

Análisis de las principales causas de las inundaciones de septiembre de 2003 en el sur del estado de Guanajuato, México

Lucía Guadalupe Matías Ramírez*
Oralia Oropeza Orozco**
José Lugo Hubp**
Miguel Cortez Vázquez(+)**
Ernesto Jáuregui Ostos***

Recibido: 26 de septiembre de 2006
Aceptado en versión final: 18 de mayo de 2007

Resumen. Las precipitaciones intensas ocurridas en septiembre de 2003, provocaron que en la cuenca del Lerma varios ríos incrementaran su nivel, asimismo, las presas Allende y Solís alcanzaron su máxima capacidad, esto generó inundaciones severas en 17 de los 46 municipios en el sur del estado de Guanajuato. Ocurrieron seis decesos y hubo 18 000 damnificados, las pérdidas económicas ascendieron a más de 900 millones de pesos, el sector agropecuario fue el más afectado. Las precipitaciones y los escurrimientos se consideran las principales causas de las inundaciones de 2003. El análisis consistió en identificar los sistemas de tiempo que por la continuidad y persistencia produjeron lluvias extraordinarias. Se llevó a cabo una distribución espacial de la precipitación, el cálculo del periodo de retorno (Tr) y la frecuencia para estudiar el comportamiento de las tormentas de esa temporada y otras similares. Lo anterior se complementa con la construcción e interpretación de hidrogramas de uno de los principales ríos, con registros históricos y estudios previos de las características morfológicas de la región.

Las inundaciones que ocurrieron en el sur del estado se deben a lluvias extraordinarias generadas por la interacción singular de tres sistemas de tiempo. La tormenta más severa alcanzó 98 mm de intensidad cuyo Tr se estimó en 50 años, los valores acumulados durante 14 días fueron de más de 300 mm, los gastos medios diarios oscilaron entre los 180 y 200 m³/seg. Sin embargo, se han presentado avenidas importantes con precipitaciones del orden de los 50 a 70 mm, acumulados de 250 mm y gastos de 170 a 210 m³/seg. La morfología del terreno y los cambios de uso del suelo también favorecen estos fenómenos.

Palabras clave: Fenómenos hidrometeorológicos, precipitaciones extraordinarias, inundaciones, cuenca del río Lerma, estado de Guanajuato.

* Subdirección de Riesgos Hidrometeorológicos, Centro Nacional de Prevención de Desastres, Av. Delfín Madrigal No. 665, Col. Pedregal de Santo Domingo, 04360, Coyoacán, México, D.F. E-mail: lgmr@cenapred.unam.mx.

** Departamento de Geografía Física, Instituto de Geografía, Universidad Nacional Autónoma de México, Cd. Universitaria, 04510, Coyoacán, México, D.F. E-mails: orooro@igg.unam.mx; lugo@servidor.unam.mx.

*** Departamento de Meteorología, Centro de Ciencias de la Atmósfera, Universidad Nacional Autónoma de México, Cd. Universitaria, 04510, Coyoacán, México, D.F. E-mail: ejos@atmosfera.unam.mx

Analysis of the main causes of the floods on September 2003, in the south of the state of Guanajuato, Mexico

Abstract. The intense rainfalls happened on September 2003, caused that in the basin of the Lerma, several rivers increased their level, also, Allende and Solís dams reached their maximum capacity. This generated severe floods in 17 of the 46 municipalities in the south of the state of Guanajuato. The affected population was estimated in more than 18000 inhabitants and six deceases. The economic losses were estimated to be more than 900 million pesos and the agricultural sector underwent the most serious effects.

The purpose of this paper is to review the main causes of the floods of 2003. The analysis consisted on identifying the systems of weather that produced extraordinary rains for the continuity and persistence. It is carried out a space distribution of the precipitation, the calculation of the period of return (T_r) and the frequency to study the behavior of the storms of that season and other similar. The above-mentioned is supplemented with the construction and hydrographs interpretation of one of the main rivers, with historical registrations and previous studies of the morphological characteristics of the region.

The floods that happened in the south of the state are due to extraordinary rains generated by the singular interaction of three systems of weather. The most severe storm reached 98 mm of intensity whose T_r was considered in 50 years, the values accumulated during 14 days were of more than 300 mm, the runoff daily means oscillated between the 180 and 200 m³/seg.

It was found that most of the towns affected by the 2003 event had presented important floods in previous events with minor intensity rainfalls; by example, 50 to 70 mm, accumulated of 250 mm and expenses of 170 to 210 m³/seg. The morphology and the changes of land use also favor these phenomena.

Key words: Hidrometeorological phenomena, Intense rainfalls, floods, Lerma river basin, state of Guanajuato.

INTRODUCCIÓN

De los fenómenos de origen natural que provocan desastres en México más del 50% corresponden a los hidrometeorológicos (La Red, 2005 y CENAPRED, 2001). En la época húmeda (mayo a octubre) son frecuentes los ciclones tropicales, las lluvias intensas y las altas temperaturas, mientras que, en la otra mitad del año (noviembre a abril), se presentan heladas, nevadas, vientos intensos, sequías y granizadas (Jáuregui, 1995).

Algunas estimaciones a nivel mundial muestran a las inundaciones como el evento; que genera los mayores desastres (CRED, 2004; La Red, 2005; Zhang and Sing, 2005 y Davis, 2003). Anualmente, las tormentas de invierno y las inundaciones causan la mayor destrucción de viviendas y afectación a la actividad económica (CRED, 2004). Esto no sólo en comparación con los fenómenos arriba mencionados, sino

también con otros eventos naturales como sismos, vulcanismo o movimientos de masa.

Entre 1970 y 2003 se registraron 1744 inundaciones en todo el territorio mexicano, que afectaron principalmente a Veracruz, el Estado de México, el Distrito Federal y Chiapas, con 232, 231, 183 y 86 casos, respectivamente. Guanajuato ocupa el décimo lugar con un registro de 55 inundaciones para el mismo periodo (Figura 1).

Durante septiembre de 2003, lluvias intensas fueron las causantes del mayor impacto en el país, situación catalogada como crítica por los efectos a que dieron lugar, sobre todo en los estados que forman parte de la cuenca media del río Lerma, como el Estado de México, Querétaro, Guanajuato, Michoacán y Jalisco. Por tal motivo, este trabajo tiene como objetivo analizar las principales causas que originaron las inundaciones, en particular en el sur del estado de Guanajuato, a fin de proporcionar

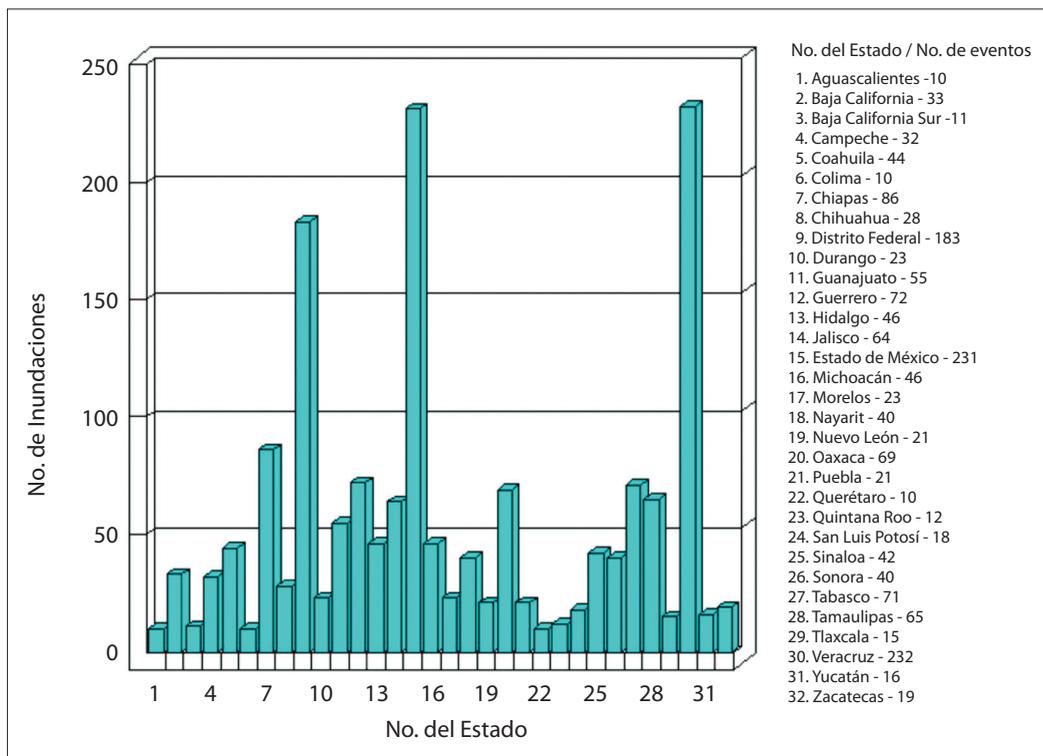


Figura 1. Frecuencia de inundaciones por estado, 1970-2003.
Fuente: La Red, 2005.

información útil a la población en general, a las unidades de Protección Civil del estado y a las autoridades responsables en la toma de decisiones durante una futura emergencia.

