

# Análisis de las características de los eventos de lluvia

de la temporada 2021 en una zona urbana, estudio de caso de Autlán de Navarro, Jalisco, México

## Analysis of the Characteristics of Rainfall Events

of the 2021 Season in an Urban Area, a Case Study of Autlán de Navarro, Jalisco, Mexico

**Gerardo Núñez-González, Domingo Velázquez-Pérez, Pedro Barboza-Jiménez, Francisco Javier Pelayo-Cortés y Luis Isidro Aguirre Salas\***

Conocer las características de los eventos de lluvia en las zonas urbanas es importante, ya que esta información se considera insumo básico en la planeación para la prevención y/o mitigación de riesgos de origen hidrometeorológico. En este trabajo se analizan las características de aquellos ocurridos durante la temporada 2021 en Autlán de Navarro, Jalisco, México, ciudad que en el último censo poblacional superó los 50 mil habitantes. El objetivo de esta investigación consistió en analizar el comportamiento espacio-temporal de los eventos de lluvia a partir de observaciones a nivel subhorario. Los resultados muestran magnitudes entre 1 y 100 mm de precipitación pluvial, duraciones de 0.5 a 45 horas, intensidades medias entre 0.2 y 28 mm/h e intensidades

It is important to know the characteristics of rainfall events in urban areas, since this information is considered a basic input in planning for the prevention and/or mitigation of hydrometeorological risks. This paper analyzes the characteristics of those occurring during the 2021 season in Autlán de Navarro, Jalisco, Mexico, a city that in the last population census exceeded 50 thousand inhabitants. The objective of this research was to analyze the spatio-temporal behavior of rainfall events from sub-hourly observations. The results show magnitudes between 1 and 100 mm of rainfall, durations from 0.5 to 45 hours, mean intensities between 0.2 and 28 mm/h and instantaneous intensities from 1 to 200 mm/h; they also presented some notable differences in

\* Universidad de Guadalajara (UdeG), gerardo.nunezg@academicos.udg.mx, domingo.velazquez@academicos.udg.mx, pedro.barboza@academicos.udg.mx, javier.pelayo@academicos.udg.mx, isidro.aguirre@academicos.udg.mx, respectivamente.

instantáneas de 1 a 200 mm/h; asimismo, presentaron algunas diferencias notables en cuanto a su desarrollo, haciendo evidente que, en el caso de áreas geográficas pequeñas, la lluvia puede presentar un grado de heterogeneidad importante tanto en el espacio como en el tiempo, justificando su estudio a nivel de evento en las áreas urbanas.

**Palabras clave:** precipitación; lluvia extrema; precipitación subhoraria; Jalisco.

**Recibido:** 17 de agosto de 2022.

**Aceptado:** 27 de marzo de 2023.

terms of their development, making it evident that, in the case of small geographic areas, rainfall can present an important degree of heterogeneity both in space and time, justifying its study at the event level in urban areas.

**Key words:** rainfall; precipitation extremes; sub-hourly precipitation; Jalisco.



Lizeth Méndez Gálvez.

## Introducción

En la literatura se ha reconocido que el crecimiento de las zonas urbanas y el cambio de uso de suelo tienen un impacto importante en los volúmenes de escurrimiento superficial, como lo señalan Esposito *et al.* (2018) y Gutiérrez-López *et al.* (2019), además de considerarse como un factor que contribuye a la formación de encharcamientos, inundaciones y caos en las ciudades (Vera y López, 2010).

De acuerdo con Vera y López (2010), entre las principales causas que pueden generar inundaciones en las zonas urbanas se encuentra la distribución espacial heterogénea de la precipitación, así como su intensidad y duración, además de factores como las condiciones topográficas del terreno y la infraestructura existente para el desalojo de las aguas de lluvia. En este sentido, la disponibilidad de información climática de calidad es importante para el desarrollo de investigación en el área de la hidrometeorología e impactos de eventos extremos en centros poblacionales (Leal-Nares *et al.*, 2010). De hecho, una de las vertientes que están cobrando relevancia en este campo se enfoca en el análisis de las características de los eventos de lluvia, así como en los patrones temporales que impulsa el ciclo hidrológico. Sin embargo, para poder realizar este tipo de estudios, es imprescindible tener series temporales de alta resolución temporal que ayuden a una valoración adecuada (Barbosa *et al.*, 2018; Dunkerley, 2019).

A la fecha, pocos estudios se han enfocado en el análisis de eventos de lluvia extrema a escala horaria o subhoraria debido, principalmente, a la carencia de series de precipitación que cubran largos periodos y que, además, cuenten con registros de alta resolución temporal (Dunkerley, 2019). Lo anterior puede ser considerado como una limitante cuando se busca realizar análisis de riesgo, pues dentro de la literatura se considera que los eventos observados a escala subhoraria son problemáticos para el manejo urbano de las aguas pluviales (Haacke y Paton, 2021; Papagiannaki *et al.*, 2017). Esto, de acuerdo con Westra *et al.*

(2014) y Guzmán *et al.* (2018), se debe a que la intensidad de la precipitación presenta cambios importantes cuando se analiza a escalas subdiarias, en especial a las horarias y subhorarias. En este sentido, estos investigadores mencionan que los análisis con datos de precipitación con una mayor resolución temporal son necesarios para prevenir el peligro que podrían generar las condiciones climáticas futuras. La necesidad de observaciones de este tipo es porque, hoy en día, la estimación del riesgo y la vulnerabilidad requieren exámenes probabilísticos más detallados para enfrentar la ocurrencia en tiempo y espacio de fenómenos extremos cada vez más severos (Gutiérrez-López *et al.*, 2019) ya que, como lo señalan Papagiannaki *et al.* (2017), las inundaciones repentinas en zonas urbanas responden a lluvias de corta duración, lo cual, de acuerdo con Dunkerley (2019), se debe a que las intensidades de lluvia alcanzadas en periodos de 10 a 30 minutos tienen más poder explicativo que los datos registrados a nivel horario o intervalos mayores.

México, por su ubicación geográfica, se encuentra expuesto a fenómenos hidrometeorológicos, como depresiones tropicales, tormentas y huracanes (García, 2003; Méndez *et al.*, 2008) provenientes tanto del océano Pacífico como del Atlántico. Para prevenir posibles riesgos derivados de estos, es necesario el monitoreo continuo de las variables climatológicas. Aunque se cuenta con más de 3 mil estaciones meteorológicas distribuidas en todo el país para dar seguimiento al comportamiento del tiempo a escala diaria, algunos investigadores, como Leal-Nares *et al.* (2010), mencionan que es necesario mejorar la cobertura espacial y temporal de los datos. En este sentido, el Servicio Meteorológico Nacional (SMN) comenzó a finales de la década de los 90 con la instalación de estaciones meteorológicas automáticas (EMAS) tratando de mejorar la resolución temporal de los datos (SMN, 2022a), sin embargo, la cobertura espacial lograda con este tipo de infraestructura aún es baja.

Por otro lado, Vera y López (2010) señalan que las inundaciones son eventos naturales y recurrentes que se producen en las planicies o en las áreas

bajas como resultado de lluvias intensas o continuas que, al sobrepasar la capacidad de retención del suelo y de los cauces, terminan desbordando e inundando los terrenos aledaños a los cursos de agua. En la actualidad, se estima que, a nivel mundial, la cantidad de desastres relacionados con el clima ha aumentado considerablemente (Conforti *et al.*, 2018; Byakatonda *et al.* 2020). De acuerdo con Hoyois y Guha-Sapir (2012), citado por De Risi *et al.* (2020), se estima que, en las décadas recientes, entre 70 y 90 % del número de desastres registrados en el mundo están relacionados con el clima.

Debido a lo anterior, en México se han realizado algunas investigaciones enfocadas al análisis de las inundaciones. Estos trabajos se han centrado, principalmente, en el análisis de la frecuencia y extensión de estas, como lo muestran González-Aguirre *et al.* (2016), Perevochtchikova y Lezama (2010) y Vera y López (2010), por ejemplo. Por otro lado, en algunos estudios se ha dado mayor énfasis al comportamiento de la precipitación alrededor de centros urbanos, como es el caso de los de Sigala *et al.* (2017) y Gutiérrez-López *et al.* (2019).

