

Impacto de las inundaciones fluviales asociadas a eventos extremos de precipitación en zonas urbanas: caso de estudio arroyo Las Liebres de la ciudad de León, Guanajuato

Impact of riverine floods associated with extreme precipitation events in urban areas: case study of the Las Liebres stream in the city of León, Guanajuato

Alexander José Díaz Buelvas¹, Jesús López De La Cruz², Joanna Alicia Gutiérrez Pérez³, Ismael Orozco Medina^{3*}

¹ Maestría en Ciencias del Agua, División de Ingenierías, Campus Guanajuato, Universidad de Guanajuato, Guanajuato, Gto., México.
a.diazbuelvas@ugto.mx

² Facultad de Ingeniería Civil, División de Ingenierías, Universidad de Colima. jlopez71@uacol.mx

^{3*} Departamento de Ingeniería Geomática e Hidráulica, División de Ingenierías, Universidad de Guanajuato, Guanajuato, Gto., México.
i.orozco@ugto.mx

*Autor de correspondencia

Resumen

Palabras clave:

Inundaciones;
eventos extremos;
cambio climático;
modelado
hidráulico-
hidrológico.

Las inundaciones son los peligros naturales más mortíferos en todo el mundo y los que provocan mayores afecciones cada año. El presente estudio se ha enfocado en evaluar el impacto de las inundaciones fluviales del arroyo Las Liebres a través de una metodología que acopla un modelado hidráulico, un modelo hidrológico y la proyección de eventos extremos de precipitación para diferentes periodos de retorno, usando el análisis de frecuencias con parámetros estacionarios y no estacionarios. Los resultados proyectan eventos máximos de precipitación de hasta 110 mm con un periodo de retorno de 100 años, generando un caudal de aproximadamente 80 m³/s e inundando el 13.2% del área urbana de la cuenca. Estas inundaciones afectan la movilidad, las infraestructuras críticas, el acceso a servicios básicos y la capacidad de respuesta ante emergencias.

Abstract

Keywords: Floods;
extreme events;
climate change;
hydraulic modelling.

Floods are the deadliest natural hazards worldwide, causing the most extensive damage every year. This study focuses on evaluating the impact of riverine floods from Las Liebres stream through a methodology that combines hydraulic modeling, hydrological modeling, and the projection of extreme precipitation events for different return periods, employing a frequency analysis with stationary and non-stationary parameters. The results project maximum precipitation events of up to 110 mm with a return period of 100 years, generating a flow rate of approximately 80 m³/s and flooding 13.2% of the urban area of the basin. These floods affect mobility, critical infrastructure, access to basic services, and emergency response capacity.

Recibido: 4 de junio de 2024

Aceptado: 21 de noviembre de 2024

Publicado: 26 de marzo de 2025

Cómo citar: Díaz Buelvas, A. J., López De La Cruz, J., Gutiérrez Pérez, J. A., & Orozco Medina, I. (2025). Impacto de las inundaciones fluviales asociadas a eventos extremos de precipitación en zonas urbanas: caso de estudio arroyo Las Liebres de la ciudad de León, Guanajuato. *Acta Universitaria* 35, e3300. doi: <http://doi.org/10.15174/au.2025.4267>

Introducción

Actualmente, las inundaciones representan el peligro natural más extendido en la Tierra, con pérdidas de numerosas vidas, daños materiales de grandes proporciones y daños a las infraestructuras críticas (Ionita & Nagavciuc, 2021; World Meteorological Organization [WMO], 2007). De acuerdo con la Organización Meteorológica Mundial (WMO, por sus siglas en inglés), las inundaciones son los peligros naturales más mortíferos, afectando cada año regiones de todo el mundo (WMO, 2007). A nivel mundial constituyeron el 44% de las causas de desastres, tan solo en el periodo del año 2000 al 2019 afectaron a 1600 millones de personas (WMO, 2021). Por su parte, el Centro de Investigaciones sobre Epidemiología de los Desastres (CRED, por sus siglas en inglés) menciona que las inundaciones se incrementaron en un 134% respecto de las dos décadas anteriores (Centro de Investigaciones sobre la Epidemiología de los Desastres-Oficina de las Naciones Unidas para la Reducción del Riesgo de Desastres [CRED-UNDRR], 2020). En el periodo de 1980 a 1999 se registraron 1389 desastres provocados por inundaciones, y de 2000 al 2019 se registraron 3254 desastres por inundaciones (CRED-UNRR, 2020). Ejemplo de ello son las inundaciones que sufrió Pakistán en el año 2022, las cuales causaron 1739 muertes y afectaron a 33 millones de personas (Louise *et al.*, 2023). Otro ejemplo son las inundaciones de mayo de 2024 registradas en el sur de Brasil, las cuales dejaron un saldo de 107 muertes, 130 personas desaparecidas y 1.7 millones de personas afectadas (ONU, 2024).

Las inundaciones se producen por una multitud de factores naturales y antropogénicos asociados, principalmente, con la densidad poblacional y el cambio climático (Barredo, 2007; Duhan & Pandey, 2013; Hammond *et al.*, 2015; Kreibich *et al.*, 2014). En el caso de las inundaciones fluvial-urbanas, se producen principalmente por intensas precipitaciones sobre suelos impermeables o saturados, provocando desbordamientos de ríos (Jonkman & Kelman, 2005; Singh *et al.*, 2011). Adicionalmente, en zonas urbanas la interrupción de los ríos, una urbanización intrusiva y el aumento de la superficie impermeable aumentan el riesgo de inundaciones (Ahmad *et al.*, 2019; Chen *et al.*, 2015; Kumar *et al.*, 2020; Marco & Cayuela, 1994).

En el contexto de cambio climático, las inundaciones serán más frecuentes y severas debido a las alteraciones en los patrones climáticos, con precipitaciones más intensas, lo que se traduce en un mayor riesgo de inundaciones (Dharmarathne *et al.*, 2024; Visser *et al.*, 2023). Se proyecta que los eventos extremos de precipitación se intensifiquen debido a los cambios en la termodinámica atmosférica (Guha-Sapir *et al.*, 2017; Huang *et al.*, 2020; Pfahl *et al.*, 2017; Pendergrass & Hartmann, 2014; Schär *et al.*, 2016; Stedinger *et al.*, 1993). Asimismo, se espera que el cambio climático tenga efectos directos sobre la variabilidad temporal y espacial de los eventos extremos de precipitación (Zand *et al.*, 2023).

Según Kundzewicz *et al.* (2013), algunos ejemplos de inundaciones asociadas a eventos extremos de precipitación producto del cambio climático son las ocurridas en las cuencas del río Rhine y sus afluentes en 1993 y 1995; en la región mediterránea en 1994; en Europa Central en 1997 y en Reino Unido, Italia, Francia y Suiza en el año 2000. También se produjeron grandes inundaciones en Europa en 2005, 2007 y 2010 (Kundzewicz *et al.*, 2013). Los países de América Latina y el Caribe no son una excepción a las inundaciones causadas por eventos extremos de precipitación, especialmente Puerto Rico, Honduras, Nicaragua, República Dominicana, Guatemala, Colombia, Argentina, Cuba, Ecuador, Bolivia y México (ONU, 2020). En el caso específico de México, las ciudades de sus 32 estados sufren inundaciones en áreas urbanas año tras año (López *et al.*, 2022). Por ejemplo, Matías & Ramírez (2022) reportan que, en el año 2021, las ciudades de los estados de Jalisco, Nuevo León, Querétaro y Veracruz fueron las que registraron la mayor cantidad de eventos de inundación.

