se integre, procese y visualice la información anterior.

La metodología de CENAPRED se ha aplicado en diversos estudios de riesgo hídrico. Ejemplos incluyen:

- Evaluación de zonas de alto riesgo de inundación en Tabasco y Veracruz, donde se usaron modelaciones hidrológicas combinadas con el análisis de vulnerabilidad socioeconómica.
- Estimación del impacto de huracanes en las costas del Golfo de México, identificando áreas de mayor exposición mediante el IVC y mapas de riesgo.

Tomando en cuenta esto, las metodologías internacionales se pueden incluir en esta metodología para complementarla, como en el caso de:

- Modelación hidrológica e hidráulica: Utilizando software como HEC-RAS o IBER para simular el comportamiento del agua en eventos extremos.
- Análisis Multicriterio (AMC): Para incluir factores socioeconómicos en la toma de decisiones.
- Índice de Vulnerabilidad ante Inundaciones (IVI): Para una evaluación específica de la vulnerabilidad urbana y estructural.

2.2 Modelo Numérico IBER

IBER utiliza el Método de Volúmenes Finitos para modelar flujos en canales y ríos, un enfoque que divide el dominio en pequeñas celdas o volúmenes de control donde se calculan variables como la velocidad y profundidad del flujo. En cada una de estas celdas, el método garantiza que se conserven propiedades como la masa y la cantidad de movimiento, al resolver el flujo en las interfaces entre celdas (CIMNE, 2024).

El procedimiento que sigue para ejecutar y los datos necesarios para llevar a cabo esta acción, son los siguientes:

1. Definición de dominio y malla de volúmenes finitos:

Se define el área de estudio como una malla de celdas, que generalmente son triángulos o cuadriláteros. Cada volumen representa una pequeña área del dominio en el cual se resolverán las ecuaciones de Saint-Venant.

2. Discretización temporal y espacial:

Las ecuaciones de Saint-Venant (conservación de masa, conservación de momento y conservación de energía) se discretiza tanto en el tiempo como en el espacio usando el método de volúmenes finitos. Cada paso de tiempo calcula el flujo, la velocidad, la fricción y el flujo que entra y que sale de cada celda.

3. Iteración y cálculo de variable:

Se ejecutan iteraciones para resolver el sistema de ecuaciones en cada celda y en cada paso de tiempo, logrando una simulación que incluye efectos complejos como ondas de choque, cambios bruscos de nivel y efectos de fricción.

2.2.1 Método de Volúmenes Finitos (MVF).

El Método de Volúmenes Finitos (MVF) es una técnica numérica utilizada para resolver ecuaciones en derivadas parciales, especialmente de dinámica de flujo y transporte. Este método se basa en la discretización del dominio físico en volúmenes de control y en la conservación de las propiedades físicas relevantes.

Las ecuaciones que utiliza el Método de Volúmenes Finitos son:

Conservación de Masa:

Versteeg & Malalasekera (2007) indican que para flujos incompresibles se expresa como:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho v) = 0$$

Donde:

- ρ es la densidad del fluido (kg/m³).
- v es el vector de velocidad del fluido (m/s).
- t es el tiempo (s).
- ∇ representa el operador divergencia (kg/(m³*s)).

Para un flujo incompresible, donde la densidad se considera constante, la ecuación se simplifica a:

$$\nabla \cdot v = 0$$

Esto implica que, en un flujo incompresible, la divergencia de la velocidad es cero, lo que significa que el flujo de masa es constante a través de cualquier sección del fluido (Patankar, 1980).

Conservación de Momentum y la Ecuación de Navier-Stokes:

La ecuación de conservación de momento en un principio general derivado de la segunda ley de Newton, que establece que la tasa de cambios de momento de un fluido es igual a la suma de las fuerzas aplicadas sobre él. En forma general, puede expresarse como:

$$\frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho v^2) = -\nabla p + F$$

Donde:

- ρ es la densidad del fluido (kg/m³).
- v es el vector de velocidad del fluido (m/s).

- p es la presión (N/m²).
- F representa las fuerzas externas que actúan en el fluido (como la gravedad o fricción) (N/m³).

La ecuación de Navier-Stokes es una formulación específica de la ecuación de momento, en la cual se añade el término de viscosidad para modelar el comportamiento de un fluido real. Al incluir la viscosidad, esta ecuación describe la difusión de momento en el fluido, lo cual es clave para modelar fricción interna en fluidos.

La forma completa de la ecuación de Navier-Stokes es:

$$\frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \nabla * (p v^2) = -\nabla p + \mu \nabla^2 v + \rho g$$

Donde:

- μ es la viscosidad dinámica, que introduce el término $\mu \nabla^2 v$ para representar la difusión viscosa (N/m³).
- g es el vector de aceleración debido a la gravedad (m/s²).

Conservación de la energía:

La ecuación de conservación de energía se basa en el principio de la termodinámica, que establece que la tasa de cambio de la energía total de un sistema es igual a la suma de la energía que entra o sale del sistema debido al trabajo, al calor y a la disipación de energía interna (White, 2008). En términos generales, para un volumen de control en flujo de fluido, la ecuación de conservación energía es:

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\rho e + \frac{1}{2} \rho v^2 \right) + \nabla * \left(\rho v \left(e + \frac{1}{2} v^2 + \frac{p}{\rho} \right) \right) = \nabla * (k \nabla T) + \Phi$$

Donde:

- ρ es la densidad del fluido (kg/m³).
- e es la energía interna por unidad de masa del fluido (J/kg).
- v es la velocidad del fluido (m/s).
- p es la presión (N/m²).
- T es la temperatura del fluido (K).
- k es la conductividad térmica del fluido (W/(m*k)).

- Φ es el término de disipación viscosa (W/m^3).
- $\nabla * (k\nabla T)$ representa la conductividad de claro (W/m^3).

Sin embargo, el método presenta varias limitaciones. Una de estas es la complejidad en el tratamiento de condiciones de frontera. La implementación del método puede volverse complicada en geometrías complejas, lo que requiere un manejo cuidadoso de las condiciones de frontera para asegurar que los flujos sean representativos del fenómeno físico que se modela (Patankar, 1980). Además, la precisión del método depende de la calidad y resolución de la malla utilizada, mallas poco refinadas pueden llevar errores significativos, especialmente en regiones donde ocurren cambios bruscos en las variables (Durrant, 2010).

Otro aspecto a tomar en cuenta es la estabilidad numérica del método. Es necesario cumplir con restricciones numéricas, como la condición de Courant-Friedrichs-Lewy (CFL), que limita el tamaño del paso de tiempo en función de la malla y la velocidad del fluido. Si estas restricciones no se cumplen, se pueden obtener resultados poco realistas, como oscilaciones no físicas (Versteeg & Malalasekera, 2007). Además, la limitación puede ser económica para los que deseen utilizar este método ya que especialmente para simulaciones en tres dimensiones o de altas resoluciones se necesita un hardware más efectivo y, a veces, técnicas de paralización (Ferziger & Peric, 2002). Por último, el modelado de flujos turbulentos es un desafío, ya que puede ser necesario implementar modelos adicionales, lo que complica aún más el análisis y puede afectar la precisión de nuestros resultados (Patankar, 1980).

2.2.2 Esquema numérico de IBER

La aplicación de un método numérico conlleva la discretización espacial del dominio en celdas o elementos de cálculos. La unión de estos elementos forma mallas. Iber, en todos sus módulos, utiliza el método de los volúmenes finitos para resolver las ecuaciones, por lo que cada elemento será a su vez un volumen finito. Un volumen finito unidimensional es un segmento, mientras que un volumen finito bidimensional es una superficie.

El módulo de drenaje urbano convive dominios unidimensionales y bidimensionales y, por lo tanto, también habrá mallas en 1D y mallas en 2D. La malla puede ser estructura y no estructurada (Figura 1). En las mallas -estructuradas, cada elemento de la misma esta inequívocamente identificado por unos índices en coordenadas cartesianas. Por su parte, en mallas no estructuradas los elementos no tienen un orden particular. Los elementos de una malla estructurada en 2D por lo general son cuadriláteros, aunque también pueden ser triángulos equiláteros. En cambio, en una malla no estructurada pueden ser triángulos, cuadriláteros o una combinación de éstos. Las mallas no estructuradas tienen la ventaja de adaptarse mejor

a geometrías complejas como las que presentan la batimetría y fronteras de estudios hidráulicos. Sin embargo, éstas requieren de una estructura de datos compleja y unos requerimientos de memoria mayores.

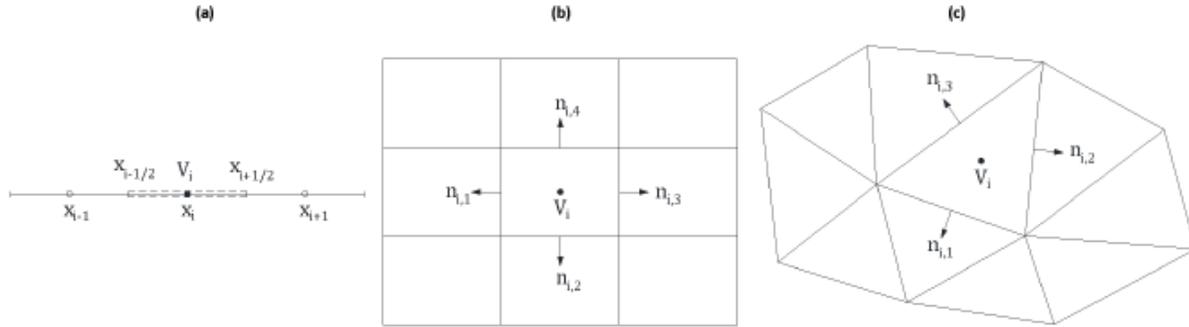


Figura 1. Tipo de Malla: a) Malla en una dimensión b) Malla estructurada en dos dimensiones c) Malla no estructurada en dos dimensiones. Fuente: [Sanz-Ramos et al. \(2022\)](#).

En los dominios unidimensionales, la discretización empleada para la resolución en el tiempo de las ecuaciones de Saint Venant con el método de los volúmenes finitos se puede escribir de forma genérica como:

$$U_i^m = U_i^{m+1} - \frac{\Delta t}{\Delta x} (F_{i+\frac{1}{2}}^* - F_{i-\frac{1}{2}}^*) + \frac{\Delta t}{\Delta x} H_i^*$$

En esta nomenclatura, los subíndices enteros hacen referencia a un volumen finito o elemento de la malla (segmento asociado a una sección transversa), mientras que los subíndices $i + \frac{1}{2}$ e $i - \frac{1}{2}$ hacen referencia a los puntos de contacto entre segmentos. En Iber el cálculo de los flujos numéricos se realiza con el esquema de Roe y su expresión resulta:

$$F_{i+\frac{1}{2}}^* = \frac{1}{2} (F_i^* + F_{i+1}^*) - \frac{1}{2} \left(\sum_{j=i}^2 \tilde{\alpha}_j \varphi_j \tilde{e}_j + \sum_{j=i}^2 \tilde{\gamma}_j \text{signo}(\tilde{\lambda}_j) \tilde{e}_j \right)$$

En la ecuación anterior, y las siguientes, los términos con el superíndice \sim son valores promediados en los contornos de los elementos. Los coeficientes constantes o fuerzas de cada onda $\tilde{\alpha}_j$, los valores y vectores propios $\tilde{\lambda}_j$ y \tilde{e}_j de la matriz jacobiana definida como $A = \frac{\partial F}{\partial U}$, se pueden expresar respectivamente como:

$$\tilde{\alpha}_{1,2} = \frac{(\tilde{c} \mp \tilde{u}) \Delta A \pm \Delta Q}{2\tilde{c}}$$

$$\tilde{\lambda}_{1,2} = \tilde{c} \mp \tilde{u}$$

$$\tilde{e}_{1,2} = \begin{pmatrix} 1 \\ \tilde{c} \mp \tilde{u} \end{pmatrix}$$

siendo,

$$\Delta A = A_{i+1} - A$$

$$\Delta Q = Q_{i+1} - Q$$

$$\tilde{u} = \frac{\frac{Q_i}{\sqrt{A_i}} + \frac{Q_{i+1}}{\sqrt{A_{i+1}}}}{\sqrt{A_i} + \sqrt{A_{i+1}}}$$

La corrección de entropía de Harten y Hyman φ_j , según Toro, es:

$$\varphi_j = \begin{cases} |\tilde{\lambda}_j| & \text{si } |\tilde{\lambda}_j| \geq \epsilon_j \\ \epsilon_j & \text{si } |\tilde{\lambda}_j| < \epsilon_j \end{cases}$$

donde,

$$\epsilon_{j,i+\frac{1}{2}} = \max\left(0, \left(\tilde{\lambda}_{j,i+\frac{1}{2}} - \tilde{\lambda}_{j,i}\right), \left(\tilde{\lambda}_{j,i+1} - \tilde{\lambda}_{j,i+\frac{1}{2}}\right)\right)$$

Para reproducir correctamente el salto de las fuerzas de presión, se utiliza una expresión que mantiene el significado físico de la celeridad, entendido como la variación de las fuerzas de presión en cada sección transversal con respecto a la variación del área de flujo en cada sección:

$$\tilde{c}^2 = \begin{cases} g \frac{(I_{i+1} - I_i) - (\Delta I_i|_{\tilde{A}})_{i+\frac{1}{2}}}{A_{i+1} - A_i} & \text{si } A_i \neq A_{i+1} \\ \frac{c_i^2 + c_{i+1}^2}{2}; \text{ o bien } g \frac{\tilde{A}}{\tilde{B}}; \text{ o bien } \frac{\Delta I}{\Delta A} & \text{si } A_i = A_{i+1} \end{cases}$$

Cuando $A_i = A_{i+1}$, Iber emplea la segunda opción. En las anteriores expresiones:

$$\tilde{A} = \frac{2A_i A_{i+1}}{A_i + A_{i+1}}$$

$$\tilde{B} = \frac{B_i + B_{i+1}}{2}$$

La variación de las fuerzas de presión $(\Delta I_i|_{\tilde{A}})_{i+\frac{1}{2}}$ en volúmenes finitos para un área constante $A_i + \frac{1}{2}$ es:

$$(\Delta I_i|_{\tilde{A}})_{i+\frac{1}{2}} = (I_i|_{\tilde{A}})_{i+1} - (\Delta I_i|_{\tilde{A}})_i$$

Donde $(\Delta I_i|_{\tilde{A}})_i$ y $(\Delta I_i|_{\tilde{A}})_{i+1}$ son las fuerzas de presión en el volumen finito i e $i + 1$ para un valor del área \tilde{A} . Finalmente, el término $\tilde{\gamma}_j$ se define como:

$$\tilde{\gamma}_1 = \frac{1}{2\tilde{c}} g \Delta(I_i|_{\tilde{A}})$$

$$\tilde{\gamma}_2 = -\tilde{\gamma}_1$$

CAPITULO 3. ÁREA DE ESTUDIO

Tula de Allende está ubicado al norte $20^{\circ} 09'$, a sur $19^{\circ}58'$ de latitud norte; al este $99^{\circ} 15'$ y al oeste $99^{\circ} 30'$ de longitud oeste (INEGI,1993). El municipio colinda al norte con los municipios de Chapantongo, Tepetitlán y Tezontepec de Aldama, al este con los municipios de Tlaxcoapan, Atitalaquia y Atotonilco de Tula, al sur con el municipio de Tepeji del Río y al oeste con el Estado de México (Figura 2).

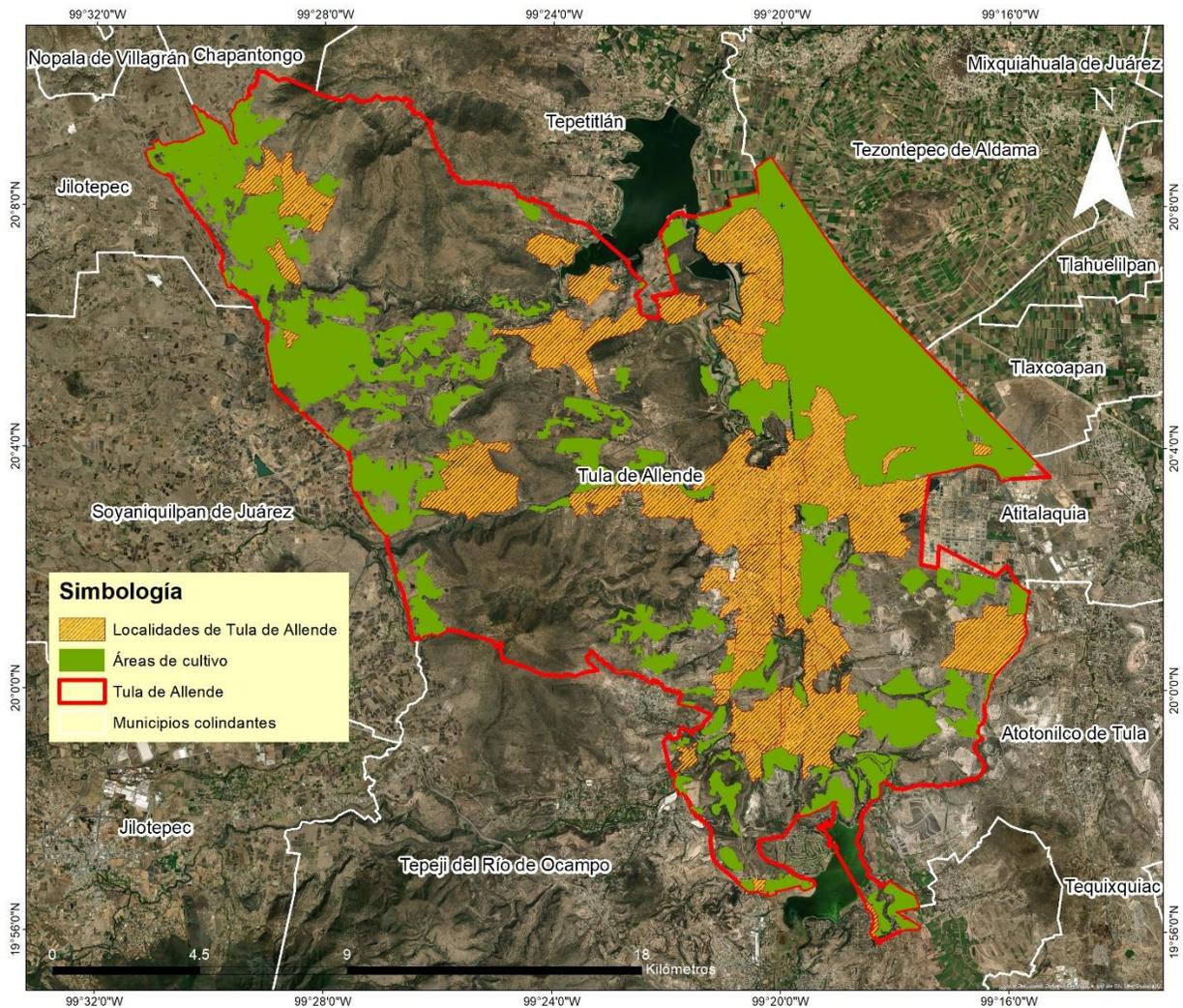


Figura 2. Mapa ubicación de área de estudio, Tula de Allende.

3.2 Características geográficas y condiciones ambientales

En Tula de Allende la corriente superficial más representativa es el Río Tula que se encuentra altamente contaminado por los desechos provenientes del desagüe de la Ciudad de México, además de los 204 sitios de descarga siendo un 52% de ese volumen correspondiente al público-urbano y el resto al industrial (42%), de servicios (6%), agroindustrial (0.03%) y pecuario (0.01%) (GeoEcoSphera. S.C, 2020).

3.3 Hidrografía

De acuerdo con la información de la (CONAGUA, 2020) y a los datos de disponibilidad media anual publicados en el Diario Oficial de la Federación en 2017, en la las cuencas hidrológicas que convergen en el municipio se encuentran clasificadas con disponibilidad como se muestra en la [Tabla 2](#). La [Figura 3](#) muestra las principales corrientes superficiales de la cuenca hidrológica de Tulancingo.

