



**GOBIERNO
FEDERAL**

SEGOB

Metodología para la elaboración de mapas de riesgo por inundaciones en zonas urbanas

Centro Nacional de Prevención de Desastres



SERIE: ATLAS NACIONAL DE RIESGOS
Fenómenos Hidrometeorológicos



Vivir Mejor

**SISTEMA NACIONAL DE PROTECCIÓN CIVIL
CENTRO NACIONAL DE PREVENCIÓN DE DESASTRES**

**METODOLOGÍA PARA LA ELABORACIÓN DE MAPAS DE RIESGO
POR INUNDACIONES EN ZONAS URBANAS**

Marco Antonio Salas Salinas

**Dirección de Investigación
Subdirección de Riesgos por Inundación**

Julio, 2011

Í N D I C E

PRESENTACIÓN.....	5
INTRODUCCIÓN.....	7
1 IDENTIFICACIÓN DEL PELIGRO POR INUNDACIONES.....	9
1.1 Tratamiento del modelo digita.....	9
1.1.1 Datos de entrada (Add Data)	9
1.1.2 Unión de datos (Merge Data).....	10
1.1.3 Identificación de depresiones (Identify Sinks)	10
1.1.4 Rellenado de depresiones (Fill Sinks)	10
1.1.5 Dirección del flujo (Flow Direction)	11
1.1.6 Acumulación del flujo (Flow Accumulation).....	12
1.1.7 Red de drenaje (Stream Network)	13
1.1.8 Delimitación de cuencas (Watershed).....	14
1.1.9 Identificación de la cuenca tributaria.....	15
1.1.10 Conversión del conjunto de celdas que delimitan la cuenca en un polígono.....	15
1.1.11 Delimitación de las subcuencas	16
1.1.12 Características fisiográficas de las subcuencas	17
1.2 Gastos de diseño	21
1.2.1 Tiempo de concentración	21
1.2.2 Precipitación e intensidad	21
1.2.3 Gastos o caudales.....	22
1.2.4 Hidrogramas para diferentes periodos de retorno.....	23
1.3 Generación de escenarios de peligro.....	23
1.3.1 Clasificación de modelos de simulación	24
1.3.2 Preparación de archivos en Arc GIS.....	25
1.3.3 Creación del proyecto en HecRAS (simulación del tránsito de avenidas)	29
1.3.3.1 Importación de datos.....	29
1.3.3.2 Completado de la información	32
1.3.3.3 Gastos	33
1.3.3.4 Condiciones de frontera.....	34
1.3.3.5 Ejecución del programa e interpretación de resultados	36

1.3.3.6	Verificación y exportación de resultados	36
1.3.4	Mapas de inundación	37
1.3.4.1	Importación del resultado de la simulación	38
1.3.4.2	Mapas de inundación	40
2	IDENTIFICACIÓN DE LA VULNERABILIDAD DE LA VIVIENDA ANTE INUNDACIONES	43
2.1	Antecedentes	43
2.2	Tipología de la vivienda	43
2.2.1	Materiales comúnmente usados para el techo y los muros de las viviendas	43
2.2.2	Combinaciones posibles	44
2.2.3	Vulnerabilidad de las combinaciones	45
2.3	Tipificación del menaje y funciones de vulnerabilidad	47
2.4	Inferencia de la vulnerabilidad a partir de datos del censo del INEGI	49
2.4.1	Base de datos usada para extraer las características de las viviendas	49
2.4.2	Definición de la vulnerabilidad	50
2.4.3	Despliegue gráfico	53
3	EVALUACIÓN DEL RIESGO	57
3.1	Definición de riesgo	57
3.1.1	Riesgo para un escenario particular	57
3.1.2	Valor esperado de los daños anuales	57
3.1.3	Índice de riesgo	59
3.2	Ejemplo de aplicación	60
3.2.1	Ubicación de la zona	60
3.2.2	Mapa de peligro	61
3.2.3	Mapa de vulnerabilidad	63
3.2.4	Mapa de riesgo por inundación	63
4	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	67
	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	69
	INFORMACIÓN CARTOGRÁFICA	70