En la ciudad de Autlán de Navarro, Jalisco, México, que recientemente superó los 50 mil habitantes, se han observado eventos hidrometeorológicos importantes, como es el caso del huracán Jova, el cual, en el 2011, causó desbordamientos y daños en las zonas urbana y agrícola debido a que, durante este evento, cayeron 330 mm de lluvia en un periodo de 18 horas (Olguín-López *et al.*, 2012), mientras que en el 2015, durante Patricia se registraron precipitaciones máximas en 24 horas de alrededor de 280 mm (Molina *et al.*, 2019).

La ocurrencia de este tipo de eventos muestra la necesidad de analizar las características de la precipitación a escalas temporales menores y así contar con información que ayude a la prevención de riesgos relacionados con fenómenos hidrometeorológicos extremos, en especial en las ciudades en crecimiento donde el cambio de uso de suelo se ha vuelto importante.

En este sentido, con el propósito de tener datos de los eventos de lluvia con mayor resolución temporal y espacial a nivel urbano, durante el 2021 se instalaron seis estaciones meteorológicas automatizadas al interior de Autlán de Navarro, lo anterior tratando de atender en parte el aspecto número dos señalado por Jiménez-Cisneros (2015) dentro de las acciones que propone la Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (UNESCO, por sus siglas en inglés) en materia de desastres hídricos y cambios hidrológicos, donde se plantea la adquisición de datos y validación en campo, así como apoyar los análisis relacionados con el efecto de las ciudades en la cantidad, estructura y frecuencia de la precipitación, ya que, como lo señalan Lorenz *et al.* (2019) en la literatura, todavía no se llega a un consenso al respecto.

Así el objetivo del presente trabajo consiste en analizar las características de los eventos de precipitación ocurridos durante la temporada de lluvias 2021 en la zona urbana de Autlán de Navarro en función de que estos presentan características similares a las observadas durante los huracanes *Jova* y *Patricia*, así como estudiar el comportamiento espacial de aquellos considerados como extremos.

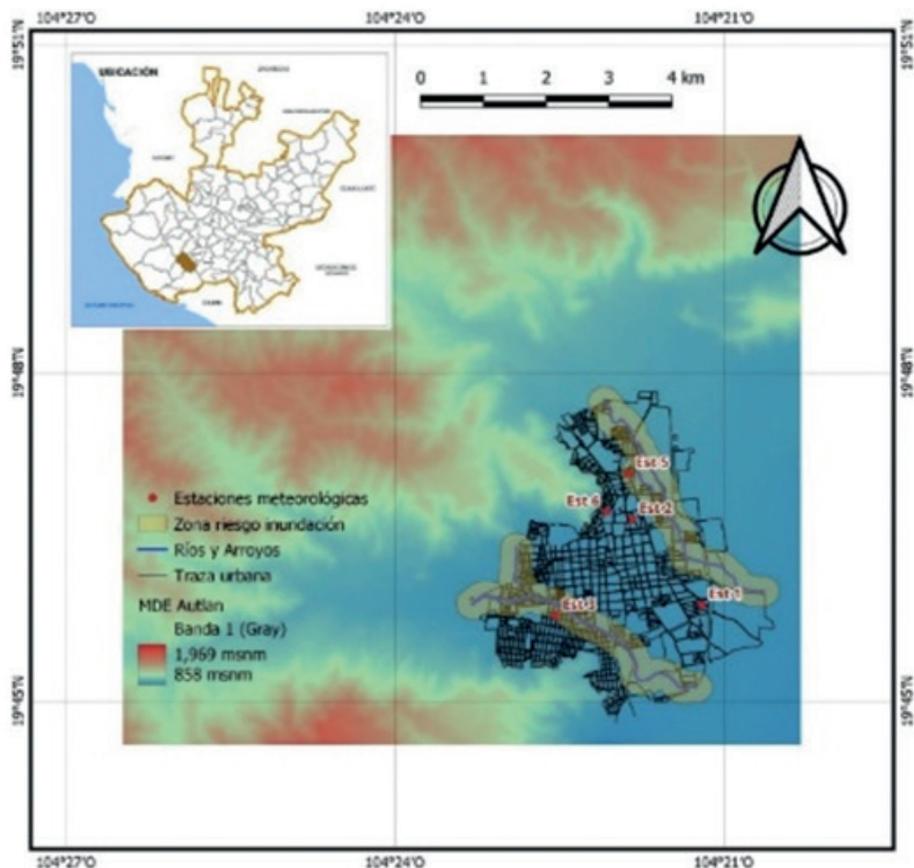
## Metodología

### Área de estudio

Autlán de Navarro se localiza al suroeste del estado de Jalisco, México, entre las coordenadas 19° 45' a 19° 48' de latitud Norte y 104° 20' a 104° 24' de longitud Oeste (figura 1), a una altitud promedio sobre el nivel del mar de 920 metros. Se ubica dentro de la cuenca del río Armería. Por la ciudad cruzan los arroyos El Cangrejo y El Coajinque, los cuales forman su caudal durante la época de lluvias. El clima en la zona es de tipo semiseco con una temperatura media anual de 21.2 °C y una precipitación media anual de 635.7 mm (IIEG, 2021). Es cabecera del municipio del mismo nombre, y cuenta con una población de 52 019 habitantes (INEGI, 2021).

Figura 1

## Localización del área de estudio y de las estaciones meteorológicas



Fuente: elaboración propia con información del Instituto de Información Estadística y Geográfica de Jalisco.

En la figura 1 se muestran las zonas que se consideran en riesgo de inundación ante eventos de precipitación extrema. La norte, por donde fluye el arroyo El Cangrejo, es un lugar con baja población donde residen 1 211 personas en viviendas de reciente construcción; aunque se encuentra catalogada como un área con Índice de Marginación (IM) bajo (CONAPO, 2023), cuenta con un hospital y centro universitario. Caso contrario, en la zona sureste, donde se encuentra El Coajinque, se tiene una alta concentración de población (8 737 habitantes) en la parte registrada como de riesgo por inundaciones; además, el IM está clasificado entre medio y muy alto (CONAPO, 2023) debido a la condición socioeconómica de la mayoría de las perso-

nas que ahí viven; al igual que en la zona norte, en el área de riesgo del arroyo se tiene infraestructura importante, como dos escuelas (primaria y secundaria), un campus de la Universidad Pedagógica Nacional y un centro de salud.

### Datos

Las seis EMAS instaladas en la zona urbana de la cabecera municipal están equipadas con pluviómetros de balancín, los cuales tienen una resolución de 0.2 mm (DAVIS, 2021). Sin embargo, debido a problemas con la conexión en tiempo real, la estación número cuatro no permitió una serie continua

de registros, por lo que en los análisis presentados en este trabajo quedó excluida. La resolución temporal utilizada en los registros de lluvia fue de 10 minutos.

## Métodos

La definición de los eventos de lluvia puede realizarse de distintas maneras. En este trabajo, esta se basó en las siguientes condiciones: 1) que la lámina total de lluvia del suceso fuera superior a 1 mm y 2) que el tiempo entre eventos fuera igual o mayor a seis horas, tiempo recomendado por Dunkerley (2008 y 2021) para la diferenciación entre estos. Aquellos cuya lámina fue menor a 1 mm no se incluyeron en los análisis. Una vez clasificados los episodios de lluvia, se determinaron los siguientes parámetros para cada uno de los eventos: lámina total de precipitación, duración, e intensidades máxima instantánea y media.

En los casos de la duración e intensidades, se tomaron en cuenta dos criterios: para la primera, se consideró como la total del evento al tiempo transcurrido desde el primer pulso de lluvia hasta el que presentara una permanencia igual o mayor a seis horas del siguiente (Dunkerley, 2008), sin embargo, como señala ese autor (2021), cuando se cuantifica de esta manera la duración de la lluvia, no se incluye la intermitencia, lo cual puede afectar la magnitud de la intensidad media de la precipitación, por lo que en este trabajo se tomó como duración relativa del evento a la suma del tiempo durante el cual se observaron pulsos de lluvia; en el mismo sentido, se calcularon las intensidades medias tomando como referencia el periodo total del evento y también una intensidad media en la cual se consideró la duración relativa de la precipitación. Los parámetros mencionados fueron sometidos a un análisis estadístico descriptivo a través de la plataforma estadística R.