Tabla 2. Cuencas que convergen en el municipio de Tula de Allende.

<i>Cuenca</i>	Disponibilidad media anual en hm³	Clasificación	Superficie en el municipio
<i>Río Salado</i>	2.335	Con disponibilidad	114.2
<i>Presa Endhó</i>	0.254	Con disponibilidad	32877.6
<i>Presa Requena</i>	0.008	Con disponibilidad	593.8

Fuente: GeoEcoSphera S.C. con base en información de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), 2020.

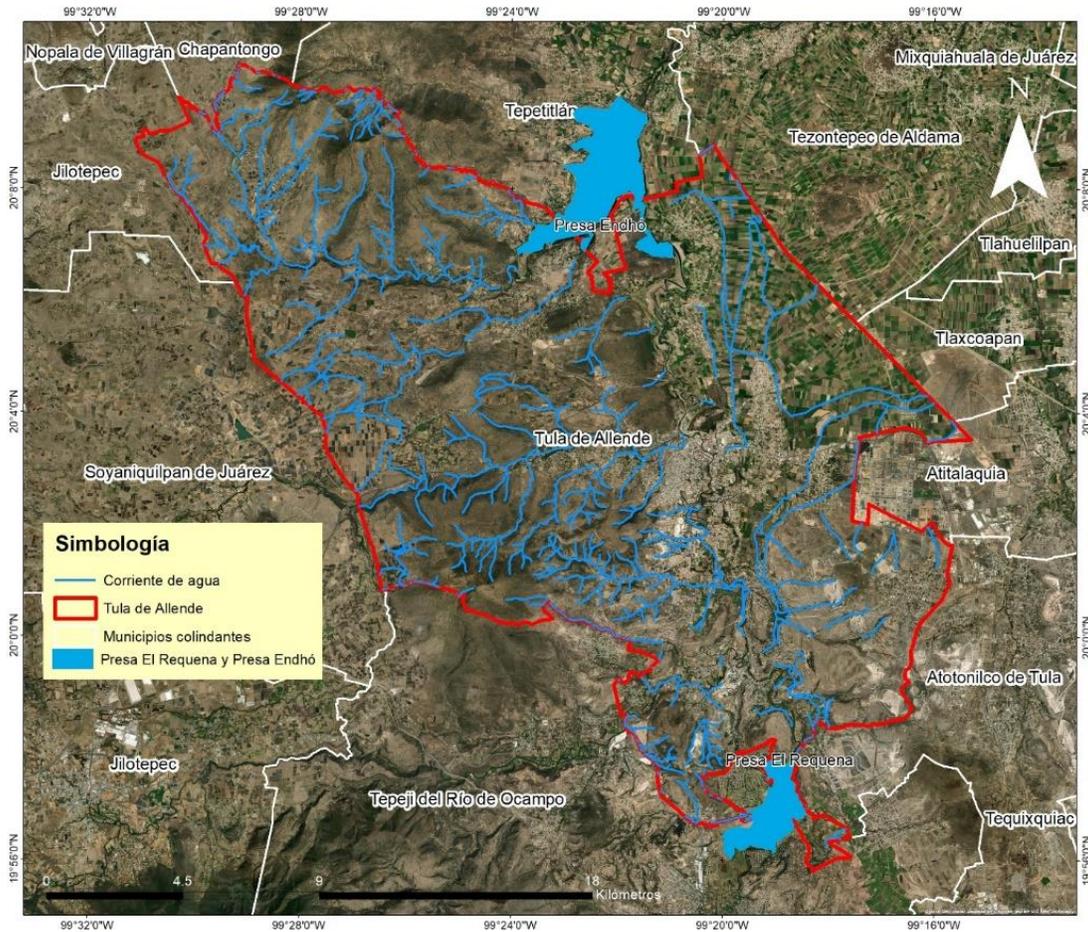


Figura 3. Mapa hidrográfico, Tula de Allende.

3.4 Climatología

Esta zona tiene un clima templado subhúmedo con lluvias en verano, de menor humedad (51.28%), semiseco templado (48.15%) y templado subhúmedo con lluvias en verano, de humedad media (0.57%), como se muestra en la [Figura 4](#). En el tema de precipitación, presenta un incremento de nororiente hacia el sur poniente del territorio municipal, alcanzando en esta zona valores de precipitación de hasta 700 mm al año. El rango de precipitación es entre 500-800 mm (INEGI, 2010).

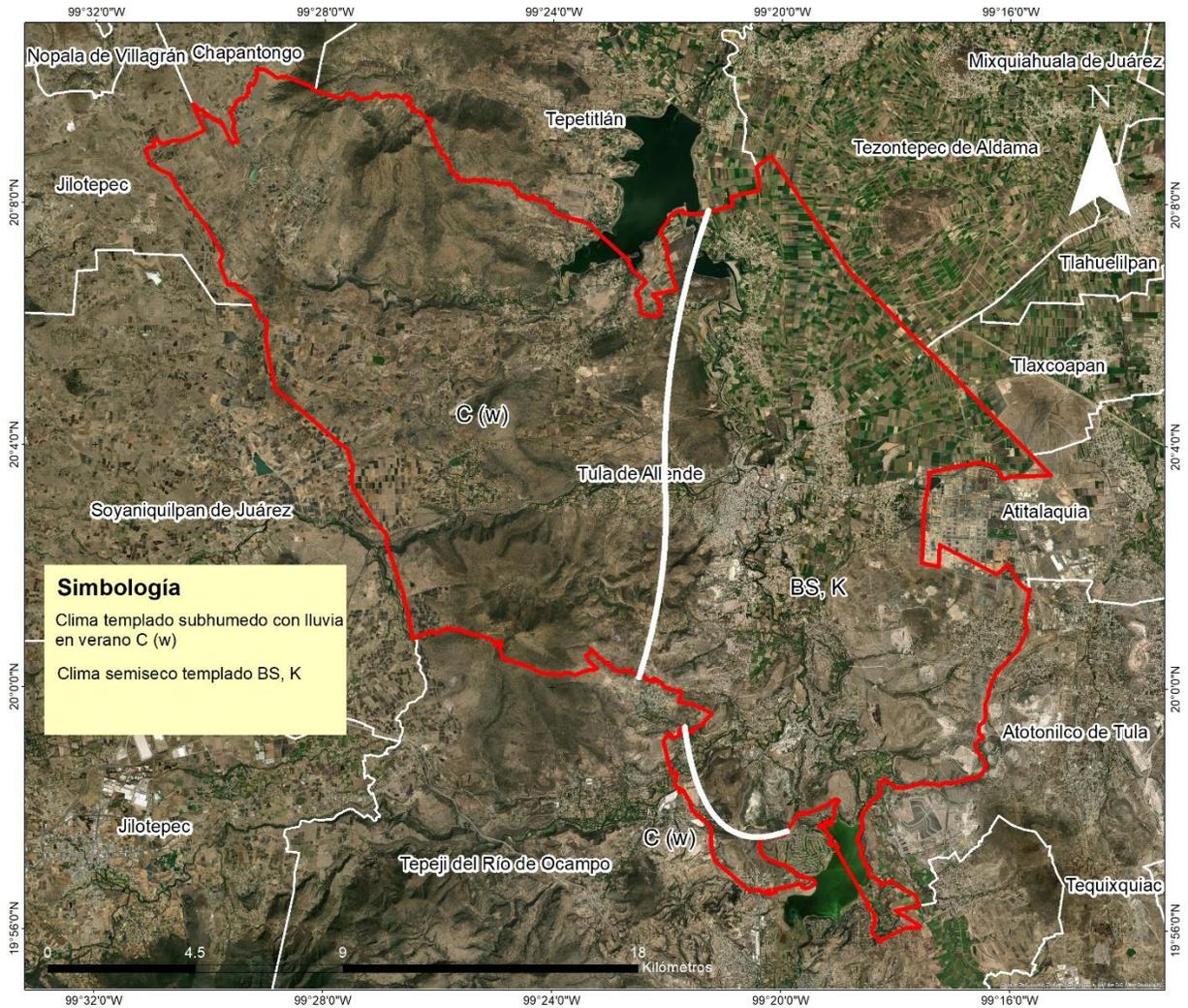


Figura 4. Mapa climatológico, Tula de Allende.

3.5 Uso de suelo

Estudios realizados en 2018 capturadas por el sensor Digital Globe con una resolución espacial de un metro por píxel. A partir de la clasificación de las imágenes de satélite mediante su interpretación visual se obtuvieron 23 categorías de uso de suelo y tipos de vegetación (GeoEcoSphera. S.C, 2020), las cuales se muestran en la [Tabla 3](#), así como, la superficie que abarca sobre el terreno y el porcentaje que ocupa dentro de este.

Tabla 3. Superficie y tipos de uso de suelo y vegetación (2018).

<i>Tipo</i>	Superficie (ha)	Porcentaje municipal	<i>Tipo</i>	Superficie (ha)	Porcentaje municipal
<i>Agricultura de riego.</i>	5863	17.46%	<i>Matorral submontano perturbado</i>	3149	9.38%
<i>Agricultura temporal.</i>	7003	20.85%	<i>Matorral xerófilo</i>	1563	4.65%
<i>Asentamientos humanos</i>	4907	14.61%	<i>Matorral xerófilo perturbado</i>	1079	3.21%
<i>Banco de materiales pétreos</i>	305	0.91%	<i>Pastizal inducido</i>	1454	4.33%
<i>Bosque de encino</i>	504	1.50%	<i>Vegetación perturbada</i>	291	0.87%
<i>Bosque de encino perturbado</i>	736	2.19%	<i>Vegetación riparia</i>	23	0.07%
<i>Camino terracería</i>	9	0.03%	<i>Vegetación secundaria</i>	3898	11.61%
<i>Cuerpo de agua</i>	709	2.11%	<i>Vía férrea</i>	34	0.10%
<i>Industria</i>	120	0.36%	<i>Vialidad pavimentada</i>	106	0.32%
<i>Infraestructura</i>	21	0.06%	<i>Zona sin vegetación aparente</i>	74	0.22%
<i>Magüeyales</i>	4	0.01%	<i>Zona inundable</i>	3	0.01%
<i>Matorral submontano</i>	1733	5.16%	Total	33588	100%

Fuente: *GeoEcoSphera S.C. con base al análisis del uso de suelo y vegetación.*

3.6 Características socio-económicas

Tula de Allende es un municipio con una fuerte presencia industrial, histórica y cultural que ha influido significativamente en su desarrollo socioeconómico. Su importancia se debe, en gran medida, a la presencia de la refinera de PEMEX y otras industrias que impulsan la economía local, generando empleo y atrayendo inversión.

Además, su ubicación estratégica dentro del estado lo convierte en un punto clave para el comercio y el transporte. Con una población de más de 115,072 habitantes, Tula de Allende presenta un índice de marginación bajo en comparación con otros municipios de la región, lo que refleja un acceso relativamente favorable a servicios básicos, educación y salud (*Gobierno Municipal de Tula de Allende, 2013*).

En términos de infraestructura, el municipio cuenta con una red de carreteras, transporte ferroviario y una terminal de autobuses que facilitan la movilidad de personas y mercancías. A pesar de los avances, aún enfrenta retos en términos de pobreza y acceso equitativo a oportunidades económicas.

En este apartado, se abordarán las principales características socioeconómicas del municipio, incluyendo aspectos de población, economía, empleo, educación, salud e infraestructura, con el fin de comprender mejor su dinámica y su impacto en la calidad de vida de sus habitantes.

1. Población y Demografía

1.1. Población total: 115,072 habitantes en el municipio y 29,390 en la cabecera municipal.

1.2. Composición étnica:

1.2.1. 246 personas (0.84%) hablan alguna lengua indígena.

1.2.2. 582 personas (1.98%) se identifican como afromexicanos.

1.3. Índice de marginación: Bajo, con un valor de -1.380, indicando mejores condiciones de vida en comparación con otros municipios de Hidalgo (**Gobierno Municipal de Tula de Allende, 2013**).

2. Economía y Empleo

2.1. Principales sectores económicos:

2.1.1. Industria: Presencia de la refinería de PEMEX, plantas cementeras (Cruz Azul) y fábricas de materiales de construcción.

2.1.2. Comercio: Contribuye significativamente al empleo y la actividad económica.

2.1.3. Agricultura y ganadería: Producción de maíz, frijol, cebada y alfalfa; cría de ganado bovino y porcino.

2.2. Situación de pobreza (2020):

2.2.1. 31.3% de la población en pobreza moderada.

2.2.2. 2.43% en pobreza extrema.

2.2.3. Ingreso per cápita: Inferior a la media nacional, aunque la actividad industrial ayuda a reducir la brecha (**Secretaría de Economía, 2025**).

2.3. Empleo:

2.3.1. Tula aporta el 8.3% de las unidades económicas manufactureras del estado.

2.3.2. Genera empleo para el 5.5% de la población estatal.

3. Infraestructura y Transporte

3.1. Red carretera:

3.1.1. 37 km de carreteras federales.

3.1.2. 72 km de carreteras estatales.

3.1.3. 40 km de vías férreas para transporte de mercancías.

3.1.4. Terminal de autobuses: Con rutas locales e interurbanas.

3.2. Servicios básicos: Agua potable, drenaje y electricidad con cobertura superior al 90% en la zona urbana.

4. Educación y Salud

4.1. Alfabetización:

4.1.1. Tasa de alfabetización: 96.4%.

4.1.2. Nivel educativo predominante: Secundaria y bachillerato.

4.2. Instituciones educativas:

4.2.1. Nivel básico: Primarias y secundarias públicas y privadas.

4.2.2. Nivel superior: Planteles del Instituto Tecnológico de Tula-Tepeji y Universidad Politécnica de la Energía.

4.3. Servicios de salud:

4.3.1. IMSS, ISSSTE, hospitales estatales y clínicas privadas.

3.6.1 Grado de rezago social

Los mapas de rezago social de las Áreas Geoestadísticas Básicas (AGEB) son herramientas útiles para identificar el nivel de rezago social en distintas regiones. Estas áreas, definidas por el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), representan las divisiones territoriales más pequeñas diseñadas para el análisis estadístico y sociodemográfico en México.

El rezago social es un indicador que evalúa las condiciones de marginación y pobreza de la población, tomando en cuenta variables como: educación, viviendas e ingresos.

En el municipio de Tula de Allende, se muestran dos niveles de rezago social: bajo y medio ([Figura 5 y Figura 6](#)) (CONEVAL, 2021). Las áreas con rezago social medio se encuentran principalmente fuera de la ciudad, al contrario de las zonas de rezago social bajo que corresponden al centro urbano, el cual está más densamente poblado y cuenta con mejores condiciones de infraestructura y servicios. Esto refleja la disparidad en el desarrollo social dentro del municipio.

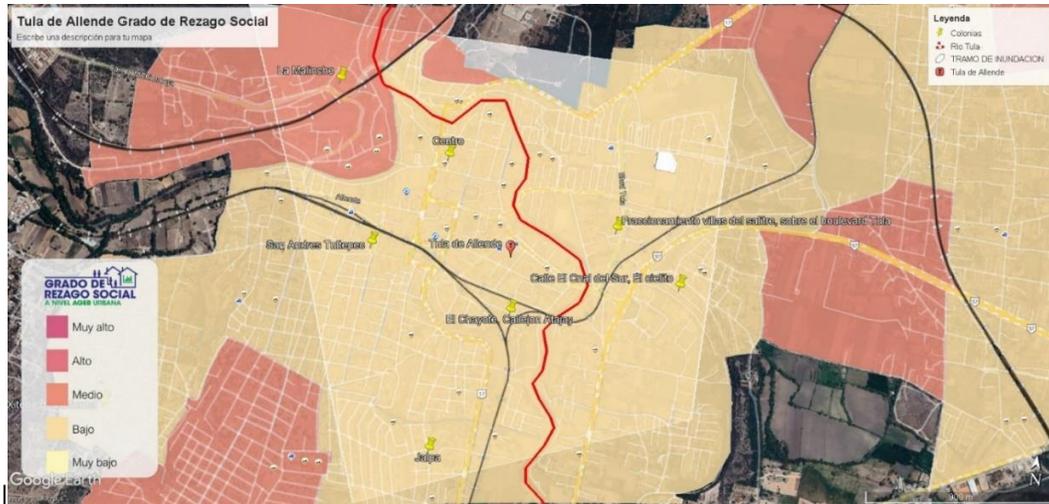


Figura 5. Mapa de grado de rezago social en Tula de Allende. Fuente: **CONEVAL, 2021**.

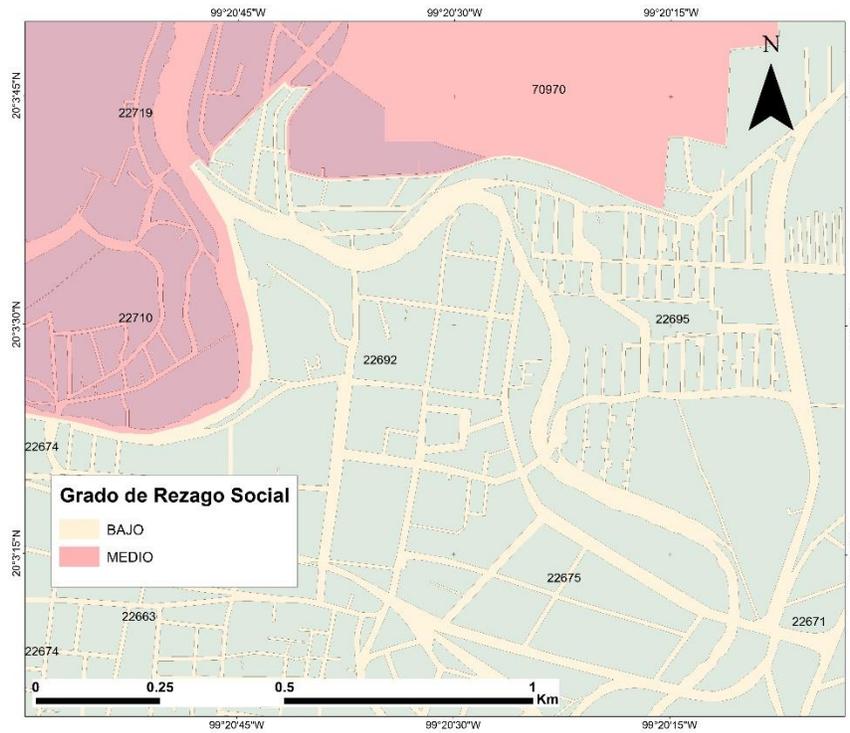


Figura 6. Mapa de grado de rezago social en la zona de estudio.

CAPITULO 4. METODOLOGÍA

El desarrollo de esta metodología se llevó a cabo mediante una serie de pasos, que abarcaron desde la recopilación inicial de datos hasta la clasificación de las áreas con mayor y menos riesgo. En la [Figura 7](#) se presenta un diagrama de flujo que resume las etapas seguidas en el proceso. Dicho esquema permite ver claramente como cada fase contribuyó a obtener los resultados finales.

