

Prospección geoespacial de inundaciones en una ciudad capital del Golfo de México

Andrés De la Rosa ^{1*}, Laura C. Ruelas-Monjardín ², Raymundo Dávalos-Sotelo ¹

¹ Instituto de Ecología A.C. Coatepec 351, El Haya, 91073 Xalapa-Enríquez, Veracruz, México.

² Instituto Tecnológico Superior de Xalapa. Sección 5A Reserva Territorial S/N, Santa Bárbara, 91096 Col. Santa Bárbara, Veracruz, México.

Resumen: Los riesgos ambientales son una preocupación para la habitabilidad del planeta. Se estima que para 2050, el 68 % de la población mundial vivirá en ciudades, y en México, el 79 % ya reside en áreas urbanas. Esta concentración poblacional enfrenta amenazas como la variabilidad climática y los efectos derivados del cambio climático, que se manifiestan en fenómenos meteorológicos extremos, incluyendo inundaciones. El índice topográfico de humedad (TWI por sus siglas en inglés) es una herramienta útil para identificar áreas susceptibles a inundaciones y planificar infraestructura preventiva. En esta investigación, se realizó un análisis diacrónico hemerográfico digital de inundaciones en Xalapa de Enríquez, Veracruz, México; modelando el TWI con datos procedentes de LIDAR para identificar zonas propensas a inundaciones. También se analizaron la marginación, el arbolado *per cápita* y el drenaje pluvial de la ciudad. Los resultados mostraron que, en 18 años ocurrieron 369 inundaciones en 120 colonias, afectando al 61.5 % de los habitantes. El 56 % de las inundaciones ocurrieron entre 2017 y 2022. Dos de las tres colonias con más inundaciones tienen un grado de marginación medio. El 39.8 % de las colonias tiene menos de 5 m² de arbolado por habitante, incumpliendo la legislación local, y el 56.7 % no alcanza los 15 m² recomendados internacionalmente. El TWI reveló que el 45 % de la superficie inundable no está registrada en el apartado de Amenazas y Vulnerabilidad a Inundaciones del Programa Municipal de Ordenamiento Territorial. Las 10 colonias con más inundaciones tienen los porcentajes más bajos de alcantarillado pluvial. Se concluye que es factible y deseable replicar el TWI en otras ciudades para prevenir inundaciones y planificar obras de gestión integral del riesgo de desastres, valorando la superficie arbolada *per cápita* en coordinación con mejoras en el drenaje pluvial, mediante un enfoque intraurbano de colonia.

Palabras clave: índice topográfico de humedad, inundaciones urbanas, equidad forestal intraurbana, marginación social, equipamiento urbano ante inundaciones.

Geospatial flood prospecting in a capital city on the Gulf of Mexico

Abstract: Environmental risks are a concern for the habitability of the planet. It is estimated that by 2050, 68 % of the world's population will live in cities, and in Mexico, 79 % already reside in urban areas. This population concentration faces threats such as climate variability and the effects of climate change, which manifested themselves in extreme weather events, including flooding. The Topographic Wetness Index (TWI) is a useful tool for identifying areas susceptible to flooding and planning preventive infrastructure. In this research, a diachronic digital hemerographic analysis of flooding in Xalapa de Enríquez, Veracruz, Mexico; was performed by modeling the TWI with LIDAR data to identify flood-prone areas. Marginalization, per capita tree cover and storm drainage

To cite this article: De la Rosa, A., Ruelas-Monjardín, L.C., Dávalos-Sotelo, R. 2025. Geospatial flood prospecting in a capital city on the Gulf of Mexico. *Revista de Teledetección*, 65, 22340. <https://doi.org/10.4995/raet.2025.22340>

* Corresponding author: delarasoportilla@gmail.com

in the city were also analyzed. The results showed that, in 18 years, 369 floods occurred in 120 neighborhoods, affecting 61.5 % of the inhabitants. 56 % of the floods occurred between 2017 and 2022. Two of the three colonias with the most floods have a medium degree of marginalization. 39.8 % of the colonias have less than 5 m² of trees per inhabitant, failing to comply with local legislation, and 56.7 % do not reach the internationally recommended 15 m². The TWI revealed that 45 % of the floodable surface is not registered in the Flood Hazards and Vulnerability section of the Municipal Land Use Planning Program. The 10 neighborhoods with the most flooded have the lowest percentages of storm sewers. It is concluded that it is feasible and desirable to replicate the TWI in other cities to prevent flooding and plan integrated disaster risk management works, valuing the per capita tree-covered area in coordination with improvements in storm drainage, through an intra-urban neighborhood approach.

Key words: topographic wetness index, urban flooding, intraurban forest equity, social marginalization, urban flooding equipment.

1. Introducción

Los riesgos relacionados con el medio ambiente se han posicionado como las principales preocupaciones para la habitabilidad en el planeta, tanto en el corto como mediano plazo. En la próxima década, los riesgos de mayor gravedad serán, en el orden siguiente: los fenómenos meteorológicos extremos, cambios críticos en los sistemas terrestres, pérdida de biodiversidad y colapso de los ecosistemas, así como el agotamiento de recursos naturales. En 2024, la principal preocupación son los fenómenos meteorológicos extremos como huracanes, inundaciones y olas de calor, entre otros, exacerbados por el cambio climático. (World Economic Forum *et al.*, 2024).

En el contexto de las ciudades, la sostenibilidad social se puede explorar desde la relación entre el espacio urbano y la sociedad, debatiendo principalmente sobre el acceso equitativo a bienes y servicios, además de la sostenibilidad de la comunidad (Dempsey *et al.*, 2011). El espacio urbano alberga una población en constante crecimiento, pasando del 25 % en 1950 a cerca del 50 % en 2020; estimándose que la población mundial alcanzó el 56 % en 2021, con la posibilidad de que el 68 % de la población habite estas zonas en el 2050 (United Nations Human Settlements Programme (UN-Habitat), 2022).

En México, el último Censo de Población y Vivienda (Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), 2022b) indica que el 79 % de los mexicanos viven en localidades urbanas. Esta concentración poblacional tiene como amenaza el cambio y la variabilidad climática, manifestándose

en fenómenos meteorológicos extremos más frecuentes e intensos, principalmente inundaciones, olas de calor y deslizamientos de tierra; que coadyuvarán al aumento de pobreza, marginación y desigualdad multidimensionales (UN-Habitat, 2022).

Es justo en esta interacción antrópica en los centros urbanos, donde se ven afectados los servicios ambientales que brindan los ecosistemas, pudiendo mitigar o acelerar las inundaciones, contribuyendo a la vulnerabilidad de la población, entendiéndose como “la predisposición o susceptibilidad física, económica, política o social que tiene una comunidad de ser afectada o de sufrir efectos adversos en caso de que se manifieste un fenómeno peligroso de origen natural, socio natural o antropogénico” (Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED), 2023a).

A nivel mundial, en el periodo de 1998 a 2017, el 90 % de los desastres se debieron a inundaciones, sequías y tormentas severas; y las inundaciones afectaron a más de 2 mil millones de personas (World Health Organization (WHO), 2023). América del Norte y del Sur, acumulan el mayor número de registros de desastres de 1909 al 2022 con 1290 y 1266 eventos, destacando los desastres provocados por tormentas e inundaciones, en primer y segundo lugar, respectivamente (Centre for Research on the Epidemiology of Disasters (CRED), 2023).

En el 2021, las precipitaciones extremas en América Latina registraron valores nunca vistos desde que se tienen registros, generando crecidas de cuerpos de agua, procesos de remoción en

masa e inundaciones. Esta región es la segunda más propensa a este tipo de fenómenos (Vera *et al.*, 2023). No obstante que el 2023 fue el año más cálido jamás registrado, las tormentas, inundaciones y procesos de remoción en masa causaron graves estragos sociales y económicos (Organización Meteorológica Mundial (OMM), 2024). La región experimentó diversos fenómenos meteorológicos y climáticos extremos, confirmando que la intervención humana a través del calentamiento global está alterando la intensidad y frecuencia de estos eventos, exacerbando sus efectos (Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 2023).

En México, del periodo 2000 al 2022, tres estados concentraron el mayor número de declaratorias de desastre por inundaciones: Veracruz de Ignacio de la Llave (Veracruz) ocupó el primer lugar con 166 declaratorias, Tabasco con 69 y Oaxaca con 36 eventos (CENAPRED, 2023b). Es importante señalar que las inundaciones tienen un alto impacto en la población generando mayor pobreza y marginación; lo anterior debido a su naturaleza extensiva, de baja intensidad y alta frecuencia, haciéndolas uno de los riesgos meteorológicos más costosos, requiriéndose enfoques multi e interdisciplinarios para mejorar la prevención, atención y resiliencia de la sociedad ante estos fenómenos (United Nations Office for Disaster Risk Reduction (UNDRR), 2023).

