

Secretario de Gobernación
Esteban Moctezuma Barragán

Subsecretario de Protección Civil y de
Prevención y Readaptación Social
Lic. Humberto Lira Mora

Director General del CENAPRED
Arq. Vicente Pérez Carabias

Jefe del Equipo Japonés en el CENAPRED
Dr. Tatsuo Murota

Coordinador de Investigación del CENAPRED
Dr. Roberto Meli

Coordinador de Difusión del CENAPRED
Lic. Ricardo Cícero Betancourt

Edición a cargo de: Violeta Ramos Radilla y
Javier Lara Espinosa

PUBLICADO POR EL CENTRO NACIONAL DE
PREVENCIÓN DE DESASTRES DE LA
SECRETARÍA DE GOBERNACIÓN

Distribución en México: Coordinación de Enlace
Nacional

Distribución en el Exterior: Coordinación de Asuntos
Internacionales

EL CONTENIDO DE ESTE DOCUMENTO ES
EXCLUSIVA RESPONSABILIDAD DE LOS
AUTORES

Julio - 1994, No. 4

Sistema Nacional de Protección Civil

DIRECTORIO DEL CENAPRED

DIRECCION GENERAL Arq. Vicente Pérez Carabias; COORDINACION DE INVESTIGACION Dr. Roberto Meli; Piralla,
COORDINACION DE CAPACITACION Lic. Glorina Luz Ortiz Espejel; COORDINACION DE DIFUSION Lic. Ricardo Cícero Betancourt,
COORDINACION DE ENLACE NACIONAL Lic. Alberto Ruiz de la Peña, COORDINACION DE ASUNTOS INTERNACIONALES Lic.
Enrique Solórzano Mier; COORDINACION DE PROGRAMAS Y NORMAS Lic. Federico Miguel Vázquez Juárez; COORDINACION
ADMINISTRATIVA C. P. Alfonso Macías Flores

SISTEMA NACIONAL DE PROTECCION CIVIL
CENTRO NACIONAL DE PREVENCION DE DESASTRES

REFLEXIONES SOBRE LAS INUNDACIONES EN MEXICO

Ramón Domínguez Mora
Martín Jiménez Espinosa
Fermín García Jiménez
Marco Antonio Salas Salinas

COORDINACION DE INVESTIGACION
AREA DE RIESGOS HIDROMETEOROLOGICOS

P R E S E N T A C I O N

La Coordinación de Investigación del Centro Nacional de Prevención de Desastres realiza estudios sobre las características de los fenómenos naturales y de las actividades humanas que son fuentes potenciales de desastres, así como sobre las técnicas y medidas que conducen a la reducción de dichos desastres.

Las actividades enfocan la problemática de los Riesgos Geológicos (Sismos y Volcanes), de los Riesgos Hidrometeorológicos (Inundaciones, Huracanes, Sequías, Erosión Costera) y de los Riesgos Químicos (Incendios, Explosiones, Contaminación por Desechos Industriales).

Los resultados de los estudios se publican en Informes Técnicos que se distribuyen a las instituciones y los especialistas relacionados con cada tema específico.

En adición a dichos informes técnicos de carácter muy especializado, el CENAPRED ha emprendido la publicación de esta serie, llamada CUADERNOS DE INVESTIGACION, con el fin de dar a conocer a un público más amplio aquellos estudios que se consideran de interés más general o que contienen información que conviene quede publicada en una edición más formal que la de los Informes Técnicos.

Los Catálogos de Informes Técnicos y de Cuadernos de Investigación, así como las publicaciones específicas pueden obtenerse solicitándolos por escrito a la Coordinación de Investigación del CENAPRED, o pueden consultarse directamente en el unidad de información del Centro.

INDICE

INTRODUCCIÓN	2
1 TIPOS DE INUNDACIÓN	3
1.1 INUNDACIONES PLUVIALES Y FLUVIALES	3
1.2 INUNDACIONES COSTERAS	3
2 MECANISMOS PRODUCTORES DE LA PRECIPITACIÓN	4
3 EVENTOS HISTÓRICOS	6
3.1 DE ORIGEN CICLÓNICO	6
3.2 TORMENTAS DE INVIERNO	11
3.3 TORMENTAS DE VERANO	13
4 MEDICIÓN DE LA PRECIPITACIÓN PLUVIAL	14
5 TRANSFORMACIÓN DE LA LLUVIA EN ESCURRIMIENTO.	15
6 LAS INUNDACIONES	18
7 MEDIDAS DE PROTECCIÓN	21
REFERENCIAS	24

INTRODUCCIÓN

Por su situación geográfica la República Mexicana se ve afectada por lluvias derivadas de diversos fenómenos meteorológicos. En verano, (junio-octubre) el país está sujeto a la acción de ciclones y tormentas tropicales prácticamente en toda su extensión. Durante el invierno, en cambio, es afectado por tormentas de origen extratropical; frentes polares originados en latitudes altas, que viajan hacia el sur y causan también fuertes precipitaciones en todo el país, sobre todo en el norte.

A estos fenómenos se suman los efectos orográficos y las precipitaciones originadas por fenómenos convectivos, los cuales producen tormentas muy intensas aunque de poca duración y extensión.

Esta diversidad de fenómenos meteorológicos produce condiciones extremas de precipitación y de sequía. De acuerdo con la referencia 1, entre 1973 y 1990, el promedio anual de daños por inundaciones se estima en 173,000 millones de pesos de 1990, sin incluir daños no cuantificables como la afectación a las condiciones normales de vida y de producción, así como la muerte de aproximadamente 104 personas por año. Adicionalmente se han producido situaciones que pueden calificarse como catastróficas, como la de la ciudad de La Paz, en 1976 (5 a 10 mil muertes), los daños producidos por el ciclón Gilberto en 1988 en Monterrey (más de 200 muertes) y los del Bajío, en 1976.

1 TIPOS DE INUNDACIÓN

De acuerdo con su origen, las inundaciones se clasifican en: pluviales, fluviales y costeras.

1.1 INUNDACIONES PLUVIALES Y FLUVIALES

Las inundaciones pluviales (causadas directamente por la lluvia) y fluviales (desbordamiento de los ríos), son consecuencia de las precipitaciones que se producen cuando la humedad contenida en los mares, océanos y otros grandes cuerpos de agua, es transportada hacia tierra por el viento; al ascender el vapor de agua y disminuir su temperatura, la humedad se precipita en forma de lluvia, nieve o granizo. El proceso puede originarse por la presencia de huracanes, vientos normales, masas polares o procesos convectivos.

1.2 INUNDACIONES COSTERAS

Las zonas costeras también pueden ser afectadas por las mareas de tormenta, particularmente en el Golfo de México, donde la sobreelevación del nivel medio del mar hace que éste penetre tierra adentro afectando en ocasiones zonas muy amplias. A este fenómeno se suma el del oleaje y juntos causan danos muy importantes, como la socavación de los cimientos en los edificios costeros, el naufragio de las embarcaciones, la demolición y destrucción de instalaciones portuarias, la rotura de las obras de defensa costera y la erosión de las playas y riscos. El efecto del agua no sólo es destructivo al avanzar tierra adentro, sino también en su retirada hacia el mar. Un ejemplo de este tipo de fenómenos y los daños correspondientes, ocurrió recientemente (1988) en las playas de Cancún, Quintana Roo, debido al paso del ciclón Gilberto.

