

Curvas de daños económicos provocados por inundaciones en zonas habitacionales y agrícolas de México.

Parte II: caso de estudio en la cuenca alta del río Lerma, México

José Emilio Baró-Suárez
Carlos Díaz-Delgado
María Vicenta Esteller-Alberich

Universidad Autónoma del Estado de México

Georgina Calderón

Universidad Nacional Autónoma de México

Las inundaciones constituyen un riesgo natural en la cuenca alta del río Lerma (sector central de la república mexicana), riesgo acrecentado por efecto de las actividades humanas. Las medidas que generalmente se han tomado han sido de tipo estructural, lo que ha implicado importantes costos económicos, mismos que no han podido ser confrontados en el marco de un análisis costo-beneficio, ya que no se cuenta con una metodología que permita la estimación de daños económicos potenciales provocados por inundación. Esta metodología ha sido propuesta en el marco del presente estudio y está basada en el cálculo de daños económicos por medio de curvas de tirante de agua alcanzado-daños. Una aplicación de estas curvas de daños se llevó a cabo en la subcuenca del río Tejalpa, la cual pertenece al curso alto del río Lerma (Estado de México). Para esta subcuenca se determinaron las áreas inundables para caudales con diferentes periodos de retorno. En cada una de estas áreas inundables se utilizó la ecuación de la curva de daños potenciales correspondiente y se estimaron los daños tangibles directos que provocaría una inundación. Los daños tangibles indirectos se estimaron como un porcentaje de los directos. La aplicación de esta metodología proporciona una estimación de la magnitud de las afectaciones en términos económicos y con base en los resultados obtenidos se podrían establecer las medidas de control, estructurales o no, de forma tal que expresen un balance de costo-beneficio rentable y racional.

Palabras clave: inundación, curvas altura de inundación-daños, evaluación de daños económicos, río Tejalpa, río Lerma, México.

Introducción

Una inundación es un fenómeno natural ligado al flujo o 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 (Bremer y Lara, 2001).

Esta amenaza hidrometeorológica tiene un carácter aleatorio y por tanto incontrolable, pero su componente hidráulico, es decir, la ocurrencia de

crecidas destructivas, puede ser controlable a largo y mediano plazos si se aplican técnicas adecuadas de gestión de cuencas hidrográficas y se implementan programas, acciones y planes de defensa y control que integren tanto medidas estructurales como no estructurales.

Una herramienta importante para la correcta formulación de lo planteado en el párrafo anterior lo constituye la estimación de los daños económicos potenciales causados por inundaciones. Esto representa una necesidad común en la planificación de recursos hidráulicos, pues permite evaluar la efectividad de los proyectos diseñados para mitigar los efectos de estas calamidades; además, permite determinar la viabilidad económica de los proyectos destinados al control de inundaciones.

La estimación de daños en zonas inundables implica cuatro tipos de análisis (Helweg, 1992; Boyle *et al.*, 1998):

1. Análisis de frecuencias: para el pronóstico de eventos extremos, simulación de escurrimiento, modelos hidráulico-hidrológicos.
2. Análisis de peligros: se enfoca en los tipos de peligros relacionados con inundaciones.
3. Análisis de vulnerabilidad: para estimar la extensión y severidad de los daños, así como la magnitud de las pérdidas, las cuales dependen de factores humanos, hidrológicos y de uso del suelo.
4. Análisis de daños: implica el costo de reemplazar o restaurar las áreas afectadas. Una aproximación normalmente utilizada es el método de correlación entre el daño estimado y las características hidrológicas y económicas de la planicie de inundación.

Para cubrir este último tipo de análisis, que implica el cálculo de los daños tangibles (pérdidas producidas por el contacto físico con el agua), normalmente se utilizan las curvas de daños, las cuales describen la relación entre los dos principales factores de las inundaciones, como son la profundidad de la inundación (o altura de lámina de agua), la duración de ésta, y los daños económicos generados (James y Lee, 1971; Helweg, 1992).

El presente trabajo tiene como objetivo la aplicación de la metodología propuesta por Baró *et al.* (2007) para la estimación de daños económicos potenciales por inundación en zonas habitacionales y agrícolas para el caso de daños tangibles. Esta aplicación se llevará a cabo en el curso alto del río Lerma, donde históricamente se han reportado inundaciones (Peralta y Salazar, 1999;

Aparicio, 2001), que han provocado importantes daños materiales, con familias damnificadas y pérdidas de cultivos.

Materiales y métodos

Definición de zonas inundables

El primer paso consiste en definir las zonas potencialmente inundables en el área de estudio, en este caso, la subcuenca del río Tejalpa, localizada en el curso alto del río Lerma (ilustración 1), para lo cual se tomó como base los trabajos de Vega (1999), y Díaz-Delgado y Vega (2001) sobre evaluación del riesgo de inundación para dicha cuenca. En tales trabajos, los autores presentan la selección de los periodos de retorno y la estimación de los caudales de las avenidas a transitar (cuadro 1). 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).

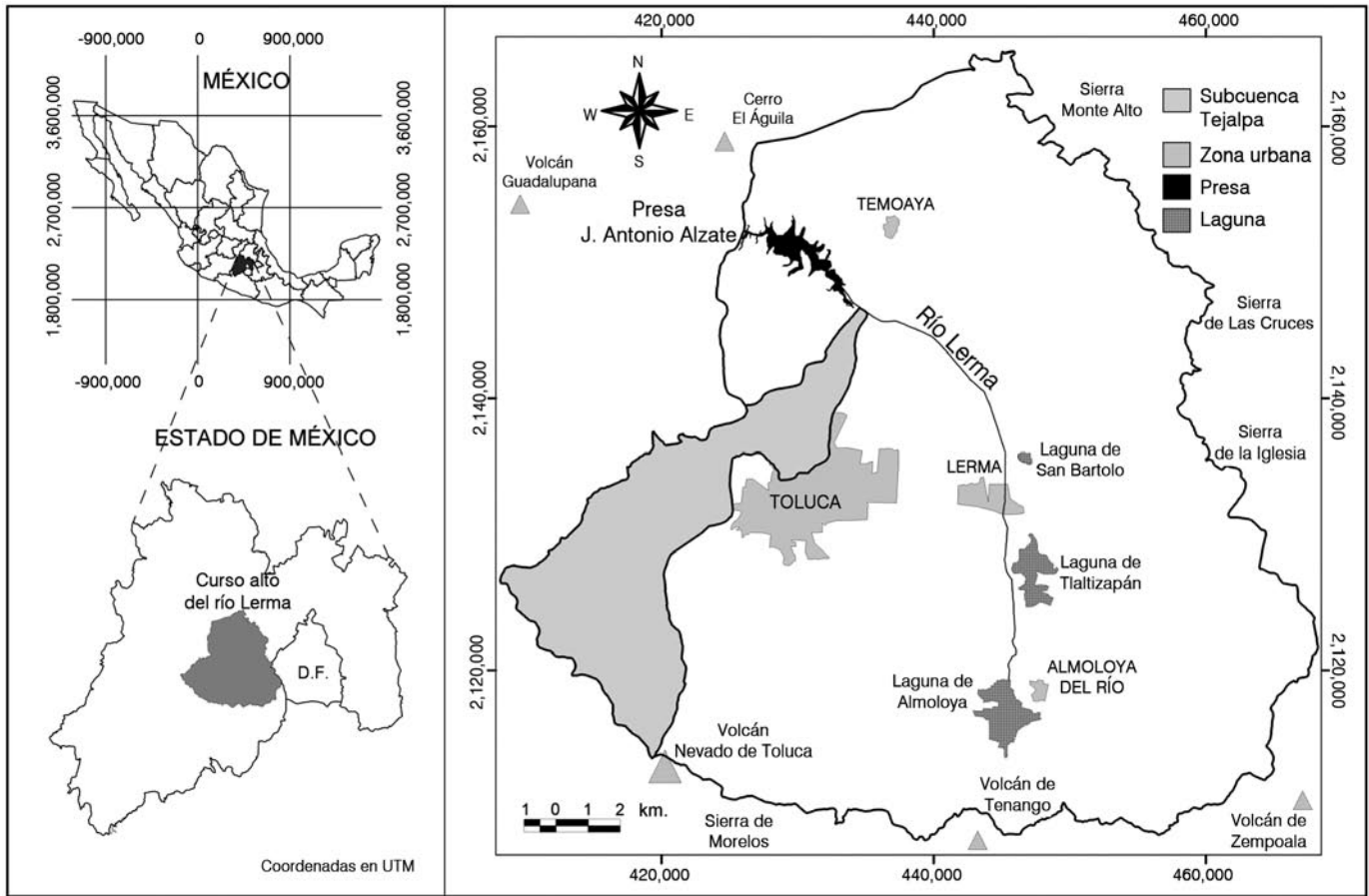
Así, definidas las planicies de inundación (ilustración 2), se determinó la extensión de estas áreas inundables y su localización (cuadro 2, ilustración 2), para lo cual se empleó, en el presente estudio, el mapa de vegetación y uso de suelo correspondiente al año 2003 (INEGI, 2003) y un modelo numérico de altitud (MNA) con curvas de nivel a cada metro; estas curvas de nivel fueron obtenidas por interpolación lineal del modelo original con curvas de nivel a cada diez metros.

