

Ciencia Nicolaita 90

ISSN: 2007-7068



Universidad
Michoacana
de San Nicolás
de Hidalgo

Revisión hidráulica e hidrológica de la lluvia del 22 de octubre de 2018 en Morelia empleando análisis forense

Hydraulic and hydrological review of the rain of october 22, 2018 in Morelia using forensic analysis

Jorge E. Ochoa García y Juan Pablo Molina Aguilar*

Para citar este artículo: Ochoa García JE, Molina Aguilar JP (2024). Revisión hidráulica e hidrológica de la lluvia del 22 de octubre de 2018 en Morelia empleando análisis forense. *Ciencia Nicolaita* 90: 127-142.
DOI: <https://doi.org/10.35830/cn.vi90.744>

Historial del artículo



Recibido: 17 de agosto de 2023
Aceptado: 7 de diciembre de 2023
Publicado en línea: abril 2024



Ver material suplementario



*Correspondencia de autor: juan.molina@umich.mx, ORCID 0000-0002-9607-6274



Términos y condiciones de uso: <https://www.cic.cn.umich.mx/cn/about/privacy>



Envíe su manuscrito a esta revista: <https://www.cic.cn.umich.mx/cn/about/submissions>

Revisión hidráulica e hidrológica de la lluvia del 22 de octubre de 2018 en Morelia empleando análisis forense

Hydraulic and hydrological review of the rain of october 22, 2018 in Morelia using forensic analysis

Jorge E. Ochoa García y Juan Pablo Molina Aguilar*

Facultad de Ingeniería Civil, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. Avenida Francisco J. Múgica S/N, Edificio "C", Ciudad Universitaria. Morelia, Michoacán.

Resumen

En el año 2018, el paso del Huracán Willa por territorio nacional ocasionó una tormenta que afectó Morelia, dejando inundaciones y encharcamientos en calles y avenidas principales de la ciudad, particularmente en colonias de la zona sur - oriente. El presente trabajo tuvo por objeto realizar la modelación hidrológica de la zona afectada, identificando y representando el comportamiento del flujo durante y después de la tormenta, complementándose con el estudio del contexto socioeconómico mediante un análisis forense, definiéndose las afectaciones demográficas y poblacionales. El análisis simultáneo de ambos enfoques mostró el periodo de retorno de la tormenta, acorde con el régimen pluviométrico de la zona de estudio, permitiendo establecer recomendaciones para mejorar la resiliencia en la capital michoacana.

Palabras clave: Análisis forense, modelación hidrológica, IBER 5, tormenta, inundación.

Abstract

In 2018, the path of Hurricane Willa through the national territory caused a storm that affected Morelia, leaving flooding and waterlogging in main streets and avenues of the city, mainly in colonies of the south-east zone. The present work had the objective of performing the hydrological modeling of the affected area, identifying and mapping the flow pattern during and after the storm, complemented with the study of the socioeconomic context by performing a forensic analysis and defining demographic and population effects. The simultaneous analysis of both perspectives showed the return period of the storm, according to the rainfall regime of the study area, allowing the establishment of recommendations to improve resilience in the capital city of Michoacán.

Keywords: Forensic analysis, hydrologic modeling, IBER 5, storm, flood.



Introducción

Las inundaciones son la respuesta de un espacio físico ante un fenómeno hidrometeorológico que, a nivel internacional cobra cada vez más importancia e impacto. Se estima que las mismas son posiblemente la causa más importante en pérdidas económicas en lo referente a fenómenos naturales, siendo además la más común mundialmente (Wang *et al.*, 2011).

De acuerdo con la OECD (2016), las inundaciones a nivel mundial superan pérdidas de 40,000 millones de dólares anualmente. Bajo ese panorama, se presupone un incremento en el número de personas vulnerables a los desastres relacionados con las inundaciones para el año 2050 (UNESCO World Water Assessment Programme, 2012), esto en conjunto con el incremento de la población en zonas propensas a inundaciones, por el cambio climático y por el incremento en el nivel de los océanos y mares.

En México, las inundaciones provocan daños temporales y permanentes en los sectores agrícola, comercial, industrial, educativo y habitacional. El Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED) identificó en el año 2016 que, de todas las pérdidas provocadas por eventos naturales, el 86% fue debido a fenómenos hidrometeorológicos. De esa cantidad, más del 70% se debió a la manifestación de intensas lluvias que provocaron a su vez inundaciones en el país. En este sentido actualmente se registran más de 120 defunciones relacionadas con esta problemática, misma que también provoca más de 5,000,000 de personas afectadas, 111,000 damnificados, 23,155 viviendas dañadas, 108 escuelas afectadas y 586 unidades económicas dañadas (CENAPRED, 2016; Vázquez y Palazuelos, 2017). Al respecto, Pablo (2012) señala que las inundaciones pueden clasificarse de acuerdo a diversos parámetros, tales como su tiempo de duración y el mecanismo que las generan.

La ciudad de Morelia no es ajena a la problemática, ya que históricamente ha manifestado inconvenientes referentes a las inundaciones en algunas zonas identificadas, a pesar de que no es nueva la aparición de esta complicación, sí se ha venido intensificando con los años. Las inundaciones en Morelia han sido estudiadas en diversos campos de aplicación, no necesariamente en lo referente al entorno ingenieril.

En el mismo sentido, Arreygue *et al.* (2005), Arreygue (2008) y Arreygue-Rocha *et al.* (2012)

realizaron estudios hidrológicos y geomorfológicos que se presentan en las partes más susceptibles de la zona de estudio, ultimando que la morfología del río ha sido modificada en el pasado, trayendo como consecuencia que se presenten desbordamientos e inundaciones en lo que antes eran sus antiguos cauces, mismos que actualmente se encuentran compuestos por la presencia de infraestructura como calles, viviendas, fábricas y comercios, siendo las precipitaciones extremas los factores más importantes para los desbordamientos.

Los desbordes de los ríos Grande y Chiquito en Morelia son factores fundamentales para el anegamiento eventual en calles y avenidas importantes de la ciudad. Aunado a lo anterior, la conformación topográfica ha permitido que en los puntos más bajos se puedan presentar problemas de inundaciones, pero también, de manera notoria, la rápida conformación de asentamientos humanos sobre terrenos irregulares.

El crecimiento de la población ha provocado que se ocupen zonas que anteriormente habían sido de cultivo, ciénegas y depresiones naturales donde se captaba agua o bien se infiltraba a los mantos acuíferos, incluyendo las márgenes de ambos ríos (Hernández y Vieyra, 2014). La falta de una planeación urbana, la cual respeta las estipulaciones establecidas por el ordenamiento territorial para conocer cuáles son las restricciones territoriales, la segregación socio-espacial y socio-ambiental de los habitantes, la escasa responsabilidad de las autoridades y de sus instituciones de control y de la falta de conocimiento que se tuvo para el desarrollo de las áreas urbanas (Bernal, 2013), contribuyó en gran medida a que las circunstancialidades generadas por las inundaciones empeoraran.

Con base a lo antes señalado, el objetivo de este trabajo fue la comprensión de la inundación provocada por la tormenta ocurrida en la madrugada del 22 de octubre del año 2018 en las colonias ubicadas en la zona sur - oriente de la ciudad de Morelia. Considerando como herramientas el análisis forense, entendida como la reconstrucción de los eventos extremos a fin de definir las causas de su ocurrencia, después de estudiar los procesos hidrológicos involucrados y aplicar técnicas de investigación que muestren relaciones causa-efecto a partir de la evidencia recabada sobre los hechos en el sitio de estudio (Gutiérrez-López, 2022; Lischeid *et al.*, 2017; Ramírez Orozco, 2015) y la modelación hidrológica, teniendo en cuenta la precipitación to-

tal diaria y asignando distintos periodos de retorno para diferentes duraciones de tormenta, la cual fue provocada por la precipitación ininterrumpida generada por el huracán Willa de categoría 5 según la escala Saffir-Simpson.

