

Cálculo de daños económicos potenciales por inundación en
zonas habitacionales: un estudio de caso en el curso alto
del Río Lerma, Estado de México

José Emilio Baró, Georgina Calderón, Carlos Díaz-Delgado y
María Vicenta Esteller

Resumen Abstract

En el presente estudio, se presenta una metodología estándar para cuantificar los daños económicos tangibles directos e indirectos provocados por inundaciones en zonas habitacionales. Se presenta un caso de estudio en la subcuenca del Río Tejalpa, localizada en el Curso Alto del Río Lerma (Estado de México). Para cada una de estas áreas inundables se aplicó la ecuación de la curva de altura de lámina de agua-daños y se estimaron los daños directos que provocaría una inundación con un caudal determinado. Los daños indirectos se estimaron como un porcentaje de los directos.

This work proposes a standardized methodology to quantify the direct and indirect tangible economic damage caused by floods in residential areas. The case studied is the basin of the River Tejalpa located in the upper reaches of the River Lerma (Mexico State). For each of the areas susceptible to flooding, the equation based on the curve of the water level versus damage was applied, and the direct loss was calculated for a specific volume of flooding. A percentage of the direct tangible loss was estimated in order to calculate the indirect tangible loss.

Palabras clave: Key words:

inundaciones, curvas altura de lámina de agua-daños, estimación de pérdidas económicas, México

Floods, depth-damage curves, estimated economic loss, Mexico

Introducción

Se considera una inundación, al flujo o a la invasión de agua por exceso de escurrimientos superficiales o por la acumulación de éstos en terrenos planos, ocasionada por la falta o insuficiencia de drenaje, tanto natural como artificial. En general, la magnitud de una inundación, provocada por eventos de origen hidrometeorológico, depende de la intensidad de la lluvia, de su distribución en el espacio y tiempo, del tamaño de las cuencas hidrológicas afectadas, así como de las características del suelo y del drenaje natural y artificial de las cuencas (Bremer y Lara, 2001).

Como estas inundaciones se producen frecuentemente en las zonas llanas, donde se dan los mayores asentamientos humanos, fácilmente se puede deducir que éstas provocan importantes daños humanos y socioeconómicos, además de los de naturaleza ambiental.

En el caso de México, hay que tener en cuenta que cada año llegan al país un promedio de 30 huracanes, de este total, cuatro o cinco suelen penetrar y causar graves daños. Por otro lado, las lluvias intensas y las consecuentes inundaciones y deslaves se presentan también de forma independiente a la temporada de ciclones y son resultado de las tormentas generadas en la época de lluvias. Los daños de estos fenómenos hidrometeorológicos representan en promedio 4,500 millones de pesos anuales (CNA, 2001).

En la decisión de qué tipo de acciones de protección hay que tomar frente a una inundación, no sólo se deben tener en cuenta cuestiones técnicas, sino también sociales y económicas. Un punto importante es saber si el costo de cierta medida de protección puede superar los daños que se producen por una inundación.

Para saber cuál es el daño económico potencial que provoca una inundación se puede hacer uso de las curvas de daños (Renyi y Nan, 2002; Lekuthai y Vongvisessomajai, 2001; Boyle y otros, 1998), en las cuales para diferentes alturas de lámina de agua se presentan los daños económicos originados por la inundación. De este modo, para una inundación hipotética de cierta altura de lámina de agua se podrá saber cuál es el daño económico que se puede producir. También se puede incorporar el factor duración de la crecida, ya que a una mayor duración se suelen producir más daños económicos.

Este costo económico de la inundación se puede comparar entonces con diversas medidas de prevención de forma que se puede efectuar un análisis económico de cuál es la medida más favorable, de forma que con un mínimo costo se obtenga una mayor disminución de los daños por inundación.

La metodología, anteriormente expuesta, se está poniendo en práctica en diversas partes del mundo por lo que el presente trabajo tiene como objetivo general elaborar una propuesta metodológica aplicable a la República Mexicana, para la construcción de curvas de daños económicos potenciales por inundación en zonas habitacionales, ya que no se cuenta con ella. Esta metodología será validada en el caso de la Subcuenca del Río Tejalpa, subcuenca perteneciente al Río Lerma (Estado de México), en la cual se han producido inundaciones en diferentes años y en donde además existen estudios previos que han permitido obtener un modelo lluvia-escurrimiento con el cual se pueden predecir inundaciones para diferentes caudales (Díaz-Delgado y Vega, 2001) .

Esta metodología, además, tiene un carácter preventivo ya que estos análisis socioeconómicos se deben realizar antes de que ocurra una inundación. La aplicación de esta metodología proporcionará una estimación de la magnitud de las afectaciones en términos económicos; y con base en los resultados obtenidos, se podrían establecer las medidas estructurales y/o no estructurales pertinentes de forma tal que expresen un balance de costo/beneficio rentable y racional. Por otro lado, podría ser una herramienta para la planificación del territorio ya que permitiría abordar un mejor uso del suelo.