De acuerdo con la clasificación del Servicio Meteorológico Nacional (SMN), las lluvias diarias que ocurrieron del 5 al 18 de septiembre de 2003 tuvieron una intensidad de muy fuerte (50 a 70 mm) a intensas (mayores de 70 mm), ocasionaron el desbordamiento de los ríos Lerma, La Laja, Turbio, Apaseo el Grande, y sus afluentes, además de arroyos locales, canales y drenes del Distrito de Riego No. 011 (Alto Lerma), mismos que inundaron las planicies. Las consecuencias se manifestaron en diversas comunidades rurales y urbanas de Guanajuato, debido también a la transformación de la red de drenaje por los sistemas de

riego y por la urbanización, lo cual contribuye a aumentar el volumen y la velocidad de los caudales (Fuentes *et al.*, 2005). Asimismo, la deforestación y la conversión del uso del suelo a terrenos agrícolas han favorecido los procesos de erosión, transporte y sedimentación, incrementando el riesgo de inundación (García *et al.*, 2002).

ÁREA EN ESTUDIO

Se localiza en el sur del estado de Guanajuato, donde 17 municipios fueron afectados (Figura 2). Desde el punto de vista fisiográfico, la porción sur pertenece al Sistema Volcánico Transversal (SVT) caracterizada por lomeríos, elevaciones menores y volcanes independientes o en grupos (sierras) que se asientan en la

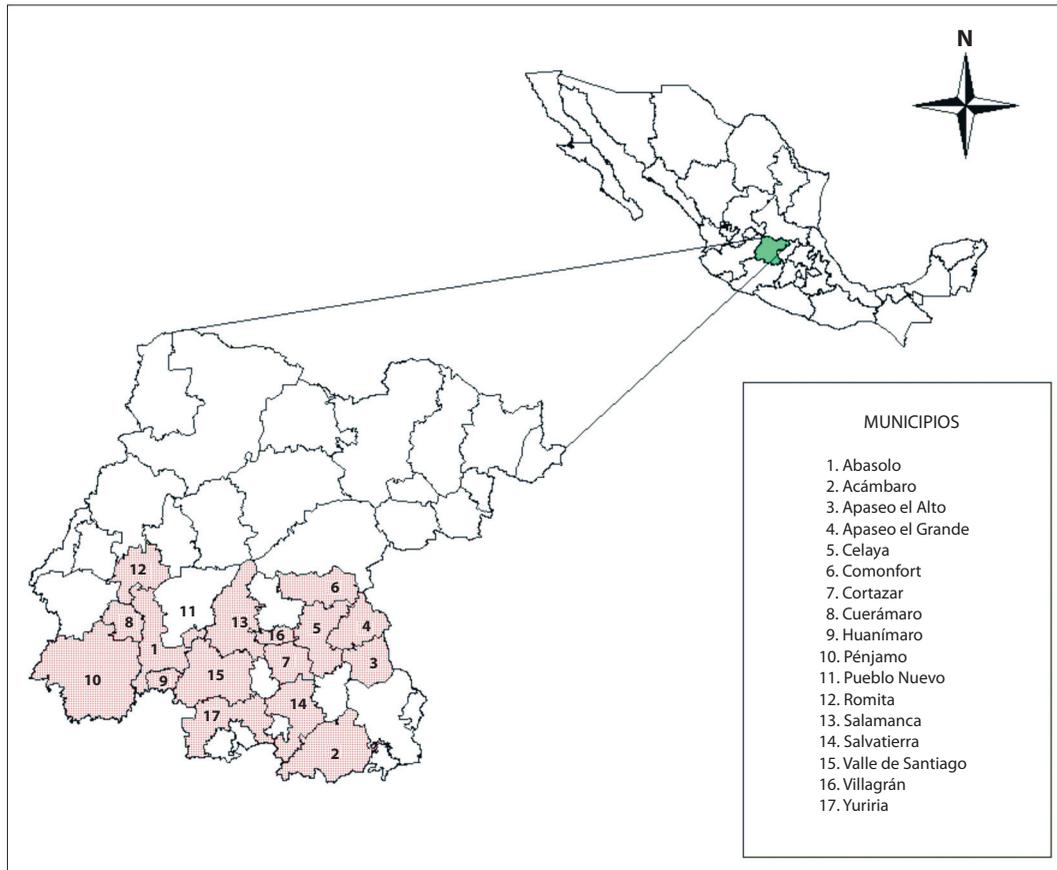


Figura 2. Municipios de Guanajuato afectados por las inundaciones de septiembre de 2003.
Fuente: CENAPRED, 2004.

altiplanicie aluvial-lacustre y volcánica del Bajío, entre 1900 y 1700 msnm (Bocco, 1983).

La constitución geológica es principalmente de rocas cuaternarias del tipo andesita y basalto (lavas y piroclastos), en menor proporción riolitas; son extensas las superficies ocupadas por depósitos aluviales y lacustres más jóvenes que las rocas volcánicas o contemporáneas a éstas.

La región está drenada por el río Lerma que nace en la altiplanicie de Tenango, Estado de México. El cauce del Lerma es propio de un río joven condicionado por el vulcanismo del Pleistoceno tardío-Holoceno, los últimos 50 000 años (Bloomfield, 1974) y la última gran erup-

ción del Xinantécatl hace aproximadamente 10 000 años (Bloomfield y Valastro, 1974).

METODOLOGÍA

Para analizar los eventos hidrometeorológicos, se utilizaron los datos de precipitación diaria y mapas sinópticos de los fenómenos meteorológicos ocurridos durante el mes de septiembre de 2003, pertenecientes al SMN. La Comisión Nacional del Agua Estatal (CNA-E) proporcionó información de escurrimientos y gastos de los principales ríos; así como de los almacenamientos y desfuegos de las presas del estado. Las imágenes de satélite en su canal vi-

sible e infrarrojo se obtuvieron de la University of Washington, Department of Atmospheric Sciences y del National Weather Service que es parte del National Oceanic Atmospheric Administration (NOAA).

Con base en los mapas sinópticos y en las imágenes se identificaron los sistemas de tiempo.

A partir de los datos pluviométricos de 25 estaciones climatológicas y con ayuda del sistema de información geográfica (SIG) Arc-Map, versión 9.0, se elaboró un mapa que muestra la distribución de la lluvia para el día de la tormenta más intensa; y otro para el acumulado. Estos datos se generaron mediante el método de Krigging que estima valores basándose en promedios ponderados de datos alrededor del punto a ser interpolado, dicho proceso es el más utilizado en estudios climáticos toda vez que permite una mejor interpolación (Lagos, *et al.*, 1991, y Chazarra y Gutiérrez, 2002). Del primer mapa se seleccionó la estación que registró los datos más altos durante el tiempo de ocurrencia de los sistemas atmosféricos; además, se calculó el periodo de retorno (Tr) para el valor máximo de lluvia, y se realizó un análisis de frecuencias para la precipitación diaria de la estación Cortazar.

Por otra parte, se construyeron hidrogramas con el propósito de comparar algunas inundaciones anteriores del río Turbio, uno de los más importantes y que cuenta con información. Asimismo, se estimó la altura de las inundaciones mediante la verificación en campo, a través de evidencias presentadas en estructuras como viviendas, puentes, escuelas y centros de salud, entre otros.

Se identificaron las zonas susceptibles a inundación con base en los mapas generados por la CNA-E (Gobierno del Estado de Guanajuato, 2001), y el Instituto Nacional de Ecología-Instituto de Geografía (INE-IGG, 1996), además, se agregaron las áreas que fueron afectadas en el 2003 (información proporcionada por Protección Civil del Estado de Guanajuato).

Para conocer la frecuencia y distribución espacial de las inundaciones por municipio se utilizó la base de datos de desastres en México DesInventar de La Red (periodo 1970-2003). Estos fenómenos se ejemplifican con las figuras más representativas.

ANÁLISIS DE LOS SISTEMAS ATMOSFÉRICOS

De acuerdo con Wallen (1955), Jáuregui (1967) y García (1997), algunos de los patrones de circulación que ocasionan la precipitación en México durante el verano son las ondas tropicales, el desplazamiento hacia el norte de la zona intertropical de convergencia (ZIC) y los ciclones tropicales.