Para la definición de los eventos extremos a escalas horaria y subhoraria, se utilizó en primera instancia el criterio propuesto por Haacke y Paton (2021), quienes explican que son aquellos donde se registran 20 mm de precipitación en una hora en

el primer caso y 10 mm en un periodo de 10 minutos en el segundo. En un siguiente momento, se les consideró como los que mostraron una lámina de lluvia importante y una duración superior a 24 horas ya que, como lo señalan Vera y López (2010), las inundaciones pueden ser producto tanto de las lluvias intensas como de las continuas.

Finalmente, para conocer la similitud de los eventos registrados en las diferentes estaciones, se calculó la distancia euclidiana de las características de estos, la cual ya ha sido utilizada para propósitos semejantes por Burn (1990) y Campos (2008), basándose en la siguiente fórmula:

$$DE_{jk} = \left[ \sum_{i=1}^p W_i (C_j^i - C_k^i)^2 \right]^{1/2} \quad (1)$$

donde  $j$  representa el sitio analizado respecto a una estación base  $k$ ;  $p$ , los atributos o parámetros utilizados para el cálculo de la distancia euclidiana;  $W_i$ , la ponderación asignada a cada atributo; y  $C_j^i$  y  $C_k^i$ , las magnitudes de los atributos pertenecientes a las estaciones  $j$  y  $k$  tomados en cuenta en la estimación de la distancia euclidiana. Siguiendo la recomendación de Campos (2008) en el caso de que se trate de una primera aproximación, se puede tomar un factor de ponderación ( $W_i$ ) igual para todas las variables.

Los parámetros incluidos para el cálculo de la similitud entre eventos fueron la lámina total de precipitación, duración, intensidades máxima y media, así como tiempo al pico. Para la estimación de las distancias euclidianas, los valores utilizados fueron estandarizados de acuerdo con la recomendación de Campos (2008).

## Resultados

### Descripción de los eventos de lluvia

De acuerdo con el procedimiento utilizado para la definición de estos y los registros de la temporada 2021 en la ciudad de Autlán de Navarro en cada una de las cinco estaciones, se observaron

entre 37 y 45 eventos de lluvia y de 13 a 20 sucesos donde la lámina total de precipitación fue menor a 1 mm; los meses durante los cuales ocurrió la lluvia fueron de junio a octubre y aquellos con la mayor cantidad de precipitación acumulada, julio y agosto (gráfica 1A); por otro lado, en los que se presentó la mayor cantidad de episodios fueron julio y septiembre (gráfica 1B); durante junio, julio y agosto se apreciaron las diferencias más importantes respecto de la cantidad de precipitación observada en cada una de las estaciones meteorológicas.

### Características de los eventos de lluvia: su magnitud

El cuadro 1 muestra los estadísticos descriptivos de los episodios clasificados como eventos de lluvia de acuerdo con el criterio establecido en este trabajo. Se puede apreciar que la magnitud de los más pequeños es de apenas 1 mm de lluvia. Sin embargo, los eventos llegaron hasta 115.8 y 125 mm en las estaciones 6 y 5, respectivamente. Estas cantidades de precipitación representan la mitad de la acumulada durante julio y agosto.

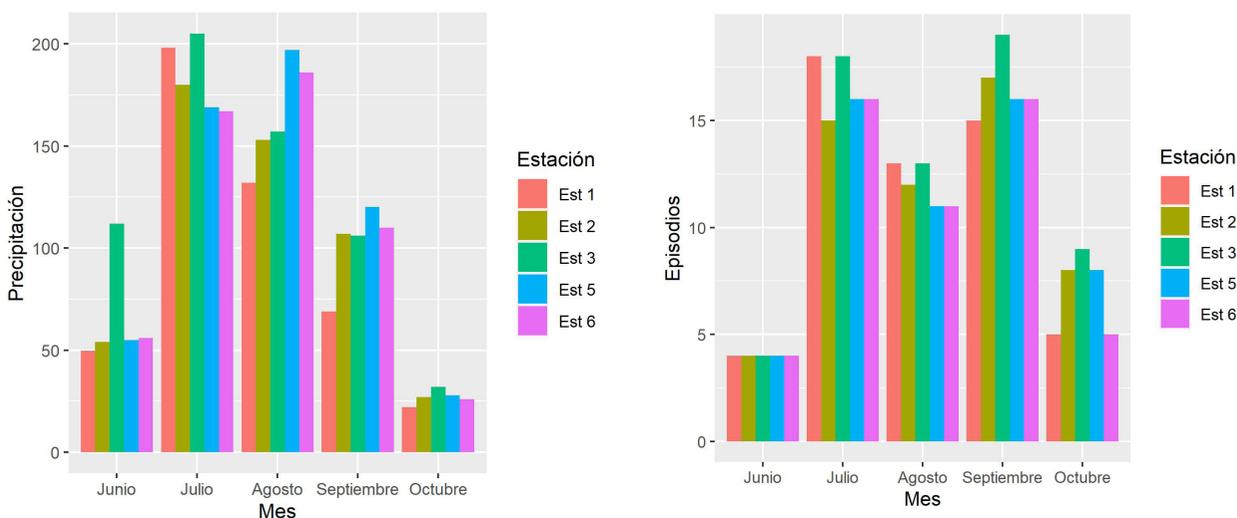
De manera general, la mediana se encuentra alrededor de los 7 mm con excepción de la EMA número 5, la cual se encuentra ubicada al norte de la ciudad y que registra 8 mm de lluvia. Por otro lado, el rango intercuartílico sugiere una dispersión similar en cuanto a la magnitud de la precipitación observada entre estaciones. A su vez, si se comparan los valores del primer y tercer cuartil respecto de la mediana, se observa que los eventos de baja magnitud tienden a estar más concentrados que los de mayor tamaño, lo que resulta en una asimetría positiva de los datos. De acuerdo con el percentil 90, se aprecia que la mayoría de los sucesos tienen una dimensión inferior a los 33 mm de lluvia.

### Duración de los eventos de lluvia

Tomando como referencia los criterios señalados en la metodología de este trabajo, se calculó su duración total, así como la relativa, cuyos resultados obtenidos se presentan en la gráfica 2. En cuanto a la duración total de los eventos, se encontró que va desde los 30 minutos hasta las 45.5 horas, mientras que la relativa mostró una reducción significativa, ya que, bajo estas

Gráficas 1

### Magnitud y cantidad de episodios de lluvia registrados durante la temporada de lluvias 2021 en Autlán de Navarro, Jalisco



Fuente: elaboración propia con información de las estaciones meteorológicas.

Cuadro 1

### Estadísticos descriptivos de la magnitud de los eventos de precipitación

Estadístico	Est. 1	Est. 2	Est. 3	Est. 5	Est. 6
Mínimo (mm)	1.2	1.0	1.0	1.0	1.0
Máximo (mm)	84.6	109.6	91.8	125.0	115.8
Mediana (mm)	7.2	7.0	7.3	8.0	7.4
1.º cuartil (mm)	3.2	2.6	2.6	2.6	3.7
3.º cuartil (mm)	14.6	15.3	14.1	17.8	15.9
Rango intercuartílico (mm)	11.4	12.7	11.5	15.2	12.2
Percentil 90 (mm)	33.2	31.2	28.4	28.2	28.3
Coefficiente de asimetría	2.5	3.4	2.9	3.8	3.4

Fuente: elaboración propia con datos de las estaciones meteorológicas.

condiciones, el rango oscila entre los 30 minutos y las 20.5 horas. Las duraciones al igual que la magnitud de la precipitación muestran asimetría positiva. De acuerdo con los valores observados para el tercer cuartil, se aprecia que, en 75 % de los casos, la duración fue menor a seis horas tomando como referencia la duración total del evento, mientras que para la relativa, en 75 % de los casos fue menor a tres horas.