Las medidas estructurales, tal como se definen, implican, generalmente, la construcción de obras, y dado que han sido las tradicionalmente utilizadas, y por ello son mucho más conocidas, a continuación se hace una simple enumeración (Estrela, 1996):

a) Medidas que reducen los caudales pico:

- Embalses de laminación.
- Establecimiento de zonas de almacenamiento controladas.
- Cauces de emergencia y trasvases.
- Conservación de suelos y reforestación.

b) Medidas que reducen los niveles de inundación para un umbral de caudal dado:

- Encauzamiento.
- Reducción de remansos procedentes de aguas abajo.
- Protección y limpieza de cauces.
- Corrección de cauces.

c) Medidas que reducen la duración de la inundación:

- Obras de drenaje.

d) Medidas que modifican la susceptibilidad al daño en las estructuras existentes:

- Instalación de cierres temporales o permanentes en aperturas de estructuras o edificaciones y uso de materiales resistentes al agua en estructuras nuevas o ya existentes.
- Relocalización de estructuras y sus contenidos fuera de un área susceptible de daños por inundación.
- Construcción de las estructuras nuevas sobre columnas o terraplenes.
- Centrales de bombeo, sistema indispensable para extraer las aguas de lluvia que se acumulan dentro de los recintos cerrados (polders) de protección de las ciudades y drenarlas hacia el curso fluvial donde el nivel del agua es superior al nivel interior del recinto.
- Entre las medidas no estructurales se tienen aquellas que gestionan el futuro desarrollo de la zona inundable (Estrela, 1996; Lopardo y Seoane, 2000):
- Regulación de la llanura de inundación por ordenanzas de zonificación y usos del suelo.
- Relocalización o protección de las propiedades de valor dentro de una estructura ya existente.
- Normas de construcción en la cuenca para evitar un aumento de la vulnerabilidad ante crecidas.
- Seguro frente a inundaciones.
- Educación ambiental de la población que habita en zonas expuestas a las inundaciones.

Además, se tienen las medidas que dan una respuesta a las inundaciones basándose en mecanismos de prevención como es la instalación de sistemas de previsión y aviso de avenidas con un plan de evacuación apropiado.

A partir de los años setenta, en Estados Unidos se dio prioridad a la aplicación de medidas no estructurales, alentando a las comunidades a adoptar programas de gestión de las llanuras de inundación, que combinan la zonificación y uso del suelo, los códigos de construcción y la planificación para las situaciones de emergencia (Estrela, 1996).

Metodología

El primer paso, es definir las zonas inundadas para lo cual se tomó como base el trabajo de Vega (1999) sobre evaluación del riesgo de inundación en el caso de la Subcuenca del Río Tejalpa, subcuenca localizada en el Curso Alto del Río Lerma, en el cual se presenta la selección de los periodos de retorno y la estimación de los caudales para las avenidas a transitar, con estos caudales se determinaron los niveles máximos de agua, utilizando para ello el modelo HEC-RAS (USACE, 1998). A estos niveles máximos de agua calculados corresponden unas planicies de inundación, las cuales fueron definidas utilizando el modelo WMS (ECGL, 1997).

Una vez calculadas las planicies de inundación, se determinó la superficie de las áreas inundadas afectadas, que corresponden fundamentalmente a áreas habitacionales y agrícolas. Para establecer la extensión de estas áreas inundables y su localización, se empleo, en el presente estudio, el mapa de vegetación y usos del suelo correspondiente al año 2003 (INEGI; 2003) y un Modelo de Elevación Digital del Terreno (MED) con curvas de nivel a cada 10 metros.

Una vez se han definido las áreas inundadas (en este caso sólo se estudiaron las áreas habitacionales) se procede a su caracterización (Figura 1). Para la caracterización de las zonas habitacionales se recopiló información que incluye los siguientes aspectos (adaptado de Boyle y otros, 1998):

Características socioeconómicas de la población

La información se centra en los indicadores socioeconómicos e índice de marginación por región, municipio y localidad del Estado

Cálculo de daños económicos potenciales por inundación en zonas habitacionales: Un estudio de caso en el curso alto del río Lerma, Estado de México

de México con base en el censo del año 2000, la cual ha sido publicada por el Consejo Estatal de Población del Gobierno del Estado de México (COESPO, 2001). Adicionalmente a esta información, también se ha tenido en cuenta el porcentaje de población que percibe hasta dos salarios mínimos, datos publicados por el Consejo Nacional de Población (CONAPO) con base en el XII Censo General de Población y Vivienda del año 2000. La cuantía del salario mínimo por área geográfica (la zona de estudio corresponde al Área Geográfica C, lo cual representa un salario mínimo diario de \$40.30) se ha obtenido de la Comisión Nacional de los Salarios Mínimos, la cual está vigente desde el 1° de enero del 2003 (CNSM, 2002). También se ha consultado información en la Encuesta Nacional de Ingresos y Gastos de los Hogares (ENIGH) para el año 2000 (INEGI, 2000).