Posterior a la delimitación de las áreas potencialmente inundadas, se procedió a su caracterización, determinándose en primer lugar el uso de suelo afectado, y se comprobó que las áreas inundables correspondían fundamentalmente a zonas agrícolas y habitacionales (cuadro 2).

Cuadro 1. Caudales máximos para los periodos de retorno de T= 10, 20, 50 y 100 años. Caso de la subcuenca del río Tejalpa (Vega, 1999).

| Probabilidad de ocurrencia | Periodo de retorno (T) años | Caudal máximo para toda la cuenca (m³/s) |
|----------------------------|-----------------------------|--|
| 0.90 | 10 | 91.41 |
| 0.95 | 20 | 105.26 |
| 0.98 | 50 | 114.46 |
| 0.99 | 100 | 121.67 |

Ilustración 1. Localización de la subcuenca del río Tejalpa en el marco de la cuenca del curso alto del río Lerma.



Cuadro 2. Superficie afectada según el 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 | |
|--|-------------------------|--------------|-------------------------|--------------|-------------------------|--------------|-------------------------|--------------|
| | Área (km ²) | % | Área (km ²) | % | Área (km ²) | % | Área (km ²) | % |
| Agricultura de riego, con cultivo anual, sin erosión | 33.7 | 62.8 | 35.4 | 62.1 | 35.9 | 61.4 | 36.0 | 61.2 |
| Agricultura de temporal, con cultivo anual, con erosión | 0.2 | 0.3 | 0.3 | 0.5 | 0.4 | 0.7 | 0.6 | 0.9 |
| Agricultura de temporal, con cultivo anual, sin erosión | 15.0 | 28.0 | 16.4 | 28.8 | 17.0 | 29.1 | 17.2 | 29.2 |
| Bosque de oyamel, sin erosión | 0.2 | 0.4 | 0.2 | 0.4 | 0.2 | 0.4 | 0.2 | 0.4 |
| Bosque de pino, sin erosión | 0.2 | 0.4 | 0.2 | 0.4 | 0.2 | 0.4 | 0.2 | 0.4 |
| Bosque de pino, vegetación secundaria arbustiva, sin erosión | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 |
| Cuerpo de agua | 0.4 | 0.7 | 0.4 | 0.7 | 0.4 | 0.7 | 0.4 | 0.7 |
| Pastizal inducido, sin erosión | 0.4 | 0.8 | 0.4 | 0.8 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| Pastizal inducido, con erosión | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.5 | 0.8 | 0.5 | 0.8 |
| Zona urbana | 1.8 | 3.4 | 1.8 | 3.3 | 2.0 | 3.5 | 2.1 | 3.6 |
| Total | 52.0 | 100.0 | 55.3 | 100.0 | 56.7 | 100.0 | 57.2 | 100.0 |

Ilustración 2. Zonas inundables en la subcuenca del río Tejalpa para un caudal con un periodo de retorno (T) de 10, 20, 50 y 100 años.