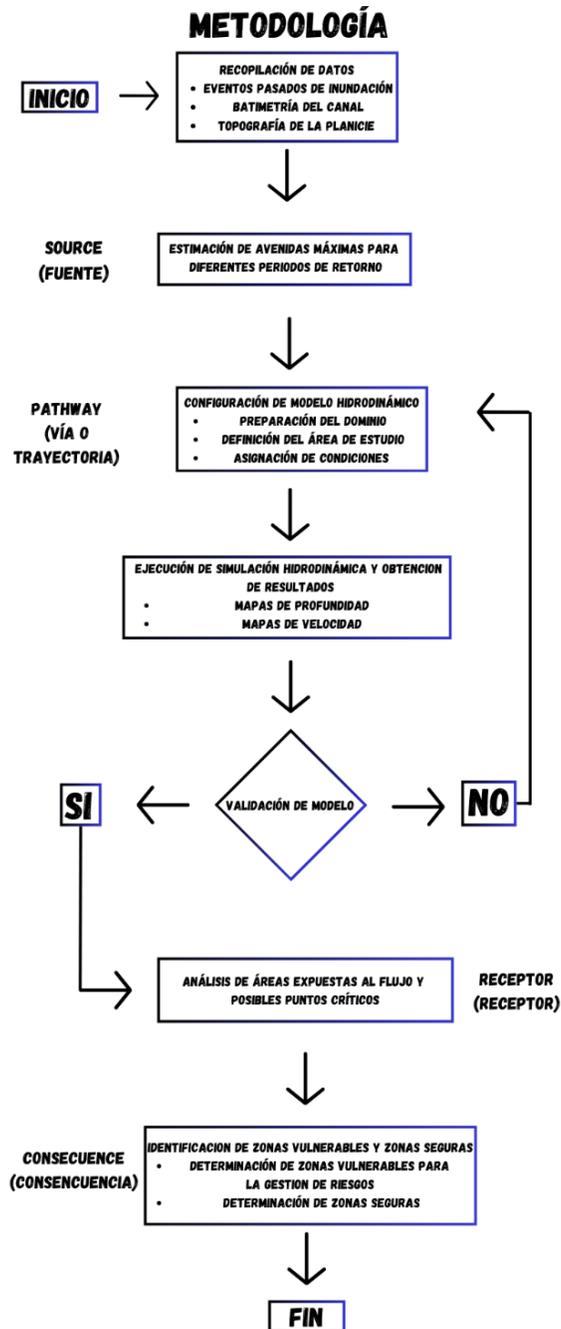


Figura 7. Metodología Source-Pathway-Receptor-Consequence.

4.1 Determinación de avenidas de diseño

4.1.1 Datos climatológicos

La climatología en México es variada y compleja en algunos casos, debido a su extensión territorial, relieve y ubicación geográfica. Se presentan climas que van desde áridos y semiáridos en el norte del país, templados en las regiones montañosas, hasta tropical en el sureste.

Alguna de las instituciones que apoyan con este tipo de datos son:

- Servicios Meteorológicos Nacionales (SMN): Monitorea y pronostica las condiciones meteorológicas.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI): Proporciona información geoespacial y climática.
- Comisión Nacional del Agua (CONAGUA): Gestiona recursos hídricos y recopila datos de lluvia y cuerpos de agua.

Algunos de los datos que nos proporcionan son:

- Temperatura
Se mide mediante estaciones meteorológicas automáticas. Los métodos utilizados son la interpolación espacial, que estima valores en zonas sin mediciones basándose en datos cercanos, y los promedios móviles, que suavizan las variaciones al calcular promedios en periodos determinados. Además, el análisis de series temporales permite identificar patrones y tendencias a lo largo del tiempo.
- Precipitaciones
Se registra con pluviómetros instalados en todo el país. Se emplea el método de Thiessen para dividir una región en polígonos y asignar a cada uno los datos de la estación más cercana. También se utiliza el método Kriging, que estima valores en áreas sin mediciones mediante modelos matemáticos, y la regresión lineal para analizar la relación entre precipitación y tiempo, facilitando predicciones.
- Humedad
Se monitorea con sensores especializados. Los ajustes estacionales corrigen los datos considerando variaciones propias de cada estación, mientras que los algoritmos de corrección eliminan errores de las mediciones. Los modelos de simulación representan matemáticamente el comportamiento de la humedad en un área usando datos históricos.

- Vientos

Registrados por anemómetros que capturan velocidad y dirección. Los modelos de pronóstico numérico utilizan ecuaciones atmosféricas para predecir su comportamiento, y la evaluación de tendencias analiza cambios a largo plazo mediante herramientas estadísticas como la desviación estándar.

Estos datos se recopilan en tiempo real, se almacenan en bases de datos nacionales y se publican periódicamente en boletines y plataformas en línea. Las instituciones realizan mantenimientos constantes de sus equipos y verifican la calidad de los datos para asegurar su fiabilidad.

El seguimiento a estos datos es continuo, con actualizaciones diarias, reportes mensuales y análisis históricos que permiten evaluar tendencias climáticas y su impacto en fenómenos naturales como las inundaciones

4.1.2 Distribución de Gumbel

La distribución de Gumbel modela la probabilidad de eventos extremos, como caudales máximos, a lo largo de diferentes periodos de retorno. En términos generales, para un periodo de retorno T , el valor extremo X_T (como el caudal máximo) se puede calcular con una formula basada en los parámetros de localización y escala de la distribución, expresada como:

$$X_T = \mu - \beta \ln\left(-\ln\left(1 - \frac{1}{T}\right)\right)$$

Donde:

- μ es el parámetro de localización, que ajusta el valor promedio de los eventos extremos
- β es el parámetro de escala, que afecta la dispersión o variabilidad de los datos (Stedinger, Voger & Foufoul-Georgiou, 1993)

En la formula se utilizó 0.00885357297004172 en lugar de β , que sería el parámetro de escala en el ajuste de Gumbel. La fórmula quedaría expresada de la siguiente forma:

$$\frac{\ln\left(\frac{1}{T}\right)}{-0.00885357297004172}$$

Este tipo de simplificaciones es común cuando se ha determinado un valor constante de β basado en datos históricos de caudales, lo que evita la necesidad de recalcular en cada análisis.

Al calcular el valor X_T para un periodo de retorno T con esta fórmula, la probabilidad de excedencia se considera implícita como:

$$P = 1 - \frac{1}{T}$$

Esto implica que el valor resultante representa un valor de caudal máximo esperado que se excederá en promedio una vez en cada T años (Mays, 2010).

4.1.3 Gastos asociados a periodos de retorno

Para estimar los caudales máximos esperados a distintos periodos de retorno, se realizó un análisis de frecuencia utilizando la distribución de Gumbel. Este análisis permite proyectar el comportamiento de los gastos máximos anuales a partir de datos históricos y así estimar los valores de caudal para diferentes niveles de recurrencia.

Lo primero realizado fue recopilar información de caudales máximos registrados diariamente en estaciones hidrométricas dentro del cauce. Estos datos fueron obtenidos de el Simulador de Flujos de Agua de Cuencas Hidrográficas (SIATL), proporcionado por el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), mediante plataformas en línea que permiten consultar registros históricos de aforos en distintos puntos del país. Las estaciones seleccionadas fueron aquellas ubicadas dentro de la cuenca de estudio y que contaban con datos suficientemente largas y de calidad aceptable para realizar el análisis.

Una vez recopilados los datos, se utilizó la distribución de Gumbel para modelar la probabilidad de ocurrencia de eventos extremos y estimar caudales asociados a diferentes periodos de retorno. Los resultados de este análisis se presentan en la [Tabla 4](#) que muestra los caudales estimados para distintos periodos de retorno. Esta tabla es fundamental para el análisis de riesgos de inundación, ya que permite relacionar la probabilidad de ocurrencia de un gasto determinado con sus posibles efectos en la zona de estudio.

Estos valores permiten determinar la magnitud de las avenidas esperadas y son datos clave para la modelación hidráulica del río Tula, ya que representa las condiciones de caudal de entrada al modelo IBER y posibilita la evaluación del impacto de inundaciones para distintos escenarios de recurrencia.

Tabla 4. Gastos a diferentes periodos de retorno.

EVENTOS DE DISEÑO	
DIST. EXPONENCIAL	
T (años)	Q (m ³ /s)
2.00	78.29
5.00	181.78
10.00	260.07
20.00	338.36
50.00	441.86
100.00	520.15
500.00	701.93
1000.00	780.22
5000.00	962.01
10000.00	1040.30

4.2 Recopilación de datos: Eventos pasados de inundación, batimetría del canal y topografía de la planicie

Para realizar el estudio, se recopilaron datos topográficos, hidrológicos y de tipo de suelo del área de interés para generar un análisis detallado de las posibles inundaciones. Se identificaron los datos necesarios, incluyendo información sobre eventos de inundación pasados (los cuales son necesarios para la validación del modelo), datos hidrométricos y meteorológicos de estaciones cercanas, cartas topográficas de la zona con buena resolución y detalle, y batimetría del canal. Se consultaron notas periodísticas que documentaban eventos de inundación relevantes, proporcionando fechas, colonias afectadas, causas y materiales que a veces no están disponibles en datos técnicos. A la par, se obtuvieron registros de estaciones hidrométricas y climatológicas, los cuales ofrecieron información precisa sobre el comportamiento del río y las condiciones climáticas en distintos momentos críticos.

Con ayuda de los Sistemas de información Geográfica se ubicó el área del canal de la cual se obtuvo la batimetría y se señaló con una polilínea, de igual forma, se ubicaron las colonias que fueron afectadas en evento pasados. Las cartas topográficas y batimetría del canal se ingresaron en ArcMap para el posicionamiento geográfico y se alinearon con el sistema de coordenadas UTM. Posteriormente, se utiliza la opción de “basemap” para realizar una comparación con lo antes hecho en Google Earth y así poder

realizar un corte a las cartas topográficas específicamente en el área de estudio, ya realizado lo anterior, se generando rásters que facilitaron análisis espaciales detallados y permitieron crear una representación continua de la elevación.

Toda la información se organizó y estandarizó para hacerla compatible con el modelo hidrodinámico. Con los rásters generados en ArcMap, se construyó un Modelo Digital del Terreno (DTM) que representa tanto el relieve de la zona de estudio, como la batimetría del canal.

4.2.1 Source (Fuente): Estimación hidrológica de avenidas máximas para diferentes periodos de retorno

Se utilizaron datos históricos de estaciones hidrométricas, estos datos son recopilados por día, sin embargo, son necesarios caudales máximos anuales, para esto se realizó una tabla dinámica la cual nos proporcionó estos caudales, una vez obtenidos, se utiliza la distribución de Gumbel para permitirnos conocer los caudales máximos probables para cada periodo de retorno de interés y de esta forma se conocer las condiciones de entrada del modelo a realizar.

4.2.2 Pathway (Vía o Trayectoria): Configuración de modelo hidrodinámico: Preparación del dominio, definición de área de estudio y asignación de condiciones

Para la preparación del dominio en el modelo hidrodinámico, se integraron los datos de batimetría del canal y de la topografía de la planicie de inundación en formato ráster. Se establecieron las condiciones de frontera, especificando los puntos de entrada y salida del flujo. Además, se asignaron parámetros hidráulicos, como el coeficiente de rugosidad, los cuales en la base de datos del software ya están predeterminados para distintos materiales y tipos de superficies, los coeficientes también se pueden modificar manualmente con los coeficientes propios o de algunos otros autores. Este ajuste es clave para reflejar la fricción del flujo sobre la superficie del cauce y las zonas inundables.

Ejecución de simulación hidrodinámica y obtención de resultados (Mapas de Profundidad, Mapas de Velocidad de Flujo y Mapas de Peligrosidad)

Una vez configurado y calibrado, se ejecutan las simulaciones en múltiples escenarios con diferentes periodos de retorno, durante la simulación se van proporcionando datos del cauce que entra y sale por

intervalo de tiempo, con esta información fue posible generar un hidrograma el cual permitió conocer el comportamiento del flujo a través del cauce.

Durante cada simulación, se obtuvo un conjunto de datos espaciales y temporales del flujo de agua en el dominio de estudio. Estos datos representan cómo la profundidad y la velocidad del agua varían a lo largo de todo el cauce y en las áreas aledañas susceptibles a inundación para cada periodo de retorno.

Los mapas de velocidad, profundidad y peligrosidad que se genera a partir de las simulaciones del modelo se exportan en formato ráster para su análisis en ArcMap. En este software, se utilizan herramientas como el “basemap” para identificar las colonias afectadas y ajustar la simbología de los mapas, permitiendo una visualización más clara y precisa. Este proceso facilita la validación del modelo al analizar de manera detallada las zonas impactadas y los resultados obtenidos.

Validación de Modelo

Una vez ejecutado el modelo para cada periodo de retorno, se llevó a cabo un proceso de validación mediante la comparación de los resultados obtenidos con información histórica, proveniente de la estación hidrométrica de Tula. Se analizaron registros de caudales máximos instantáneos, niveles de inundación reportados y la extensión aproximada de zonas afectadas en eventos significativos.

De acuerdo con la literatura (p. ej., [Horritt y Bates, 2002](#), [Hunter et al., 2007](#)), la validación de modelos hidrodinámicos puede considerarse adecuada cuando se dispone de al menos datos de caudal y niveles de agua observados durante eventos extremos, siempre que estos tengan una resolución temporal aceptable (diaria) y provengan de fuentes confiables como estaciones hidrométricas.

En este estudio, los datos de la estación hidrométrica fueron completamente con registros fotográficos y reportes de afectación emitidos por Protección Civil, lo cual permitió establecer correspondencias entre los resultados simulados y las condiciones observadas. Aunque la información disponible presenta limitaciones en cuanto a resolución espacial, se consideró suficiente para llevar a cabo una validación preliminar del modelo, bajo los criterios aceptados en estudios similares.

Cuando se detectaron discrepancias entre las simulaciones y los datos históricos, se ajustaron los parámetros del modelo (como la rugosidad de Manning o condiciones de frontera) y se ejecutó el modelo nuevamente hasta obtener resultados coherentes y representativos de los eventos pasados.

4.2.3 Receptor (Receptor): Análisis de áreas expuestas al flujo y posibles puntos críticos

Con los mapas de profundidad, velocidad y peligrosidad generados, se realizó un análisis de exposición para identificar las áreas de infraestructura, zonas habitacionales y sectores económicos que podrían verse afectadas por un evento de inundación. Este análisis implicó evaluar los niveles de exposición en cada área, considerando factores como la presencia de infraestructura crítica, el tipo de construcción y su cercanía al cauce.

Este proceso permite no solo identificar las áreas directamente expuestas al riesgo de inundación, sino también comprender el potencial de daño en función del flujo, la profundidad y la velocidad en cada escenario de caudal. De este modo, el análisis de exposición establece un mapa de riesgo que muestra los sectores más vulnerables.

4.2.4 Consequence (Consecuencia): Identificación de zonas vulnerables y zonas seguras

Utilizando la información obtenida en los pasos previos, se realizó una clasificación de las zonas dentro del área de estudio en términos de vulnerabilidad y seguridad. Las áreas con mayores niveles de profundidad y velocidad en los mapas de simulación fueron catalogadas como vulnerables, ya que presentan mayor riesgo de daño ante un evento de inundación. Por otro lado, aquellas áreas con menores niveles de exposición al flujo y con baja velocidad de agua fueron identificadas como zonas seguras.

Este análisis final de las zonas vulnerables y seguras proporciona una herramienta crítica para la planificación de riesgos, ya que permite enfocar las estrategias de prevención y respuesta en las áreas que presentan mayor probabilidad de impacto. Además, esta clasificación servirá de base para desarrollar recomendaciones específicas que busquen reducir el riesgo de inundación en el área y proteger tanto a la infraestructura como a la población localizada en las zonas más expuestas.

La metodología SPRC, la cual es utilizada en la evaluación de riesgos, puede adaptarse a diversos contextos. En este caso en particular, se empleó para la evolución del riesgo de inundación, siguiendo un enfoque estructurado que permitió identificar zonas críticas, vulnerables y seguras.

4.3 Simulación numérica en IBER

El modelo hidrodinámico se elaboró utilizando datos previamente analizados. Esta topografía de la planicie de inundación se obtuvo a partir de cartas topográficas del INEGI correspondientes a las áreas de Tula de Allende, Tepeji del Río de Ocampo, Mixquiahuala y Zumpango de Ocampo (INEGI, 2009). Fue necesario integrar estas cuatro cartas para poder abarcar completamente la topografía de Tula de Allende. Por otro lado, la batimetría, la cual es de 3.7 km, fue proporcionada por CONAGUA.

Para delimitar el área de estudio y localizar las colonias más vulnerables, se generó un mapa en Google Earth. Entre las colonias identificadas con mayor riesgo se encuentra Centro, La Malinche, San Andrés Tultepec, El Chayote y El Cielito (Figura 8).

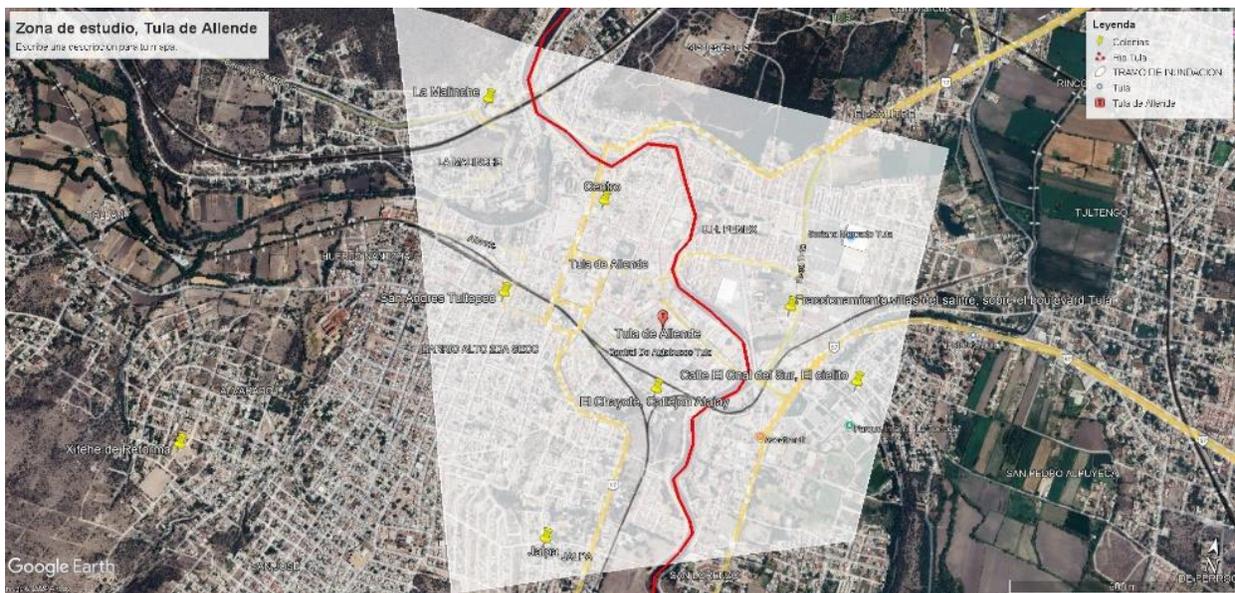


Figura 8. Zona de estudio (Colonias más vulnerables y tramo de cauce).

4.3.1 Geometría y malla

La geometría del área de estudio, incluye la batimetría del río y la topografía de la planicie. Para el análisis, se realizó un recorte de esta información, abarcando los 3.7 km del cauce y las colonias identificadas como vulnerables. El modelo se generó utilizando una malla no estructurada, conformada por 21,062 elementos triangulares (Figura 9).

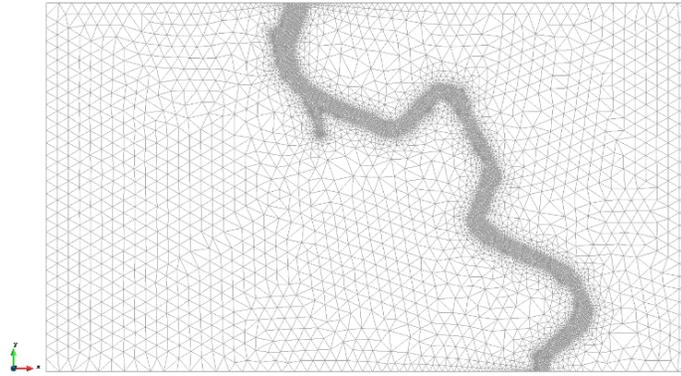


Figura 9. Malla de la planicie y batimetría del canal en Iber Model.