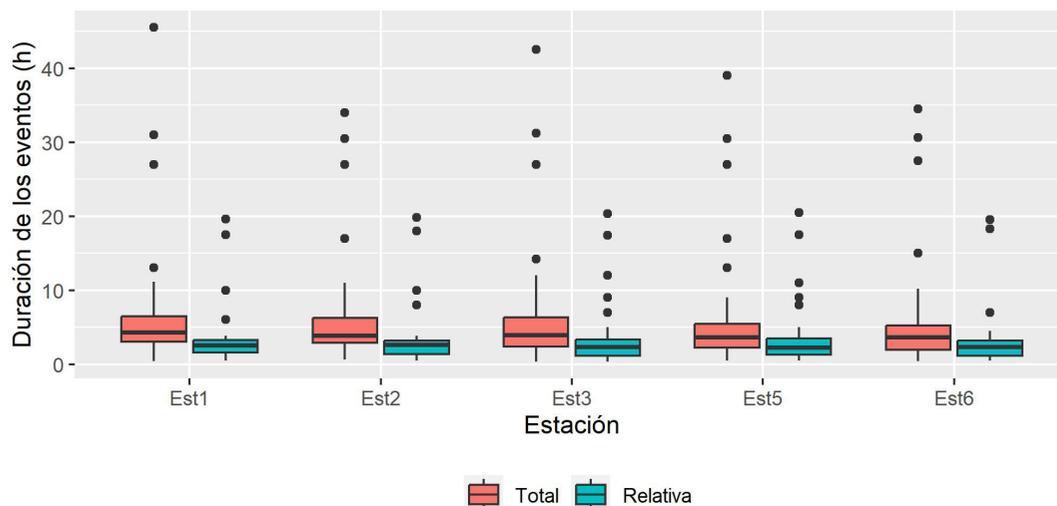
### Intensidad de los eventos de lluvia

La media de la precipitación fue calculada de manera global y de forma relativa. En los resulta-

dos mostrados en la gráfica 3 se aprecian algunas diferencias al tomar en cuenta los dos tipos de duración del evento en el cálculo de la intensidad media. Sus rangos de variación van desde 0.2 mm/h hasta 28.2 mm/h, mientras que, en el caso de la intensidad relativa, oscilan entre 1.2 mm/h y 28.6 mm/h; las diferencias observadas en los rangos de variación de las intensidades a nivel de evento y relativa son mínimas. Sin embargo, si se comparan las medianas bajo las dos condiciones, se aprecian discrepancias importantes ya que, mientras que la mediana de la intensidad del evento es de 2 mm/h, la relativa es de 3 mm/h de lluvia.

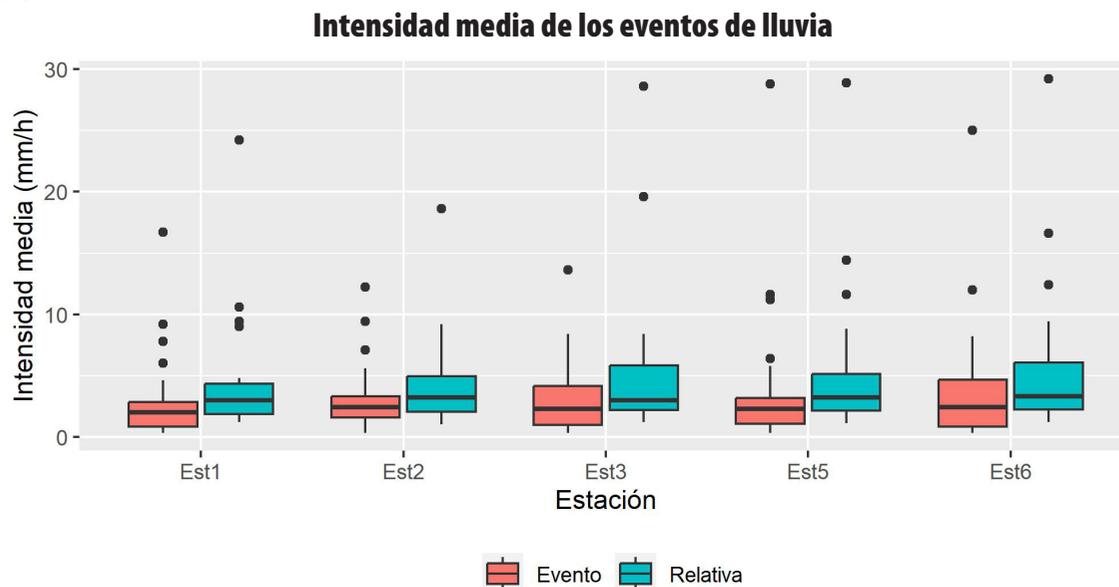
Gráfica 2

### Duración de los eventos de lluvia registrados durante la temporada 2021



Fuente: elaboración propia con información de las estaciones meteorológicas.

Gráfica 3



Fuente: elaboración propia con información de las estaciones meteorológicas.

Por otro lado, las intensidades máximas observadas en intervalos de 10 minutos (cuadro 2) muestran un rango de variabilidad muy grande para las instantáneas, ya que pueden llegar a estar entre 1.2 y 201.6 mm/h en el caso más extremo. No obstante, de acuerdo con los valores de la mediana, es posible inferir que durante la temporada de lluvias 2021 los eventos extremos debidos a una lámina de precipitación mayor a 10 mm en un periodo de 10 minutos fueron menos de 50 por ciento.

### Comportamiento de los eventos de precipitación extrema

De acuerdo con la definición de Haacke y Paton (2021), durante la temporada de lluvias 2021 se registraron seis eventos que pueden considerarse como extremos: tres de ellos fueron durante julio; uno, en agosto; y dos más, en septiembre. De estos, solo uno cumplió con las dos condiciones de clasificación como evento extremo en las cinco estaciones,

Cuadro 2

### Estadísticos descriptivos de la intensidad máxima observada en 10 minutos

Estadístico	Est. 1	Est. 2	Est. 3	Est. 5	Est. 6
Mínimo (mm/h)	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2
Máximo (mm/h)	144.0	115.2	134.4	201.6	130.8
Mediana (mm/h)	8.4	9.6	10.8	10.8	9.6
1er cuartil (mm/h)	4.8	4.2	2.4	4.8	4.8
3er cuartil (mm/h)	18.0	30.6	19.2	30.9	31.8
Rango intercuartílico (mm/h)	13.2	26.4	16.8	26.1	27.0
Percentil 90 (mm/h)	31.9	39.8	38.9	48.6	48.2
Coficiente de asimetría	3.4	2.5	3.7	3.5	2.5

Fuente: elaboración propia con datos de las estaciones meteorológicas.

el cual sucedió casi a finales de julio (día 21). En el caso de los restantes, se observó que las condiciones de clasificación se cumplían únicamente en una parte de las estaciones, por ejemplo, uno de los ocurridos en septiembre cumplió el criterio de registro de 10 mm de lluvia en un periodo de 10 minutos solo en tres estaciones. En el resto, alguno de los dos criterios se cumplió solo en una estación, aunque en la mayor parte de los casos estuvo cerca de satisfacerse en otra de las EMAS vecinas.

El comportamiento de los eventos extremos muestra que la precipitación también puede presentar alta variabilidad espacial, incluso en regiones pequeñas, sobre todo si se toma en cuenta que la separación máxima entre estaciones es de alrededor de 2 kilómetros (figuras 2 y 3). Dentro de la definición, se decidió incluir dos eventos de precipitación que, si bien no cumplen con los criterios propuestos por Haacke y Paton (2021), es necesario considerarlos como extremos debido a la cantidad de lluvia observada y a su duración, los cuales, incluso, fueron de los eventos de mayor magnitud. El primero de ellos estuvo asociado al huracán Enrique (González, 2021) y el segundo, a Nora (Baca, 2021), ambos de categoría 1. En cuanto a la precipitación asociada a Enrique, se observaron láminas entre 57 y 80 mm, dependiendo de la zona de la ciudad (figura 2) e intensidades máximas en un periodo de 10 minutos, las cuales oscilaron desde 18 hasta 26 mm/h (figura 3), mientras que en el caso de la precipitación asociada a Nora, las láminas fueron mayores, observándose en el rango de 86 a 123 mm

(figura 2) con intensidades instantáneas entre 27 y 45 mm/h (figura 3).

En el mismo sentido, en las figuras 2 y 3 se presentan la distribución espacial de la magnitud de los eventos de lluvia considerados como extremos y las intensidades instantáneas observadas en un periodo de 10 minutos. En la figura 2 se aprecian dos patrones de concentración espacial de la precipitación, el primero de ellos sobre la zona este de la ciudad y el segundo hacia el norte. En cuanto al comportamiento de las intensidades instantáneas (figura 3), se da una predominancia a que estas sean mayores en el área este, aunque no se descartan algunas fuertes sobre la norte.