PRESENTACIÓN

En tiempos recientes los desastres registrados en México han ocasionado, en promedio, la pérdida de 131 vidas humanas y alrededor de 500 millones de dólares por año. Esto hace que el tema de la prevención de desastres tome relevancia en la agenda nacional de la Protección Civil y deje de mani-fiesto la inminente necesidad de establecer estrategias y programas de largo alcance enfocados a prevenir y reducir sus efectos y no sólo prestar atención durante las emergencias y desastres.

La estrategia de la prevención establece tres pasos fundamentales:

- Conocer los peligros y amenazas para saber dónde, cuándo y cómo nos afectan,
- Identificar y establecer las características y los niveles actuales de riesgo que implican esos fenómenos y,
- Diseñar acciones para mitigar oportunamente esos riesgos

En ese sentido las unidades municipales y estatales de Protección Civil, deben elaborar los atlas de riesgos para los diferentes fenómenos por los que son afectados, para difundir y socializar el conocimiento referente a dichos peligros e identificación de sus correspondientes riesgos.

Dado que evaluar el riesgo es complejo, ya que éste cambia con el tiempo y la ubicación geográfica de interés, para la mayoría de los fenómenos, incluidas las inundaciones, no

es suficiente representarlos en un mapa ya que éste sólo es válido para la ventana de tiempo de cuando se elaboró. Por lo anterior resulta más adecuado hablar de escenarios de riesgo, con los cuales es factible analizar una gran cantidad de posibles variantes tanto del evento mismo como del sistema expuesto.

Para realizar lo anterior, la Metodología para la Elaboración de Mapas de Riesgo por Inundaciones en Zonas Urbanas, que forma parte de la serie Atlas Nacional de Riesgos editada por el CENAPRED, es útil para evaluar esos escenarios de peligro y riesgo a los que está expuesta la población, empleando para ello toda la información y las herramientas disponibles.

Finalmente, cabe mencionar que desde hace tiempo se cuenta con programas y procedimientos para elaborar, de manera aislada, los estudios o análisis requeridos para la elaboración de un Atlas de Riesgo por Inundaciones. La metodología que ahora se presenta es el resultado de la integración de esas diferentes partes, indicando de qué manera se emplea cierta información, en qué momento se integra con el siguiente procedimiento y, en general, llevando al lector paso a paso en el uso de las diferentes herramientas empleadas.

INTRODUCCIÓN

Desde hace varios años el CENAPRED, preocupado por brindar herramientas útiles para llevar a cabo los atlas de riesgo estatales, ha venido desarrollando una serie de guías y metodologías que ayuden a cumplir con tal objetivo.

En un principio, se pensó en aquellas comunidades donde no hubiera los recursos deseables para realizar estudios de este tipo (localidades rurales, de acuerdo con el INEGI con una población menor de 2,500 habitantes). Sin embargo, al desarrollar algunos casos de estudio, se evidenció la necesidad de contar con una metodología más práctica, por lo que se hicieron las adecuaciones siguientes:

La metodología que a continuación se plantea requiere de gente especializada en el tema, es decir, que quien la aplique debe poseer conocimientos avanzados de hidráulica y sistemas de información geográfica (SIG), ya que en ella se requiere del uso de herramientas específicas relacionadas con ambos temas.

En la parte de peligro se emplean algunos programas de uso libre (por ejemplo: *HecRAS*¹ o *ArcHydro*²), con los que se pueden delimitar las zonas inundadas a partir de simulaciones hidráulicas del fenómeno, auxiliadas por modelos digitales del terreno.