4.3.2 Condiciones de frontera (Condiciones de entrada y salida del flujo)

Los caudales máximos asociados a diferentes periodos de retorno, los cuales fueron calculados con los caudales anuales máximos obtenidos de la estación hidrométrica “JASSO” (clave oficial B37012) que se muestran en la [Tabla 5](#), a los cuales, aplicando la distribución de Gumbel, se obtuvieron los resultados de la [Tabla 4](#) los cuales son gastos a distintos periodos de retorno de los cuales solo se tomó la decisión de trabajar con cinco. La asignación de entrada se realizó con los periodos 10, 50, 100, 500 y 1000 años, tomando en cuenta la dirección del flujo para asignar la condición de entrada, así como la condición de salida, la cual se asignó al final del cauce.

Tabla 5. Gastos máximos anuales de la estación hidrométrica “JASSO”.

Año	Gasto	Año	Gasto
1968	9.6	1981	143
1969	4.7	1982	36.5
1970	2.5	1983	111
1972	9.63	1984	361
1973	5.71	1986	117
1974	4.02	1987	65.2
1975	4.86	1988	132
1976	12.02	1989	49.6
1977	47.07	1990	246
1978	17.78	1991	801
1979	18.7	1992	375
1980	13.88	1993	123

Tabla 4. Gastos a diferentes periodos de retorno.

EVENTOS DE DISEÑO	
DIST. EXPONENCIAL	
T (años)	Q (m ³ /s)
2.00	78.29
5.00	181.78
10.00	260.07
20.00	338.36
50.00	441.86
100.00	520.15
500.00	701.93
1000.00	780.22
5000.00	962.01
10000.00	1040.30

4.3.3 Coeficiente de rugosidad

Se asignaron valores de rugosidad de Manning para cada sección del dominio. Dado que se toma en cuenta que existen 23 categorías de uso de suelo, se tomó la decisión de asignar el coeficiente de rugosidad predeterminado de “residencial” y para el cauce el coeficiente de rugosidad de “rio”, los cuales fueron 0.15 y 0.035 respectivamente (Figura 10).

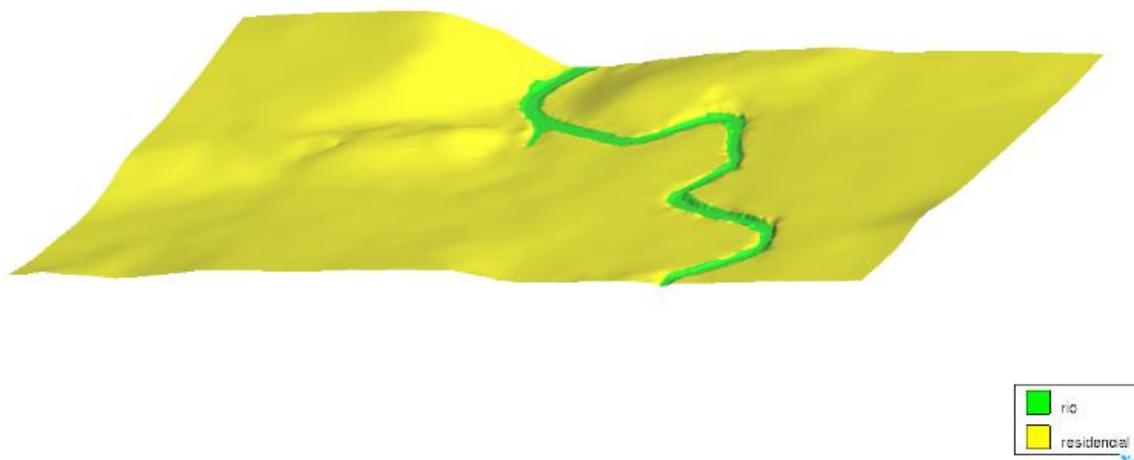


Figura 10. Asignación de uso de suelo al modelo hidrodinámico.

4.3.4 Parámetros de simulación

Los parámetros utilizados para la simulación numérica del escurrimiento superficial se muestran en la [Tabla 7](#). La [Figura 10](#) es un hidrograma el cual, explica como varia el caudal del cauce en función del tiempo, se utilizaron los siguientes periodos y caudales: 10 años – 260.07, 50 años – 441.86, 100 años – 520.15, 500 años – 701.93 y 1000 años – 780.22.

Tabla 6. Parámetros numéricos para la simulación del escurrimiento.

Tiempo máximo de simulación (s)	3600
<i>Intervalos de resultados (s)</i>	60
<i>Precipitación (mm)</i>	1
<i>Esquema numérico</i>	Hidráulico
<i>Tipo de suelo predominante</i>	Residencial
<i>Coficiente de Manning</i>	0.15
<i>Número de elementos de la malla</i>	3045
<i>Numero de nodos</i>	1971

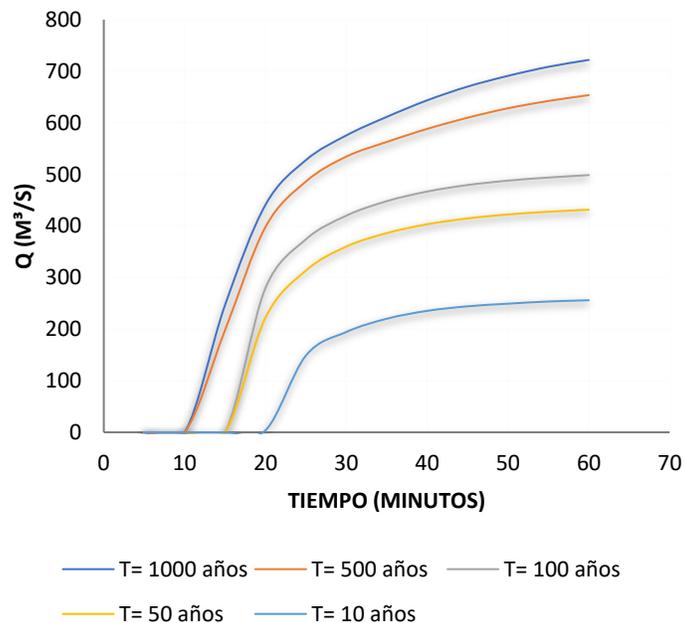


Figura 11. Hidrograma del Río Tula, aplicado a diferentes periodos de retorno.

CAPITULO 5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5.1 Resultados hidrodinámicos de velocidad y profundidad de la inundación

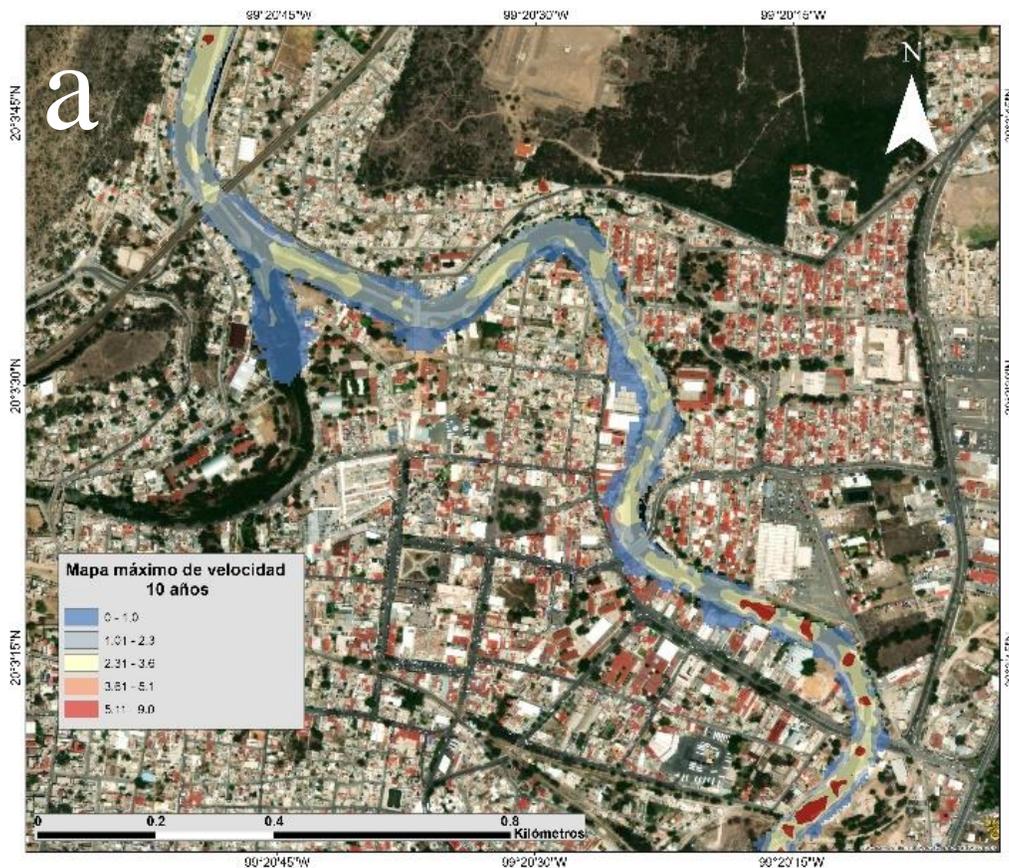
Al finalizar las simulaciones, el programa Iber nos genera mapas correspondientes a los periodos de retorno (10, 50, 100, 500 y 1000), los cuales se exportan en formato ráster. Cada uno de estos archivos se procesan posteriormente en ArcMap, donde se realizan ajustes de simbologías, las leyendas y el diseño en general. Este paso permite presentar los resultados de forma clara y comprensible, facilitando de esta forma la interpretación y el análisis de la información.

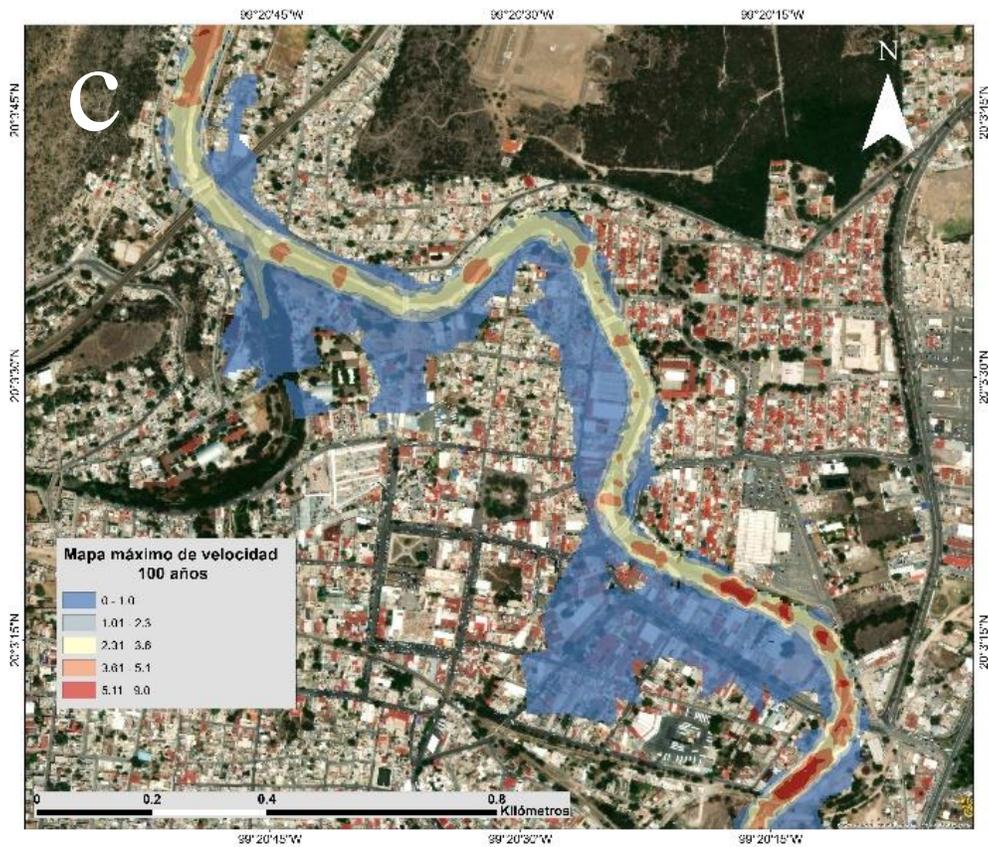
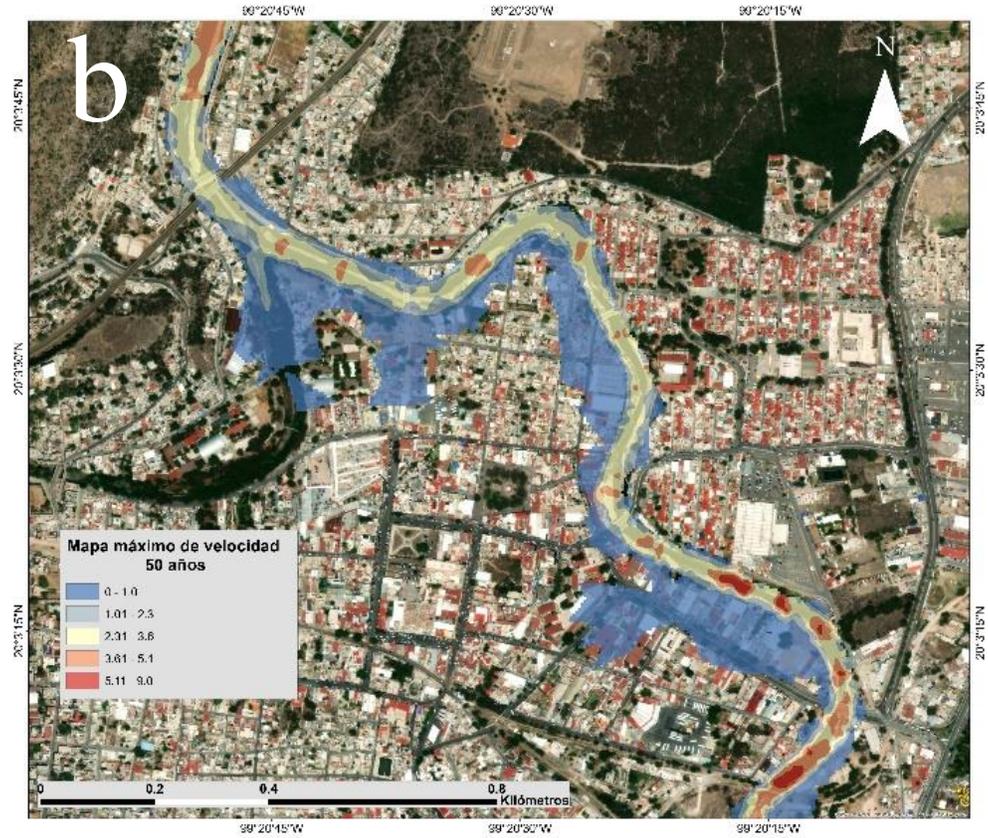
Los mapas de velocidad presentan una distribución similar a los de profundidad, ya que las mayores velocidades del flujo se encuentran dentro del cauce del río, donde se concentra la mayor parte de la energía del flujo. A medida que el agua se aleja del cauce y se dispersa hacia la planicie de inundación, la velocidad disminuye progresivamente. Sin embargo, la velocidad del agua es un factor crítico para evaluar la peligrosidad de una inundación, ya que se tiene un impacto directo en la estabilidad de la persona y la infraestructura. Estudios empíricos indican que velocidades mayores a 0.5 m/s pueden desestabilizar a una persona, y cuando las velocidades son significativamente mayores, el nivel de riesgo se clasifica como alto, por lo tanto, el análisis de velocidades no solo complementa la información sobre la profundidad, sino que también proporciona una herramienta esencial para determinar zonas de mayor peligro.

- a) Para el periodo de retorno de 10 años, los resultados del modelado muestran que las velocidades más altas son las que se presentan dentro del cauce. En las zonas habitacionales cercanas al río, las velocidades del agua se encuentran en el rango de 0 a 1.0 m/s. Si bien algunas viviendas se ven afectadas por estos niveles de velocidad, no se consideran casos de inundación, ya que el flujo no genera una acumulación significativa de agua en estas áreas (Figura 12a).
- b) Para el periodo de retorno de 50 años, podemos observar un incremento en las áreas con velocidades en el rango de 0 a 10 m/s, afectando partes de la colonia Centro y la colonia El Chayote. En comparación con el escenario de 10 años, el flujo alcanza mayor superficie, lo que indica una mayor propagación del agua fuera del cauce. Aunque las velocidades siguen sin aumentar y siendo bajas, la acumulación y permanencia del agua podría generar afectaciones en vialidades e infraestructura (Figura 12b).
- c) En este escenario, la superficie afectada sigue incrementando, con el agua alcanzando zonas más lejanas del cauce, como lo son la colonia El Chayote, que aumento el área de inundación. A pesar de que las velocidades aún permanecen dentro del rango más bajo, el alcance de la inundación es considerado mayor, lo que podría implicar afectaciones en vialidades y accesos principales (Figura 12c).

- d) En el caso del periodo del periodo de retorno de 500 años, las superficies de inundación son más altas, aunque no existen cambios en las velocidades se pueden afectar vialidades, accesos principales e infraestructura, dentro de la colonia Centro y la colonia El Chayote, siguió el aumento del área, el cual ya se percibe más a nivel visual en las imágenes. Estas áreas ya afectan al tránsito de las personas dentro de estas colonias lo cual ya comienza a ser un problema para la realización de actividades de rutina de cada individuo (Figura 12d).
- e) En el evento más extremo modelado, donde la extensión de la zona afectada es la mayor registrada, en la cual la inundación ya cubre casi por completo la colonia El Chayote y lo mismo sucede con la colonia Centro a ambos lados, por derecha y por izquierda. La velocidad sigue sin modificarse, se encuentra dentro del mismo rango de las anteriores, la magnitud del evento sugiere un impacto importante en términos de superficie inundada (Figura 12e).

Para comprender mejor las diferencias entre estos escenarios, a continuación, se hablarán de los mapas de profundidad, donde se podrán apreciar que, aunque la velocidad no aumente, la profundidad de inundación si comienza a variar dentro de estas áreas.