El cuadro 3 presenta un resumen con las distancias euclidianas para los ocho eventos considerados como extremos. Se puede apreciar que las menores (0.1 y 0.6) se dieron durante los ocurridos el 19 de julio y el 27 de junio entre las estaciones 2 y 5 y 2 y 6, respectivamente, EMAS que, de manera general, muestran la mayor similitud entre sucesos, y se encuentran ubicadas en la zona norte de Autlán de Navarro, lo cual sugiere la tendencia de un patrón geográfico de ocurrencia de los eventos de lluvia sobre esta parte de la ciudad.

## Discusión

La ocurrencia de los eventos de lluvia en Autlán de Navarro coincide con el periodo observado por

Cuadro 3

### Distancia euclidiana observada para los eventos extremos

Fecha	E1-E2	E1-E3	E1-E5	E1-E6	E2-E3	E2-E5	E2-E6	E3-E5	E3-E6	E5-E6
19 jul.	5.4	4.4	5.4	4.2	3.2	<b>0.1</b>	1.3	3.1	2.6	1.2
21 jul.	5.3	2.7	5.4	3.9	3.6	2.9	3.3	2.8	<b>1.3</b>	1.8
31 jul.	2.6	2.8	5.1	3.4	4.2	3.1	2.3	5.1	3.3	<b>2.0</b>
8 ago.	5.6	4.5	4.5	2.6	1.8	2.3	<b>1.1</b>	<b>1.1</b>	2.2	3.0
14 sept.	3.8	<b>0.9</b>	4.9	5.1	2.9	1.2	2.6	4.0	4.4	2.6
19 sept.	2.4	2.1	2.1	1.6	1.4	1.5	1.1	<b>1.0</b>	1.5	1.7
27 jun.	2.5	5.4	2.9	2.4	5.0	1.1	<b>0.6</b>	4.3	5.3	1.6
27 ago.	4.1	4.2	4.0	5.0	3.8	<b>1.5</b>	1.6	3.9	3.2	1.9

Fuente: elaboración propia con datos de las estaciones meteorológicas.

Gutiérrez-López *et al.* (2019) en la ciudad de Querétaro y con lo presentado a nivel nacional por Méndez *et al.* (2008). Los meses con la mayor cantidad de lluvia coinciden con la tendencia mostrada por las normales climatológicas calculadas con base en datos diarios para el periodo 1981-2010 (SMN, 2022b). El comportamiento de la precipitación en los meses de verano evidencia la ausencia durante el 2021 de la sequía de medio verano (canícula), la cual se registra en julio y agosto en el estado de Jalisco (Peralta *et al.*, 2008) aunque, como señalan Alcalá *et al.* (2005), esta es más característica durante los años que se presenta el fenómeno de *El Niño*.

De manera general, las magnitudes de los eventos observados coinciden con lo reportado por Barbosa *et al.* (2018) en las regiones de Aiuaba y Guaraira en Brasil y la tendencia central de estos con lo encontrado por Dunkerley (2021) en Australia. Aunque en la zona en estudio el tamaño de los sucesos de lluvia puede considerarse como bajo, en los últimos años se ha vuelto recurrente la presencia de eventos de magnitud importante, como los del 2021, donde uno de ellos alcanzó los 100 mm, cantidad que representa la mitad de la precipitación acumulada en julio o agosto y alrededor de un tercio de la registrada durante los huracanes *Jova* y *Patricia* de acuerdo con lo reportado por Olguín-López *et al.* (2012) y Molina *et al.* (2019).

Adicionalmente, los valores máximos observados durante el 2021 son muy cercanos a la precipitación máxima diaria determinada en las normales climatológicas para el periodo 1981-2010 dentro de la zona de estudio (SMN, 2022b). La ocurrencia de este tipo de eventos pone en riesgo al centro urbano ya que, ante acontecimientos de dicha magnitud, la infraestructura para el desalojo de las aguas de lluvia se ve comprometida de acuerdo con su capacidad actual.

Por otro lado, en Autlán de Navarro se encontró que las duraciones son mayores a lo reportado por Barbosa *et al.* (2018) en Brasil y por Dunkerley (2021) en la estación de investigación de zonas áridas de Fowlers Gap, pero menores a lo observado por ese mismo investigador (2021) en la región de Millaa Millaa, en Australia.

Por una parte, las discrepancias observadas se pueden atribuir a la diferencia de criterios utilizados para la definición de los eventos de lluvia en el caso de la investigación de Barbosa *et al.* (2018) y, de manera general, a las disparidades geográficas y climáticas presentes en los sitios bajo estudio, así como al tamaño de la muestra de datos empleada en los análisis de cada uno de los trabajos; y por otra parte, el comportamiento de la duración indica que la intermitencia durante los eventos es muy importante, que respalda lo señalado por Dunkerley (2021) a partir de observaciones de acontecimientos de precipitación en Australia. Los de duración prolongada fueron pocos y, de forma general, se consideran atípicos. Los eventos de larga duración pueden relacionarse con la actividad ciclónica del Pacífico (Baca, 2021; González, 2021), mientras que las duraciones más cortas están involucradas con la actividad convectiva de la temporada de lluvias.

En el mismo sentido, la variabilidad observada en la intensidad de la lluvia es muy importante, lo cual refuerza lo señalado por Westra *et al.* (2014) y Guzmán *et al.* (2018) en el sentido de que las intensidades a escalas subhorarias presentan cambios de consideración respecto a las temporales mayores. En cuanto a la prevención del riesgo, las intensidades bajas no representan una situación problemática, sin embargo, de acuerdo con Haacke y Paton (2021), los eventos donde se aprecia una lámina de precipitación igual o mayor a los 10 mm en un periodo de 10 minutos (60 mm/h) pueden considerarse como extremos. En términos generales, los rangos de variación observados para la intensidad en la ciudad de Autlán de Navarro se encuentran por debajo de lo registrado en Brasil por Barbosa *et al.* (2018), mientras que los valores de tendencia central son muy aproximados a los encontrados por Dunkerley (2021) en Australia.

Haacke y Paton (2021) definen a los eventos de precipitación extrema a escalas subhorarias como aquellos donde se registran 20 mm de precipitación en una hora, o bien, 10 mm en un periodo de 10 minutos. Sin embargo, de acuerdo con las observaciones, se encontró que los de larga duración también pueden considerarse dentro de los extremos según la cantidad de precipitación que generan, así como a

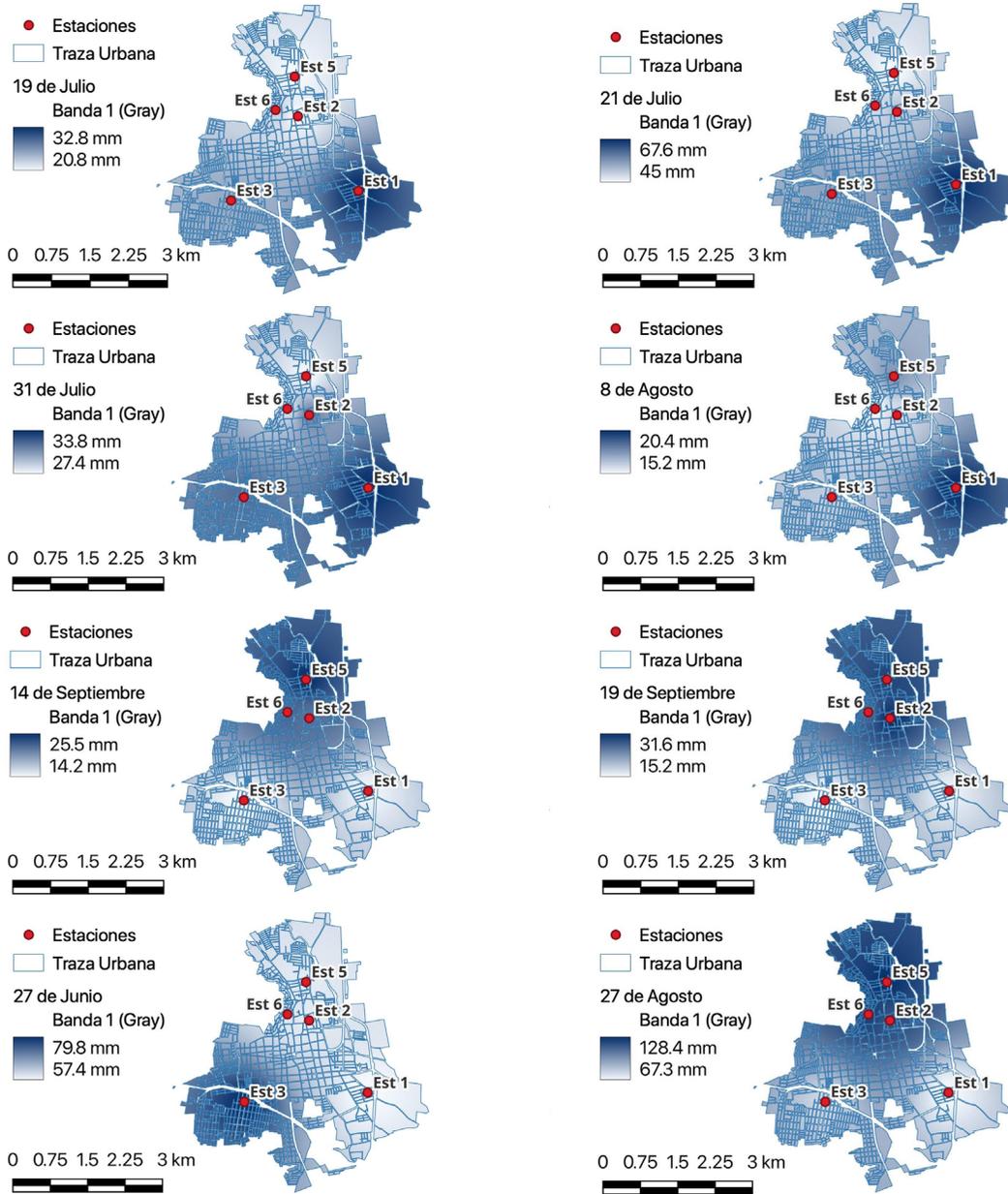
la magnitud de las intensidades instantáneas observadas, las cuales, si bien no cumplen con el criterio propuesto por estos investigadores, si están cerca de ello, con lo cual se predisponen las condiciones que suelen originar las inundaciones (Vera y López, 2010).

