



Nova scientia

ISSN: 2007-0705

Universidad de La Salle Bajío A. C., Coordinación de
Investigación

Herrera, Eduardo; Magaña, Víctor; Morett, Sigrid

Relación entre eventos extremos de precipitación con inundaciones. Estudio de caso: Tulancingo, Hidalgo

Nova scientia, vol. 10, núm. 21, 2019, pp. 191-206

Universidad de La Salle Bajío A. C., Coordinación de Investigación

DOI: 10.21640/ns.v10i21.1527

Disponible en: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=203359541011>

- ▶ Cómo citar el artículo
- ▶ Número completo
- ▶ Más información del artículo
- ▶ Página de la revista en redalyc.org

redalyc.org

Sistema de Información Científica Redalyc

Red de Revistas Científicas de América Latina y el Caribe, España y Portugal
Proyecto académico sin fines de lucro, desarrollado bajo la iniciativa de acceso abierto

Relación entre eventos extremos de precipitación con inundaciones. Estudio de caso: Tulancingo, Hidalgo

Relationship between Precipitation extreme events and floods. Case study: Tulancingo, Hidalgo

Eduardo Herrera¹

Víctor Magaña²

Sigrid Morett³

¹ Posgrado de Ciencias de la Tierra, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad de México

² Instituto de Geografía, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad de México

³ Facultad de Ciencias, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad de México

Autor para correspondencia: Eduardo Herrera, E-mail: herreraztegui@gmail.com

Resumen

Se analizó la dinámica de las inundaciones más importantes ocurridas en Tulancingo, Hidalgo, centrándose en la caracterización de la amenaza de eventos de precipitación extrema. El estudio de la climatología de la precipitación permitió determinar patrones temporales y espaciales, así como las fechas de los eventos extremos. Con base a una investigación hemerográfica se relacionaron los casos de eventos extremos con desastres (inundaciones) registrados. Los patrones espaciales asociados a los desastres registrados permiten establecer estrategias de prevención basadas en el pronóstico de precipitación.

Palabras clave: precipitación; inundación; eventos extremos; desastre; riesgo

Abstract

We analyzed the dynamics of the more significant floods in Tulancingo, Hidalgo, by characterizing the extreme precipitation hazard. Studying the precipitation climatology allows us to determine the occurrence of extreme events and its temporal and spatial patterns. The extreme events were associated with disaster hemerographic records. Disaster-related spatial patterns allow establishing prevention strategies using precipitation forecast.

Keywords: precipitation; flood; extreme events; disaster; risk

Recibido en 30/05/2018

Aceptado en 27/07/2018

Introducción

Las inundaciones son fenómenos que tienen inherente una parte natural y una social, cuando se presentan en lugares poblados pueden afectar a la ciudadanía considerablemente; esta afectación tiene componentes tanto espacial como temporal; por lo que su estudio conecta diferentes disciplinas como la Meteorología, Climatología, Hidrología, Geografía, Economía, Ingeniería, Política, etc. Por ello, entender el problema de manera satisfactoria requiere un esfuerzo multidisciplinario conjunto (Berz, 2000).

En México, en diversas localidades costeras, han ocurrido inundaciones severas a lo largo de su historia, varias se han estudiado a detalle. De los últimos quince años se tienen, por ejemplo, las sucedidas en Veracruz en 2005 y 2010 (Tejeda-Martínez, 2006 y 2011), en Tabasco en 2007 (Gama *et al.*, 2010; Rivera-Trejo *et al.*, 2010) y en Guerrero en 2013 (Pedrozo-Acuña *et al.*, 2014). En contraste, el estudio de eventos extremos de precipitación e inundaciones en localidades dentro del continente se ha realizado para pocos sitios, por ejemplo: Ciudad de México (Magaña *et al.*, 2013), Guanajuato (Matías-Ramírez *et al.*, 2007), Ciudad Juárez (Dena-O., *et al.* 2012), etc.

Estos estudios son importantes debido a que el crecimiento de la población en varias ciudades no costeras ha mostrado de forma evidente cuánto también ha crecido su vulnerabilidad

a eventos de precipitación intensa o extrema. Así, tener una mejor comprensión de la amenaza, que en este caso es la precipitación extrema, ayuda a determinar qué factores contribuyen de mayor forma a la vulnerabilidad, por ejemplo: el mismo crecimiento de población, asentamientos irregulares, sistema de drenaje deficiente, mal manejo de presas y embalses, etc., y con ellas, amenaza y vulnerabilidad bien caracterizadas, es posible diseñar estrategias para el manejo de riesgo (Zúñiga y Magaña, 2018).

En Tulancingo, Hidalgo, a lo largo de la historia se han presentado diversas inundaciones, en particular, las de los años 1955, 1999 y 2007 se catalogan como las de peores consecuencias para la población. Bonasia *et al.* en el año 2017 realizaron un estudio para evaluar la amenaza de inundación en Tulancingo, basado en escenarios hidrológicos para la cuenca de la presa ‘La Esperanza’, construidos con un modelo hidrológico. Sus resultados son útiles para visualizar las regiones de mayor afectación ante distintos escenarios, pero sin considerar la caracterización de la precipitación.

El objetivo principal de este trabajo es encontrar una relación entre eventos extremos de precipitación e inundaciones. En particular, se desea: a) identificar el patrón espacial y temporal de la precipitación en la región de estudio; b) obtener las fechas de eventos extremos de precipitación y su relación con fenómenos meteorológicos (Magaña *et al.*, 2003) y c) analizar la conexión de estos eventos con su impacto social, en especial los desastres producidos por la inundación.

Para este fin, el trabajo se ha dividido así: en la siguiente sección se mencionan tanto las bases de datos como la metodología utilizada. Posteriormente, en la sección de resultados se presenta la climatología de la precipitación, la estadística para las diferentes estaciones meteorológicas y su relación con diferentes fenómenos meteorológicos. Al final de esa sección, se presenta la conexión de los eventos extremos con el desastre mediante algunos ejemplos hemerográficos. Por último, la sección de conclusiones.