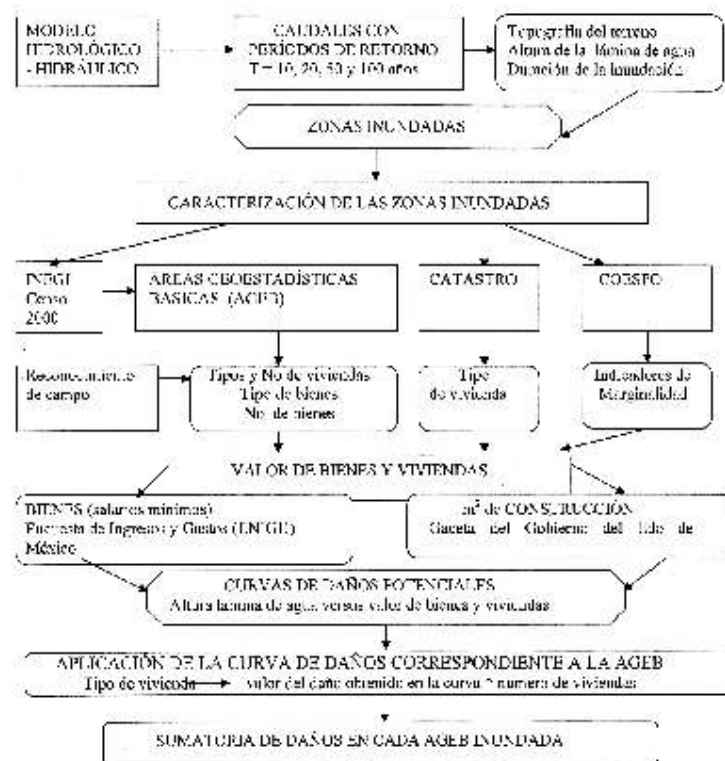


Figura 1. Desarrollo conceptual de una metodología para el cálculo de daños potenciales causados por inundaciones en zonas habitacionales. Daños directos.

Valor unitario de las construcciones

Se ha considerado la información publicada en la Gaceta del Gobierno del Estado de México (1998, 2002). En el caso del uso habitacional, se definen las siguientes clases de viviendas con relación a su estructura básica: Clase A (HA) Precaria, Clase B (HB) Económica, Clase C (HC) Interés Social, Clase D (HD) Regular, Clase E (HE) Buena, Clase F (HF) Muy Buena y Clase G (HG) Lujo. Las principales características de estas viviendas son:

Clase A (HA) Precaria: Realizadas sin proyecto, con materiales de mala calidad, cimentación de piedra, muros de adobe o tabicón o tabique rojo, en algunos casos con pocos castillos, techos de madera (vigas o polines), perfiles metálicos estructurales o tubulares, cubierta de teja de barro o lámina galvanizada, de asbesto o traslúcida.

Clase B (HB) Económica: Realizadas sin proyecto o parcialmente definidas, con materiales económicos y ejecución de baja calidad, cimentación de mampostería y/o zapatas corridas, muros de tabique o tabicón o block con castillos y cadenas de concreto, techos de concreto, ocasionalmente con vigas de madera con pendiente.

Clase C (HC) Interés Social: Realizadas con proyecto definido, con materiales de calidad económica, construcciones en serie, cimentación de zapatas corridas o losas de cimentación de concreto, muros de tabique o tabique vidriado, con castillos y cadenas de concreto prefabricadas, techos de concreto o prefabricadas.

Clase D (HD) Regular: Realizadas con proyecto definido, con materiales de mediana calidad, cimientos de mampostería o zapatas corridas de concreto, algunos muros de contención, muros de adobe o tabique o tabicón con castillos y cadenas, techos de concreto o bóveda catalana o terrado con vigas de madera, enladrillado o teja común vidriada.

Clase E (HE) Buena: Realizadas con proyecto definido funcional y de calidad, con materiales de buena calidad, cimientos de mampostería con dalas de desplantes y/o zapatas corridas o aisladas de concreto, muros de contención de piedra o de concreto, muros de adobe o tabique o tabicón o piedra o tabique extruido con castillos o columnas y cadenas de concreto, techos de losa maciza o aligeradas (nervada o reticular) o losa de acero de claros de hasta 8 metros o bóveda catalana o terrado o viquería con tabla, capa a la compresión y malla.

Clase F (HF) Muy Buena: Realizadas con proyecto de calidad con detalles especiales, con materiales de buena calidad y de lujo,

cimientos de mampostería con dalas de desplantes y/o zapatas aisladas con contratraveses de liga o zapatas corridas, muros de contención de piedra o de concreto con sistemas especiales, muros de adobe estabilizado o de tabique o tabicón o block o piedra labrada con castillos y columnas, y cadenas y trabes de concreto, con detalles de cantera, techos de losa reticular o losa de acero o bóveda catalana o terrado o losa especial y con claros hasta de 10 metros, impermeabilizado de membrana de aluminio, enladrillado o teja de barro vidriada.

Tabla 1. Valores unitarios de construcciones para uso habitacional para el año 2003. Valores para el municipio de Toluca

Código	Clase	Categoría	Valor Unitario (Pesos Por M ²)
HA1	Precaria	Bajo	\$302.00
HA2		Medio	\$715.00
HA3		Alto	\$1,042.00
HB1	Económica	Bajo	\$1,296.00
HB2		Medio	\$1,499.00
HB3		Alto	\$1,667.00
HC1	Interés Social	Bajo	\$1,817.00
HC2		Medio	\$1,966.00
HC3		Alto	\$2,140.00
HD1	Regular	Bajo	\$2,333.00
HD2		Medio	\$2,585.00
HD3		Alto	\$2,907.00
HE1	Buena	Bajo	\$3,316.00
HE2		Medio	\$3,828.00
HE3		Alto	\$4,463.00
HF1	Muy Buena	Bajo	\$5,237.00
HF2		Medio	\$6,167.00
HF3		Alto	\$6,910.00
HG1	Lujo	Bajo	\$7,251.00
HG2		Medio	\$8,236.00
HG3		Alto	\$9,360.00

Con base en esta clasificación, y en el decreto publicado en la Gaceta el Gobierno del Estado de México en el 2002; se presentan en la tabla 1 los valores promedios unitarios (por m²) de construcción para cada una de estas clases de viviendas para el municipio de Toluca, ya que este municipio es uno de los afectados por las inundaciones producidas por el río Tejalpa. Clase G (HG) Lujo: Realizadas con proyecto de calidad con detalles especiales, con materiales de lujo, cimientos con zapatas aisladas con contratraveses de liga o zapatas corridas, muros de contención de piedra o de concreto, muros de adobe estabilizado o de tabique o tabicón o block o piedra labrada con cadenas de cerramiento, castillos y trabes de concreto armado, con detalles de cantera, techumbre de losa maciza, losa reticular o losa de acero o bóveda catalana, estructuras horizontales prefabricadas, viguería con capa de compresión con malla, losas de diseño especial y con claros hasta de 10 metros o más. Impermeabilizante de membrana (plástico aluminio) enladrillado o teja de barro o teja vidriada, y pretilos aplanados con acabados especiales.