Materiales y métodos

La zona de estudio, establecida como la delimitación geográfica del espacio, donde se lleva a cabo la modelación hidrológica y su correspondiente análisis forense, es aquel en el cual se consideran diferentes parámetros (capas de información), de tal forma que permitan conocer los aspectos físicos, geográficos, ambientales, climatológicos e hidrológicos del territorio analizado y que sea fundamental para discurrir en su vinculación con los materiales empleados y el resultado al que se espera llegar.

La zona de estudio, localizada en el municipio de Morelia, en el interior del estado de Michoacán, el cual forma parte de la región occidente de la República Mexicana, está delimitada por los paralelos 19°27'06" y 19°50'12" y meridianos 101°01'43" y 101°30'32", contando con un área de 146 km² que representan el 2% de la superficie del estado. Se demarcó de tal forma que se consideraron las colonias que se vieron afectadas por la tormenta

ocurrida el día 22 de octubre del año 2018 en la zona sur-oriente de la ciudad (**Figura 1**), siendo estas las siguientes: Nueva Jacarandas, Ventura Puente, Félix Ireta, La Loma, Electricistas, Bosque Camelinas, Camelinas, Chapultepec Sur, Oriente y Nueva Chapultepec.

La zona de estudio delimitada, respecto de los aspectos hidrológicos, se encuentra en la cuenca del Río Chiquito, perteneciente al sistema de cuencas de la región Lerma-Santiago. La cuenca abarca una superficie de casi 90 km² y se localiza en la zona suroriente de la ciudad de Morelia. En su interior se localiza el Río Chiquito, homónimo a la cuenca dentro de la cual se localiza la zona de estudio, que recorre de oriente a poniente la ciudad a partir de Cañadas del Rincón hasta unir sus aguas con las del Río Grande. El Río Chiquito rara vez se desborda dentro de la zona de estudio y dependiendo del lugar en su interior donde se hagan lecturas, el tirante del mismo no llega a sobrepasar los 40 cm durante los meses secos.

Su representación topográfica está caracterizada por la Loma de Santa María que se sitúa a más de 2,100 msnm, así como el cerro perteneciente a la localidad de Jesús del Monte que son las partes más altas, mientras que las partes más bajas son las correspondientes a las zonas cercanas al cauce del Río Chiquito, correspondiente a la urbanización en la ciudad en la cual se sitúan las colonias enlista-



Figura 1. Imagen satelital de la zona de estudio.



das previamente.

Para las colonias afectadas, el uso de suelo predominante es el de tipo complementario (suelo no natural o desprovisto de vegetación); por otro lado, en menor medida en la zona sur la Loma de Santa María concentra un uso de suelo forestal.

En Morelia, la vegetación más característica es el bosque de pino-encino, la cual representa poco más del 30% de su extensión. El pastizal inducido se encuentra ubicado en regiones presentes en el noroeste de la ciudad, aunque también en menor medida en las comunidades Loma de Santa María y El Durazno del sur de la ciudad, principalmente en pequeñas regiones donde no se encuentran asentamientos urbanos.

Como características meteorológicas o variables del estado atmosférico, consideradas en la zona de estudio, para esta investigación fueron la precipitación, la temperatura, la zona de heladas y la zona de granizadas.

La topografía de la región, fue considerada con base al Modelo de Elevación Digital (MED) del municipio de Morelia, que fue obtenido del Instituto Municipal de Planeación de Morelia (IMPLAN) con el cual fueron realizadas las curvas de nivel, haciendo énfasis en las colonias afectadas (**Figura 2a**). Por otra parte, la delimitación de la cuenca hidrológica que aporta escurrimiento superficial a la zona de estudio (**Figura 2b**) se realizó con base a información de la Biblioteca Digital de Mapas del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI).

Dentro del territorio municipal de Morelia se localizan 9 estaciones climatológicas, también conocidas como estaciones meteorológicas convencionales por sus siglas EMC (**Figura 3**) gestionadas por el Servicio Meteorológico Nacional (SMN) de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). Cada una de ellas recibe el nombre de la comunidad o pueblo en el que se encuentran ubicadas, estando situadas dos dentro de la ciudad de Morelia y el resto en Jesús del Monte, San Miguel del Monte, Teremendo, Cointzio, Cuitzillo Grande, Santiago Undameo y Capula respectivamente, que son comunidades y tenencias del municipio.

Como se observa en la **Figura 3** y el estatus consignado en la **Tabla 1**, la estación 16081 Morelia, se sitúa en la zona de estudio y se encuentra operando, razón por la cual se consultó la información registrada en la fecha del evento pluviométrico a causa del Huracán Willa (**Tabla 2**).

Para conjuntar la modelación hidrológica con el análisis forense, se requirió información desde el ámbito socioeconómico de la zona que presentó daños por la inundación, obtenida de las bases de datos de INEGI. Se hizo énfasis en identificar los elementos dentro de este apartado al interior de la zona de estudio, identificando su ubicación por medio de mapas, mismos que se enfatizan en las colonias de la zona sur de la ciudad afectadas. En esta información, se incluyen los semblantes educativos, comerciales, de infraestructura, de salud, y de los programas de desarrollo que tienen influencia en la región (**Figura 4**).

Tabla 1. Ubicación y estatus de las EMC en el municipio de Morelia.

Código	Nombre	Situación	Coordenadas		Elevación (m)
			Longitud	Latitud	
16055	Jesús del Monte	Operativa	-101.1514	19.6517	2180
16080	Morelia (OBS)	Operativa	-101.1833	19.7	1912.7
16081	Morelia	Operativa	-101.1761	19.6886	1908
16114	San Miguel del Monte	Operativa	-101.1342	19.6203	1965
16254	Teremendo	Operativa	-101.4778	19.7833	2188
16022	Cointzio	Suspendida	-101.2811	19.625	2096
16028	Cuitzillo Grande	Suspendida	-101.1194	19.7667	1987
16120	Santiago Undameo	Suspendida	-101.32	19.6028	2130
16247	Capula	Suspendida	-101.3917	19.675	2097

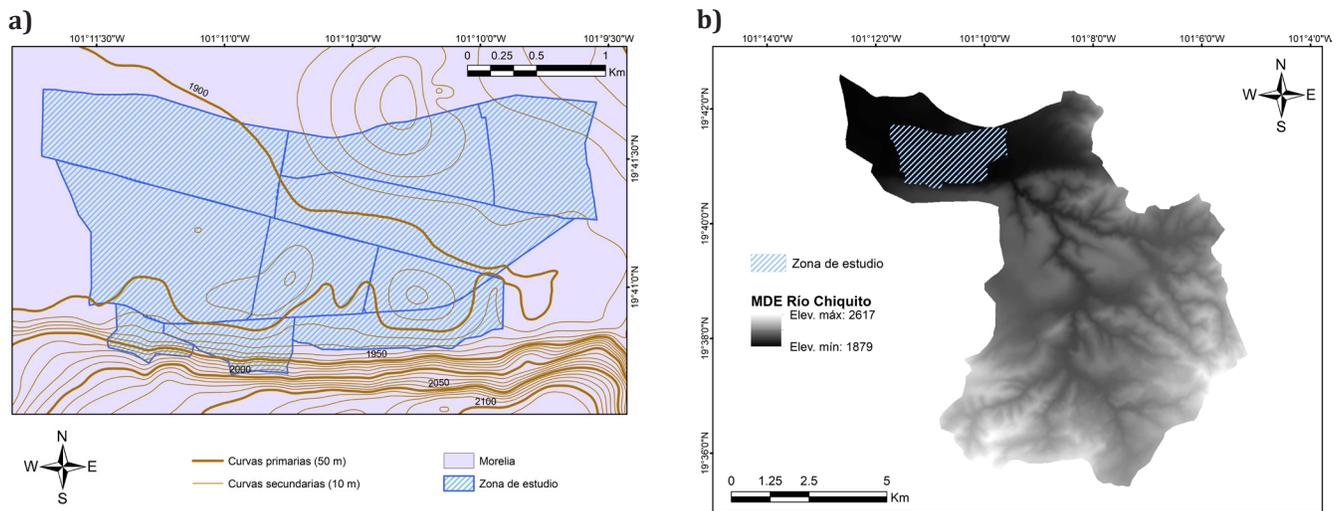


Figura 2. Zona de estudio a) curvas de nivel y b) cuenca hidrológica.