2 MECANISMOS PRODUCTORES DE LA PRECIPITACIÓN

La humedad contenida por la atmósfera sobre los grandes cuerpos de agua es transportada hacia tierra por el viento. Cuando el vapor de agua asciende y disminuye su temperatura por abajo del punto de rocío, inicia la condensación y se produce la precipitación.

De acuerdo con el proceso que da origen a la precipitación, pueden distinguirse lluvias originadas por huracanes, lluvias provocadas por vientos "normales" que transportan humedad del mar hacia las montañas que la obligan a ascender provocando su enfriamiento y precipitación, lluvias derivadas de las masas polares y lluvias convectivas.

Aunque en muchas ocasiones estos mecanismos se combinan, es útil analizar por separado las características de la precipitación correspondiente a cada caso.

Los huracanes transportan grandes cantidades de humedad y ocupan también grandes extensiones. Cuando penetran tierra adentro provocan tormentas de larga duración (del orden de varios días) y extensión (ha habido huracanes como el Beulah y el Gilberto, que antes de penetrar a la costa ocuparon prácticamente todo el Golfo de México (fig. 1). Estos fenómenos pueden provocar inundaciones generalizadas en las principales cuencas de la República, sobre todo en las vertientes del centro y norte del Golfo de México y del Océano Pacífico.

En muchas partes de la República, particularmente en las cuencas que vierten al sur del Golfo de México y del Océano Pacífico, los ciclones no penetran directamente; sin embargo, las corrientes de aire, que transportan flujos importantes de humedad del mar hacia la tierra, al encontrarse con los sistemas montañosos, ascienden y provocan grandes precipitaciones, concentradas en el lado de barlovento de dichos sistemas montañosos. Los mapas de precipitación media anual (fig. 2) muestran que este mecanismo es el causante de las mayores precipitaciones en la República Mexicana.

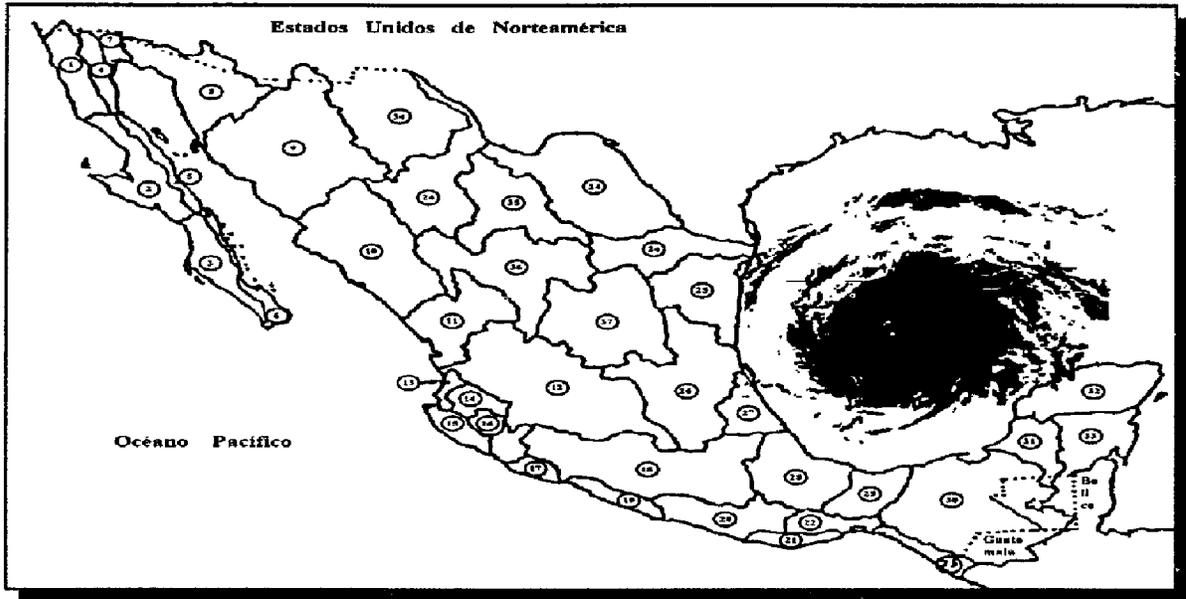


Figura 1. Huracán Gilberto en el año de 1988

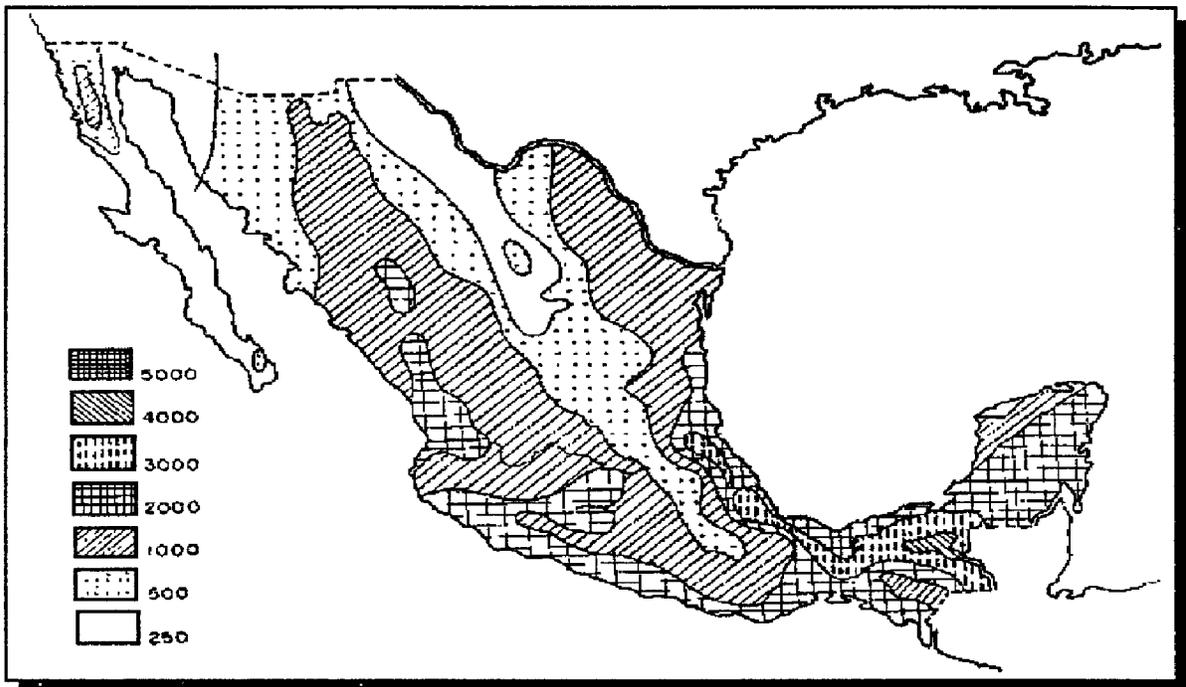


Figura 2: Zonificación de la precipitación media anual

Otro fenómeno causante de precipitaciones importantes en la República, sobre todo en la región noroeste, es el desplazamiento de frentes fríos, que provienen de las zonas polares.