Por su parte, Hosler (1956) indica que las ondas del este son más frecuentes durante agosto y septiembre. Para ello debe existir aire seco que tienda a reemplazar la entrada de aire húmedo desde el Golfo de México, inmediatamente después del paso de la onda; de tal manera que la lluvia continuará por varios días y se podrá mover hacia el oeste, directamente sobre la planicie central de México. Asimismo, Jáuregui (1967) explica que el comportamiento de la onda se distorsiona con la topografía al cruzar el Sistema Volcánico Transversal, por lo que en la parte trasera de la onda, las nubes crecen hasta los 7 u 8 km produciendo abundantes lluvias.

Durante septiembre de 2003, las lluvias abundantes fueron generadas por una línea de vaguada (configuración en la que a partir del centro de una baja presión las isobaras se deforman al alejarse de él) que se encontraba sobre la zona central del país y por el paso consecutivo de seis ondas tropicales (denominadas con los números 40, 41, 43, 44, 45 y 46, por el SMN) que viajan en la corriente de los vientos Alisios, mismas que provocaron fuerte actividad convectiva sobre dicha zona. Estas condiciones meteorológicas coincidieron, justo al final de la época de lluvias; por una parte, se tenía una fuerte actividad en la ZIC y las tormentas tro-

picales *Kevin* y *Linda* al sur de la península de Baja California; por otra, la vaguada produjo una mayor distribución de flujo de aire frío, el cual incrementó las lluvias.

En las cartas sinópticas, del 5 y 12 de septiembre (Figura 3, izquierda), se observa la configuración de los sistemas meteorológicos señalados, se muestra actividad convectiva y la influencia de la nubosidad en el centro del país, la cual está asociada a la vaguada. En la imagen de satélite del día 5, en el canal visible (superior derecha) se identifica la evolución de nubes con potencial de lluvias en niveles bajos, durante

las horas luz del día; mientras que el día 12, en el canal infrarrojo (inferior derecha) se detecta la circulación de niveles superiores.

Por lo anterior, en Guanajuato, del 5 al 18 de septiembre, la precipitación fue mucho mayor (921.5 mm; SMN, 2003a) respecto a la normal; y la media para el mismo mes, de 1941 al 2002, es de 597.3 mm (CNA-SMN, 2002), comparada con la de 2003 resulta 154.2% mayor.

La distribución espacial de las isoyetas del día con mayor intensidad de la precipitación (6 de septiembre), así como de la lluvia acumulada (5 al 18 de septiembre) muestra los valores

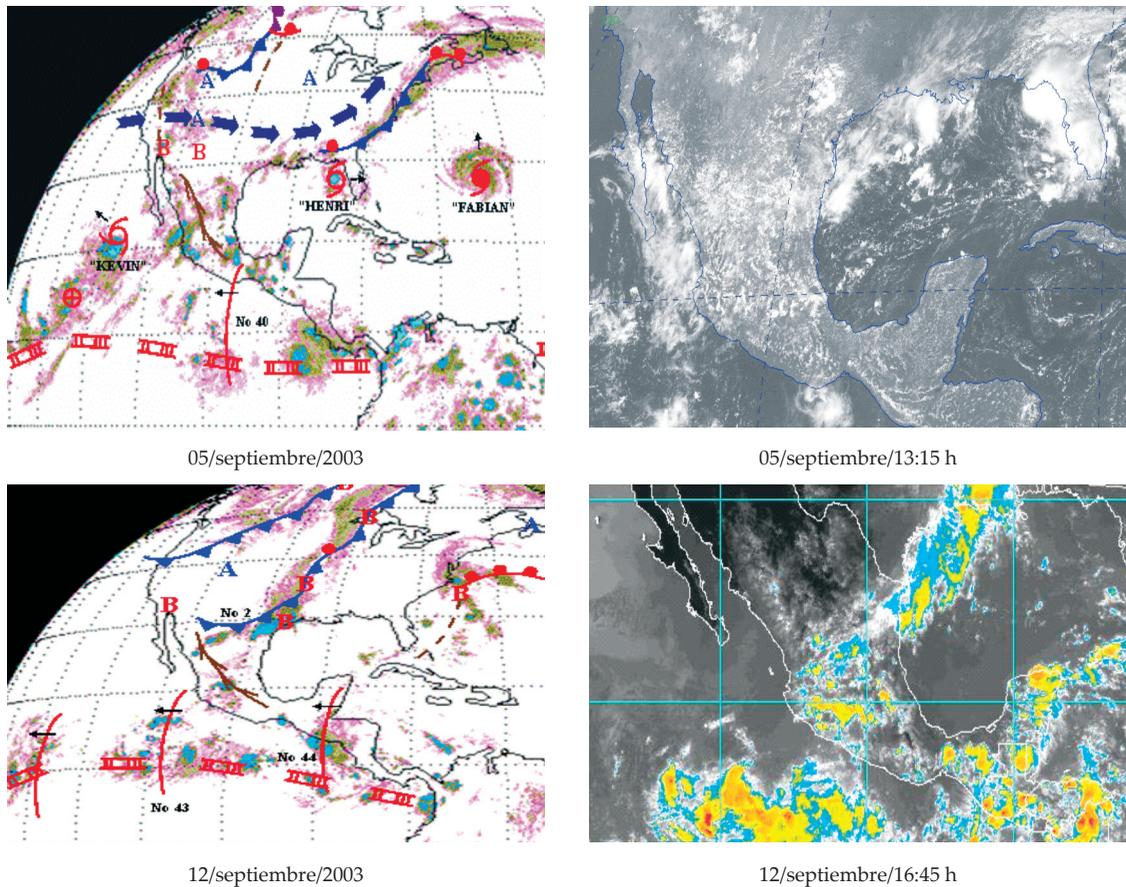


Figura 3. Fenómenos meteorológicos e imágenes de satélite de septiembre de 2003, donde se observan las bandas nubosas sobre el centro del país causantes de las lluvias intensas en el estado de Guanajuato.

Fuente: SMN (México) y University of Washington y National Weather Service, U.S.A.

más altos (>90 y >300 mm, respectivamente) hacia el sureste del estado (Figuras 4a y b), coinciden con las zonas más afectadas por las inundaciones.

En dicho periodo, de 28 tormentas con precipitación superior a 50 mm, 12 ocurrieron el día 6 de septiembre (Tabla 1). Según Salas y Jiménez (2003) este umbral de lluvia muy fuerte es suficiente para generar inundaciones en el centro y sur del estado. El valor máximo en 24 horas fue de 97.9 mm (el día 6), que corresponde a la estación climatológica de Cortazar (SMN, 2003b), localizada al suroeste de Celaya. Con ayuda del programa Ax (Jiménez, 2000) se calculó un periodo de retorno (Tr) de 50 años con base en 42 años de registros. Además, se estimó una anomalía de precipitación equivalente a 24.7% por arriba de lo normal. Así pues, el valor histórico más alto de 82 mm (22 de septiembre de 1976; SMN-IMTA, 2000), se superó en 2003.

Para complementar el análisis se determinó la frecuencia de la precipitación diaria en la misma estación y se comparó con las evidencias históricas de otras inundaciones en esa región (Gobierno del Estado de Guanajuato, 2001). Los valores obtenidos se muestran en la Tabla 2, de un total de 32 tormentas, nueve alcanzaron la categoría de intensas (>70 mm) y 23 fueron catalogadas como muy fuerte (>50 mm). Éstas ocurren de junio a septiembre; sin embargo, en el mes siguiente todavía se forman tormentas, como la del 7 de octubre de 1967 (86 mm).

ANÁLISIS HIDROLÓGICO DURANTE EL EVENTO DE 2003: CUENCA DEL RÍO LERMA EN GUANAJUATO

Las inundaciones en Guanajuato se han presentado desde el siglo XVII hasta nuestros días (García-Acosta *et al.*, 2003 y Escobar, 2004).