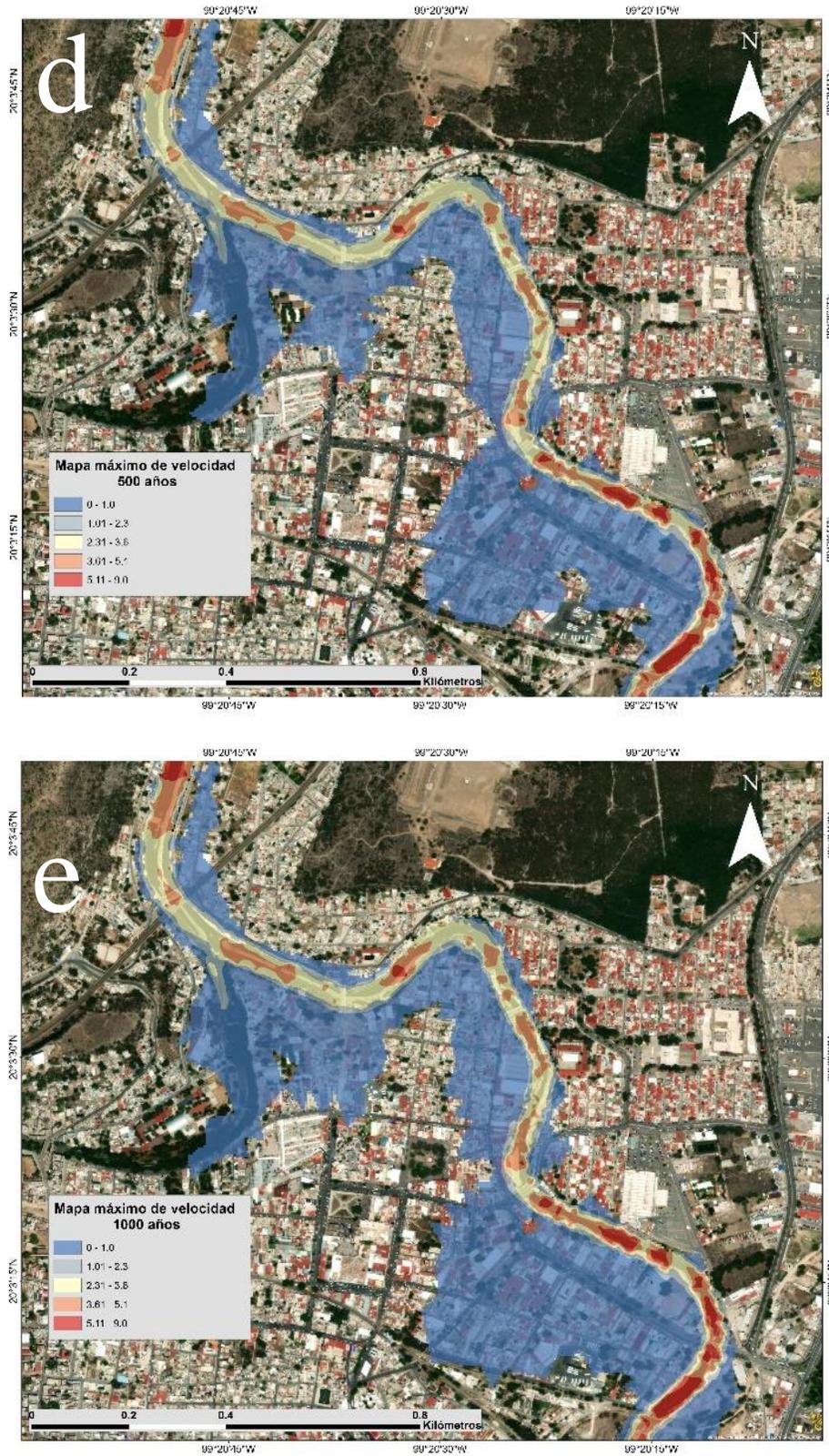
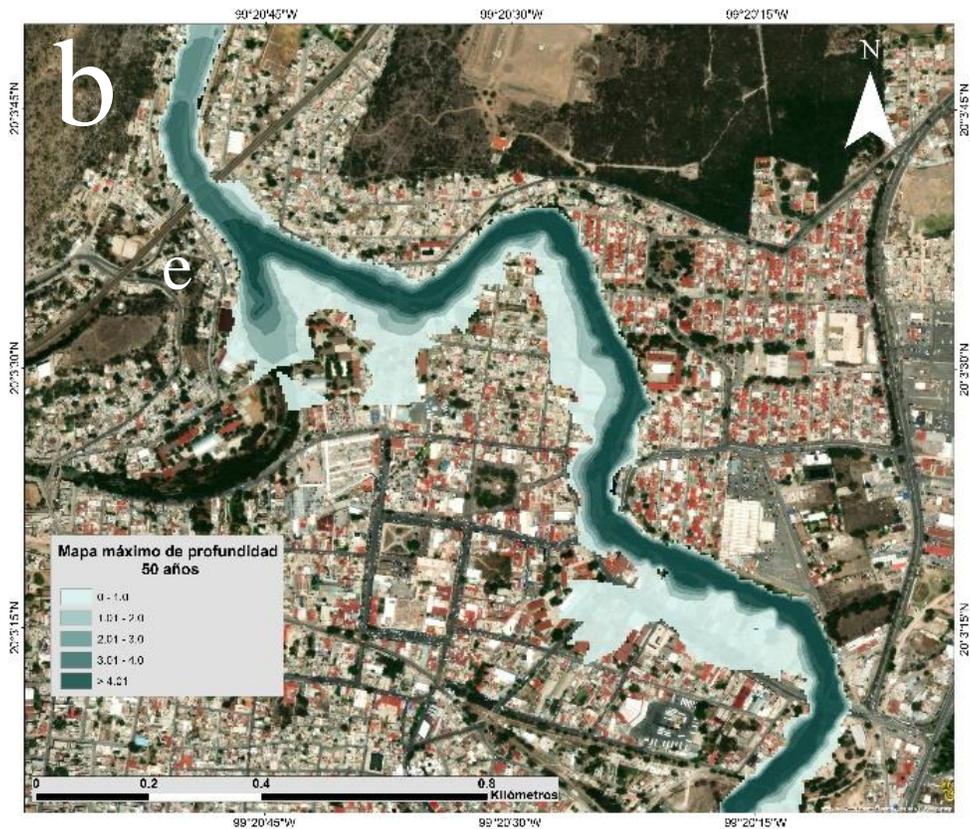
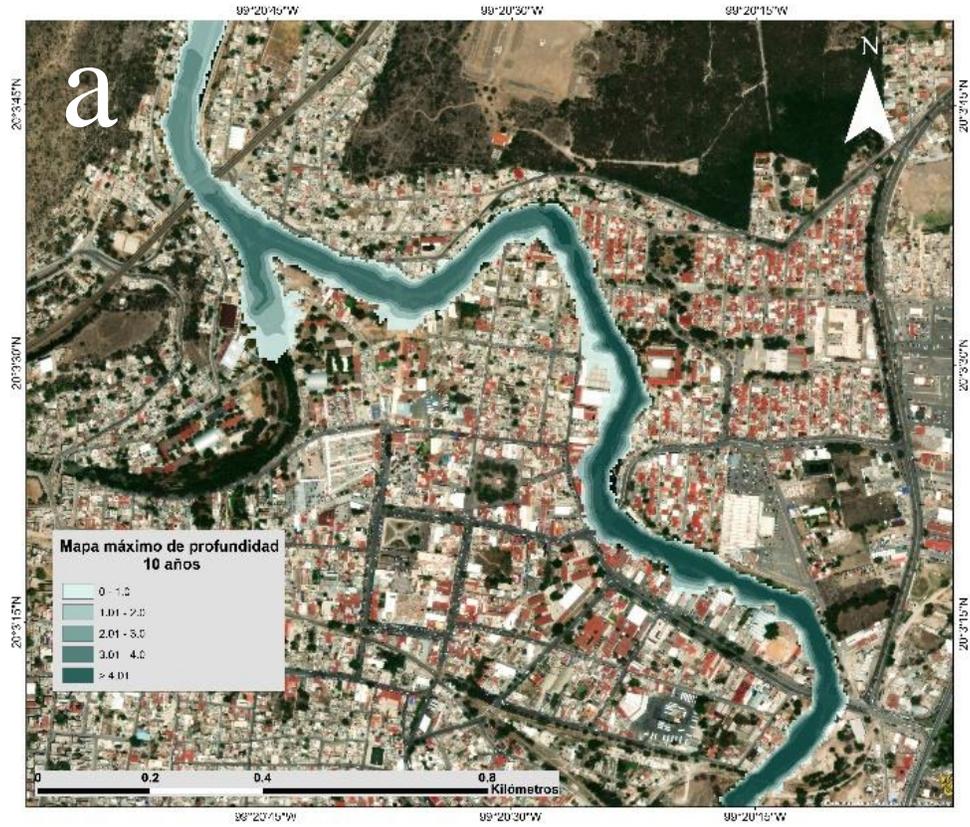


Figura 12. Mapas de velocidad a diferentes periodos de retorno: a) 10 años b) 50 años c) 100 años d) 500 años e) 1000 años.

En el caso de los mapas de profundidad se manejaron cinco clasificaciones las cuales fueron guiadas por el periodo de retorno más alto el cual fue de 1000 años (Figura 13a – 13e). Dado que la profundidad más alta variaba en los diferentes periodos de retorno se tomó la decisión de darle un valor >4 . Las clasificaciones se dividieron en diferentes profundidades las cuales fueron 0 a 1, 1.01 a 2.0, 2.01 a 3, 3.01 a 4 y mayor a 4. La escala de colores que se utilizó va del color más fuerte que es la zona más crítica hasta el más claro que es la menos crítica. Nos podemos dar cuenta que la profundidad más alta se encuentra dentro del cauce y conforme el flujo se va expandiendo por el área se va haciendo cada vez menos profunda. Por esta razón las zonas más críticas se siguen encontrando cercanas al cauce, mientras que las menos críticas alejadas del cauce.

- a) En el mapa de profundidad con periodo de retorno de 10 años nos damos cuenta que no existe ningún tipo de problema con el cauce, las mayores profundidades que son de 4 metros se encuentran dentro de este, lo cual nos dice que el canal funciona de forma correcta (Figura 13a).
- b) En el escenario a 50 años se observa incremento en la extensión de las zonas con acumulación de agua, alcanzando partes de la colonia Centro y El Chayote, con profundidades dentro del rango de 0 a 1 metro. Aunque la profundidad es baja en muchas áreas habitacionales, comienza a presentarse un mayor impacto en vialidades y espacios abiertos (Figura 13b).
- c) Comienzan a apreciarse profundidades dentro del rango de 1 a 2 metros, aunque de manera limitada. Estas zonas aún son mínimas, pero representan un problema, ya que pueden generar afectaciones directas en viviendas y dificultar el tránsito vehicular, por lo tanto, a las personas se les comienza a dificultar caminar por las calles de forma fácil y segura (Figura 13c).
- d) Es evidente un aumento en el área de profundidades, la colonia Centro y la colonia el Chayote, comienzan a presentar zonas en las cuales ya se sobrepasa el metro, entrando dentro del rango de 1.0 a 2.0 metros. Esto sugiere un impacto más severo en la infraestructura, con posibles afectaciones a viviendas y estructuras urbanas (Figura 13d).
- e) En este que es el evento más extremo, algunas zonas cercanas al cauce ya alcanzaron profundidades mayores a 2.0 metros, las cuales entran dentro del rango de 2 a 3 metros. Aunque estas áreas son reducidas, es importante hacer referencia a ellas, ya que representan puntos de alta severidad. En general este escenario muestra mayores profundidades en la zona Centro y en la colonia El Chayote, viajando a la colonia siguiente la cual es Jalpa, lo que implica un mayor tiempo de recuperación y daños significativos en las zonas afectadas, tomando en cuenta que el alto de las casas por promedio es de 3 metros y se cubre 2 metros representa más de la mitad de la altura de la casa (Figura 13e).



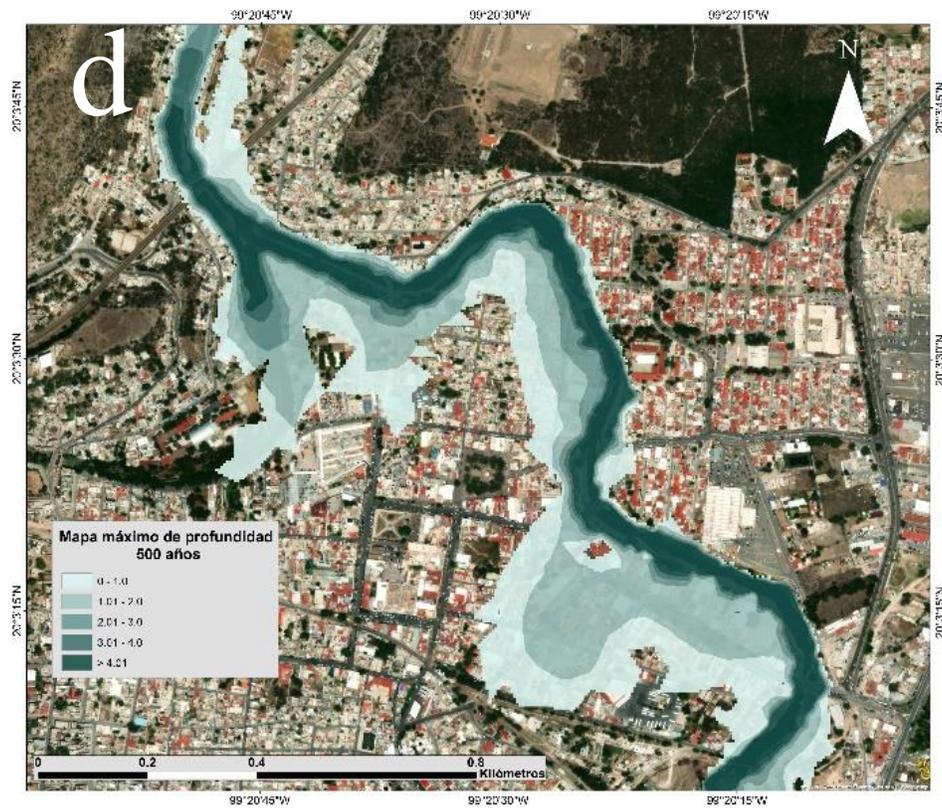
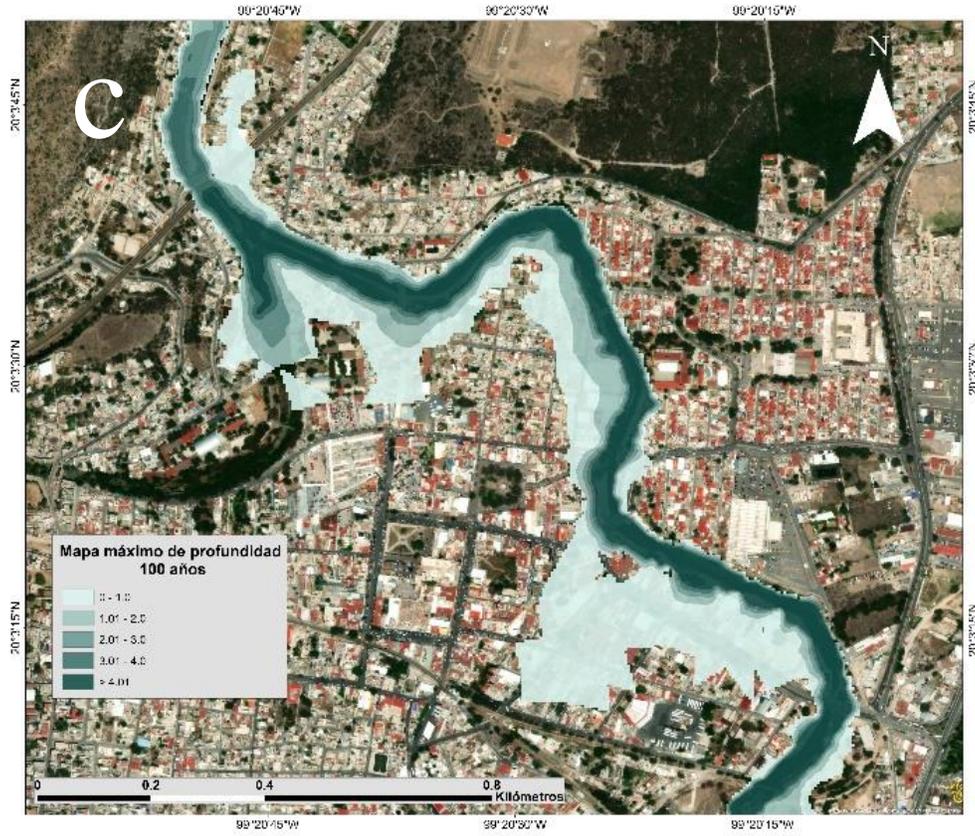




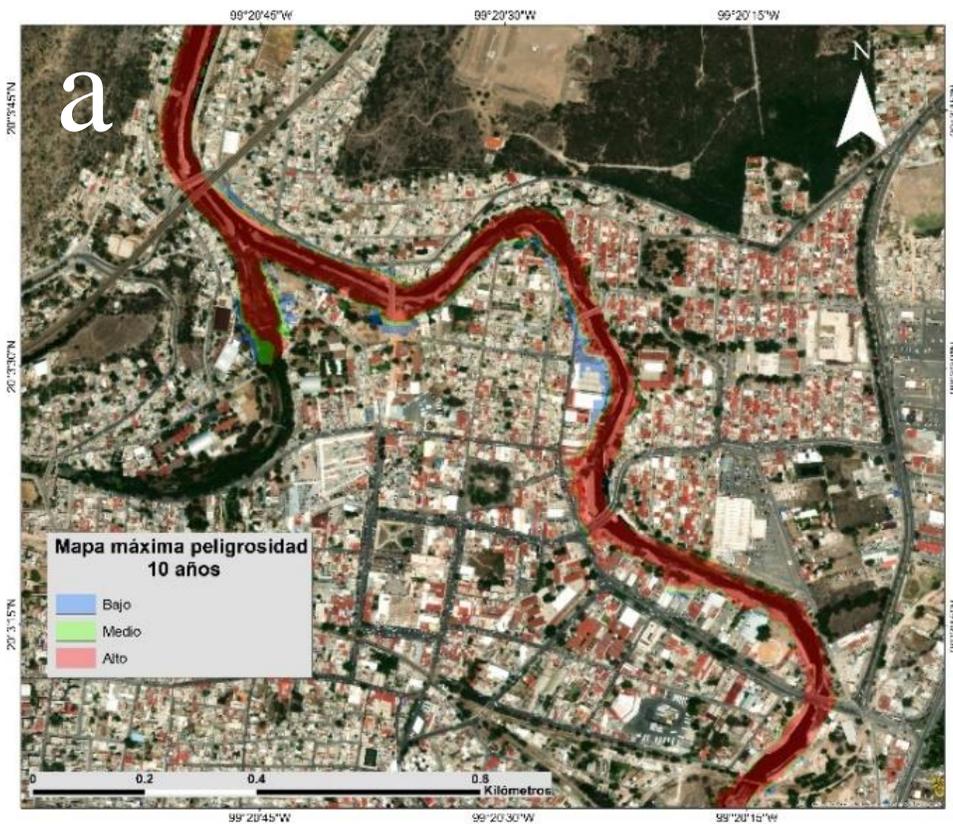
Figura 13. Mapas de profundidad a diferentes periodos de retorno: a) 10 años b) 50 años c) 100 años d) 500 años e)1000 años.