Respecto a la vulnerabilidad, el principal obstáculo que ha enfrentado la metodología de zonas rurales es que para llevar a cabo la tipificación de la vivienda, es necesario una inspección visual casa por casa. A este respecto, en esta propuesta se usan los datos del censo general de población y vivienda a nivel de registro junto con un mapa de las zonas urbanas a nivel de manzana. Lo anterior trae como resultado 1) que no se requiere inspección física de la vivienda, 2) posibilita la tipificación de cualquier localidad que cuente con la información arriba mencionada, 3) se puede hacer en cualquier lugar que cuente con la información mínima requerida, es decir, no es necesario estar físicamente en la localidad que se esté analizando.

Por último, es importante comentar que parte de lo expuesto en esta guía, está basado en material de algunos cursos de *ArcGIS* y Análisis Espacial del Environmental Systems Research Institute, Inc. (ESRI), así como en los manuales del programa *HecRAS* y *HecGeoRAS* del United States American Corps of Engineers (USACE). Se hace alusión a términos en inglés, con la finalidad de familiarizarse con la operación y el uso de los programas de cómputo que se usan en la metodología aquí planteada.

¹ *HecRAS* (Hydrologic Engineering Centers River Analysis System) es un programa que permite modelar unidimensionalmente flujo permanente y flujo variable.

² *ArcHydro* es un juego de herramientas para derivar muchos juegos de datos que colectivamente describen el patrón de drenaje de una cuenca.

1. IDENTIFICACIÓN DEL PELIGRO POR INUNDACIONES

En esta primera parte se detallan las tareas que deben realizarse con el objetivo de contar con uno o más mapas de peligro por inundación, en los que se muestren zonas de inundación asociadas con diferentes periodos de retorno.

Para lograr lo anterior, se deberán desarrollar las etapas siguientes:

- a) **Tratamiento del modelo digital.** Se refiere a la parte donde se adecuen los datos, para obtener la red de drenaje a partir de la cual se realizan las simulaciones del fenómeno,
- b) **Obtención de los caudales de diseño.** Corresponde al uso de los mapas de precipitación del anexo 1 “Mapas de precipitación para diferentes periodos de retorno y distintas duraciones”, y
- c) **Simulación del fenómeno y generación de escenarios de peligro.** En esta parte se ligan, en un sistema de información geográfica (SIG), las características físicas de la cuenca en estudio y la localidad de interés, con los resultados de las simulaciones hidrológica e hidráulica y se plasman en mapas donde se muestran los diferentes escenarios obtenidos.

1.1 Tratamiento del modelo digital

En esta metodología, para elaborar los mapas de peligro por inundación se considera que debe cumplirse una serie de requerimientos de programas de cómputo e insumos informáticos:

- ArcGIS 8.0 ó mayor
- Spatial Analyst 8.0 ó mayor
- Hydrology Modelling (Extensión)
- Xtools Pro for ArcGIS 2.2.0 ó mayor
- Modelos Digitales del Terreno³ (MDT)

Es importante aclarar que los dos primeros programas en la lista son comerciales y tienen un costo que debe tomarse

en cuenta durante la planeación de los trabajos. Los siguientes dos son de libre distribución y se pueden descargar del sitio Web de ESRI; el último requerimiento de la lista también es de distribución gratuita por parte del INEGI. Igualmente es posible adquirir MDT, cuya resolución es mejor respecto a los de INEGI; sin embargo, éstos sí tienen un costo.

1.1.1 Datos de entrada (Add Data)

Para iniciar el análisis, debe iniciarse el programa ArcGIS para cargar los MDT que sean necesarios para cubrir el área correspondiente a la cuenca hidrológica que drena hacia el sitio de interés, el cual puede ser una ciudad, una obra hidráulica, una zona industrial, etc. (Figura 1.1).

Actualmente, las descargas de los datos del CEM del INEGI (de hasta 2 por 2 grados), hacen posible que muchas cuencas queden confinadas en la información de dichas descargas y, sólo para el caso de cuencas muy grandes (mayores de 40,000 km²), habrá que cargar varios MDT para posteriormente unirlos (Figura 1.1).