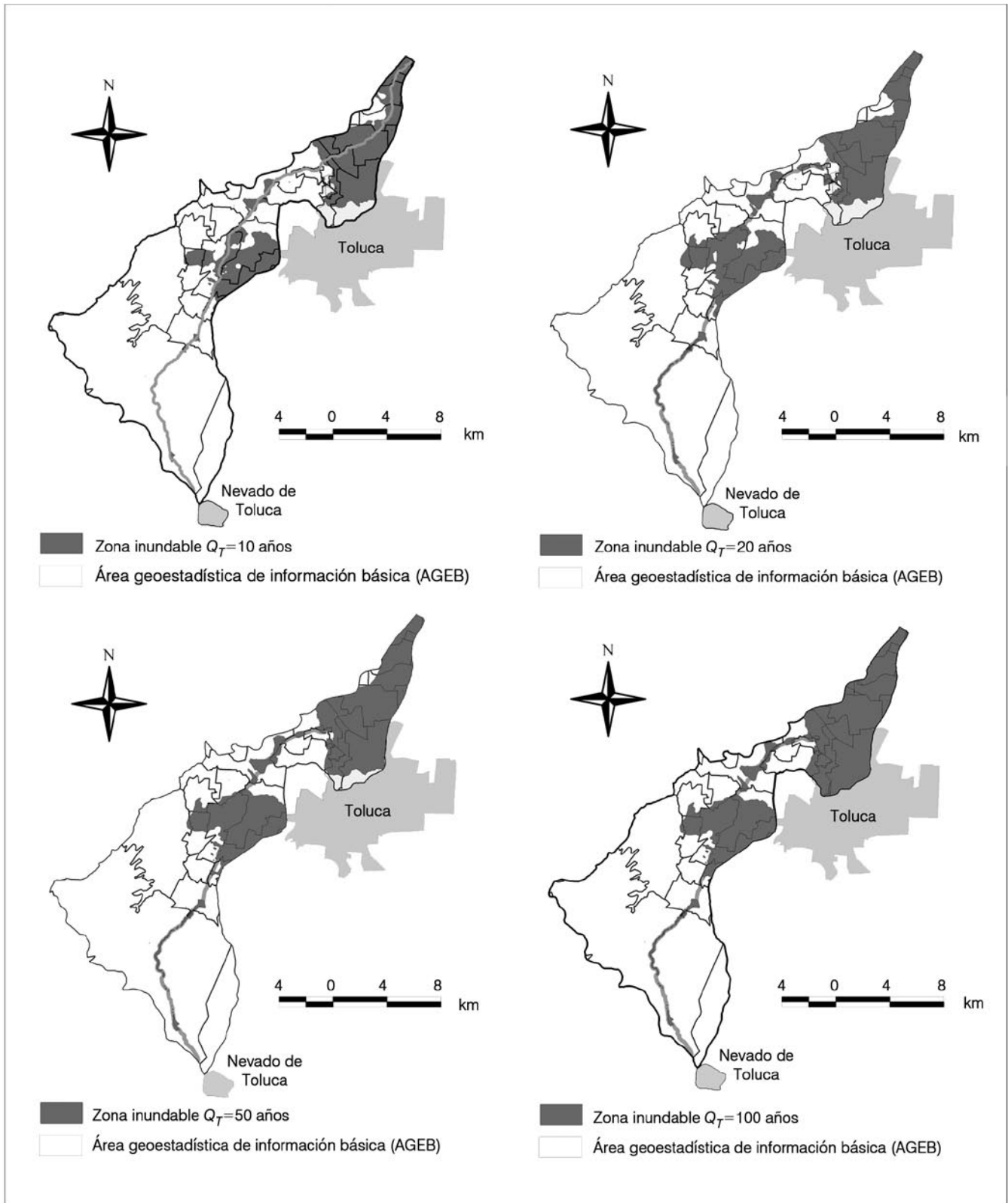
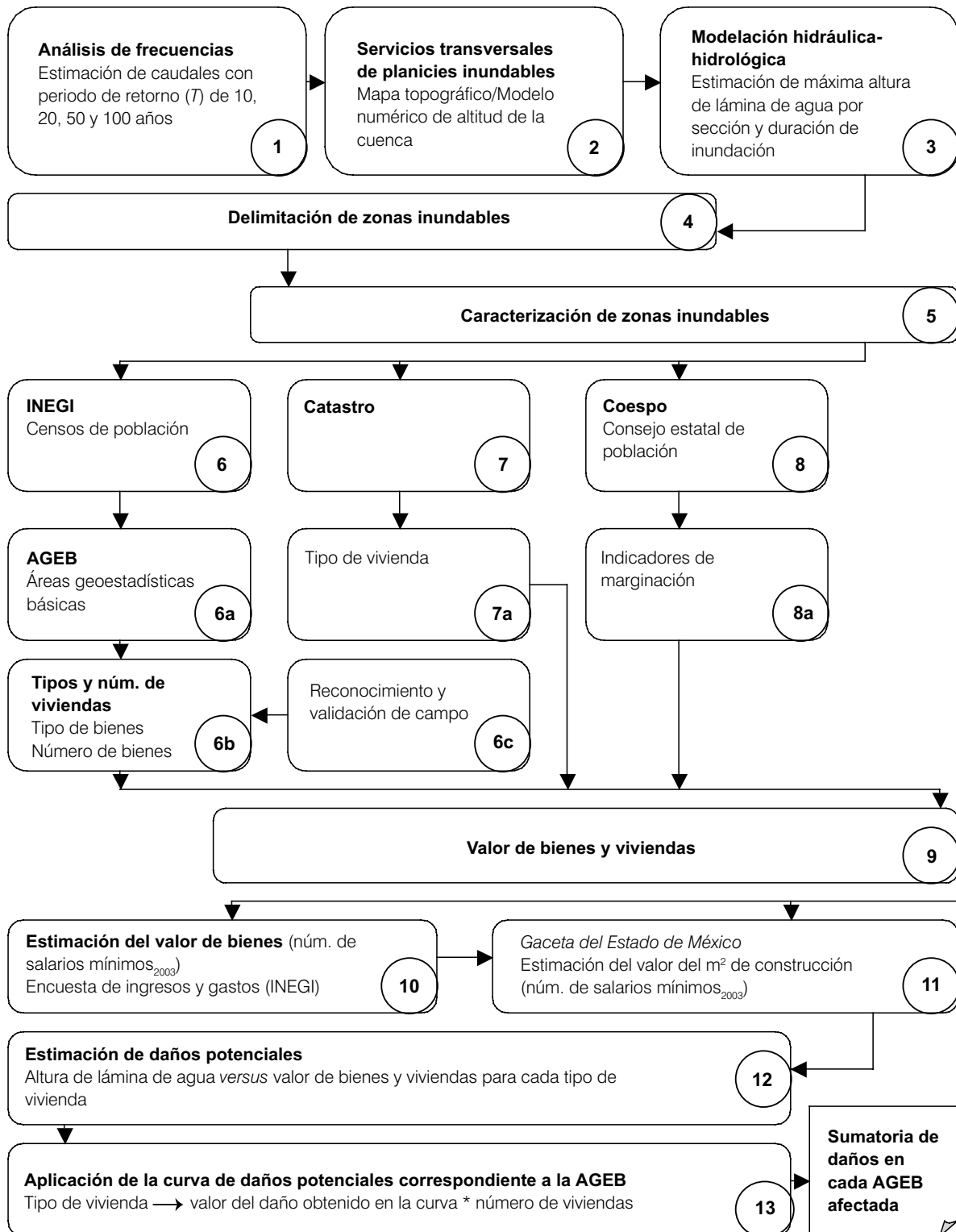


Ilustración 3. Desarrollo conceptual de la propuesta metodológica para la estimación de daños potenciales causados por inundaciones en zonas habitacionales. Daños directos. (Coespo: Consejo Estatal de Población; INEGI: Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática).



Caracterización de las zonas habitacionales

En la ilustración 3 se presentan esquemáticamente las etapas llevadas a cabo para la caracterización de las zonas habitacionales. La información demográfica fue obtenida del INEGI (2000) y del Consejo Estatal de Población (Coespo, 2001); a partir del Sistema para la Consulta de Información Censal SCINCE 2000 (INEGI, 2002a) se establecieron cuáles áreas geoestadísticas de información básica (AGEB) quedaban incluidas dentro de las zonas inundables. Para cada AGEB se consideró información sobre número y características de viviendas, tipos y número de bienes, variables validadas con muestreos aleatorios en recorridos de campo.

Con esta información fue posible identificar la clase o clases de viviendas que se ubican en las zonas inundables para cada AGEB en particular con base en los criterios establecidos en la *Gaceta del Estado de México* (1998) para definir las características de cada clase de vivienda. Asimismo, se estableció el valor de cada clase de vivienda teniendo en cuenta los valores unitarios de construcción (\$/m²) para cada una de estas clases (*Gaceta del Estado de México*, 2002).

Con base en el valor de los bienes incluidos para cada clase de vivienda y el valor de cada una de éstas, se construyeron las curvas de daños potenciales directos en zonas habitacionales, las cuales se pueden consultar en Baró (2004) y Baró *et al.* (2007).

Una vez identificadas las clases de viviendas afectadas y su curva de daños correspondiente, es posible estimar el daño tangible directo potencialmente causado en una vivienda por una inundación de una determinada altura de lámina de agua para un periodo de retorno dado. Con este valor de daños directos en una vivienda se calcula el número total de viviendas afectadas por AGEB, de modo que el daño económico calculado para una vivienda se multiplica por el número de viviendas afectadas en cada AGEB. Finalmente se agregan los daños determinados en cada AGEB para obtener el daño total en zonas habitacionales.

Caracterización de las zonas agrícolas

En la ilustración 4 se presentan de forma esquemática las etapas llevadas a cabo para la caracterización de las zonas agrícolas. Así, una vez definidas las áreas inundables con el empleo de los resultados del tránsito de avenidas para los diferentes periodos de retorno, se hizo un recorrido de campo para validar los tipos de cultivos predominantes en la cuenca y específicamente para estas áreas. De manera particular, durante la época de inundaciones (mayo a noviembre), se

comprobó que el cultivo fundamental es el de maíz en grano, información corroborada con datos históricos de producción agrícola en la región (INEGI, 2002b; Sagarpa, 2002; Sedagro, 2002). Lo anterior permitió conocer la superficie sembrada en hectáreas de maíz en grano bajo riego y de temporal en el Distrito de Desarrollo Rural de Toluca, donde se localiza la zona de estudio, y el volumen en toneladas que se produce para cada uno de los sistemas de cultivo. Por otro lado, se obtuvo información económica en el *Anuario Estadístico del Estado de México* (INEGI, 2002b) para establecer el valor de la producción por hectárea de maíz en grano tanto bajo riego como de temporal.

Se desarrolló una investigación bibliográfica sobre las afectaciones de los cultivos por efecto de las inundaciones, estableciéndose el grado de daño del cultivo en función del desarrollo biológico de la planta la altura de la lámina de agua y la duración de la inundación (para mayores detalles sobre los efectos de las inundaciones sobre el cultivo del maíz, se sugiere al lector consultar Lafitte, 2001).