Las grandes avenidas que se han producido, por ejemplo, en los ríos Fuerte y Yaqui, son producto de este tipo de precipitaciones, que además provocan el deshielo de la nieve acumulada en las partes altas de las montañas de esa región.

Finalmente los mecanismos de ascenso de humedad por convección son causantes de precipitaciones de gran intensidad aunque de poca duración y concentradas en áreas muy chicas. A las lluvias de origen convectivo están asociadas las inundaciones en las zonas urbanas situadas en la altiplanicie de la República, particularmente las inundaciones en la Ciudad de México.

3 EVENTOS HISTÓRICOS¹

En seguida se hace un resumen de algunos eventos históricos registrados en la República Mexicana.

3.1 DE ORIGEN CICLÓNICO

1955 Los ciclones Gladys, Hilda y Janet afectaron sobre todo la región hidrológica 26 (Pánuco), ver la figura 1, pero también provocaron gastos de gran importancia en las regiones hidrológicas 25 (Soto la Marina), 27 (Tuxpan) y 37 (El Salado).

A continuación se describe con más detalle la trayectoria y efectos de los ciclones antes mencionados.

¹ La mayoría de los datos que se incluyen en este capítulo están basados en los Boletines Hidrológicos que cubren hasta 1973 en algunos casos y hasta 1979 en otros. Se añaden también algunos eventos ocurridos recientemente (1988-1993).

Ciclón Gladys

Su origen se localizó el primero de septiembre a 100 km al norte de Coatzacoalcos (Veracruz). Siguió una trayectoria general hacia el NW y recurvó el día 5 hacia el poniente penetrando a tierra el día 6 en la zona de Tamiahua (Veracruz). La zona más afectada fue la cuenca sobre el río Tempoal donde el 4 de septiembre en la estación del mismo nombre se registro un gasto de 4,002 m³/s.

Ciclón Hilda

Se inicio el día 12 de septiembre frente a la costa norte de República Dominicana con una trayectoria hacia el poniente. Después cambio su trayectoria y el día 17 de septiembre entra al Golfo de México tocando la península de Yucatán para penetrar a tierra el 19 de septiembre, ligeramente al sur de Tampico. Este ciclón generó sobre el río Tampaón, en la estación Pujal, un gasto de 4,810 m³/s el día 21 de septiembre.

Ciclón Janet

Comenzó a formarse el 22 de septiembre 400 km al este de las islas Barbados, después de seguir una trayectoria muy definida, pasando por Granada, Nicaragua y Honduras, el día 27 tocó tierra en la península de Yucatán, a la altura de Chetumal, continuó su trayecto y penetró al Golfo de México el día 28 para después internarse en la zona montañosa de la sierra Madre Oriental. De los efectos más relevantes que ocasionó este ciclón fue que el vaso de la presa San José, situada 8 km al oeste de la ciudad de San Luis Potosí, sobre el río Santiago, se llenó a su máxima capacidad y la cortina funcionó como vertedor sin reportarse daños en la misma, pero el exceso de agua derramada ocasionó los siguientes daños el día 30 de septiembre.

- Destrucción de una parte de la carretera que va de San Luis Potosí a la presa San José.
- Socavación en la base de las pilas del puente que une a San Luis Potosí con el poblado de Morales.

- Gran parte del escurrimiento entró al centro de San Luis Potosí por la avenida Venustiano Carranza.
- Dañó severamente un puente de la calle de Damián Carmona que conduce a los poblados de Mezquitic y Ahualulco.
- Uno de los lugares más afectados fue el poblado de Soledad Diez Gutiérrez, ya que el desbordamiento del río Santiago ocasionó que fueran destruidas muchas viviendas.

1967 Los ciclones Beulah y Katrina (el primero penetró por el Golfo de México y el segundo por el Pacífico) afectaron sobre todo las regiones hidrológicas 24 (Bravo), 18 (Balsas), 12 (Lerma) y 19 (Costa grande de Guerrero), provocando crecientes muy importantes.

Ciclón Beulah

Se formó el día 8 de septiembre al oriente de las Antillas. Fue hasta el día 18 cuando se localizó en el Golfo de México y para el día 19 recurvió hacia el NW y penetró por la parte SE de Texas. El día 21 volvió a cambiar de dirección, esta vez hacia el SSW, ya dentro de tierra firme. Se disolvió el 23 de septiembre al sur de Tamaulipas. Este ciclón provocó el desbordamiento del río Bravo ocasionando severas inundaciones en las ciudades de Reynosa y Matamoros, así como en otras del lado de los E.U.A.

Ciclón Katrina

Este ciclón se formó el 29 de agosto con características de huracán frente a las costas del estado de Guerrero, donde tomó dirección NW, paralelamente a las costas del país.

Los efectos más relevantes de este ciclón fueron:

- Sobre el río Balsas, en la estación hidrométrica Santo Tomás, el día 23 de septiembre se registró el gasto máximo histórico en la estación ($Q=3,881 \text{ m}^3/\text{s}$).
- Sobre el río Turbio (una ramal del río Lerma), en la estación Las Adjuntas, se registró el 13 de septiembre el gasto máximo histórico de $Q=117 \text{ m}^3/\text{s}$ en el período

1943-1970.

- Sobre el río La Unión se obtuvieron $Q=1,400 \text{ m}^3/\text{s}$ el día 26 de septiembre, el cual es el máximo histórico observado en el período 1961-1974.
- Sobre el río Tecpan se obtuvieron $Q=3,550 \text{ m}^3/\text{s}$ el día 26 de septiembre, el cual es el máximo histórico observado en el período que lleva la estación.

1968 El ciclón Nahomi fue el más devastador que se presentó en el Pacífico este año. Empezó a formarse el 10 de septiembre frente a las costas de Colima (unos 200 km mar adentro), después de un recorrido divagante por el océano entró a tierra cerca de Mazatlán (Sinaloa) el 13 de septiembre, disipándose más tarde en el estado de Durango. Afectó las cuencas de los ríos Presidio, Baluarte y Acaponeta, posteriormente se desplazó tierra adentro hasta la cuenca del río Nazas. En muchas estaciones se registraron los gastos máximos históricos, en algunos casos con valores más altos que el correspondiente a la envolvente mundial y en otros casos sólo fueron superados recientemente durante el huracán Lidia, en 1993.

1976 El huracán Liza (en el Pacífico norte) fue uno de los huracanes que causaron mayor desastre y pérdidas humanas en nuestro país en los últimos 30 años. Otro huracán que se registro este año fue el Madeleine (Pacífico sur), el cual provocó gastos máximos históricos en la cuenca baja del Balsas.

Huracán Liza

Nació al SW de Manzanillo (Colima) el 25 de septiembre, su movimiento siempre fue con componente norte, el primero de octubre, Liza perdió intensidad al toparse con las sierras de la península de Baja California y la sierra Madre Occidental. La zona más afectada fue la boquilla El Cajoncito en La Paz (Baja California). Las lluvias generadas fueron de carácter extraordinario; en el arroyo El Cajoncito la creciente

ocasionó inundaciones y graves daños a la ciudad de La Paz a tal grado que es la inundación en que han ocurrido el mayor número de pérdidas humanas en la República Mexicana.