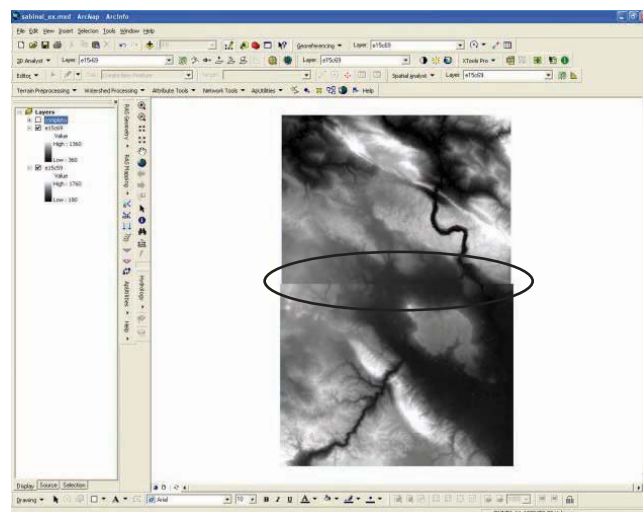


Figura 1.1 Primer paso: cargar todos los MDT necesarios para cubrir la cuenca de aportación

³ Para el caso de México, el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) es quien proporciona los MDT. Los modelos más comunes son los correspondientes al Continuo de Elevaciones Mexicano (CEM) cuyo cubrimiento correspondiente puede ser desde 20" hasta 2°, con una resolución de 1 arcsec 30 m.

NOTA: Obsérvese la línea que divide los dos MDT que fueron cargados en la figura anterior. Dicha línea indica que no existe continuidad en el área de trabajo, por lo que se requiere unir ambos MDT.

1.1.2 Unión de datos (Merge Data)

Cuando se tiene el caso en que el área por cubrir requiere de más de dos MDT, es necesario unir las partes que conforman el área total, ya que si no se hace esto, en los análisis hidrológicos se trabajará sólo con el MDT activo (uno a la vez), por lo que la red de drenaje y las subcuencas de aportación generadas pueden ser incorrectas.

Esta operación se realiza con el comando **Mosaic** de la extensión de Spatial Analyst, de la manera siguiente:

```
[completo] = mosaic([MDT1], [MDT2], [MDT3], ... , [MDTn])
```

Con esta instrucción se logra combinar todos los MDT que fueron necesarios para cubrir la cuenca bajo estudio en un solo MDT (Figura 1.2).



Figura 1.2 Unión de todos los MDT necesarios para cubrir la cuenca de aportación

Nótese que una vez que los MDT se han unido (Figura 1.2), la discontinuidad de la Figura 1.1 ya no aparece.

1.1.3 Identificación de depresiones (Identify Sinks)

Uno de los principales problemas al usar MDT es la calidad de los datos, sobre todo en zonas planas, debido a que pequeñas variaciones en la elevación del terreno pueden generar cambios significativos en el análisis hidrológico.

Una depresión o foso se define como aquella celda cuyos vecinos tienen una elevación mayor a la propia (como se muestra en la Figura 1.3a) por lo tanto, las depresiones tienen vecinos que apuntan en dirección a ellas, mientras que un pico es el caso contrario, es decir, vecinos con elevaciones menores o iguales a los de ellas (Figura 1.3b). En caso de pasar por alto esta situación, es posible que la red de drenaje generada sea defectuosa, por lo que es importante que primero se corrija, usando la herramienta *llenado de depresiones*.

