



Identificación de zonas de riesgo por inundación en la Ciudad de Morelia, Michoacán, y propuesta de un sistema de monitoreo a través de estaciones meteorológicas

Identification of flood risk areas in the City of Morelia, Michoacán, and proposal for a monitoring system through meteorological stations

Israel García Ledesma^{ID}, Sonia Tatiana Sánchez Quispe^{ID}, Jesús Pardo Loaiza*^{ID}, Constantino Domínguez Sánchez^{ID}

Facultad de Ingeniería Civil, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Morelia, Michoacán, México.

Historial

Manuscrito recibido: 19 de enero de 2024

Manuscrito aceptado: 22 de agosto de 2024

Manuscrito publicado: agosto 2024

*Autor para correspondencia

Jesús Pardo Loaiza

e-mail: jesus.pardo@umich.mx

ORCID: 0000-0001-6473-8598

Resumen

El propósito de este trabajo es definir las zonas propensas a inundaciones en la Ciudad de Morelia, para diseñar una red de monitoreo de precipitación que advierta a la población en riesgo de inundación. Para ello, se recopiló información histórica sobre inundaciones previas que han impactado la Ciudad, para identificar las áreas más afectadas y, en consecuencia, delimitar su área de influencia. Esto condujo a la identificación de las ubicaciones estratégicas para la instalación de estaciones de monitoreo. Los Sistemas de Alerta Temprana (SAT) desempeñan un papel esencial en la mitigación del riesgo de inundaciones, permitiendo a la población protegerse ante tales eventos, reduciendo de manera significativa sus efectos adversos.

Palabras clave: Inundaciones, monitoreo de precipitación, riesgo social, sistemas de alerta temprana.

Abstract

The aim of this study is to delineate flood-prone areas in the City of Morelia, in order to devise a precipitation monitoring network that forewarns the flood-vulnerable population. Towards this goal, historical data on previous floods were compiled to identify the most affected zones within the city and consequently define their sphere of influence. This process led to the pinpointing of strategic locations for the installation of monitoring stations. Early Warning Systems (EWS) play a crucial role in flood risk mitigation, enabling the population to shield themselves against such events and significantly mitigate their adverse effects.

Keywords: Floods, rainfall monitoring, social risk, early warning systems.

Introducción

Las inundaciones son uno de los fenómenos meteorológicos que dominan la lista de catástrofes tanto en términos de pérdidas humanas como económicas, según un análisis de la Organización Meteorológica Mundial (ONU-Hábitat, 2022). Esto derivado de la recurrencia con la que se presentan y el aumento de la población, lo que genera asentamientos en zonas con riesgo de inundación, aunado a la consecuente insuficiencia que tienen las estructuras de drenaje en la mayoría de las ciudades del mundo. Los sistemas de drenaje deficientes de baja capacidad de almacenamiento y el crecimiento e infiltración du-

rante las tormentas, la falta de mantenimiento y el crecimiento urbano heterogéneo son las principales causas de las inundaciones en zonas urbanas (Eini *et al.*, 2020). De acuerdo con Benito *et al.* (2021) existe un amplio consenso científico de que el cambio climático producirá variaciones en las inundaciones, con lo que la infraestructura existente no podría cumplir adecuadamente con la función para la que fue diseñada (Peck *et al.*, 2014).

Por lo general, las lluvias extraordinarias son la principal causa de inundaciones, lo que pone en peligro vida y bienes materiales (Alarcón Neva *et al.*, 2020); las Inundaciones Repentinas Urbanas

(IRU) se distinguen por tener una escala de tiempo inferior a 6 horas entre la precipitación y el inicio de la inundación. Las IRU han despertado un gran interés en la comunidad científica ya que, en comparación con los territorios rurales, las zonas urbanas tienen elementos expuestos de mucho mayor valor (Galuppini *et al.*, 2020).

Desde su fundación, la Ciudad de Morelia ha sufrido diversos episodios de inundación, ya que las condiciones topográficas e hidrográficas de la región, constituyen elementos que incrementan su vulnerabilidad (Bernal, 2015). En esta urbe se han presentado múltiples inundaciones, ocasionando pérdidas económicas y de infraestructura (CONAGUA, 2016).