Tabla 2. Información climatológica registrada en la estación 16081 Morelia, antes, durante y después de la tormenta provocada por el huracán Willa.

Clave	Variable climatológica	Unidad	Valor registrado		
			Día 21	Día 22	Día 23
1	Temperatura ambiente 8 horas	°C	16	15	15.5
2	Temperatura mínima	°C	25	23	27
3	Temperatura máxima	°C	15	13	14.5
5	Precipitación 24 horas	mm	6.7	43.5	2.3
18	Evaporación 24 horas	mm	1.2	0.68	4.26
30	Días con tormenta	-	0	1	0

Estimación de tormenta de diseño

El método de estimación de la tormenta de diseño fue el desarrollado por Dick-Peschke (Gamarra, 2021) el cual cuenta con aceptación internacional. Es útil cuando se dispone únicamente de registro la precipitación máxima en 24 horas (P_{24}) registrada en mm y la relaciona con la duración de la tormenta (d) en minutos, es decir, permite la resolución de precipitaciones en periodos cortos de duración (P_d) en mm, con apenas dos variables.

$$P_d = P_{24} \left[\frac{d}{1440} \right]^{0.25}$$

Curvas intensidad-duración-frecuencia (IDF)

Las curvas intensidad - duración - frecuencia (IDF) son el elemento de diseño que relacionan la intensidad de la lluvia (I), la duración de la misma (D) y la frecuencia (F) con la que se puede presentar en un lugar determinado, es decir, su probabilidad de ocurrencia o el periodo de retorno (Tr). Para su determinación se necesita contar con registros pluviográficos en el lugar de interés y seleccionar la lluvia más intensa de diferentes duraciones en cada año. Con la finalidad de realizar un estudio de frecuencia con cada una de las series así formadas, mediante la definición de los parámetros k , m y n se relacionan con el régimen pluviométrico y las características geográficas, así como climatológicas de la zona de estudio.

Estas series anuales se forman eligiendo, en cada año del registro, el mayor valor observado correspondiente a cada duración, obteniéndose con ello un valor para cada año y cada duración (MTC, 2008) y posteriormente se utilizan para construir hietogramas sintéticos que representen los picos más altos de la intensidad y el momento en el que se manifestaron.

$$i = \frac{k Tr^m}{d^n}$$

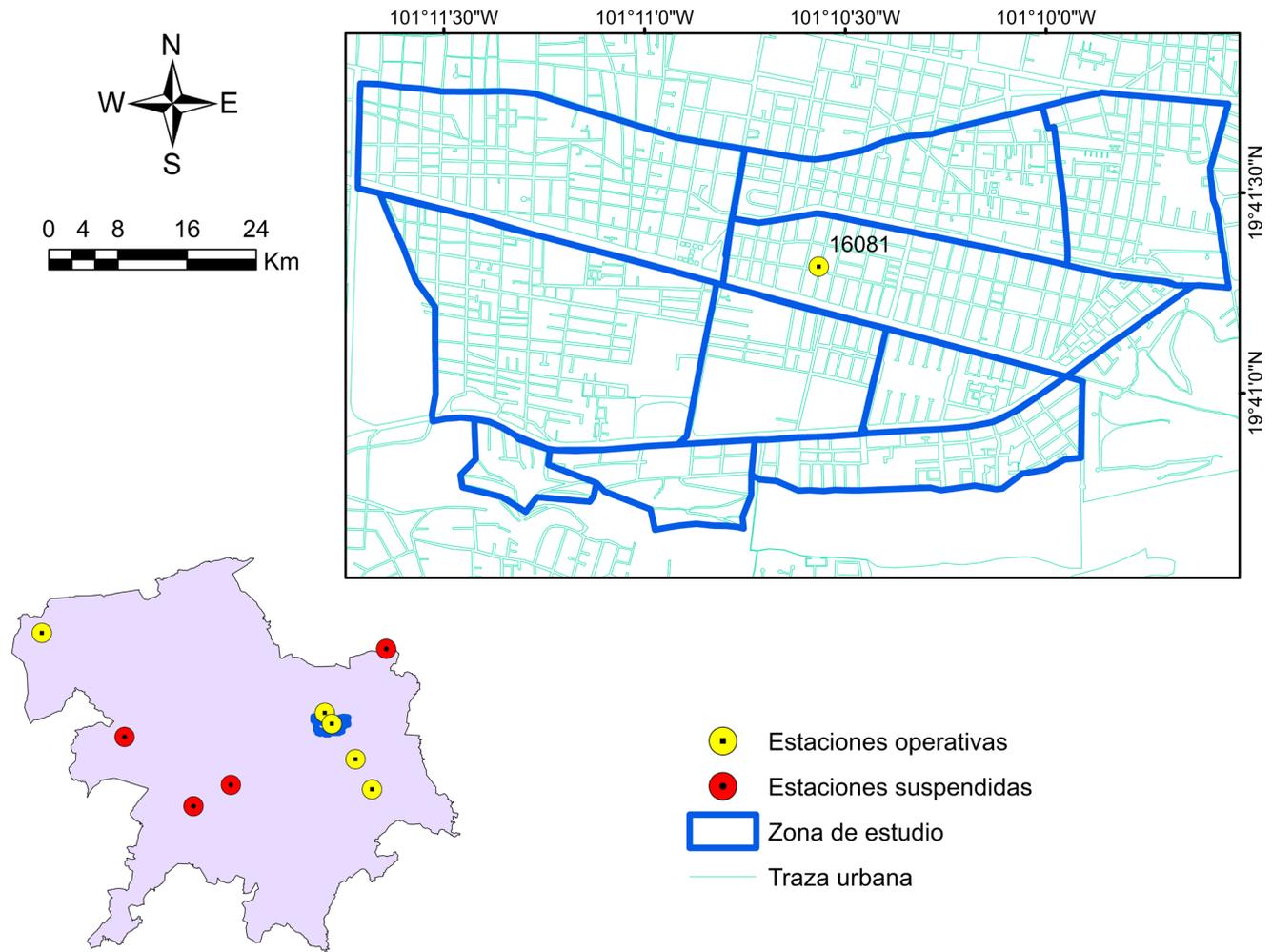


Figura 3. Ubicación de las EMC en el municipio de Morelia.

Hietograma de diseño por el método del bloque alterno

El hietograma de diseño, en términos de un T_r , es requerido en el programa IBER para el funcionamiento del comportamiento del flujo. Siendo IBER capaz de leer la información de la precipitación y la hora a la que se presentó, de modo que, respecto al intervalo de tiempo seleccionado y a las variables del coeficiente de rugosidad de Manning (n) y de escurrimiento (c), se pueda modelar el flujo superficial del agua sobre el enmallado.

El método de bloque alterno es una forma simple para su obtención empleando una curva IDF. El hietograma de diseño producido por este método, especifica la altura de precipitación que ocurre en n intervalos de tiempo sucesivos de duración Δt sobre una duración total de tormenta. Después de seleccionar el periodo de retorno de diseño, la intensidad es leída en una curva IDF

para cada una de las duraciones Δt , $2\Delta t$, $3\Delta t$, ..., y la altura de precipitación correspondiente se encuentra al multiplicar la intensidad y la duración (Chow *et al.*, 1988).