Datos y metodología

El Valle de Tulancingo, se ubica en la región hidrológica Cuenca del Río Pánuco, ubicada al centro-noreste de la República Mexicana. La subregión corresponde al Alto Pánuco del Río Moctezuma, del cual es afluente el río que recibe diferentes nombres: Quetzalapa, Amajac, Metztitlán y Río Grande Tulancingo (Figura 1).

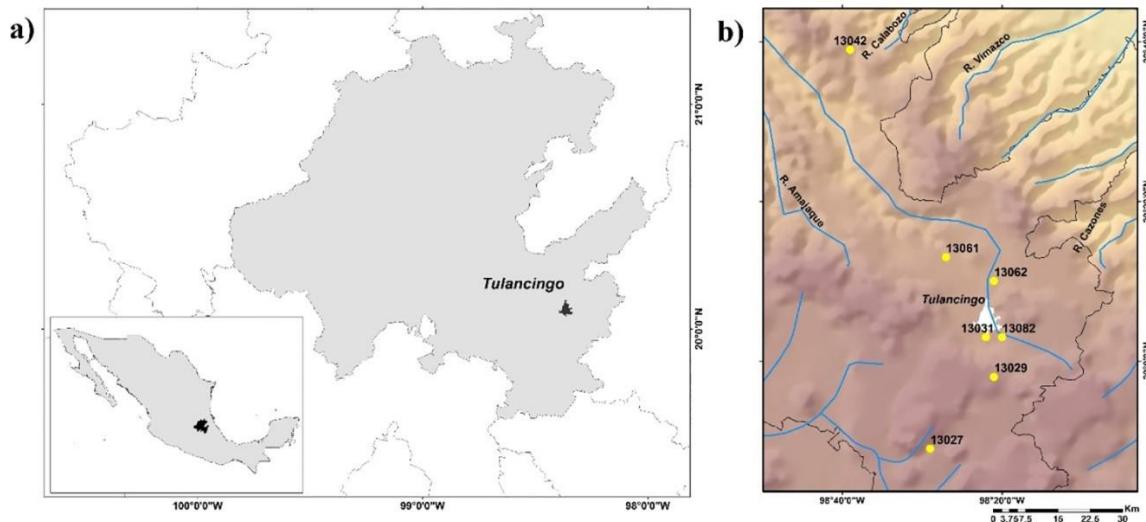


Figura 1. a) Ubicación de Tulancingo en el estado de Hidalgo, México. b) Ríos principales de la cuenca que rodea Tulancingo (líneas azules) y localización de las estaciones meteorológicas usadas (puntos en amarillo).

La información de precipitación diaria se extrajo de la base de datos ERIC III V2 (IMTA), para siete estaciones meteorológicas al oriente del estado de Hidalgo (Tabla 1); de ellas, la estación denominada ‘Presa La Esperanza’ (013082) es la que se considera central para este análisis tanto por la cercanía a la ciudad de Tulancingo, como porque se encuentra justo en la presa que Bonasia *et al.* (2017) utilizaron para hacer su estudio; por lo mismo, parte de la estadística se hizo con referencia a esa estación. No todas las estaciones tuvieron el mismo número de datos y tampoco todas están completas, por lo que se seleccionaron los datos para un periodo donde la mayoría coincidiera, así los datos diarios de precipitación tomados de estaciones meteorológicas abarcan principalmente del 1 de enero de 1973 al 31 de diciembre de 2003.

Tabla 1. Número, nombre de cada estación meteorológica y coordenadas geográficas.

No. Estación	Nombre	Longitud (°)	Latitud (°)	Altitud (m)
013027	SAN JERONIMO, TEPEAPULCO	-98.483	19.817	1528
013029	SAN LORENZO ZAYULA	-98.350	19.967	2350
013031	SANTIAGO TULANTEPEC	-98.367	20.050	2180
013042	ZACUALTIPAN	-98.650	20.650	1980
013061	ALCHOLOYA, ACATLAN	-98.450	20.217	2210
013062	BINOLA, TEZONTEPEC	-98.350	20.167	2000
013082	PRESA LA ESPERANZA	-98.333	20.050	2210

Para el análisis espacial se utilizaron las bases de datos en malla de las siguientes variables: precipitación mensual (mm/mes) del CCA/UNAM para el periodo (1973-2002) a una resolución de $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$, precipitación diaria de TRMM (mm/día) para el periodo (1998-2014) a una resolución de $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$, para un dominio que contempla la región de estudio (Huffman *et al.* 2007). También se utilizó la base de datos propia del grupo Clima y Sociedad del Instituto de Geografía de la UNAM (IGg-UNAM) para precipitación diaria corregida a una resolución de 9 km y además, pronósticos de precipitación con el modelo WRF (The Weather Research and Forecasting) a la misma resolución.

Para determinar la fase del fenómeno El Niño Oscilación del Sur (ENOS) que prevalecía durante la ocurrencia de un evento extremo, se utilizaron las anomalías mensuales de temperatura superficial del mar, obtenidas de la base de datos de NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration).

La ciudad de Tulancingo se encuentra al sureste del estado de Hidalgo y al poniente del Corredor Biológico de Bosque Mesófilo de Montaña Región III, perteneciente a la sierra madre oriental y justo al este del corredor seco que atraviesa el poniente del estado desde el noroeste hacia el sureste, registra en promedio una precipitación acumulada anual alrededor de 1000 mm (Figura 2).

En la misma Figura 2, se puede apreciar que el patrón espacial de precipitación acumulada anual es similar para dos bases de datos diferentes (UNAM y TRMM) y para periodos diferentes también, manteniendo el corredor seco antes descrito y con dos máximos justo sobre la sierra.