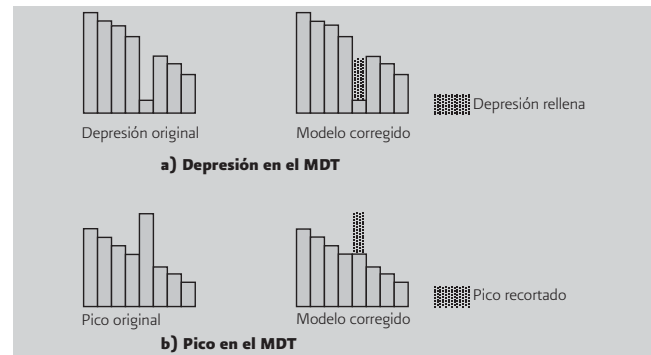


Figura 1.3 Zonas planas y depresiones en modelos digitales de elevación

1.1.4 Rellenado de depresiones (Fill Sinks)

Para solucionar el problema anterior, se usa la herramienta llamada *Hydrology Modelling Sample Extensión* (Figura 1.4), la cual define las principales variables del análisis hidrológico.

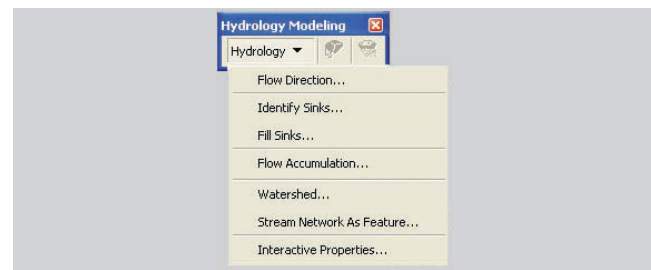


Figura 1.4 Menú de la Extensión Hydrology Modelling Sample

Al dar clic sobre la opción **Fill Sinks** (Figura 1.5), aparece una ventana, en la que se especifica el nombre del archivo que contiene el MDT que se va a depurar, así como el nombre del archivo de resultados.



Figura 1.5 Ventana de la opción Fill Sinks

Una vez que el proceso ha finalizado, el resultado se muestra en la Figura 1.6.

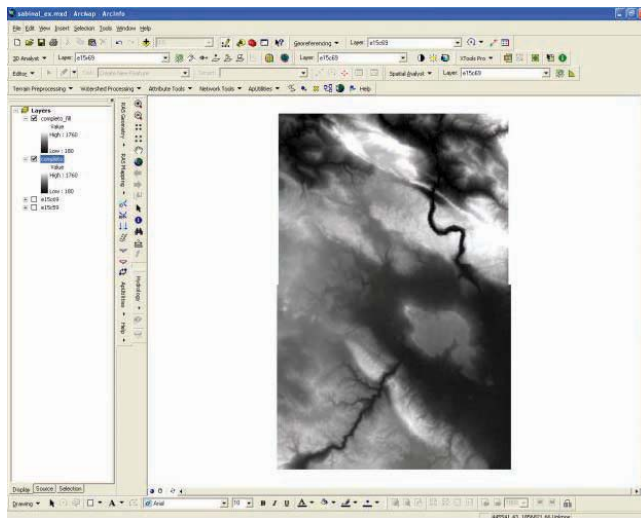


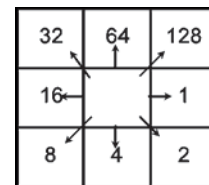
Figura 1.6 Resultado del proceso Fill Sinks

Aunque a simple vista no se nota diferencia alguna entre los archivos antes y después del proceso **Fill Sink**, las redes de drenaje obtenidas pueden variar significativamente, por lo que es recomendable usar esta opción, sobre todo cuando se trate de zonas planas.

1.1.5 Dirección del flujo (Flow Direction)

Una de las claves para definir las características de una cuenca a través de un modelo digital del terreno, se basa en la correcta definición de la dirección del flujo. Esto se hace con la opción **Flow Direction** del menú *Hydrology Modelling*.

Esta herramienta toma como datos de entrada un MDT y muestra como datos de salida un archivo *raster* con la dirección del flujo en cada celda. Existen ocho posibles direcciones en cualquier celda, relacionadas con las ocho celdas adyacentes en las cuales el escurrimiento puede viajar.



