Ciencia Nicolaita 91: 33-43; Agosto de 2024 doi:10.35830/cn.vi91.762

Evolución histórica del análisis de peligro por inundaciones en el municipio de León, Guanajuato (2006 - 2018)

Historical evolution of flood hazard analysis in the municipality of León, Guanajuato (2006 - 2018)

Norma Claudia Calderón Rosas*, José de Jesús Esparza Claudio

CIATEC, A.C., Omega 201, Industrial Delta, León, Guanajuato. Tel.:477 710 00 11, Ext. 15303, Ext. 15300

Historial
Manuscrito recibido: 1 de diciembre de 2023
Manuscrito aceptado: 23 de mayo de 2024
Manuscrito publicado: agosto 2024

***Autor para correspondencia**
Norma Claudia Calderón Rosas
e-mail: ncalderon@ciatec.mx

Resumen

La cronología de desastres por inundaciones en León data desde el siglo XVII. Dicho componente ha sido descrito en los atlas de riesgos de 2006, 2010 y 2018. El presente trabajo describe la evolución histórica del peligro por inundaciones en cada atlas. Se comparan los capítulos del componente desarrollado bajo las metodologías vigentes para cada versión. Los resultados muestran que la información climatológica e hidrológica fueron cruciales en la calibración de modelaciones (1D y 2D) en HEC-RAS. Sin embargo, la constante actualización de información topográfica de precisión es transcendental en las modelaciones 2D para determinar llanuras de inundación, y con ello, desarrollar la vulnerabilidad y riesgo del componente.

Palabras clave: peligro, inundaciones, atlas de riesgos, municipio de León.

Abstract

The chronology of flood disasters in León dates back to the 17th century. This component has been described in the 2006, 2010 and 2018 risk atlases. This paper describes the historical evolution of the flood hazard in each atlas. The chapters of the component developed under the current methodologies for each version are compared. The results show that climatological and hydrological information were crucial in the calibration of modeling (1D and 2D) in HEC-RAS. However, the constant updating of accurate topographic information is transcendental in the 2D modeling to determine flood plains, and thus develop the vulnerability and risk of the component.

Keywords: hazard, floods, risk atlas, municipality of León.

Introducción

De todos los fenómenos naturales que ocurren en el planeta, las inundaciones son consideradas como el fenómeno más dañino en cuanto a personas afectadas (Capacci y Mangano, 2015), como se observa en la **Tabla 1.**

La cantidad de eventos por inundaciones ha crecido vertiginosamente, así como de manera puntual en áreas urbanas donde se presentan impactos negativos dentro de los sectores social, de servicios, económico y financiero, dejando vulnerables principalmente a la población de escasos recursos. De acuerdo a las cifras tanto del Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED) como del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), cerca del 41% del territorio nacional se encuentra expuesto a fenómenos hidrometeorológicos (Alcocer-Yamanaka *et al.,* 2016).

En el periodo 2000-2023, se registraron 1,140 declaratorias de emergencia, desastre y/o contingencia climatológica por inundaciones en todo el territorio nacional, afectando principalmente a los estados de Veracruz, Tabasco y Chihuahua; el estado de Guanajuato se posicionó en el lugar número 16 dentro del periodo mencionado con 12 declaratorias, como se puede observar en la **Figura 1**.

Copyright © Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo • ISSN 2007-7068

Tabla 1. Impacto humano por tipo de desastres (promedio 1992-2021 versus año 2022).

Defunciones		Fenómeno ocurrido		Personas afectadas	
1992-2021	2022			1992-2021	2022
83	76		Incendio forestal	0.6	2
109	6		Actividad volcánica	0.2	1
8,788	1,582		Tormenta	32M	17M
6,740	8,038		Inundación	96M	58M
876	403		Deslizamiento de ladera	0.2	0.1
6,040	16,416		Temperatura extrema	4M	0.08
26,074	1,626		Sismo	5M	4M

Adaptado de Emergency Events Database EM-DAT (https://www.emdat.be/).

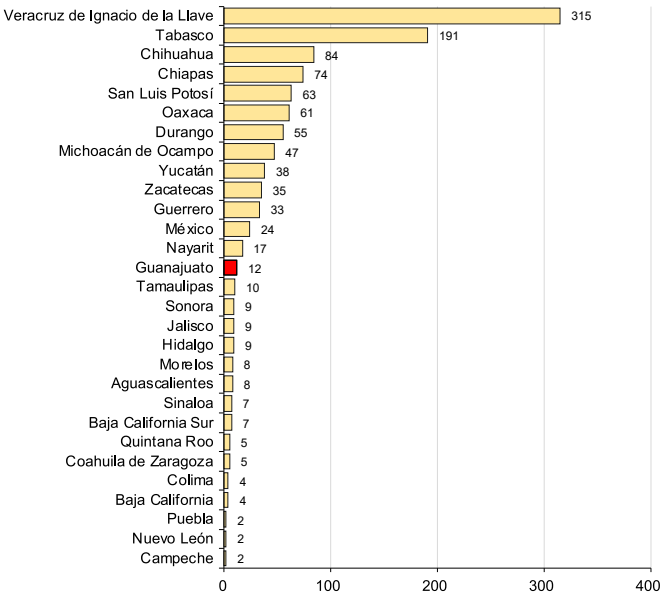

Figura 1. Declaratorias de emergencia en México por inundaciones dentro del periodo 2000 y 2023 (CENAPRED, 2023).

El municipio de León se encuentra ubicado al noroeste del estado de Guanajuato; la primera urbe se estableció en la zona del valle, o Bajío Guanajuatense, alrededor del año 1580, sin embargo, su mayor crecimiento se da en la década de 1980, ya que, por su ubicación geográfica, se empieza a consolidar como polo comercial a nivel nacional. De acuerdo a datos cartográficos, ha incrementado su superficie en un 90% (en 1993 el área urbana era de 12 mil 148 ha y en 2019 de 23 mil 083 ha), (IMPLAN, Instituto Municipal de Planeación, 2020). Dicho crecimiento ha sido hacia el norponiente y oriente de la ciudad principalmente (**Figura 2**).

En cuanto a su topografía e hidrografía, en el municipio se distinguen tres zonas (**Figura 3**):

Zona 1: al norte del municipio, dominada por serranía con relieve accidentado y, por ende, con un gran número de arroyos tributarios con dirección NE-SW principalmente, mismos que desembocan hacia presas como El Palote, Media Luna, Ojo de Agua de Reyes, Echeveste, entre otras; esta característica ha frenado el crecimiento urbano por la identificación de zonas con problemática de deslizamiento de laderas.