El estado de Veracruz, por su ubicación geográfica en la franja central de las costas del Golfo de México, está expuesto a un gran número de fenómenos naturales como ciclones y lluvias intensas, originando algunos de ellos inundaciones (De la Rosa *et al.*, 2021).

Sin embargo, los paisajes antrópicos como las ciudades modifican el ciclo hidrológico de forma tal que difiere en su comportamiento con los sistemas naturales. Lo anterior, por la presencia de superficies impermeables y alteración topográfica en las zonas urbanas, haciéndolas propensas a la anegación. En estos casos, el índice topográfico de humedad o TWI por sus siglas en inglés, permite identificar zonas susceptibles a inundaciones y plantear proyectos de infraestructura verde (Ballerine, 2017). El TWI considera el efecto de la topografía local y la dirección del flujo de las corrientes superficiales, utilizándose con mayor frecuencia en paisajes rurales y escasamente en

zonas urbanas (Kelleher & McPhillips, 2020). Aunado a ello, la incorporación de datos LIDAR (light detection and ranging), facilita la disponibilidad de modelos digitales de alta resolución espacial (< 10 m). De esta forma, el modelado del TWI, constituye un nuevo enfoque hacia una hidrología más precisa y a menor costo, en comparación con los enfoques tradicionales de estudios hidrológicos e hidráulicos (Higginbottom *et al.*, 2018).

En este contexto, esta investigación tuvo como objetivo llevar a cabo una revisión hemerográfica digital de las inundaciones registradas en la ciudad Xalapa de Enríquez (Xalapa-Enríquez), del estado de Veracruz, México; identificando las colonias donde ocurrió el fenómeno. Posteriormente, se desarrolló el TWI para definir las zonas propensas a inundación; además de analizar las características socioeconómicas (marginación), ambientales (arbolado) y de prevención de inundaciones (drenaje pluvial, atlas de riesgos y ordenamiento territorial).

2. Materiales y métodos

2.1. Área de estudio

La ciudad Xalapa-Enríquez, del municipio de Xalapa, se ubica en la zona centro del Golfo de México, México; en las coordenadas geográficas 19°31'38" Latitud norte, 96°55'22" Longitud oeste a 1392 metros sobre el nivel del mar (INEGI, 2022a). Es la ciudad capital del estado de Veracruz y está conformada por 432 colonias (sinónimo de barrio que indica las partes en que se divide una ciudad) donde habitan 450763 personas (Consejo Nacional de Población (CONAPO), 2022). El municipio de Xalapa colinda al norte con los municipios de Banderilla, Jilotepec y Naolinco, al sureste con Emiliano Zapata, al sur con Coatepec y al suroeste con Tlalnahuayocan (INEGI, 2023a) (Figura 1). El clima en el territorio municipal corresponde en un 54% a semicálido húmedo con abundantes lluvias en verano, 44% a cálido subhúmedo con lluvias en verano y 1% a templado húmedo con lluvias todo el año. El rango de temperatura se ubica en los 18 a 24 °C, y una precipitación acumulada entre los 1100 a los 1600 mm (Sistema de Información Estadística y Geográfica del Estado de Veracruz de Ignacio de la Llave (SIEGVER), 2023).

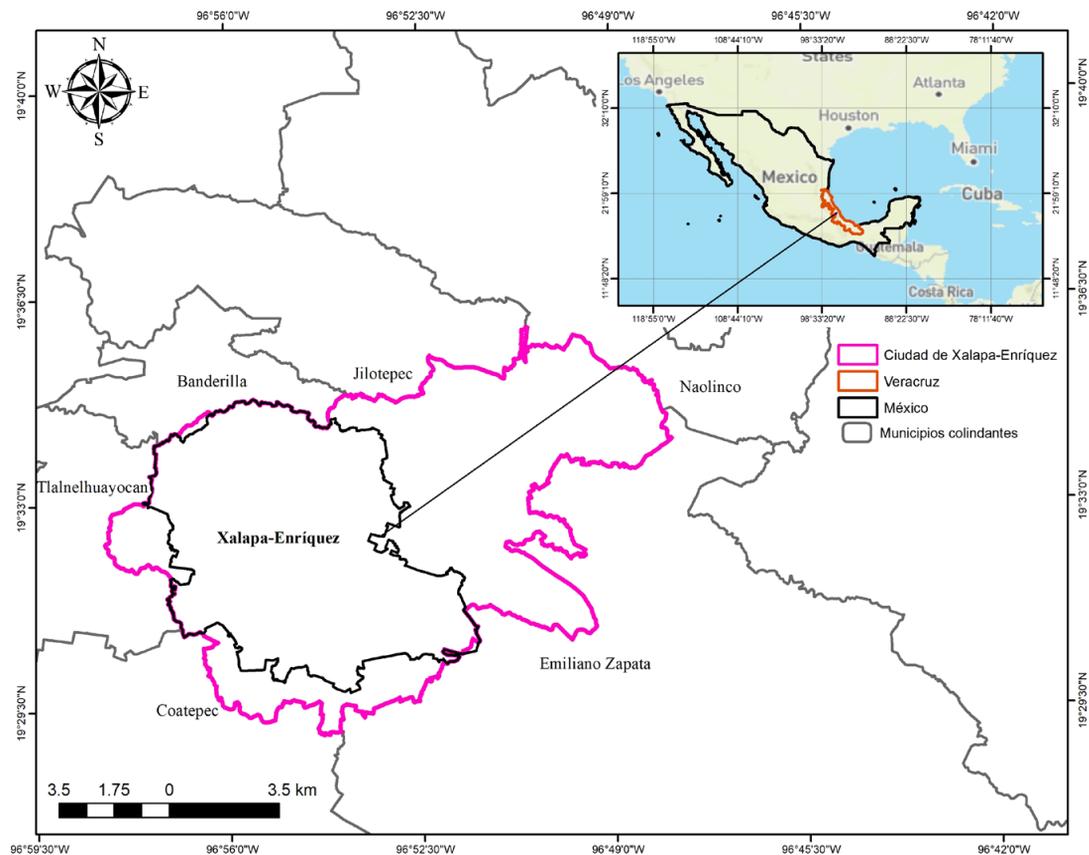


Figura 1. Ubicación de la ciudad Xalapa- Enríquez, estado de Veracruz, México.

2.2. Procedimiento

2.2.1. Delimitación del área de estudio

A través del software ArcGIS Pro 3.1.5 (Environmental Systems Research Institute (ESRI), 2023) y con el marco geostadístico del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI, 2023a), se delimitó geográficamente la poligonal de la ciudad de Xalapa-Enríquez. Posteriormente, se ubicaron las colonias, la población y su grado de marginación, obtenido del índice de marginación urbana 2020 (Consejo Nacional de Población (CONAPO), 2022).

2.2.2. Fuentes hemerográficas

Se consultaron y analizaron fuentes hemerográficas digitales sobre inundaciones en la ciudad de estudio, verificando que la información contara con año, día, fuente y colonia afectada, a efecto

de asignar un valor cuantitativo de ocurrencia del fenómeno. El primer dato de inundación registrado corresponde al 21 de abril de 1981 y el último al 18 de octubre de 2022. La fecha de búsqueda se acotó hasta el segundo semestre del 2022, toda vez que en los últimos 40 años ha habido eventos que han concluido en desastre, siendo el huracán Grace el más reciente y severo durante el 21 y 22 de agosto de 2021 (CENAPRED, 2021; Secretaría de Protección Civil (PC), 2023).

2.2.3. Arbolado urbano

Para analizar la existencia del arbolado por colonia, se utilizó una imagen PlanetScope Super Dove (PSB.SD), de 3 m de resolución con ocho bandas espectrales del 28 de febrero de 2023 (Planet Team, 2017), utilizando los canales infrarrojo cercano (NIR), verde (*green*) y borde rojo (*red edge*) en las bandas rojo, verde y azul, procediendo a la clasificación no supervisada de

la imagen. Posteriormente, se calculó la superficie arbolada por colonia. Para evaluar el arbolado *per cápita*, se utilizaron los parámetros de 5 m² arbolados por habitante (Ley Estatal de Protección Ambiental, 2000), 9 m² (Russo & Cirella, 2018), 15 m² (Programa de Naciones Unidas para los Asentamientos Humanos (ONU-Habitat), 2019) y 50 m² (Russo & Cirella, 2018).

2.2.4. Índice topográfico de humedad (TWI)

Para desarrollar el TWI se utilizaron modelos digitales de elevación provenientes de LIDAR del tipo terreno de 5 m de resolución, los cuales se obtuvieron del sistema de consulta Espacio y Datos de México (INEGI, 2024), descargando nueve cartas que cubrieron Xalapa-Enríquez. Posteriormente se

unieron las nueve cartas en un mosaico y se procedió al modelado (Figura 2) con base en Beven y Kirkby (1979), y con el procedimiento adaptado de Kopecký *et al.* (2021), aplicando la siguiente fórmula con la calculadora ráster:

$$TWI = Ln \left(\frac{UCA}{ST} \right) \quad (1)$$

Donde:

TWI= Índice topográfico de humedad.