Morelia, en su calidad de capital del estado de Michoacán, representa la principal concentración urbana de la entidad, misma que ha sufrido a lo largo de su historia diferentes procesos en la conformación territorial y crecimiento poblacional (Hernández Guerrero y Vieyra, 2014). Pese a ser vulnerable a inundaciones, la respuesta por parte de las autoridades para mitigar los efectos de este fenómeno es insuficiente, o simplemente, no existen los elementos necesarios para gestionar el riesgo que dichos fenómenos ambientales representan, haciendo que se perciban como catástrofes por los daños que causan, en ocasiones irreversibles, particularmente en las áreas cercanas a ríos y arroyos (Alarcón Neva, 2018).

De acuerdo con Bernal-Trejo (2018), los costos de la solución integral de los daños durante los temporales de lluvia en la ciudad de Morelia ascienden a alrededor de 40 millones de dólares debido a las inundaciones, de los cuales sólo se disponen de 250,000 dólares para mitigar sus consecuencias. En los últimos años, los costos se han incrementado debido al creciente aumento de damnificados, por lo cual es de suma importancia realizar trabajos que minimicen estas pérdidas.

La presente investigación tiene como objetivo identificar las zonas de inundación existentes en la zona urbana de la Ciudad de Morelia, con la finalidad de proponer estaciones climatológicas de monitoreo en puntos estratégicos que permitan advertir a la población vulnerable a los eventos de

inundación que continuamente afectan a la ciudad, y con ello reducir las pérdidas económicas y sociales subsiguientes.

Materiales y métodos

La delimitación y caracterización de las zonas de inundación que se encuentran dentro del espacio urbano de la Ciudad constituye la primera etapa en la definición de un plan de acción en la prevención y gestión de las inundaciones. El presente trabajo consta de dos estrategias para cumplir los objetivos planteados; la primera consistió en delimitar y caracterizar las zonas de inundación históricamente afectadas. La cuantificación de los daños permite establecer los sitios más propensos para priorizar acciones futuras. Otro aspecto importante en la prevención y gestión de las inundaciones es el monitoreo de la precipitación; para ello, se lleva a cabo la búsqueda de las estaciones climatológicas existentes en la ciudad y la delimitación de la zona de influencia que tiene cada una de ellas, con la finalidad de identificar las zonas que requieren monitoreo localizado (**Figura 1**).

Para la delimitación de las zonas de inundación,

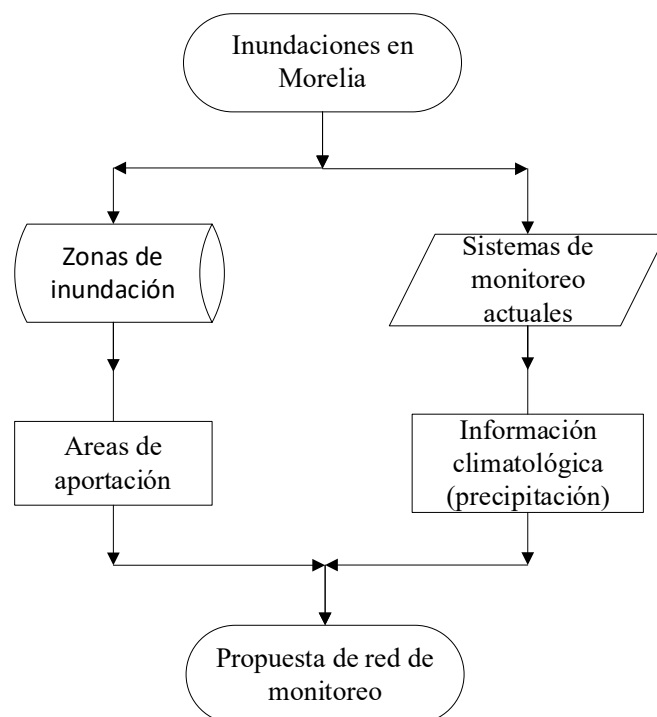


Figura 1. Diagrama metodológico

se documentaron las inundaciones con mayor riesgo que ha sufrido la ciudad de Morelia en el periodo histórico de 2010 a 2022, incluyendo aquellas que más pérdidas económicas generaron y en las que se activó el Plan de Auxilio a la Población Civil en Casos de Desastre denominado (Plan DN-III).

Posteriormente, se realizó la delimitación de las zonas de aportación a las áreas inundadas, que se encuentran en espacios topográficamente más bajos.