Con base en lo anterior, el objetivo del presente estudio fue determinar las áreas urbanas propensas a sufrir inundaciones fluviales y los impactos que tienen los desbordamientos de afluentes ocasionados por eventos extremos de precipitación. Lo anterior se llevó a cabo mediante una propuesta metodológica que involucra el modelado determinístico y probabilístico. Con ello se espera contribuir en la planificación urbana, en la gestión de desastres y en la protección de vidas y bienes, facilitando la generación de medidas y estrategias de mitigación para reducir los impactos negativos de las inundaciones asociadas a eventos extremos de precipitación en áreas urbanas.

Caso de estudio

El área de estudio ha sido la cuenca del arroyo Las Liebres, ubicada en la ciudad de León, Guanajuato, México (Figura 1). La cuenca tiene un área de 54.2 km² y el arroyo Las Liebres tiene una longitud de 20.7 km. El arroyo incluye gran parte de la zona norte y sur de la ciudad de León; al norte colinda con el Sauz y al sur con el boulevard Timoteo Lozano, antes de su unión con el arroyo El Granizo (Figura 1). El arroyo Las Liebres ha provocado anualmente inundaciones con importantes afectaciones en el área urbana de la ciudad de León.

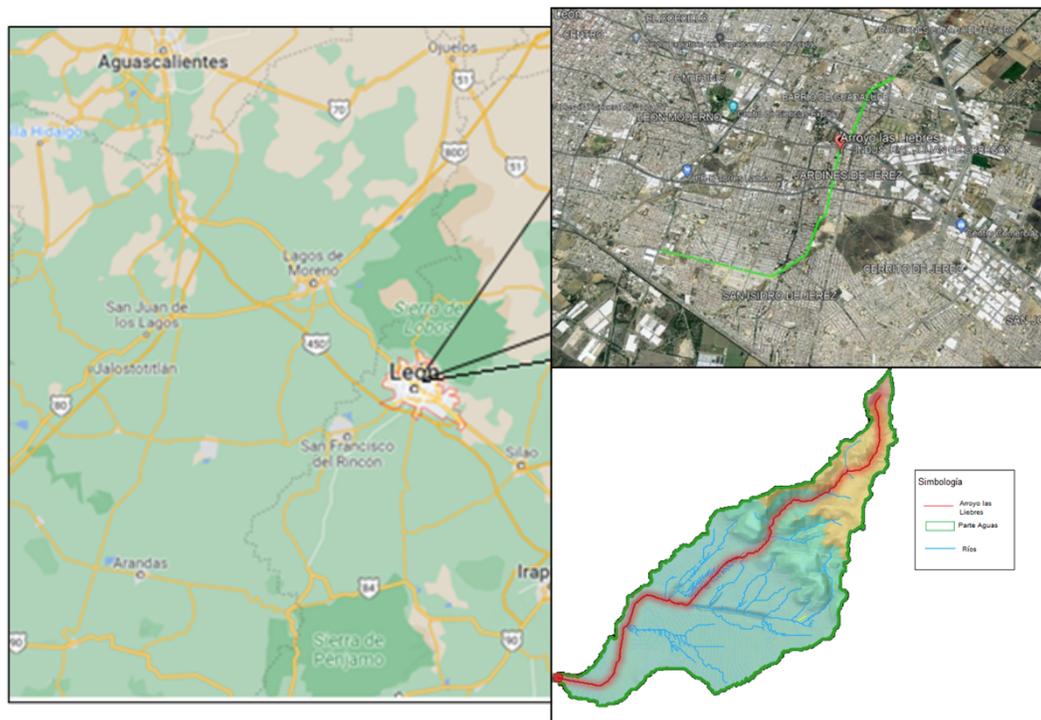


Figura 1. Ubicación del arroyo Las Libres y su cuenca de aportación usada como caso de estudio.

Fuente: Elaboración propia.

La cuenca tiene un tiempo de concentración de 2.1 horas, una pendiente media en ladera de 3.1% y 5.4% en el cauce principal. La curva hipsométrica obtenida a partir de un Modelo Digital de Elevaciones (DEM, por sus siglas en inglés) con resolución de 30 m muestra un porcentaje reducido de altas elevaciones y un alto porcentaje de elevaciones bajas, lo que indica la presencia de llanuras o áreas bajas que son propensas a inundaciones (Figura 2).

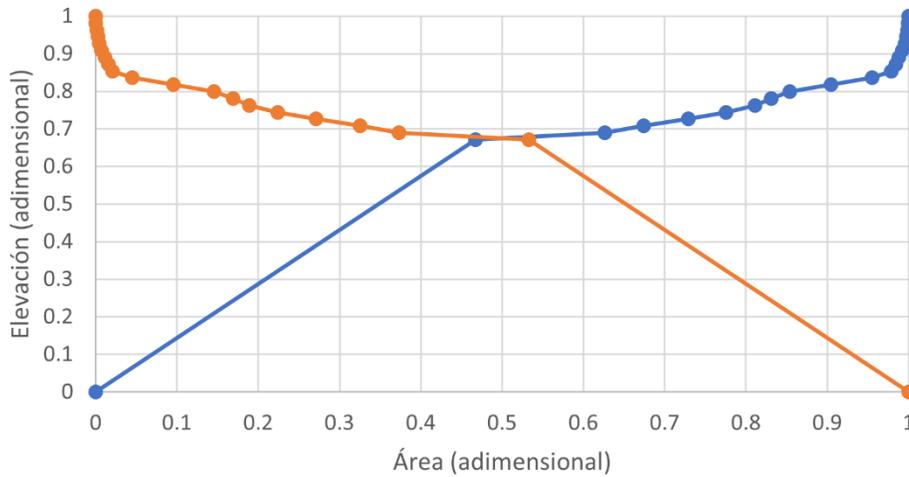


Figura 2. Curva hipsométrica de la cuenca del arroyo Las Liebres.
Fuente: Elaboración propia.

Materiales y métodos

La metodología implementada para realizar la presente investigación acopla el modelo hidráulico IBER[®], el modelo hidrológico HEC-HMS y un análisis de frecuencias con parámetros estacionarios y no estacionarios (Figura 2). Se ha decidido utilizar IBER[®] en el modelado hidráulico bidimensional del flujo debido a su precisión y robustez. Así como por su capacidad para simular eventos extremos, las interacciones entre ríos y llanuras de inundación, flexibilidad y adaptabilidad a diferentes condiciones geográficas y climáticas, además por su interfaz amigable y de acceso libre (Bladé *et al.*, 2014). También se ha decidido usar el HEC-HMS en el modelado de la producción de escorrentía superficial de la cuenca del arroyo Las Liebres (Ramly & Tahir, 2016), debido a que no se cuenta con caudales observados en la desembocadura de la cuenca, además de que el modelo HEC-HMS permite incluir diferentes tormentas de diseño y es de descarga libre. Finalmente, para proyectar los eventos extremos de precipitación en diferentes periodos de retorno, se empleó un análisis de frecuencias utilizando parámetros tanto estacionarios como no estacionarios. El análisis para el modelo estacionario se llevó a cabo con el *software* $Ax+b$, el cual es de libre distribución y ha sido desarrollado por el Centro Nacional de Prevención de Desastres (Merlos, 2017). El modelado no estacionario se ha realizado con el *software* Rstudio aplicando los modelos estadísticos *Generalized Additive Model for Location Scale and Shape* (GAMLSS). Los GAMLSS permiten modelar todos los parámetros de la variable de interés en función de covariables y son de gran utilidad para representar variables no lineales (Hernández *et al.*, 2017). La metodología propuesta permitirá una evaluación más precisa de los riesgos asociados con las precipitaciones extremas, considerando las variaciones temporales y los posibles cambios en los patrones climáticos debido al cambio climático.