Zona 2: ubicada al centro y dominada por llanuras y lomeríos bajos, comprende la mancha urbana, así como las principales corrientes de agua provenientes de la serranía, como el Río de Los Gómez, el cual corre desde la salida de la Presa El Palote hacia la zona centro y posteriormente hacia el poniente de la zona urbana (**Figura 3**). A su paso, capta los escurrimientos de otras corrientes como son: Granizo, Penitente, El Muerto, Ejido, Alfaro, Las Liebres, La Tinaja, Timoteo Lozano, Chichihuas, Mariches, Las Joyas, Hondo, entre otros.

Zona 3: al sur del municipio, dominada por planicies las cuales, actualmente, conservan su vocación agrícola con la identificación de algunas corrientes (Tajo de Santa Ana, Los Tepetates, Canal Santa Rosa, entre otros), así como una gran cantidad de canales de riesgo; esta zona también se caracteriza

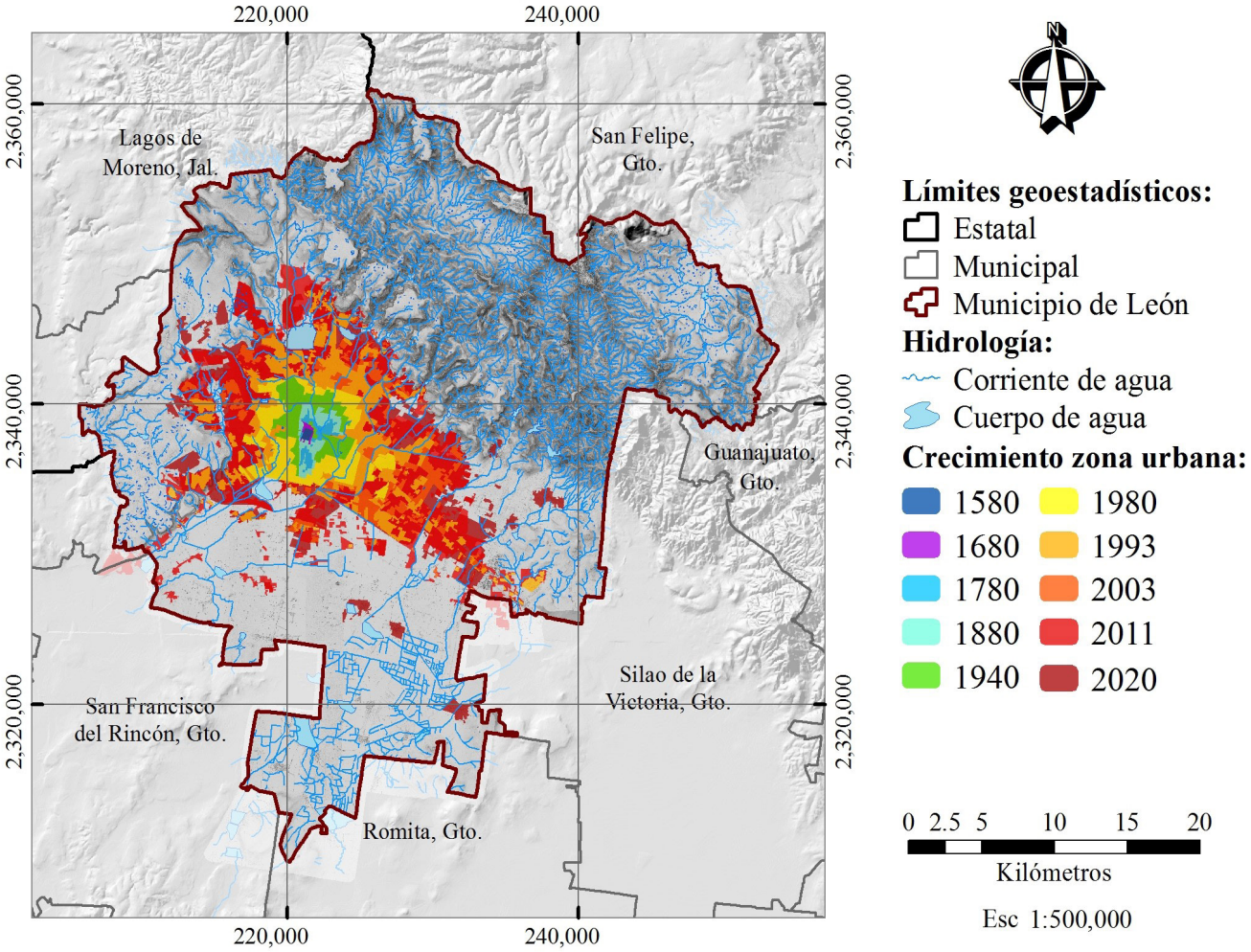

Figura 2. Crecimiento de la zona urbana del municipio de León, de 1580 al 2020. Figura elaborada con datos geoespaciales de INEGI, 2020.

por presentar problemática de subsidencia dada la sobreexplotación de los acuíferos por la actividad agrícola.

Dentro de la cronología de desastres ocurridos en el municipio de León destacan las inundaciones, muchas de ellas acontecidas anualmente y un buen número no tan continuas pero significativas por los daños provocados (**Tabla 2**).

Las causas de los mencionados desastres se repetían con frecuencia: precipitaciones pluviales de exagerada abundancia, descuido en la atención preventiva en desazolve de arroyos y del Río de Señora o de Los Gómez (corriente de agua que atraviesa la zona urbana del municipio), el que casi siempre en temporada de lluvias derramaba sus aguas (Navarro Valtierra, 2010).

De acuerdo a los indicadores municipales de peligro (CENAPRED, 2023), la totalidad del territorio de León está catalogado con peligro alto en cuanto a inundaciones (**Figura 4**); por otro lado, la Coordinación Estatal de Protección Civil de Guanajuato, en su portal geográfico, menciona la existencia de algunos polígonos (cercanos a

Tabla 2. Inundaciones históricas ocurridas en el municipio de León, Guanajuato.