Tomando diferencias entre valores sucesivos de la altura de precipitación, se encuentra la cantidad de precipitación que debe añadirse por cada unidad adicional de tiempo Δt . Estos incrementos o bloques se reordenan en una secuencia temporal de modo que la intensidad máxima ocurra en el centro de la duración requerida y que los demás bloques queden en orden descendente alternativamente hacia la derecha y hacia la izquierda del bloque central para formar el hietograma de diseño (MTC, 2008; Paredes, 2015).

Funcionamiento del programa IBER

El software IBER tiene la capacidad de calcular el comportamiento del flujo a superficie libre

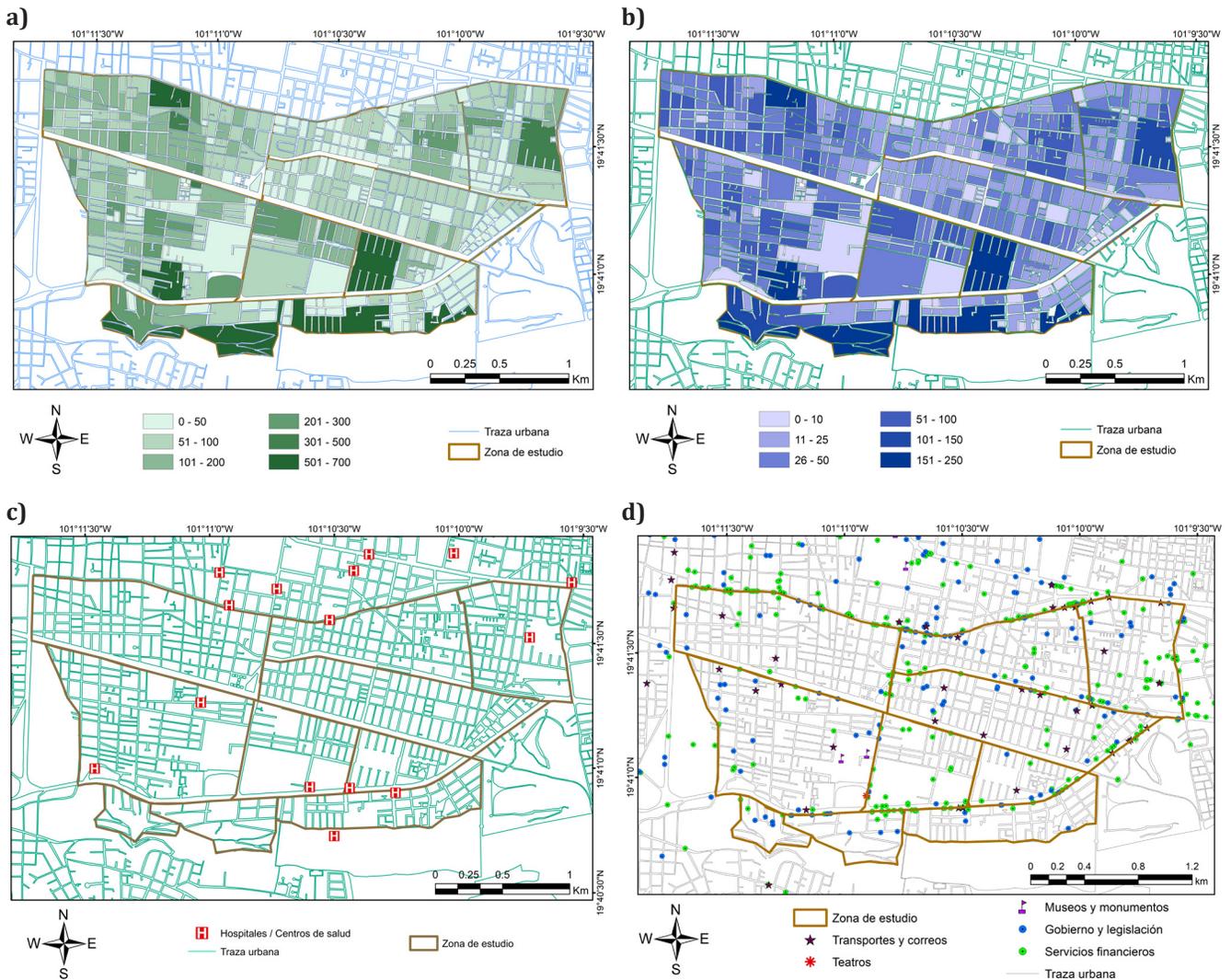


Figura 4. Información socioeconómica de la zona de estudio. a) Número de habitantes por manzana. b) Número de viviendas por manzana. c) Centros de salud, consultorios y hospitales. d) Ubicación de financieras y empresas de transporte.

mediante el sistema de ecuaciones diferenciales de Saint-Venant en dos dimensiones, contemplando los efectos de turbulencia, y rozamiento superficial por viento; las cuales dependiendo de si se cuentan con las condiciones suficientes, se pueden calcular bajo dichas condiciones u omitir. Bladé *et al.* (2014), simplifican la representación de las ecuaciones de Saint-Venant, considerando todas las variables representadas y expresándolas de la forma:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial hU_x}{\partial x} + \frac{\partial hU_y}{\partial y} = 0$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(hU_y) + \frac{\partial}{\partial x}(hU_xU_y) + \frac{\partial}{\partial y}\left(hU_y^2 + g\frac{h^2}{2}\right) =$$

$$= -gh\frac{\partial hZ_b}{\partial y} + \frac{\tau_{s,y}}{\rho} - \frac{\tau_{b,y}}{\rho} + \frac{\partial}{\partial x}\left(v_t h \frac{\partial U_y}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(v_t h \frac{\partial U_y}{\partial y}\right)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(hU_x) + \frac{\partial}{\partial x}\left(hU_x^2 + g\frac{h^2}{2}\right) + \frac{\partial}{\partial y}(hU_xU_y) = gh$$

$$= -gh\frac{\partial hZ_b}{\partial x} + \frac{\tau_{s,x}}{\rho} - \frac{\tau_{b,x}}{\rho} + \frac{\partial}{\partial x}\left(v_t h \frac{\partial U_x}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(v_t h \frac{\partial U_x}{\partial y}\right)$$

En las ecuaciones anteriores h representa el tirante (m), por su parte U_x , U_y son las velocidades horizontales promediadas en profundidad (m/s), mientras que g considera la acción de la aceleración de la gravedad (m/s²), en el caso de Z_b se representa la cota del fondo (m), con τ_s se muestra la fricción en la superficie libre debida el rozamiento producido por el viento, de forma análoga τ_b muestra la fricción debida al rozamiento del fondo, en lo que concierne al flujo v_t considera la viscosidad turbulenta (m²/s) y ρ es la densidad (kg/m³).



La modelación del escurrimiento superficial producto del régimen pluviométrico empleando IBER, requiere la conformación de Redes Irregulares de Triángulos Rectángulos (Right-Triangulated Irregular Networks, RTIN por sus siglas en inglés) es un enmallado propuesto por Evans *et al.* (2001), el cual consiste en una representación de la superficie de la zona de estudio basado en un MDE. Es decir, IBER cuenta con la capacidad de crear una malla mediante la técnica RTIN a partir de un MDE convencional, a pesar de no contar con la capacidad de leer un formato MDE extraído directamente de la base de datos del INEGI.

Para que el programa pueda hacer efectiva la lectura de los datos ya existentes de un MDE, es preciso que el formato a ingresar con la información del terreno sea de tipo ASCII por sus siglas en inglés (American Standard Code for Information Interchange), mismo que se puede obtener a partir de un SIG como ArcGIS o mediante la descarga de los metadatos desde la biblioteca digital de mapas del INEGI, si es que no se requiere realizar un tratamiento previo a la información del terreno.