Información sobre los bienes existentes en las viviendas

Esta información se ha recopilado a partir del Cuestionario Ampliado empleado en el XII Censo de Población y Vivienda 2000, elaborado por el INEGI (2000). La cuantificación de estos bienes, tanto los definidos por el INEGI como los que se han incluido adicionalmente en este estudio, se ha llevado a cabo recogiendo información en diferentes casas comerciales así como a partir de la información proporcionada por la PROFECO (Procuraduría Federal de Protección del Consumidor) para el periodo del 1 al 16 de abril del 2003.

Con el objetivo de acotar esta información se utilizó el SCINCE 2000 (INEGI, 2002b), Sistema para la Consulta de Información Censal, el cual cuenta con los resultados definitivos del XII Censo General de Población y Vivienda 2000. SCINCE es un sistema que permite relacionar los datos estadísticos con el espacio geográfico al que pertenecen. Para ello cuenta con información estadística que se puede consultar a nivel de entidad federativa, municipio, localidad urbana (con 2,500 o más habitantes y cabeceras municipales independientemente de su tamaño), y dentro de éstas para grupos de manzanas, las cuales se reconocen como Áreas Geoestadísticas Básicas (AGEB).

Información correspondiente a la altura a la cual el agua puede entrar en las viviendas

Las características hidráulicas de una cuenca se pueden obtener con el empleo de algún modelo de simulación hidráulico-hidrológico. Estas características incluyen los caudales del río para diferentes períodos de retorno (Tiempo=10, 20, 50 y 100 años) y las elevaciones potenciales que alcanzaría el del agua en las zonas inundables (Díaz-Delgado, y Vega, 2001, Vega, 1999).

Una vez procesada esta información se procedió al cálculo de los daños tangibles directos (pérdidas producidas por el contacto físico con el agua) para lo cual se utilizaron las curvas de daños.

En casi todos los estudios realizados se ha comprobado que una misma altura de inundación puede causar diferentes daños para diferentes tipos de usos del suelo, y dentro de los diferentes tipos de usos de suelo también se puede realizar una subdivisión teniendo en cuenta ciertos criterios. Para el caso concreto de la zona de estudio, dentro de las zonas habitacionales se ha llevado a cabo una subdivisión en función del tipo de vivienda y de las características socioeconómicas ligadas a ese tipo de vivienda.

A cada uno de estas clases de viviendas se les ha hecho corresponder unos bienes, cuyo valor promedio ha sido cuantificado, para posteriormente ver cuál es el daño en cada uno de estos bienes en función de la altura de la lámina de agua. Asimismo, se han considerado los daños a la propia construcción.

De esta manera, se pueden definir curvas de daños-altura de lámina de agua para las construcciones de tipo precario, económico, de interés social, regular y buena-muy buena-lujo. Las alturas de lámina de agua a evaluar corresponden a las obtenidas en el modelo hidrológico, de forma que a partir de la altura máxima de la lámina de agua que provoca la inundación, se establecen intervalos regulares de altura de lámina de agua. De cada una de estas curvas, se obtienen una ecuación, cuyos parámetros servirán para cálculos posteriores.

En el caso de daños tangibles indirectos, que incluyen el coste adicional por desvíos alrededor del área inundada, las pérdidas derivadas de la interrupción de servicios y las pérdidas en negocios, salarios, costos de limpieza después de la inundación, los incrementos de costes en tareas de previsión y alarma, las evacuaciones, los alojamientos temporales en zonas de libre peligro, etcétera, se calculan como un porcentaje fijo de los daños directos. Los porcentajes que han sido propuestos por Kates (1965) son los más utiliza-

dos, y son los que se emplearán en el presente estudio. El valor de este porcentaje para el caso de zonas habitacionales es del 15%.

Resultados y Discusión

Características de la zona de estudio

El Río Tejalpa, subcuenca localizada en el Curso Alto del Río Lerma, tiene sus orígenes en las laderas del Nevado de Toluca, donde se conoce como arroyo Torrentillas, descendiendo desde una altitud en torno a los 4,100 metros sobre el nivel del mar (msnm) en dirección norte, para finalmente desembocar en el Río Lerma, a 2 km de Villa Seca La Providencia. Toda esta subcuenca abarca una extensión de 242.8 km². Esta subcuenca abarca parte de los municipios de San Miguel Zinacantepec, Toluca, Otzolotepec y Almoloya de Juárez.

Con base en la información del Mapa de Uso del Suelo, elaborado por el INEGI (2003), y cuya información ha sido digitalizada y forma parte de la base de datos del SIG-CARL (Sistemas de Información Geográfica del Curso Alto del Río Lerma), elaborado por Díaz-Delgado y otros. (2004), hay que resaltar el hecho de que esta subcuenca es eminentemente agrícola, ya que el 55.07% de suelo está dedicada al cultivo, mientras que las áreas urbanas ocupan el 15.22% del total de la superficie de la subcuenca.