Siglo	Año de ocurrencia
XVII	1637, 1649
XVIII	1749, 1762
XIX	1803, 1865, 1888
XX	1911, 1926, 1971, 1973 y 1998

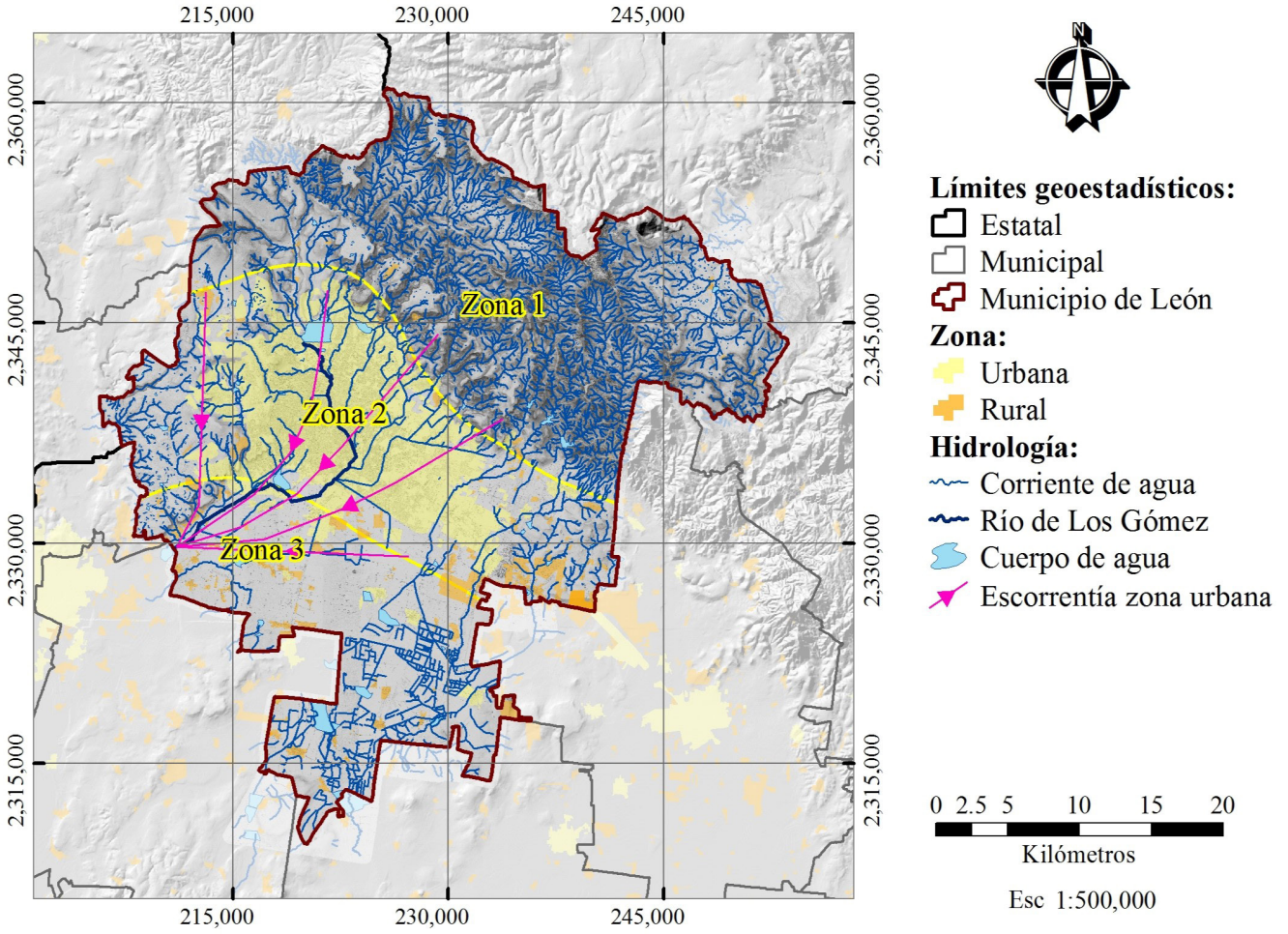

Figura 3. Descripción topográfica e hidrográfica del municipio de León. Figura elaborada con datos geoespaciales de INEGI, 2020.

presas) e infraestructura hidráulica (**Figura 5**) con problemática de inundaciones fluviales (SSPG, 2023).

No obstante, los atlas de riesgos del municipio de León, en sus versiones 2006, 2011 y 2018, fueron desarrollados bajo metodologías de análisis vigentes en su respectivo año, con el objetivo de identificar y clasificar puntualmente las zonas de peligro por inundaciones fluviales bajo los niveles de peligro muy bajo, bajo, medio, alto y muy alto. El primer esbozo, en cuanto a la gestión de riesgos del municipio, se desarrolló en el año 2002; en dicho documento únicamente se identificaron componentes naturales y antropogénicos. En el atlas de riesgos del año 2006, dentro del fenómeno hidrometeorológico, se desarrolló el componente de inundaciones de acuerdo a las metodologías de CENAPRED. Posteriormente, en el documento del atlas del año 2010, se desarrolla el componente con las metodologías de SEDESOL, y finalmente en la actualización en 2018, con las metodologías vigentes de CENAPRED.

Bajo este contexto histórico, el presente trabajo describe la evolución metodológica de peligro por inundaciones fluviales, el cual parte desde la integración de información climatológica, hidrológica y topográfica para la calibración de modelaciones en una dimensión con el fin de determinar zonas de peligro adyacentes a los cauces de los principales arroyos en la zona urbana del municipio de León (IMPLAN, 2006), hasta el uso de información lídar, o topografía de alta resolución con el mismo fin pero ahora en modelaciones en dos dimensiones, y la obtención de llanuras de inundación más puntua-

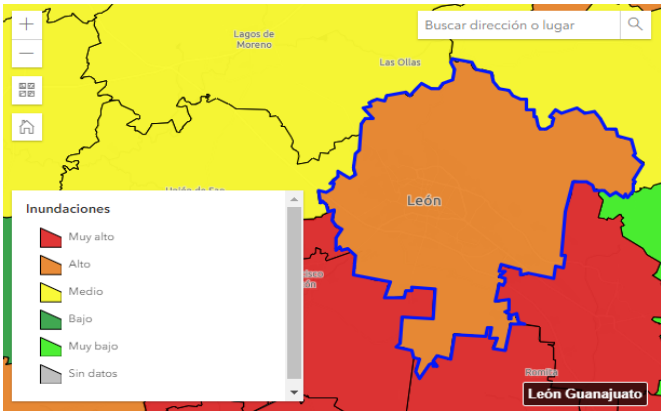

Figura 4. Clasificación de peligro por fenómeno para el municipio de León (CENAPRED, 2023).

Figura 5. Identificación de zonas con problemática de inundaciones fluviales en el municipio de León (SSPG, 2023).