De forma paralela, se realizó la búsqueda de los sistemas de monitoreo meteorológico de uso libre que se tienen en Morelia, con la finalidad de establecer la zona de influencia de cada una de las estaciones meteorológicas y verificar si abarcan la zona de estudio y revisar la calidad y escala temporal (mensual, diaria, horaria, minutos) de los datos registrados. Finalmente, se realizó el análisis de las zonas de inundación, la distribución del monitoreo actual y la necesidad de actualizar o proponer un

nuevo sistema de monitoreo de la precipitación y evaluar las posibles consecuencias que esta genera de manera espacialmente distribuida.

Resultados y discusión

Caracterización de la zona de estudio

El Municipio de Morelia se localiza al norte del estado de Michoacán, entre los paralelos 19°27'06" y 19°50'12" de latitud norte y los meridianos 101°01'43" y 101°30'32" de longitud oeste, a una altitud promedio de 1,920 metros sobre el nivel del mar. Cuenta con una superficie de 119,349.7 hectáreas, representando el 2% del territorio estatal (**Figura 2**). El 18% de la población del estado de Michoacán habita en este municipio (849,053 habitantes de acuerdo con el censo de Población y Vivienda de 2020), principalmente en la Ciudad de Morelia, que es el área urbana de mayor extensión y población en el estado. Colinda con 14