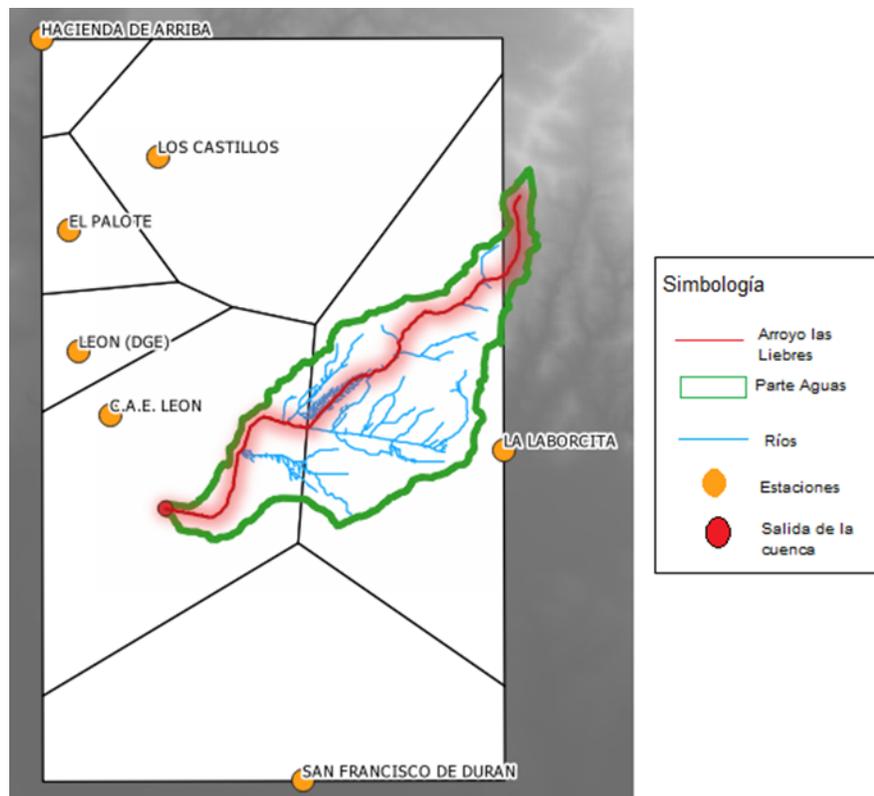


Figura 4. Ubicación de las estaciones pluviométricas y su influencia de acuerdo con los polígonos de Thiessen.
Fuente: Elaboración propia.

Resultados y discusión

En el cálculo de los periodos de retorno de los eventos extremos de precipitación registrados en la estación pluviométrica León-DGE, se ha usado una serie histórica de 59 años (periodo de 1960 al 2018). De la serie histórica se han extraído las precipitaciones máximas anuales, las cuales han variado de los 15 mm a los 82 mm (Tabla 1). Con base en la serie histórica, el periodo de retorno máximo es de 60 años para un evento extremo de 82 mm y una probabilidad de excedencia del 2%. Es decir, para este evento extremo se espera una frecuencia de 60 años, lo que representa información de gran valor para la gestión y mitigación del riesgo a inundaciones en el arroyo Las Liebres.

Tabla 1. Periodo de retorno para los eventos máximos de precipitación registrados en la estación pluviométrica León-DGE (clave 11095).

Año	Precipitación (mm)	Precipitación ordenada (mm)	Número de orden	Periodo de retorno (años)	Probabilidad de no excedencia
1960	68	82	1	60.0	0.02
1961	20	77	2	30.0	0.03
1962	34	74	3	20.0	0.05
1963	20	73	4	15.0	0.07
1964	24	70	5	12.0	0.08
1965	40	70	6	10.0	0.10
1966	27	68	7	8.6	0.12
1967	15	66	8	7.5	0.13
1968	47	65	9	6.7	0.15
1969	17	65	10	6.0	0.17
1970	60	60	11	5.5	0.18
1971	28	60	12	5.0	0.20
1972	25	60	13	4.6	0.22
1973	43	60	14	4.3	0.23
1974	42	58	15	4.0	0.25
1975	43	57	16	3.8	0.27
1976	58	53	17	3.5	0.28
1977	28	53	18	3.3	0.30
1978	21	50	19	3.2	0.32
1979	25	49	20	3.0	0.33
1980	22	49	21	2.9	0.35
1981	36	48	22	2.7	0.37
1982	36	47	23	2.6	0.38
1983	39	46	24	2.5	0.40
1984	34	45	25	2.4	0.42
1985	36	44	26	2.3	0.43
1986	53	43	27	2.2	0.45
1987	74	43	28	2.1	0.47
1988	45	42	29	2.1	0.48
1989	24	42	30	2.0	0.50
1990	65	40	31	1.9	0.52
1991	25	39	32	1.9	0.53
1992	20	39	33	1.8	0.55
1993	77	39	34	1.8	0.57
1994	39	38	35	1.7	0.58
1995	60	36	36	1.7	0.60
1996	48	36	37	1.6	0.62
1997	39	36	38	1.6	0.63
1998	53	36	39	1.5	0.65

Tabla 1. Periodo de retorno para los eventos máximos de precipitación registrados en la estación pluviométrica León-DGE (clave 11095). [Continuación]

Año	Precipitación (mm)	Precipitación ordenada (mm)	Número de orden	Periodo de retorno (años)	Probabilidad de no excedencia
1999	50	35	40	1.5	0.67
2000	49	34	41	1.5	0.68
2001	70	34	42	1.4	0.70
2002	35	32	43	1.4	0.72
2003	73	28	44	1.4	0.73
2004	57	28	45	1.3	0.75
2005	60	27	46	1.3	0.77
2006	49	25	47	1.3	0.78
2007	36	25	48	1.3	0.80
2008	44	25	49	1.2	0.82
2009	60	25	50	1.2	0.83
2010	82	24	51	1.2	0.85
2011	25	24	52	1.2	0.87
2012	42	22	53	1.1	0.88
2013	32	21	54	1.1	0.90
2014	38	20	55	1.1	0.92
2015	46	20	56	1.1	0.93
2016	66	20	57	1.1	0.95
2017	70	17	58	1.0	0.97
2018	65	15	59	1.0	0.98

Fuente: Elaboración propia.

El análisis de frecuencias con parámetros estacionarios se ha realizado mediante el *software Ax+b*. En el análisis se evaluaron un total de 29 funciones de distribución de probabilidad, utilizando para la estimación de sus parámetros tanto el método de máxima verosimilitud como el método de momentos (Figura 5). Tras aplicar criterios de bondad en el ajuste, se ha concluido que la distribución que mejor se ajusta a la frecuencia de los datos observados es la Gumbel doble con error estándar de ajuste (EEA) de 1.9020% (Figura 6).