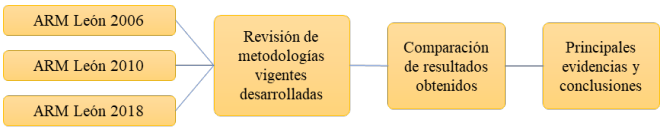

Figura 6. Metodología utilizada.

les de acuerdo a la integración de un modelo digital de elevación de precisión.

Materiales y métodos

La metodología aplicada para el presente trabajo corresponde al análisis de los capítulos relativos al componente de inundaciones para las versiones de los atlas 2006, 2010 y 2018, como se muestra en la **Figura 6.**

En la **Tabla 3**, se mencionan las metodologías desarrolladas para el componente de inundaciones fluviales de acuerdo a cada versión del atlas. De manera evolutiva, se resalta la mejora en cuanto a la disposición de información topográfica, desde el uso de los primeros modelos digitales de elevación elaborados por INEGI, hasta la disponibilidad de información tipo lídar, así como los avances tecnológicos en cuanto al software utilizado llamado HEC-RAS (Hydrological Engineering Center – River Analysis System), el cual es un programa de modelación hidráulica para flujo en régimen permanente y no permanente en cauces naturales o canales artificiales, y cuyo objetivo es determinar las posibles zonas inundables (HEC, 2023); dicho programa se ha mantenido en constate actualización desde su creación en el año 1968, con la versión 0, hasta la versión actual 6.5.

En cambio, en el tema relativo a datos del clima, en palabras de Landa *et al.* (2017), "se tienen aún serias limitaciones para producir información de calidad. Muchas de las herramientas de predicción del tiempo y clima que se emplean en la toma de decisiones carecen de elementos científicamente sustentados".

Resultados

En la versión del atlas de riesgos 2006, en el apartado de inundaciones fluviales se desarrollaron los siguientes puntos:

Tabla 3. Metodología desarrollada para el componente de inundaciones fluviales por versión.

Versión	Metodología	Fuente
2006	Guía Básica para la Elaboración de Atlas Estatales y Municipales de Peligros y Riesgos	(CENAPRED, Archivos, 2006)
2010	Bases para la Estandarización en la Elaboración de Atlas de Riesgos y Catálogo de Datos Geográficos para Representar el Riesgo	(SEDESOL, 2010)
2018	Guía de contenido mínimo para la elaboración del Atlas Nacional de Riesgos	(CENAPRED, 2016)

- Compilación, análisis y síntesis de la información hidrometeorológica disponible para el municipio de León.
- Revisión y corrección en su caso de las limitaciones de las microcuencas en el municipio de León.
- Clasificación de los ríos del municipio de León de acuerdo al orden de corrientes y criterios establecidos por CENAPRED.
- Cálculo de los gastos hidráulicos por cuenca para períodos de retorno de 50, 100, 500 y 1,000 años.
- Elaboración de mapas referentes a peligros por inundaciones.

Bajo este contexto, a continuación, se presenta la modelación del arroyo El Muerto, el cual nace en la parte noreste del municipio hasta su confluencia con el Río de Los Gómez (corriente principal del municipio de León). El mapa fue elaborado con base en la información topográfica disponible en su momento, levantamientos topográficos en las estructuras hidráulicas con problemática de desbordamiento y los cálculos hidráulicos con la información disponible (**Figura 7**). Si bien se observan los niveles de peligro (alto, medio y bajo) la configura-

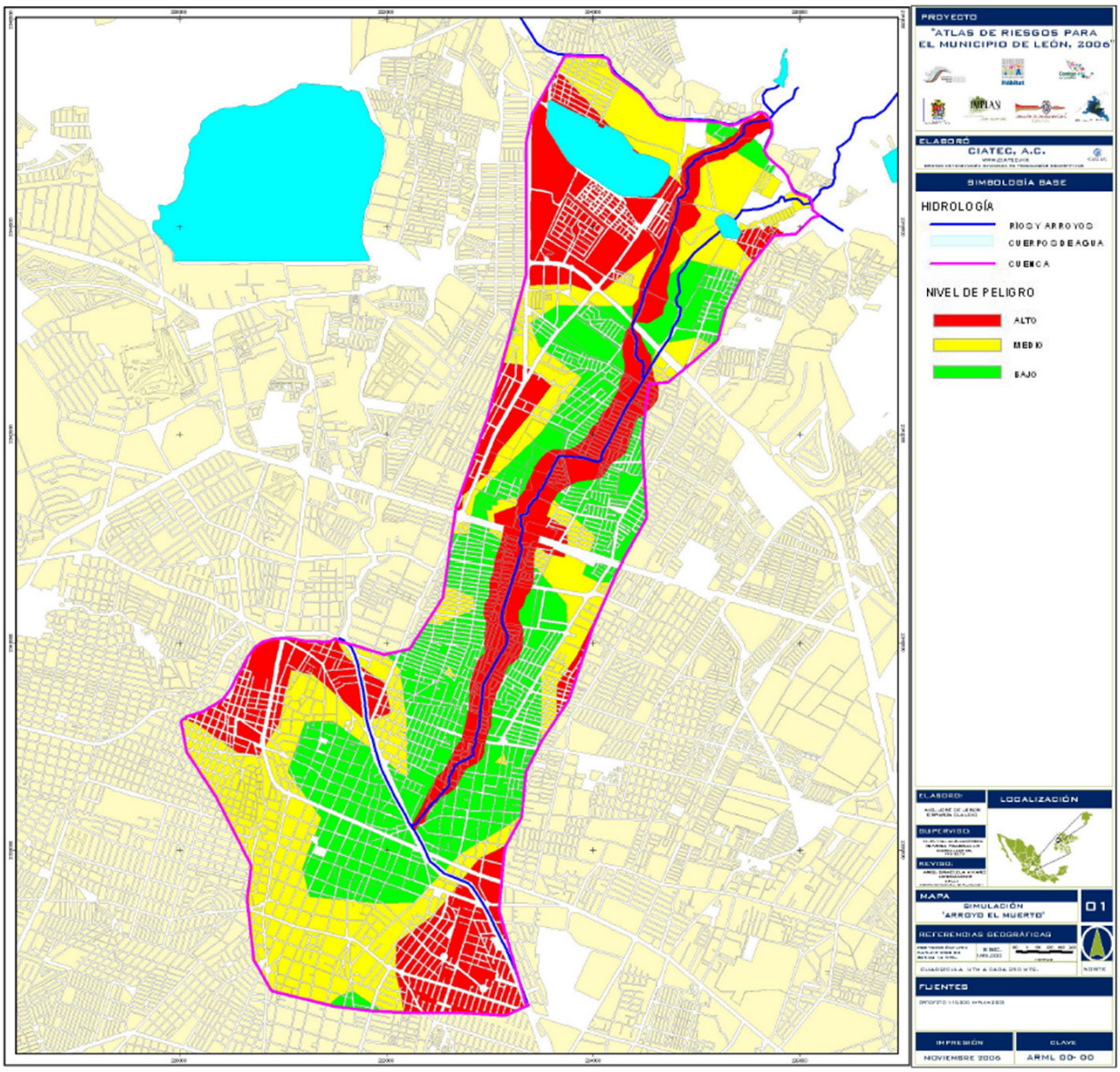

Figura 7. Simulación del arroyo El Muerto (IMPLAN, 2006).