Parámetros temporales

Por parámetros de tiempo, se refiere a los elementos temporales que se involucran para la modelación de flujo IBER (Tabla 3). Para poder establecer el tiempo de análisis se tienen cuatro días desde el momento en el que se inició el registro de la lluvia en la zona de estudio hasta que el huracán Willa llegó a Sinaloa y se convirtió en depresión tropical (DT).

Tabla 3. Parámetros temporales asignados al programa IBER.

Fecha/hora	Parámetro temporal	Tiempo (s)	Observación
21/10/2018 22:00 p.m.	Instante inicial	0	
22/10/2018 05:00 a.m.	Tiempo máximo de simulación	25,200	Equivalentes a las siete horas de simulación de flujo
	Intervalo de resultados	900	Equivalentes a 15 minutos del intervalo de simulación

Condiciones hidrodinámicas iniciales

Para que no se presenten anomalías en la modelación del flujo, una vez ejecutado el programa con las variables establecidas, es imperioso ingresar los elementos hidrodinámicos ya presentes en la microcuenca y, en particular, en la zona de estudio, para que su presencia no pueda afectar el resultado obtenido.

Por lo anterior, las condiciones hidrodinámicas iniciales consisten en la determinación de la ubicación en la malla correspondiente a la zona de estudio de ríos, lagos, lagunas, estuarios, drenes, entre otros. Torres y Lucas (2014), indican que la sección transversal del Río Chiquito es de forma trapezoidal irregular, tiene una profundidad de aproximadamente 4 m hasta el fondo del cauce, un ancho de 3 m con un tirante de 15 cm en temporada de estiaje el cual incrementa hasta 40 cm en temporada de lluvias, los autores no establecieron la influencia de los fenómenos extraordinarios que afectan la ciudad. Por practicidad, el valor considerado para el enmallado RTIN fue de 40 cm en toda la extensión del río dentro de la zona de estudio, es decir, se consideró su comportamiento uniforme previo a la recepción de los escurrimientos superficiales asociados con la lluvia aportada por el huracán Willa.

Escurrecimiento superficial

El escurrimiento superficial es definido como el agua proveniente de la precipitación que se mueve sobre la superficie del suelo hasta llegar a los cauces de ríos dentro de la región, normalmente definidos por la letra S.

El modelo que fue definido por el Servicio de Conservación de Suelos de Estados Unidos (SCS por sus siglas en inglés), únicamente requiere conocer una variable previa para poder ser empleado, siendo así que su utilización resulta sencilla, definido con la ecuación:

$$S = \frac{1000}{CN} - 10$$

En donde CN es el número de curva de escurrimiento, cuyo valor resulta empírico, ya que se encuentra en función del uso de suelo y cualquier otro factor que pueda afectar al escurrimiento y a la retención del agua precipitada. El número de curva es un parámetro hidrológico que permite caracterizar el potencial de escorrentía en una cuenca hidrográfica y se determina a partir de

algunas características físicas del territorio como el tipo, la densidad y el tratamiento de las coberturas (NRCS, 2004; Díaz y Mercado, 2017), así como por el grupo hidrológico de suelo (GHS).

Incorporar tanto el GHS como el CN a subáreas pertenecientes a la microcuenca del Río Chiquito es complicado, pues se requiere conocer de información del suelo que permita entonces identificar los grupos de suelo y posteriormente a los mismos aplicar el número de curvatura. Para este trabajo de investigación, se decidió considerar la capa del uso de suelo y una imagen satelital georreferenciada de la zona de estudio para poder ubicar con mayor exactitud las áreas pertenecientes a los usos agrícola, urbano y suburbano, que no son aplicables por considerarse zona urbana sin espacios para uso exclusivo de vegetación.

Resultados

Como parte del análisis del régimen pluviométrico de la ciudad de Morelia, la estación 16081 permite obtener información suficiente, que en el proceso de la selección de función de distribución de probabilidad (*f_{dp}*). En la **Tabla 4**, se encuentran resumidos los resultados del valor de la prueba de bondad de ajuste de Kolmogorov-Smirnov, donde se destaca la distribución con el menor delta teórico, que representa la diferencia entre las probabilidades observada y estimada. Dicha prueba sirve para determinar cuál de las *f_{dp}* utilizadas se adapta más al comportamiento histórico de los datos, de modo que la escogida sirva para proyectar

Tabla 4. Delta teórico para cada una de las *f_{dp}* ajustadas.

FDP	$ F_0(x_m) - F(x_m) $
Normal	0.1207
Log-Normal 2 parámetros	0.0669
Log-Normal 3 parámetros	0.0684
Gamma 2 parámetros	0.0850
Gamma 3 parámetros	0.06813
Pearson Tipo III	Sin resultado. No se ajusta a las condiciones
Gumbel	0.0565
Log-Gumbel	0.0888

la información para diferentes *Tr* y con ayuda de la información de lluvia del día 22 de octubre, se pueda determinar su *Tr* específico.

Como la *f_{dp}* Gumbel es en la que menor delta teórico se presentó, es con ella con la cual se obtienen las precipitaciones probables para diferentes periodos de retorno (**Tabla 5**).

Con los resultados obtenidos y aplicando el método de Dick-Peschke, una vez asignado el periodo de retorno, la precipitación máxima de 24 horas y la duración de la tormenta, se pudo estimar la precipitación acontecida por el huracán Willa (**Figura 5**).

A fin de establecer el hietograma de precipitación, realizado el ajuste de la IDF, mediante el procedimiento sugerido por Aparicio Mijares (1992), se obtuvieron las constantes $k=384.1482$, $m=0.1705$, $n=0.7500$ que definen la ecuación de la intensidad:

$$I = \frac{384.1482Tr^{0.1705}}{d^{0.7500}}$$

La cual, al ser evaluada para un periodo de retorno equivalente a la precipitación registrada el día 22 de octubre, resulta en el siguiente hietograma de diseño (**Figura 6**).

Modelación hidrológica

Los resultados presentados corresponden al *Tr* estimado de 17.72 años equivalente a la precipitación acaecida el día 22 de octubre, que fue de 43.5 mm. Por otra parte, las imágenes presentadas de la modelación extraídas del programa IBER corresponden a ocho tiempos de

Tabla 5. Precipitaciones asignadas a diferentes periodos de retorno.

Tr (años)	hp (mm)
2	29.988
5	35.059
10	39.457
17.72	43.500
25	46.129
50	51.916
100	58.429

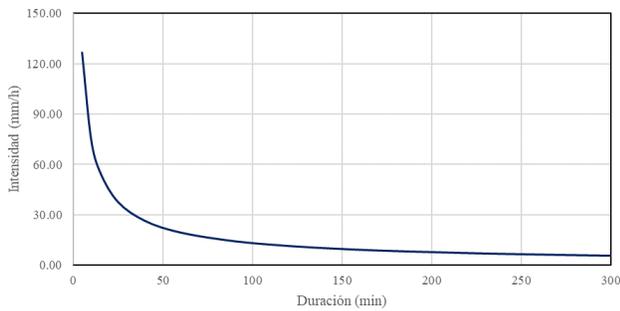


Figura 5. Curva IDF con una duración de 5 horas para un $Tr = 17.72$ años.

modelación; partiendo del hecho que se modelaron siete horas donde cinco de ellas forman parte de la duración de la tormenta, mientras que las otras dos complementarias se tomaron para observar más detalladamente el comportamiento del flujo en la cuenca después del fenómeno climatológico (**Figura 7**).