Ln= Logaritmo natural.

UCA= Contribución aguas arriba.

ST= Tangente de la pendiente.

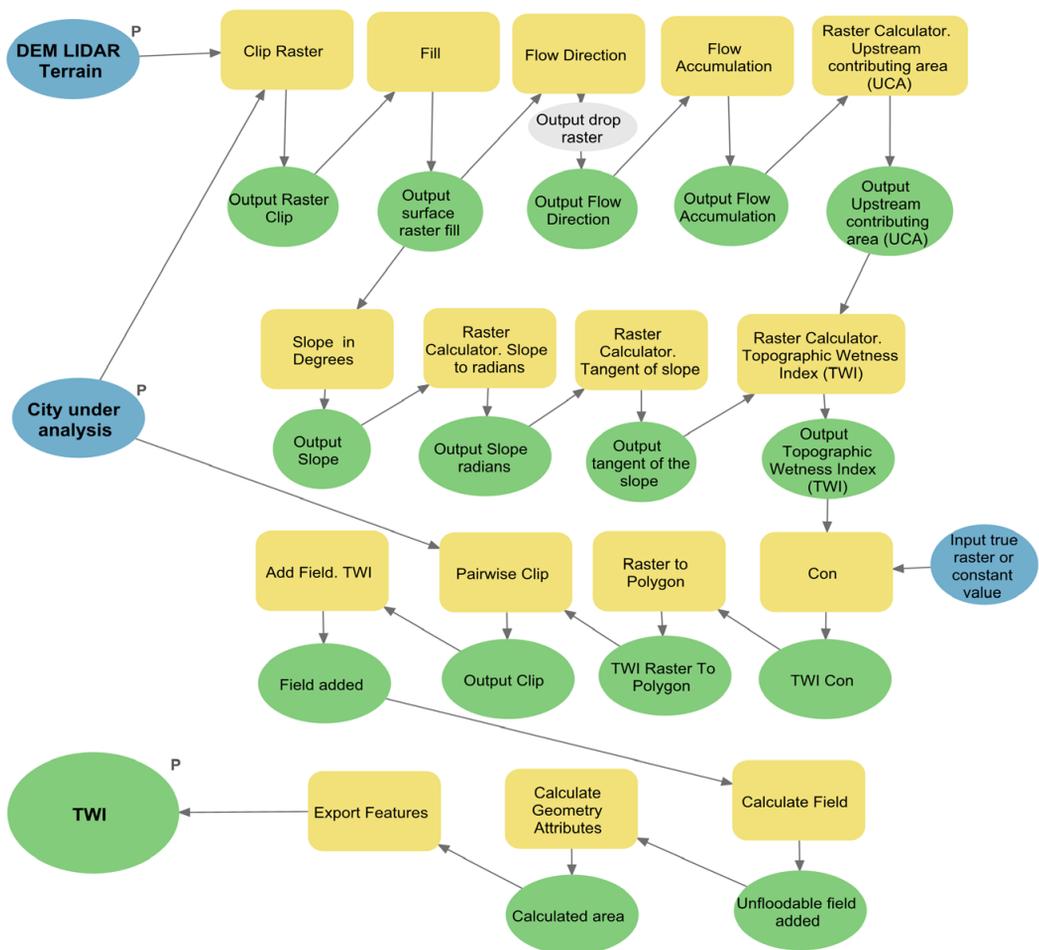


Figura 2. Modelo desarrollado para la obtención del índice topográfico de humedad.

Para la obtención de la contribución aguas arriba (UCA) se utilizó:

$$UCA = (FA + 1) \cdot TP \quad (2)$$

Donde:

UCA =Contribución aguas arriba.

FA =Acumulación de flujo.

1= Valor fijo de acumulación para incluir la celda actual en el cálculo.

TP = Tamaño del píxel del MDE utilizado en el modelo, en este caso 5.

La tangente de la pendiente se obtuvo con:

$$ST = Con(SR > 0, \tan(SR), 0,001) \quad (3)$$

Donde:

ST = Representa el valor de la tangente de la pendiente.

Con = Función condicional que evalúa si la pendiente (SR) es mayor que 0. Si es positivo, calcula la tangente de SR ; si es negativa, asigna un valor de 0,001.

SR =Pendiente en radianes.

La pendiente en radianes se calculó de la siguiente forma:

$$SR = \frac{S \cdot \pi/2}{Eqv} \quad (4)$$

Donde:

SR = Pendiente en radianes.

S = La pendiente grados.

$\pi/2$ = Valor por aproximación de 1,570796.

Eqv : Es el equivalente a la fracción $\pi/2$. Se utilizó el valor constante de 90 grados.

Finalmente, se contrastaron los resultados del TWI con el Atlas de riesgos del estado de Veracruz (PC, 2023), obtenido de <https://tinyurl.com/2d9ykd93>; el Atlas de riesgos municipal (H. Ayuntamiento de Xalapa, 2019), descargado de <https://tinyurl.com/25cxsl5t>; y el Programa Municipal de Ordenamiento Territorial de Xalapa, Ver., (2021), apartado 11.1.3 Inundaciones urbanas: caso Xalapa, de <https://tinyurl.com/27pe5566>.

2.2.5. Equipamiento urbano para la prevención de inundaciones

La disponibilidad de alcantarillado para drenaje pluvial se obtuvo del Inventario Nacional de Viviendas (INEGI, 2020) a nivel de vialidad, cuantificadas por colonia.

2.2.6. Análisis integral de la información espacial

Se evaluaron los datos de las colonias que presentaron mayor frecuencia de ocurrencia de inundaciones, su número de habitantes y grado de marginación, presencia de arbolado, superficie inundable, además de las vialidades con drenaje pluvial. El algoritmo de clasificación utilizado para las variables a excepción del TWI fue el de rupturas naturales de Jenks, dada su buena adaptabilidad y alta precisión en la división de unidades de entorno geográfico (De Smith *et al.*, 2024; Environmental Systems Research Institute (ESRI), 2016). En este caso, se utilizaron cinco clases, donde la determinación de los cortes de clase se caracterizó por agrupar los valores similares maximizando las diferencias entre los datos obtenidos (De la Rosa *et al.*, 2021). En el caso del TWI, se utilizó el algoritmo de intervalos geométricos para generar cinco clases, ya que se diseñó específicamente para trabajar con datos continuos; los cuales representan un fenómeno en el que su punto de ubicación es una medida de concentración (Environmental Systems Research Institute (ESRI), 2024). Finalmente, se contrastaron las colonias de la ciudad de Xalapa que presentaron superficie inundable en el TWI, con el Atlas del estado de Veracruz, el Atlas de riesgos municipal; y la cartografía (D-11 Amenazas y vulnerabilidad, Inundaciones) del Programa municipal de ordenamiento territorial.

3. Resultados

3.1. Revisión hemerográfica digital

Se recopilaron 68 eventos de inundación de 34 medios de comunicación (Material complementario) con los siguientes campos: año de inundación, mes, día, fuente, autor, institución (si aplicó), año de publicación, calle, barrio y/o colonia afectada y enlace a la fuente. Destacó que, de los 18 años con registro, los últimos seis del periodo (2017 al 2022) concentraron el 56% de los eventos (Figura 3). Dado que cada una de las

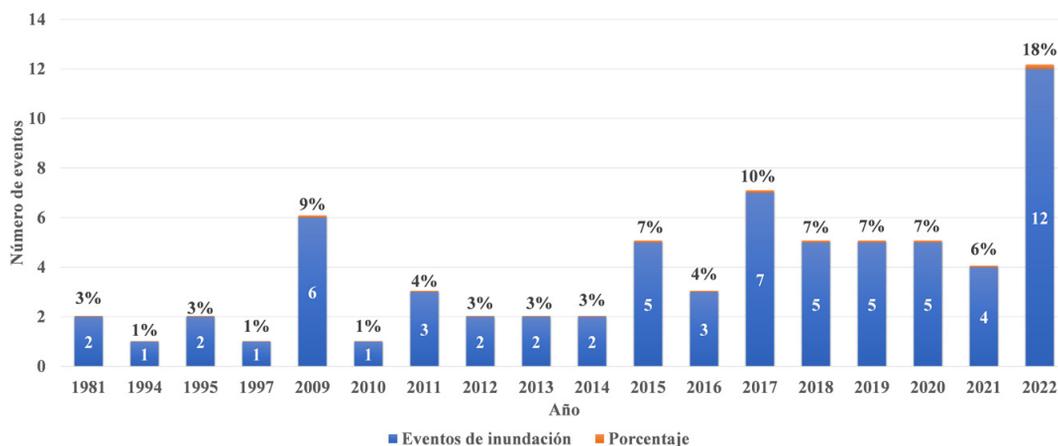


Figura 3. Eventos de inundaciones en 18 años en la ciudad de Xalapa-Enríquez.

referencias periodísticas a eventos de inundación evidenciaban al fenómeno de estudio en diversas ubicaciones, se localizaron 401 inundaciones a nivel colonia; de las cuales, 369 (92%), se encontraron dentro de la poligonal de la ciudad de Xalapa-Enríquez, afectando en algún momento y medida a 277 566 (61,5%) habitantes de 120 colonias xalapeñas.