ción de los polígonos obedece a límites establecidos por las dimensiones de las manzanas (nivel medio y bajo), y en lo que respecta a las márgenes de los ríos, la delimitación obedece a una primera calibración de simulación en una dimensión bajo el uso del programa HEC-RAS, el cual resulta ser adecuado para el estudio de flujos con un marcado carácter unidimensional, utilizándose básicamente para la modelización de ríos y canales en los cuales la geometría se puede definir por una línea o cauce longitudinal con una sección transversal asociada en cada punto a través del seccionamiento topográfico.

En la versión del atlas de riesgos 2010, en el apartado de inundaciones fluviales se integró la nueva delimitación de la zona urbana, así como la modelación de más arroyos como lo fueron Los Castillos, El Salto, Sardeneta, El Ejido, Granizo, Hondo, Las Joyas, La Patiña, El Hueso, Las Liebres, Magisterial, Los Naranjos, Otates, entre otros. De cada uno de éstos se presentaron los cálculo y modelaciones en una dimensión (**Figuras 8** y **9**), con el propósito de actualizar el mapa de peligro por inundaciones. Para la calibración de este modelo, se utilizó información topográfica proveniente de un modelo digital de elevación con una resolución a 5 metros, por lo que se complementó su análisis con levantamientos topográficos en puntos clasificados con problemáticas de desbordamiento; estos levantamientos se realizaron 500 metros aguas arriba y aguas abajo de estructuras hidráulicas.

Finalmente, en la versión 2018 del atlas de riesgos del municipio de León, se contó con información tipo lídar (formado por nubes de puntos clasificados) de toda la zona urbana, con la cual se logró simular a una mejor resolución el comportamiento hidráulico de los arroyos Alfaro (**Figura 10a**), Hondo (**Figura 10b**), Las Liebres (**Figura 10c**), El Muerto (**Figura 10d**), canal Timoteo Lozano (**Figura 10e**) y Magisterial (**Figura 10f**), todos ellos ubicados en la zona geotécnica del Valle de León, es decir zona de baja pendiente y, por ende, propensa a la ocurrencia de inundaciones.

La mayor ventaja de la modelación en 2D es que a partir de una malla generada desde información de Modelos Digitales de Elevaciones del Terreno (MDT), se logra estudiar celda por celda qué ocurre y cómo se comporta el flujo en ella, es decir, hacia dónde se dirige. La mayor desventaja ocurrida

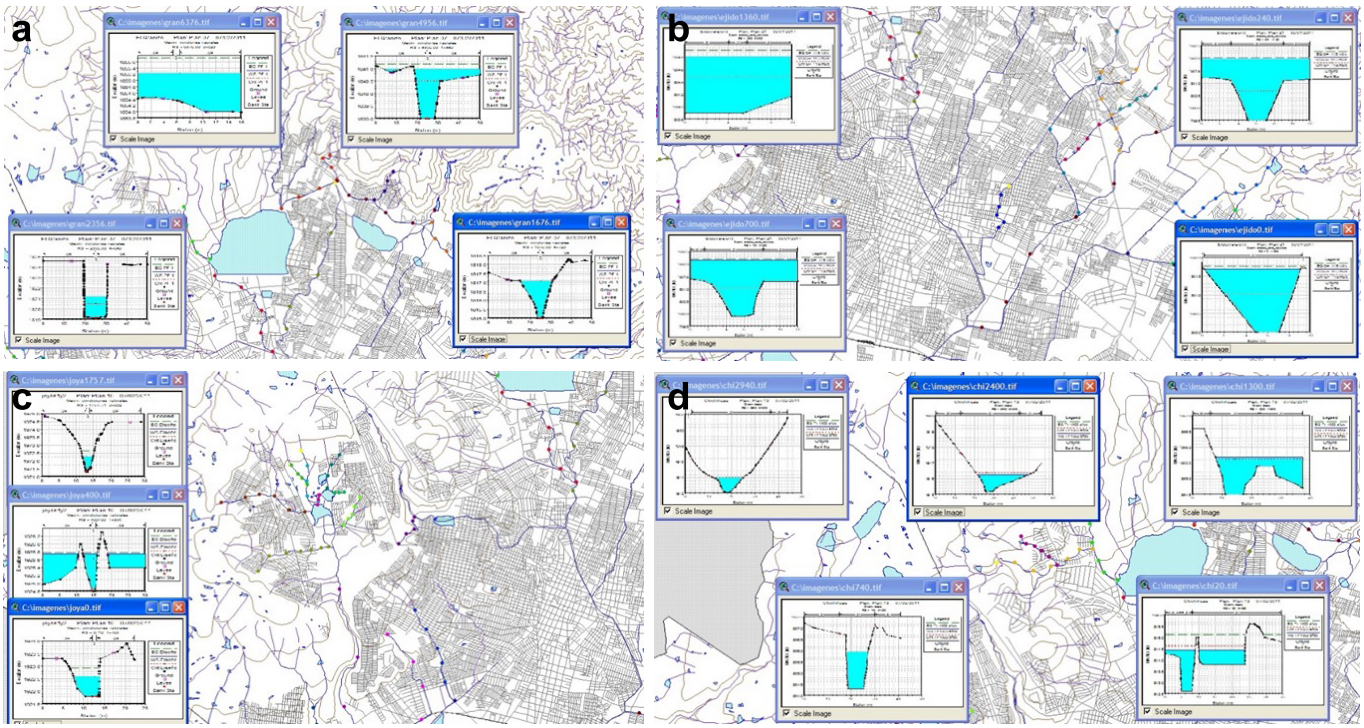

Figura 8. Simulación de secciones de arroyos para el atlas 2010. **a)** Sardaneta, **b)** Magisterial, **c)** Las Joyas, **d)** La Patiña (IMPLAN, Actualización del Atlas de Riesgos del municipio de León 2010).