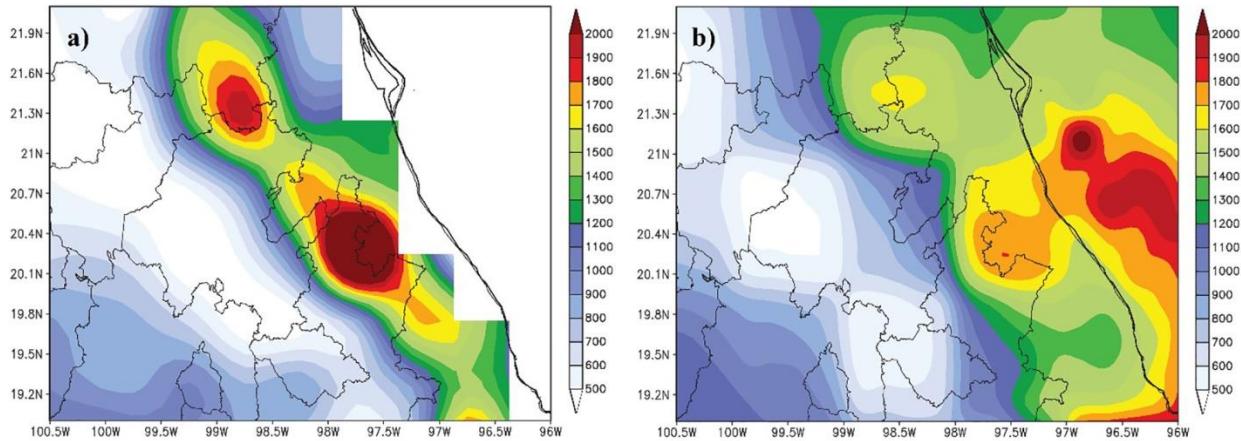


Figura 2. Climatología de Precipitación acumulada anual (mm), para los períodos: a) 1973-2002 (UNAM), y b) 1998-2014 (TRMM).

El ciclo anual de la precipitación acumulada sigue un patrón bimodal, con un mínimo relativo a fines del mes de julio e inicios del mes de agosto, y mayor variabilidad para el segundo máximo, entre los meses de septiembre y octubre (Figura 3). Por ello, se dividió la temporada lluviosa en dos subperiodos; el primero para el inicio de la estación lluviosa considerando los meses de mayo, junio y julio (MJJ), y el segundo para el final de la temporada, con los meses de agosto, septiembre y octubre (ASO). Por otra parte, la precipitación en el segundo subperiodo sobre la región de estudio tiene un comportamiento más homogéneo, lo cual se aprecia en el coeficiente de correlación de la serie de cada estación con la serie de referencia, estación 013082 (Presa ‘La Esperanza’). En general, la correlación de las series temporales aumenta para el periodo de ASO, al igual que lo hace el porcentaje de varianza explicada (Tabla 2).

Para determinar los valores extremos máximos de precipitación se utilizó la distribución gamma (Wilks, 1995), definida como:

$$f(x) = \frac{\left(\frac{x}{\beta}\right)^{\alpha-1} e^{-\frac{x}{\beta}}}{\beta \Gamma(\alpha)}, \quad x, \alpha, \beta > 0 \quad (1)$$

Donde $\Gamma(\alpha)$ es la función gamma y los parámetros α y β se calculan por medio de la estimación de Thom (1958),

$$\alpha = \frac{1 + \sqrt{1 + 4D/3}}{4D}, \quad \beta = \frac{\bar{x}}{\alpha}, \quad (2)$$

Y

$$D = \ln(\bar{x}) - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \ln(x_i) \quad (3)$$

Donde x_i es cada dato diario en el que se registró lluvia, datos con precipitación nula no se tomaron en cuenta; x con barra encima es el promedio del periodo.

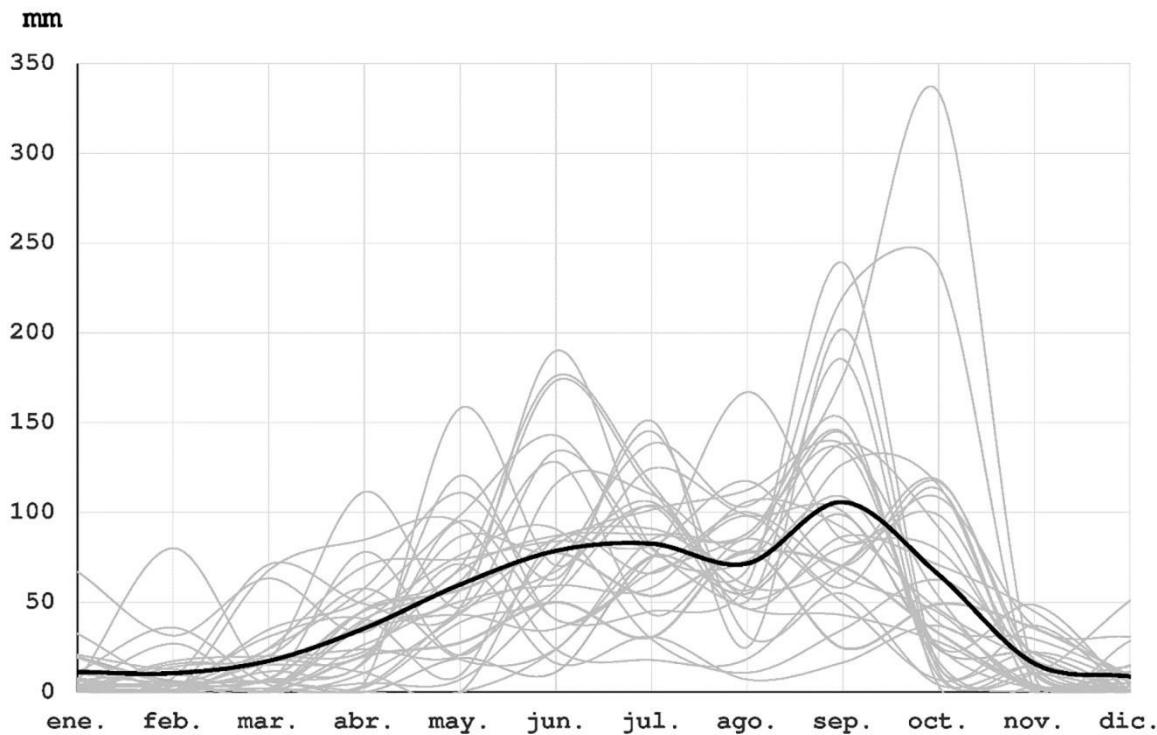


Figura 3. Precipitación acumulada mensual (mm) para la estación 013082 (Presa 'La Esperanza'), climatología (1973-2003) en color negro y para cada año en color gris.