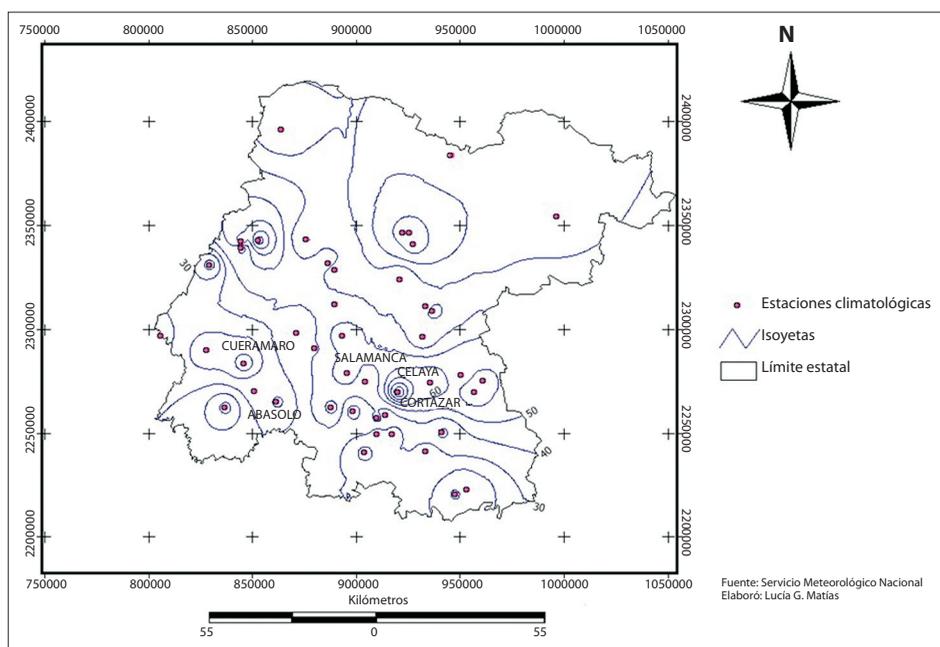


Figura 4a. Isoyetas del 6 de septiembre de 2003. El núcleo máximo se localiza al sureste de Celaya con un valor mayor de 90 mm en la estación Cortazar.

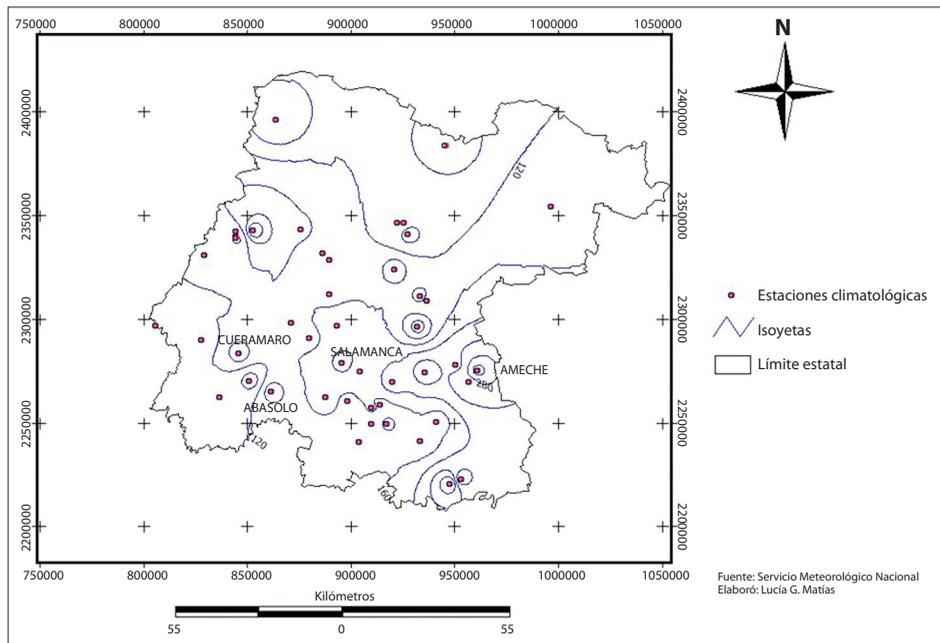


Figura 4b. Isoyetas del 4 al 18 de septiembre de 2003. El valor máximo fue reportado en la estación Amealco con más de 300 mm.

Entre los siglos XVII y XIX, en el municipio de León ocurrieron los sucesos más significativos con once registros, destacan las inundaciones de 1637, 1749, 1762, 1803, 1883, 1887, 1888 y 1890. La más grave fue la del 18 de junio de 1888, que causó la muerte de 265 personas y 1 420 desaparecidos, los caminos se inundaron en su totalidad, más de 1 000 casas fueron derribadas y 30 mil personas se quedaron sin hogar y en la miseria, lo que provocó el éxodo de la población (Garza, 1998 y Escobar, 2004).

En la época actual, de 1970 a 2003 se han registrado 55 inundaciones severas en 19 municipios del estado (La Red, 2005), en ellas han perdido la vida 85 personas. En los últimos 33 años la frecuencia y distribución espacial de los eventos se ha dado principalmente en los municipios, de Irapuato y León, con siete y nueve casos respectivamente. Destaca la inundación de Irapuato, 18 de agosto de 1973, donde seis presas se desbordaron y 90% de las viviendas de adobe fueron destruidas debido a

las intensas precipitaciones generadas durante varios días en la cuenca alta de la presa El Conejo, los escurrimientos rebasaron la capacidad de las pequeñas presas y bordos localizados aguas arriba. Por lo tanto, se inundaron los terrenos situados aguas abajo de la misma (Salas y Jiménez, 2004 e IPN, 2003).

Los ríos que favorecen las inundaciones extraordinarias, en las zonas de relieve negativo con drenaje deficiente y fragmentadas por el vulcanismo cuaternario (CNA, 2003 y Ortiz *et al.*, 1990), son el Lerma y sus tributarios más importantes, en su margen derecha, los ríos La Laja y Turbio, la superficie de sus cuencas es de 11 978 y 12 395 km², respectivamente; la dirección preferencial de los ríos es este-oeste. Mientras que, en la margen izquierda, se encuentra el río Angulo (Figura 5); todos pertenecen a su vez a la cuenca del Lerma Santiago (área aproximada de 140 000 km²), esta última tiene una forma alargada e irregular. El río Lerma se interna al estado de Guanajuato.

Tabla 1. Tormentas mayores a 50 mm en el estado de Guanajuato (SMN, 2003b)

Estación	Precipitación en 24 horas (mm) del 5 al 18 de septiembre de 2003														Lluvia Acumulada
	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	
Acámbaro	0.5	9	60	70.5	38	28.2	30.5	5.2	0	22.7	3	0	0	56.2	323.8
Agua Tibia	15.5	27	22	7.5	2	33	23.0	15	53.1	9	0.0	0.01	0.0	14.0	221.11
Ameche	24.6	62	59.5	17.5	28	14	47	29.5	12.5	42	0	0	0	0	336.6
Apaseo el Alto	7	57	19	42.0	25	39	7.0	8	9.0	11	0.0	0.0	0.0	7	231
Apaseo el Grande	23.6	67	42.2	7.3	18.7	14.9	18.2	23.3	27.7	20.5	0.0	0.0	0.0	3.3	266.7
Celaya	9.4	70.4	57.2	44.5	2.8	11.3	37.8	8.3	11.9	18.8	0	0	0	2.4	274.8
Cinco Señores	7.3	40.4	2.3	16.8	55.5	47.4	11.2	0.01	0.01	0.01	0	0	0.01	0	180.94
Cortazar	2.9	97.9	35	5.0	1.8	15.3	48.0	13.2	0.0	17.0	0.01	0.0	0.0	4.7	240.8
El Conejo	14.5	29.5	0.01	10.4	1.3	7.9	10.3	58.3	17	17.3	0	0	0	0.01	166.52
El Gigante	2.1	9.2	7.0	6.8	30.2	8.3	21.3	14.3	11.2	4.2	0.0	0.0	0.0	58.3	172.9
El Palote	14.2	57.5	22.7	6.8	1.5	22.4	21.3	5	0	9.9	0	0	0	0.01	161.31
Guanajuato	0	34.1	21	50.0	0	2	24.5	0	0	2.2	0.01	0.01	0	0	133.82
Las Adjuntas	73.2	13.3	19.6	5	10.2	10.2	5.7	6.2	16.6	3.0	16.6	3.0	0.01	15.4	182.11
Los Castillos	7.5	70.3	20.6	9.4	1.7	17.2	5.7	0.01	9.0	17.4	0	0	0	0.01	158.82
P. La Golondrina	30.0	52.0	Inap*	1.0	2.0	11.0	5.0	6.0	18.0	2.0	4.0	0.0	0.0	55.0	186.0
P. La Purísima	0	53.0	17	36	3.6	14	16	11.6	0	18.5	0	0	0	0	169.7
Salamanca	1.8	58.5	17.5	7.8	0.01	50.8	29.3	17.8	16.8	17.3	0	1.8	0	1.3	220.71
Sta. Julia	7.9	35.2	24.6	0	0	13.7	60.8	4.1	0	0	0	0	0	5.8	152.1
Sta. Rita	6.8	26.2	21.3	0	0.01	12.3	64.3	3.8	0	0.01	0	0	0	6.3	141.02
Temascalco	20.0	59.0	8.0	20.0	2.2	12.0	17.5	20.0	14.2	27.0	0.0	0.0	0.0	0.8	200.7
Tres Guerras	20	84.5	44	34.5	3.5	15	31.7	15.5	11	24.5	0	0	0	2.5	286.7
Victoria	12.5	27.6	23.6	0	0	16.5	57.9	2.9	0	0	0	0	0	7.7	148.7

* Inap. = Inapreciable.
Elaboración propia de los autores.