A partir de los resultados continuos obtenidos en el programa IBER, fue posible identificar la evolución de los encharcamientos en las principales avenidas de la zona de estudio (**Figura 8**). En el caso la avenida Ventura Puente, la cual tiene una ubicación norte a sur en la ciudad, se aprecia el incremento gradual a partir de los 43 minutos una vez que se inicia la acumulación del escurrimiento superficial. Respecto a la Av. Solidaridad, Boulevard García de León y Av. Camelinas, que cuenta con orientación oriente – poniente, los resultados sugieren un comportamiento análogo, en el cual el escurrimiento superficial sobre el Río Chiquito de Morelia rige el movimiento de los escurrimientos en exceso a partir de la Av. Solidaridad y hacía las dos avenidas restantes, lo que implica un movimiento simultaneo de los encharcamientos en dirección norte y sur.

Análisis forense del sitio

Una vez realizada la modelación hidrológica, se procedió a identificar información socio-económica relacionada al periodo temporal y espacial, a fin de conformar el análisis forense, mismo que se muestra en las **Figuras 9 - 12**.

Discusión

El análisis forense realizado en sus etapas de recopilación de eventos históricos y en la revisión de los programas de desarrollo, muestran que, en efecto,

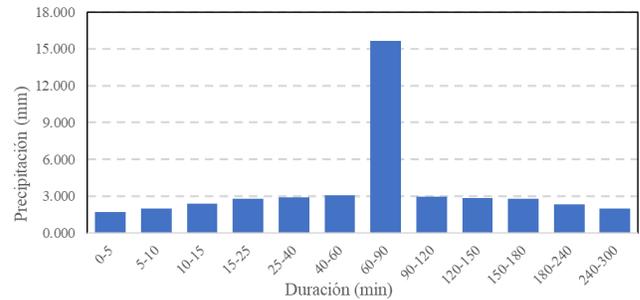


Figura 6. Hietograma de diseño para el $Tr = 17.72$ años.

el crecimiento de la población en zonas propensas a inundarse ha provocado que la problemática al día de hoy se siga conservando y, con el crecimiento de la ciudad en regiones igualmente vulnerables puede verse un empeoramiento de la situación.

En la modelación hidrológica se distingue un comportamiento en el flujo que tiende a descender a la zona baja de la microcuenca del Río Chiquito, justamente hacia la zona de estudio establecida en este trabajo, lo cual confirma que las condiciones topográficas de la ciudad también han incentivado en que se presenten inundaciones en avenidas importantes de la ciudad que corresponden a un alto índice participativo en lo competente al comercio y a zonas donde se concentra una alta cantidad de personas con dificultades de movimiento y, a su vez, presencia de hospitales, clínicas y centros médicos en general. Aunque en lo establecido en el análisis forense y en función de lo reportado por las autoridades, el Río Chiquito no se desbordó durante el paso del huracán Willa, lo cual no impidió que las calles aledañas al mismo resultaran dañadas por la misma topografía de la región. Esta problemática registró sus principales afectaciones en las colonias aledañas a Lomas de Santa María.

En cuando a la modelación hidrológica, la misma mostró que para una intensidad equivalente a la precipitación acaecida en este estudio, las avenidas más importantes de la zona y, a su vez, de la misma ciudad en algunos puntos conflictivos se presentaron tirantes que oscilaron desde los 10 hasta los 40 cm, pudiendo variar el resultado con el comportamiento real dados los coeficientes de uso de suelo y la situación de la red de drenaje, ya que no es posible conocer su estado real durante la tormenta, por lo que el tirante registrado en la modelación es posible que sea mayor al que se obtuvo realmente. Por otra parte, y dadas las limitaciones del enmallado utilizado, no se contó con una capa de RTIN que fuera capaz de contar

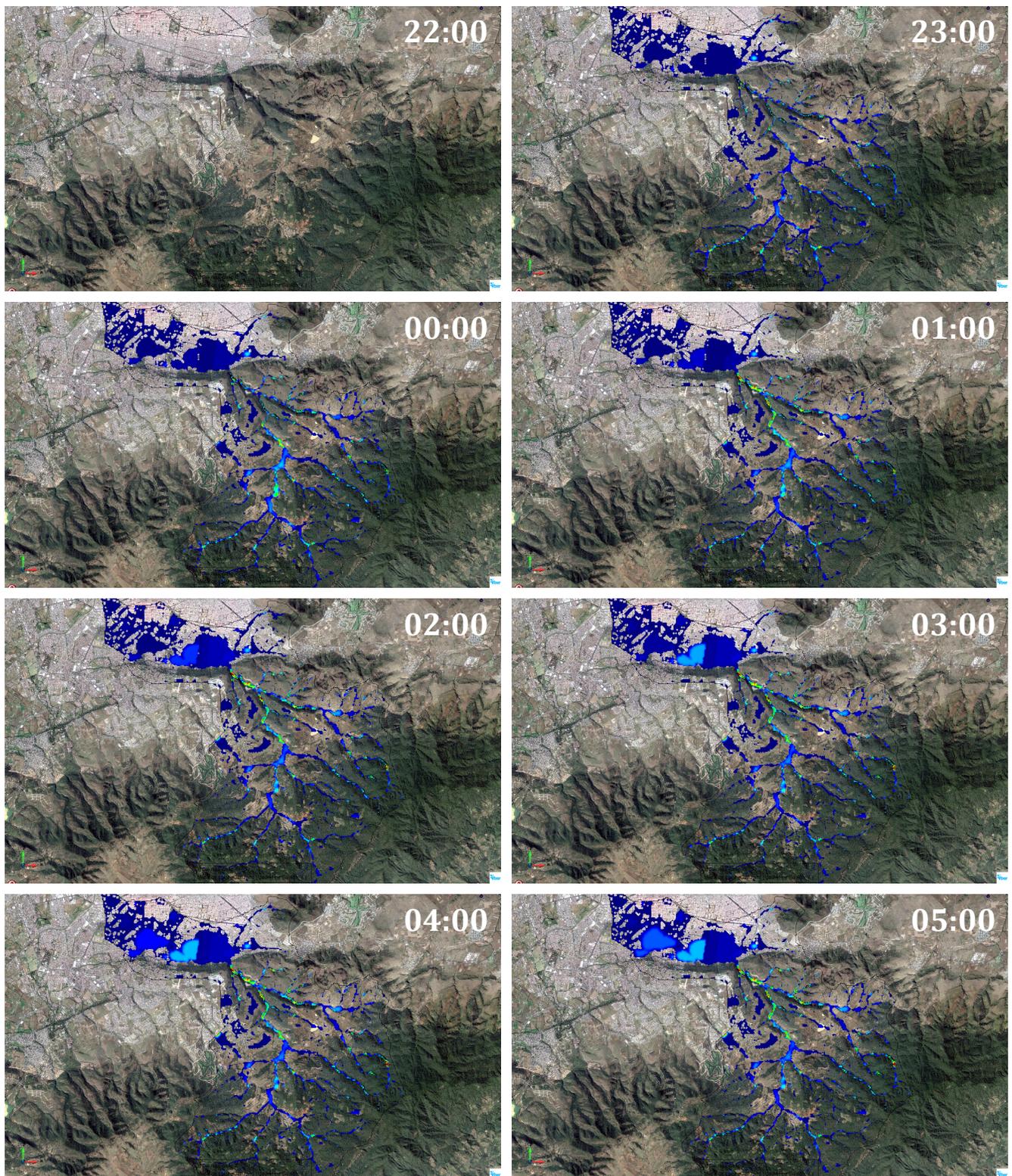


Figura 7. Resultado de la modelación hidrológica en la cuenca de aportación a la zona de estudio considerando la precipitación registrada a causa del huracán Willa a partir de las 22:00 pm del día 21 en intervalo horario hasta las 05:00 a.m. del día 22.