3.2. Frecuencia de ocurrencia por colonia, habitantes y grado de marginación

De las 432 colonias analizadas, diez (2,3%) concentraron la mayor frecuencia de inundaciones, acumulando 125 eventos (33,8%) de los 369 registrados y afectando a 70728 personas

(15,6% del total de habitantes). Entre las colonias más afectadas destacaron la Obrero Campesina con 18 eventos, 6608 habitantes y un grado de marginación bajo; Revolución con 18 eventos y 19283 habitantes; además de la Veracruz con 15 eventos y 3976 habitantes; las dos últimas colonias, tienen un grado de marginación medio (Tabla 1).

3.3. Recursos forestales

El análisis de la imagen satelital reveló que 358 colonias (82,8%) presentan una cobertura arbórea en el rango más bajo, entre 0 y 3 hectáreas. Al respecto, destacaron las colonias Obrero Campesina y Veracruz, dos de las tres con la mayor frecuencia de ocurrencia de inundaciones, ubicándose en el

Tabla 1. Colonia, frecuencia de ocurrencia de inundaciones, habitantes y marginación.

Colonia	Clave	Inundaciones	Habitantes	Grado de marginación
Obrero Campesina	90522	18	6,608	Bajo
Revolución	90588	18	19,283	Medio
Veracruz	90646	15	3,976	Medio
La Lagunilla	90391	12	2406	Bajo
Rafael Lucio	90556	12	11,023	Bajo
El Sumidero 2	90306	11	750	Bajo
Zona Centro	90667	11	19,945	Bajo
Fraccionamiento Rubí Ánimas	90598	10	1,148	Muy bajo
Cerro Colorado	90245	9	786	Medio
Mártires de Chicago	90493	9	4,803	Bajo

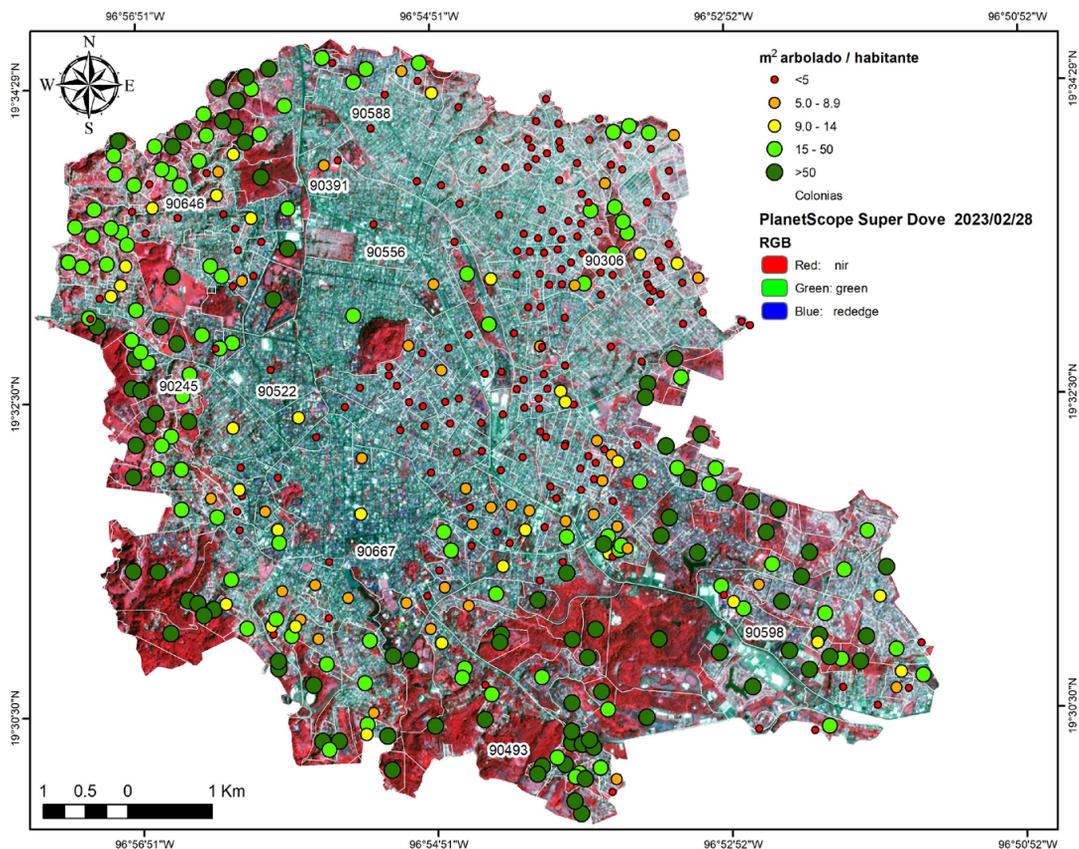


Figura 4. Superficie arbolada por habitante y colonias con mayor ocurrencia de inundaciones en 18 años en Xalapa-Enríquez.

rango más bajo de arbolado con 1,78 y 2,94 ha, respectivamente. La tercera colonia, Revolución, se ubicó en el rango bajo de superficie arbolada con 6,29 ha. Del arbolado *per cápita*, sobresalieron 84 colonias (19,4%) por no alcanzar 1 m² arbolado/habitante, en el mismo sentido, un total de 172 colonias (39,8%) tienen menos de 5 m² arbolado/habitante; incumpléndose en ambos casos la Ley Estatal de Protección Ambiental (2000). Acerca de las recomendaciones internacionales de Russo & Cirella (2018) y ONU-Habitat (2019); 245 colonias (56,7%) no alcanzan los 15 m² arbolado/habitante y un total de 341 colonias (78,9%) no cuentan con 50 m² arbolado/habitante. Las tres colonias con mayor frecuencia de ocurrencia de inundaciones, Obrero Campesina, Revolución y Veracruz; se encuentran en los niveles más bajos de arbolado con 4,4 m², 3,3 m² y 4,5 m²/habitante, respectivamente (Figura 4).

3.4. Índice topográfico de humedad (TWI)

El modelado del TWI indicó que 10 colonias donde habitan 45538 personas presentan los valores más altos de superficie inundable, destacando la colonia Revolución con 36,1 ha (19283 habitantes), Zona Centro 25,7 ha (19945 habitantes) y Lomas del Seminario con 22,9 ha (3105 habitantes) (Figura 5).

De igual forma, las colonias Obrero Campesina, Revolución y Veracruz con mayor frecuencia de ocurrencia de inundaciones, se ubicaron en los rangos más altos de superficie inundable con 10,0, 36,1 y 2,5 ha, respectivamente (Figura 6).

Al contrastar el resultado del TWI a nivel colonia con el Atlas de riesgos municipal de Xalapa a través de la susceptibilidad muy alta de inundación, se encontró una coincidencia del 91,9% (69 colonias)