Huracán Madeleine

Se originó el 28 de septiembre 300 km al SSW de las costas de Tapachula (Chiapas), el día 8 de octubre entró a tierra en los límites de los estados de Michoacán y Guerrero. Las mayores lluvias generadas por este huracán ocurrieron en la desembocadura del río Balsas y en las regiones más altas del macizo montañoso que separa a esa cuenca de la costa de Guerrero, por ejemplo, en la estación hidrométrica La Caimanera sobre el río Balsas, se registró el día 9 de octubre un gasto de 5,422 m³/s, uno de los más grandes que se han registrado en esta estación.

- 1988 En septiembre de este año el huracán Gilberto pasó por nuestro país, causando muchas pérdidas humanas y materiales. Debido a la importancia de este fenómeno, se incluye la siguiente información hidrométrica (ver tabla 1), correspondiente a los estados de Nuevo León y Tamaulipas, tomada de el artículo "Gilberto: ejemplo de huracanes de gran intensidad" en la revista Ingeniería Hidráulica en México, No.1, vol.V, enero 1990.
- 1993 En septiembre, el huracán Gert penetró a tierra por la costa del Golfo de México. Las crecientes registradas en la cuenca del río Pánuco superaron en algunos casos a las observadas en 1955.
- 1993 El huracán Lidia llegó a tierra en septiembre, afectando severamente las costas de Sinaloa. Los mayores daños se presentaron en la ciudad de Mazatlán, que quedó incomunicada por tierra durante varios días y sin abastecimiento regular de agua potable.

Tabla 1: Gastos máximos durante el huracán Gilberto

Estado	Río	Estación	Área (km ²)	Gasto (m ³ /s)		Gasto por unidad de área (m ³ /s- /km ²)	
				Gilberto	Histórico	Gilberto	Histórico
Nuevo León	Sta. Catarina	Puente Zaragoza	1,333	1,900	178	1.43	0.13
Nuevo León	San Juan	Tepehuaje	3,594	5,880	2,302	1.64	0.64
Nuevo León	Pesquería	Los Herrera	20,023	900	1,317	0.04	0.07
Nuevo León	Potosí	Cabezones	1,166	6,900	1,128	5.92	0.97
Nuevo León	Pabillito	Linares S	994	730	472	0.73	0.47
Nuevo León	Camacho	Linares N	428	1,090	1,086	2.55	2.54
Tamaulipas	San Fernando	San Fernando	14,797	4,400	2,258	0.3	0.15

3.2 TORMENTAS DE INVIERNO

Son provocadas por frentes polares y su interacción con otros sistemas de invierno o inclusive remanentes de verano. Generan abundantes y persistentes precipitaciones conocidas en la zona como "equipatas", que han producido las máximas crecientes registradas en estos lugares. Las regiones más afectadas en nuestro país a causa de este fenómeno son las del Pacífico Norte. Algunas de las tormentas de invierno más importantes que han ocurrido en nuestro país son:

1943 Las principales crecientes de este año en la cuenca del río Fuerte (región hidrológica 10) fueron producidas por un período de lluvias invernales sumamente abundante, cuya máxima intensidad se presentó entre los días 7 y 9 de diciembre. Las crecientes de este año fueron catastróficas pues ocasionaron cuantiosos daños y el deterioro de varias estructuras, que hasta esa fecha habían permanecido indemnes en algunos sitios de los ríos principales, como por ejemplo, el puente del ferrocarril sud-Pacífico sobre el río

Fuerte, que fue dañado parcialmente, y la destrucción del poblado de Tamazula. En la estación Huites, sobre el río Fuerte, se presentó el 9 de diciembre un gasto de 14,376 m³/s.

1949 De nuevo en la estación Huites sobre el río Fuerte, el día 13 de enero de este año se presentó un gasto muy alto, 10,000 m³/s, ocasionado por una tormenta tropical. También sobre el río Yaqui en la estación hidrométrica El Águila, se registró el 15 de enero de 1949 un gasto de 5,265 m³/s, el cual es el máximo ocurrido en esta estación durante el período de su funcionamiento.

1960 El frente polar que se presentó este año generó en las estaciones hidrométricas de La Junta y El Novillo I, ambas sobre el río Yaqui, gastos de 1,397 m³/s (11 de enero) y 4,566 m³/s (12 de enero) respectivamente, que son los máximos registrados en dichas estaciones durante el período que llevan trabajando. A causa del mismo fenómeno, el 12 de enero se presentó en el río Fuerte uno de los gastos más grandes registrados (15,000 m³/s) en la estación Huites.

1990 Los últimos días de diciembre de 1990, la interacción de un frente frío muy intenso con una corriente de chorro cuya velocidad se estimó de 220 km/h y un sistema de baja presión provocaron lluvias sin precedente en los estados de Baja California Sur, Sonora, Sinaloa y Chihuahua. En particular en la estación hidrométrica Huites, sobre el río Fuerte se registró un gasto máximo de 11,720 m³/s y escurrieron 2,150 millones de m³ en 5 días.

De acuerdo con la referencia 2, la inundación afectó 33 poblados, teniendo un total de 43,000 personas damnificadas; 60,000 Ha sembradas sufrieron pérdidas estimadas en 90,000 millones de pesos de 1990, la ganadería fue afectada en 31,159 cabezas de ganado, se dañaron 80 km de canales, así como algunas carreteras estatales y puentes.

1992 En enero de 1992 una corriente de chorro de gran intensidad provocó lluvias sin precedente en la cuenca del río Huaynamota, afluente del río Santiago, de tal forma que la obra de desvío de la presa Aguamilpa recibió un gasto pico cercano a los 10,000 m³/s. Dicho gasto superó considerablemente al máximo registrado desde 1942 (6,700 m³/s) y duplica el máximo registrado en época de invierno (4,430 m³/s). Los daños causados fueron menores gracias a la regulación que proporcionó la presa en construcción.

1993 En enero de 1993 se presentaron lluvias extraordinarias en la cuenca de la zona urbana de la ciudad de Tijuana. El desastre provocó la muerte de alrededor de 20 personas, más de 10,000 damnificados, además de daños en las zonas agrícolas y a las vías de comunicación.

Los días 3 al 5 de noviembre de 1993, en la zona de Los Cabos, en Baja California Sur, se registraron precipitaciones que superan al doble de lo que en promedio llueve en un año. Las crecientes inundaron y llenaron de arena varias decenas de casas, dejaron enterrados automóviles y camionetas, además fue dañada en varios puntos la carretera de cuatro carriles que comunica San José del Cabo con Cabo San Lucas.

3.3 TORMENTAS DE VERANO

Las crecientes de los grandes ríos, particularmente en la vertiente del Golfo de México, generalmente se deben a lluvias causadas por vientos normales en la barrera montañosa.

Debe hacerse notar que estos fenómenos ocurren en las zonas más lluviosas del país y se presentan prácticamente todos los años, por lo que no es fácil identificar casos extraordinarios; sin embargo, pueden destacarse las crecientes ocurridas en la cuenca del Papaloapan en 1958, 1969 y 1992 y la que se presentó en el Grijalva en 1963.