Tabla 2. Frecuencia de la precipitación diaria en la estación Cortázar, 1961-2003

INTENSIDAD (mm)	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	TOTAL
<5	959	902	970	943	959	795	692	738	777	927	828	885	10375
5 a 10	77	65	74	70	100	123	156	162	149	104	63	74	1217
11 a 20	12	6	5	6	29	93	101	97	62	20	6	2	439
21 a 50	6	1	0	5	10	55	54	50	58	12	2	2	255
51 a 70	0	0	0	2	1	6	8	10	5	0	0	0	32
>70	0	0	0	0	0	4	1	1	2	1	0	0	9
Núm. días	1054	974	1049	1026	1100	1076	1012	1058	1053	1064	899	963	12328

Fuente: elaboración propia con base en SMN-IMTA, 2000; SMN, 2003b.

to por la región sureste, conecta y cruza los valles escalonados con dirección este a oeste, de Maravatío, Acámbaro, Salvatierra, Jaral del Progreso, Salamanca, Irapuato, Pénjamo, La Piedad y La Barca; hasta llegar a la desembocadura del lago de Chapala, en Jalisco (Escolero y Alcocer, 2004). Esta cuenca recibe una precipitación promedio anual de 730 mm y es afectada por fenómenos cíclicos como los ciclones tropicales (Farfán, 2004; Jáuregui, 1995; Mosiño y Morales, 1988).

La región tiene una alta densidad de distritos y unidades de riego, especialmente en El Bajío, donde se concentra el 66% de los distritos de riego de la cuenca Lerma-Chapala (Hansen y Afferden, 2004). Sin embargo, la actividad agrícola ha acelerado la erosión de la tierra, los recursos hídricos subterráneos cerca de los cauces están sobreexplotados, 1 000 hm³ por año, que representa alrededor del 25% de la recarga total de la cuenca, y se ha visto afectada considerablemente la calidad del agua (Aguilar, 1993). Asimismo, el Lerma capta las aguas de desagüe doméstico e industrial provenientes de las grandes ciudades por donde atraviesa, ellas se mezclan con las pluviales; con éstas se riegan las zonas de cultivo (Hansen y Afferden, 2004).

Por su parte, el río La Laja capta el agua de las subcuencas Allende, Celaya y Apaseo, en

las que se encuentra un número elevado de presas y bordos. El 91% de los escurrimientos se registra entre los meses de julio a octubre, el porcentaje de uso de los aprovechamientos agrícolas es 87%, industrial 3%, pecuario 2% y agua potable 8%. Mientras que, la cuenca Lerma-Salamanca incluye las subcuencas de los ríos Turbio-Manuel Doblado, Guanajuato, Turbio-Corralejo, Angulo-Briseñas y Salamanca-Angulo (Fuentes *et al.*, 2005).

Entre los almacenamientos que captan los escurrimientos de las subcuencas mencionadas, los más importantes corresponden a las presas Ignacio Allende y Solís (Tabla 3).

Estas presas tienen la finalidad de controlar las avenidas e inundaciones, como las que afectaron a la ciudad de Celaya, en 1967, 1971 y 1973 (Gobierno del Estado de Guanajuato, 2001).

Las intensas precipitaciones incrementaron el nivel de estas presas. La presa Allende tenía un almacenamiento de 193 hm³, éste no había sido rebasado desde octubre de 1998; el día 17 de septiembre se presentó una avenida y se tuvo que desfogar. El día 22 ocurrió otra tormenta que elevó de nuevo el nivel de la presa, no era necesario desfogarla, pero se hizo. También la presa Solís, que recibió los aportes de los ríos Lerma y Apaseo, así como del arroyo Grande, elevó su almacenamiento hasta 869 hm³, esto

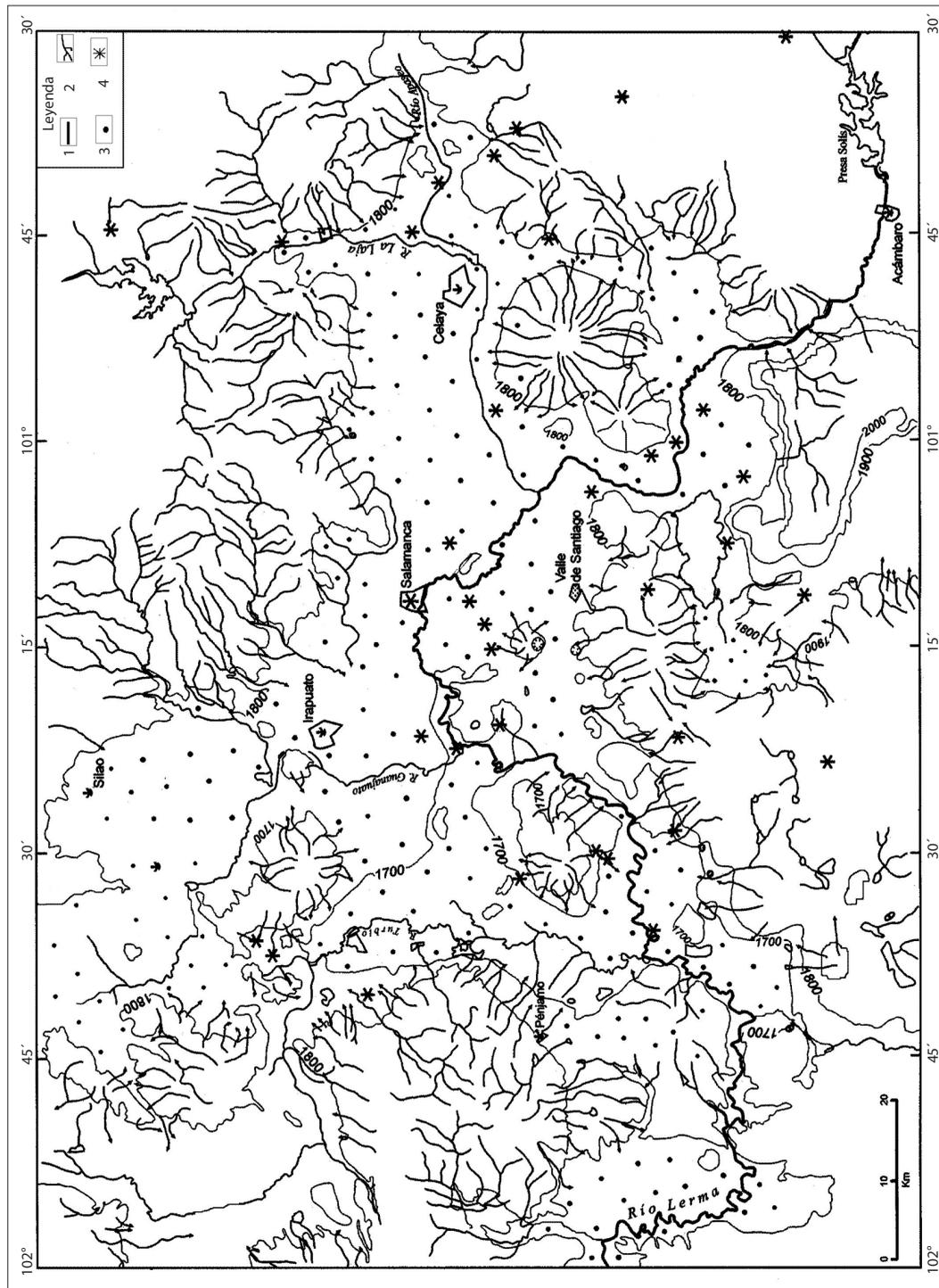


Figura 5. Mapa morfológico de la zona de Guanajuato. 1. Cauce principal del río Lerma, 2. Corrientes fluviales, 3. Planicies de nivel de base y 4. Ciudades inundables (Fuente: elaboración propia).