Los eventos que ocurren sobre la zona norte de de Autlán de Navarro son los que representan una ma-

yor exposición al riesgo de inundaciones, ya que la pendiente de gran parte de la ciudad corre de ahí hacia el centro, donde la inclinación disminuye considerablemente. Además, sobre la zona norte se está dando gran parte de la expansión urbana, lo cual pudiera incrementar los niveles de exposición al riesgo ya que, como señalan Gutiérrez-López *et al.* (2019), el crecimiento de las áreas urbanas

Figura 2

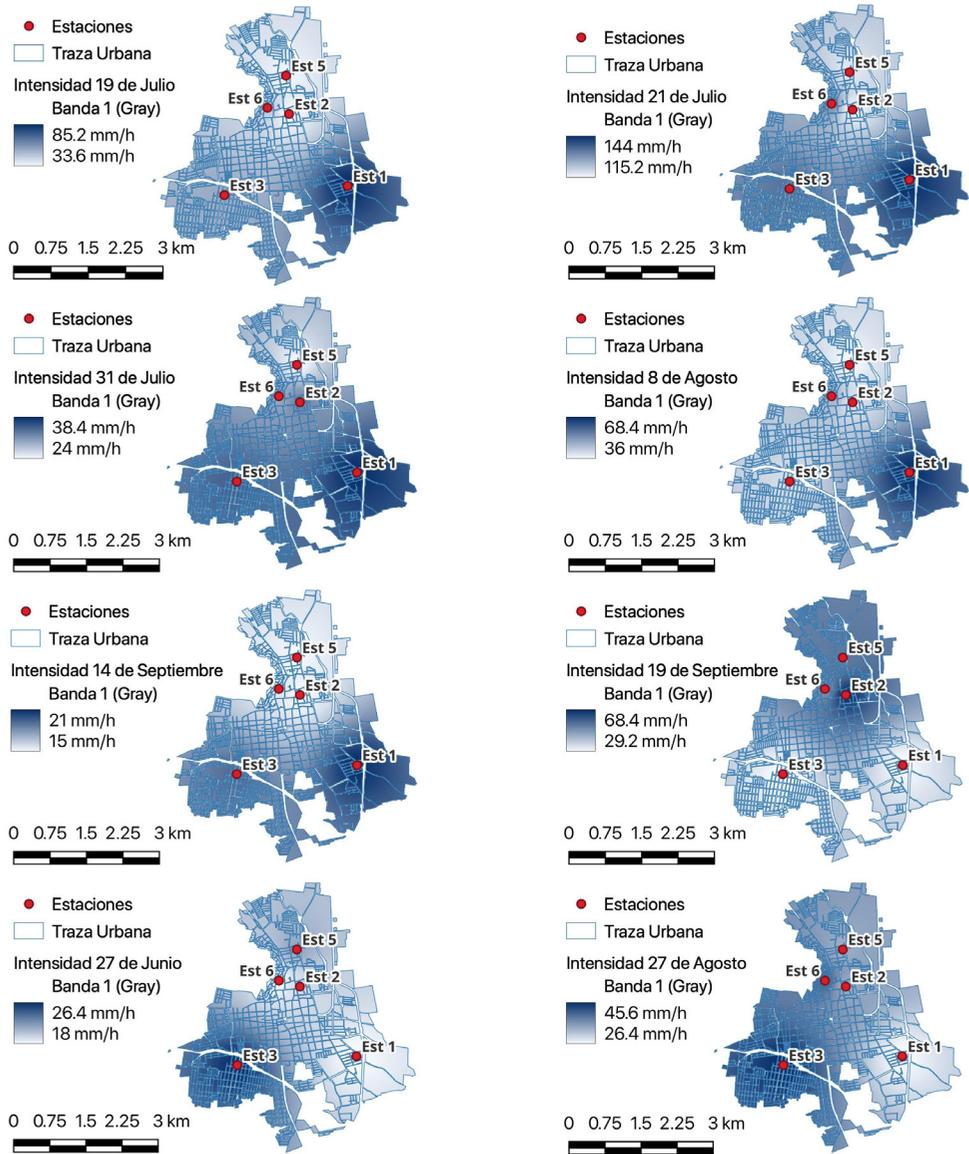
### Magnitud de los eventos de lluvia considerados como extremos



Fuente: elaboración propia con datos de las estaciones meteorológicas.

Figura 3

### Intensidad máxima instantánea de los eventos de lluvia extrema



Fuente: elaboración propia con datos de las estaciones meteorológicas.

genera un cambio de uso de suelo que favorece el incremento de los escurrimientos superficiales. Por otro lado, los eventos que se concentran en mayor medida en la parte oeste de la ciudad también suelen representar una condición de peligro notoria, sobre todo en el caso de los eventos de larga duración, ya que esta zona se caracteriza por la presencia de pendientes importantes que además funcionan como *parteaguas* de una de las cuencas que drenan sus escurrimientos a través de un arroyo que corre por el oeste.

La distancia euclidiana es una herramienta que permite identificar la similitud estadística de los eventos de lluvia a partir del comportamiento de los valores de sus principales características (Campos, 2008). El parecido de los sucesos entre las estaciones estudiadas parece mostrar un patrón donde la semejanza de estos disminuye conforme aumenta la distancia que separa las EMAS, lo cual ya ha sido señalado en Gutiérrez-López *et al.* (2019) de acuerdo con el comportamiento de la precipitación en la zona urbana de Querétaro, México. Aunque también

se dan similitudes estadísticas de consideración entre estaciones con una separación importante, e incluso se encuentran en polos opuestos de la ciudad, lo cual podría ser resultado de la ocurrencia de eventos de carácter local, así como de aquellos asociados a los patrones de circulación general, los cuales suelen cubrir mayores porciones geográficas. De esta manera, se observa que la precipitación muestra un nivel de heterogeneidad temporal y espacial notable en zonas geográficas pequeñas, lo que confiere relevancia para su estudio a estas escalas.

Si bien las observaciones de un temporal de lluvias no proporcionan la información suficiente para llegar a conclusiones generales sobre el comportamiento de la precipitación a escalas horarias y sub-horarias, sí puede considerarse como un avance ya que, como se ha señalado en la literatura (Haacke y Paton, 2021), en la actualidad se carece de series de calidad para largos periodos de monitoreo, lo que, de acuerdo con Westra *et al.* (2014), limita la imagen que se tiene del patrón de la lluvia a escalas temporales más finas.