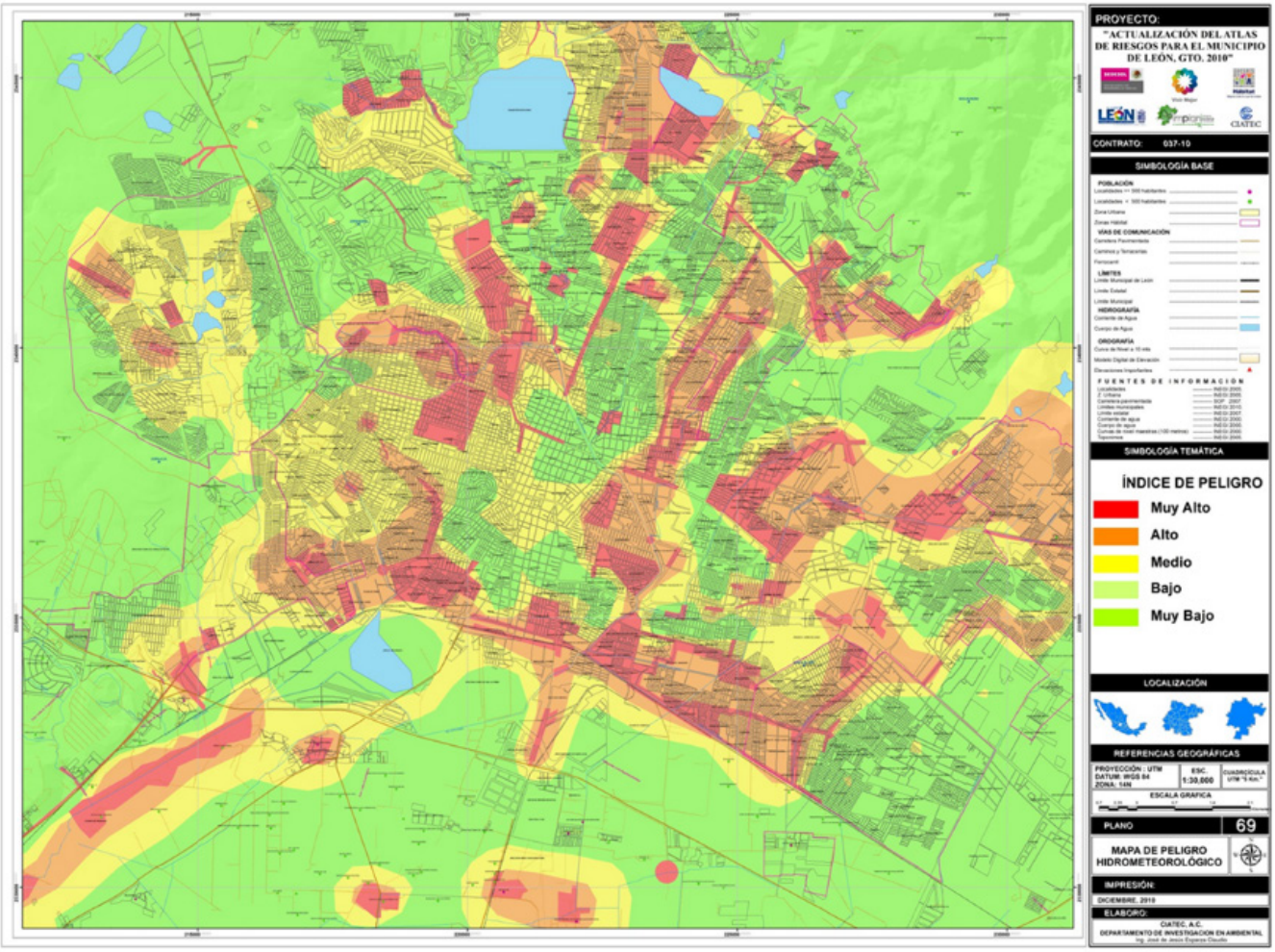

Figura 9. Mapa de peligro hidrometeorológico para el atlas 2010 (IMPLAN, Actualización del Atlas de Riesgos del municipio de León 2010).

durante la modelación en este atlas fue la capacidad de procesamiento por el programa utilizado, el cual puede tardar horas, incluso días, ello debido al detalle de la información topográfica y los datos hidrológicos e hidrométricos suministrados.

Adicionalmente, se elaboró un mapa de peligro con las modelaciones, así como datos proporcionados por el organismo operador de agua del municipio, y el propio IMPLAN (**Figura 11**). Si bien en este mapa la superficie con clasificación de peligro alto es menor a la versión del atlas 2010, los polígonos fueron obtenidos con apego a datos topográficos más reales.

Conclusiones

El uso de sistemas de información geográfica ha sido indispensable en la gestión de riesgos por su capacidad de visualización y procesamiento de fenómenos espaciales, los cuales en conjunto con la evolución de las versiones del programa HEC-RAS, posibilitan la generación de información relevante en etapas tempranas de prevención de riesgos, planificación y ordenamiento territorial a nivel urbano.

En la modelación de ríos puede ser necesario recurrir a un modelo 2D cuando existen meandros fuertes con llanuras de inundación importantes. En dichas geometrías, para el cálculo de aguas bajas se puede utilizar un modelo 1D, pero para el caudal de avenida la dirección del flujo deja de seguir el cauce principal, inundando las llanuras adyacentes para circular por el cauce de aguas altas, mucho más rectilíneo y ancho que el cauce principal.