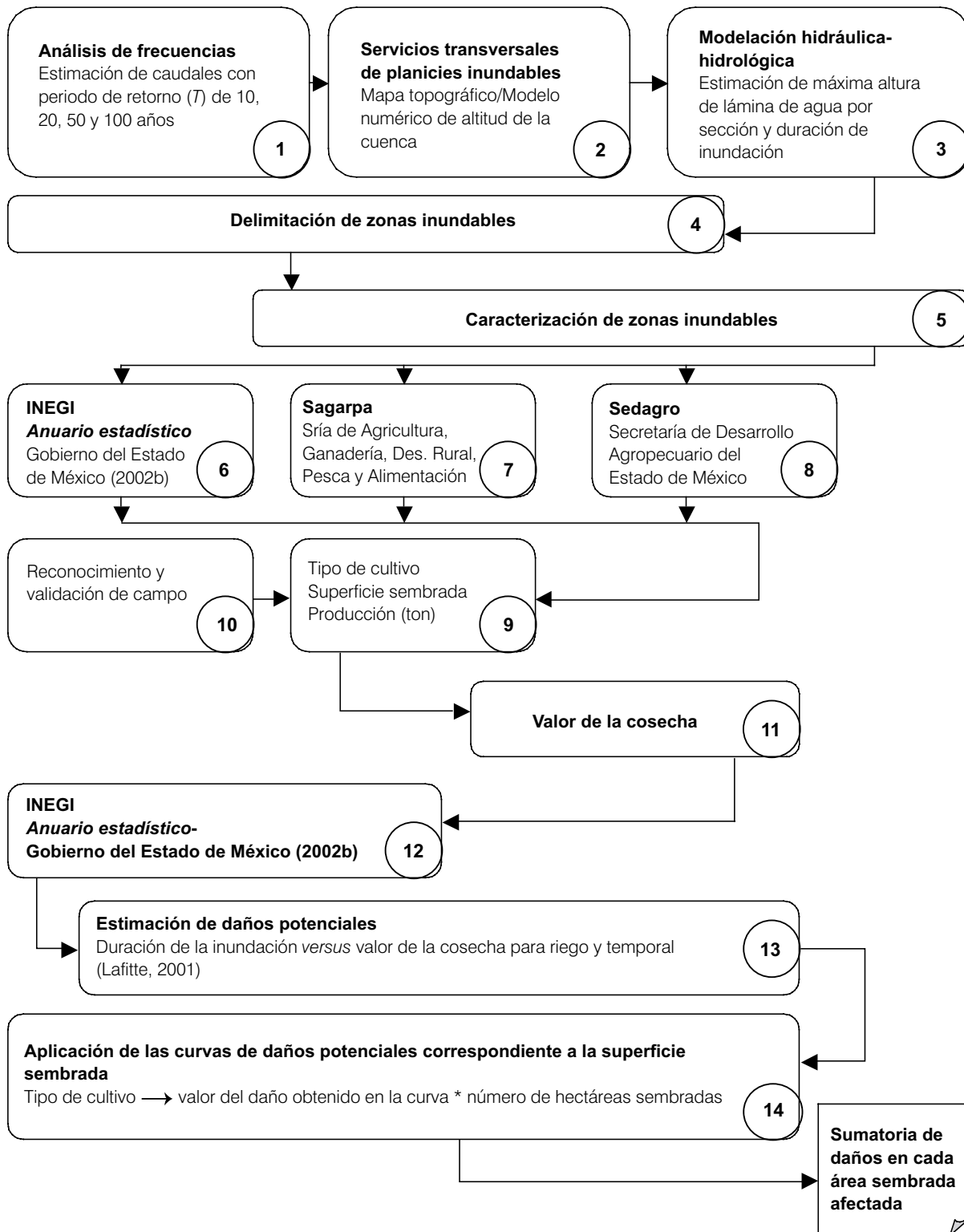
Con la información obtenida se procedió a la construcción de las curvas de daños potenciales para el cultivo de maíz tanto de riego como de temporal. En este caso se establecieron las curvas de daños-duración de la inundación para el maíz en grano (para mayor información sobre la construcción de estas curvas consultar Baró *et al.*, 2007).

Para el análisis de costos, con base en el periodo de mayor probabilidad de ocurrencia de este tipo de eventos hidrológicos en la región, se consideró una duración hipotética de la inundación de tres días y un desarrollo del cultivo mayor de 30 cm para estimar los daños tangibles directos en una hectárea bajo riego o bien de temporal. Conocida la cuantía de los daños por hectárea, se multiplicó por el número total de hectáreas cultivadas potencialmente afectadas. Posteriormente se realizó la sumatoria de todos los daños para obtener el total de los daños tangibles directos en zonas agrícolas.

En la estimación de daños tangibles indirectos se utilizaron los porcentajes de ponderación, comúnmente utilizados, mismos que han sido propuestos por Kates (1965). El valor de este porcentaje de ponderación para el caso de zonas habitacionales es del 15% y para las agrícolas, del 10% del valor de los daños tangibles directos.

Es importante señalar que el trabajo de investigación requirió de una gran diversidad de información, por lo que fue necesario utilizar un sistema de información geográfica (SIG) (Díaz-Delgado *et al.*, 1998, 2004) para el correcto procesamiento de datos y análisis en las diferentes etapas realizadas.

Ilustración 4. Desarrollo conceptual de la propuesta metodológica para la estimación de daños potenciales causados por inundaciones en zonas agrícolas. Daños directos (Sagarpa: Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación; INEGI: Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática).



Resultados y discusión

Características de la zona de estudio

El río Tejalpa tiene sus orígenes en las laderas del Nevado de Toluca para finalmente desembocar en el río Lerma. Esta subcuenca tiene una extensión de 242.8 km² y abarca parte de los municipios de San Miguel Zinacantepec, Toluca, Oztolotepec y Almoloya de Juárez (ilustración 1). Como característica primordial hay que resaltar el hecho de que esta subcuenca es eminentemente agrícola, ya que el 55.07% de suelo está dedicado al cultivo, mientras que las áreas urbanas ocupan tan sólo el 15.22% del total de la superficie (INEGI, 2003). De esta subcuenca se dispone de información referente a los caudales para diferentes periodos de retorno (cuadro 1) y la altura de la lámina de agua en las zonas inundables para los diferentes periodos de retorno (Vega 1999; Díaz-Delgado y Vega, 2001).

Para cada uno de los caudales estudiados se estableció la superficie potencialmente afectada por efecto de la inundación (ilustración 2). Con objeto de llevar a cabo la estimación de esta superficie, se tomó como base el mapa de uso del suelo elaborado por el INEGI en el año 2003.

En el cuadro 2 se presenta la superficie potencialmente afectada según el uso del suelo para los periodos de retorno (T) de 10, 20, 50 y 100 años. En este cuadro se puede comprobar cómo los usos de suelo más afectados para cualquier periodo de retorno son, en primer lugar, el de agricultura bajo riego, en segundo lugar el de agricultura de temporal y, finalmente, el suelo urbano. El resto de usos del suelo no presenta grandes afectaciones, ya que se obtienen porcentajes inferiores al 1%. La diferencia de superficie afectada entre los periodos de retorno estudiados para toda la cuenca es mínima, ya que para un $T=10$ años, la superficie total afectada es de 52.0 km² y para $T=100$ años es de 57.2 km².

Daños tangibles en zonas habitacionales

En primer término se localizaron las AGEB que se enmarcan dentro de la zona de estudio (ilustración 2), para lo cual se utilizó un mapa obtenido del SCINCE (INEGI, 2002a), y que se exportó al SIG, donde se sobrepuso en cada uno de los mapas donde se delimitaban las zonas inundadas para un caudal con un periodo de retorno de 10, 20, 50 y 100 años, respectivamente (ilustración 2).

Las AGEB, dentro de las cuales se identifican zonas inundables, corresponden a las localidades de Calixtlahuaca, en el municipio de Toluca; San Juan de las Huertas y San Miguel de Zinacantepec, en el municipio de Zinacantepec, y finalmente San Francisco Tlacilalcalpan, localidad perteneciente al municipio de Almoloya de Juárez. En el cuadro 3 se muestran tanto la unidad geográfica correspondiente a cada localidad como el número de identificación de las AGEB afectadas por localidad.

Para establecer el número de viviendas afectadas por inundación, primero se tomó en cuenta la superficie total de la AGEB y el número total de viviendas existentes en cada una de éstas, y se supuso una distribución uniforme de las viviendas. A partir de estos datos se calculó el número de viviendas correspondientes a una superficie dada, superficie cuya área equivale a la superficie inundada dentro de los límites de la AGEB. Los resultados obtenidos se muestran en el cuadro 4.