4 MEDICIÓN DE LA PRECIPITACIÓN PLUVIAL

El origen principal de las inundaciones es la lluvia, pero antes de que éstas ocurran se da un proceso que transforma la lluvia en escurrimiento. Por eso, las medidas dirigidas a disminuir los riesgos ocasionados por inundaciones se deben basar en una adecuada medición de la precipitación y en el conocimiento preciso de su transformación en escurrimiento.

Para determinar en forma objetiva la cantidad de lluvia que cae en un sitio preestablecido, se utilizan dos instrumentos de medida: el pluviómetro (fig. 3) y el pluviógrafo (fig. 4).

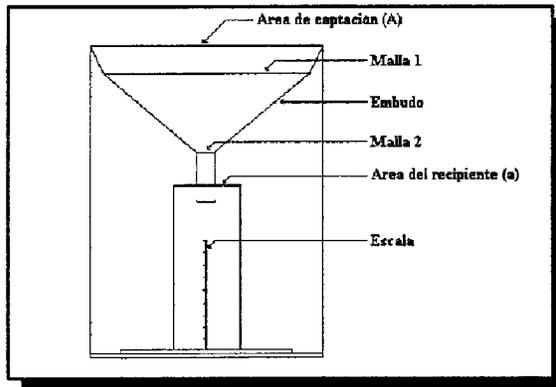


Figura 3: Pluviómetro

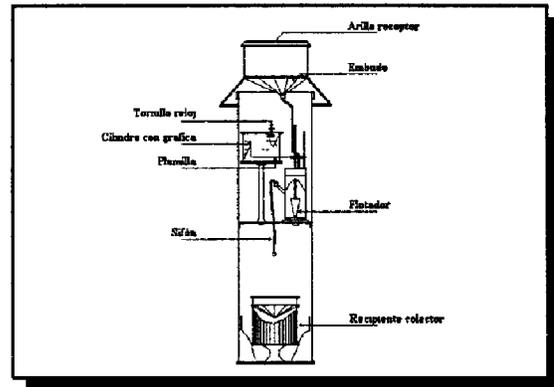


Figura 4: Pluviógrafo de flotador con sifón

El primero es un recipiente graduado en el que se mide el total de la lluvia acumulada cada 24 horas; el segundo, tiene adaptado, además, un reloj que hace girar un cilindro con una hoja de papel en la que se registra, en forma continua, la intensidad de la precipitación.

La precipitación en un determinado lugar, se representa mediante una gráfica a la que se denomina "curva masa", donde se relacionan el tiempo y el agua acumulada durante una tormenta (fig. 5).

Si en el mapa de una región de interés se señalan varios sitios donde se han realizado

medidas, pueden trazarse curvas que unen los lugares con igual precipitación, como se muestra en la figura 6. Estas curvas -llamadas isoyetas- permiten representar la distribución de la lluvia en el espacio.

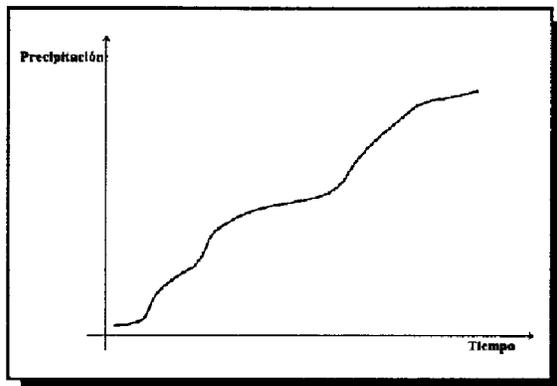


Figura 5: Curva masa

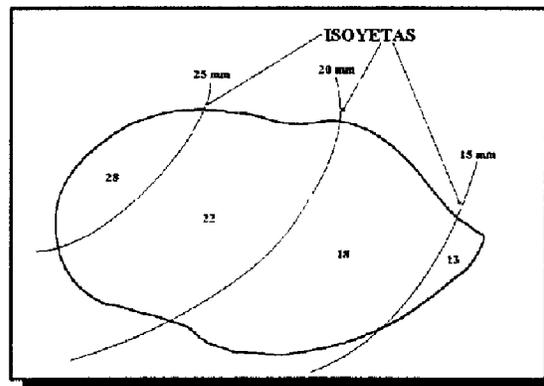


Figura 6. Isoyetas

El registro de cualquier tormenta, debe contener los datos de la precipitación acumulada (curva masa) en todos los puntos de medición, con esto se tiene en primera instancia la distribución temporal de la tormenta, y el plano de isoyetas correspondiente a la duración total de la tormenta, este segundo requisito proporciona la distribución espacial de la misma tormenta. Con estos datos se traza el hietograma de precipitación media en la cuenca.

5 TRANSFORMACIÓN DE LA LLUVIA EN ESCURRIMIENTO

La posibilidad de pronosticar la magnitud y características de una creciente, está íntimamente ligada con el nivel de conocimiento que se tenga del proceso de transformación de la precipitación en escurrimiento y, en consecuencia, conforme mejor se interprete este proceso, se incrementa la eficiencia del diseño y del establecimiento de medidas preventivas para disminuir los daños causados por una inundación.

El proceso (fig. 7 y 8) puede resumirse de la siguiente forma:

Al iniciarse la lluvia una parte de ella moja la vegetación, otra se infiltra en la tierra, y el resto llena las depresiones del terreno, dejando un escurrimiento prácticamente nulo. Una vez que la cantidad de agua supera las posibilidades de almacenamiento en las depresiones del terreno, se inicia el escurrimiento (Q_1) por los cauces de pequeños arroyos, aunque una parte continúa alimentando el proceso de infiltración.

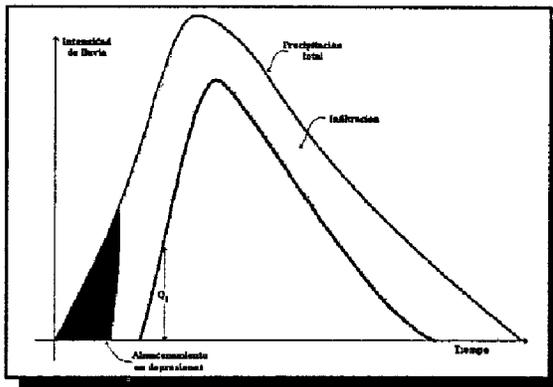


Figura 7: Distribución en el tiempo de la lluvia y las infiltraciones

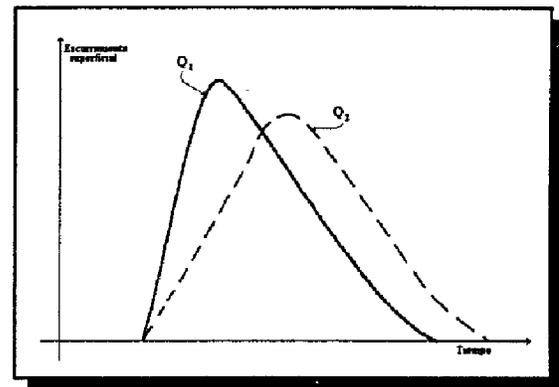


Figura 8: Regulación de la avenida

La lluvia que escurre superficialmente, denominada lluvia efectiva, pasa por un proceso de regulación a través del almacenamiento temporal en arroyos y de retraso en el tiempo de salida del agua de la cuenca (hidrograma Q_2 , en la figura 8), posteriormente escurre por el cauce o lecho del río, sufriendo nuevamente un proceso de regulación y retraso que depende de las características de cada lecho o cauce.