Otro caso en el que se debe recurrir a la

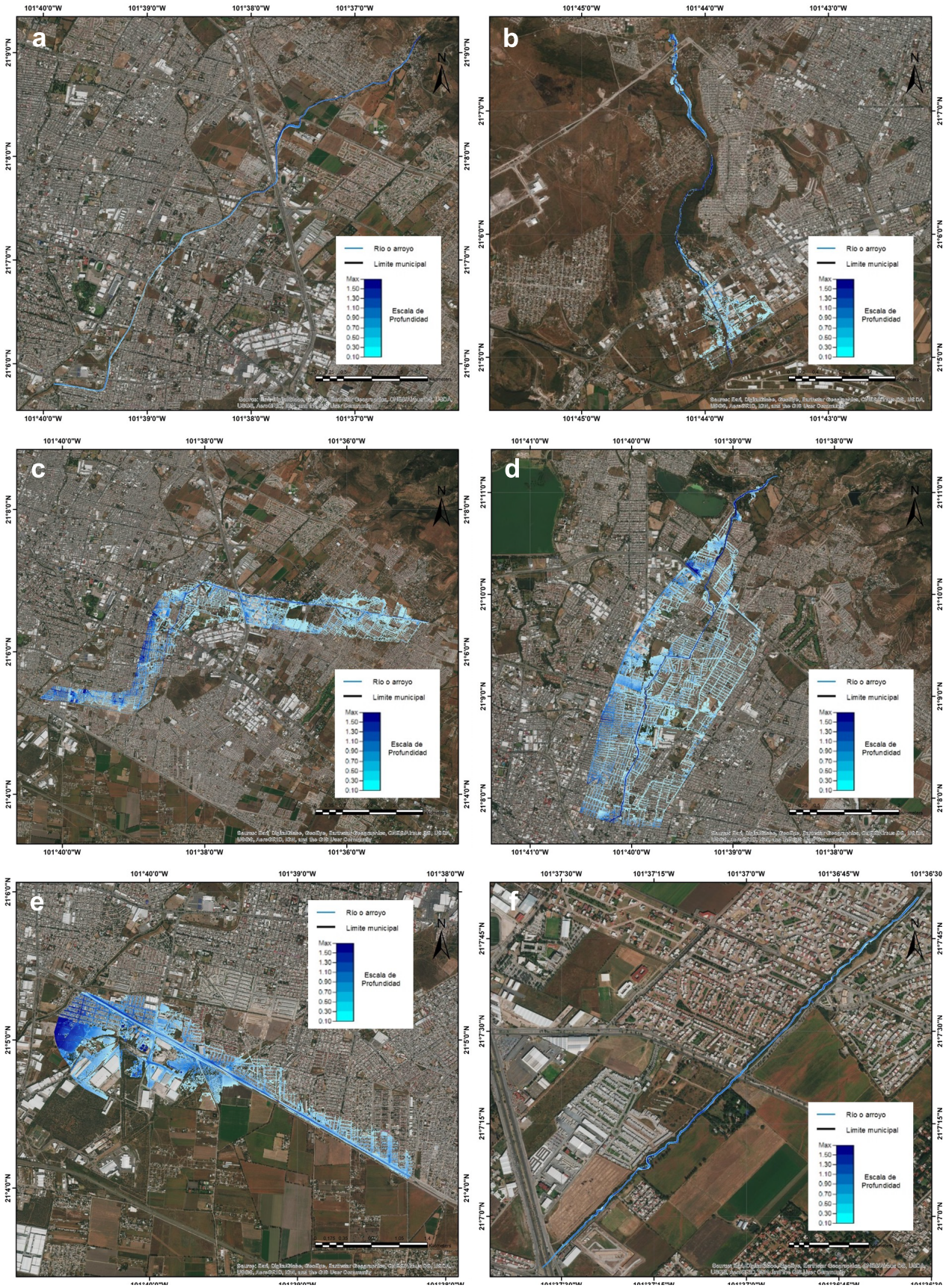

Figura 10. Modelación del comportamiento hidráulico del **a)** arroyo Alfaro, **b)** arroyo Hondo, **c)** arroyo Las Liebres, **d)** arroyo El Muerto, **e)** canal Timoteo Lozano, **f)** arroyo Magisterial, ubicados en la zona geotécnica del Valle de León.

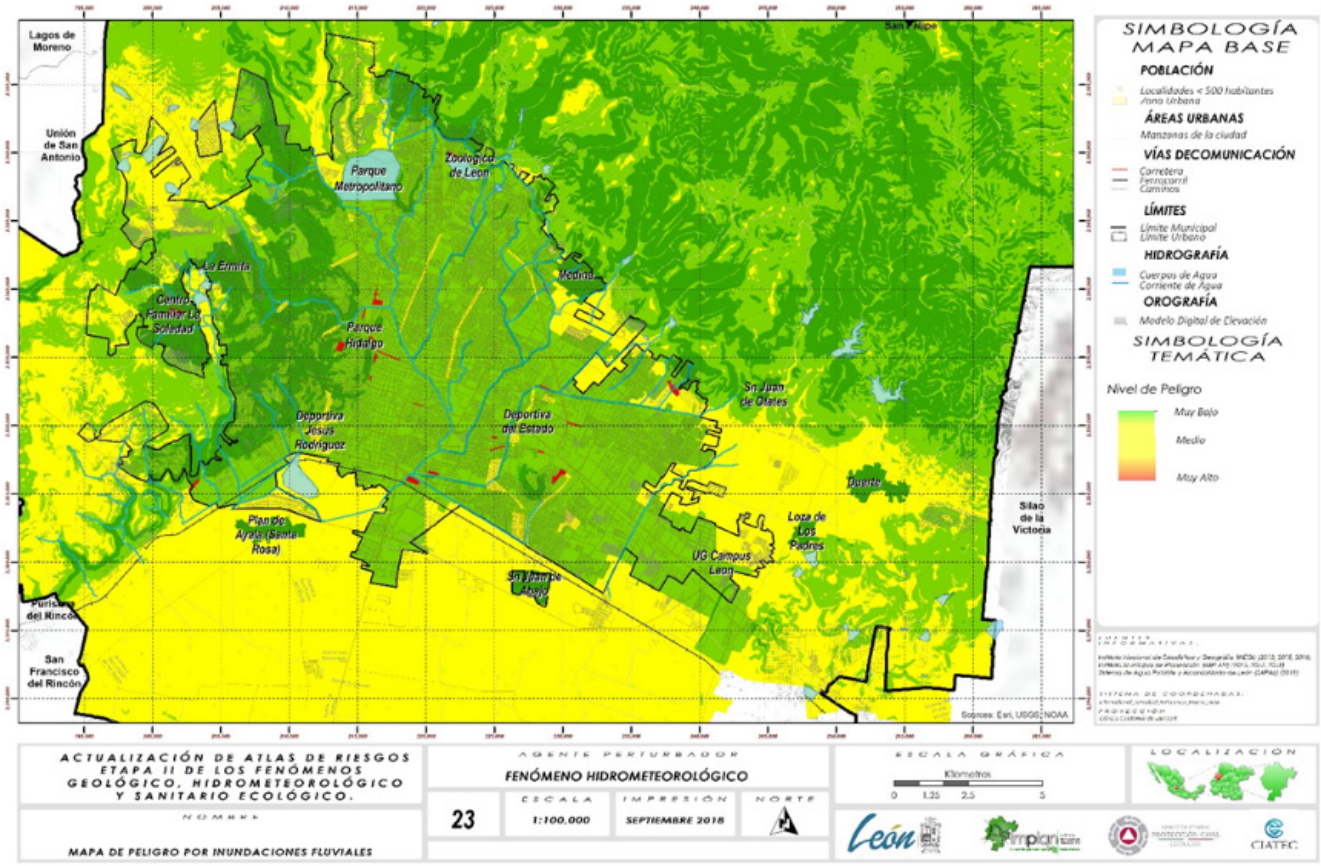

Figura 11. Mapa de peligro por inundaciones versión 2018 (IMPLAN, 2018).