Para conocer la clase de vivienda afectada en cada AGEB, se extrajo del SCINCE (INEGI, 2002a) la información referida a los indicadores censales 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, lo cual también fue validado en recorridos de campo. Por lo anterior, la ecuación aplicable corresponde a la curva de daños potenciales en zonas habitacionales para la clase de vivienda económica (Baró *et al.*, 2007)

Cuadro 3. Identificación de las áreas geoestadísticas de información básica (AGEB) localizadas en zonas inundables. Caso de la subcuenca del río Tejalpa.

| Unidad geográfica | Municipio | Localidad | AGEB |
|-------------------|--------------------|------------------------------|-------|
| 151060044 | Toluca | Calixtlahuaca | 175-2 |
| 151180001 | Zinacantepec | San Miguel Zinacantepec | 008-3 |
| 151180001 | Zinacantepec | San Miguel Zinacantepec | 007-9 |
| 151180001 | Zinacantepec | San Miguel Zinacantepec | 010-0 |
| 151180001 | Zinacantepec | San Miguel Zinacantepec | 011-5 |
| 151180058 | Zinacantepec | San Juan de las Huertas | 005-A |
| 150050032 | Almoloya de Juárez | San Francisco Tlacilalcalpan | 014-5 |

Cuadro 4. Superficie inundada en cada localidad identificada y número de viviendas afectadas para cada uno de los periodos de retorno definidos. Caso de la subcuenca del río Tejalpa.

| <i>T</i> años | Localidad | Área total de las AGEB km ² | Número total de viviendas en las AGEB | Área inundada km ² | Número de viviendas afectadas |
|------------------|------------------------------|--|---|-------------------------------------|-------------------------------------|
| 10 | Calixtlahuaca | 1.41 | 1,574 | 0.04 | 45 |
| | San Miguel Zinacantepec | 13.49 | 8,607 | 1.65 | 1,053 |
| | San Juan de las Huertas | 1.84 | 2,105 | 0.09 | 103 |
| | Total | 16.74 | 12,286 | 1.78 | 1,200 |
| 20 | Calixtlahuaca | 1.41 | 1,574 | 0.04 | 45 |
| | San Miguel Zinacantepec | 13.49 | 8,607 | 1.67 | 1,062 |
| | San Francisco Tlacilalcalpan | 4.29 | 2,018 | 0.03 | 14 |
| | San Juan de las Huertas | 1.84 | 2,105 | 0.10 | 109 |
| Total | 21.03 | 14,304 | 1.83 | 1,229 | |
| 50 | Calixtlahuaca | 1.41 | 1,574 | 0.05 | 52 |
| | San Miguel Zinacantepec | 13.49 | 8,607 | 1.68 | 1,069 |
| | San Francisco Tlacilalcalpan | 4.29 | 2,018 | 0.04 | 20 |
| | San Juan de las Huertas | 1.84 | 2,105 | 0.21 | 240 |
| Total | 21.03 | 14,304 | 1.98 | 1,382 | |
| 100 | Calixtlahuaca | 1.41 | 1,574 | 0.30 | 329 |
| | San Miguel Zinacantepec | 13.49 | 8,607 | 1.68 | 1,070 |
| | San Francisco Tlacilalcalpan | 4.29 | 2,018 | 0.05 | 25 |
| | San Juan de las Huertas | 1.84 | 2,105 | 0.06 | 65 |
| Total | 21.03 | 14,304 | 2.08 | 1,489 | |

$$DDHe = 1016.6 \ln(h) + 2030.7 \quad (1)$$

donde DDHe son los daños directos potenciales para una clase de vivienda económica en número de salarios mínimos y *h* es la altura de lámina de agua.

El empleo de la ecuación (1) en todas las zonas habitacionales inundadas dentro de los límites de cada AGEB requirió del conocimiento de la altura máxima de lámina de agua alcanzada. Para obtener el valor de la altura máxima de lámina de agua alcanzada, se identificaron aquellas secciones del río que se localizaban en estas zonas inundadas (ilustración 5), ya que para estas secciones se tienen previamente calculadas las láminas de agua para cada caudal, con un periodo de retorno de 10, 20, 50 y 100 años (Vega, 1999). Los valores de altura de lámina de agua obtenidos de las secciones localizadas en las zonas inundadas se promediaron para cada una de las zonas afectadas dentro de los límites de cada AGEB, siendo este valor promedio de altura de lámina de agua el que se utilizó para establecer los daños económicos con base en la ecuación de la curva de daños para vivienda económica.

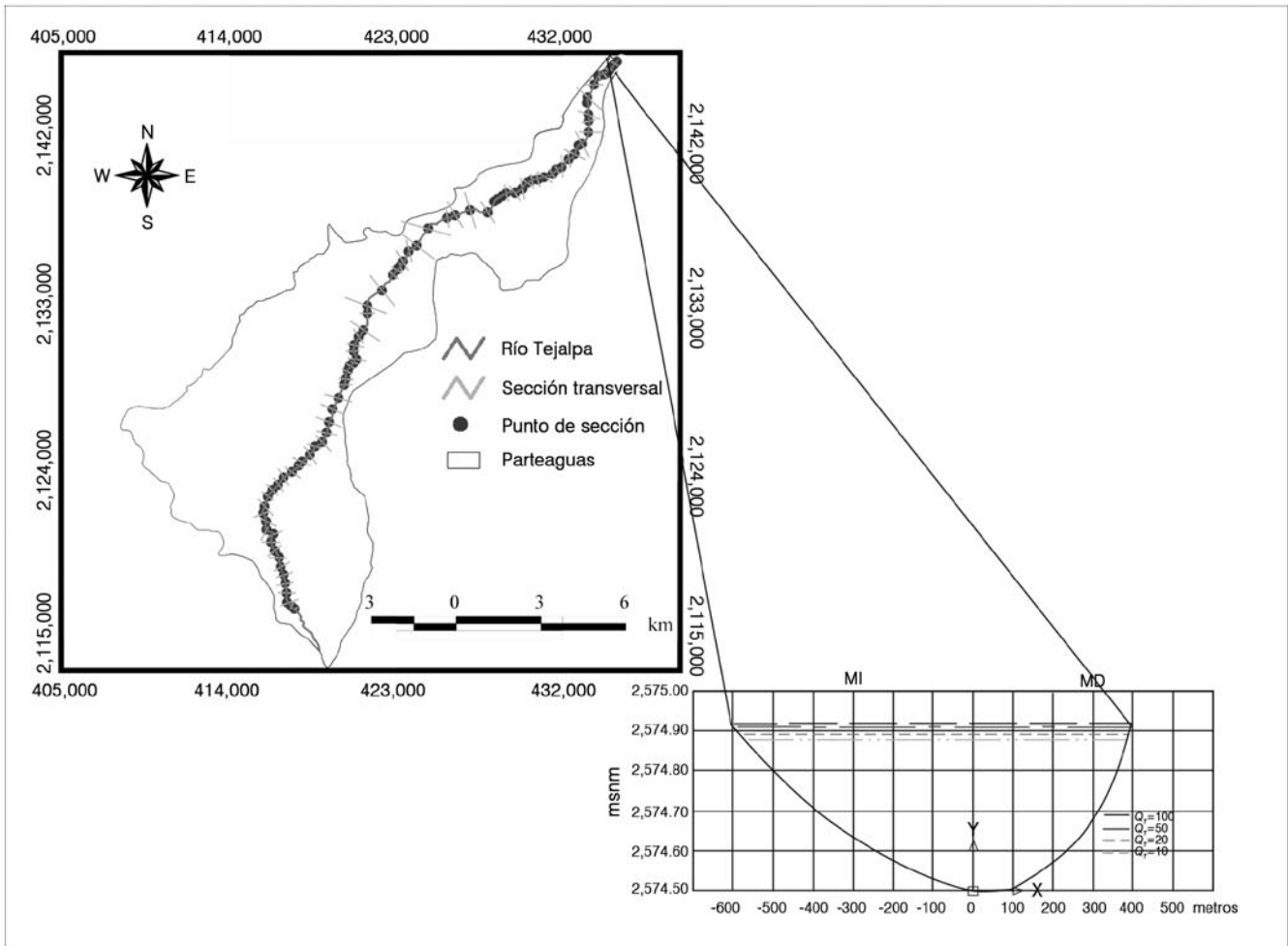
El siguiente paso fue multiplicar el valor del daño

obtenido para una vivienda dada y para una altura de lámina de agua determinada por el número total de viviendas afectadas en cada localidad, valor que se tomó del cuadro 4, obteniéndose así los daños directos totales en zonas habitacionales para cada localidad. Los resultados obtenidos se muestran en el cuadro 5, donde se presenta la altura de lámina de agua considerada para cada periodo de retorno y para cada localidad, el valor del daño ocasionado en una vivienda en número de salarios mínimos₂₀₀₃ (CNSM, 2002) y los daños directos totales alcanzados para cada localidad y periodo de retorno en número de salarios mínimos₂₀₀₃.