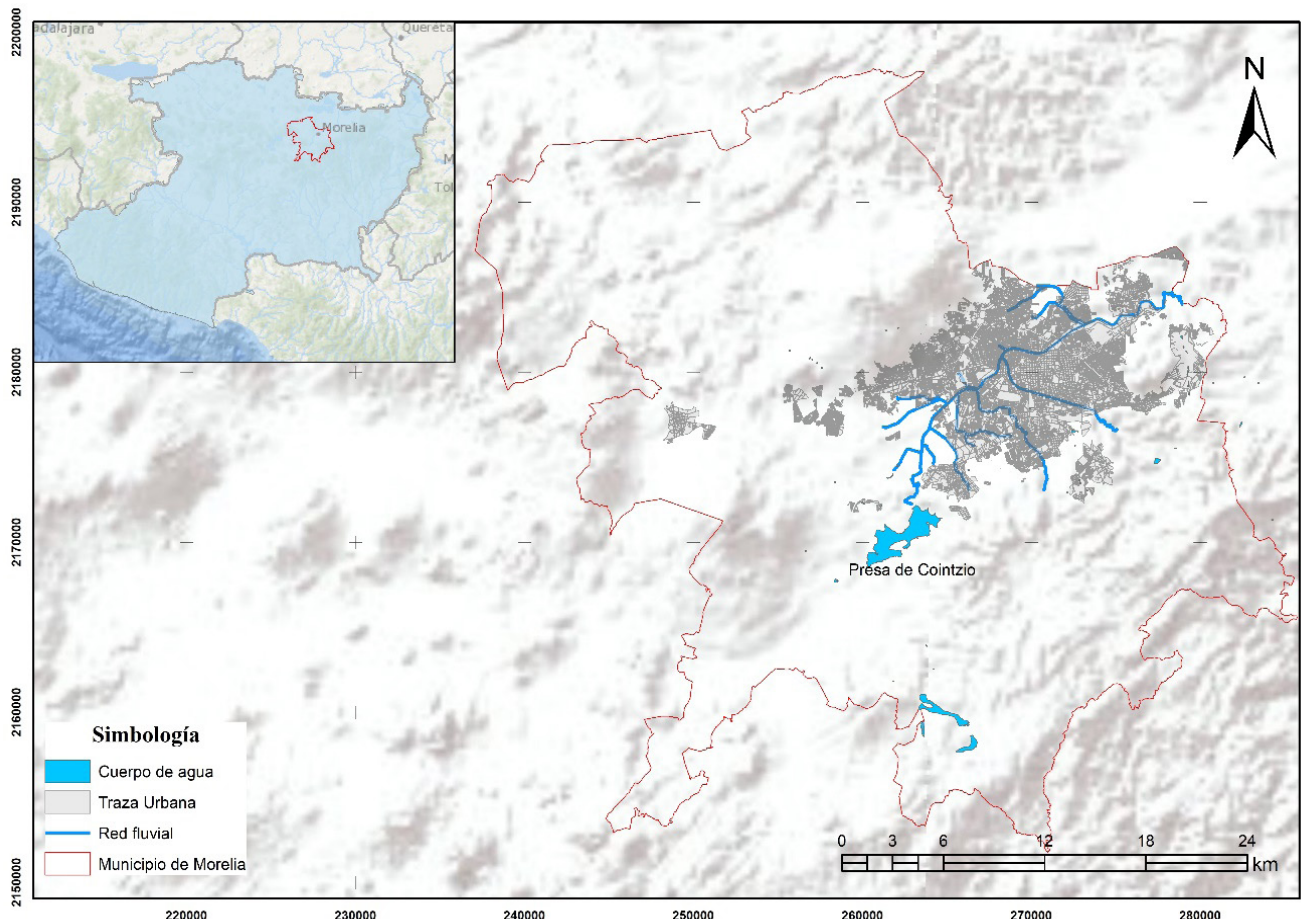


Figura 2. Localización de la zona de estudio.

municipios: al norte con Tarímbaro, Chucándiro, Copándaro y Huaniqueo; al este con Charo; al sureste con Tzitzio; al sur con Madero y Acuitzio; al suroeste con Huiramba y Pátzcuaro, y al oeste con Lagunillas, Tzintzuntzan, Quiroga y Coeneo (INEGI, 2020). Por su parte, la precipitación pluvial se presenta principalmente durante el temporal de lluvias (mayo a octubre), con una media anual de 780 mm (Hernández Guerrero y Vieyra, 2010).

Historia de las inundaciones

En primer lugar, se realizó una investigación de las principales inundaciones que han afectado a la ciudad de Morelia en el periodo de 2010 a 2022, para determinar las zonas de inundación recurrentes (Figura 3).

Evidentemente la lista se puede incrementar, ya que la recurrencia de eventos de inundación en la Ciudad es muy grande y se observa un claro crecimiento tanto en la recurrencia de las inundaciones como en la afectación que estas generan. En la **Figura 4** se aprecia que existen zonas recurrentes de inundación, las cuales tienen diferentes orígenes.

Tomando en cuenta lo anterior, en Morelia se tienen inundaciones identificadas por los drenajes sobrecargados derivado de lluvias intensas en sitios localizados y por desbordamiento de ríos. Se observa qué, en lo referente al desbordamiento de

los ríos, se requieren estaciones de monitoreo que midan en tiempo real lo que ocurre en la parte alta de la cuenca, ya que el escurrimiento que se genera ocasiona el desbordamiento de los drenes aguas abajo, mientras que en la parte urbana se requiere un análisis espacial de la zona de aportación en cada uno de los sitios vulnerables a inundación. Como se puede ver en la **Figura 5**, se requiere una red de monitoreo que permita alertar a la población en riesgo, ya que las inundaciones generadas en la Ciudad demandan un tiempo de respuesta muy rápido debido a que en su mayoría son zonas de nula infiltración, lo que genera una mayor velocidad en los escurrimientos generados.

Sistemas de información meteorológica en Morelia

Los sistemas de alerta son la medida preventiva no estructural por excelencia; ya que, permiten a la población reaccionar de manera anticipada ante una inundación resguardando su salud y los bienes que se encuentren expuestos. Una red de monitoreo espacialmente distribuida dentro de la zona urbana de la Ciudad que sea de acceso público, permite tener una delimitación más fina a las zonas vulnerables a inundación, teniendo en consideración la traza urbana de la ciudad y el posible crecimiento de la mancha urbana; con ello, es posible reducir las pérdidas ocasionadas por una inundación.

Actualmente, Morelia cuenta con una estación climatológica por parte la Red Universitaria de Observatorios Atmosféricos (RUOA) de la UNAM, la cual realiza mediciones cada minuto. También se cuenta con una estación automática del Sistema Meteorológico Nacional (SMN), la cual realiza mediciones a cada hora y una estación de la red de Estaciones Meteorológicas Automáticas (EMAS). Sin embargo, la información de estas últimas dos no es de acceso directo al público y se debe solicitar la información directamente en la dependencia, por lo que para fines de esta investigación no son funcionales. Por otra parte, del mismo SMN se tiene una estación dentro de la Ciudad, la cual realiza mediciones de precipitación total por día; sin embargo, esta información no se encuentra actualizada ya que se tienen datos hasta el 2015; por lo que, para fines