Tabla 3. Almacenamientos de las principales presas de Guanajuato

PRESA	Capacidad		Almacenamiento															
	millones de m ³		1996		1997		1998		1999		2000		2001		2002		2003	
	NAMO ¹	NAME ²	**abril	***oct	abril	oct	abril	oct	abril	oct	abril	oct	abril	oct	abril	oct	abril	oct
Tepuxtepec*	425	537.5	304	522	217	294	32	525	261	413	242	423	308	421	267	517	385.1	491.1
Solís	800	1217	90	355	195	266	53	705	463	630	480	371	537	721	362	481	369.6	869.9
Laguna de Yuriria	187.9	369.1	25	56.5	28	25	4.5	114	27	69	24	26	0	52	78	126	47.45	237.9
Peñuelitas	23.8	33.5	12	14.3	8.1	5.1	15	22.2	15	3.3	3.1	5.5	3.5	5.9	4.1	24.6	19.6	24.1
I. Allende	150	251.4	13	104	36	53	30	195	85	81	39	69	33	72	77	124	118.6	198.3
La Purísima	110	195.7	48	67.8	32	33	27	56.5	31	29	21	50	38	61	46	62	59.1	111.9
El Palote	9.5	11.5	9	5.1	3.2	2.6	12	9.5	5.5	3.4	1.4	1.8	0.9	9.9	6.3	9.7	6.4	10
<i>Total</i>	<i>1 706</i>	<i>2 616</i>	<i>502</i>	<i>1 124</i>	<i>519</i>	<i>679</i>	<i>173</i>	<i>1 627</i>	<i>886</i>	<i>809</i>	<i>564</i>	<i>516</i>	<i>608</i>	<i>906</i>	<i>563</i>	<i>793</i>	<i>1 005.8</i>	<i>1 943.2</i>

¹ Namó: es el nivel máximo con que puede operar la presa para satisfacer las demandas.

² Name: es el nivel de aguas máximas extraordinarias, nivel más alto que debe alcanzar el agua en el vaso bajo cualquier condición (Aparicio, 2004).

* Se localiza en el estado de Michoacán y aporta volúmenes de agua a Guanajuato.

** Antes de la temporada de lluvias.

*** Después de la temporada de lluvias.

Fuente: CNA, Gerencia del Estado de Guanajuato, Informe meteorológico, 1999 y 2003.

tampoco sucedía desde 1998 (Tabla 3; CNA, 1999). Igualmente se desfogó hasta el día 25. Cabe mencionar que no obstante el adecuado manejo que hizo la Comisión Nacional del Agua del Estado (CNA-E) para evitar avenidas súbitas, varias localidades situadas aguas abajo se inundaron paulatinamente.

Otro aspecto del análisis se relaciona con el comportamiento hidrológico en periodos de lluvia prolongados. Si bien las tormentas intensas (>70 mm) pueden provocar desbordamiento de ríos e inundaciones, con precipitaciones de magnitud muy fuertes (>50 mm) que se acumulen durante 10 a 15 días continuos, pueden generar inundaciones severas (Australian Gov., 2007). Por lo anterior, se seleccionaron los registros de inundaciones importantes en 1973, 1996 y 2003 de la estación climatológica Celaya e hidrométrica Las Adjuntas; con los

datos obtenidos se elaboraron las gráficas correspondientes a la precipitación acumulada y los hidrogramas de dichos eventos (Figuras 6 y 7).

Los resultados muestran que a partir de los umbrales de lluvia acumulada (150 y 250 mm) y de los gastos medios (45 y 200 m³/s), las inundaciones ya son significativas. Por ejemplo, en 1996 el total de lluvia fue de 179 mm y el gasto de 45 m³/s, se podría clasificar como una inundación moderada teniendo en cuenta también el área de cubrimiento y los daños ocasionados. Mientras que, en 1973, los valores alcanzaron los 228 mm y 200 m³/s, respectivamente; los daños fueron mayores, por ello, la avenida es catalogada como severa. En 2003 las lluvias superaron los 340 mm y los gastos más de 180 m³/s, así pues, la inundación se determinó como extraordinaria.

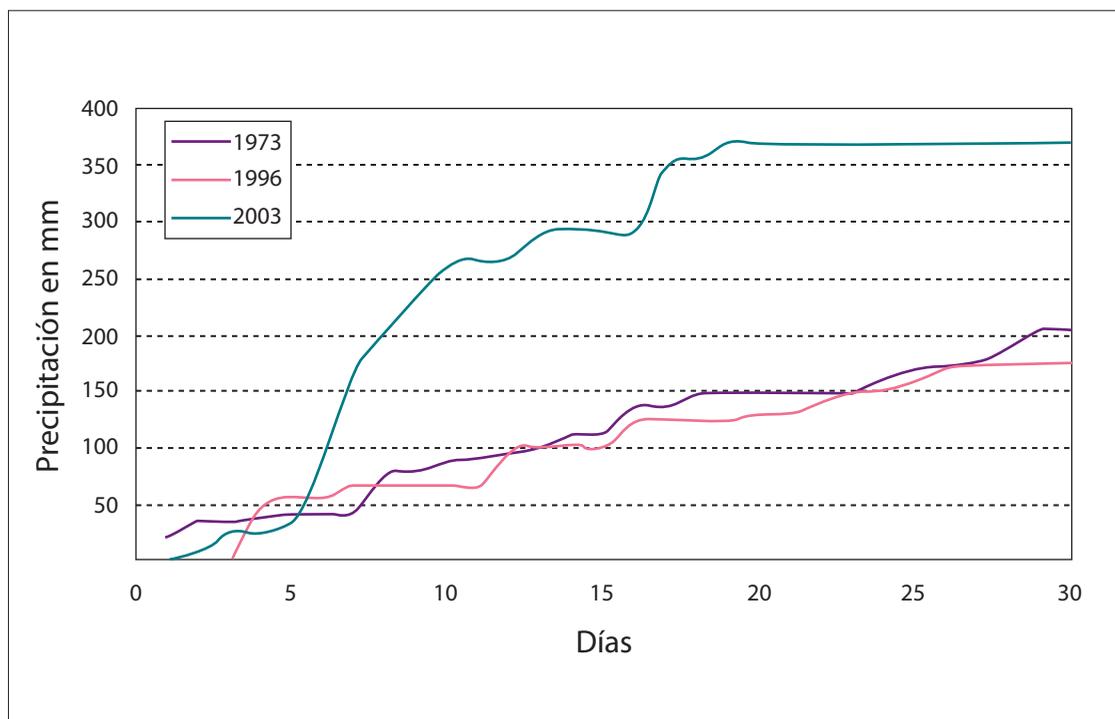


Figura 6. Precipitación acumulada de las inundaciones de 1973, 1996 y 2003.

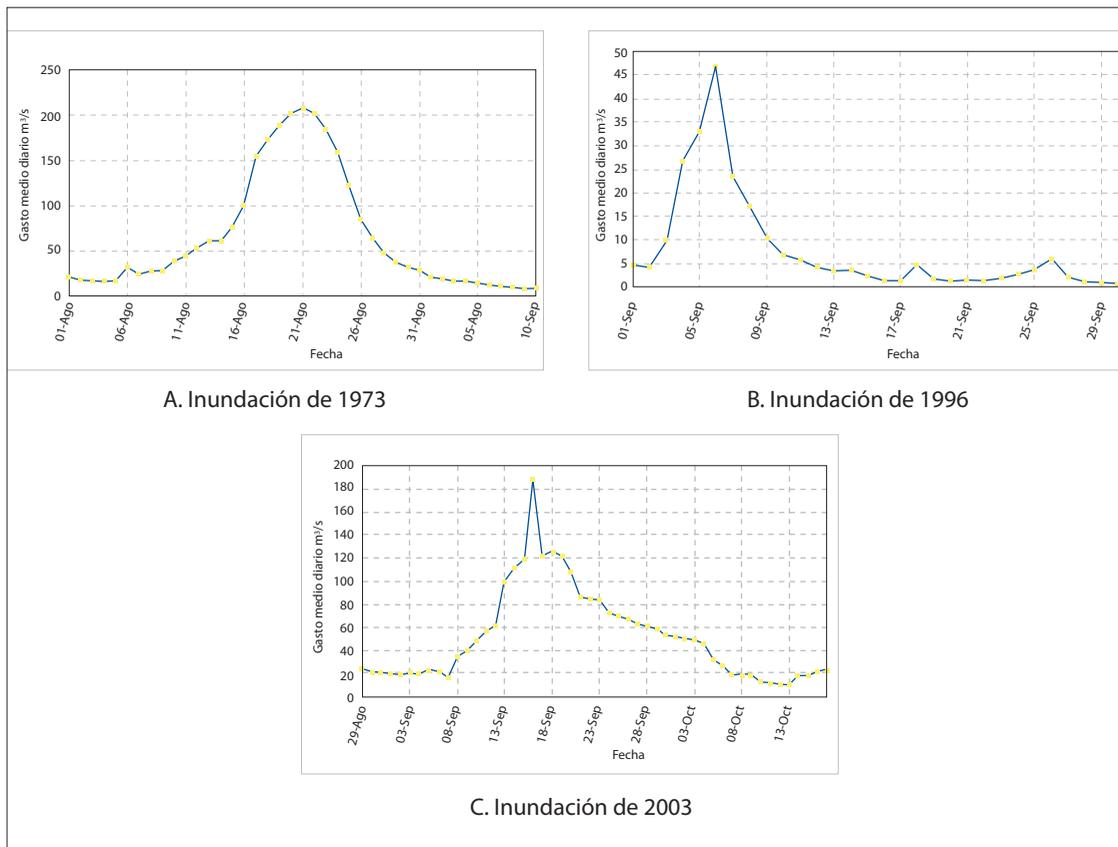


Figura 7. Hidrogramas de la estación Las Adjuntas para diferentes inundaciones.