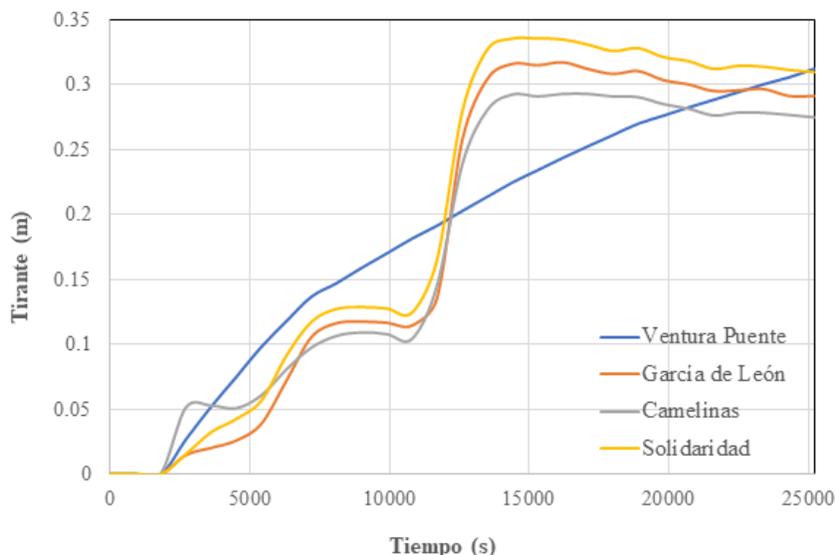


Figura 8. Evolución temporal de los encharcamientos en la zona de estudio.

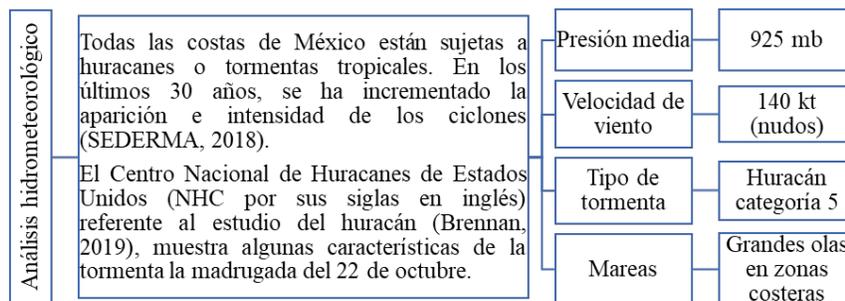


Figura 9. Análisis hidrometeorológico del huracán Willa.

con información perteneciente a la infraestructura a nivel de banqueta, ni mucho menos el detallado de las calles por lo que se muestran regiones inundadas pertenecientes a comercios, viviendas, centros de envíos, oficinas gubernamentales y demás.

Se sabe que la zona protegida de la Loma de Santa María estuvo en su momento resguardada bajo los estatutos de ANP hasta que el mismo fue revocado y se cambió a simplemente una zona protegida, la cual, a diferencia de la anterior, sí permite limitadamente la construcción de nuevos edificios con fines departamentales, lo que ha provocado que el cambio de uso de suelo de la región intensifique las inundaciones al verse diezmada la posibilidad de que el agua precipitada en la loma se infiltre y, en consecuencia, se estanque en la zona baja.

Con base a los resultados del análisis hidráulico e hidrológico, señalado en los párrafos anteriores, se logró establecer que la infraestructura civil de la zona afectada, carece de capacidad ante eventos

climatológicos cuyo periodo de retorno sea mayor a 17.72 años, el cual es un estándar muy bajo para las condiciones en las que se deben de realizar obras civiles. Esto quiere decir que, la falta de mantenimiento, así como de la modernización de los servicios públicos en función del periodo de vida útil ocasiona un decremento en las condiciones de diseño adoptadas, esto implica que se debe hacer una revisión periódica del funcionamiento en concordancia con el régimen pluviométrico actual, mismo que presenta rasgos tangibles del cambio climático y las alteraciones antropogénicas de la ciudad.

Lo anterior debe ser una acción paralela a las políticas públicas y la observancia de los instrumentos jurídicos que regula el comportamiento de la sociedad en cuestiones del manejo de los residuos sólidos y su disposición en sitios establecidos por las autoridades competentes que contribuyan a mantener en lo posibles las condiciones de la red de drenaje en la ciudad.

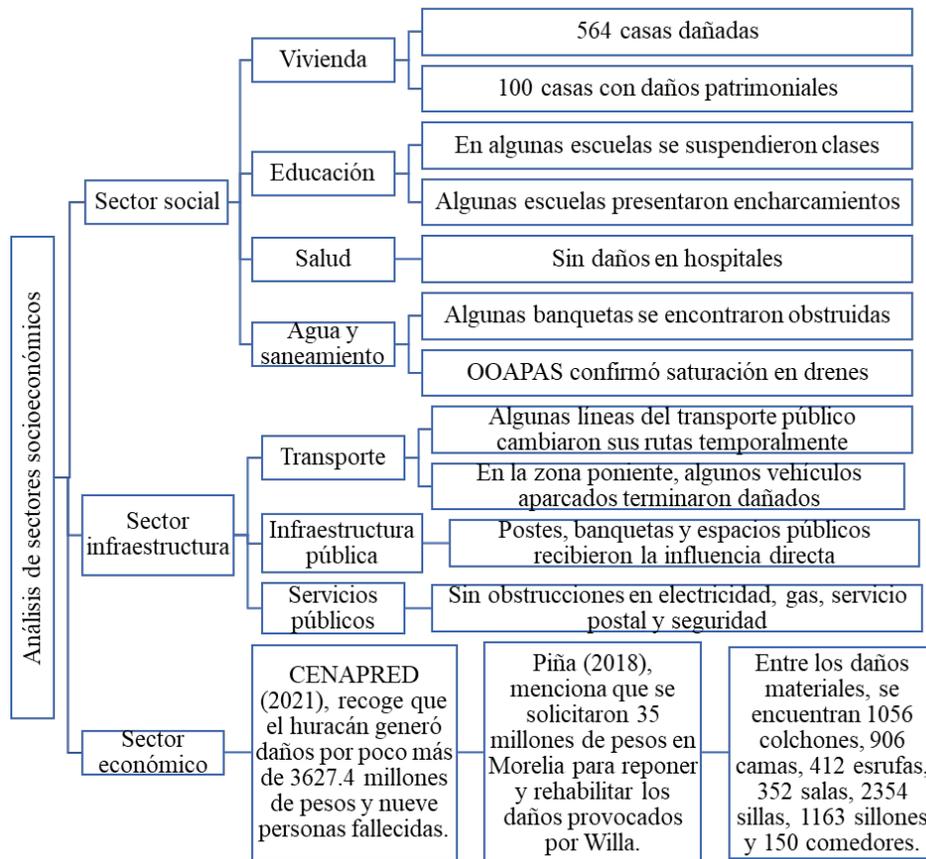


Figura 10. Análisis de los sectores socioeconómicos en la ciudad de Morelia.

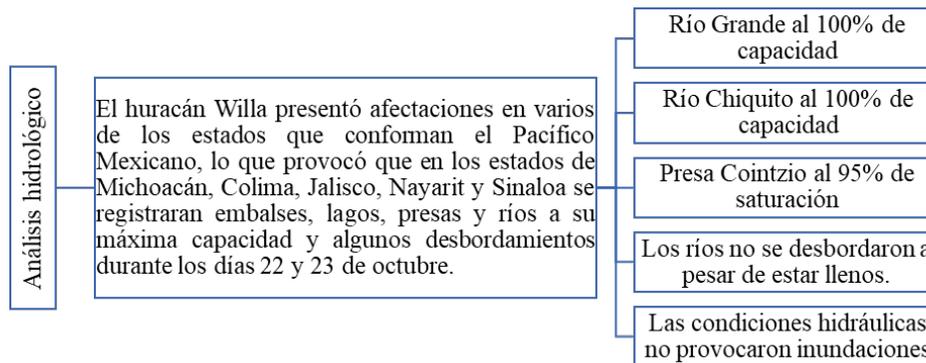


Figura 11. Análisis hidrológico en la ciudad de Morelia.