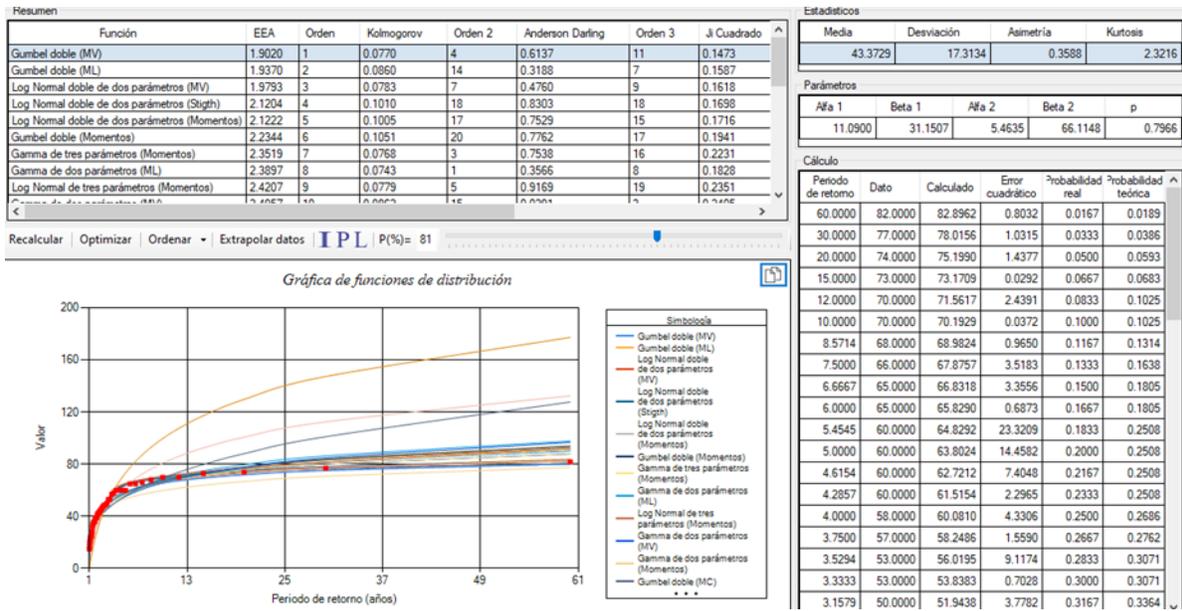


Figura 5. Análisis de frecuencias de los eventos máximos de precipitación registrados en la estación pluviométrica León-DGE. Fuente: Elaboración propia.

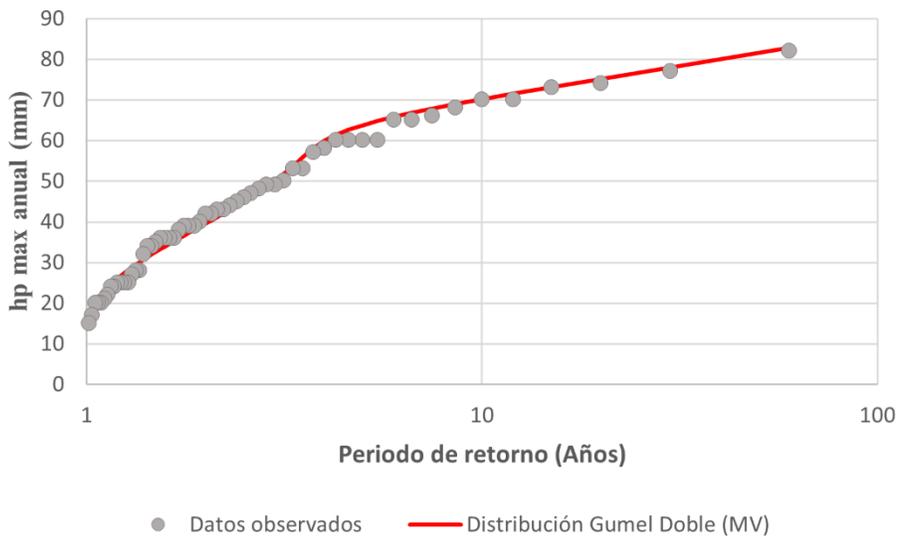


Figura 6. Ajuste obtenido con la función de distribución de probabilidad Gumbel doble con parámetros estimados por el método de momentos. Fuente: Elaboración propia.

En el caso del análisis de frecuencias con parámetros no estacionarios, se ha realizado aplicando los modelos estadísticos GAMLSS en el *software* Rstudio (Amat, 2020). En la Figura 7 se presentan los periodos de retorno para los diferentes eventos extremos de precipitación usando la distribución ajustada y validada mediante el criterio de información de Akaike (AIC, por sus siglas en inglés) y el criterio de información bayesiano (BIC, por sus siglas en inglés).

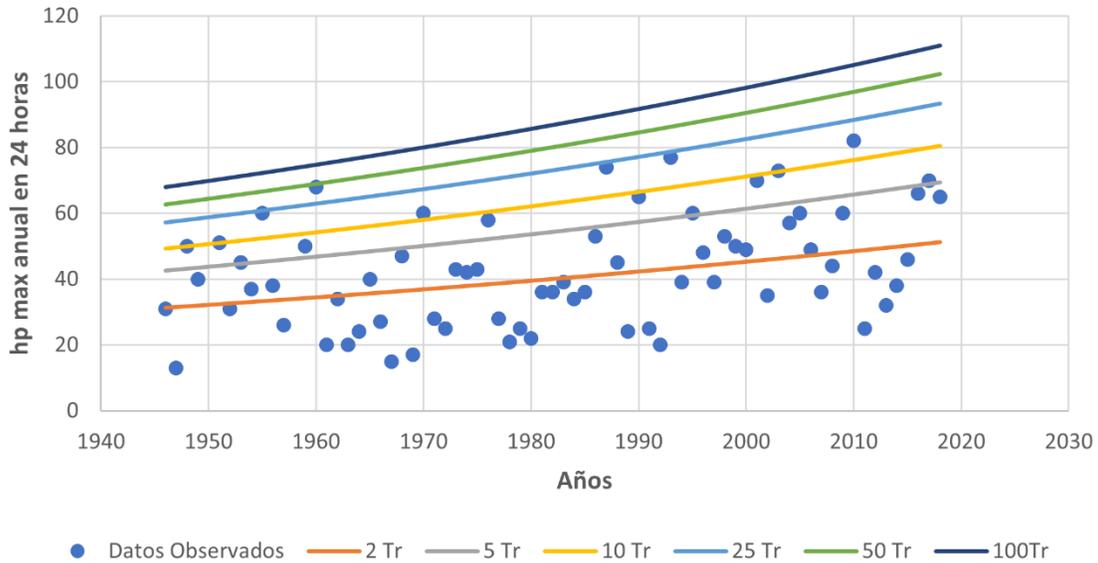


Figura 7. Ajuste obtenido con los modelos GAMLSS con parámetros no estacionarios.
Fuente: Elaboración propia.