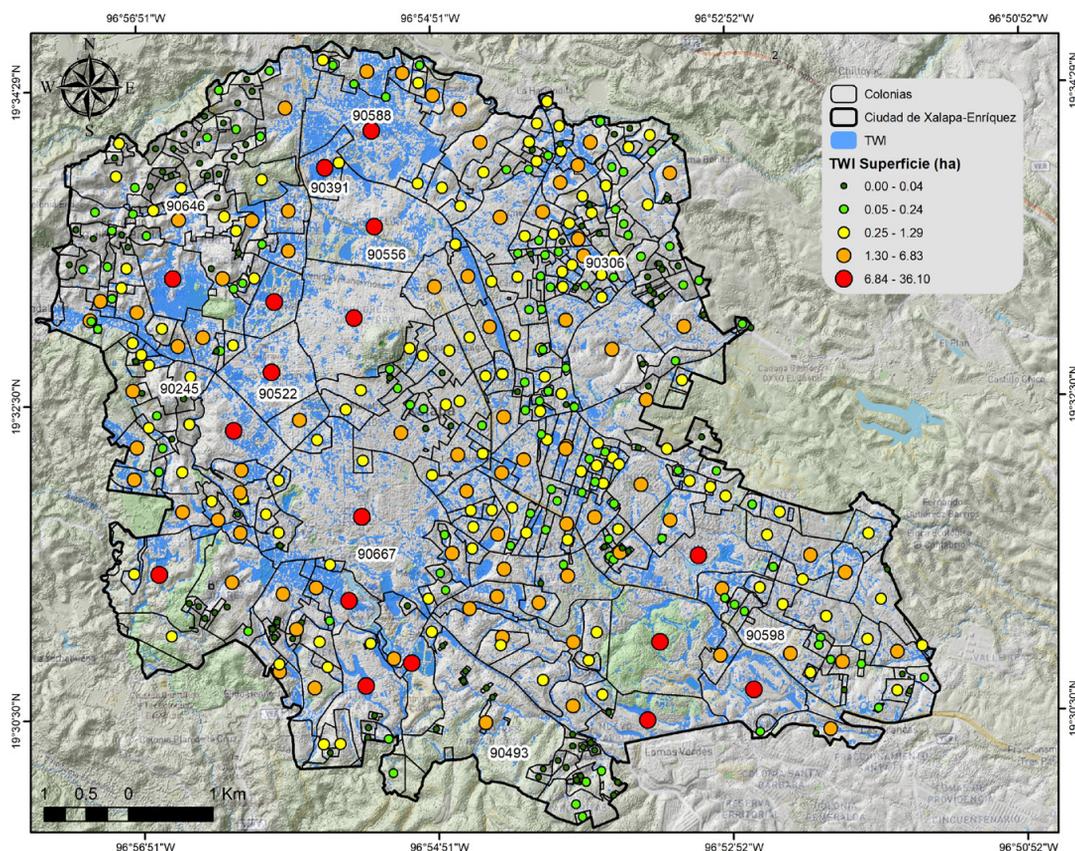


Figura 5. TWI y superficie inundable en colonias de Xalapa-Enríquez.

con respecto de las zonas que el TWI indicaba con potencial inundable. Posteriormente, en el mismo Atlas se identificaron seis eventos como información histórica de inundaciones en el municipio; encontrando que estos están incluidos en las fuentes hemerográficas utilizadas. Ulteriormente, como resultado de la sobreposición de la capa de inundaciones del Programa municipal de ordenamiento territorial con la poligonal de la ciudad de Xalapa, destacó que en el 100% de los 120 polígonos del ordenamiento, se identificó la superficie inundable con base en el TWI. El 45% de superficie inundable del TWI (230 ha), se encuentra fuera de las poligonales indicadas como amenaza de inundación del ordenamiento (Figura 7).

3.5. Equipamiento urbano para la prevención de inundaciones

El análisis del porcentaje de alcantarillado para drenaje pluvial indicó que, las 10 colonias con

mayor frecuencia de ocurrencia de inundaciones presentan los porcentajes más bajos de este tipo de equipamiento urbano. Destacó que las tres colonias con más inundaciones se encuentran en el rango más bajo de esta variable (Figura 8).

4. Discusión

Una limitante de este tipo de investigaciones es la dependencia de fuentes digitales para el registro de inundaciones; sin embargo, es una herramienta muy utilizada para análisis diacrónicos como el estudio de caso de las inundaciones en Xalapa del Atlas de riesgos del estado de Veracruz (PC, 2023). Además, esta investigación amplía el horizonte temporal, identificando un mayor número de eventos de inundación (369) e incluye variables ambientales, comparadas con las que analizaron Moguel Flores *et al.* (2012) en la misma ciudad. La revisión de fuentes hemerográficas digitales, combinada con análisis geográficos, es ampliamente

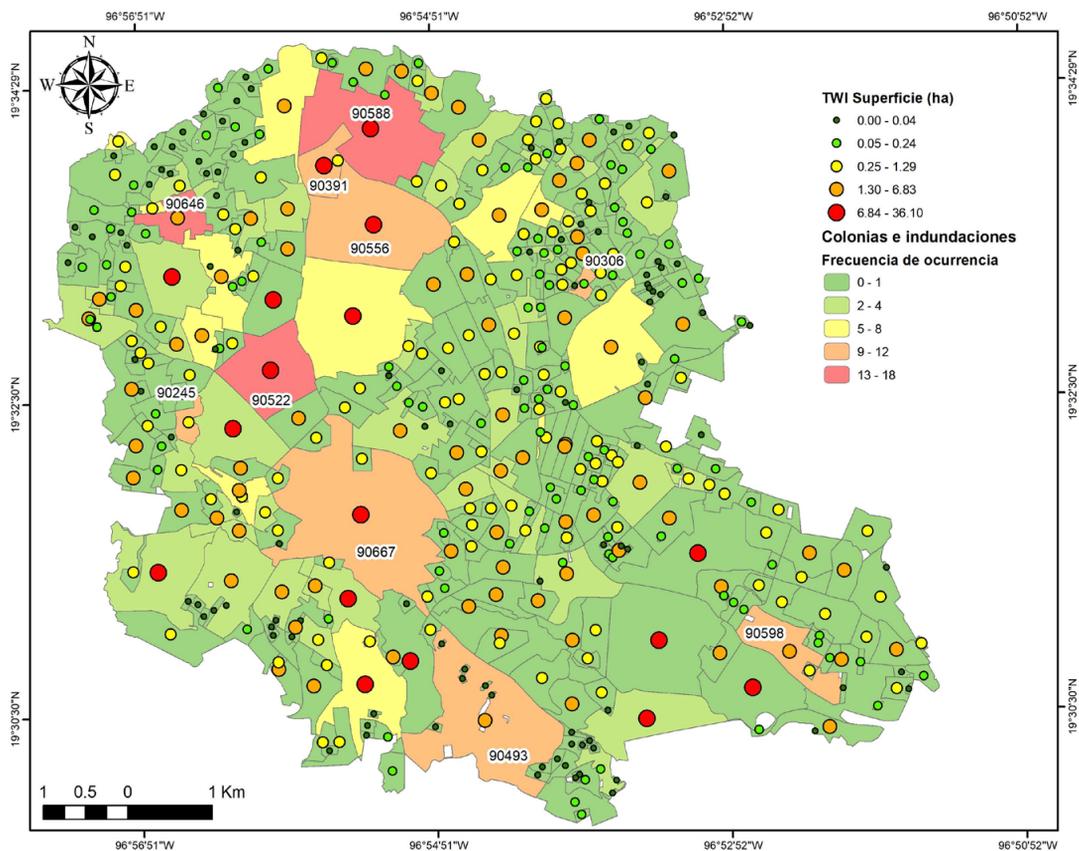


Figura 6. Colonias con mayor frecuencia de ocurrencia de inundaciones en 18 años y superficie inundable en Xalapa-Enríquez.

utilizada en estudios socio hidrológicos como se aprecia en el Observatorio de Conflictos por el Agua en México (Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA), 2024) a nivel estado y localidad, o Vera Pérez & López Blanco (2010) a nivel alcaldía de la Ciudad de México, y Sanabria *et al.* (2022) a nivel colonia.

Se considera que las estimaciones de la marginación a nivel de colonia tienen una diferencia de 1,7% de habitantes en Xalapa-Enríquez, con base en los datos calculados por el Consejo Nacional de Población (CONAPO, 2022) y los reportados por el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI, 2023b), ya que no existe una cartografía que se vincule directamente con los datos censales generados a este nivel espacial. Sin embargo, se coincide con el Consejo Nacional de Población (CONAPO, 2022), ya que un producto de marginación a nivel de colonia tiene un mayor impacto y significado para la sociedad por la

concreta identificación de los nombres asociados en el ideario público; lo cual, es relevante para el empoderamiento de la información. En este sentido, la investigación de Pérez Córdova & Welsh Rodríguez (2020), resalta la necesidad de un enfoque interdisciplinar y datos precisos de inundaciones, coincidiendo con esta investigación.