modelización bidimensional en ríos es en el estudio de tramos cortos en los que existen ensanchamientos y estrechamientos de sección que pueden provocar, en función de las condiciones de caudal, zonas de recirculación importantes, que también suelen aparecer para determinadas condiciones de marea en la desembocadura de ríos en estuarios, y que reducen la sección efectiva de desagüe, provocando un aumento de velocidad en el resto de la sección.

Hasta no hace mucho, en general se trabajaba sólo con modelos 1D. Afortunadamente, la implementación y desarrollo de computadoras con procesadores cada vez más potentes han empezado a hacer posible que se extienda el desarrollo y uso de software en modelización hidráulica 2D, sin embargo, ello implica invertir en equipo que soporten dichos procesos.

Finalmente, el avance tecnológico en cuanto a la recopilación de datos topográficos de precisión, ha logrado que el análisis de riesgos sea cada vez más puntual en cuanto a la determinación de zonas de peligro, y nos solamente en el tema hidrometeorológico, sino también para los fenómenos antropogénicos. Prueba de ello, son la identificación de las llanuras de inundación para diferentes periodos de retorno de manera puntual, como se observa en los mapas anteriores. Si bien los modelos 1D son ampliamente usados y dan resultados precisos en el cauce principal del río, son menos exactos para modelar el flujo de desbordamiento sobre las márgenes hacia las planicies adyacentes; en contraste los modelos 2D son la tecnología de punta para la modelación de inundaciones, sin embargo, estos modelos tienen la desventaja de que su aplicación está limitada por los altos requerimientos de datos, hardware y software.

A manera de resumen, los resultados obtenidos para el atlas del 2006 y 2010 son producto de simulaciones con la limitante en cuanto a disposición de información topográfica de precisión para la

construcción de modelos digitales de elevación (MDE), así como de superficie (MDS), lo cual afecta en la simulación de las zonas de desborde y llanuras de inundación. En el tema de calibración de modelos en HEC-RAS, las 3 versiones de los atlas de riesgos (2006, 2010 y 2018), aun presentan limitantes por la calidad y continuidad histórica de las bases de datos climatológicos, hidrométricos e hidrológicos en el área de estudio, así como la constante actualización de información vectorial relativa al uso de suelo con el fin de identificar los coeficientes de escurrimiento a escalas precisas.

Agradecimientos

Agradecemos la confianza del Instituto de Planeación del municipio de León (IMPLAN), quienes desde 2006 han permitido a CIATEC, A.C., colaborar en materia riesgos con el desarrollo y actualización de los atlas de riesgos.

Referencias

Alcocer-Yamanaka VH, Rodríguez-Varela JM, Bourguett-Ortiz VJ, Llaguno-Guilberto OJ, Albornoz-Góngora PM (2016). Metodología para la generación de mapas de riesgo por inundación en zonas urbanas. *Tecnología y Ciencias del Agua* 7(5):33-55.

Capacci A, Mangano S (2015). Las catástrofes naturales. *Cuadernos de Geografía: Revista Colombiana de Geografía* 24(2):35-51. doi:10.15446/rcdg.v24n2.50206

CENAPRED. (1 de Noviembre de 2006). *Archivos*. Recuperado el 1 de Agosto de 2023, de Documentos: http://www.atlasnacionalderiesgos.gob.mx/archivo/material_apoyo.html

CENAPRED (1 de Diciembre de 2016). Recuperado el 11 de Mayo de 2023, de http://www.atlasnacionalderiesgos.gob.mx/archivo/descargas.html

CENAPRED (20 de Junio de 2023). Obtenido de http://www.atlasnacionalderiesgos.gob.mx/portal/Apps/Municipios/

Navarro Valtierra CA (2010). Llegar a ser. Monografía del Municipio de León. *Gobierno del Estado de Guanajuato*.

HEC (20 de 08 de 2023). *U.S. Army Corps of Engineers Hydrologic Engineering Center*. Obtenido de HEC-RAS: https://www.hec.usace.army.mil/software/hec-ras/

IMPLAN (2006). Obtenido de http://rmgir.proyectomesoamerica.org/PDFMunicipales/HABITAT/vr_Atlas_leon.pdf

IMPLAN (2010). *Actualización del Atlas de Riesgos del municipio de León 2010.* León: IMPLAN. Obtenido de https://dga-ssp.guanajuato.gob.mx/atlas/atlas%20elab%20municipios/Atlas%20de%20Riesgos%20Leon/02%20CAPITULOS%201%20a%206.pdf

IMPLAN (2018). Obtenido de https://www.implan.gob.mx/pdf/estudios/resiliencia/Atlasde-riesgo-del-Municipio-leon-2018.pdf

IMPLAN (11 de Mayo de 2020). *Instituto Municipal de Planeación*. Obtenido de Estudios: https://www.implan.gob.mx/pdf/estudios/cambios/Indice-de-Biodiversidad-Urbana-de-la-ciudad-de-Leon.pdf

INEGI (20 de 04 de 2020). *INEGI*. Obtenido de Medio Ambiente: https://www.inegi.org.mx/temas/mg/

Landa R, Magaña V, Neri C (Febrero de 2017). *UNAM.* Obtenido de Centro de Ciencias de la Atmósfera: https://www.atmosfera.unam.mx/wp-content/uploads/2017/12/agua-y-clima.pdf

SEDESOL (20 de Septiembre de 2010). *Gobierno de México.* Recuperado el 11 de Mayo de 2023, de Documentos: https://es.scribd.com/document/51775401/Base-Estandarizacion-Atlas-Riesgos-SEDESOL

SSPG (20 de 09 de 2023). *Coordinación Estatal de Protección Civil*. Obtenido de Atlas Estatal de Riesgos del Estado de Guanajuato: https://experience.arcgis.com/experience/1baeec9e3b454ad689787ae2b7dceec2/