Para llevar cabo este estudio, se tiene la información necesaria referente a los caudales para diferentes períodos de retorno (Tabla 2), la altura de la lámina de agua en las zonas inundables para los caudales con diferentes períodos de retorno y la información sobre las zonas habitacionales y agrícolas.

Tabla 2. Caudales máximos para los períodos de retorno de T= 10, 20, 50 y 100 años

Probabilidad de ocurrencia	Período de retorno (T) años	Caudal máximo para toda la cuenca (m ³ /s)
0.90	10	91.41
0.95	20	105.26
0.98	50	114.46
0.99	100	121.67

Para cada uno de los caudales, se estableció la superficie afectada en la subcuenca por efecto de la inundación provocada por cada caudal. Con objeto de llevar a cabo la estimación de esta superficie se tomo como mapa base, el mapa de uso del suelo elaborado por el INEGI en el año 2003, por lo que los valores difieren de los presentados por Vega (1999), ya que en aquel estudio se utilizó la información publicada por el INEGI en 1977. Por otro lado, en el estudio de Vega (1999) se empleo un Modelo de Elevación Digital (MED) del territorio con curvas de nivel cada 60 metros (m), mientras que el utilizado en el marco del presente estudio está conformado por curvas de nivel cada 10 m, por lo que este hecho también contribuye a que se obtengan valores diferentes.

En la tabla 3 se presentan la superficie afectada según el uso del suelo para los períodos de retorno de 10, 20, 50 y 100 años. En esta tabla se puede comprobar como los usos de suelo más afectados son el de agricultura bajo riego en primer lugar; el de agricultura de temporal en segundo lugar, y finalmente, en tercer lugar, el suelo urbano. El resto de usos del suelo no presenta grandes afectaciones ya que obtienen porcentajes inferiores al 1%. La diferencia de superficie afectada entre estos períodos de retorno para toda la cuenca es mínima, ya que para un periodo de retorno de 10 años la superficie total afectada es de 52.0 km², para 20 años es de 55.3 km², para 50 años es de 56.7 km² y para 100 años, es de 57.2 km².

Tabla 3. Superficie afectada según uso del suelo en la Subcuenca del Río Tejalpa para los caudales correspondientes a los diferentes periodos de retorno

Uso del suelo	T = 10 años		T = 20 años		T = 50 años		T = 100 años	
	Area (km ²)	%	Area (km ²)	%	Area (km ²)	%	Area (km ²)	%
Agropecuario, con cultivo anual, sin erosión	33.7	62.8	35.4	62.1	35.9	61.4	36.0	61.2
Agropecuario, con cultivo anual, con erosión	0.2	0.3	0.3	0.5	0.4	0.7	0.6	0.9
Agropecuario, con cultivo anual, sin erosión	15.0	28.0	16.4	28.8	17.0	29.1	17.2	29.2
Agropecuario, sin erosión	0.2	0.4	0.2	0.4	0.2	0.4	0.2	0.4
Agropecuario, erosión	0.2	0.4	0.2	0.4	0.2	0.4	0.2	0.4
Agropecuario, vegetación secundaria arbustiva, sin erosión	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
Agropecuario, vegetación secundaria arbustiva, erosión	0.4	0.7	0.4	0.7	0.4	0.7	0.4	0.7
Agropecuario, sin erosión	0.4	0.8	0.4	0.8	0.0	0.0	0.0	0.0
Agropecuario, erosión					0.5	0.8	0.5	0.8
	1.8	3.4	1.8	3.3	2.0	3.5	2.1	3.6
	52.0	100.0	55.3	100.0	56.7	100.0	57.2	100.0

Curvas de daños potenciales por inundación

Esta metodología expuesta ha sido aplicada a la Subcuenca del Río Tejalpa. Para llevar cabo este estudio, se tiene la información necesaria referente a los caudales para diferentes períodos de retorno, la altura de la lámina de agua en las zonas inundables para los caudales con diferentes períodos de retorno y la información sobre las zonas habitacionales.

En primer termino, se localizaron las AGEB que se enmarcan dentro de la zona de estudio, mapa obtenido del SCINCE (INEGI, 2002), y que se exporto al SIG, donde se sobrepuso sobre cada uno de los mapas de las zonas habitacionales afectadas por una inundación para un caudal con un período de retorno de 10, 20, 50 y 100 años.

Las AGEB dentro de las cuales se identifican zonas inundables corresponden a las localidades de Calixtlahuaca, San Juan de las Huertas, San Miguel de Zinacantepec y San Francisco Tlacilalcalpan, localidades pertenecientes a los municipios de Toluca, Zinacantepec y Almoloya de Juárez.

Para establecer el número de viviendas afectadas por la inundación, se tomo en cuenta la superficie total de la AGEB y el número total de viviendas existentes en cada AGEB, y se supuso una distribución uniforme de estas viviendas en toda la AGEB. A partir de estos datos, se calculó cuántas viviendas corresponderían a una superficie dada, en este caso la superficie inundada dentro de la AGEB. Los resultados obtenidos se presentan en la tabla 4. Como se puede comprobar, el número de viviendas afectadas va aumentando a medida que también se incrementa la superficie inundada para cada período de retorno.

Para saber que clase de vivienda era afectada en cada AGEB, se extrajo del SCINCE (2002) la información referida a los indicadores censales para cada AGEB, ya que a través de estos indicadores es posible conocer las características del AGEB en cuanto población, economía, viviendas, etcétera. De todos estos indicadores, se eligieron aquellos relacionados con la vivienda para poder establecer la clase de vivienda promedio en cada AGEB. El análisis de esta información permitió definir que la clase de vivienda predominante era la económica (HB), además se llevaron a cabo recorridos de campo para verificar esta información y se consulto con técnicos de vivienda de cada uno de los municipios.