Al comparar las proyecciones de los eventos extremos de precipitación para los periodos de retorno de 2, 3, 10, 25, 50 y 100 años, se observan diferencias entre los modelos estacionarios y los no estacionarios (Tabla 2). Por ejemplo, para el periodo de retorno de 100 años, se tiene una diferencia de 24.314 mm en las precipitaciones máximas proyectadas, lo que representa una diferencia del 21.9%. Esta diferencia es significativa en la evaluación del riesgo de inundaciones, y destaca la importancia de utilizar ambos modelos debido a la incertidumbre en las tendencias y la variabilidad de las proyecciones. Dichas diferencias pueden traducirse en subestimaciones o sobreestimaciones de los eventos extremos, lo que podría llevar a decisiones inadecuadas en la gestión del riesgo de inundaciones.

Tabla 2. Proyecciones para diferentes periodos de retorno a través del análisis de frecuencias con parámetros estacionarios y no estacionarios.

Tr (años)	Proyección de eventos extremos de precipitación (mm)	
	Estacionario	No estacionario
2	42.00	51.236
5	63.81	69.461
10	70.19	80.478
25	76.75	93.403
50	81.59	102.415
100	86.66	110.974

Fuente: Elaboración propia.

Una vez generados los eventos extremos de precipitación, se ha realizado la transformación precipitación a escurrimiento a través del modelado en HEC-HMS. Para ello, se ha utilizado el hidrograma unitario adimensional y el número de curva del Servicio de Conservación de Suelos (SCS). En la Figura 8 se presentan los resultados del modelado de la producción de escorrentía para los eventos extremos de precipitación estacionarios y no estacionarios. Los hidrogramas permiten observar que, en un evento ciclónico no estacionario, el caudal máximo alcanza un valor pico mayor al que se tendría en un evento con parámetros estacionarios.

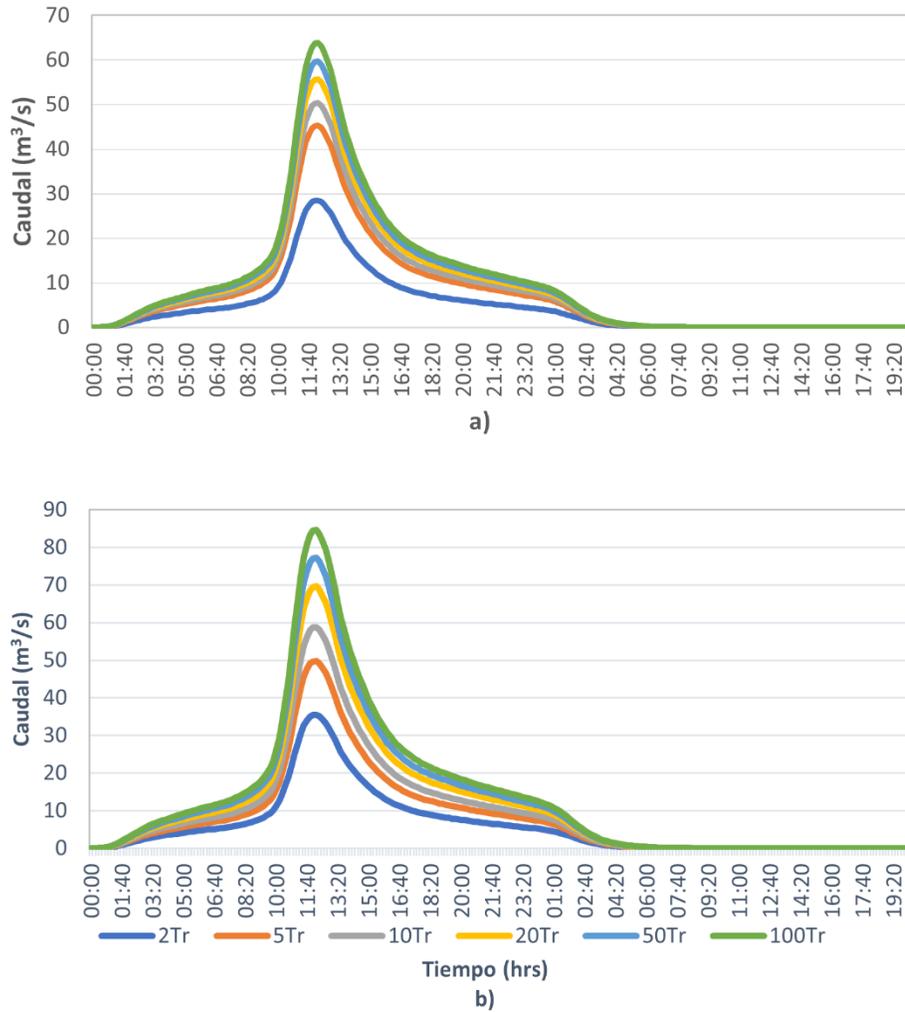
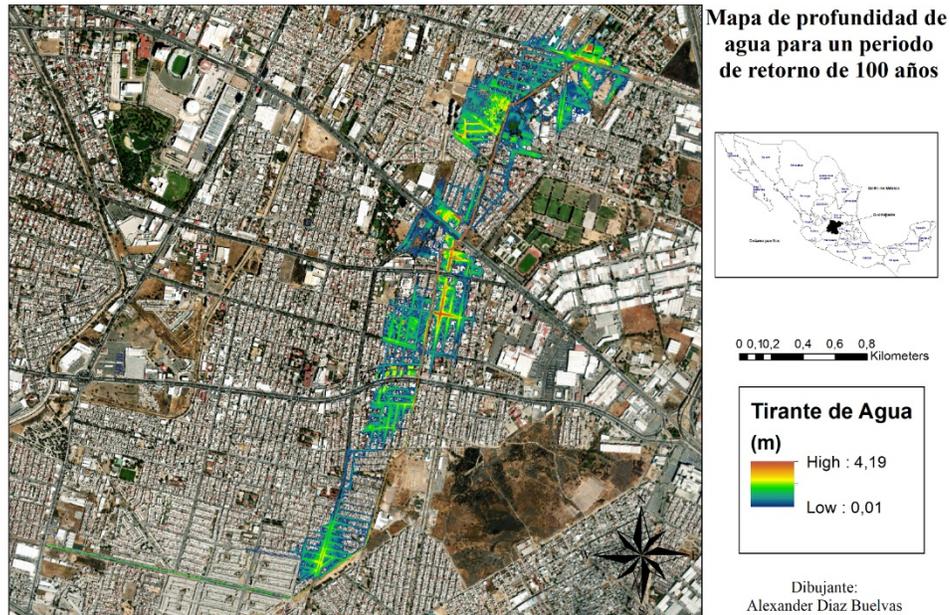


Figura 8. Hidrogramas de las avenidas máximas para diferentes periodos de retorno utilizadas en el modelado de las inundaciones en IBER®. (a) parámetros estacionarios y (b) parámetros no estacionarios.