Por otra parte, las condiciones de la cuenca cambian de una época del año a otra; así, por ejemplo, la humedad del suelo y la cubierta vegetal pueden transformarse radicalmente del verano al invierno; sin embargo, los cambios más importantes son los derivados de la actividad humana: la disminución de la permeabilidad debida a la urbanización, desforestación y modificaciones del uso del suelo, traen generalmente un aumento considerable en el volumen del escurrimiento y la velocidad con que se presenta su valor máximo (fig. 9).

Para modelar correctamente el proceso descrito, es necesario considerar que tanto las características de la precipitación como las de la superficie del terreno, varían de un punto a otro de la cuenca. En consecuencia, lo que realmente ocurre es el resultado de la superposición de muchos factores del área en estudio.

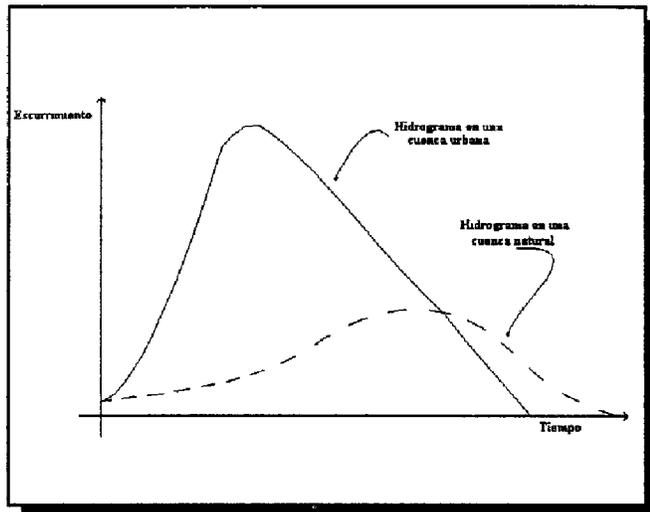


Figura 9: Regulación de una avenida en cuenca urbana y natural

Con el objeto de incrementar la confiabilidad en los modelos de estos procesos y predecir mejor sus resultados, los hidrólogos han trabajado en el desarrollo de estudios que permiten determinar:

- a) Los sitios en que se presentarán grandes tormentas y los modelos que describen la distribución temporal y espacial de las precipitaciones correspondientes (Modelos de lluvias).
- b) La magnitud de la creciente a la salida de la cuenca, cuando se conocen las características de la misma y la distribución temporal y espacial de la precipitación (Modelos lluvia-escurrimiento).
- c) El comportamiento de las avenidas durante su tránsito por los cauces principales (Tránsito de avenidas en cauces).

Dadas las características tan variables de los fenómenos productores de la lluvia, y las dificultades para el conocimiento preciso de lo que ocurre con ésta en cada punto de la cuenca, los modelos deben complementarse con aplicaciones del cálculo de probabilidades, que permitan estimar la ocurrencia de fenómenos de determinada magnitud y tomar en cuenta el grado de conocimiento de los mecanismos de transformación de la precipitación en escurrimiento.

6 LAS INUNDACIONES

Puede decirse que una inundación se produce cuando el gasto de las avenidas generadas en una cuenca supera la capacidad del cauce. Cuando esto sucede, el exceso de agua escurre fuera de su cauce, sin control, hacia las partes bajas.

Las inundaciones ocurren prácticamente en todo el territorio nacional, pero para su análisis es conveniente clasificarlas de acuerdo con su origen y las características de la zona afectada, en los siguientes grupos:

1. Inundaciones que se producen cuando el gasto de una creciente es tal que el nivel del agua supera, en alguna sección del cauce, el nivel de las márgenes del río (fig. 10) en alguno de los grandes ríos de la República: Usumacinta, Grijalva, Coatzacoalcos, Papaloapan, Pánuco, Bravo, Colorado, los del Pacífico Norte (del Yaqui al Culiacán), del Pacífico Sur (del Papagayo al Tehuantepec), el Balsas, el Lerma-Santiago y el Nazas.

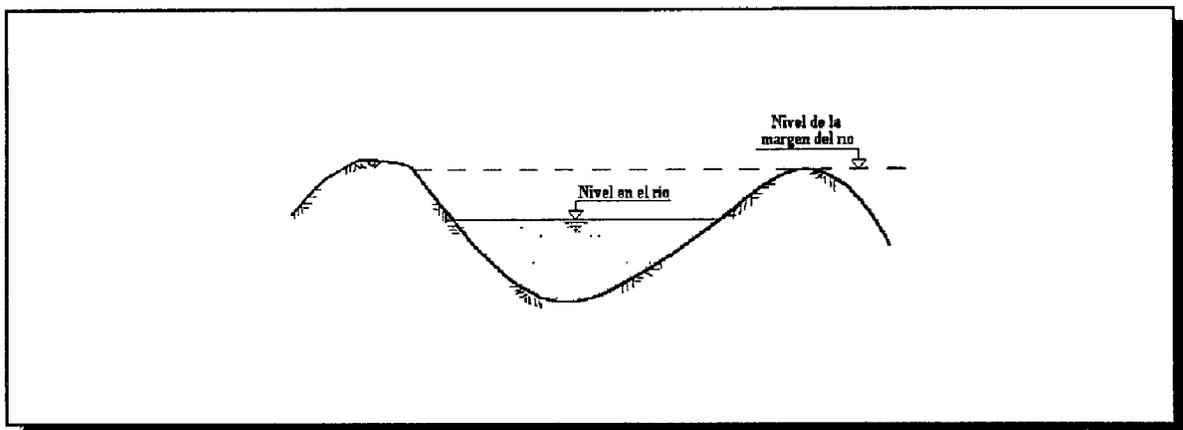


Figura 10: Nivel de las márgenes de un río

2. Inundaciones derivadas de la insuficiencia de las obras construidas para el almacenamiento y control de las avenidas.

3. Inundaciones en zonas urbanas.

En México, prácticamente cada año, se producen inundaciones derivadas del desbordamiento de los grandes ríos. Algunos ejemplos extremos son los desbordamientos del Grijalva en 1963 y 1973; los del Papaloapan en 1944, 1958, 1969 y 1989; los del Pánuco en 1955, los del bajo Bravo en 1967 y 1989; los de los ríos del Noroeste en 1943, 1949 y 1960; los del Pacífico Centro en 1958 y 1959; el Santiago en 1973 y 1992, el Balsas en 1967, 1976 y 1984; ..., etc.

Debido a que en zonas semidesérticas, las inundaciones son menos frecuentes suelen olvidarse, de manera que cuando ocurren, los problemas que causan son mayores, como ocurrió por ejemplo en La Paz (1976), y en Monterrey (1988).

Las inundaciones en las cuencas que han sido urbanizadas y los daños que éstas producen son cada vez mayores debido a que, por un lado, las modificaciones del terreno producen crecientes varias veces mayores que las de la cuenca natural y, por otro, afectan bienes de alto valor económico.