2013	21 colonias afectadas y al menos una persona fallecida por lluvia el 10 de julio (Notimex, 2013).
2015	32 colonias afectadas por lluvia el 15 de marzo (Guerrero, 2015).
2016	Al menos una decena de colonias afectadas por lluvia el 29 de julio (Pacheco, 2016).
2017	Al menos 20 colonias afectadas por lluvia el 07 de junio (Arrieta, 2017).
2018	Se declara situación de desastre por las lluvias registradas el 09 y 10 de Julio (DOF, 2018).
2018	Desbordamiento de una represa y colonias inundadas quedan como resultado de la tormenta del 22 de octubre (Villanueva, 2018).
2018	Al menos 24 colonias afectadas por lluvia el 22 de octubre (La voz, 2018).
2022	La Comisión Nacional del Agua el 22 de mayo declara al menos 54 colonias susceptibles a inundación (Velazquez, 2022).
2022	Inundaciones y vehículos dañados en diversas zonas de la ciudad por lluvia el 14 de agosto (Gaytan, 2022).

Figura 3. Inundaciones históricas de la Ciudad de Morelia.

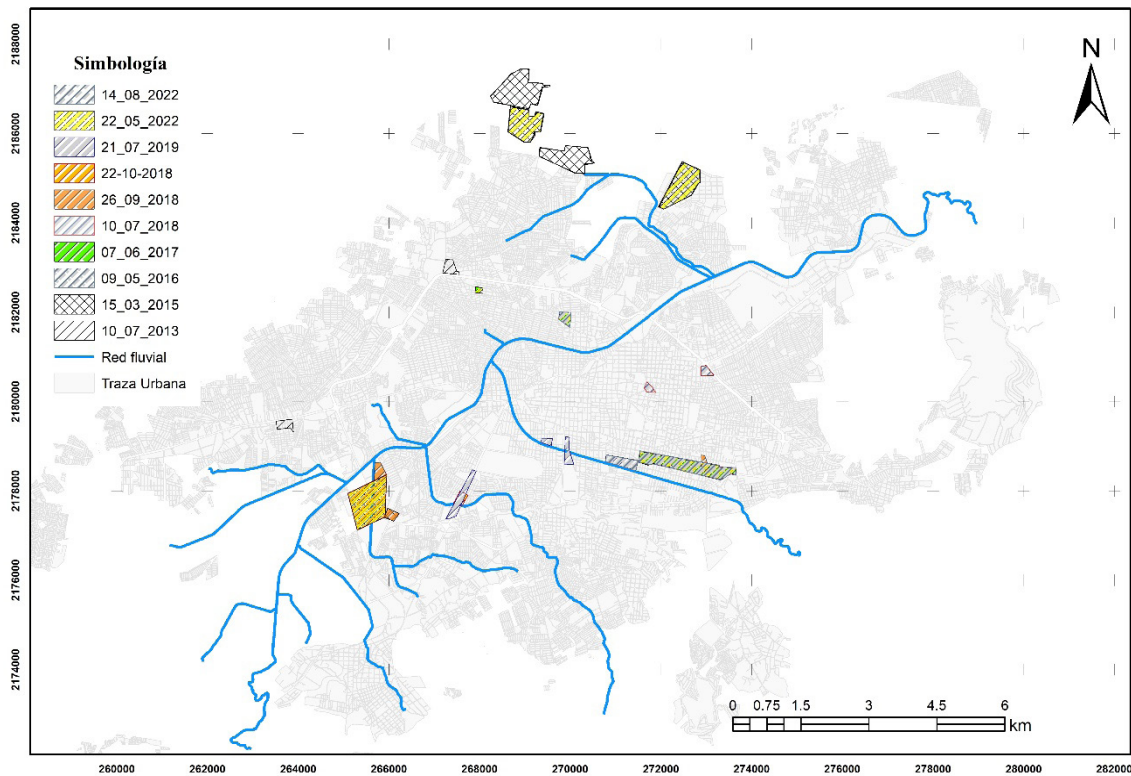


Figura 4. Ubicación espacial de las zonas de inundación en Morelia.