Con la distribución gamma se determinaron los valores extremos para cada subperiodo (MJJ y ASO) y para cada año (Figura 4), puesto que la lluvia en cada temporada cambia de magnitud por diversos factores como son la interacción de sistemas sinópticos y de meso-escala como por variabilidad climática de baja frecuencia. Entonces, los valores extremos se tomaron como aquellos mayores o iguales al percentil 99.

Tabla 2. Coeficientes de correlación y cuadrado de éste con referencia a la serie de la estación 013082, para cada temporada (MJJ y ASO). En color amarillo se denota $r>0.5$.

Número de Estación	MJJ		ASO	
	r	r^2	r	r^2
013027	0.2770	0.0767	0.3698	0.1367
013029	0.5917	0.3501	0.7556	0.5710
013031	0.6837	0.4674	0.5816	0.3383
013042	0.3078	0.0948	0.5084	0.2585
013061	0.3297	0.1087	0.5541	0.3071
013062	0.2910	0.0847	0.3024	0.0914
013082	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000

Además, se trabajó una estadística para los valores máximos, se identificaron cuándo las lluvias extremas están asociadas a fenómenos de meso-escala locales, tales como grandes nubes de tormenta, que pueden causar lluvia intensa en un sólo día; y cuándo la precipitación se asocia a fenómenos de escala sinóptica que pueden ser casi estacionarios y produzcan precipitación que dura varios días. Dicho análisis se hizo para cada serie de datos, al observar días consecutivos de lluvia.

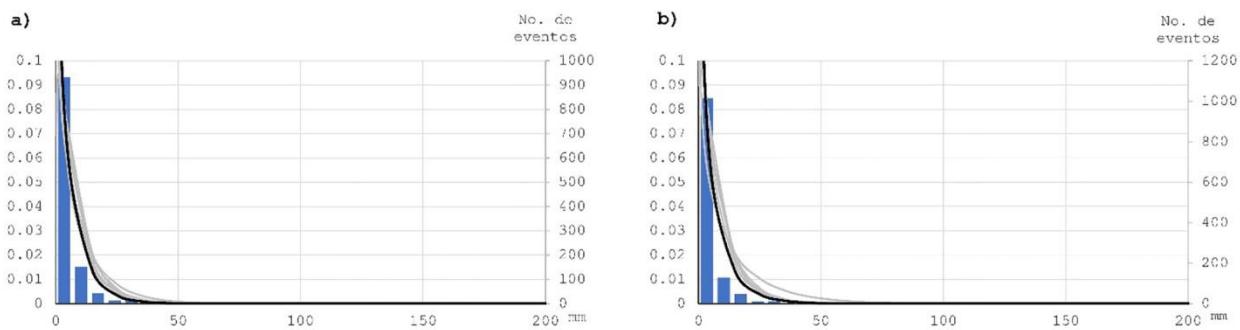


Figura 4. Histograma de Precipitación diaria (en mm, en el eje horizontal) con barras azules y ajuste de distribución gamma (línea negra) para la estación 013082, ajuste de distribución gamma para el resto de estaciones (líneas en gris). Para a) MJJ, b) ASO, ambos en el periodo (1973-2003). Los ejes verticales denotan frecuencia relativa (izquierdo) y absoluta (derecho).

Por último, con base en las fechas correspondientes a los eventos extremos de precipitación obtenidos por el método anteriormente descrito, se hizo una búsqueda tanto en la Hemeroteca

Nacional como en los registros de DesInventar (2013), para revisar si alguno de esos eventos extremos estaba relacionado con una inundación.

Resultados

Se separaron las series temporales de cada año en dos subperiodos estacionales del periodo total de lluvias (MJ y ASO), se obtuvieron las cotas para determinar qué valores de precipitación quedaron por encima de ellas para cada temporada lluviosa y para cada año; es decir, al tomar los datos diarios de precipitación para cada estación se obtuvo la cota de percentil 99 para la distribución gamma para la climatología de cada temporada y también para cada año (Figura 5).

Con esos resultados se determinó que, en general, el número de eventos extremos es casi el doble al final de la temporada lluviosa (ASO), comparados con el inicio de la temporada (MJ), como se observa en la Tabla 3, este resultado ya se anticipaba por la observación de mayor variabilidad del segundo máximo de precipitación. Esto se debe principalmente a que hacia los meses de ASO la alberca de agua caliente del Golfo de México y del Caribe presenta su máximo de calentamiento y es precisamente en esos meses donde se produce un máximo en la generación de ciclones tropicales en esas regiones (DeMaria y Kaplan, 1994, Wang y Enfield, 2001) y por lo tanto la probabilidad que un ciclón tropical toque tierra en la región del Golfo aumenta. Precisamente, respecto a los eventos relacionados a tormentas y ciclones tropicales que impactan al estado de Veracruz (centro-Puerto de Veracruz y norte-Tuxpan) y que tienen afectación importante en la región de Tulancingo, tienen una probabilidad alta, mayor a 60% de impactar esas zonas cada año (Palma-Grayeb *et al.*, 2011). En la Tabla 3, también se especifica la fase ENOS que prevalecía durante la ocurrencia de cada uno de los eventos extremos, obteniendo que para los dos subperiodos el 39.2% ocurrió en fase La Niña y el 51% en fase Neutra, debido a que generalmente durante la fase El Niño hay una disminución en la precipitación para las regiones centro, sur y sureste de México; contrariamente a lo que ocurre en fase La Niña (Magaña, 2004).

Además, se determinaron periodos de precipitación acumulada mayor a 40 mm durante once días consecutivos, sólo se contabilizaron aquellos que fueran máximos y que no se

traslaparan. Un valor aproximadamente igual a 40 mm, fue el valor promedio mínimo para los máximos de precipitación en un día (Figura 5) y en promedio cada bloque de once días contuvo 7.5 días que registraron precipitación. También los valores extremos de precipitación se ajustaron a una distribución gamma.

La Figura 6 refleja lo anteriormente descrito para el caso de precipitación acumulada para las dos temporadas MJJ y ASO, un 94.6% de todos los periodos se mantuvo en un rango de precipitación acumulada entre 40 y 150 mm. Pero, para el caso de la inundación de 1999 (línea rojo oscuro), la precipitación acumulada se eleva hasta valores cercanos a 400 mm. Esos registros de máximos representan aquellos que son superiores al 99.9 percentil.