El estudio de la precipitación a escalas subhorarias es importante porque se ha observado que los eventos extremos bajo estas condiciones pueden causar fallas parciales o totales de los sistemas de drenaje urbano (Fletcher *et al.*, 2013; Haacke y Paton, 2021). Las ciudades en crecimiento representan un área de estudio toral debido a que a nivel mundial se está dando una tendencia a que la población se concentre más en las zonas urbanas que en las rurales, con lo cual se favorece el cambio de uso de suelo y, por lo tanto, se generan cambios significativos en la hidrología del área urbana (Fletcher *et al.*, 2013; Gutiérrez-López *et al.*, 2019). En este sentido, en el sitio de estudio se han observado algunos efectos adversos de la urbanización ante la ocurrencia de sucesos de precipitación extrema, como fue el caso de los huracanes Jova y Patricia en el 2011 y 2015, respectivamente (Olguín-López *et al.*, 2012; Molina *et al.*, 2019). La preocupación por la modificación de las condiciones hidrológicas dentro de este entorno urbano aumenta si tomamos en cuenta que, de acuerdo con Sánchez-Crispín y Propin (2001), las urbes medias

de la vertiente pacífica mexicana crecieron de forma extraordinaria en los últimos años del siglo XX.

## Conclusiones

El análisis de las características de los eventos de lluvia dentro de los centros urbanos puede servir como referencia dentro de los procesos de planeación en materia de prevención y mitigación de riesgos de origen hidrometeorológico, ya que a través de este tipo de estudio se puede conocer la magnitud, duración, intensidades media y máxima instantánea, así como tiempo al pico de las precipitaciones, con lo cual se pueden mejorar los procesos de modelación lluvia-escurrimiento a escala urbana y así contar con escenarios sobre la posible respuesta hidrológica de las zonas urbanas durante la época de lluvias.

Los resultados de los análisis de las características de los eventos de lluvia en la ciudad de Autlán de Navarro mostraron que la mayor parte de los ocurridos durante el 2021 fueron de magnitud baja, aunque en 10 % de los casos fue superior a los 30 mm, llegando incluso a valores por arriba de los 100 mm cuando estuvieron relacionados con la actividad ciclónica del océano Pacífico. Las duraciones de los eventos presentaron dos patrones bien definidos: duraciones cortas asociadas a los sucesos convectivos y largas para el caso de los de tipo ciclónico.

La intensidad media de los acontecimientos de lluvia del 2021 mostró que puede subestimar el comportamiento real del evento, ya que en la mayor parte de los casos está por debajo de los 5 mm/h, mientras que al analizarse la instantánea para un periodo de 10 minutos es posible encontrar intensidades superiores a los 100 mm/h, lo que podría impactar de manera significativa la producción de escurrimientos debido a las condiciones de la superficie de las cuencas urbanas y comprometer así la capacidad de los sistemas de drenaje pluvial.

Durante la temporada de lluvias analizada se encontró que los eventos extremos representaron entre 17 y 22 % de los sucesos de precipitación

ocurridos. Para la definición de los extremos, resultó importante utilizar un criterio basado en el comportamiento de la intensidad instantánea, el cual es en mayor medida recomendable para aquellos de origen convectivo, además de la magnitud y duración del evento, la cual resultó útil en el caso de los acontecimientos de carácter ciclónico.

Por otra parte, los resultados mostraron que en el caso de áreas geográficas pequeñas la precipitación puede mostrar un grado de heterogeneidad importante tanto en el espacio como en el tiempo. El análisis de dicha heterogeneidad puede llegar a mejorarse utilizando técnicas más avanzadas de la geoestadística.

## Fuentes

- Alcalá, J. B., E. García, O. H. Ramírez, A. R. Meulenert y M. García. "Sequía de medio verano (canícula) durante la presencia de 'El Niño/Oscilación del Sur' (ENOS) en el estado de Jalisco", en: *XI Congreso Latinoamericano e Ibérico de Meteorología*. Cancún, Quintana Roo, México, 2005.
- Baca, C. A. *Ciclones tropicales 2021: huracán Nora del océano Pacífico*. México, Servicio Meteorológico Nacional, 2021 (DE) <https://smn.conagua.gob.mx/tools/DATA/Ciclones%20Tropicales/Ciclones/2021-Nora%20.pdf>.
- Barbosa, R. L., A. C. Neves, C. V. H. Rabelo, F. E. Silva, G. C. Oliveira y J. C. Araújo. "Sub-hourly rainfall patterns by hyetograph type under distinct climate conditions in Northeast Brazil: a comparative inference of their key properties", en: *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*. Núm. 23, 2018, p. e46 (DE) <https://doi.org/10.1590/2318-0331.231820180076>.
- Burn, D. H. "An appraisal of the region of influence approach to flood frequency analysis", en: *Hydrological Sciences Journal*. Vol. 35, 2-4, 1990, pp. 149-165 (DE) <https://doi.org/10.1080/02626669009492415>.
- Byakatonda, J., B. P. Parida, D. B. Moalafhi, P. K. Kenabatho y D. Lesolle. "Investigating relationship between drought severity in Botswana and ENSO", en: *Natural Hazards*. 100, 2020, pp. 255, 278 (DE) <https://doi.org/10.1007/s11069-019-03810-1>.
- Campos, A. D. F. "Estudio de la precipitación máxima diaria anual en la Región Hidrológica No. 10 (Sinaloa) con base en distancias euclidianas", en: *Investigaciones Geográficas*. Núm. 65, 2008, pp. 56-67 (DE) <http://www.investigacionesgeograficas.unam.mx/index.php/rig/article/view/17974/17115>.
- Campos, F. S. y F. J. Abarca. "Emplazamiento y localización en las CM andaluzas", en: *Cuadernos Geográficos*. Núm. 52, 2013, pp. 288-317 (DE) <https://revistaseug.ugr.es/index.php/cuadgeo/article/view/935/1086>.
- Conforti, P., S. Ahmed, G. Markova. *Impact of disasters and crises in agricultura and food security 2017*. Rome, Italy, FAO, 2018.
- Consejo Nacional de Población (CONAPO). *Índices de marginación por entidad federativa y municipio 2020*. Consejo Nacional de Población, 2023. (DE) <https://www.gob.mx/conapo/articulos/indice-de-marginacion-por-entidad-federativa-y-municipio-2020-271404?idiom=es>.
- DAVIS. *Manual de instalación: estación Davis Vantage Pro 2+*. Davis Instruments, 2021, 58 pp. (DE) <https://www.davisinstruments.com/collections/vantage-pro2>.
- De Risi, R., F. Jalayer, F. De Paola, S. Carozza, N. Yonas, M. Giugni y P. Gasparini. "From flood risk mapping toward reducing vulnerability: the case of Addis Ababa", en: *Natural Hazards*. 100, 2020 pp. 387-415 (DE) <https://doi.org/10.1007/s11069-019-03817-8>.
- Dunkerley, D. "Identifying individual rain events from pluviograph records: a review with analysis of data from Australian dryland site", en: *Hydrological Processes*. Núm. 22, 2008, pp. 5024-5036 (DE) <https://doi.org/10.1002/hyp.7122>.
- \_\_\_\_\_ "Rainfall intensity bursts and the erosion of soils: an analysis highlighting the need for high temporal resolution rainfall data for research under current and future climates", en: *Earth Surface Dynamics*. 7, 2019, pp. 345-360 (DE) <https://doi.org/10.5194/esurf-7-345-2019>.
- \_\_\_\_\_ "Intermittency of rainfall at sub-daily timescales: New quantitative indices based on the number, duration, and sequencing of interruptions to rainfall", en: *Atmospheric Research*. Núm. 253, 2021, art. 105475, pp. 1-12, (DE) <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2021.105475>.
- Esposito, G., F. Matano, G. Scepti. "Analysis of increasing flash flood frequency in the densely urbanized coastline of the Campi Flegrei volcanic area, Italy", en: *Frontiers in Earth Science*. 6, 2018, pp. 1-17 (DE) <https://doi.org/10.3389/feart.2018.00063>.
- Fletcher, T. D., H. Andrieu y P. Hamel (2013). "Understanding, management and modelling of urban hydrology and its consequences for receiving Waters: A state of the art", en: *Advances in Water Resources*. Núm. 51, 2013, pp. 261-279 (DE) <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2012.09.001>.
- García, E. "Distribución de la precipitación en la República Mexicana", en: *Investigaciones Geográficas*. 50, 2003, pp. 67-76.
- González-Aguirre, J., M. E. Vázquez-Cendón y J. Alavez-Ramírez. "Simulación numérica de inundaciones en Villahermosa, México, usando el código IBER", en: *Ingeniería del Agua*. Núm. 20(4), 2016, pp. 201-216 (DE) <https://doi.org/10.4995/ia.2016.5231>.
- González, V. L. *Ciclones tropicales 2021: huracán Enrique del océano Pacífico*. México, Servicio Meteorológico Nacional, 2021 (DE) <https://smn.conagua.gob.mx/tools/DATA/Ciclones%20Tropicales/Ciclones/2021-Enrique.pdf>.
- Gutiérrez-López, A., T. Lebel, I. Ruíz, L. Descroix, y M. Duhne. "Prediction of hydrological risk for sustainable use of water in Northern Mexico", en: S. Setegn y M. Donoso. *Sustainability of Integrated Water Resources Management*. Springer Publishing, 2015, pp. 245-271 (DE) <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-319-12194-9>.