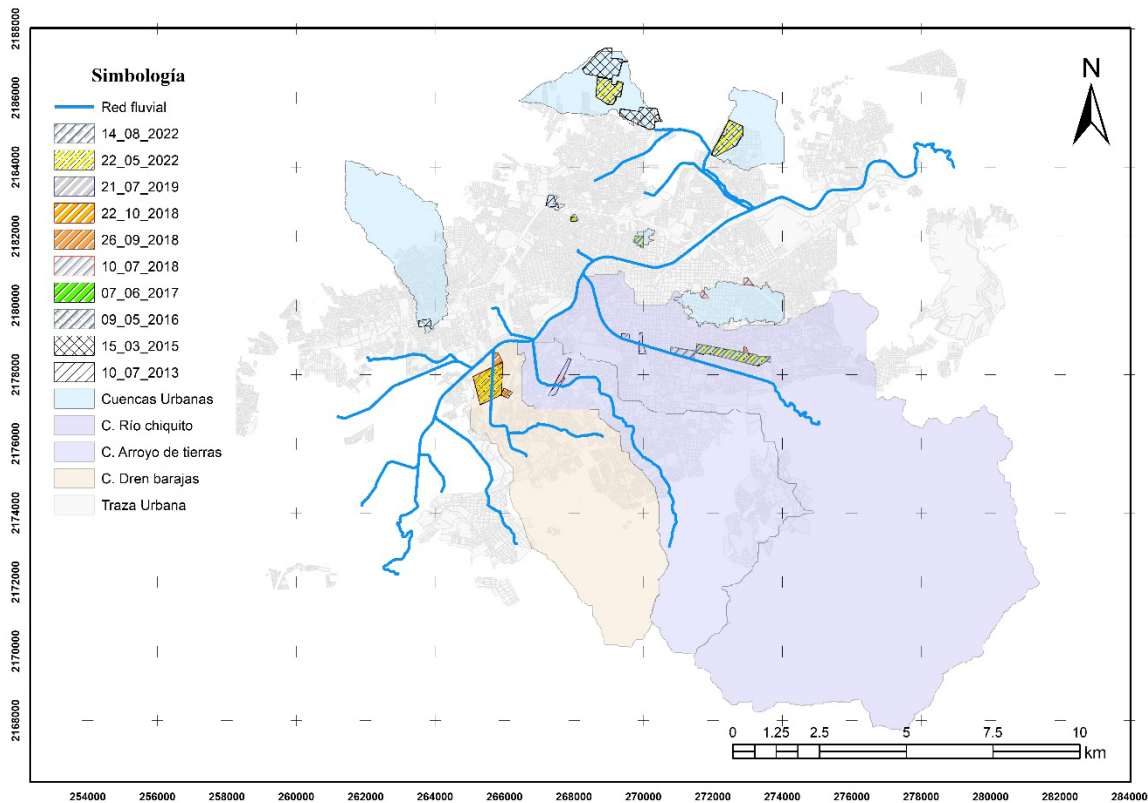


Figura 5. Cuencas de aportación en las zonas de inundación.

de alertar a la población no es aplicable.

El Organismo Operador de Agua Potable Alcantarillado y Saneamiento de Morelia (OOAPAS), cuenta con una red de 9 estaciones climatológicas en Morelia; no obstante, la ubicación espacial de las mismas no está disponible y la información que toma a cada minuto no es almacenada en ninguna base de datos. Debido a esto, la información de las estaciones que conforman esta red no es del todo accesible para la ciudadanía, ya que no se encuentra disponible la ubicación de estas. Por lo tanto, actualmente en la ciudad se dispone de una estación meteorológica con medición a cada minuto de acceso público que puede servir de alerta a la población y es la estación que forma parte de RUOA (**Figura 6**). De acuerdo con esta información, es evidente que se requiere trabajar en un sistema de monitoreo funcional y de acceso público que sirva para alertar a la población que se localiza en zonas susceptibles a inundación.

En el presente trabajo se propone la instalación de estaciones meteorológicas de bajo costo, como lo sostiene Rodríguez-Licea (2020), las cuales registran precipitación en tiempo real y se comunican vía wifi compartiendo la información en la página saii.umich.mx. La ubicación propuesta de las estaciones que integren la red de monitoreo estará, en el centroide de cada una de las microcuencas principales de la ciudad (**Figura 6**), con el propósito de tener al menos un sitio de monitoreo por microcuenca y poder analizar de manera aislada lo que ocurre en cada una de ellas. Con esto se podrá alertar a la población que se ubique en zonas de riesgo y posteriormente se puedan proponer medidas estructurales que ayuden a mitigar los efectos adversos que generan las inundaciones. Las estaciones propuestas tendrían una red de comunicación local basada en ondas de radio, lo cual reduce el error en la comunicación de la información, brindando información en tiempo real sobre la evolución de la tormenta.