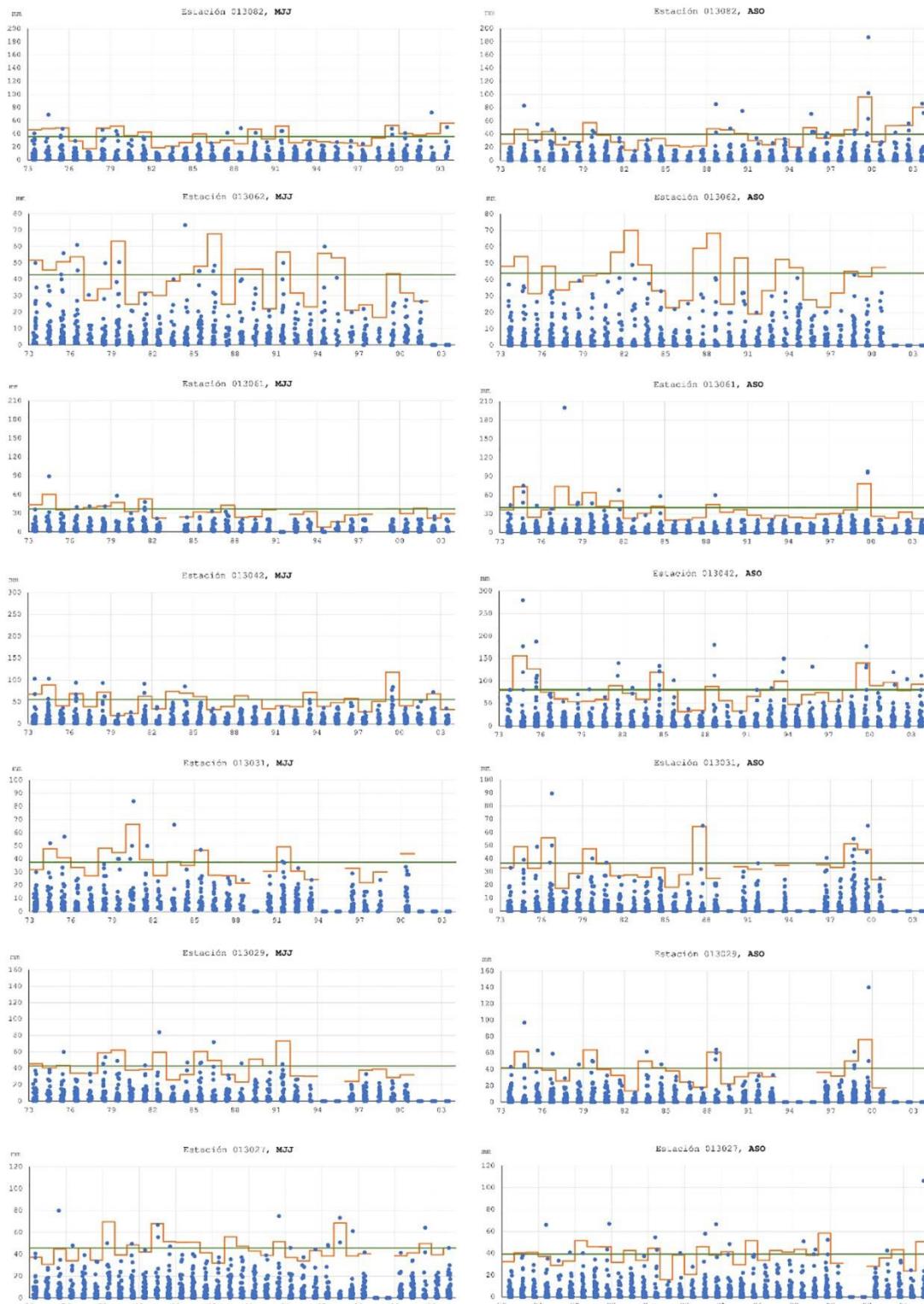


Figura 5. Datos diarios de precipitación (mm, en azul) para cada estación contra tiempo en años. Línea de percentil 99 para la distribución gamma para la climatología de cada temporada (verde) y para cada año (naranja).

Tabla 3. Fechas para eventos extremos de precipitación iguales o mayores que el percentil 99 para los dos subperiodos de la temporada lluviosa MJJ y ASO, sólo para la estación Presa ‘La Esperanza’ (013082). Denotados por su fase ENOS: La Niña (azul), Neutra (negro), El Niño (rojo).

MJJ		ASO			
24/06/1973	15/06/1991	20/09/1974	02/09/1988	20/10/1995	05/10/1999
04/07/1974	06/07/1991	09/09/1975	04/09/1988	22/08/1996	24/09/2001
28/05/1975	30/06/1995	07/10/1976	21/09/1989	02/10/1996	07/09/2002
15/07/1975	07/07/1996	27/08/1977	07/08/1990	01/10/1998	15/09/2002
07/06/1978	17/05/1997	17/09/1979	17/08/1991	04/10/1998	05/09/2003
10/06/1979	25/06/1999	29/10/1979	23/10/1992	06/10/1998	10/10/2003
07/07/1987	14/06/2000	27/08/1981	30/08/1993	05/09/1999	
03/07/1988	16/05/2002	28/08/1981	10/08/1995	29/09/1999	
30/07/1989	01/07/2003	07/09/1983	01/09/1995	04/10/1999	