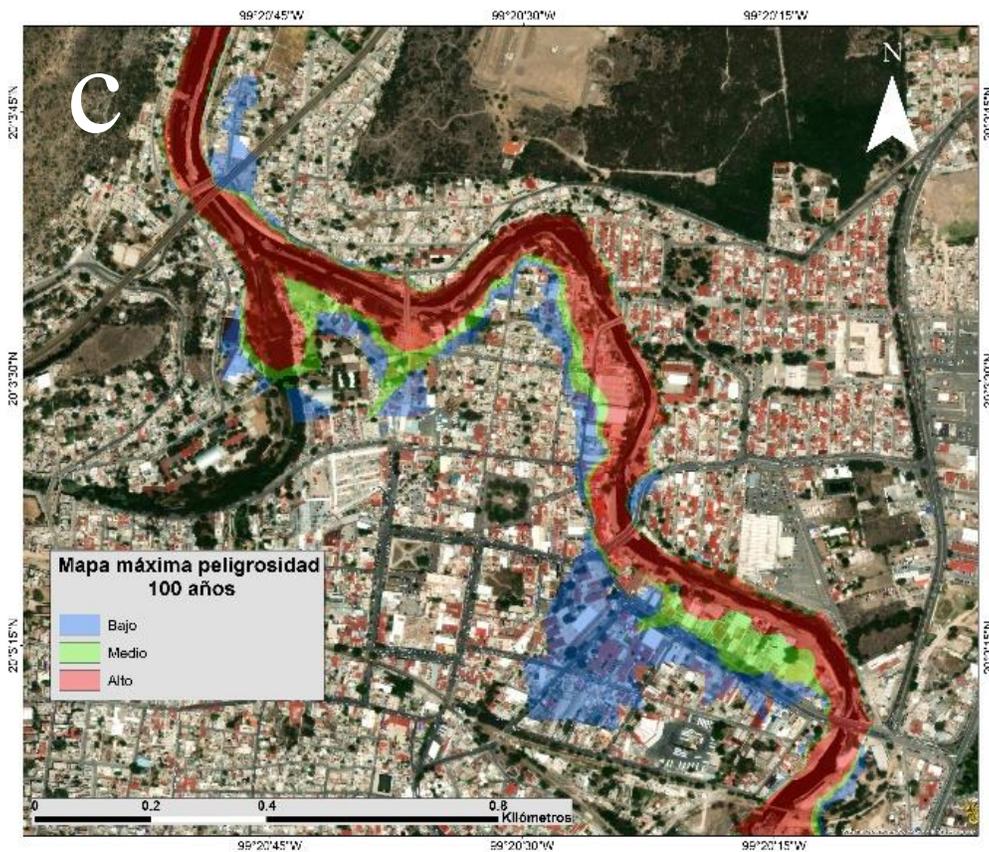
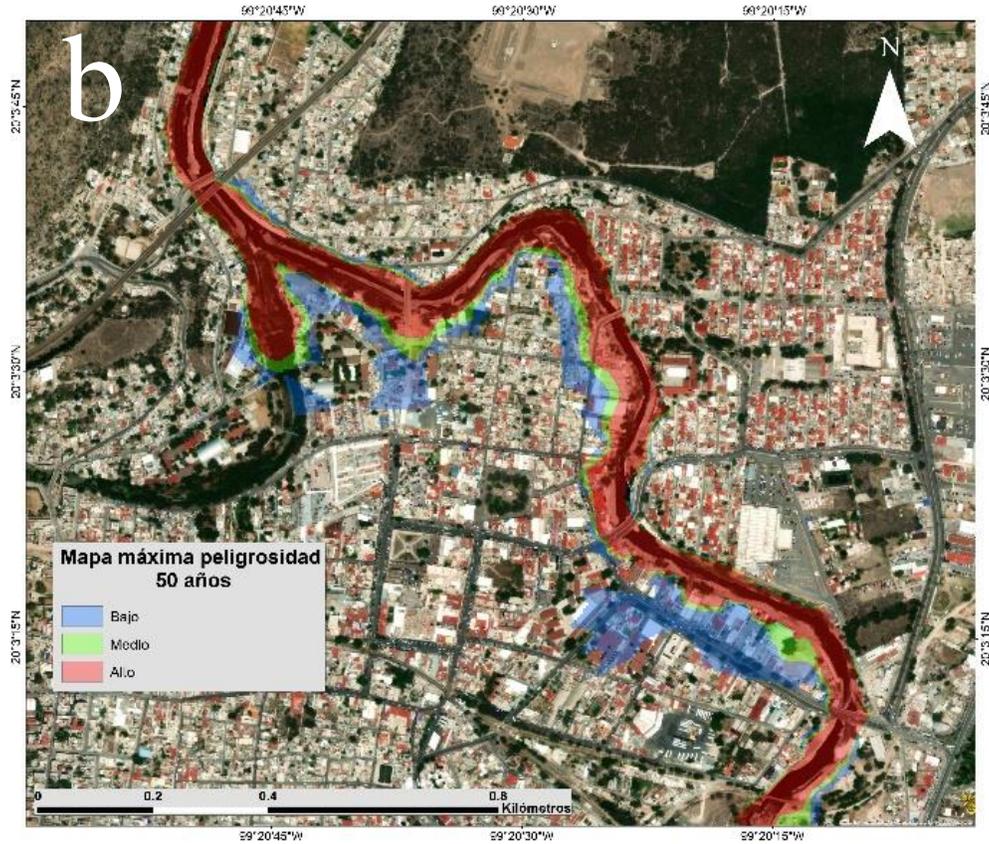
5.2 Mapas de peligrosidad de inundación

Los mapas de peligrosidad se clasificaron en tres categorías: baja, media y alta, representadas mediante los colores azul, verde y rojo, respectivamente. Esta clasificación se realizó siguiendo los criterios establecidos por las normas utilizadas en Iber, las cuales están basadas en estándares de España. Los intervalos que estos estándares manejan van del 0.25 siendo este el más bajo, hasta 1.25 siendo el más alto, para hacerlos más entendibles se manejaron intervalos de 0.25-0.7 (Bajo), 0.701-1 (Medio) y 1.01-1.25 (Alto), de esta forma obtuvimos de forma inicial los siguientes mapas de máxima peligrosidad, en los cuales nos podemos dar cuenta que conforme va aumentando el periodo de retorno el área de color rojo se va haciendo cada vez más grande, sin embargo, siempre las zonas más críticas van a ser las más cercanas al cauce y la zona menos crítica es la zona azul las cuales son zonas que están más alejadas del cauce (Figura 14).

- a) En el primer escenario, el cual es de 10 años, no se presentan niveles de peligrosidad fuera del cauce, ya que el flujo se mantiene dentro de la zona del río. Esto indica que no existe un riesgo significativo para las colonias cercanas al río (Figura 14a).

- b) En el segundo periodo de retorno de 50 años, se comienza a presentar peligrosidades bajas, en la colonia Centro y El Chayote. Aunque la extensión de esta zona es mínima y solo ocupa una pequeña parte de cada colonia, marca el inicio de la afectación fuera del cauce (Figura 14b).
- c) El área de peligrosidad baja se extiende, cubriendo una mayor superficie en la colonia El Chayote y afectando parcialmente la colonia Centro. Además, empiezan a observarse pequeños puntos con peligrosidad alta. Aunque estas áreas de alto riesgo son reducidas, representan un punto crítico en la evolución del evento (Figura 14c).
- d) Se presenta un incremento notable en la extensión de la zona de peligrosidad alta y se comienza a notar la zona de peligrosidad media, la cual ocupa un área no tan grande pero significativa dentro de la colonia Centro y El Chayote. Se mantiene la peligrosidad baja, aunque en menor proporción al igual que la peligrosidad media. Este escenario ya presenta un riesgo significativo para la infraestructura y las viviendas afectadas (Figura 14d).
- e) El evento máximo en los periodos de retorno propuestos, presenta una peligrosidad alta en gran superficie de la colonia Centro y la colonia El Chayote, en la colonia Centro la mitad está siendo clasificada como peligrosidad alta haciendo difícil el tránsito dentro de esta, en la colonia El Chayote se identifican zonas con niveles de peligrosidad altas en gran parte de la superficie, generando condiciones de riesgo extremo en gran parte de la zona (Figura 14e).





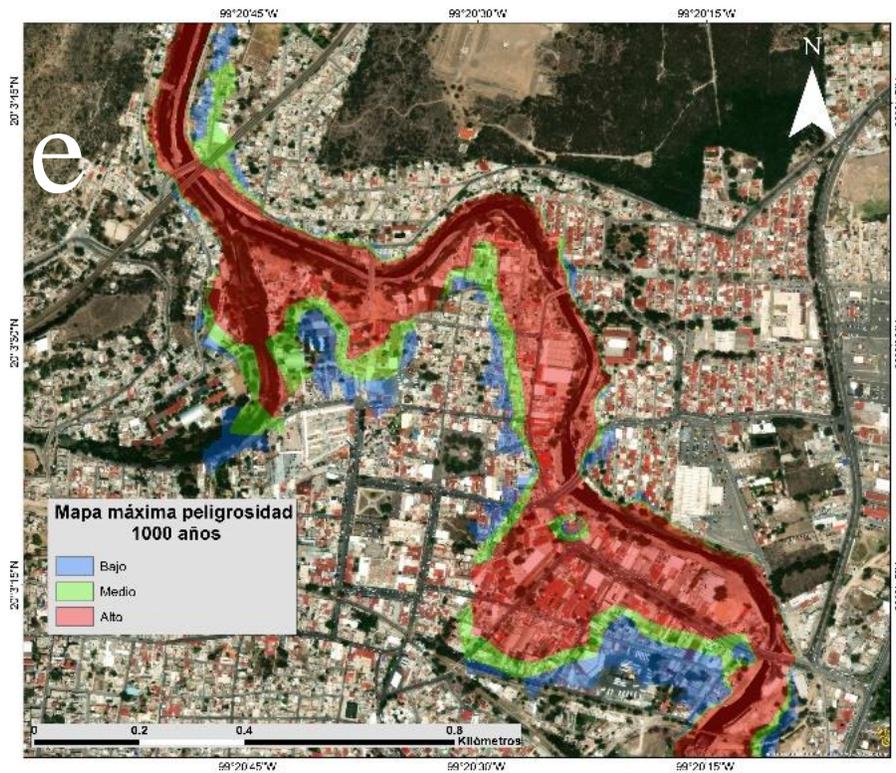
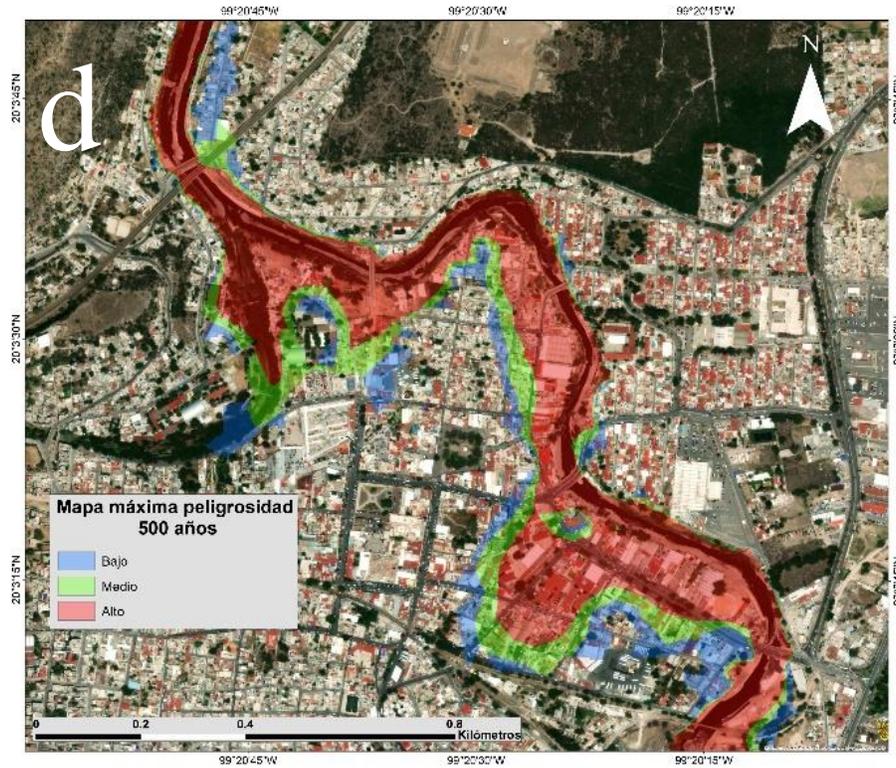


Figura 14. Mapas de peligrosidad a diferentes periodos de retorno: a) 10 años b) 50 años c) 100 años d) 500 años e) 1000 años.

5.3 Mapas de profundidad y peligrosidad reclasificados

Los primeros mapas, resultado de las simulaciones, ofrecen una idea preliminar de las zonas más y menos críticas en caso de una inundación, sin embargo, es importante considerar que los datos que utiliza Iber provienen de normativas y estándares establecidos en España, por lo que funcionan únicamente como una referencia inicial. Para ajustarlos a las condiciones y normativas mexicanas, específicamente las manejadas por el **CENAPRED (2010)**, es posible modificar los rangos de clasificación de los mapas. De esta forma, los resultados obtenidos se adaptan a los estándares nacionales, permitiendo un análisis más alineado con el contexto de México, estos estándares se muestran en la **Tabla 7**:

Tabla 7. Estándares para la clasificación de severidad.

Severidad	Velocidad m/s	Tirante m
A	$v > 2$	$Y > 2$
B	$v \leq 2$	$1 < Y \leq 2$
C	$v \leq 2$	$0.8 \leq Y \leq 1$
D	$v \leq 2$	$0.3 \leq Y \leq 0.8$
E	$v \leq 2$	$Y \leq 0.3$

Fuente: CONAGUA, 2014.

Con los mapas ajustados a la normativa mexicana, se puede observar que las mayores profundidades y niveles de peligrosidad se encuentran principalmente dentro del cauce del río, donde el flujo es más intenso debido a la mayor acumulación de agua y energía. A medida que el agua se expande hacia las áreas inundadas fuera del cauce, la profundidad y los niveles de peligrosidad disminuyen de forma progresiva, lo que refleja un comportamiento típico de las inundaciones fluviales.

La normativa mexicana clasifica las áreas de riesgo en cinco categorías, de la letra A a la E, donde A representa la zona más crítica, es decir, aquella con mayores profundidades y mayor impacto, mientras que la E corresponde a las áreas menos críticas, con profundidades reducidas y menor impacto. Esta clasificación es esencial para entender cómo se comportan las inundaciones dentro del área de estudio, permitiendo una evaluación clara y organizada del riesgo según su intensidad.

En cuanto a los mapas de velocidad, su utilidad es limitada dentro de estos parámetros normativos, ya que, según los estándares, las velocidades mayores a 2 m/s generalmente se encuentran confinadas dentro del cauce, donde el flujo es más rápido, mientras que las velocidades menores a 2 m/s se disminuyen en las zonas fuera del cauce, donde el agua se mueve lentamente al expandirse. Por lo tanto, esta normativa, el

enfoque recae en las profundidades y su clasificación, donde la velocidad se considera secundaria en términos de evaluación del riesgo general.

Este análisis combinado de profundidad y velocidades, ajustados a estándares locales proporcionan una herramienta más precisa y confiable para identificar las áreas seguras y vulnerables dentro del área de estudio. Asimismo, facilita la planificación de estrategias de evacuación más efectivas y adaptadas al contexto específico de la región.

Los mapas de peligrosidad en los periodos de retorno de 10, 50, 100, 500 y 1000 años, son los siguientes y los podemos entender de la siguiente manera:

- a) La peligrosidad máxima, representada por la categoría E, se encuentra principalmente dentro del cauce del río, ya que en este escenario no hay desbordamientos significativos. También se observan áreas dentro de la categoría A, lo que indica niveles mínimos de peligrosidad dentro de la escala establecida (Figura 15a).
- b) En la colonia Centro, comienzan a aparecer áreas con peligrosidad baja: una superficie clasificada como A y B, siendo estas dos las que más área cubren fuera del cauce. Estas áreas en mayor parte están sobre la colonia Centro y colonia El Chayote. Aunque este escenario aún no representa un riesgo crítico, es importante considerar estrategias preventivas para eventos de mayor magnitud en el futuro (Figura 15b).
- c) En la colonia Centro, los cambios con respecto al escenario anterior son mínimos; a simple vista, la distribución de las áreas afectadas es similar. En la colonia El Chayote, el área A se ha expandido de manera más notable, lo que comienza a representar una mayor preocupación para sus habitantes. Las categorías máximas como E y D se encuentran aún dentro del cauce, si han aumentado sin embargo aun no es un escenario crítico, sin embargo, se deben comenzar a planear estrategias de evacuación para eventos futuros (Figura 15c).
- d) En este escenario, se presenta un gran cambio en las áreas con respecto a todos los anteriores, la colonia Centro y El chayote siguen siendo afectadas. El área aumentó el doble en la categoría C, D y E aproximadamente, en las demás categorías como la B se mantuvo con poca variación, pero se alejó del cauce, la categoría más baja disminuyó el doble, esto no significa que no exista peligrosidad, al contrario, es preocupante por las demás categorías son las que ocupan mayor área dentro de las superficies de inundación (Figura 15d).

- e) Este es el escenario de mayor impacto, donde la peligrosidad alcanza su nivel más alto y las áreas afectadas aumentan de manera considerable en ambas colonias. La superficie que cubre cada categoría es mayor, en la categoría A, B y C, los metros cuadrados no varían en gran cantidad con respecto al anterior, sin embargo, aunque no aumente, se alejan cada vez más del cauce. Las categorías máximas tienen variaciones mayores, las cuales siguen afectando la colonia Centro y la colonia El Chayote, al ser el ultimo escenario y a su vez el más crítico, afecta de forma considerable las vialidades, zonas habitadas e infraestructura, lo que es motivo de evacuación para estas zonas (Figura 15e).

Para facilitar la comprensión de los resultados, se presentan tres tablas que muestran la comparación de las superficies inundadas en distintos escenarios:

- **Tabla 8:** Presenta la superficie inundada correspondiente a cada periodo de retorno, organizada por categoría de riesgo.
- **Tabla 9:** Muestra la diferencia en la superficie inundada entre periodos de retorno consecutivos, permitiendo observar el incremento y decremento.
- **Tabla 10:** Refleja la diferencia en la superficie inundada entre el primer y el último periodo de retorno, destacando el aumento total a lo largo del análisis.

Tabla 8. Áreas de mapas de peligrosidad reclasificados a diferentes periodos de retorno: a) 10 años b) 50 años c) 100 años d) 500 años e) 1000 años.

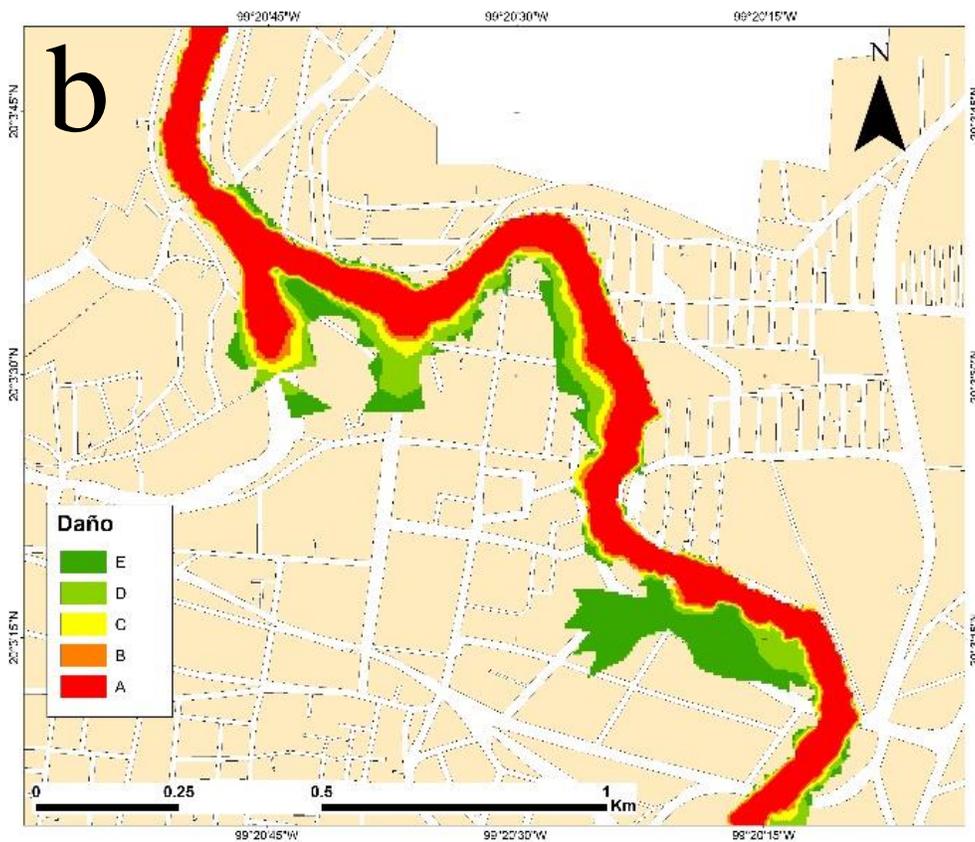
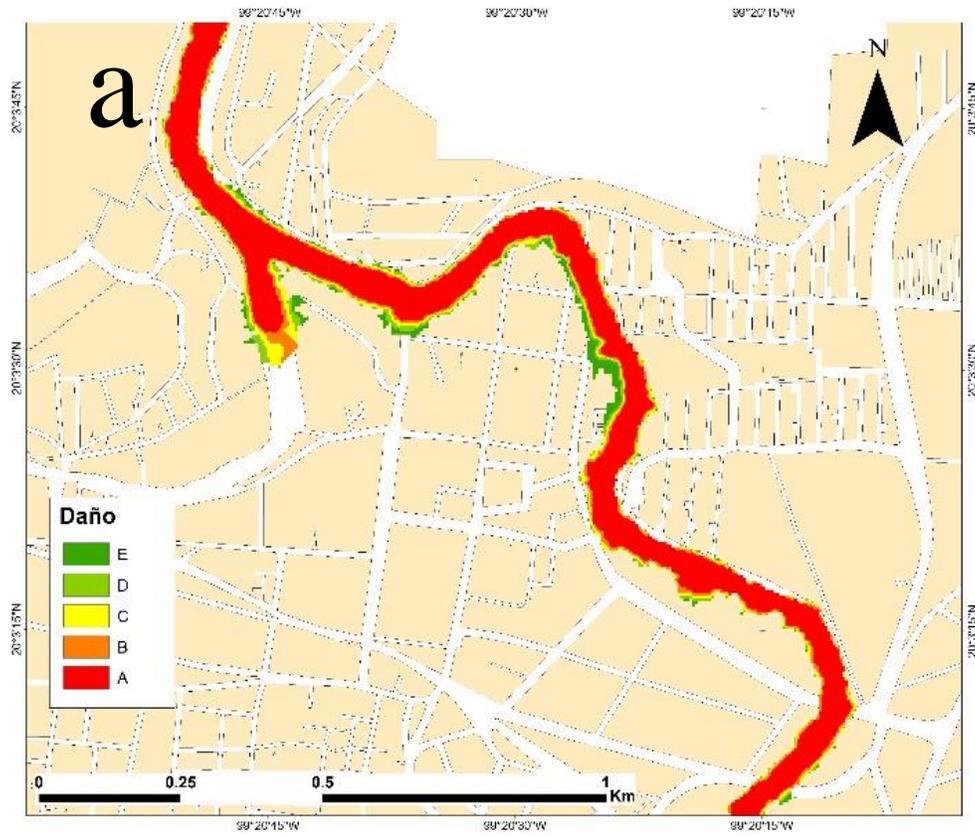
	10 años	50 años	100 años	500 años	1000 años
A	7,396.79	57,832.31	74,656.97	36,594.60	37,742.05
B	8,696.25	38,216.02	62,016.66	62,209.71	62,847.09
C	14,063.89	25,393.25	34,056.82	73,199.73	73,120.98
D	14,155.05	17,451.30	21,553.92	48,530.69	52,943.44
E	116,623.77	143,872.16	162,296.39	250,361.93	288,284.37