En el cuadro 5 se puede apreciar, igualmente, que el incremento en la altura de la lámina de agua provoca consecuentemente un mayor daño económico en la vivienda; así, por ejemplo, el daño de una vivienda localizada en Calixtlahuaca se valora en 1,640 salarios mínimos₂₀₀₃ para un periodo de retorno de diez años (1.30 m de lámina de agua) y en 2,727 número de salarios mínimos₂₀₀₃ para un periodo de retorno de cien años (1.60 m de lámina de agua).

A continuación, cada uno de los valores correspondientes al daño de una vivienda se multiplicó

Ilustración 5. Ubicación de las secciones transversales de la subcuenca del río Tejalpa para las cuales fue calculada la lámina de agua alcanzada para cada periodo de retorno y sección 3 con sus niveles de agua correspondientes.



por el número de viviendas afectadas en cada localidad (cuadro 4), para de esta forma calcular los daños potenciales totales directos para el caso de las zonas habitacionales. Estos daños oscilaron entre 2,822,852 salarios mínimos₂₀₀₃, para un caudal, con un periodo de retorno de diez años, y 3,814,085 salarios mínimos₂₀₀₃, para un caudal con un periodo de retorno de cien años (cuadro 5), lo que supone un incremento de prácticamente 100,000 salarios mínimos₂₀₀₃.

Para la estimación de los daños indirectos se consideró un factor de ponderación del 15% con respecto a los directos (Kates, 1965). Los resultados se presentan en el cuadro 5, donde se puede comprobar que los daños indirectos variaron entre 423,428 salarios mínimos₂₀₀₃ para un caudal con un periodo de retorno de diez años, y 572,113 salarios mínimos₂₀₀₃ para un caudal con un periodo de retorno de cien años.

Daños tangibles en zonas agrícolas

Las zonas agrícolas se localizan en la parte baja de la cuenca, por lo tanto, cuando se produce una inundación, una gran superficie de éstas es afectada. Un alto porcentaje de las zonas agrícolas potencialmente afectadas corresponde a la agricultura bajo riego, ya que del total de la superficie inundada representa, en promedio, el 62%, mientras que la agricultura de temporal representa un 28% (cuadro 2).

En estas zonas agrícolas se consideró que el cultivo, en este caso maíz de grano bajo riego y temporal, tendría una altura de planta mayor de 30 cm, y que la inundación tendría una duración de tres días, dado que esta combinación de duración y altura de cultivo suele coincidir con la época de posibles crecidas máximas en la región. Para este caso, las ecuaciones de las curvas

Cuadro 5. Daños económicos potenciales directos e indirectos en zonas habitacionales para los diferentes periodos de retorno. Caso de la subcuenca del río Tejalpa (núm. S.M₂₀₀₃: número de salarios mínimos₂₀₀₃).

| <i>T</i> años | Localidad | Altura de la lámina de agua m | Daños directos por vivienda núm. S.M ₂₀₀₃ /vivienda | Daños directos totales núm. de S.M ₂₀₀₃ | Daños indirectos totales (15%) núm. de S.M ₂₀₀₃ |
|------------------|------------------------------|--|---|--|--|
| 10 | Calixtlahuaca | 1.3 | 2,524.7 | 112,733 | |
| | San Miguel Zinacantepec | 1.2 | 2,413.9 | 2,541,226 | |
| | San Juan de las Huertas | 0.6 | 1,640.3 | 168,893 | |
| | Total | | | 2,822,852 | 423,428 |
| 20 | Calixtlahuaca | 1.5 | 2,666.8 | 119,077 | |
| | San Miguel Zinacantepec | 1.2 | 2,468.5 | 2,622,298 | |
| | San Francisco Tlacilalcalpan | 1.2 | 2,468.5 | 33,674 | |
| | San Juan de las Huertas | 0.6 | 1,695.6 | 184,281 | |
| Total | | | 2,959,330 | 443,900 | |
| 50 | Calixtlahuaca | 1.5 | 2,703.2 | 141,826 | |
| | San Miguel Zinacantepec | 1.3 | 2,516.2 | 2,690,674 | |
| | San Francisco Tlacilalcalpan | 1.3 | 2,516.2 | 50,896 | |
| | San Juan de las Huertas | 0.7 | 1,765.2 | 424,078 | |
| Total | | | 3,307,473 | 496,121 | |
| 100 | Calixtlahuaca | 1.6 | 2,727.9 | 898,346 | |
| | San Miguel Zinacantepec | 1.3 | 2,557.9 | 2,736,861 | |
| | San Francisco Tlacilalcalpan | 1.3 | 2,557.9 | 63,770 | |
| | San Juan de las Huertas | 0.7 | 1,765.2 | 115,107 | |
| Total | | | 3,814,085 | 572,113 | |

de daños potenciales directos por inundación aplicadas fueron las siguientes (Baró, 2004; Baró *et al.*, 2007):

Maíz grano temporal $DDAmgt=86.742\ln(t)-17.483$ (2)

Maíz grano bajo riego $DDAmgr=110.17\ln(t)-22.204$ (3)

Donde $DDAmgt$ representan los daños directos para el cultivo de maíz de grano en temporal y $DDAmgr$, los daños directos potenciales para el mismo cultivo, pero bajo riego. El parámetro t representa la duración de la inundación. Los resultados obtenidos se presentan en el cuadro 6. Así pues, se obtiene que los daños directos por hectárea tienen un valor que varía entre 85.9 salarios mínimos₂₀₀₃/ha en zonas bajo riego y 67.7 salarios mínimos₂₀₀₃/ha en zonas de temporal.

Si estos daños económicos por hectárea se multiplican por el número de hectáreas cultivadas potencialmente afectadas se obtienen los daños totales directos en zonas agrícolas (cuadro 6). Estos daños serían de 392,540 salarios mínimos₂₀₀₃, para un caudal con un periodo de retorno de diez años, y de 429,162 salarios mínimos₂₀₀₃ para un caudal con un periodo de retorno

de cien años. Para el caso de los daños económicos potenciales indirectos, nuevamente se utiliza el factor de ponderación sugerido por Kates (1965) del 10% sobre el valor de los directos (cuadro 6). Los resultados manifiestan que estos daños indirectos oscilan entre 39,254 salarios mínimos₂₀₀₃ y 42,916 salarios mínimos₂₀₀₃, para caudales con periodos de retorno de diez y cien años, respectivamente.