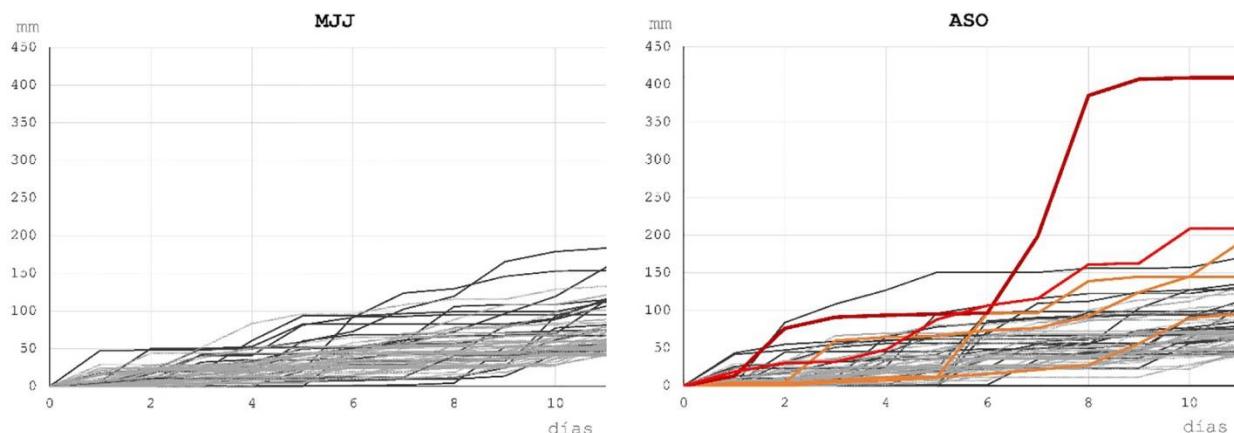


Figura 6. Precipitación acumulada (mm) en períodos de once días que supera 40 mm, para MJJ y ASO para la estación 013082 (Presa ‘La Esperanza’) para 1979-2003. Períodos que incluyen un día de máxima precipitación (negro), que incluyen dos (naranja) y tres (rojo). Los que no incluyen ningún día (gris).

Derivado de la investigación hemerográfica, así como de los registros de DesInventar se obtuvieron para la ciudad de Tulancingo 15 fechas con alguna afectación, todas las fechas obtenidas dentro del intervalo (1973-2003) están incluidas en el conjunto de eventos extremos que se obtienen en este estudio, ya sea por fecha de extremo o por lluvia acumulada en uno de los bloques de once días, con excepción de fechas posteriores a 2003, sólo porque los registros de

estaciones no cubrieron esos períodos. Lo que indica que la metodología seguida permite fijar umbrales para eventos extremos y su relación con el desastre. De la investigación hemerográfica se obtuvieron registros en periódicos nacionales y locales, para los máximos en los que se presentó algún tipo de daño (Figura 7). Por lo que, de la Tabla 3, el 27.5% de los eventos extremos correspondieron a algún tipo de desastre.

Aunque no hubo los suficientes datos provenientes de las estaciones para cubrir la temporada lluviosa del año 2007 (sólo una tenía registros, la 013027), importante por la última gran inundación en la ciudad de Tulancingo, se estudió su efecto con el patrón espacial de la lluvia acumulada en un periodo de once días y se observa que el patrón es similar al de otros eventos extremos (Figura 8), remarcando que en la región tanto por su configuración orográfica, como por la interacción de diferentes fenómenos atmosféricos se produce un modo de distribución espacial de la precipitación característico. Que el patrón espacial de la precipitación tenga modos similares a los de la climatología tiene efectos importantes en el escurrimiento, al tomar en cuenta que cuando se presentan inundaciones, los escurrimientos provienen principalmente del este, sureste y sur. También es notable que el patrón espacial para el caso de la inundación de 1999, presenta un máximo mayor a todos los obtenidos.

Los principales fenómenos causantes de eventos extremos de precipitación sobre la zona de estudio son: a) la interacción de frentes con flujo del este, lo que crea convergencia en la zona, además esto último se agrava si se trata de una situación estacionaria que puede durar varios días; b) tormentas y ciclones tropicales, que llevan gran cantidad de agua precipitable a la región, recalando los procedentes del Golfo de México y que impactan al estado de Veracruz en la parte centro y norte; c) ondas del este, que también provocan entrada de humedad y lluvias. Específicamente, para los eventos extremos de 1999 y 2007 se trató de los casos a) y b), respectivamente.

Aun cuando todavía es tema de investigación averiguar cuánta humedad puede contener y transportar cualquiera de los fenómenos antes descritos y de qué depende, se pueden establecer acciones para la consideración de posibles daños por lluvias relacionadas a ellos. El poder del pronóstico está fuertemente ligado al de prevención, ya que haciendo diferentes corridas y simulaciones se obtienen resultados espaciales con las localidades que tendrán mayor probabilidad de ser afectadas. Para los casos de inundación que han afectado a Tulancingo, se hizo precisamente una corrida de pronóstico para la última ocurrida en el año 2007 debida al

huracán Dean; usando el modelo WRF y se obtuvo el pronóstico por hora para las siguientes 72 horas a partir de las 0Z horas del día 21 de agosto 2007 (19:00 horas en el horario de verano local del 20 de agosto).



Figura 7. Primera plana del periódico El Universal del día miércoles 06 de octubre de 1999, obtenida de la Hemeroteca Nacional.