Como ya se señaló, los cambios de uso de suelo favorecen las inundaciones, al respecto, en la Tabla 4 se aprecian durante las últimas décadas los incrementos en los cultivos, pastizales inducidos y cultivados, selvas y bosques secundarios en un 43%, en decremento de los otros grupos de uso de suelo.

Para complementar el estudio y contribuir en la prevención, se elaboró un mapa con las áreas susceptibles a estos fenómenos (Figura 8). Dichas áreas en general son coincidentes con eventos anteriores. Éstas se relacionan con la red de drenaje natural y artificial, principalmente en las zonas agrícolas y los centros urbanos más afectados en el 2003.

IMPACTO SOCIOECONÓMICO

Las inundaciones se convierten en un problema cuando el hombre invade el curso de los ríos y altera la esencia natural de las llanuras inundables. Obviamente, el interés por estos espacios radica en su potencial económico ya que en general son rentables para cualquier tipo de desarrollo (Wolansky *et al.*, 2003).

Durante las precipitaciones de septiembre, 17 de los 46 municipios de Guanajuato sufrieron daños directos e indirectos. El 37.7% del territorio permaneció inundado durante más de 15 días; sólo hubo seis decesos, aunque los damnificados fueron 18000; 5000 viviendas

Tabla 4. Cambios en el uso de suelo durante 1970 y 2000 en el estado de Guanajuato (área en kilómetros cuadrados)

Tipo de uso de suelo	1970	2000	%
Pastizales naturales	1840.596	1738.030	-5.57 (decremento)
Bosques	1172.450	682.593	-41.8 (decremento)
Bosques secundarios	59.354	772.884	+13.02
Cultivos	780.090	12162.753	+15.59
Matorral	1932.949	1087.388	-43.8 (decremento)
Pastizales inducidos y cultivados	414.820	1267.287	+3.0
Selvas	34.468	407.009	+11.8
Selvas secundarias	1296.340	932.389	-28.1 (decremento)

Fuente: INE, 2001.

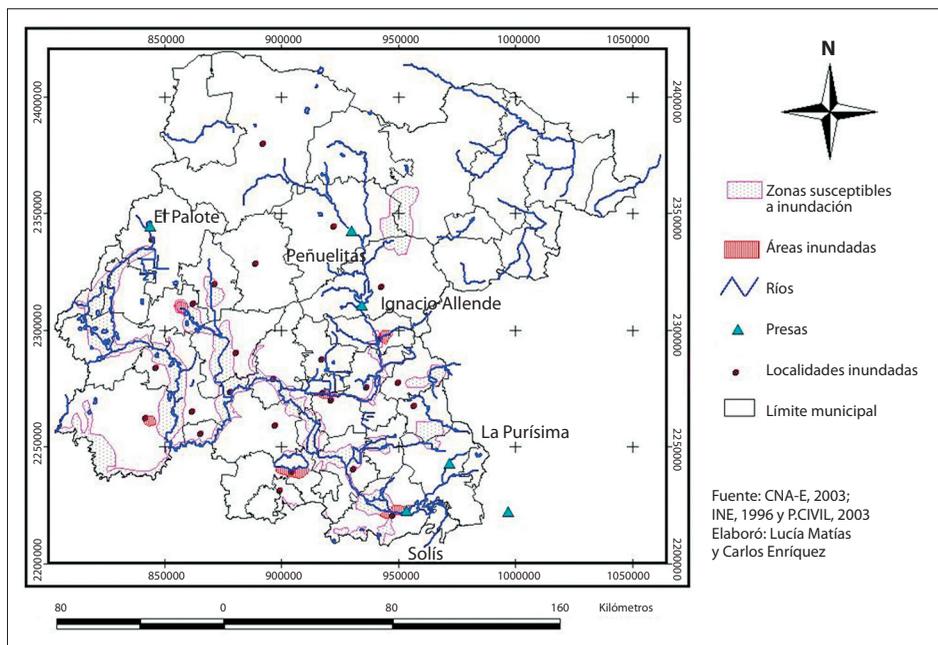


Figura 8. Áreas susceptibles a inundación en Guanajuato.

arruinadas por el agua o por la acumulación de sedimentos, escombros y basura. Del total de daños económicos estimados en 997 millones de pesos equivalentes al 0.5% del Producto Interno Bruto del estado, al sector agropecuario, que fue el más afectado, corresponden más de 600 millones (CENAPRED, 2004).

El municipio de Abasolo, muy susceptible a las inundaciones debido a su configuración fisiográfica y que ya las había presentado en junio del mismo año, fue el más perjudicado, el nivel del agua alcanzó más de 1.50 m de altura. En algunos lugares, dos meses después del evento aún se encontraban encharcamientos de 20 cm de altura. Gran parte de su población permaneció más de cuatro meses en albergues.

En otros municipios como Salamanca, se observó una gran cantidad de árboles sobre el cauce del río Lerma, éstos constituyen obstáculos que facilitan los desbordamientos que invaden las zonas habitacionales e industriales próximas a las márgenes del río (Matías, 2004).

CONCLUSIONES

El análisis de las principales causas que provocaron las inundaciones durante septiembre de 2003, en Guanajuato, muestra que se debieron a lluvias extraordinarias producidas por la interacción de una línea de vaguada, el paso consecutivo de seis ondas tropicales y la presencia de dos ciclones tropicales. Las intensas precipitaciones provocaron el desbordamiento del río Lerma y sus afluentes más importantes, La Laja y Turbio, sobre las planicies aluviales y lacustres del Bajío.

La distribución espacial de la intensidad de la lluvia máxima y acumulada en 14 días muestra los valores más altos (mayores de 90 y 300 mm, respectivamente) hacia el sureste del estado coinciden con las zonas más afectadas por las inundaciones. El periodo de retorno para un fenómeno con estas características resultó de 50 años.

Se identificaron 32 tormentas intensas (superiores a 50 mm) que han producido avenidas significativas en 42 años, sin embargo, la lluvia de 2003 casi se duplicó (98 mm), por ello, las consecuencias socioeconómicas y ambientales fueron muy grandes. Los gastos medios diarios del río Turbio han sido mayores de 200, en 1973, entre 180 y 200 en 2003 y más de 45 m³/seg en 1996, suficientes para generar inundaciones.

Las presas Ignacio Allende y Solís aumentaron su capacidad e incluso sobrepasaron su nivel máximo, fueron desfogadas por la CNA, y debido al manejo adecuado que realizó, se evitaron avenidas extraordinarias y súbitas. No obstante, aguas abajo se presentaron inundaciones retardadas en el tiempo de movimiento.

Por un lado, la morfología del terreno de las planicies de inundación de los ríos Lerma, La Laja, Turbio y sus tributarios; y por otro, los cambios de uso de suelo son factores que contribuyen a la vulnerabilidad de los espacios urbanos, rurales y agrícolas, así como de la infraestructura (carreteras, vías férreas y bordos).

Los impactos más graves fueron en el municipio de Abasolo. También el sector agropecuario presentó daños en una extensa área.

Las inundaciones en Guanajuato son recurrentes, con el fin de proteger a la población es recomendable establecer acciones para evitar daños por avenidas excepcionales y contar con medidas estructurales e institucionales. En las primeras se encuentran la retención, almacenamiento y derivación del agua, a través de las presas; además de modificaciones al cauce de los ríos, construcciones de bordos y muros de encauzamiento. En tanto, las medidas institucionales están en función de la planeación y realización de trabajos con el propósito de disminuir los daños por inundaciones; destacan la elaboración de mapas de peligro, vulnerabilidad y riesgo a nivel municipal. Así como el establecimiento de programas de protección civil y la difusión de medidas preventivas antes

de cada temporada de lluvias, dirigidas a los diversos sectores de la población.

Es fundamental incrementar las redes de estaciones climatológicas e hidrométricas y darle continuidad a los sistemas de monitoreo, pues la carencia de información básica en algunos ríos limita su análisis como el caso de La Laja y Lerma dentro del área en estudio.

AGRADECIMIENTOS

A los ingenieros Octavio Muñoz Torres y Luis Enrique Aguilera Ortega, de la Comisión Nacional del Agua del Estado de Guanajuato y al ingeniero Javier Espinosa Cruickshank, del Servicio Meteorológico Nacional, por la información hidrológica y meteorológica proporcionada. Al arquitecto Luis Antonio Güereca, director estatal de Protección Civil, por el apoyo brindado durante la visita al estado.