Daños totales

Con los valores obtenidos (cuadros 5 y 6), se efectúa la suma total (cuadro 7), de forma que se pueden cifrar los daños totales tangibles para la subcuenca del río Tejalpa entre los 3,678,074 salarios mínimos₂₀₀₃ para un periodo de retorno de diez años, y los 4,329,375 salarios mínimos₂₀₀₃, en el caso particular de una inundación correspondiente a un periodo de retorno de cien años. Si estas cifras se distribuyen según se trate de zonas habitacionales o zonas agrícolas, se comprueba que el 88% de los daños correspondería a zonas habitacionales,

Cuadro 6. Daños económicos potenciales directos e indirectos en zonas agrícolas por hectárea y por total de la zona inundada. Caso de la subcuenca del río Tejalpa (núm. S.M₂₀₀₃.: número de salarios mínimos₂₀₀₃).

| <i>T</i> años | Uso del suelo | Daños directos por hectárea núm. de S.M. ₂₀₀₃ /ha | Superficie inundada ha | Daños directos totales núm. de S.M. ₂₀₀₃ * | Daños indirectos totales (10%) núm. de S.M. ₂₀₀₃ * |
|------------------|---|---|---------------------------|--|--|
| 10 | Agricultura de riego, con cultivo anual, sin erosión | 85.9 | 3,371.4 | 289,779 | |
| | Agricultura de temporal, con cultivo anual, con erosión | 67.7 | 16.7 | 1,130 | |
| | Agricultura de temporal, con cultivo anual, sin erosión | 67.7 | 1,501.7 | 101,631 | |
| | Total | | 4,889.8 | 392,540 | 39,254 |
| 20 | Agricultura de riego, con cultivo anual, sin erosión | 85.9 | 3,540.7 | 304,331 | |
| | Agricultura de temporal, con cultivo anual, con erosión | 67.7 | 26.8 | 1,814 | |
| | Agricultura de temporal, con cultivo anual, sin erosión | 67.7 | 1,644.6 | 111,302 | |
| | Total | | 5,212.1 | 417,447 | 41,745 |
| 50 | Agricultura de riego, con cultivo anual, sin erosión | 85.9 | 3,590.3 | 308,594 | |
| | Agricultura de temporal, con cultivo anual, con erosión | 67.7 | 41.4 | 2,802 | |
| | Agricultura de temporal, con cultivo anual, sin erosión | 67.7 | 1,698.2 | 114,929 | |
| | Total | | 5,329.9 | 426,326 | 42,633 |
| 100 | Agricultura de riego, con cultivo anual, sin erosión | 85.9 | 3,595.9 | 309,076 | |
| | Agricultura de temporal, con cultivo anual, con erosión | 67.7 | 55.2 | 3,736 | |
| | Agricultura de temporal, con cultivo anual, sin erosión | 67.7 | 1,719.2 | 116,351 | |
| | Total | | 5,370.3 | 429,162 | 42,916 |

Cuadro 7. Daños económicos potenciales en zonas habitacionales y agrícolas para caudales con diferentes periodos de retorno. Caso de la subcuenca del río Tejalpa (núm. S.M₂₀₀₃.: número de salarios mínimos₂₀₀₃).

| <i>T</i> años | Uso del suelo | Daños directos núm. de S.M. ₂₀₀₃ * | Daños Indirectos núm. de S.M. ₂₀₀₃ * | Daños Totales núm. de S.M. ₂₀₀₃ * | Porcentaje |
|------------------|---------------|--|--|---|------------|
| 10 | Habitacional | 2,822,852 | 423,428 | 3,246,280 | 88% |
| | Agrícola | 392,540 | 39,254 | 431,795 | 12% |
| | Total | | | 3,678,074 | |
| 20 | Habitacional | 2,959,330 | 443,900 | 3,403,230 | 88% |
| | Agrícola | 417,447 | 41,745 | 459,191 | 12% |
| | Total | | | 3,862,421 | |
| 50 | Habitacional | 3,307,473 | 496,121 | 3,803,594 | 89% |
| | Agrícola | 426,326 | 42,633 | 468,958 | 11% |
| | Total | | | 4,272,552 | |
| 100 | Habitacional | 3,354,171 | 503,126 | 3,857,297 | 89% |
| | Agrícola | 429,162 | 42,916 | 472,078 | 11% |
| | Total | | | 4,329,375 | |

y sólo el 12% a zonas agrícolas para caudales con periodos de retorno de diez y veinte años; mientras que para caudales con periodos de retorno de cincuenta y cien años, el porcentaje para zona habitacional sería del 89% y para zona agrícola del 11%. Hay que destacar que a pesar de que la extensión de la superficie inundada es mucho menor en zonas habitacionales que en zonas agrícolas, los daños en zonas habitacionales son mayores, ya que el valor de los cultivos es muy bajo, por lo que los daños son menores.

Conclusiones

La evaluación de las condiciones socioeconómicas en la subcuenca del río Tejalpa indica que la población de las zonas inundables es de bajos recursos, por lo tanto sus viviendas y bienes son de baja calidad. Sin embargo, las afectaciones por inundación resultan ser muy importantes desde el punto de vista social, aunque los daños económicos aparentemente no son tan elevados, se afecta un porcentaje significativo de sus habitantes.

Por otro lado, la construcción de las curvas de daños tangibles directos potenciales provocados por una inundación en una vivienda de tipo económica ha permitido evaluar, por medio de un modelo matemático de tipo regresivo, el daño potencialmente ocasionado sobre la vivienda y sus bienes para una inundación de una determinada altura máxima de lámina de agua alcanzada.

En el caso de las zonas agrícolas, el cultivo más frecuente en la república mexicana es el maíz (grano). Las curvas de daños tangibles directos potenciales para este cultivo se han estimado en función de su suministro hídrico, es decir, bajo riego o de temporal, y de la duración de la crecida, y considerando que la planta de maíz tenga una altura superior a 30 cm. Si la altura es menor, se consideraría una pérdida total del cultivo, sea cual sea la duración de la inundación (Lafitte, 2001).

La aplicación de esta metodología en el caso de la subcuenca del río Tejalpa ha permitido poner en evidencia que los daños tangibles en zonas habitacionales representan el 88-89% del total de daños, mientras que las zonas agrícolas sólo representan el 11-12%, por lo que las medidas estructurales y no estructurales deberían, para esta cuenca, estar orientadas en términos de costo-beneficio en la prevención de daños de las zonas habitacionales potencialmente afectadas.

Se considera igualmente que la presente propuesta metodológica de estimación de daños económicos provocados por inundaciones en zonas habitacionales y agrícolas puede ser la base de un procedimiento estandarizado y automatizado aplicable en cualquier

región hidrológica del país, contando, para cada región en estudio, con una base de datos de las características de la región y con modelos hidráulicos-hidrológicos que permitan el análisis de las inundaciones que podrían acaecer.

Finalmente, se considera que esta metodología es congruente, estructurada y fácilmente integrable a los pasos propuestos por Helweg (1992) para el análisis de la pérdida promedio anual por inundación (PPAI), procedimiento ampliamente utilizado para la evaluación del costo-beneficio de medidas de control de inundaciones.

Agradecimientos

Los autores desean expresar su más sincero agradecimiento a todas aquellas personas que han permitido el desarrollo de este trabajo de investigación. Igualmente se agradece el apoyo de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) por la beca de posgrado otorgada.

Recibido: 24/08/2005

Aprobado: 27/09/2006

Referencias

- APARICIO, J. *Hydrology of the Lerma-Chapala Watershed*. Hansen, A.M. y van Afferden (editores). *The Lerma Chapala watershed. Evolution and management*. New York: Kluwer Academic/Plenum Publishers, 2001, pp. 3-30.
- BARÓ, J.E. *Estimación de las curvas de daños económicos potenciales por inundación en zonas agrícolas y habitacionales, caso de estudio: subcuenca del río Tejalpa – curso alto del río Lerma*. Tesis de maestría. México, D.F.: Facultad de Filosofía y Letras, Posgrado en Geografía, Universidad Nacional Autónoma de México, 2004, 200 pp.
- BARÓ, J.E., DÍAZ-DELGADO, C., CALDERÓN, G. y ESTELLER, M.V. Curvas de daños económicos provocados por inundaciones en zonas habitacionales y agrícolas de México Parte I: Propuesta metodológica. *Ingeniería hidráulica en México*. Vol. XXII, núm. 1, 2007, pp. 91-102.
- BOYLE, S.J., TSANIS, I.K. y KANAROGLOU, P.S. Developing Geographic Information Systems for land use impact assessment in flooding conditions. *Journal of Water Resources Planning and Management*. Vol. 124, 1998, pp. 89-98.
- BREMER, M.H. y LARA C.A. *Proyecto de Atlas de Riesgo de Inundación de la Ciudad de Monterrey*. Reporte ITESM. México, D.F.: ITESM, Campus Monterrey, 2001.
- CNSM. *Salarios mínimos y zonas geográficas*. [en línea]. Comisión Nacional de Salarios Mínimos. <http://www.cnsm>.