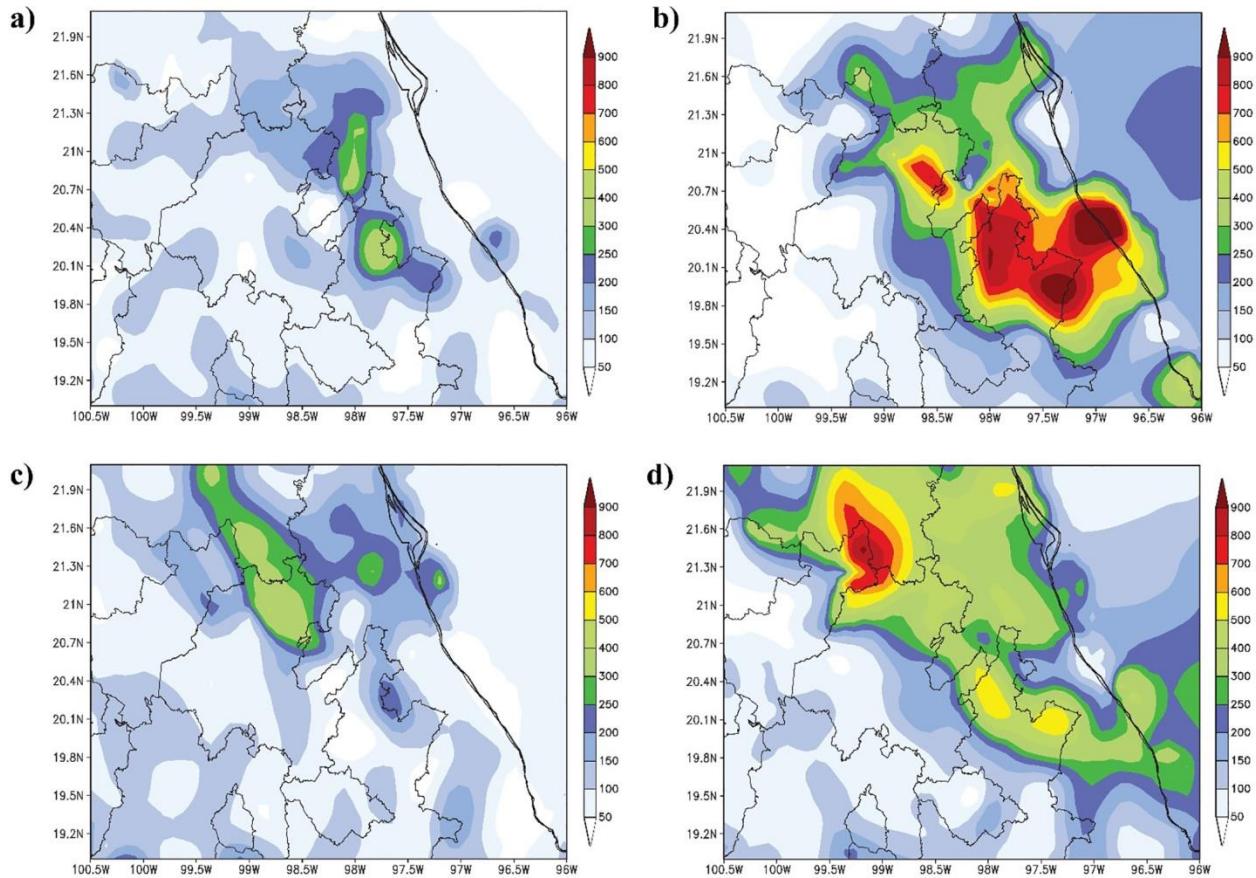


Figura 8. Precipitación acumulada (mm) durante once días, para las siguientes fechas como dato central: a) 02/10/1998, b) 03/10/1999, c) 15/09/2002 y d) 26/08/2007, datos de IGg-UNAM.

Las Figuras 9a, 9b y 9c muestran la precipitación acumulada (mm) para: a) 24, b) 48 y c) 72 horas respectivamente, donde se aprecia que el patrón espacial de precipitación acumulada esperada después de 72 horas (Figura 9c) concuerda con el de precipitación acumulada observada (Figura 8d), es decir, el modelo tiene buena habilidad de predicción.

Conclusiones

Para el caso de Tulancingo, Hidalgo se identificó la dinámica de la amenaza que en parte provoca las inundaciones de la ciudad. Los principales fenómenos meteorológicos que están relacionados a eventos extremos son los que crean gran convergencia en la región, como son la interacción de ondas del este con flujo del oeste y por otra parte ciclones tropicales provenientes del Golfo de México.

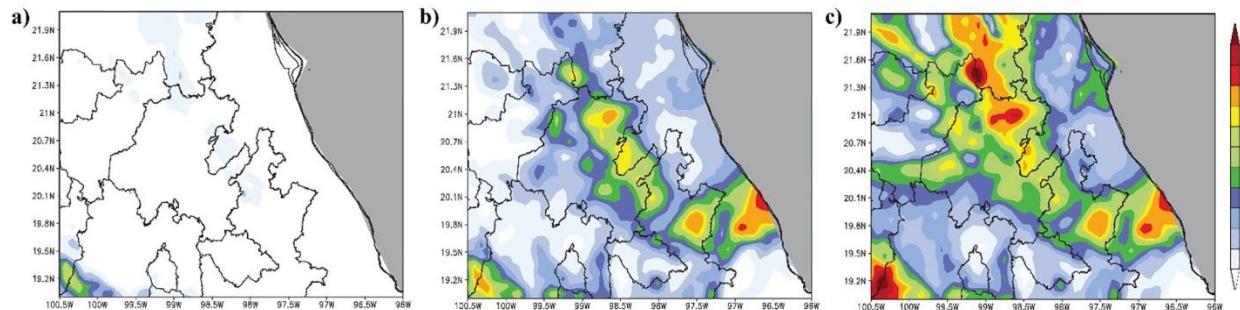


Figura 9. Pronóstico (WRF) para precipitación acumulada (mm) a partir de las 0Z del día 21/08/2007 (19:00 horas local de verano del 20/08/2007): a) para 24 horas, b) 48 horas, c) 72 horas. IGg-UNAM.

Los patrones espaciales de la climatología de la precipitación coinciden en lluvia acumulada al norte, noreste y este de la ciudad, aunque para los eventos extremos obtenidos en este estudio, precipitaciones intensas (40 mm) al este, sureste y sur de la ciudad representan casos de alerta por el escurrimiento desde las zonas altas y más si esas lluvias están relacionadas a fenómenos que provoquen precipitación con una duración de varios días, lo cual favorece la posibilidad de inundación.

Se determinó que existe un incremento de probabilidad de que se presente un evento extremo en los meses de agosto a octubre sólo tomando en cuenta temperaturas superficiales del mar en el Caribe y en Golfo de México (Wang y Enfield, 2001) y actividad de ondas del este. Aunado a lo anterior, se produce un incremento en la humedad del suelo en dicho periodo (ASO), lo que conlleva a la presencia de suelos saturados y por ende, mayor tendencia para encharcamientos e inundaciones.

Es imperativo que las autoridades de protección civil como las que rigen el manejo de presas y embalses, tomen de forma acoplada los pronósticos meteorológicos junto a los mapas de riesgo ante fenómenos que tienen la posibilidad de producir precipitación intensa en la región, además del hecho que la ciudad y la presa han aumentado su vulnerabilidad por diversas razones,

por ejemplo, que ha crecido la población que vive en zonas de alto riesgo, que el tiempo de vida de la presa ‘La Esperanza’ ha concluido y su capacidad ahora se ha reducido al 40% del volumen original (Bonasia *et al.*, 2017); factores que sumados tienen como consecuencia que el tiempo de retorno del desastre disminuya y pueda presentarse con mayor frecuencia.