- Gutiérrez-López, A., M. Fortanell Trejo, N. I. Albuquerque González y F. Bravo Prado. "Análisis de la variabilidad espacial en la precipitación en la zona metropolitana de Querétaro empleando ecuaciones de anisotropía", en: *Investigaciones Geográficas*. 99, 2019, p. e59757 (DE) <http://www.investigacionesgeograficas.unam.mx/index.php/rig/article/view/59757/53323>.
- Guzmán, J. A., M. L. Chu, J. L. Steiner y P. J. Starks. "Assessing and quantifying changes in precipitation patterns using event-driven analysis", en: *Journal of Hydrology: Regional Studies*. Núm. 15, 2018, pp. 1-15 (DE) <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2017.11.006>.
- Haacke, N. y E. N. Paton. "Analysis of diurnal, seasonal, and annual distribution of urban sub-hourly to hourly rainfall extremes in Germany", en: *Hydrology Research*. Núm. 52(2), 2021, pp. 478-491 (DE) <https://doi.org/10.2166/nh.2021.181>.
- Hoyois, P. y D. Guha-Sapir. *Measuring the human and economic impact of disasters*. Report 297. Center for Research and Epidemiology of Disaster, 2012.
- Instituto de Información Estadística y Geográfica de Jalisco (IIEG). *Autlán de Navarro. Diagnóstico del municipio*. Instituto de Información Estadística y Geográfica de Jalisco, 2021, 52 pp. (DE) <https://iieg.gob.mx/ns/wp-content/uploads/2022/01/Autl%C3%A1n-de-Navarro-1.pdf>.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). *Censo de Población y Vivienda 2020*. Microdatos. México, INEGI, 2021 (DE) <https://www.inegi.org.mx/programas/ccpv/2020/#Microdatos>.
- Jiménez-Cisneros, B. "Seguridad hídrica: retos y respuestas, la fase VIII del Programa Hidrológico Internacional de la UNESCO (2014-2021)", en: *Revista Aqua-LAC*. Núm. 7(1), 2015, pp. 20-27 (DE) <https://doi.org/10.29104/phi-aqualac/2015-v7-1-03>.
- Leal-Nares, O. A., M. E. Mendoza y G. E. Carranza. "Análisis y modelamiento espacial de información climática en la cuenca de Cuitzeo, México", en: *Investigaciones Geográficas*. Núm. 72, 2010, pp. 49-67 (DE) <http://www.investigacionesgeograficas.unam.mx/index.php/rig/article/view/59226/52240>.
- Lorenz, J. M., R. Kronenberg, C. Bernhofer y D. Niyogi. "Urban rainfall modification: observational climatology over Berlin, Germany", en: *Atmospheres*. Núm. 124(2), 2019, pp. 731-746 (DE) <https://doi.org/10.1029/2018JD028858>.
- Méndez, J., J. Nívar y V. González. "Análisis de tendencias de precipitación (1920-2004) en México", en: *Investigaciones Geográficas*. 65, 2008, pp. 38-55 (DE) <http://www.investigacionesgeograficas.unam.mx/index.php/rig/article/view/17973/17114>.
- Molina, A. J. P., L. A. Gutiérrez, P. I. M. Cruz, O. A. F. Nolasco y T. D. M. González. "Huracán Patricia: análisis multivariado temporal de variables meteorológicas durante su evolución", en: *Revista Nthe*. Núm. 30, 2019, pp. 70-82 (DE) [http://nthe.mx/NTHE\\_v2/pdfArticulos/PDF\\_Articulo20200721215241.pdf](http://nthe.mx/NTHE_v2/pdfArticulos/PDF_Articulo20200721215241.pdf).
- Olguín-López, J. L., R. D. Guevara-Gutiérrez, R. J. M. Ramírez y R. M. R. Álvarez. "Los efectos de Jova en el municipio de Autlán de Navarro, Jalisco, México: un caso histórico", en: *Revista Iberoamericana para la Investigación y el Desarrollo Educativo*. Núm. 2(4), 2012, pp. 1-19 (DE) <http://ride.org.mx/index.php/RIDE/article/view/44>.
- Papagiannaki, K, V. Kotroni y K. Lagouvardos. "Urban area response to flash flood-triggering rainfall, featuring human behavioral factors: the case of 22 October 2015", en: *Attica, Greece. Weather, Clim Society*. 9, 2017, pp. 621-637 (DE) <https://doi.org/10.1175/WCAS-D-16-0068.1>.
- Pavia, E. G., F. Graef y J. Reyes. "PDO-ENSO effects in the climate of Mexico", en: *Journal of Climate*. 19, 2006, pp. 6433-6438.
- Peralta-Hernández, A. R., L. R. Barba-Martínez, V. O. Magaña-Rueda, A. D. Matthias y J. J. Luna-Ruiz, "Temporal and spatial behavior of temperature and precipitation during the canícula (midsummer drought) under El Niño conditions in central México", en: *Atmósfera*. Núm. 21(3), 2008, pp. 265-280 (DE) <https://www.revistascca.unam.mx/atm/index.php/atm/article/view/8605>.
- Perevotchikova, M. y T. J. L. Lezama. "Causas de un desastre: Inundaciones del 2007 en Tabasco, México", en: *Journal of Latin American Geography*. Núm. 9(2), 2010, pp. 73-98 (DE) <https://www.jstor.org/stable/25765308>.
- Servicio Meteorológico Nacional (SMN). *Estaciones meteorológicas automáticas (EMAS)*. México, SMN, 2022a (DE) <https://smn.conagua.gob.mx/es/observando-el-tiempo/estaciones-meteorologicas-automaticas-ema-s>.
- \_\_\_\_\_. *Normales climatológicas por estado*. México, SMN, 2022b (DE) <https://smn.conagua.gob.mx/es/informacion-climatologica-por-estado?estado=jal>.
- Sánchez-Crispín, A. y F. E. Propin. "Cambios en la orientación funcional de las ciudades medias del trópico mexicano", en: *Cuadernos Geográficos*. Núm. 32, 2001, pp. 69-85 (DE) <https://revistaseug.ugr.es/index.php/cuadgeo/article/view/1943/2120>.
- Sigala, D. R., M. G. G. Pérez y Y. A. Lara. "Eventos ciclónicos y potencial de precipitación en los cabos, México: efectos urbanos", en: *Tecnogestión: Una Mirada al Ambiente*. Núm. 14(1), 2017, pp. 115-126 (DE) <https://revistas.udistrital.edu.co/index.php/tecges/article/view/12637>.
- Vera, P. M. y B. J. López. "Evaluación de amenazas por inundaciones en el centro de México: el caso de Iztapalapa, Distrito federal (1998-2005)", en: *Investigaciones Geográficas*. Núm. 73, 2010, pp. 22-40 (DE) <http://www.investigacionesgeograficas.unam.mx/index.php/rig/article/view/59448/52669>.
- Westra, S., H. J. Fowler, J. P. Evans, L. V. Alexander, P. Berg, F. Johnson, E. J. Kendon, G. Lenderink y N. M. Roberts. "Future changes to the intensity and frequency of short-duration extreme rainfall", en: *Reviews of Geophysics*. Núm. 52, 2014, pp. 522-555 (DE) <https://doi.org/10.1002/2014RG000464>.