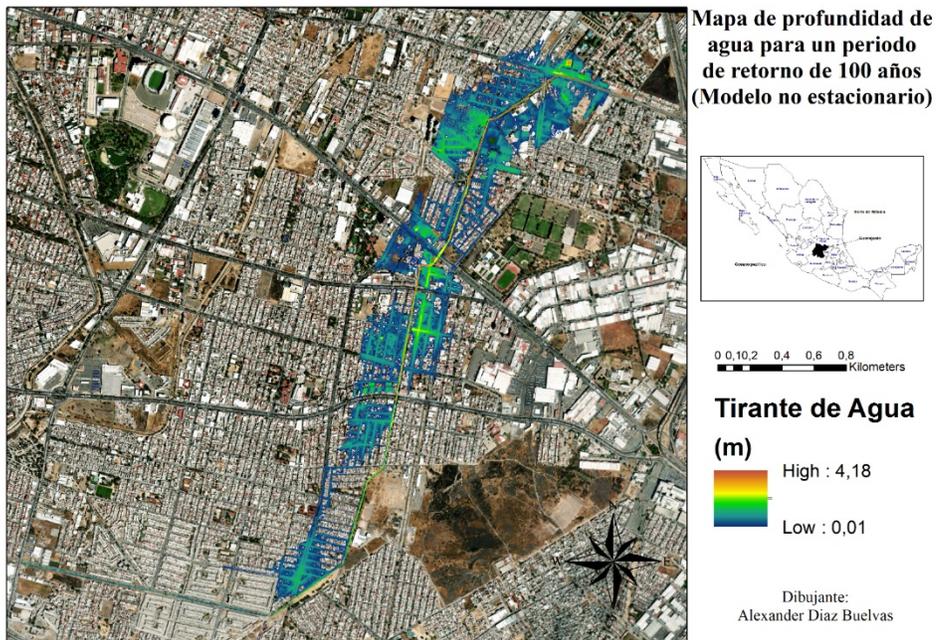
Fuente: Elaboración propia.

En este punto del estudio se procedió a realizar el modelado hidráulico bidimensional de las avenidas de los diferentes periodos de retorno usando el modelo IBER®. Lo anterior ha permitido analizar el comportamiento del flujo de agua en el área de estudio, considerando las características hidráulicas, la topografía, la rugosidad del terreno y las condiciones del contorno. En términos generales, los resultados del modelado hidráulico muestran que las zonas cercanas al cauce del arroyo Las Liebres son las más afectadas, incluso con eventos de precipitación del orden de los 42 mm, con periodo de retorno de dos años. Esto evidencia la vulnerabilidad de las zonas urbanas cercanas al arroyo y la necesidad de implementar medidas de mitigación y adaptación a corto y largo plazo. Las mayores afectaciones se presentan en eventos de 86 mm y 110 mm, los cuales tienen un periodo de retorno de 100 años (Figura 9).

Las áreas urbanas inundadas por los eventos máximos proyectados, tanto con parámetros estacionarios como con parámetros no estacionarios, son muy similares. En algunos casos, las profundidades del agua alcanzan hasta 4 m y las velocidades máximas de flujo de agua llegan a 12 m/s (Figura 10). Esto resalta la gravedad del impacto de los eventos extremos de precipitación en las zonas urbanas y la importancia de considerar ambos enfoques de modelado en la planificación y gestión del riesgo de inundaciones.



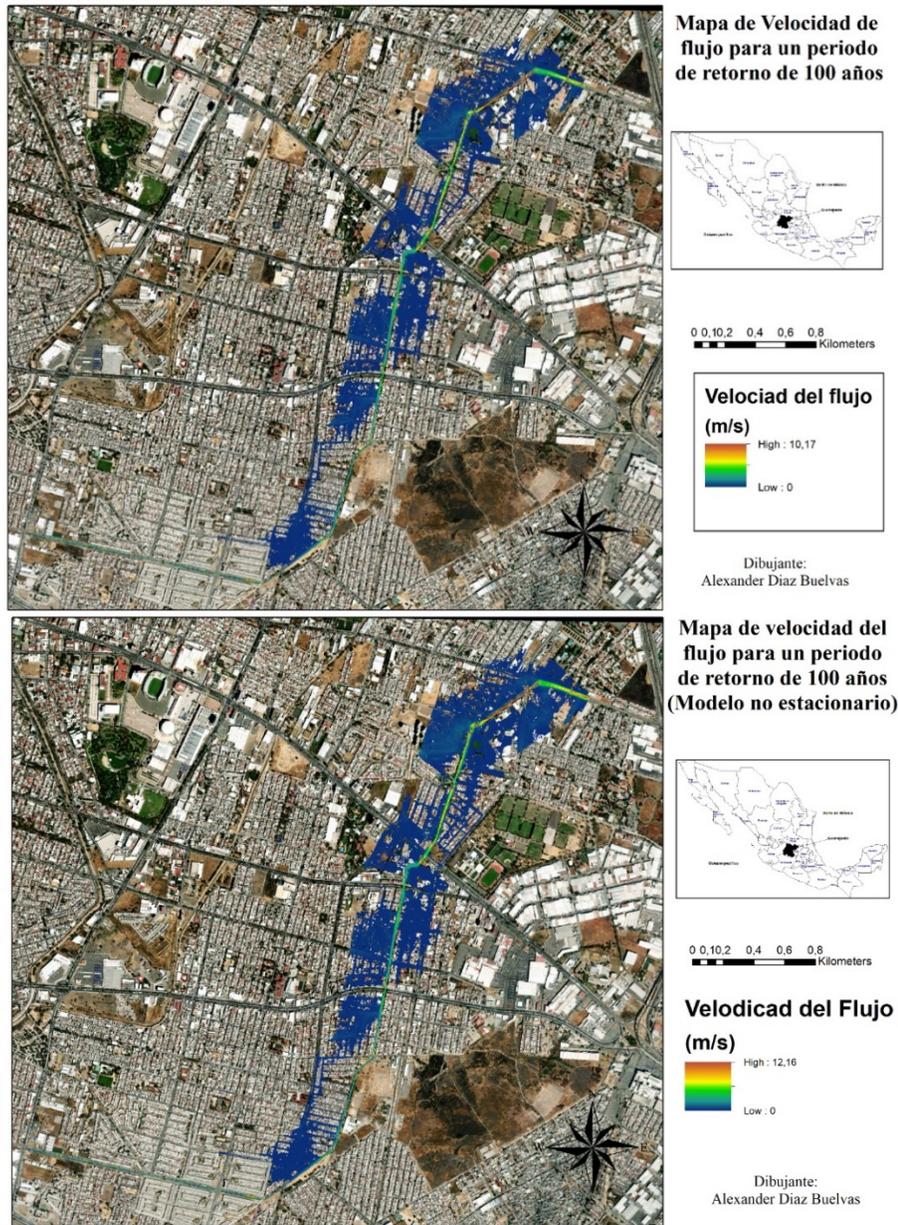
a)



b)

Figura 9. Profundidades alcanzadas en el área inundada durante la crecida generada por evento de precipitación para el periodo de retorno de 100 años. (a) modelado estacionario y (b) no estacionario.

Fuente: Elaboración propia.



a)

b)

Figura 10. Velocidades máximas alcanzadas durante la crecida generada por evento de precipitación para el periodo de retorno de 100 años. (a) modelado estacionario y (b) no estacionario.

Fuente: Elaboración propia.

Con base en los resultados anteriores, los impactos identificados en las zonas inundadas por el arroyo Las Liebres son, principalmente, económicos y de seguridad debido a las profundidades y a las altas velocidades del flujo del agua. También se han identificado afectaciones en la movilidad vehicular y peatonal, ya que profundidades superiores a 30 cm impiden el tránsito tanto de vehículos como de peatones. Además, se identificaron y localizaron las infraestructuras críticas, como farmacias, centros de salud, escuelas, entre otras, que resultaron afectadas por el desbordamiento del arroyo Las Liebres (Figura 11).