Agradecimientos

Los autores agradecemos a Gustavo Vázquez Cruz, Luis M. Galván y Emmanuel Zúñiga su apoyo y comentarios. De igual forma se agradece a los revisores anónimos.

Referencias

- Berz, G. (2000). Flood disasters: lessons from the past - worries for the future, Water and Maritime Engineering, Proceedings of the Institution of Civil Engineers (142): 3-8.
- Bonasia, R., O.S. Areu-Rangel, D. Tolentino, I. Mendoza-Sánchez, J. González-Cao and J. Klapp. (2017). Flooding hazard assessment at Tulancingo (Hidalgo, Mexico). Journal of Flood Risk Management (11, S2): S1116-S1124. <https://doi.org/10.1111/jfr3.12312>
- CCA/UNAM. (Universidad Nacional Autónoma de México- Centro de Ciencias de la Atmósfera) Base de datos de precipitación, temperatura máxima y mínima mensual. https://iridl.ldeo.columbia.edu/SOURCES/.UNAM/.gridded/.monthly/.v0705/.dataset_documentation.html (28 de marzo de 2018).
- DeMaria, Mark. and John Kaplan. (1994). Sea Surface Temperature and the Maximum Intensity of Atlantic Tropical Cyclones. Journal of Climate (7): 1324-1334.
- Dena-O, Oscar S., Griselda Obeso C., Diane Doser, Jesús E. Leyva, E. Rascon, Francisco Gómez and Miguel Domínguez A. (2012). Using subsurface geophysical methods in flood control: A resistivity survey to define underground storage capacity of a sand body in Ciudad Juárez, Mexico. Geofísica Internacional (51): 225-249.
- DesInventar (2013). Sistema de Inventario de Desastres para México. Consultado el 28 de marzo de 2018 de <https://online.desinventar.org/>.
- Gama, L., E.M. Ordoñez, C. Villanueva-García, M. Arturo Ortiz-Pérez, H.D. López, R.C. Torres, and M.E.M. Valadez. (2010). Floods in Tabasco Mexico: history and perspectives. En Flood recovery, Innovation and Response II, edited by D. de Wrachien, D. Proverbs, C.A. Brebbia and S. Mambretti, 25-33. WIT Press.

- Huffman, G.J., R.F. Adler, D.T. Bolvin, G. Gu, E.J. Nelkin, K.P. Bowman, Y. Hong, E.F. Stocker, D.B. Wolff. (2007): The TRMM Multi-satellite Precipitation Analysis: Quasi-Global, Multi-Year, Combined-Sensor Precipitation Estimates at Fine Scale. *J. Hydrometeor.* (8): 38-55.
- IGg-UNAM. Base de datos propia del grupo de Clima y Sociedad.
- Magaña, Víctor., Joel Pérez, and Matías Méndez. (2003). Diagnosis and prognosis of extreme precipitation events in the Mexico City Basin. *Geofísica Internacional* (41): 247-259.
- Magaña R., Víctor O. (Editor). (2004). Los impactos de El Niño en México (UNAM, SEP-CONACYT, IAI, CENAPRED, PEMBU).
- Magaña, Víctor., Luis Clemente López y Gustavo Vázquez. (2013). El pronóstico de lluvias intensas para la Ciudad de México. *TIP Revista Especializada en Ciencias Químico-Biológicas* (16): 18-25.
- Matías-Ramírez, Lucía Guadalupe., Oralia Oropeza-Orozco, José Lugo-Hubp, Miguel Cortez-Vázquez, Ernesto Jáuregui-Ostos. (2007). Análisis de las principales causas de las inundaciones de septiembre de 2003 en el sur del estado de Guanajuato, México. *Investigaciones Geográficas* (64): 7-25.
- NOAA, base de datos de anomalías mensuales de temperatura superficial del mar. https://www.esrl.noaa.gov/psd/gcos_wgsp/Timeseries/Data/nino34.long.anom.data
- Palma-Grayeb, Beatriz Elena., Rosa Elena Morales-Cortez, y David Díaz-Gutiérrez. (2011). Actualización de envolventes de probabilidad empírica de impacto de ciclones a cuatro puertos del Golfo de México y la antelación al riesgo. En *Inundaciones 2010 en el estado de Veracruz*, editado por Tejeda-Martínez, Adalberto; 289-305. Veracruz: COVECYT y Universidad Veracruzana.
- Pedrozo-Acuña, Adrián., J. Agustín Breña-Naranjo, and Ramón Domínguez-Mora. (2014). The hydrological setting of the 2013 floods in Mexico. *Weather* (69), 295-302.
- Rivera-Trejo, Fabian., Gabriel Soto-Cortés, and Baldemar Méndez-Antonio. (2010). The 2007 flood in Tabasco, Mexico: an integral analysis of a devastating phenomenon. *International Journal of River Basin Management* (8): 255-267.
- Tejeda-Martínez, Adalberto (Editor). (2006). *Inundaciones 2005 en el estado de Veracruz* (COVECYT y Universidad Veracruzana), ISBN 968-834-754-X.

Tejeda-Martínez, Adalberto (Editor). (2011). Inundaciones 2010 en el estado de Veracruz (COVECYT y Universidad Veracruzana).

Thom, H.C.S. (1958). A note on the gamma distribution. *Monthly Weather Review* (86): 117–122.

Wang, C., and Enfield, D. B. (2001). The tropical Western Hemisphere warm pool. *Geophysical Research Letters* (28): 1635-1638.

Wilks D. S. (1995). Statistical Methods in the Atmospheric science. Academic Press. (p. 86-89).

Zúñiga, Emmanuel, and Víctor Magaña. (2018). Vulnerability and risk to intense rainfall in Mexico: The effect of land use cover change. *Investigaciones Geográficas* (95): 1-18.
DOI: dx.doi.org/10.14350/rig.59465