El diferenciar colonias urbanas con base en la falta de acceso a la educación, salud, vivienda adecuada y falta de bienes (marginación); y contrastarlo con la frecuencia de ocurrencia de inundaciones, es indispensable para abordar el riesgo de inundación urbana sostenible (Oneto & Canepa, 2023). Además, puede utilizarse para la toma de decisiones informada en materia de política pública (Macedo & García, 2022). Esta acción cobra relevancia ante la desproporcionalidad socioeconómica de la población, ya que la visión integral (social, económico y ambiental) desde el modelo espacial permite un punto de

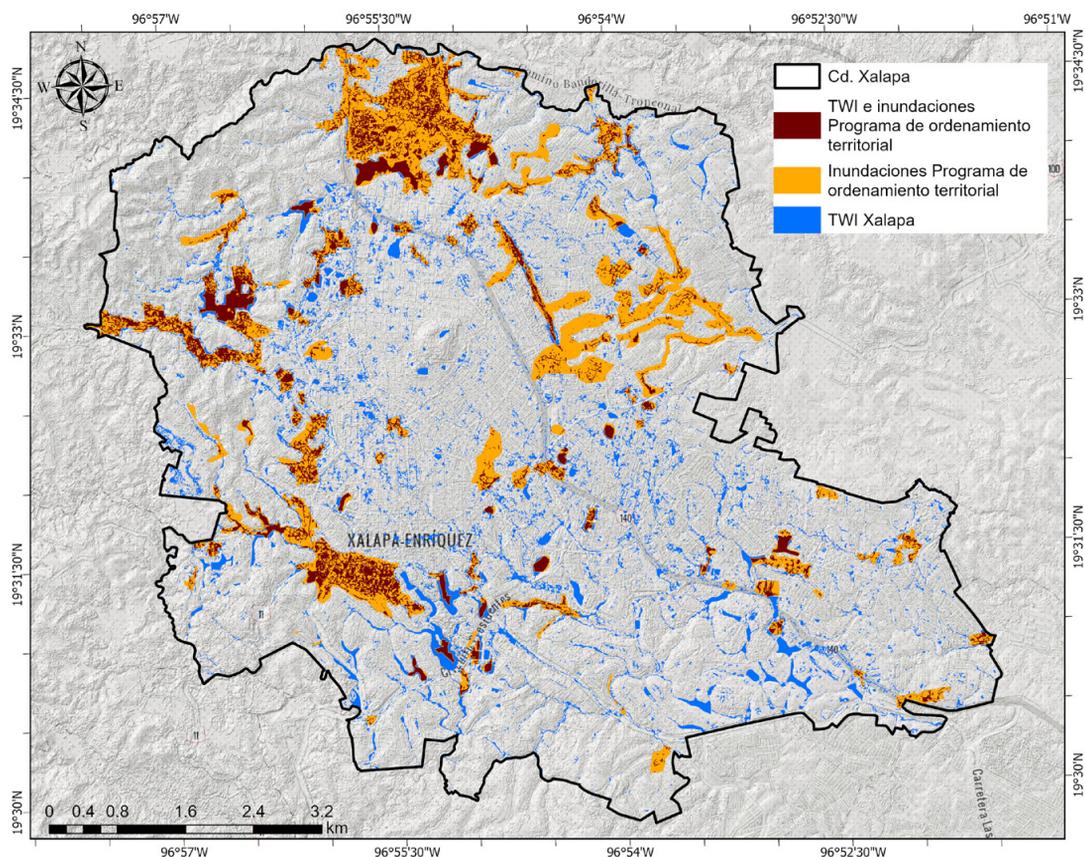


Figura 7. Comparación de la superficie inundable derivada del TWI y el Programa Municipal de Ordenamiento Territorial de Xalapa-Enríquez.

vista alterno para evaluar la eficacia de la gestión de recursos naturales, el riesgo y la resiliencia ante el posible impacto por inundaciones, coincidiendo con Nowak *et al.* (2006). En este sentido, existe una relación proporcional entre la marginación y el impacto que las inundaciones pueden tener, derivado del nivel bajo o muy bajo de resiliencia socioeconómica de la población vulnerable como indica González (2018). Bajo estos criterios, dos de las tres colonias con el mayor número de inundaciones, presentan un grado de marginación medio, evidenciando que 23259 habitantes son más vulnerables socioeconómicamente ante una inundación y a su posterior recuperación. Por tanto, la inclusión de la marginación es relevante para la valoración de daños, en congruencia con Parroquin Pérez *et al.* (2018).

Existe coincidencia con Marapara *et al.* (2021) sobre el hecho de que los árboles modifican el comportamiento de la hidrología superficial,

colaborando a retrasar el pico de descarga del agua, reduciendo el flujo superficial y el riesgo de inundación. Von Thaden *et al.* (2021) y Carmona-Ortega *et al.* (2022), mencionan que la ciudad de Xalapa-Enríquez se percibe como arbolada; sin embargo, presenta una distribución desigual en la masa forestal urbana relacionada con los distintos estratos sociales, coincidiendo con los resultados obtenidos. Lo anterior, solo puede observarse cuando se profundiza en el concepto espacial intraurbano de colonia.

Con respecto del TWI, las 10 colonias con mayor ocurrencia de inundaciones obtuvieron la mayor superficie inundable; lo que coincide con Kelleher & McPhillips (2020), quienes demostraron que este índice es un predictor útil de inundaciones en entornos urbanos. El hecho de que el 45% de superficie inundable del TWI, se encuentra fuera de las poligonales indicadas como amenaza de inundación del ordenamiento territorial referido,

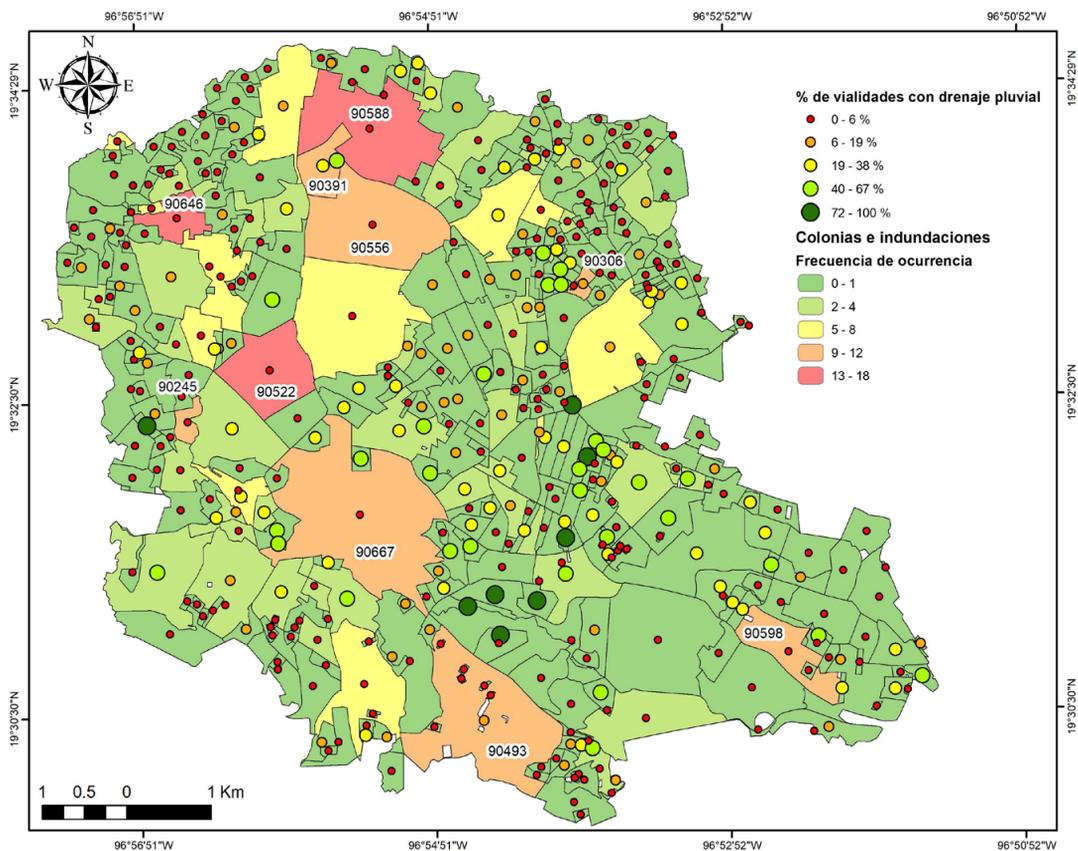


Figura 8. Porcentaje de vialidades con alcantarillado para drenaje pluvial y frecuencia de ocurrencia de inundaciones en 18 años.

se explica por la alta resolución espacial utilizada (LIDAR), identificando superficies inundables que otros instrumentos de planeación no han logrado a la fecha, coincidiendo con Buchanan *et al.* (2014). En concordancia con Sánchez & Álvarez (2024), el TWI permitiría ubicar las zonas idóneas para planear y construir infraestructuras para mejorar la infiltración. En este contexto, la colonia Campo Nuevo y los fraccionamientos Jardines de las Ánimas y Residencial del Lago, presentaron valores muy altos de superficie inundable, sin registros de ocurrencia a la fecha, lo que puede explicarse con base en Marapara *et al.* (2021), desde los diversos factores del arbolado y del territorio para que ocurra una inundación, como pueden ser: la ubicación, clima, topografía y magnitud de la lluvia, entre otros. Se coincide plenamente con Kopecký *et al.* (2021) con respecto de que frecuentemente el cálculo del TWI no se especifica detalladamente en los estudios científicos,

limitando su reproducibilidad e impactando en su utilización. Por esta razón, consideramos pertinente el modelo explícito y accesible desarrollado para el cálculo de este índice, coadyubando a la ciencia abierta y a la transparencia en la investigación.