Tabla 4. Superficie inundada en cada localidad identificada y número de viviendas afectadas para cada uno de los períodos de retorno definidos

Periodo de retorno (T) (años)	LOCALIDAD	Número total de viviendas	Área inundada km ²	Número viviendas afectadas
10	Calixtlahuaca	2,105	0.04	45
	San Miguel	8,607	1.65	1,053
	Zinacantepec			
	San Juan de las Huertas	1,574	0.09	103
	TOTAL	12,286	1.78	1,200
20	Calixtlahuaca	1,574	0.04	45
	San Miguel	8,607	1.67	1,062
	Zinacantepec			
	San Francisco	2,018	0.03	14
	Tlacilalcalpan			
	San Juan de las Huertas	2,105	0.10	109
50	TOTAL	14,304	1.83	1,229
	Calixtlahuaca	1,574	0.05	52
	San Miguel	8,607	1.68	1,069
	Zinacantepec			
	San Francisco	2,018	0.04	20
	Tlacilalcalpan			
100	San Juan de las Huertas	2,105	0.21	240
	TOTAL	14,304	1.98	1,382
	Calixtlahuaca	1,574	0.30	329
	San Miguel	8,607	1.68	1,070
	Zinacantepec			
	San Francisco	2,018	0.05	25
	Tlacilalcalpan			
	San Juan de las Huertas	2,105	0.06	65
	TOTAL	14,304	2.08	1,489

Una vez identificada la clase de vivienda, se definió la relación de bienes que como promedio existen. A cada uno de estos bienes se le hizo corresponder un precio unitario, teniendo en cuenta los ingresos y gastos de una familia que habita en este tipo de vivienda, para finalmente obtener el costo total de todos ellos.

Adicionalmente, se consideraron los daños estructurales que podría tener la vivienda por efecto de la inundación. Para ello se tomó un valor promedio de la superficie construida que puede tener esta clase de vivienda. A cada m² se le asignó un valor que corres-

ponde al definido en la Gaceta del Gobierno del Estado de México (2002).

El siguiente paso fue establecer los intervalos de altura de lámina de agua, para definir de este modo el porcentaje de afectación que pudieran tener cada uno de estos bienes, así como la propia vivienda al entrar en contacto con el agua. Para ello se consideró en el caso de los electrodomésticos a qué altura se encuentra instalado la fuente de producción de energía, y en caso de los muebles, cuales son sus dimensiones promedio.

Las alturas de lámina de agua definidas fueron de 0.10 m, 0.20 m, 0.30 m, 0.40 m, 0.50 m, 0.70 m y 1.00 m. No se definieron más alturas ya que a esta última, los daños totales alcanzan un valor del 100%

En el caso de los electrodomésticos, el porcentaje de afectación se estableció en función de que la altura de la lámina de agua alcance partes vitales del electrodoméstico. Con respecto a los muebles, cabe señalar que éstos se ven dañados desde el momento en que se inicia la inundación ya que están a ras de suelo, por lo cual su afectación va en aumento a medida que crece la altura de la lámina de agua.

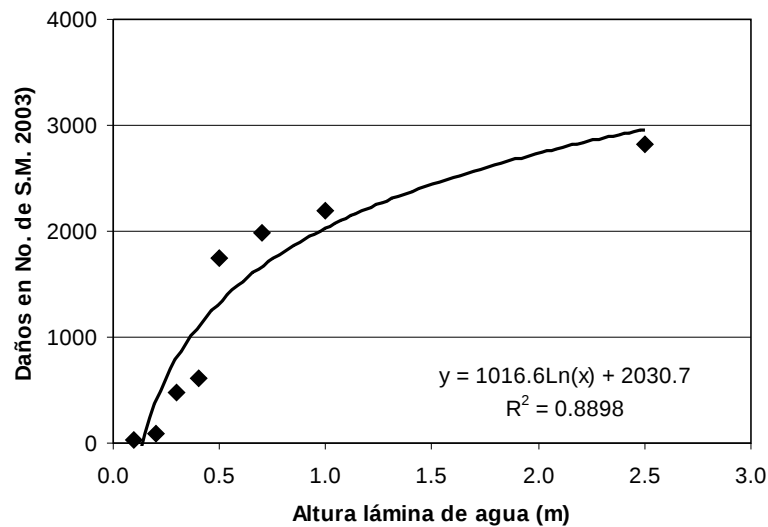
En cuanto a los daños estructurales en la vivienda, como se trata de viviendas construidas con materiales de baja calidad, la afectación puede ser elevada ya que estos materiales no tienen las características estructurales adecuadas, para soportar los efectos de la humedad, por lo tanto, se estimó una afectación del 100% a partir del medio metro de inundación ya que es muy posible que se produzcan fallos estructurales.

Una vez asignados los porcentajes de afectación se calculó el valor correspondiente con base en el costo de cada rubro, posteriormente se calculó la sumatoria para cada altura de lámina de agua, de modo que se obtiene el valor en pesos de los daños económicos para cada altura de lámina de agua. Estos daños totales se convirtieron en número de salarios mínimos, teniendo en cuenta que un salario mínimo equivale a \$40.30 para el año 2003, que es el que corresponde a un área geográfica C, como es el caso de los municipios de Toluca, Zinacantepec y Almoloya de Juárez, (CNSM, 2002), de tal forma que se tiene para cada altura de lámina de agua los daños económicos en vivienda valorados en el número de salarios mínimos para el año 2003.