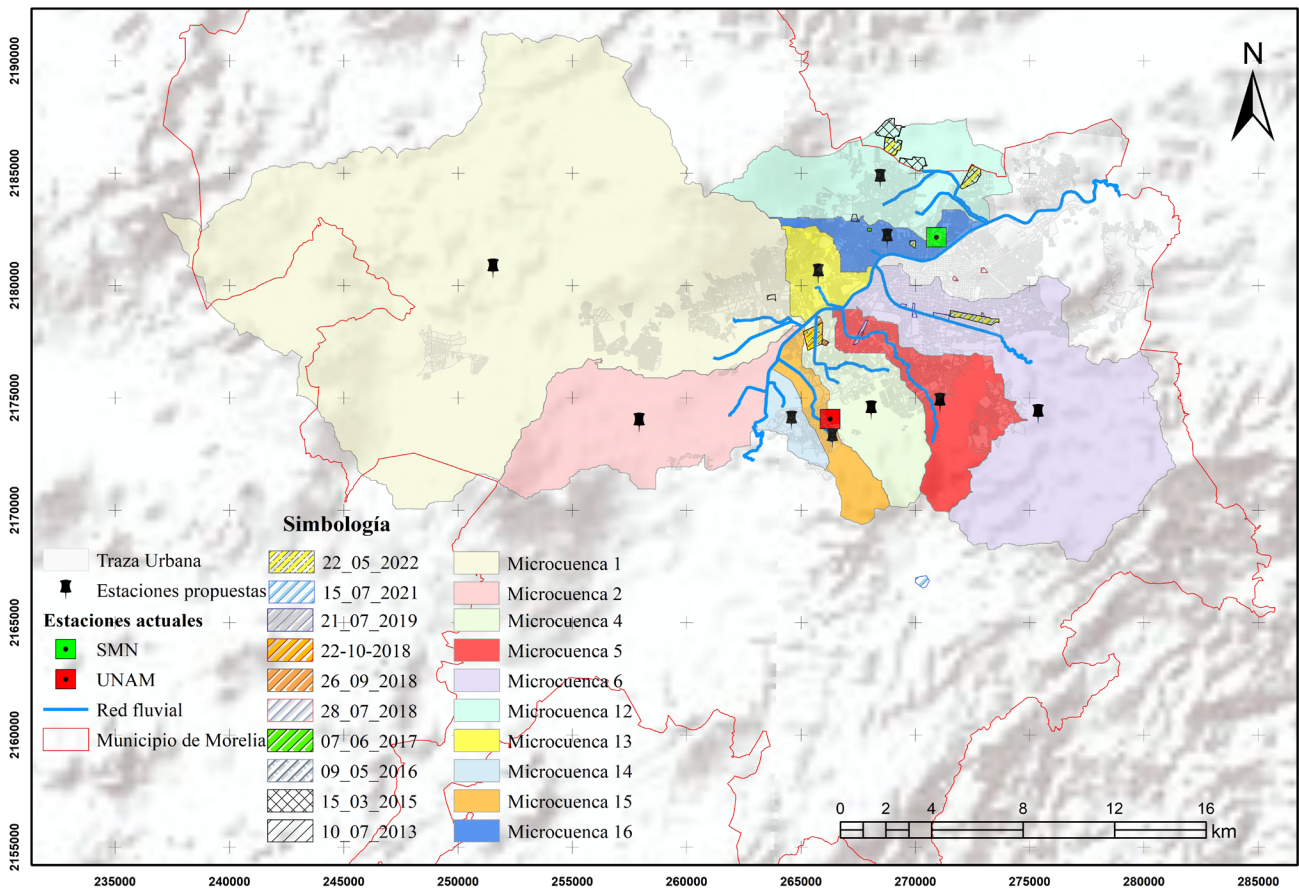


Figura 6. Ubicación de las estaciones meteorológicas existentes y propuestas.

Actualmente, la ubicación de las estaciones meteorológicas no se encuentra disponible debido a que las páginas se encuentran fuera de servicio (saih) o como el caso del OOAPAS, no comparte la ubicación geográfica de estas, solo el nombre de la estación y el registro, únicamente se cuenta con la ubicación espacial de las estaciones de la UNAM y el SMN.

Conclusiones

Las inundaciones que se presentan en la Ciudad de Morelia tienen patrones de recurrencia en sitios puntuales, es por ello que surge la necesidad de aplicar medidas de mitigación que permitan disminuir las pérdidas generadas año con año. Debido al costo elevado que presentan las medidas de mitigación de tipo estructural, la implementación de medidas no estructurales como los sistemas de alerta son indispensables para disminuir los efectos adversos en la sociedad.