- org.m. Fecha de consulta: 25 de junio de 2003.
- COESPO. *Índices de marginación: regional, municipal y por localidad*. México, D.F.: Gobierno del Estado de México-Consejo Estatal de Población del Estado de México, 2001.
- DÍAZ-DELGADO, C., BÂ, K.M., ESTELLER, M.V. y GARCÍA-ARAGÓN, J.A. *Sistema de Información Geográfica para el Análisis Geográfico-Hidrológico del Curso Alto del Río Lerma*. SIGCARL [en línea]. 1998 (citado el 10 de febrero del 2002). Disponible para World Wide Web: <http://www.uaem.mx/ceninv/cirha>.
- DÍAZ-DELGADO, C., QUENTIN, E., MAYA, R., ALBITER, R., BÂ, K. y ESTELLER, M.V. *Sistema de información para las Cuencas Hidrológicas del Estado de México* (SICHEM Versión 1.0). Laboratorio de Hidrogeomática del Centro Interamericano de Recursos del Agua. Facultad de Ingeniería, UAEM, 2004. **OJO AUTOR, FALTA CIUDAD DE EDICIÓN.**
- DÍAZ-DELGADO, C. y VEGA, G. Análisis de gran visión de las inundaciones en la Cuenca Alta del Río Lerma: caso de la Subcuenca del Río Tejalpa, Estado de México. *Ingeniería Hidráulica en México*. Vol. XVI, núm. 1, 2001, pp. 73-86.
- ECGL. *Watershed Modeling System 5.0. User's Manual*. Engineering Computer Graphics Laboratory, 1997. **OJO AUTOR, FALTA CIUDAD DE EDICIÓN.**
- GACETA DEL ESTADO DE MÉXICO. Periódico Oficial del Gobierno Constitucional del Estado de México. Tomo CLXVI No.113. *Decreto No. 76 con el que se aprueban las cuadros de valores actualizadas para la determinación de los valores unitarios de suelo y construcción para 1999*. Gobierno del Estado de México, 1998. **OJO AUTOR, FALTA CIUDAD DE EDICIÓN.**
- GACETA DEL ESTADO DE MÉXICO Periódico Oficial del Gobierno Constitucional del Estado de México. Tomo CLXXIV No. 109. *Decreto No. 103 con el que se aprueban las cuadros de valor para la determinación de valores unitarios de suelos y construcción para el año 2003*. Gobierno del Estado de México, 2002. **OJO AUTOR, FALTA CIUDAD DE EDICIÓN.**
- HELWEG, O.J. *Recursos hidráulicos – planeación y administración*. México, D.F.: Editorial Limusa, S.A. de C.V., 1992, pp. 121-174.
- INEGI. *XII Censo de Población y Vivienda*. México, D.F.: Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. Gobierno de la Federación, 2000.
- INEGI. *SCINCE Sistema para la consulta de Información Censal 2000 en CD*. México, D.F.: Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática, 2002a.
- INEGI. *Anuario Estadístico del Estado de México*. Edición 2002. México, D.F.: Gobierno del Estado de México-Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática, 2002b.
- INEGI. *Mapa de usos de suelo y vegetación*. México, D.F.: Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática, 2003.
- JAMES, L.D. y LEE, R.R. *Economics of Water Resources Planning*. New York: McGraw-Hill, 1971.
- KATES, R.W. *Industrial Flood Losses: Damage estimation in the Lehigh Valley*. Chicago: University of Chicago, Department of Geography Research Paper No. 98. The University of Chicago Press, 1965.
- LAFITTE, H.R. Estrés abióticos que afectan al maíz. Paliwal, R.L., Granados, G., Lafitte, H.R. y Violiv, A.D. (editores). *El maíz en los trópicos: Mejoramiento y producción*. Colección FAO Producción y Protección Vegetal. Roma: FAO, 2001.
- PERALTA, L. y SALAZAR, M. *Zonificación de áreas susceptibles a inundaciones en la Cuenca del Río Tejalpa*. Tesis de licenciatura. Toluca, México: Facultad de Geografía. Universidad Autónoma del Estado de México, 1999.
- SEDAGRO. *Estadísticas agropecuarias. Agricultura. Anuario 2001 (en línea)*. Secretaría de Desarrollo Agropecuario del Estado de México. [en línea] citada el 30 de marzo del 2002, <http://www.edomexico.gob.mx/sedagro/archivos-pdf/anuario2001.pdf>. 2002.
- SAGARPA. *Información del sector agricultura-estadísticas del Sistema Integral de Información Agroalimentaria y Pesquera*. Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación. [en línea] citada el 30 de marzo del 2002, http://www.Sian.sagarpa.gob.mx/ar_comeagr.html. 2002.
- USACE. *Hec Ras User's manual*. Versión 2.1. US Army Corps of Engineers-Hidrologic Engineering Center, 1998. **OJO AUTOR, FALTA CIUDAD DE EDICIÓN.**
- VEGA, G. *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. Toluca, México: Facultad de Ingeniería. Universidad Autónoma del Estado de México, 1999.

Abstract

BARÓ-SUÁREZ, J.E., DÍAZ-DELGADO, C., ESTELLER-ALBERICH, M.V. & CALDERÓN, G. Flood economic loss estimation curves for Mexican rural and residential areas. Part II: study case of the upper Lerma river watershed, Mexico. Hydraulic engineering in Mexico (in Spanish). Vol. XXII, no. 3, July-September, 2007, pp. 71-85.

Floods are a very frequent natural risk in the upper basin of the Lerma river (central region of the Mexican Republic), however this risk has increased as consequence of the hydrological changes induced by human activities through time. The measures taken to prevent floods have been of the structural type (dams, levees, etc.), which implied important economic investments and they could not be confronted within the framework of an efficient cost/benefits analysis. The estimation of the economic loss have a lack of a robust and simple methodology in order to get an appropriate calculation of potential flood economic damages. This methodology was applied in a real case study over the Tejalpa river watershed, which is part of the upper basin of the Lerma river. For each floodable area the corresponding stage – damages curve was applied and the indirect tangible damages were computed as a percentage of the direct damages obtained. The flooded areas for different return periods in the watershed under study were built. The use of this methodology provides estimations of the loss magnitude generated by floods in economic terms. This information could improve a more realistic and rational analysis of cost / benefits of measures, structural or not, to mitigate flood damages.

Keywords: floods, stage-damage curves, economic damage assessment, Tejalpa river, Lerma river, Mexico.

Dirección institucional de los autores:

M. en G. José Emilio Baró Suárez

Facultad de Planeación Urbana y Regional,
Universidad Autónoma del Estado de México,
**OJO AUTOR, PONER DIRECCIÓN COMPLETA: NÚMERO,
TELÉFONO, FAX Y CORREO ELECTRÓNICO.**

Dr. Carlos Díaz-Delgado
Dra. María Vicenta Esteller Alberich

Centro Interamericano de Recursos del Agua,
Facultad de Ingeniería,
Universidad Autónoma del Estado de México,
cdiaz@uaemex.mx,
esteller@uaemex.mx
**OJO AUTOR, PONER DIRECCIÓN COMPLETA: NÚMERO,
TELÉFONO Y FAX.**

Dra. Georgina Calderón

Facultad de Filosofía y Letras,
Posgrado de Geografía,
Universidad Nacional Autónoma de México,
Ciudad Universitaria
**OJO AUTOR, PONER DIRECCIÓN COMPLETA: NÚMERO,
TELÉFONO, FAX Y CORREO ELECTRÓNICO.**