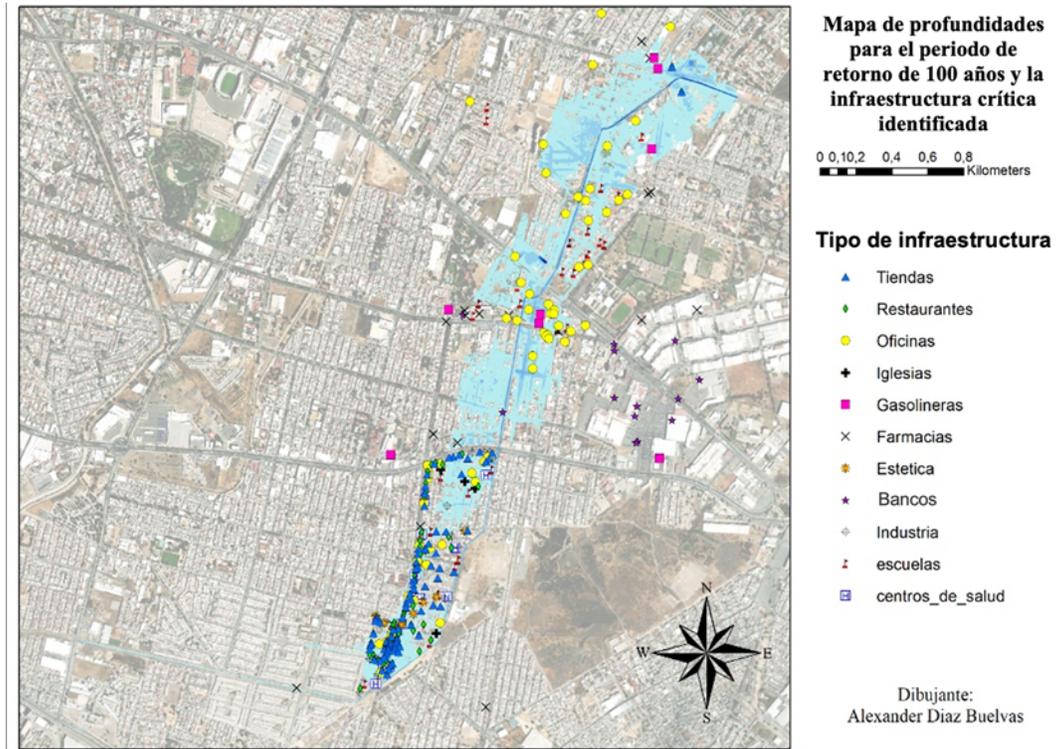


Figura 11. Identificación de infraestructura crítica afectada por la crecida generada por evento de precipitación para el periodo de retorno de 100 años (modelado no estacionario).

Fuente: Elaboración propia.

Este análisis destaca la necesidad de implementar medidas preventivas y estrategias de gestión del riesgo para proteger y salvaguardar infraestructuras esenciales como las ya mencionadas. En un contexto de incertidumbre respecto de la variabilidad y frecuencia de los eventos extremos asociados al cambio climático y a la respuesta rápida de la cuenca del arroyo Las Liebres, la planificación para la gestión de riesgos no es solo una necesidad práctica, sino también una inversión a largo plazo en la seguridad y el bienestar de la sociedad. Ante esta peligrosidad, se sugiere explorar y evaluar medidas de mitigación estructurales como embalses de retención, así como medidas de mitigación no estructurales como revisar y mejorar los planes de ordenamiento territorial. Además, se recomienda implementar medidas basadas en la naturaleza, que ayuden a la restauración de la cuenca del arroyo Las Libres y, con ello, reducir la velocidad de escorrentía y fomentar la infiltración en las zonas altas.

Conclusiones

El presente estudio ha permitido la delimitación de las áreas urbanas afectadas por las inundaciones fluviales en la periferia del arroyo Las Liebres ubicado en la ciudad de León, Guanajuato, las cuales representan el 13.2% del área urbana de la cuenca. Mediante la metodología implementada, se ha evidenciado que incluso eventos de precipitación con un periodo de retorno de tan solo dos años pueden desencadenar inundaciones en las zonas adyacentes al arroyo Las Liebres. Sin embargo, los resultados proyectan eventos máximos de precipitación de hasta 110 mm con un periodo de retorno de 100 años, generando un caudal de aproximadamente 80 m³/s e inundando el 13.2% del área urbana de la cuenca. Estas inundaciones afectan la movilidad, las infraestructuras críticas, el acceso a servicios básicos y la capacidad de respuesta ante emergencias. Este hallazgo resalta la urgencia de adoptar medidas de gestión del riesgo y adaptación para reducir la vulnerabilidad de estas áreas frente a futuros eventos extremos de precipitación, lo que implica desafíos importantes en términos de restauración, planificación de emergencias y fortalecimiento de la resiliencia de las infraestructuras ante eventos futuros.

Agradecimientos

A la Dirección de Apoyo a la Investigación y al Posgrado (DAIP) de la Universidad de Guanajuato por el financiamiento asignado al Proyecto 210/2024 dentro de la Convocatoria Institucional de Investigación Científica 2024.

Conflictos de interés

Los autores declaran que no existen conflictos de interés.

Referencias

- Ahmad, T., Pandey, A. C., & Kumar, A. (2019). Evaluating urban growth and its implication on flood hazard and vulnerability in Srinagar city, Kashmir Valley, using geoinformatics. *Arabian Journal of Geosciences*, 12(308). <https://doi.org/10.1007/s12517-019-4458-1>
- Amat, J. (2020). *GAMLSS: modelos aditivos generalizados para posición, escala y forma*. Rpubs.com. https://rpubs.com/Joaquin_AR/603234
- Barredo, J. I. (2007). Major flood disasters in Europe: 1950–2005. *Natural Hazards*, 42, 125–148. <https://doi.org/10.1007/s11069-006-9065-2>
- 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. <https://doi.org/10.1016/j.rimni.2012.07.004>.
- Chen, Z., Yin, L., Chen, X., Wei, S., & Zhu, Z. (2015). Research on the characteristics of urban rainstorm pattern in the humid area of Southern China: a case study of Guangzhou City. *International Journal of Climatology*, 35, 4370-4386. <https://doi.org/10.1002/joc.4294>
- Centro de Investigaciones sobre la Epidemiología de los Desastres (CRED)-Oficina de las Naciones Unidas para la Reducción del Riesgo de Desastres (UNDRR). (2020). *El costo humano de los desastres: una mirada a los últimos 20 años 2000-2019*. UNDRR. <https://agua.org.mx/biblioteca/el-costos-humano-de-los-desastres-una-mirada-a-los-ultimos-20-anos-undrr/>
- Dharmarathne, G., Waduge, A. O., Bogahawaththa, M., Rathnayake, U., & Meddage, D. P. P. (2024). Adapting cities to the surge: a comprehensive review of climate-induced urban flooding. *Results in Engineering*, 22, 1-15. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.102123>
- Duhan, D., & Pandey, A. (2013). Statistical analysis of long term spatial and temporal trends of precipitation during 1901–2002 at Madhya Pradesh, India. *Atmospheric Research*, 122, 136-149. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2012.10.010>