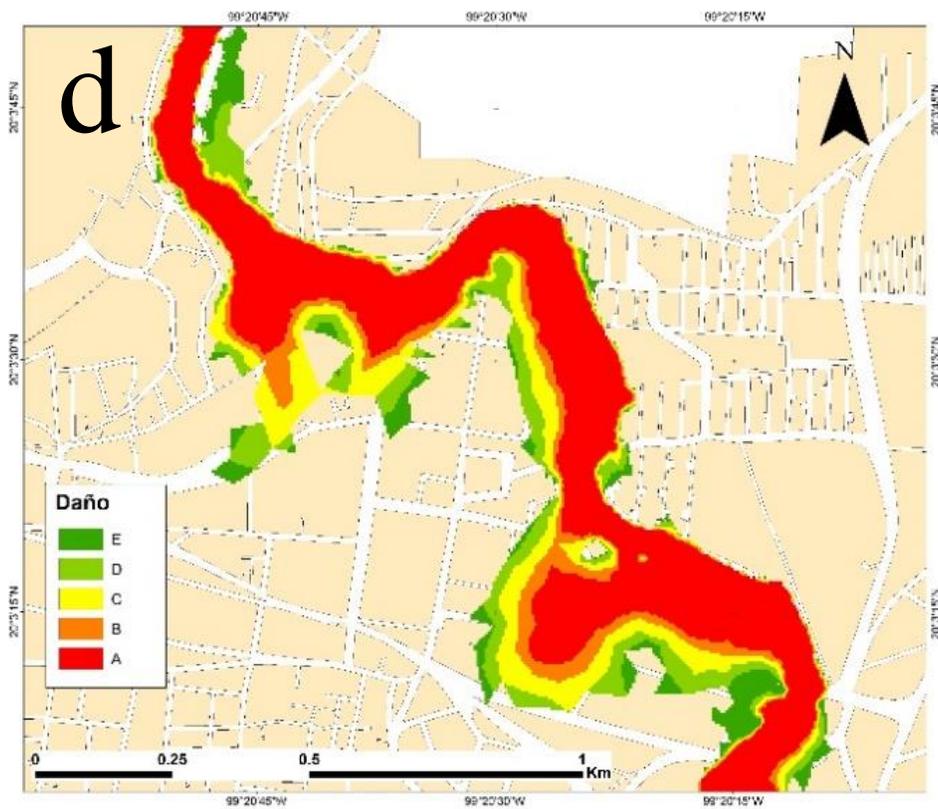
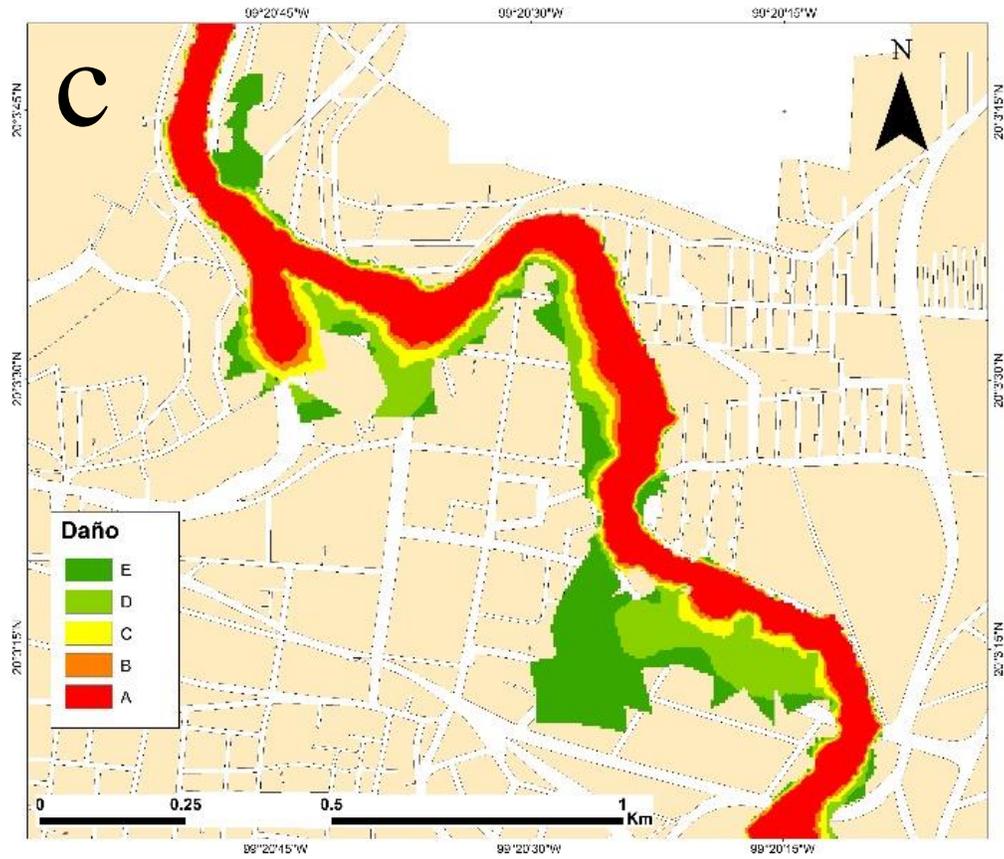
Tabla 9. Diferencia de áreas con respecto a su periodo de retorno consecutivo.

	10 años 50 años	50 años 100 años	100 años 500 años	500 años 1000 años
A	50,435.52	16,824.66	-38,062.37	1,147.45
B	29,519.77	23,800.64	193.05	637.38
C	11,329.36	8,663.57	39,142.91	-78.75
D	3,296.25	4,102.62	26,976.77	4,412.75
E	27,248.39	18,424.23	88,065.54	37,922.44

Tabla 10. Diferencia de áreas de los periodos de retorno (10 años y 1000 años)

	10 años 1000 años
A	30,345.26
B	54,150.84
C	59,057.09
D	38,788.39
E	171,660.60





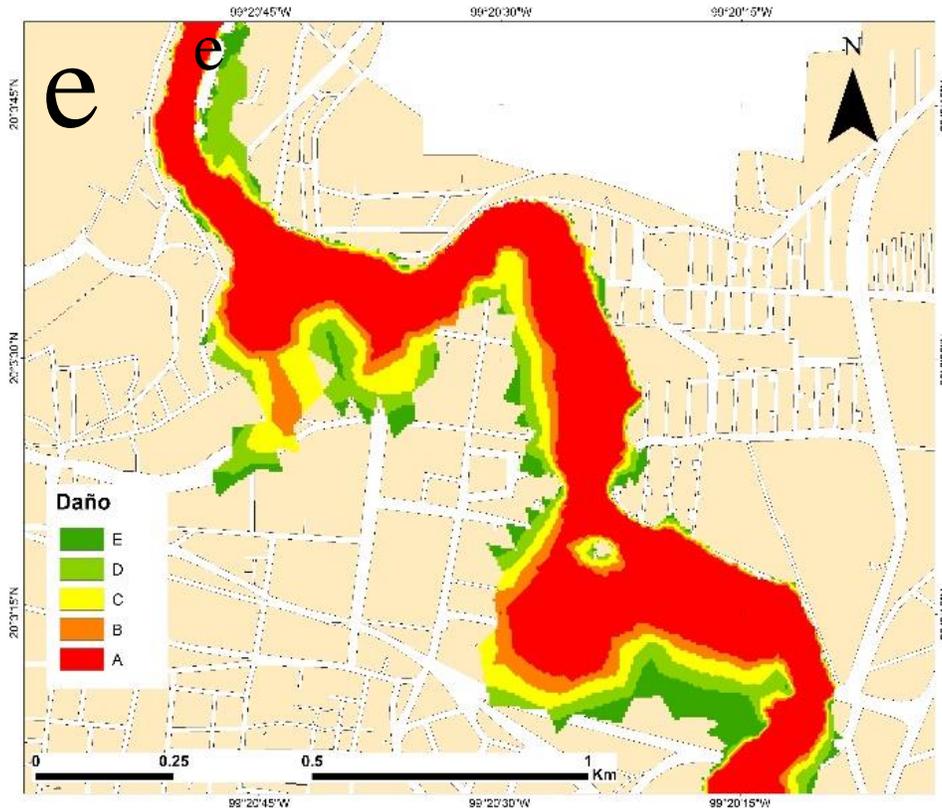


Figura 15. Mapas reclasificados de peligrosidad a diferentes periodos de retorno: a) 10 años b) 50 años c) 100 años d) 500 años e)1000 años.

5.4 Identificación de zonas vulnerables y zonas seguras

La [Figura 16](#) en el cual se tomó en cuenta el periodo de retorno más alto, muestra las zonas menos expuestas a la inundación. Mas allá de la zona marcada en color rojo, que representa el límite máximo alcanzado por la inundación, se identifican posibles albergues para la evacuación de personas que habitan cerca del cauce o en áreas consideradas críticas. Estos albergues incluyen centros de atención médica, instituciones educativas, mercados y supermercados. Además, se estima el tiempo necesario para evacuar las áreas inundadas en función de su proximidad a estos refugios.

Para calcular los tiempos de llegada a los albergues, se utilizó un mapa que considera la distancia desde las zonas críticas hasta los puntos de refugio, representando una distancia con circunferencias trazadas a cada 60 metros. También se asumió una velocidad promedio de caminata de 0.5 m/s, adecuada para residentes en un rango de edad de entre 8 y 59 años. Con base en esta velocidad, se determinó que cada 60 metros se recorre en un aproximado de 2 minutos (FDMA, 2002, Morgado Y., 2023).

Los resultados muestran que las zonas más cercanas a los albergues tienen un tiempo mínimo de evaluación de 2 minutos, mientras que las zonas más alejadas, ubicadas en los límites de la zona urbana, pueden tardar

20 minutos en alcanzar un albergue. Para las zonas intermedias, los tiempos de evacuación oscilan entre los 10 y 15 minutos, dependiendo de la distancia específica al albergue más cercano. Esta información es fundamental para planificar estrategias de evacuación efectivas y garantizar la seguridad de los residentes en situaciones de emergencia.

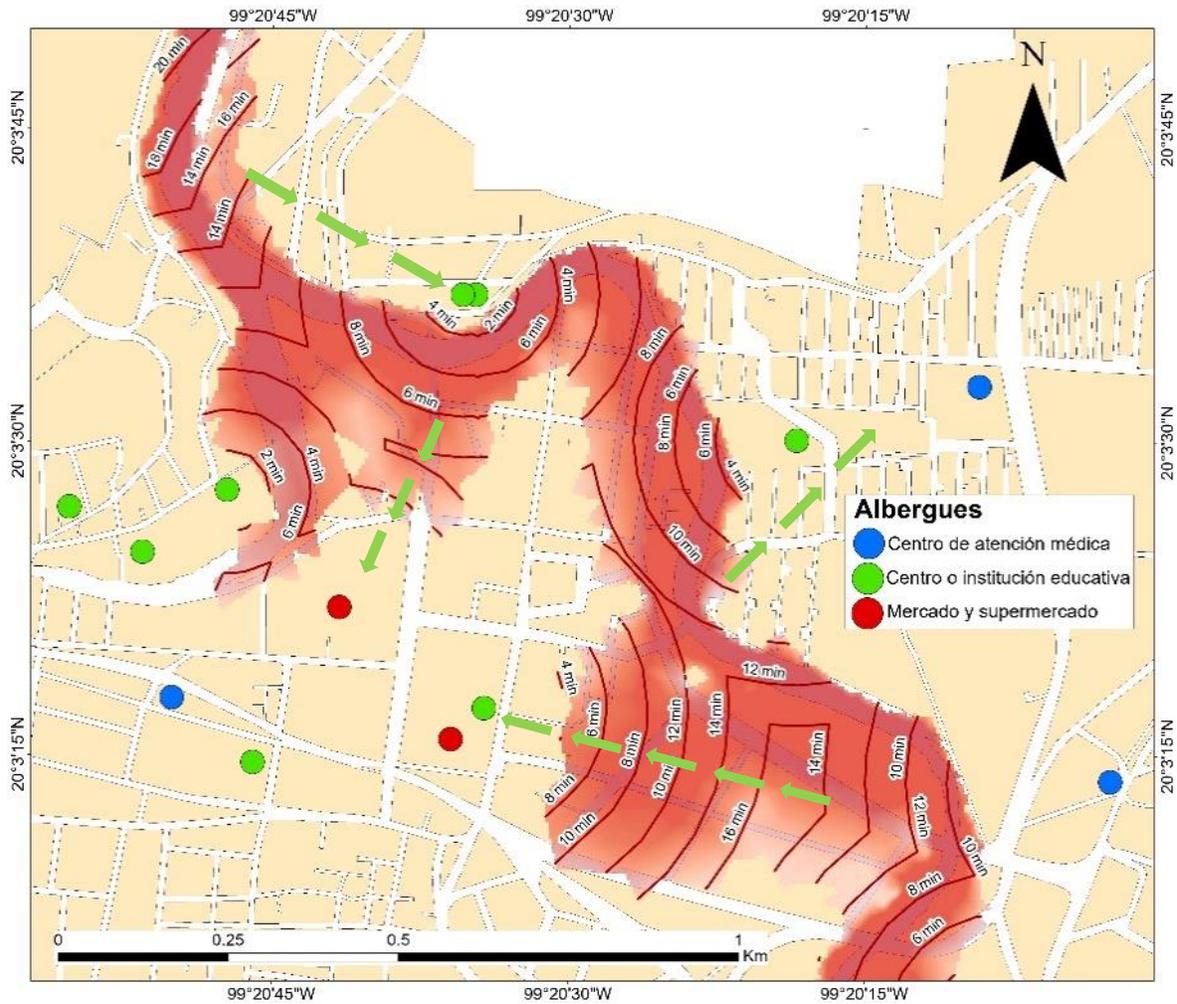


Figura 16. Tiempo necesario para evacuar la zona inundada hacia los albergues.

5.5 Discusión

5.5.1 Análisis de los resultados obtenidos

La simulación hidrométrica realizada en el presente estudio permitió identificar con claridad las zonas más vulnerables a inundaciones en Tula de Allende, Hidalgo. Los resultados mostraron que las áreas aledañas al cruce principal del río Tula presentan los mayores niveles de exposición, particularmente en sectores con pendientes suaves y urbanización densa. Las profundidades superaron en algunos casos los 1.5 metros, lo que implica un riesgo considerable para la integridad de viviendas y personas.

Asimismo, se detectaron velocidades de flujo significativas en ciertos tramos urbanos, lo que refuerza la necesidad de considerar este parámetro en el análisis de vulnerabilidad estructural. La modelación permitió clasificar las viviendas en niveles de riesgo bajo, medio y alto, lo cual se utilizó posteriormente para estimar los daños directos. Esta clasificación facilita la priorización de acciones en materia de protección civil y ordenamiento urbano.

5.5.2 Interpretación de los hallazgos

Los hallazgos obtenidos reflejan la importancia de integrar modelos hidrodinámicos bidimensionales en la gestión de riesgo por inundaciones, ya que permiten un análisis detallado de la dinámica del agua sobre el territorio. La inclusión de variables como la profundidad y la velocidad del flujo en la evaluación de daños directos contribuye a una comprensión más realista del impacto físico y económico sobre la infraestructura urbana. Adicionalmente, la propuesta metodológica implementada demuestra que es viable cuantificar los daños materiales utilizando datos generados por el modelo, lo cual representa una herramienta útil para tomar decisiones. Esta aproximación ampliar su aplicación en estudios de vulnerabilidad y planeación territorial.

5.5.3 Comparación con estudios similares

Los resultados obtenidos en el presente estudio muestran coincidencias importantes con investigaciones previas que también emplearon el modelo hidrodinámico IBER para la simulación de inundaciones en contextos urbanos y rurales. En particular, el trabajo de González-Aguirre et al. (2016) en Villahermosa, Tabasco, representa un antecedente clave, pues logró reproducir de forma precisa la extensión de las inundaciones de octubre de 2007. Dicho estudio validó sus resultados con datos de estaciones hidrométricas, lo cual permitió ajustar el modelo con alto grado de confiabilidad. Similar a este enfoque, en el presente trabajo se utilizaron datos históricos de caudales máximos y topografía para calibrar el

modelo, logrando una representación coherente con los eventos registrados en Tula de Allende en septiembre de 2021.

Por otro lado, la investigación de Gutiérrez García et al. (2022) en la cuenca del río Tesechoacán empleó el modelo IBER para evaluar zonas de alta peligrosidad y proponer medidas de mitigación estructurales. En este caso, el modelo se complementó con un enfoque territorial que permitió priorizar acciones en función del riesgo. En comparación, el presente estudio también incorpora la evaluación del riesgo, pero con un enfoque en los daños directos, calculando impactos potenciales en infraestructura urbana mediante variables hidrodinámicas como profundidad y velocidad. Esta diferencia metodológica amplía el espectro de aplicación del modelo, demostrando su versatilidad tanto para fines de prevención como de estimación de impactos.

A diferencia de los trabajos mencionados, este estudio contribuye además con una propuesta metodológica para la clasificación de viviendas por niveles de exposición y estimación económica de daños, lo cual no se abordó en las investigaciones anteriores. Esto permite un acercamiento más tangible al impacto social y económico de los eventos hidrometeorológicos extremos, lo que resulta particularmente útil para la gestión del riesgo a nivel municipal.

Finalmente, si bien los tres estudios comparten el uso del modelo IBER y una base de análisis sobre escenarios históricos, el presente trabajo se distingue por centrarse en una localidad que, pese a su vulnerabilidad, no había sido suficientemente analizada a nivel académico. La aplicación en Tula de Allende, Hidalgo, representa así una contribución significativa tanto en lo técnico como en lo territorial, al fortalecer el conocimiento sobre zonas susceptibles en una región históricamente afectada por desbordamientos fluviales.