En cuanto a las inundaciones derivadas de la insuficiencia de las obras de almacenamiento y control, afortunadamente, éstas han sido poco frecuentes. Se pueden destacar las inundaciones del año de 1976 en la ciudad de la Paz, mencionada líneas arriba, originadas por la falla de un bordo de protección y las ocurridas en el Bajío en el mismo año, por el desbordamiento de una serie de pequeñas represas. En estos problemas debe tenerse especial cuidado debido a que pueden generar daños de mucha consideración

Es particularmente importante evitar el desbordamiento de las presas, ya que en caso de ocurrir, provocaría su propia destrucción en pocas horas y el volumen de agua almacenado sería descargado súbitamente, superando la capacidad del cauce.

Para entender el problema, considérese el caso de la presa El Infiernillo, situada en el río Balsas. En 1967 ingresó a la presa una avenida con un gasto máximo del orden de 20,000 m³/s (uno de los mayores que se ha registrado en la República Mexicana). Gracias a la capacidad de almacenamiento de la presa, la avenida pudo regularse para descargar un gasto máximo del orden de 6,500 m³/s, que solamente causó daños menores aguas abajo, en la presa La Villita y el delta del Balsas; sin embargo, si la capacidad de la presa El Infiernillo no hubiera sido suficiente el agua habría pasado sobre su corona, destruyendo la cortina de la presa y el volumen almacenado se derramaría súbitamente, formando una avenida de mucho mayor magnitud que la de ingreso, que no podría ser controlada por la presa La Villita e inundaría totalmente las poblaciones y la zona industrial ubicadas en el delta del Balsas.

Es importante tomar en cuenta que las fallas pueden ocurrir no solamente por la insuficiencia de la obra desde el punto de vista hidrológico, sino también por deficiencias en el diseño hidráulico de la obra.

Algunas ideas importantes para plantear las necesidades y formas de estudio de los fenómenos relacionados con las inundaciones se pueden resumir como sigue:

1. En la mayoría de los casos no es posible diseñar obras que anulen totalmente el riesgo. En otras palabras, las obras hidráulicas y en general, las medidas para el control de inundaciones, deben diseñarse conciliando el objetivo de disminuir los daños causados por las inundaciones con los costos de las inversiones necesarias para ello.

2. Hay que mantener una vigilancia continua, especialmente en las zonas semidesérticas, ya que la falta de ocurrencia de avenidas importantes durante varios años, no garantiza que en el futuro dejen de presentarse.

3. Cuando las obras de infraestructura están mal diseñadas o carecen del adecuado mantenimiento, pueden producirse daños más graves que si la obra no existiera.

7 MEDIDAS DE PROTECCIÓN

Para mitigar los daños causados por las inundaciones, es posible desarrollar una serie de medidas de protección; dichas medidas pueden clasificarse en estructurales y no estructurales o institucionales. En general es conveniente el uso conjunto de ambos tipos de medidas.

Las medidas estructurales están constituidas por cualquier obra hidráulica destinada al control de inundaciones. De acuerdo con su función puede dividirse en:

- a) Obras de regulación. Son fundamentalmente las presas, que permiten almacenar temporalmente las avenidas para después descargarlas en forma controlada.
- b) Obras cuya función es facilitar el transporte rápido del agua, disminuyendo el tirante de agua en ríos y canales para evitar que se desborden. Algunas de ellas son la rectificación de cauces, el corte de meandros y en general los conductos de drenaje construidos artificialmente.
- c) Bordos de protección. Su función es confinar el agua dentro del cauce del río o bien evitar que la inundación alcance poblaciones o zonas de gran importancia económica.

El objetivo de las medidas no estructurales o institucionales más que evitar las inundaciones es disminuir los daños que causan. Pueden clasificarse en:

- a) Medidas de operación. Se utilizan cuando se presenta un fenómeno meteorológico que puede causar una inundación. Se instrumentan de acuerdo con los pronósticos y, por ello, su efectividad depende de la precisión de dichos pronósticos. Las principales medidas de este tipo son: la difusión de boletines de alerta, la operación de la infraestructura hidráulica y la evacuación de personas y bienes afectables.

b) Medidas permanentes. Están constituidas básicamente por la reglamentación y control del uso del suelo, con el propósito de evitar que los bienes de mayor valor económico o social se ubiquen en zonas sujetas a riesgo de inundación. Así, en algunos países (ref. 3) se han establecido restricciones en el uso del suelo como la que se muestra esquemáticamente en la figura 11.

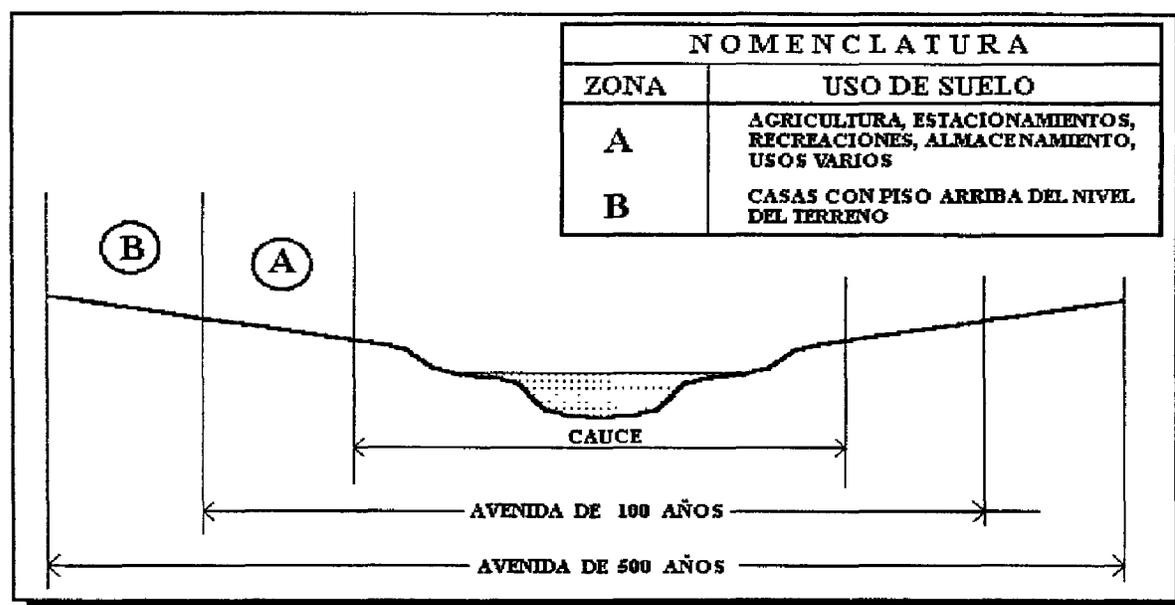


Figura 11: Zonificación de planicies inundables

Sin embargo, si se analizan las causas de las principales catástrofes provocadas por las crecientes en los últimos años y se reflexiona con respecto a las tendencias actuales del desarrollo de la urbanización, sobre todo en ciudades de rápido crecimiento, es posible que este tipo de reglamentación no sea suficiente.

El caso de la inundación de la zona residencial de Atlamaya, en la cuenca del río Tequilasco, en el Distrito Federal, en 1992, y el de las inundaciones en la ciudad de Tijuana, a principios de 1993, muestran que el desarrollo urbano que invade las barrancas y en general las zonas montañosas no sólo causa daños por inundación en estas zonas, sino que afecta muy

severamente las áreas situadas al pie de las montañas, que habían sido urbanizadas previamente.