La impermeabilización del suelo en zonas urbanas genera un aumento en los volúmenes de escurrimiento superficial; por tanto, la Comisión Nacional del Agua (2019) señala que el objetivo del drenaje pluvial urbano es desalojar el agua de lluvia para mitigar los riesgos asociados por posibles inundaciones. Sin embargo, Estrada Díaz (2018) asegura que es insuficiente el equipamiento de esta infraestructura para responder a lluvias extremas, coincidiendo con los resultados mostrados, ya que las 10 colonias con mayor frecuencia de ocurrencia de inundaciones presentan los porcentajes más bajos de este equipamiento urbano. Finalmente, predecir el lugar específico de la posible ocurrencia de inundación, permitirá planear

y gestionar el riesgo desde lo local, al lograr una identificación espacial por colonia. Lo anterior, es muy relevante ante el aumento exponencial e inminente de las inundaciones y la frecuencia de las lluvias extremas en los trópicos (México), producidas por los efectos del calentamiento global, como indican Kotz *et al.* (2024).

5. Conclusiones

La revisión de fuentes hemerográficas digitales fue efectiva para la detección de fenómenos hidrometeorológicos a escalas muy puntuales, como son las colonias. Esta escala permitió combinar eventos de inundaciones con factores ambientales, sociales y de equipamiento urbano. Dado que el riesgo es socialmente construido, la identificación de las variables de lo que está expuesto y las condiciones que guardan los sistemas naturales y sociales permiten un abordaje integral del riesgo. Es sorprendente que el 39,8% de las colonias tengan menos de 5 m² de arbolado/habitante, incumpliendo la Ley Estatal, y según recomendaciones internacionales, el 56,7% no llega a 15 m². Lo anterior es relevante, ya que los árboles modifican el comportamiento de la hidrología superficial, contribuyendo a retrasar el pico de descarga del agua, reduciendo el flujo superficial. Aunado a ello, se suma la insuficiencia de equipamiento urbano para la prevención de inundaciones, como el drenaje pluvial para hacer frente a lluvias extremas.

El TWI resultó un predictor de inundaciones fiable a nivel de colonia en entornos urbanos en México. El poder anticipar el lugar específico de la ocurrencia de inundaciones, permitirá planear y gestionar el riesgo desde lo local, integrando las características socio ecológicas. Por tanto, se considera viable replicar el modelo del TWI en cualquier ciudad. Queda claro que existe una relación proporcional entre la marginación y el impacto que las inundaciones pueden tener, debido al nivel bajo o muy bajo de resiliencia socioeconómico de la población vulnerable. Finalmente, esta investigación plantea un punto de vista alternativo para evaluar la eficacia de la gestión de recursos naturales, del riesgo y resiliencia ante el posible impacto por inundaciones.

6. Agradecimientos

Los autores agradecen a los alumnos de Ingeniería Industrial del Tecnológico Superior de Xalapa: Dimas Landa, Víctor Cabana, Julio Alejandro Valenzuela Hernández y Ricard Jesús Morales Suárez, por el apoyo en la recopilación de datos de fuentes hemerográficas. Al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías (CONAHCYT), por la beca de Estancia Posdoctoral 2023 (1) otorgada al Dr. Andrés De la Rosa. Así como a los revisores anónimos por sus valiosas sugerencias que contribuyeron significativamente a la mejora de este artículo.

7. Material suplementario

Se encuentran disponibles en:

1. La base de datos con las diversas fuentes hemerográficas de las inundaciones registradas (<https://polipapers.upv.es/index.php/raet/article/view/22340/17089>).
2. Los MDE utilizados (<https://polipapers.upv.es/index.php/raet/article/view/22340/17090>).
3. El TWI (<https://polipapers.upv.es/index.php/raet/article/view/22340/17091>).
4. El modelo para ser ejecutado en ArcGIS Pro (<https://polipapers.upv.es/index.php/raet/article/view/22340/17092>).
5. El archivo python para ser replicado a través de software libre (<https://polipapers.upv.es/index.php/raet/article/view/22340/17093>).

Referencias

- Ballerine, C. 2017. Topographic wetness index urban flooding awareness act action support. En Will & DuPage Counties, Illinois. <https://www.isws.illinois.edu/pubdoc/CR/ISWSCR2017-02.pdf>
- Beven, K.J., Kirkby, M.J. 1979. A physically based, variable contributing area model of basin hydrology. *Hydrological sciences journal*, 24(1), 43–69. <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/02626667909491834>
- Buchanan, B.P., Fleming, M., Schneider, R.L., Richards, B.K., Archibald, J., Qiu, Z., Walter, M.T. 2014. Evaluating topographic wetness indices across central New York agricultural landscapes. *Hydrology and Earth System Sciences*, 18(8), 3279–3299. <https://doi.org/10.5194/hess-18-3279-2014>

- Carmona-Ortega, M., Falfán, I., Lascurain-Rangel, M., Benítez-Badillo, G. 2022. Distribución espacial de las áreas verdes urbanas en Xalapa, México: un caso de inequidad. *Sociedad y Ambiente*, 25, 1–32. <https://revistas.ecosur.mx/sociedadambiente/index.php/sya/article/view/2559>
- Centre for Research on the Epidemiology of Disasters (CRED). 2023. The International Disaster Database EM-DAT. <https://www.emdat.be/database>
- Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED). (2021, agosto 21). El Huracán Grace se intensifica en su segundo impacto a territorio nacional. Huracán Grace. <https://www.gob.mx/cenapred/articulos/toma-tus-precauciones-ante-el-impacto-del-huracan-grace>
- Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED). (2023a). Glosario CENAPRED. <http://www.atlasnacionalderiesgos.gob.mx/IGOPP/glosario.php>
- Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED). (2023b). Sistema de Consulta de Declaratorias 2000-2022. <http://www.atlasnacionalderiesgos.gob.mx/apps/Declaratorias/>
- Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). 2019. Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento. Drenaje Pluvial Urbano (Vol. 19). <https://www.gob.mx/conagua/documentos/biblioteca-digital-de-mapas>
- Consejo Nacional de Población (CONAPO). 2022. Índice de marginación urbana por colonia 2020. Índices de marginación 2020. <https://www.gob.mx/conapo/documentos/indices-de-marginacion-2020-284372>
- De la Rosa, A., Valdés-Rodríguez, O.A., Villada-Canela, M., Manson, R., Murrieta-Galindo, R. 2021. Caracterizando la seguridad hídrica con enfoque de cuenca hidrológica: Caso de estudio Veracruz, México. *Ingeniería del agua*, 25(3), 187–203. <https://doi.org/10.4995/ia.2021.15221>
- De Smith, M.J., Goodchild, M.F., Longley, P. 2024. *Geospatial analysis: a comprehensive guide to principles, techniques and software tools* (7th edition). Troubador publishing ltd. https://www.spatialanalysisonline.com/HTML/index.html?introduction_and_terminology.htm
- Dempsey, N., Bramley, G., Power, S., Brown, C. 2011. The social dimension of sustainable development: Defining urban social sustainability. *Sustainable development*, 19(5), 289–300. <https://doi.org/10.1002/sd.417>
- Environmental Systems Research Institute (ESRI). 2016. Rupturas naturales (Jenks) (Vol. 2016). https://pro.arcgis.com/es/pro-app/help/mapping/symbols-and-styles/data-classification-methods.htm#ESRI_SECTION1_B47C458CFF6A4EEC933A8C7612DA558B
- Environmental Systems Research Institute (ESRI). 2023. ArcGIS Pro (3.1.5). <https://www.esri.com/es-es/arcgis/products/arcgis-pro/overview>
- Environmental Systems Research Institute (ESRI). 2024. Sistemas de medición: valores y lo que representan. Spatial Analyst ArcGis Pro 3.1. Documentación. <https://pro.arcgis.com/es/pro-app/3.1/help/analysis/spatial-analyst/performing-analysis/values-and-what-they-represent.htm>
- Estrada Díaz, G. 2018. Los Sistemas Urbanos de Drenaje Sustentable: Una estrategia adaptativa para incrementar la resiliencia de las zonas urbanas. *Revista e-RUA*, 10(20). <https://rua.uv.mx/index.php/rua/article/view/184>
- González, O.D.R. 2018. Zonas urbanas marginadas vulnerables a procesos de remoción en masa, zona norte, delegación Álvaro Obregón, Ciudad de México, 2015-2018. *Revista Geográfica*, 159, 89–108. <https://revistasipgh.org/index.php/regeo/article/view/171/178>
- H. Ayuntamiento de Xalapa. 2019. ATLAS DE RIESGOS MUNICIPAL, XALAPA, VERACRUZ. https://rmgir.proyectomesoamerica.org/AtlasMunPDF/2019/30087_XALAPA_2019.pdf
- Higginbottom, T.P., Field, C.D., Rosenburgh, A.E., Wright, A., Symeonakis, E., Caporn, S.J.M. 2018. High-resolution wetness index mapping: A useful tool for regional scale wetland management. *Ecological Informatics*, 48, 89–96. <https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2018.08.003>
- Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA). 2024. Observatorio de Conflictos por el Agua en México. <http://ocam.imta.mx/inicio.html>
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). 2020. Inventario Nacional de Viviendas 2020. <https://www.inegi.org.mx/app/mapa/espaciodydatos/?app=inv>
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2022a). Aspectos Geográficos Veracruz 2021. https://www.inegi.org.mx/contenidos/app/areasgeograficas/resumen/resumen_30.pdf
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2022b). Censo de Población y Vivienda 2020. <https://www.inegi.org.mx/programas/ccpv/2020/>

- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2023a). Marco Geoestadístico 2023. <https://www.inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.html?upc=794551067314>
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2023b). Sistema para la Consulta de Información Censal 2020 (SCINCE 2020) 2020. INEGI. <https://gaia.inegi.org.mx/scince2020/>
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). 2024. Espacio y datos de México. Modelos Digitales de Elevación de Alta Resolución LIDAR, con resolución de 5m. Terreno. GRID. <https://www.inegi.org.mx/app/mapa/espaciodydatos/>
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). 2023. Climate Change 2021 – The Physical Science Basis. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781009157896>
- Kelleher, C., McPhillips, L. 2020. Exploring the application of topographic indices in urban areas as indicators of pluvial flooding locations. *Hydrological Processes*, 34(3), 780–794. <https://doi.org/10.1002/hyp.13628>
- Kopecký, M., Macek, M., Wild, J. 2021. Topographic Wetness Index calculation guidelines based on measured soil moisture and plant species composition. *Science of The Total Environment*, 757, 143785. <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2020.143785>
- Kotz, M., Lange, S., Wenz, L., Levermann, A. 2024. Constraining the Pattern and Magnitude of Projected Extreme Precipitation Change in a Multimodel Ensemble. *Journal of Climate*, 37(1), 97–111. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-23-0492.1>
- Ley Estatal de Protección Ambiental, Pub. L. No. 62, Actualizada el 29 de noviembre de 2018 189. 2000. <https://www.legisver.gob.mx/leyes/LeyesPDF/LEPA291118.pdf>
- Macedo, L.V., García, N.M. 2022. La Vulnerabilidad en la ciudad de Mazatlán: inundaciones y marginación. *Proyección. Estudios Geográficos y de Ordenamiento Territorial*, 16(32), 39–63. <https://doi.org/10.48162/rev.55.028>
- Marapara, T.R., Jackson, B.M., Hartley, S., Maxwell, D. 2021. Disentangling the factors that vary the impact of trees on flooding (a review). *Water and Environment Journal*, 35(2), 514–529. <https://doi.org/10.1111/wej.12647>
- Moguel Flores, A.G., Tejada, A., García Pacheco, V.H. 2012. Propuesta para la evaluación de riesgos por inundaciones urbanas: el caso de Xalapa (México). *Publicaciones de la Asociación Española de Climatología. Serie A; 8*. http://aeclim.org/wp-content/uploads/2016/02/0096_PU-SA-VIII-2012-AG_MOGUEL.pdf
- Nowak, P., Bowen, S., Cabot, P.E. 2006. Disproportionality as a framework for linking social and biophysical systems. *Society and Natural Resources*, 19, 153–173. <https://doi.org/10.1080/08941920500394816>
- Oneto, G., Canepa, M. 2023. Addressing sustainable urban flood risk: reviewing the role and scope of theoretical models and policies. *Water Policy*, 25. <https://doi.org/10.2166/wp.2023.022>
- Organización Meteorológica Mundial (OMM). 2024. El estado del clima en América Latina y el Caribe 2023 OMM-N° 1351. <https://library.wmo.int/idurl/4/68895>
- Parroquin Pérez, R., Uehara Guerrero Ma. Guadalupe, Sánchez Correa, L. 2018. Resiliencia urbana en eventos por inundación: experiencias para medir, evaluar y mejorar políticas públicas. *Revista e-RUA*, 10(20). <https://rua.uv.mx/index.php/rua/article/view/43/42>
- Pérez Córdova, S.J., Welsh Rodríguez, C.M. 2020. Evaluación de peligro por inundación en Xalapa Veracruz. *UVserva. Una mirada desde los observatorios*, 10, 285–297. <https://doi.org/10.25009/uvs.v0i10.2692>
- Planet Team. 2017. Planet Application Program Interface: In Space for Life on Earth. <https://api.planet.com>.
- Programa de Naciones Unidas para los Asentamientos Humanos (ONU-Habitat). 2019. Reporte nacional de prosperidad urbana en México. Índice de las ciudades prósperas (CPI). <https://onuhabitat.org.mx/index.php/reportes-nacional-de-prosperidad-urbana-en-mexico-2019>
- Programa Municipal de Ordenamiento Territorial de Xalapa, Ver., Gaceta Oficial 1. 2021. <https://datosabiertos.xalapa.gob.mx/dataset/diagnostico>
- Russo, A., Cirella, G.T. 2018. Modern compact cities: how much greenery do we need? *International journal of environmental research and public health*, 15(10), 2180. <https://doi.org/10.3390/ijerph15102180>
- Sanabria, J.M.C., Alvarado, R.C., Porcayo, A.W.E., Pinto, A.G.R., Zavalegui, R.A.S., Trinidad, J.A.Á. 2022. Inundaciones por lluvias extremas asociadas a fenómenos meteorológicos. Caso de estudio: colonia Proterritorio, Chetumal, Quintana Roo. En J.M. Camacho Sanabria & R. Chávez Alvarado (Eds.), *Riesgos hidrometeorológicos en el sureste mexicano (Quintana Roo): inundaciones urbanas (Primera, p. 19)*. Universidad Autónoma del Estado de Quintana Roo. https://www.researchgate.net/publication/366866969_Inundaciones_por_lluvias_extremas_asociadas_a_fenomenos_meteorologicos_Caso_de_estudio_colonia_Proterritorio_Chetumal_Quintana_Roo

- Sánchez, E., Álvarez, C. 2024. Prioritization of Hydrological Restoration Areas Using AHP and GIS in Dulcepamba River Basin in Bolívar–Ecuador. *Hydrology*, 11(6), 81. <https://doi.org/10.3390/hydrology11060081>
- Secretaría de Protección Civil (PC). 2023. ATLAS DE RIESGOS DEL ESTADO DE VERACRUZ. https://rmgir.proyectomesoamerica.org/PDFAtlasEstatales/VERACRUZ_2023.pdf
- Sistema de Información Estadística y Geográfica del Estado de Veracruz de Ignacio de la Llave (SIEGVER). 2023. Cuadernillos municipales 2023. Xalapa. http://ceieg.veracruz.gob.mx/wp-content/uploads/sites/21/2023/08/Xalapa.CM_Ver_2023.2.pdf
- United Nations Human Settlements Programme (UN-Habitat). 2022. World Cities Report 2022. Envisaging the future of cities. https://unhabitat.org/sites/default/files/2022/06/wcr_2022.pdf?utm_medium=website&utm_source=archdaily.mx
- United Nations Office for Disaster Risk Reduction (UNDRR). 2023. Global Assessment Report on Disaster Risk Reduction (GAR). Special Report 2023. Mapping Resilience for the Sustainable Development Goals. <https://www.undrr.org/gar/gar2023-special-report#reading>
- Vera, F., Uribe, M.C., Del Castillo, S. 2023. Acción climática y Acuerdo de París: el rol de las ciudades de América Latina y el Caribe. IADB: Inter-American Development Bank. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.18235/0004837>
- Vera Pérez, M., López Blanco, J. 2010. Evaluación de amenazas por inundaciones en el centro de México: el caso de Iztapalapa, Distrito Federal (1998-2005). *Investigaciones geográficas*, 73, 22–40. https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_abstract&pid=S0188-46112010000300003&lng=es&nrm=i&tlng=es
- Von Thaden, J., Badillo-Montaña, R., Lira-Noriega, A., García-Ramírez, A., Benítez, G., Equihua, M., Looker, N., Pérez-Maqueo, O. 2021. Contributions of green spaces and isolated trees to landscape connectivity in an urban landscape. *Urban Forestry & Urban Greening*, 64, 127277. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ufug.2021.127277>
- World Economic Forum, Marsh McLennan, Zurich Insurance Group. 2024. The Global Risks Report 2024. <https://www.weforum.org/publications/global-risks-report-2024/>
- World Health Organization (WHO). 2023. Floods. https://www.who.int/health-topics/floods#tab=tab_1