CAPITULO 6. CONCLUSIÓN

En esta investigación se hizo una evaluación de riesgos de inundación en el municipio de Tula de Allende, la cual permitió identificar zonas seguras y zonas críticas, además de albergues cercanos a la población que se vea afectada ante eventos hidrometeorológicos. Este estudio se basó en los periodos de retorno de 10, 50, 100, 500 y 1000 años, lo cual permitió ver los escenarios más críticos, y de acuerdo a esto poder identificar los albergues más cercanos a las zonas afectadas en relación al tiempo ideal de evacuación de las personas. Para lograr esto, se realizaron múltiples simulaciones utilizando el modelo hidrodinámico Iber, alimentando con datos de entrada y salida. Los resultados generaron mapas de profundidad, velocidad y peligrosidad, que sirvieron como base para adaptar las normativas españolas del modelo a las normativas mexicanas.

La metodología Source-Pathway-Receptor-Consequence (SPRC), no solo permitió caracterizar las zonas de riesgo, sino también proporciono un enfoque adaptable para su aplicación en diversos contextos. Esta metodología es útil para la identificación de riesgos, el análisis del trayecto del flujo, la evaluación de impactos, y la planeación de medidas de evacuación. Entre sus aplicaciones, se puede lograr el diseño de mapas de riesgo, el análisis de escenarios futuros, la gestión y mantenimiento de daños, la conservación de ecosistemas, y el desarrollo de políticas públicas enfocadas en la gestión de riesgos.

La relevancia de esta investigación radica en que ofrece una herramienta precisa y adaptable para gestionar riesgos y planificar estrategias de evacuación ante inundaciones. Al adaptar la metodología a las condiciones locales y normativas mexicanas, se facilita su aplicación en diferentes contextos dentro del país, específicamente en regiones con características similares a las de Tula de Allende. Asimismo, los hallazgos contribuyen a reducir la incertidumbre en la planificación de emergencias, proporcionando una base sólida para la toma de decisiones que prioricen la seguridad de las comunidades vulnerables.

Este estudio no solo identificó los riesgos y áreas críticas en caso de inundaciones futuras en Tula de Allende, sino que también contribuyó al desarrollo de estrategias prácticas y adaptables para la gestión del riesgo hídrico, fortaleciendo la capacidad local de respuesta ante fenómenos naturales y sentando las bases para una planificación territorial más segura y resiliente.

Por último, se identificó que dentro de la zona inundada destacan dos tipos de grados de rezago social, los cuales son: medio y bajo. Lo que quiere decir que dentro de la zona de grado medio existe población con acceso limitado a servicios básicos (agua potable, drenaje, electricidad), educación incompleta, o calidad de vida insuficiente y dentro de la zona de grado bajo la población tiene mejor acceso a los servicios básicos y condiciones de vida en comparación al grado medio.

REFERENCIAS

1. Areu-Rangel, O. S., Cea, L., Bonasia, R., & Espinosa-Echavarría, V. J. (2019). Impact of urban growth and changes in land use on river flood hazard in Villahermosa, Tabasco (México). *Water*, 11(2), 304. <https://doi.org/10.3390/w11020304>
2. Bentley Systems, Incorporated. (s.f.). WaterCAD [Software]. Recuperado de <https://www.bentley.com/software/openflows-watercad/>
3. Bladé, E., Cea, L., Corestein, G., Escolano, E., Puertas, J., Vázquez-Cendón, J., Dolz, J. & Coll, A. (2014). IBER: herramienta de simulación numérica de flujo en ríos. *Rev Int Métodos Num para Cálculo y Diseño en Ing* 2014, 30, (1), 1–10. Recuperado de [Iber: herramienta de simulación numérica del flujo en ríos - ScienceDirect](#)
4. Bonasia, R., Areu-Rangel, O.S., Tolentino, D., Mendoza-Sanchez, I., Gonzalez-Cao, J., & Klapp, J. (modelacio). Flooding hazard assessment at Tulancingo (Hidalgo, Mexico). *Journal of Flood Risk Management*, 11.
5. CENAPRED (Centro Nacional de Prevención de Desastres). (2010). Metodología para la elaboración de Atlas de Peligros y Riesgos por fenómenos naturales. Secretaría de Gobernación, México. Recuperado de: <https://www.gob.mx/cenapred>
6. CENAPRED (Centro Nacional de Prevención de Desastres). (2015). Atlas de riesgos del estado de Hidalgo. México: Secretaría de Gobernación.
7. CEPREDENAC, Parrales, R., & Ugarte, A. (2019). Estudio Regional sobre Análisis Costo-Beneficio de Obras de Mitigación ante Inundaciones en Centroamérica. Recuperado de https://www.researchgate.net/publication/341579101_Estudio_Regional_sobre_Analisis_Costo-Beneficio_de_Obras_de_Mitigacion_ante_Inundaciones_en_Centroamerica
8. Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). (2014). Lineamientos para la elaboración de mapas de peligro por inundación. Recuperado de [https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/469330/Lineamientos para la elaboraci n de mapas de peligro por inundaci n.pdf](https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/469330/Lineamientos_para_la_elaboraci_n_de_mapas_de_peligro_por_inundaci_n.pdf)
9. Consejo Nacional de Evaluación de la Política de Desarrollo Social (CONEVAL). (2021). Rezago social por AGEB urbano 2020. https://www.coneval.org.mx/Medicion/IRS/Paginas/Rezago_social_AGEB_2020.aspx
10. Departamento Nacional de Planeación (DNP). (s.f.). Metodología para evaluar los riesgos. Recuperado de https://colaboracion.dnp.gov.co/CDT/Prensa/2_Metodolog%C3%ADa%20para%20evaluar%20los%20riesgos_1FVcc.pdf

11. Durran, D. R. (2010). Numerical methods for fluid dynamics: With applications to geophysics (2.^a ed.). Springer. <https://doi.org/10.1007/978-1-4419-6412-0>
12. Evans, E. P., Ashley, R., Hall, J., Penning-Rowsell, E., Sayers, P., Thorne, C., & Watkinson, A. (2004). Foresight Future Flooding. Scientific Summary: Volume I – Future Risks and Their Drivers. Office of Science and Technology. Recuperado de https://www.researchgate.net/publication/237474773_The_Foresight_Future_Flooding_project_drivers_responses_and_choices_for_future_flood_risk_management
13. Federal Emergency Management Agency (FEMA). (2024). Benefit-Cost Analysis. Recuperado de <https://www.fema.gov/grants/tools/benefit-cost-analysis>
14. Fernández-Díaz, V. Z., Silva, R., & Mendoza, E. (2015). Metodologías para evaluar el rol social en el riesgo costero. IX Congreso “Los Puertos Mexicanos y su Conectividad”, Veracruz, México. Recuperado de https://www.researchgate.net/publication/324162499_Metodologias_para_evaluar_el_rol_social_en_el_riesgo_costero
15. Ferziger, J. H., Perić, M., & Street, R. L. (2020). Computational methods for fluid dynamics (4^a ed.). Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-99693-6>
16. Fire and Disaster Management Agency (FDMA). (s.f.). Fire and Disaster Management Agency. Recuperado de <https://www.fdma.go.jp/en/post1.html>
17. Garcia Bu Bucogen, G., Piccolo, M. C., & Bohn, V. Y. (2021). Estimación de la susceptibilidad a inundaciones en la cuenca inferior de Río Negro, Argentina. Finisterra, 56(118), 3–24. <https://doi.org/10.18055/Finis22671>
18. GeoEcoSphera. S.C. (2020). Atlas de peligros y/o riesgos del municipio de Tula de Allende, Hidalgo.
19. GIZ. (2018). Valoración de los beneficios, costes e impactos de medidas de adaptación basadas en ecosistemas: Un libro guía para los planificadores de adaptación, gerentes e inversores. AdaptationCommunity.net. Recuperado de https://www.adaptationcommunity.net/wp-content/uploads/2018/03/Valuacion_AbE_es_online.pdf
20. Gobierno Municipal de Tula de Allende. (2013). Programa Municipal de Desarrollo Urbano y Ordenamiento Territorial de Tula de Allende, Estado de Hidalgo. <https://tula.gob.mx/TRANSPARENCIA-70/FRACCION-I/F/PROGRAMA-MUNICIPAL-DE-DESARROLLO.pdf>
21. Guillén, B. (2021, noviembre 17). El Gobierno reconoce en un informe que la inundación de Tula se debió a la descarga en exceso de agua del Valle de México. El País. <https://elpais.com/mexico/2021-11-17/el-gobierno-reconoce-en-un-informe-que-la-inundacion-de-tula-se-debio-a-la-descarga-en-exceso-de-agua-del-valle-de-mexico.html>

22. Gutiérrez García, J. V., Rubiños Panta, J. E., Fernández Reynoso, D. S., Ramírez Ayala, C., Roblero Hidalgo, R., Gutiérrez García, F. G., & Romero Sánchez, M. E. (2022). Modelación hidráulica en Iber para prevención de inundaciones en la cuenca Tesechoacán. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 13(71), 159–181. <https://biblat.unam.mx/es/revista/revista-mexicana-de-ciencias-forestales/articulo/modelacion-hidraulica-en-iber-para-prevencion-de-inundaciones-en-la-cuenca-tesechoacan>
23. Holdgate, M. W. (1979). *A perspective of environmental pollution*. Cambridge University Press. Recuperado de <https://doi.org/10.1017/S0376892900026989>
24. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM). (2024, agosto 23). Protocolo de modelación hidrológica e hidráulica. <https://www.ideam.gov.co/sala-de-prensa/informes/publicacion-vie-23082024-1200-1>
25. Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (1994). Tula de Allende, Estado de Hidalgo: Cuaderno estadístico municipal 1993. Dirección de Estadísticas Sectoriales, Estatales y Regionales. Recuperado de http://internet.contenidos.inegi.org.mx/contenidos/productos/prod_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/historicos/920/702825921941/702825921941_1.pdf
26. Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2009). *Generador de Cartas del Conjunto Nacional de Información Topográfica Escala 1:50 000*. <https://gaia.inegi.org.mx/app/geo2/generacarta50k/>
27. Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2010). *Compendio de información geográfica municipal 2010: Tula de Allende, Hidalgo*. https://www.inegi.org.mx/contenidos/app/mexicocifras/datos_geograficos/13/13076.pdf
28. Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2020). *Censo de Población y Vivienda 2020*. <https://www.inegi.org.mx/programas/ccpv/2020/>
29. Kefi, M., Kumar, B., Kuman, P., Masago, Y., & Fukushi, K. (2018). Assessment of tangible direct flood damage using a spatial analysis approach under the effects of climate change: Case study in an urban watershed in Hanoi, Vietnam. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 7(1), 29. <https://doi.org/10.3390/ijgi7010029>
30. Koks, E. E., Carrera, L., Jonkeren, O., Aerts, J. C. J. H., Husby, T. G., Thissen, M., Standardi, G., & Mysiak, J. (2016). Regional disaster impact analysis: Comparing input–output and computable general equilibrium models. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 16(8), 1911–1924. <https://doi.org/10.5194/nhess-16-1911-2016>
31. Ling, C., Li, J., Liu, Y., & Cai, Z. (2021). Extremal analysis of flooding risk and management. arXiv. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2112.00562>

32. Lozano Cortijo, O. (2008). Metodología para el análisis de vulnerabilidad y riesgo ante inundaciones y sismos de las edificaciones en centros urbanos. En Estrategia Internacional para la Reducción de Desastres (Ed.), La gestión del riesgo urbano en América Latina: Recopilación de artículos (pp. 59–85). Naciones Unidas. Recuperado de <https://www.eird.org/plataforma-tematica-riesgo-urbano/recopilacion-de-articulos/olga-lozano.pdf>
33. Morales-Novelo, J. A., Rodríguez-Tapia, L., & Humanitarian OpenStreetMap Team. (2019). Flood vulnerability index for coastal communities linked to mangrove forests based on the COASTMAP URABÁ project in Colombia. Recuperado de <https://media.ccc.de/v/bucharest-431-flood-vulnerability-index-for-coastal-communities-linked-to-mangrove-forests-based-on-the-coastmap-urab-project-in-colombia>
34. Moreno, A., Ramírez, J., & González, P. (2021). Evaluación de vulnerabilidad ante inundaciones en cuencas mexicanas. *Revista Mexicana de Ingeniería Civil*.
35. Morgado Y., Areu O., Silva R., Miyashita T., Mori N, & Tomeczek T. (2023). Using the SPRC methodology to assess tsunami risk in Zihuatanejo, Mexico, *Coastal Engineering Journal*, 65:2, 256-276. <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/21664250.2023.2172992>
36. Narayan, S., Beck, M. W., Wilson, P., Thomas, C. J., Guerrero, A., Shepard, C. C., & Reguero, B. G. (2012). The effectiveness, costs and coastal protection benefits of natural and nature-based defenses. <https://journals.plos.org/plosone/article/file?id=10.1371/journal.pone.0154735&type=printable>
37. Nicholls, R. J., & Brampton, A. H. (1998). Application of a source-pathway-receptor-consequence (S-P-R-C) methodology to the Teign Estuary, UK. *Ocean & Coastal Management*, 39(1–2), 13–30. <https://www.jstor.org/stable/26491075>
38. Ojeda Zújar, J. J., Álvarez Francoso, J. I., Martín Cajaraville, D., & Fraile Jurado, P. (2009). El uso de las tecnologías de la información geográfica para el cálculo del Índice de Vulnerabilidad Costera (IVC) ante una potencial subida del nivel del mar en la costa andaluza. *GeoFocus*, 9, 83–100. Recuperado de <https://www.redalyc.org/journal/943/94347938013/movil/>
39. Organización de los Estados Americanos (OEA). (2007). Documento de discusión: Análisis costo-beneficio: probando que invertir en reducción de vulnerabilidad en las Américas es una mejor opción. Encuentro Hemisférico, 11–12 de diciembre, Bogotá, Colombia. <https://www.oas.org/dsd/spanish/Desastresnaturales/Eventos/Assets/Encuentro%20-%20Doc%20Discusion%20v0.pdf>
40. Patankar, S. V. (1980). Numerical heat transfer and fluid flow. Hemisphere Publishing Corporation. <https://catatanstudi.wordpress.com/wp-content/uploads/2010/02/numerical-heat-transfer-and-fluid-flow.pdf>

41. Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD). (2015). Metodologías para la determinación de riesgos de desastres. Parte 1. Recuperado de <https://www.undp.org/es/cuba/publicaciones/metodologias-para-la-determinacion-de-riesgos-de-desastres-parte-1>
42. Ramsbottom, D., Wade, S., Bain, V., Floyd, P., Penning-Rowsell, E., Wilson, T., Fernández, A., & House, M. (2006). Flood Risks to People: Phase 2 – The Flood Risks to People Methodology (FD2321/TR1). Department for Environment, Food and Rural Affairs; Environment Agency. https://assets.publishing.service.gov.uk/media/602bbc768fa8f50383c41f80/Flood_risks_to_people_-_Phase_2_The_flood_risks_to_people_methodology_technical_report.pdf
43. Ríos Saldaña, C. A., Martínez Tovar, C., Maldonado Pesina, E., & Galarza Sosa, O. M. (2023). Los estudios de peligro, vulnerabilidad y riesgo tecnológicos por el manejo de sustancias químicas peligrosas: su papel en la gestión de riesgos de desastres. Cuba: Medio Ambiente y Desarrollo, 23. Recuperado de <https://cmad.ama.cu/index.php/cmad/article/view/253/527>
44. Rodríguez Varela, J. M., Alcocer Yamanaka, V. H., Albornoz Góngora, P. M., Llaguno Guilberto, O. J., & Maldonado Silvestre, J. (2014). Mapas de riesgo en zonas urbanas. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. <https://www.imta.gob.mx/images/pdf/articulos/MAPAS-DE-RIESGO-EN-ZONAS-URBANAS.pdf>
45. Rohrbeck, C., & Cooley, D. (2023). Simulating flood event sets using extremal principal components. The Annals of Applied Statistics, 17(2), 1333–1352. <https://doi.org/10.1214/22-AOAS1672>
46. Samuels, P., Klijn, F., & Dijkman, J. (2006). An analysis of the current practice of policies on river flood risk management in different countries. Irrigation and Drainage, 55(S1), S141–S150. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/ird.257>
47. Sánchez Lozano, J. L. (2017). Modelación hidrológica e hidráulica acoplada de la cuenca media y baja del río Magdalena [Tesis de maestría, Universidad Nacional de Colombia]. Repositorio Institucional UNAL. <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/63017>
48. Sánchez Ortiz, J. L., & Perea Carabali, L. O. (2024). Análisis Multicriterio del Riesgo de Inundación en el Municipio de Sucre para el Ordenamiento Agroambiental del Territorio. Universidad Nacional Abierta y a Distancia (UNAD). <https://repositorio.unad.edu.co/bitstream/handle/10596/66491/jlsnchezo.pdf?sequence=1>
49. Sanz-Ramos, M., Cea, L., Bladé, E., López, D., Sañudo, E., Corestein, G., García-Alén, G., & Aragón, J. L. (2022). Iber v3: Manual de referencia e interfaz de usuario de las nuevas implementaciones. Barcelona: International Centre for Numerical Methods in Engineering (CIMNE). <https://doi.org/10.23967/iber.2022.01>

50. Sayers, P. B., B. Gouldby, J. D. Simm, P. J. Hawkes, D. M. Ramsbottom, I. C. Meadowcroft, and J. W. Hall. (2002). Risk, Performance and Uncertainty in Flood and Coastal Defence-A Review. https://assets.publishing.service.gov.uk/media/6026918ee90e070552b334e3/Risk_performance_and_uncertainty_in_flood_and_coastal_defence_-_A_Review_Re-release_technical_report.pdf
51. Secretaría de Economía. (2025). Tula: Economía, empleo, equidad, calidad de vida, educación, salud y seguridad pública. DataMéxico. <https://www.economia.gob.mx/datamexico/es/profile/geo/tula-991302>
52. Sener, S., Sener, E., Karagüzel, R., & Karagüzel, R. (2015). A flood vulnerability index for coastal cities and its use in assessing climate change impacts. *Natural Hazards*, 76(1), 1–19. <https://link.springer.com/article/10.1007/s11069-012-0234-1>
53. Stedinger, J. R., Vogel, R. M., & Foufoula-Georgiou, E. (1993). Frequency analysis of extreme events. En D. R. Maidment (Ed.), *Handbook of Hydrology* (Cap. 18). McGraw-Hill.
54. Teng, J., Jakeman, A. J., Vaze, J., Croke, B. F. W., Dutta, D., & Kim, S. (2017). Flood inundation modelling: A review of methods, recent advances and uncertainty analysis. *Environmental Modelling & Software*. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1364815216310040>
55. Tucci, C. E. M. (2004). Inundaciones urbanas.
56. Versteeg, H. K., & Malalasekera, W. (2007). *An Introduction to Computational Fluid Dynamics: The Finite Volume Method*. Pearson Education. https://ia801605.us.archive.org/20/items/AnIntroductionToComputationalFluidDynamics/An_introduction_to_computational_fluid_dynamics.pdf
57. White, F. M. (2008). *Fluid Mechanics* (6^a ed.). McGraw-Hill Higher Education. https://www.academia.edu/37398208/Mec%C3%A1nica_de_Fluidos_Frank_M_White?auto=download
58. Wright, D. B. (2016). *Métodos de evaluación de riesgos y amenazas de inundación* (Nota técnica). Grupo Banco Mundial.
59. Yavuz, C., E. Kentel, & M. Aral. (2020). “Tsunami Risk Assessment: Economic, Environmental and Social Dimensions.” *Natural Hazards* 104: 1413–1442. <https://link.springer.com/article/10.1007/s11069-020-04226-y>