- Guha-Sapir, D., Hoyois, P., Wallemaq, P., & Bellow, R. (2017). *Annual disaster statistical review 2016: the numbers and trends*. Centre for Research on the Epidemiology of Disasters (CRED) Institute of Health and Society (IRSS) Université catholique de Louvain- Brussels, Belgium. <https://reliefweb.int/report/world/annual-disaster-statistical-review-2016-numbers-and-trends>
- Hammond, M. J., Chen, A. S., Djordjević, S., Butler, D., & Mark, O. (2015). Urban flood impact assessment: a state-of-the-art review. *Urban Water Journal*, 12, 14–29. <https://doi.org/10.1080/1573062X.2013.857421>
- Hernández, F., Naranjo-Dueñas, G., & Monsalve-Lugo, E. (2017). Estimación del rendimiento de orellana mediante modelos Gamlss. *Revista de la Facultad de Ciencias*, 6(1), 67-82. <https://doi.org/10.15446/rev.fac.cienc.v6n1.61119>
- Huang, X., Swain, D. L., & Hall, A. D. (2020). Future precipitation increase from very high resolution ensemble downscaling of extreme atmospheric river storms in California. *Science Advances*, 6(29), 1-16. <https://doi.org/10.1126/sciadv.aba1323>
- Ionita, M., & Nagavciuc, V. (2021). Extreme floods in the eastern part of Europe: large-scale drivers and associated impacts. *Water*, 13(8), 1122. <https://doi.org/10.3390/w13081122>
- Jonkman, S. N., & Kelman, I. (2005). An analysis of the causes and circumstances of flood disaster deaths. *Disasters*, 29(1), 75–97. <https://doi.org/10.1111/j.0361-3666.2005.00275.x>
- Kreibich, H., Bubeck, P., Kunz, M., Mahlke, H., Parolai, S., Khazai, B., Daniell, J., Lakes, T., & Schröter, K. (2014). A review of multiple natural hazards and risks in Germany, *Natural Hazards*, 74, 2279–2304. <https://doi.org/10.1007/s11069-014-1265-6>
- Kumar, N., Kumar, M., Sherring, A., Suryavanshi, S., Ahmad, A., & Lal, D. (2020). Applicability of HEC-RAS 2D and GFMS for flood extent mapping: a case study of Sangam area, Prayagraj, India. *Modeling Earth Systems Environment*, 6, 397-405. <https://doi.org/10.1007/s40808-019-00687-8>
- Kundzewicz, Z. W., Kanae, S., Seneviratne, S. I., Handmer, J., Nicholls, N., Peduzzi, P., Mechler, R., Bouwer, L. M., Arnell, N., Mach, K., Muir-Wood, R., Brakenridge, G. R., Kron, W., Benito, G., Honda, Y., Takahashi, K., & Sherstyukov, B. (2013). Flood risk and climate change: global and regional perspectives. *Hydrological Sciences Journal*, 59(1), 1–28. <https://doi.org/10.1080/02626667.2013.857411>
- López, M., Magaña, V., & Perez, T. (2022). Riesgo de inundaciones urbanas repentinas en la zona Metropolitana de Guadalajara, México. *Investigaciones Geográficas*, (108), 1-21. <https://doi.org/10.14350/ig.60547>
- Louise, R., Kharb, A., & Tubeuf, S. (2023). The untold story of missing data in disaster research: a systematic review of the empirical literature utilising the Emergency Events Database (EM-DAT). *Environmental Research Letters*, 18(10), 103006, 1-10. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/acfd42>
- Marco, J. B., & Cayuela, A. (1994). Urban flooding: the flood-planned city concept. En G. Rossi, N. Harmancioğlu, & V. Yevjevich, (eds.), *Coping with floods* (pp. 705-715). Springer. https://doi.org/10.1007/978-94-011-1098-3_43
- Matías, L. G., & Ramírez, N. D. (2022). *Catálogo de inundaciones 2021*. Subdirección de Riesgos por Inundación Dirección de Investigación. https://www1.cenapred.unam.mx/DIR_INVESTIGACION/2022/XLI/RI/220221_RIAct23_Catalogoinundaciones2021.pdf
- Merlos, F. (2017). *Manual de usuario SIHIMAX 1.56*. <https://www.hydrobits.com/programas/manuales.html>
- Organización de las Naciones Unidas (ONU). (2020). *América Latina y el Caribe: la segunda región más propensa a los desastres*. <https://news.un.org/es/story/2020/01/1467501>
- Organización de las Naciones Unidas (ONU). (2024). *Las inundaciones en Brasil afectan a más de 1,7 millones de personas*. <https://news.un.org/es/story/2024/05/1529696>
- Pendergrass, A. G., & Hartmann, D. L. (2014). Changes in the distribution of rain frequency and intensity in response to global warming. *Journal of Climate*, 27(22), 8372–8383. <https://doi.org/10.1175/jcli-d-14-00183.1>
- Pfahl, S., O’Gorman, P. A., & Fischer, E. M. (2017). Understanding the regional pattern of projected future changes in extreme precipitation. *Nature Climate Change*, 7(6), 423–427. <https://doi.org/10.1038/nclimate3287>

- Ramly, S., & Tahir, W. (2016). Application of HEC-GeoHMS and HEC-HMS as rainfall-runoff model for flood simulation. En W. Tahir, P. Abu Bakar, M. Wahid, S. Mohd Nasir, & W. Lee (eds.), *ISFRAM 2015* (pp. 181-192). Springer. https://doi.org/10.1007/978-981-10-0500-8_15
- Schär, C., Ban, N., Fischer, E. M., Rajczak, J., Schmidli, J., Frei, C., Giorgi, F., Karl, T. R., Kendon, E. J., Klein, A. M. G., O’Gorman, P. A., Sillmann, J., Zhang, X., & Zwiers, F. W. (2016). Percentile indices for assessing changes in heavy precipitation events. *Climatic Change*, 137, 201–216. <https://doi.org/10.1007/s10584-016-1669-2>
- Singh, S. K., Pandey, A. C., & Nathawat, M. S. (2011). Rainfall variability and spatio temporal dynamics of flood inundation during the 2008 Kosi Flood in Bihar State, India. *Asian Journal of Earth Sciences*, 4(1), 9-19. <https://doi.org/10.3923/ajes.2011.9.19>
- Stedinger, J. R., Vogel, R. M., & Foufoula-Georgiou, E. (1993). Frequency analysis of extreme events. En D. R. Maidment (ed.), *Handbook of hydrology* (pp. 1-66). McGraw-Hill Inc. <https://sites.tufts.edu/richardvogel/files/2019/04/frequencyAnalysis.pdf>
- Visser, J. B., Wasko, C., Sharma, A., & Nathan, R. (2023). Changing storm temporal patterns with increasing temperatures across Australia. *Journal of Climate*, 36(18), 6247-6259. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-22-0694.1>
- World Meteorological Organization (WMO). (2007). *Economic aspects of integrated flood management*. https://www.floodmanagement.info/publications/policy/ifm_economic_aspects/Economic_Aspects_of_IFM_En.pdf
- World Meteorological Organization (WMO). (2021). *2021 state of climate services water*. <https://library.wmo.int/records/item/57630-2021-state-of-climate-services-water?offset=2>
- Zand, M., Gholamrezaei, S., Daryabari, S. J., & Alijani, B. (2023). Detection of climate change by analyzing the occurrence of Extreme-climatic events in the west and southwest of Iran. *Journal of Climate Research*, 14(54), 37-54. https://clima.irimo.ir/article_172643.html?lang=en