Para entender estos problemas es necesario pensar en que cualquier modificación a las condiciones naturales del suelo afecta no sólo a la zona modificada, sino que repercute inclusive en forma más grave, hacia aguas abajo. En el caso de las zonas urbanas situadas al pie de las montañas el problema se concentra debido a que en ellas la pendiente de los cauces disminuye bruscamente y, por lo tanto, disminuye la capacidad de conducción de los cauces.

También hay que hacer notar que el problema no es únicamente derivado de la extensión de la zona urbanizada hacia las montañas sino que, por la desforestación de estas zonas, las crecientes que en condiciones naturales conducían fundamentalmente agua, al escurrir por montañas desforestadas, están formadas por una mezcla de agua con las partículas del terreno erosionado.

Otro fenómeno que se da cada vez con mayor frecuencia es la ocupación de los cauces o las zonas de planicie inundable aguas abajo de las presas de almacenamiento. Este fenómeno, derivado de una percepción exagerada de seguridad e impulsado por la demanda creciente de suelos aptos para el cultivo, provoca restricciones en las políticas de operación de las presas, de tal forma que en un intento por proteger a la población asentada en estas zonas, no se cumple cabalmente con los objetivos para los que la presa fue diseñada y, a fin de cuentas, aunque los gastos máximos de descarga disminuyan, los daños provocados por estas descargas pueden incrementarse.

Los dos tipos de problemas tiene en común que las alteraciones en el uso del suelo en un sitio determinado provocan conflictos no sólo en este sitio sino también aguas abajo (en el caso de la urbanización o la desforestación de las laderas de las montañas) o aguas arriba (en el caso de la ocupación de los cauces aguas abajo de una presa).

En resumen, parece indispensable reglamentar y establecer controles efectivos en el uso de suelo, sin los cuales, debido a la presión derivada de condiciones económicas, sociales y políticas, los problemas se irán agravando hasta que tengamos que lamentar desastres de grandes proporciones.

REFERENCIAS

1. CNA, "Programa nacional para el control de avenidas y la prevención de daños por inundaciones", Subdirección General de Administración del Agua, noviembre, 1990.
2. Sancho y Cervera, J. y Acosta Godínez A., "Avenidas del río Fuerte, Sin. del 28 de diciembre de 1990 al 2 de enero de 1991", Revista Ingeniería, Facultad de Ingeniería, UNAM., México, septiembre, 1991.
3. Berga C., Luis, "La problemática de las inundaciones y los sistemas de alarma y previsión de avenidas", Sistemas de Previsión y Alarma, Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, Madrid, España, 1987.

TITULOS PUBLICADOS

BASES DE DATOS PARA LA ESTIMACION DE RIESGO SISMICO EN LA CIUDAD DE MEXICO; Coordinación de Investigación; Area de Riesgos Geológicos; M. Ordaz, R. Meli, C. Montoya-Dulché, L. Sánchez y L.E. Pérez-Rocha.

TRANSPORTE, DESTINO Y TOXICIDAD DE CONSTITUYENTES QUE HACEN PELIGROSO A UN RESIDUO; Coordinación de Investigación; Area de Riesgos Químicos; Ma. E. Arcos, J. Becerril, M. Espíndola, G. Fernández y Ma. E. Navarrete.

PROCESOS FISICOQUIMICOS PARA ESTABILIZACION DE RESIDUOS PELIGROSOS; Coordinación de Investigación; Area de Riesgos Químicos; M. Y. Espíndola y G. Fernández.

REFLEXIONES SOBRE LAS INUNDACIONES EN MEXICO; Coordinación de Investigación; Area de Riesgos Hidrometeorológicos; R. Domínguez, M. Jiménez, F. García y M.A. Salas.

MODELO LLUVIA-ESCURRIMIENTO; Coordinación de Investigación; Area de Riesgos Hidrometeorológicos; R. Domínguez, M. Jiménez, F. García y M.A. Salas

REPORT ON THE JANUARY 17, 1994 NORTHRIDGE EARTHQUAKE. SEISMOLOGICAL AND ENGINEERING ASPECTS; Coordinación de Investigación; Areas de Riesgos Geológicos y de Ensayes Sísmicos; T. Mikumo, C. Gutiérrez, K. Kikuchi, S. M. Alcocer y T. A. Sánchez.

APPLICATION OF FEM (FINITE ELEMENT METHOD) TO RC (REINFORCED CONCRETE) STRUCTURES; Coordinación de Investigación; Area de Ensayes Sísmicos, H. Noguchi.

DEVELOPMENT OF ADVANCED REINFORCED CONCRETE BUILDINGS USING HIGH-STRENGTH CONCRETE AND REINFORCEMENT -NEW CONSTRUCTION TECHNOLOGY IN JAPAN-; Coordinación de Investigación; Area de Ensayes Sísmicos; S. Otani.

A STUDY ON NONLINEAR FINITE ELEMENT ANALYSIS OF CONFINED MASONRY WALLS; Coordinación de Investigación; Area de Ensayes Sísmicos; K. Ishibashi; H. Kastumata; K. Naganuma; M. Ohkubo.

SEGURIDAD SISMICA DE LA VIVIENDA ECONOMICA; Coordinación de Investigación; Area de Ensayes Sísmicos; R. Meli; S.M. Alcocer; L.A. Díaz Infante; T.A. Sánchez; L.E. Flores; R. Vázquez del Mercado; R.R. Díaz.

DETERMINISTIC INVERSE APPROACHES FOR NEAR-SOURCE HIGH-FREQUENCY STRONG MOTION, Coordinación de Investigación; Area de Riesgos Geológicos; M. Iida.

SISMICIDAD Y MOVIMIENTOS FUERTES EN MEXICO: UNA VISION ACTUAL; Coordinación de Investigación; Area de Riesgos Geológicos; S. K. Singh, M. Ordaz.

JAPANESE PRESS DESIGN GUIDELINES FOR REINFORCED CONCRETE BUILDINGS; Coordinación de Investigación; Area de Ensayes Sísmicos, S. Otani.

COMENTARIOS SOBRE LAS NORMAS INDUSTRIALES JAPONESAS DE LA CALIDAD DE AGREGADOS PARA EL CONCRETO; Coordinación de Investigación; Area de Ensayes Sísmicos; M. Saito, H. Kitajima, K. Suzuki, S. M. Alcocer.

COMENTARIOS SOBRE LAS NORMAS INDUSTRIALES JAPONESAS DE LA CALIDAD DEL CONCRETO; Coordinación de Investigación; Area de Ensayes Sísmicos; M. Saito, H. Kitajima, K. Suzuki, S. M. Alcocer.

NORMAS DE DISEÑO PARA ESTRUCTURAS DE MAMPOSTERIA DEL INSTITUTO DE ARQUITECTURA DEL JAPON; Coordinación de Investigación; Area de Ensayes Sísmicos; K. Yoshimura, K. Kikuchi, T. A. Sánchez.

RED DE OBSERVACION SISMICA DEL CENAPRED, REGISTROS ACELEROGRAFICOS OBTENIDOS DURANTE 1993, Coordinación de Investigación; Area de Instrumentación Sísmica, B. López, R. Quaas, S. Medina, E. Guevara, R. González.