REFERENCIAS

Aguilar, G. (1993), *Las regiones agrícolas de Guanajuato*, Universidad de Chapingo, México.

Aparicio, F. (2004), *Fundamentos de hidrología de superficie*, duodécima reimpresión, Limusa, México.

Australian Government (2007), *Heavy Rain and Flooding*. Bureau of Meteorology. {<http://www.bom.gov.au/weather/wa/sevwx/perth/floods.shtml>}, 5 de abril de 2007}.

Bloomfield, K. (1974), "The age and significance of the Tenango Basalt, Central Mexico", *Bulletin of Volcanology*, vol. 37, pp. 586-595.

Bloomfield, K. and S. Valastro (1974). "Late Pleistocene eruptive of Nevado de Toluca Volcano, Central Mexico", *Geological Society of America Bulletin*, vol. 85, pp. 901-906.

Bocco, G. (1983), *Cartografía geomorfológica 1:250 000 en Querétaro-Guanajuato*, tesis de Maestría en Geografía, División de Estudios Superiores, Facultad de Filosofía, UNAM, p. 78.

CENAPRED (2001), *Características del impacto socioeconómico de los principales desastres ocurridos en México en el periodo 1980-99*, Coordinación de Investigación, p. 107.

CENAPRED (2004), *Impacto socioeconómico de los principales desastres ocurridos en la República Mexicana en el año 2003*, Dirección de Investigación, pp. 51-90.

Chazarra A. y E. Gutiérrez (2002), *Descripción de un método de interpolación espacial de variables climatológicas considerando la influencia de parámetros fisiográficos. Aplicación a la precipitación mensual*, Instituto de Meteorología de Valencia, España, pp. 169-176.

CNA (1999), *Diagnóstico a la situación hidráulica del estado de Guanajuato*, Comisión Nacional del Agua, diciembre, pp. 22.

CNA (2003), *Diagnóstico de la región Lerma Santiago Pacífico (Lago de Chapala)*, Comisión Nacional del Agua, {<http://www.redagua-lsp.org.mx>: 10 de noviembre de 2005}.

CNA-SMN (2002), *Normales climatológicas estándar y provisionales 1961-1990* [CD].

CRED (2004), *The OFDA/CRED Internacional Disaster Database Université Catholique de Louvain-Brussels-Belgium* {www.em-dat.net: 15 de marzo de 2005}.

Davis, D. (2003), "Risk analysis in flood", *Damages Reduction Studies. The Coros Experiences*, World Water Congreso, no. 118, p. 306.

Escobar, A. (2004), *Catálogo de desastres agrícolas en México. Tomo II. Siglo XIX (1822-1900)*, Fondo de Cultura Económica, México.

Escolero, O. y J. Alcocer (2004), "Desecación de los lagos cráter del valle de Santiago, Guanajuato", *El agua en México vista desde la academia*, Academia Mexicana de Ciencias, México, pp. 99-115.

Farfán, L. (2004), "Regional observations during the landfall of tropical cyclone Juliette (2001), in Baja California, Mexico", *Monthly Weather Review*, vol. 132, July, pp. 1575-1589.

- Fuentes, Ó., J. Carrillo, A. Ávila, M. Jiménez, J. Mendoza, A. Gerón, A. Ravelo y J. Aragón (2005), *Estudio de aprovechamiento hidráulico y de control de inundaciones de la cuenca del río Lerma*, elaborado para Comisión Nacional del Agua, Gerencia Regional Lerma-Santiago-Pacífico.
- García, E. (1997) "Nuevas técnicas de análisis en la climatología", *Memorias del VII Congreso Nacional de Meteorología*, Universidad de Chapingo, Estado de México, pp. 39-73.
- García, H., R. García, R. Moreno y A. González (2002), "Uso de sensores remotos y SIG para delimitar los cambios del uso del suelo agrícola de 1970 a 1997 en el estado de Guanajuato", *Investigaciones Geográficas*, Boletín, núm. 47, Instituto de Geografía, UNAM, México, pp. 92-112.
- García-Acosta, V., A. Molina y J. M. Pérez (2003), *Catálogo de desastres agrícolas en México. Tomo I Épocas prehispánica y colonial (958-1822)*, Fondo de Cultura Económica, México.
- Garza Salinas, M. A. (1998), "Breve historia de la Protección Civil en México", en *Los desastres en México, una perspectiva multidisciplinaria*. Universidad Iberoamericana-UNAM, México, pp. 247-280.
- Gobierno del Estado de Guanajuato (2001), *Atlas de riesgos del estado de Guanajuato*, Tomo Geológico e Hidrometeorológico, 3ª. ed., México.
- Hansen, A. y M. Afferden (2004), "El Lago de Chapala: destino final del río Lerma", *El agua en México vista desde la academia*, Academia Mexicana de Ciencias, pp. 117-135.
- Hosler, C. (1956), "A study of easterly waves in the Gulf of Mexico", *Bulletin of the American Meteorological Society*, vol. 37, no. 3, March, pp. 107-107.
- INE (2001), *Cambio de uso del suelo y vegetación para el periodo 1976-2000. Cuenca hidrográfica Lerma-Chapala*. México, Dirección General de Investigación en Ordenamiento Ecológico y Conservación de Ecosistemas, México.
- INE-IGg-UNAM (1996), *Mapas de riesgos geológicos y geomorfológicos*, esc. 1:1 000 000 INE (Archivo interno), México.
- IPN (2003), *La gran inundación de Irapuato 1973*, Instituto Politécnico Nacional, México, video.
- Jáuregui, E. (1967), Las ondas del este y los ciclones tropicales en México, *Ingeniería Hidráulica en México*, vol. XXI, núm. 3, pp. 197-208.
- Jáuregui, E. (1995), "Rainfall fluctuations and tropical storm activity in Mexico", *ERDKUNDE*, March, vol. 49, pp. 39-48.
- Jiménez, M. (2000), *Programa Ax: ajuste de funciones de probabilidad*, CENAPRED, México.
- Lagos, P., D. Hansen and A. Herman (1991), "Climatological Atlas of the Subsurface Structure of the Eastern Tropical South Pacific Ocean", NOAA. *Technical Report*, U.S. Department of Commerce, USA.
- La Red (2005), Base de datos DesInventar-México (en construcción) {www.desenredando.org: 5 de marzo de 2005}.
- Matías, L. (2004), "Características de las lluvias torrenciales e inundaciones en el estado de Guanajuato", en la *Serie de impacto socioeconómico de los desastres en México*, núm. 5, CENAPRED, México, pp. 51-75.
- Mosiño, P. y T. Morales (1988), "Los ciclones tropicales, el niño y las lluvias en Tacubaya, D.F.", *Geofísica Internacional*, vol. 27-1, pp. 61-82.
- Ortiz-Pérez, M. A., O. Oropeza, A. Palacio y A. D'Luna (1990), "Mapa inundaciones. Carta V.2.9. Zonas susceptibles a desastres por fenómenos naturales", *Atlas Nacional de México*, tomo II, Instituto de Geografía, UNAM.
- Salas, M. y M. Jiménez (2004), *Inundaciones*, CENAPRED, México.
- Salas, M. y M. Jiménez (2003), "Obtención de mapas de precipitación con duraciones de una y 24 horas y Tr=5 años aplicados en la Protección Civil", *XIII Congreso Nacional de Meteorología*, Los Cabos, BCS, noviembre, México.
- SPP (1980), *Síntesis geográfica del estado de Guanajuato*, Secretaría de Programación y Presupuesto, Coordinación General de los Servicios Nacionales de Estadística, Geografía e Informática, México.

SMN (2003a), *Servicio Meteorológico Nacional*, Archivo interno de precipitación media mensual.

SMN (2003b), *Servicio Meteorológico Nacional*, Archivo interno de precipitación diaria.

SMN-IMTA (2000), *Servicio Meteorológico Nacional e Instituto Mexicano de Tecnología del Agua*. Extractor Rápido de Información Climatológica, ERIC2 [CD].

Wallen, C. (1955), "Some characteristics of precipitation in Mexico", *Geografiska Annaler*, XXXVII, pp. 51-85.

Wolansky, S., H. Corzo, A. Valsagna y N. Morbidoni (2003), "Las inundaciones en Santa Fe", *Desastres naturales y mitigación del riesgo*, vol. 2, Universidad Nacional del Litoral, Santa Fe, Argentina, p. 45.

Zhang, L. and V. P. Singh (2005), "Frequency analysis of flood damage", *Journal Hydrologic Engrg.*, vol. 10, March-April, pp. 100-109.