Con estos datos se construyó una gráfica, donde el eje X corresponde a valores de altura de lámina de agua en metros, y en el eje Y los daños económicos en unidades de número de salarios mínimos.

Una vez se grafican los datos, se construye un modelo matemático de tipo regresivo y con este ajuste se obtiene una ecuación cuyos parámetros se utilizarán posteriormente para el cálculo de los daños tangibles directos (figura 2).

Figura 2



La ecuación del ajuste permite calcular los daños potenciales directos, en número de salarios mínimos, para una altura de lámina dada. Por ejemplo, si la inundación producida en un sector determinado provoca una lámina de agua de 0.56 m de altura, sólo será cuestión de sustituir la x de la ecuación por este valor para obtener la cuantificación de los daños potenciales directos en número de salarios mínimos para una vivienda de clase precaria.

Esta gráfica tiene la particularidad de utilizar como unidades de medida el número de salarios mínimos. Esto implica que la gráfica puede ser aplicada en cualquier año ya que para estimar los daños en pesos bastaría multiplicar el número de salarios mínimos correspondiente a la altura de la lámina de agua por el valor del salario mínimo en ese año en particular correspondiente al área geográfica en cuestión (A, B o C) en donde se produzca la inundación, el

cual se da a conocer por el Consejo Nacional de Salarios Mínimos cada año.

Con base en estos resultados se tomó la ecuación correspondiente a la curva de daños potenciales en zonas habitacionales para la clase de vivienda económico (Figura 2). El ajuste elegido fue aquel con el que se obtuvo el valor más alto del coeficiente de determinación (R^2), que en este caso correspondió a un ajuste lineal, con un coeficiente de determinación de 0.89.

$$DDHe = 1016.6 \ln(h) + 2030.7$$

Donde DDHe, son los daños económicos potenciales para una clase de vivienda económica en número de salarios mínimos y h la altura de lámina de agua.

También es posible notar, en la Figura 2, como a partir de una altura de lámina de agua de 0.50 m se produce un cambio en el comportamiento de los datos. Esto es consecuencia de que para alturas de lámina mayor, los bienes están afectados casi en su totalidad en un 100%, y el incremento de los daños se produce a partir de este punto por la afectación en la estructura de la vivienda, fundamentalmente.

Hay que señalar que esta gráfica, representa como los daños a la vivienda y sus bienes van aumentando de forma aproximadamente lineal con el nivel de las aguas, pero llega un punto en que los daños van aumentando más lentamente hasta que se producen los daños estructurales en la vivienda, lo que implica una afectación del 100%, tal y como lo reporta Estrela (1996).

Para aplicar esta curva a todas las zonas inundadas de cada AGEB es necesario saber el número de viviendas que pueden ser afectadas y la altura de lámina de agua. El número de viviendas afectadas se tomó de la tabla 4 y para saber cual es la lámina de agua se identificaron aquellas secciones del río que se localizaban en estas zonas inundadas o en sus proximidades. Para estas secciones se tiene calculado la lámina de agua para cada caudal con un período de retorno de 10, 20, 50 y 100 años.

Los valores de altura de lámina de agua obtenidos de las secciones se promediaron para cada una de las zonas habitacionales afectadas en cada AGEB, siendo este valor promedio el que se utilizó para establecer los daños económicos directos con base en la ecuación de la curva de daños para vivienda económica. Los resultados obtenidos se presentan en la tabla 5, donde se cuantifica cual es el daño potencial de una vivienda económica para los diferentes períodos de retorno.

Tabla 5. Daños totales para las zonas habitacionales inundables de la Subcuenca del Río Tejalpa para caudales con diferentes períodos de retorno (SM salarios mínimos 2003)

PERÍODO DE RETORNO	Caudal máximo para toda la cuenca (m ³ /s)	ÁREA INUNDADA Km ²	DAÑOS DIRECTOS No. de SM	DAÑOS INDIRECTOS No. de SM	DAÑOS TOTALES No. de SM
10 años	91.41	1.78	2,822,852	423,428	3,246,280
20 años	105.26	1.83	2,959,330	443,900	3,403,230
50 años	114.46	1.98	3,307,473	496,121	3,803,594
100 años	121.67	2.08	3,354,171	503,126	3,857,297

En esta tabla se puede apreciar como el incremento en la altura de la lámina de agua provoca consecuentemente un mayor daño económico en las viviendas, por lo tanto para caudales con un período de retorno mayor, los daños económicos son más elevados.

A continuación, cada uno de los valores correspondientes al daño de una vivienda se multiplicó por el número de viviendas afectadas en cada localidad, para de esta forma calcular los daños potenciales totales directos para el caso de las zonas habitacionales. Estos daños oscilaron entre 2'822,852 de salarios mínimos (S.M.), o lo que es lo mismo 113'760,939 pesos, para un caudal con período de retorno de 10 años, y 3'814,085 S.M., equivalente a 153'707.613 pesos, para un caudal con un período de retorno de 100 años (Tabla 5), lo que supone un incremento de casi 100,000 S.M.

Para la estimación de los daños indirectos, se calculó el 15% con respecto a los directos. Los resultados se presentan en la tabla 5. Los daños indirectos variaron entre 423,428 S.M. para un caudal con un período de retorno de 10 años, y 572,113 S.M. para un caudal con un período de retorno de 100 años.