El sistema de monitoreo propuesto en esta investigación cubre la mancha urbana de la Ciudad de Morelia; lo cual permitirá realizar la medición y el pronóstico anticipado de las posibles inundaciones que se generan por el incremento del volumen de escurrimiento por la precipitación, de esta manera la ciudadanía ubicada en zonas de riesgo podrá ser alertada antes de verse afectada para salvaguardar su integridad y su patrimonio.

Agradecimientos

Los autores agradecen a la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, en especial al Programa de Doctorado en Ingeniería Civil y al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencia y Tecnologías (CONAHCyT).

Referencias

Alarcón Neva A (2018). Estimación de áreas vulnerables a inundaciones en zonas urbanas, caso: Morelia, Michoacán, México: MSc thesis, Colegio de Postgraduados.

Alarcón Neva A, Chávez Morales J, Palacios Vélez ÓL, Ibáñez Castillo LA (2024) Estimación de áreas vulnerables a inundaciones en zonas urbanas: Morelia, Michoacán, México. *Tecnología y ciencias del agua* 11(3):01-26. doi:10.24850/tyca-2020-03-01

Benito G, Beneyto C, Aranda JÁ, Machado M, Francés F, Sánchez-Moya Y (2021). Inundaciones y cambio climático: certezas e incertidumbres en el camino a la adaptación. *Cuadernos de Geografía* 107:191-216. doi:10.7203/CGUV.107.21424

Bernal E (2015). La gestión de riesgos de inundación en la administración pública caso Morelia. 20° Encuentro Nacional Sobre Desarrollo Regional En México.

Bernal-Trejo EG (2018). La Gestión de Riesgos de Inundaciones en la Ciudad de Morelia, Michoacán 2016-2017: Tesis de Maestría, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.

CONAGUA (2016). Actualización del estudio para el control de avenidas en el sistema Río Grande-río Chiquito de la presa Cointzio a su desembocadura al lago de Cuitzeo.

Eini M, Kaboli HS, Rashidian M, Hedayat H (2020). Hazard and vulnerability in urban flood risk mapping: Machine learning techniques and considering the role of urban districts. *International Journal of Disaster Risk Reduction* 50:101687. doi:10.1016/j.ijdr.2020.101687

Galuppini G, Quintilliani C, Arosio M, Barbero G, Ghilardi P, Manenti S, Petaccia G, Todeschini S, Ciapponi C, Martina MLV, Creaco E (2020). A unified framework for the assessment of multiple source urban flash flood hazard: the case study of Monza, Italy. *Urban Water Journal* 17(1):65–77. doi:10.1080/1573062X.2020.1734950

Hernández Guerrero JA, Vieyra A (2014). Precariedad Habitacional en el peri-urbano de la ciudad de Morelia, Michoacán: riesgos de desastre por inundaciones. En Vieyra A, Larrazábal A (eds.) *Urbanización, sociedad y ambiente: experiencias en ciudades medias*. Centro de Investigaciones en Geografía Ambiental (CIGA), pp 271-293.

Hernández Guerrero JA, Vieyra A (2010). Riesgo por inundaciones en asentamientos precarios del periurbano. Morelia, una ciudad media mexicana: ¿El desastre nace o se hace? *Revista de Geografía Norte Grande* 47:45–62. doi:10.4067/S0718-34022010000300003

INEGI (2020). Marco Geoestadístico. Censo de Población y Vivienda 2020.

ONU-Hábitat (2022). El Programa de las Naciones Unidas para los Asentamientos Humanos. <https://onuhabitat.org.mx/index.php/sequias-tormentas-e-inundaciones-el-agua-y-elcambio-climatico-dominan-la-lista-de-desastres>

Paquier A, Bazin PH, El Kadi Abderrezzak K (2020). Sensitivity of 2D hydrodynamic modelling of urban floods to the forcing inputs: lessons from two field cases. *Urban Water Journal*

17(5):457-466. doi:10.1080/1573062X.2019.1669200

Peck AM, Bowering EA, Simonovic SP (2014). A flood risk assessment to municipal infrastructure due to changing climate part II: case study. *Urban Water Journal* 11(7):519-

531. doi:10.1080/1573062X.2013.781760

Rodríguez-Licea D (2020). Sistema Automático de información Hidrológica de Morelia. Tesis de Maestría, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.