Conclusiones

Los planes y programas de acción, así como los atlas de riesgo vigentes consultados tanto del ámbito estatal como del municipal hacen mención de un sistema de alcantarillado deficiente, lo cual provoca que el funcionamiento del mismo no resulte completamente óptimo y, por lo tanto, ya no se pueda permitir el paso del agua hacia el mismo.

La red de drenaje, a diferencia de la presencia del Río Chiquito, sí resultó ser un problema durante el paso del huracán Willa puesto que en el análisis forense se recoge que, efectivamente, el mismo se mostró en su máxima capacidad y permitió que el agua precipitada y proveniente de las zonas altas de la microcuenca quedara estancada en algunas partes de la zona de estudio, en particular en las correspondientes a una topografía uniforme. El

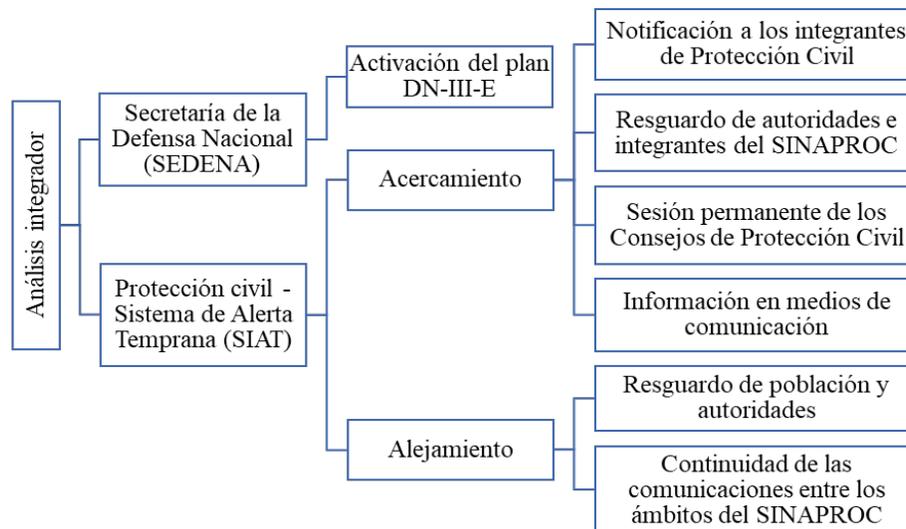


Figura 12. Resumen de causas y consecuencias de la tormenta en la zona de estudio.

problema, aparte de la deficiente infraestructura con la que se cuenta al respecto al verse rebasados los Tr de diseño utilizados en su momento, se debe también a la cultura que se cuenta con la gestión de los residuos sólidos.

Se sugiere una actualización normativa de los periodos de retorno en términos de las nuevas condiciones climatológicas con que cuenta el país, en base a los enfoques de cambio climático, dado que mucha infraestructura hidráulica e hidrológica se encuentra rebasada por las lluvias actuales no obstante a tener estas un Tr menor que el especificado en el diseño.

Referencias

- Arreygue E, Garduño V, Canuti P, Casagli N, Iotti A (2005). Riesgos Geomorfológicos e hidrológicos en la ciudad de Morelia, Michoacán, México. Depto. de Geología y Mineralogía IMM, UMSNH, Morelia. México.
- Arreygue-Rocha E (2008). Evaluación de las constantes inundaciones en la ciudad de Morelia, Michoacán, México. Instituto de Investigaciones Metalúrgicas, UMSNH, Morelia. México.
- Arreygue-Rocha *et al.* (2012). Estudio de las inundaciones en la Ciudad de Morelia, Michoacán, México. *Revista de Geología Aplicada a la Ingeniería y al Ambiente*. 103 - -110.
- Bernal Trejo EG (2013). La gestión urbano resiliente en la ciudad de Morelia, Michoacán. División de Estudios de Posgrado, Facultad de Derecho y Ciencias Administrativas, UMSNH. Morelia, México.
- Bladé E, Cea L, Corestein G, Escolano E, Puertas J, Vázquez-Cendón E, Dolz J, Coll A (2014). Iber: Herramienta de simulación numérica del flujo en ríos. *Revista Internacional de Métodos Numéricos para Cálculo y Diseño en Ingeniería* 30(1): 1-10. doi:[10.1016/j.rimni.2012.07.004](https://doi.org/10.1016/j.rimni.2012.07.004)
- Brennan, Michael J (2019) Hurricane Willa (EP242018). National Hurricane Center, Tropical Cyclone Report. National Oceanic and Atmospheric Administration.
- CENAPRED, Centro Nacional de Prevención de Desastres (2016). Atlas Nacional de Riesgos, Cobertura de atlas municipales. Disponible en <http://www.atlasnacionalderiesgos.gob.mx/archivo/cob-atlas-municipales.html>.
- CENAPRED (2021). Impacto Socioeconómico de los Principales Desastres. Secretaría de Seguridad y Protección Ciudadana. Centro Nacional de Desastres, México.
- Gutierrez-Lopez A (2022). Methodological Guide to Forensic Hydrology. *Water* 14(23). doi:[10.3390/w14233863](https://doi.org/10.3390/w14233863)
- Hernández J, Vieyra A (2014). Precariedad habitacional en el peri-urbano de la ciudad de morelia, una ciudad media mexicana: ¿El desastre nace o se hace? *Revista de Geografía Norte Grande* (47): 45-60. Disponible en https://www.scielo.cl/scielo.php?pid=S071834022010000300003&s-cript=sci_arttext

- Lischeid G, Balla D, Dannowski R, Dietrich O, Kalettka T, Merz C, Schindler U, Steidl J (2017). Forensic hydrology: what function tells about structure in complex settings. *Environmental Earth Sciences* 76(1). doi:[10.1007/s12665-016-6351-5](https://doi.org/10.1007/s12665-016-6351-5)
- OECD (2016). Financial management of food risk. Disponible en <https://www.oecd.org/finance/financial-management-of-flood-risk.htm>.
- Pablo Feliciano G (2012). Inundaciones en Zonas Urbanas. Facultad de Estudios Aragón. Superiores, Universidad Nacional Autónoma de México. San Juan de Aragón, México.
- Piña I (2018). Necesarios 35 mdp para solventar daños por "Willa". Recuperado el 13 de abril de 2022, de <https://www.contramuro.com/necesarios-35-mdp-para-solventar-danos-por-willa/>.
- Ramírez Orozco AI, Herrera Lozano A (2016). Forensic hydrology. En *Forensic Analysis-From Death to Justice*. IntechOpen. doi:<http://dx.doi.org/10.5772/64616>
- SEDERMA (2018). Gaceta Ambiental, Revista publicación trimestral Año: 13 Número: 01/ enero-marzo 2019. Secretaría de Desarrollo Rural y Medio Ambiente. Subsecretaría de Medio Ambiente.
- UNESCO World Water Assessment Programme (2012). *United Nations world water development report 4: Managing water under uncertainty and risk*. Disponible en <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000215644>.
- Vázquez Correa Lorena; Palazuelos Covarrubias Israel, "Principales retos y pendientes ante las inundaciones en México", Mirada Legislativa, No. 138, Ciudad de México, Instituto Belisario Domínguez, Senado de la República, 21p. Disponible en <http://bibliodigitalibd.senado.gob.mx/handle/123456789/3791>.
- Wang Y, Li Z, Tang Z, Zeng G (2011). A GIS-Based Spatial Multi-Criteria Approach for Flood Risk Assessment in the Dongting Lake Region, Hunan, Central China. *Water Resources Management* 25(13): 3465-3484. doi:[10.1007/s11269-011-9866-2](https://doi.org/10.1007/s11269-011-9866-2)