Con los valores obtenidos, se efectúa la suma total (Tabla 5), de forma que se pueden cifrar los daños totales tangibles para la Subcuenca del Río Tejalpa en zonas habitacionales, que varían entre los 3'246,280 S.M. para un período de retorno de 10 años y los 3'857,297 S.M. en el caso particular de una inundación correspondiente a un período de retorno de 100 años.

Conclusiones

La evaluación de las condiciones socioeconómicas en el área de estudio indica que la población que habita en las zonas inundables de la subcuenca del Río Tejalpa es de bajos recursos, por lo tanto sus viviendas y bienes son de baja calidad y las afectaciones por una inundación son muy importantes desde el punto de vista social, aunque los daños económicos aparentemente no resultan ser tan elevados.

Las curvas de daños tangibles directos potenciales provocados por una inundación en zonas habitacionales han permitido establecer, por medio de modelos matemáticos de tipo regresivo, cuáles son los daños ocasionados por una inundación de X altura de lámina de agua para cada una de las clases de vivienda definidas.

La estimación de pérdidas económicas con estas curvas de daños en zonas habitacionales, debe ser completada con otras curvas que permitan el cálculo de daños en zonas agrícolas, industriales, comerciales y/o de servicios con el objetivo de obtener una cuantificación total más precisa de las afectaciones.

Bibliografía

- Boyle, S.J. y otros, 1998: "Developing Geographic Information Systems for land use impact assessment in flooding conditions" en *Journal of Water Resources Planning and Management* 124(2)89-98.
- Bremer, M.H. y Lara C.A., 2001: Proyecto de Atlas de Riesgo de Inundación de la Ciudad de Monterrey, México: Reporte ITESM.
- CNA Comisión Nacional del Agua 2001: Fichas temáticas sobre el Sector Hidráulico; Obras de protección contra inundaciones. Prevención de emergencias, México: Comisión Nacional de Agua.
- CNSM Comisión Nacional de Salarios Mínimos, 2002: Salarios mínimos y zonas geográficas. <http://www.cnsm.org.mx>.
- COESPO Consejo Estatal de Población, 2001: Índices de marginación: regional, municipal y por localidad, México: Gobierno del Estado de México-Consejo Estatal de Población. México.
- Díaz-Delgado, C. y Vega, G., 2001: "Análisis de gran visión de las inundaciones en la Cuenca Alta del Río Lerma: caso de la Subcuenca del Río Tejalpa, Estado de México, México" en *Ingeniería Hidráulica en México* XVI(1)73-86.

Cálculo de daños económicos potenciales por inundación en zonas habitacionales: Un estudio de caso en el curso alto del río Lerma, Estado de México

- Díaz-Delgado, C. y otros, 1998. Sistema de Información geográfica para el análisis Geográfico-Hidrológico del Curso Alto del Río Lerma, SIGCARL. UAEMex. <http://www.uaem.mx/ceninv/cira>.
- ECGL, 1997: Watershed Modeling System 5.0. User's Manual. USA.
- Estrela, T., 1996: Inundaciones: Impactos y estrategias de respuesta. Apuntes del Curso de Planificación Hidrológica y Medio Ambiente. CEDEX, Madrid: Ministerio de Obras Públicas y Medio Ambiente.
- Gaceta del Estado de México, 1998: Periódico Oficial del Gobierno Constitucional del Estado de México. Tomo CLXVI No.113 Decreto No. 76 con el que se aprueban las tablas de valores actualizadas para la determinación de los valores unitarios de suelo y construcción para 1999. Gobierno del Estado de México. México.
- Gaceta del Estado de México, 2002: Periódico Oficial del Gobierno Constitucional del Estado de México. Tomo CLXXIV No. 109 Decreto No. 103 con el que se aprueban las tablas de valor para la determinación de valores unitarios de suelos y construcción para el año 2003. Gobierno del Estado de México. México.
- INEGI Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática 2000: ENIGH Encuesta Nacional de Ingresos y Gastos de los Hogares, Gobierno de México. México Gobierno del Estado de México. México. www.inegi.gob.mx.
- INEGI Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática, 2003: Mapa de usos de suelo y vegetación, s/c:mimeo
- INEGI Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática, 2000: ENIGH Encuesta Nacional de Ingresos y Gastos de los Hogares, Gobierno de México. México Gobierno del Estado de México. México. www.inegi.gob.mx.
- INEGI Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática, 2002: SCINCE Sistema para la consulta de Información Censal 2000, México: CD. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática.
- Kates, R.W., 1965: Industrial Flood Losses: Damage estimation in the Lehigh Valley. University of Chicago, Department of Geography Research Paper No. 98 The University of Chicago Press, Chicago.
- Lekuthai, A. and Vongvisessomajai, S., 2001: "Intangible flood damage quantification" en Water Resources Management 15:343-362.
- Lopardo R.A. y Seoane R., 2000: "Algunas reflexiones sobre crecidas e inundaciones" en Ingeniería del Agua 7(1)11-21.
- Renyi, L. and Nan, L., 2002: "Flood area and damage estimation in Zhejiang, China" en Journal of Environmental Management 66:1-8.

José Emilio Baró, Georgina Calderón, Carlos Díaz-Delgado y María Vicenta Esteller

USACE US, 1998: Hec Ras User's manual. Versión 2.1. Hidrologic Engineering Center. USA.

Vega, G., 1999: Evaluación del riesgo de inundación en la Cuenca Alta del Río Lerma: Caso de la Subcuenca del Río Tejalpa. Estado de México. Tesis de Maestría en Ciencias del Agua. Facultad de Ingeniería. Universidad Autónoma del Estado de México. Toluca. México.