NOTA: En un MDT el terreno es representado por celdas, cuya extensión depende de la precisión que se maneje. El Continuo de Elevaciones Mexicano, del INEGI, presenta celdas de 1 arcosegundo de lado, esto es, aproximadamente 30 m. El valor de cada celda representa la elevación promedio en ella.

La distancia se calcula centro a centro de las celdas. Así, si el tamaño de la celda es 1, la distancia entre dos celdas ortogonales es 1. Mientras que entre dos celdas diagonales es $\sqrt{1+1} = 1.4142$. Si el desnivel respecto a todas las celdas adyacentes es el mismo, la vecindad se agranda hasta encontrar el mayor descenso.

Cuando la dirección del máximo descenso es encontrada, la salida de la celda es codificada con el valor que representa esa dirección (Figura 1.7).

78	72	72	71	58	49	↖	↖	↖	↖	↖	↖	2	2	2	2	4	8
74	67	56	49	46	50	↖	↖	↖	↖	↖	↖	2	2	2	4	8	8
69	53	44	37	38	48	→	→	→	→	→	→	1	1	2	4	8	4
64	58	55	22	31	24	↖	↖	↖	↖	↖	↖	128	128	2	2	4	8
68	61	47	21	16	19	↖	↖	↖	↖	↖	↖	2	2	2	2	4	8
74	53	34	12	11	12	→	→	→	→	→	→	1	1	1	1	4	16

Figura 1.7 Interpretación de la dirección del flujo

Si los valores de todas las celdas vecinas son mayores que el de la celda procesada, ésta es una depresión (sink), y su

dirección de flujo no está definida. Las celdas con dirección de flujo no definida pueden ser clasificadas como depresiones usando la opción **Identify Sinks** (Figura 1.8). Para obtener la dirección del flujo aproximada en el MDE, las depresiones deben ser rellenadas.

Al dar clic sobre la opción **Flow Direction**, aparece una ventana, donde se especifica el nombre del archivo que contiene el MDT, así como el nombre del archivo de resultados.



Figura 1.8 Ventana de la opción Flow Direction

Una vez que el proceso ha finalizado, el resultado muestra un raster con ocho diferentes tonalidades, cada una de las cuales representa una posible dirección del flujo (Figura 1.9).

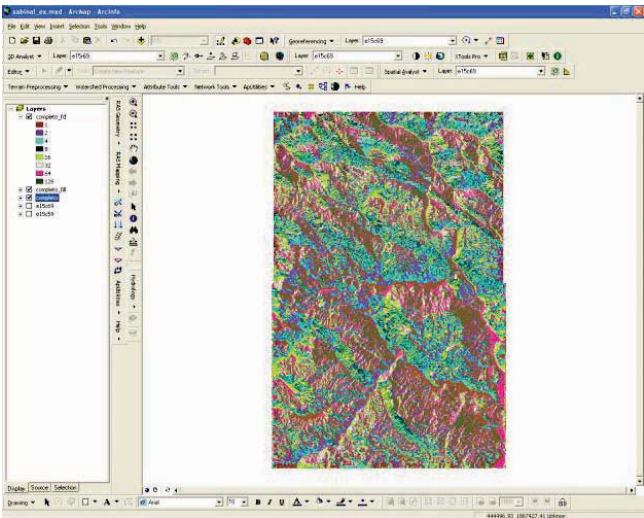


Figura 1.9 Resultado del proceso Flow Direction

1.1.6 Acumulación del flujo (Flow Accumulation)

La opción **Flow Accumulation** calcula el flujo acumulado como el total acumulado de las celdas que confluyen hacia cada una de las celdas ubicadas aguas abajo (Figura 1.10). A cada celda se le aplica un peso unitario; el valor de cada celda en el raster de salida será el número de celdas que fluyen hacia cada celda.

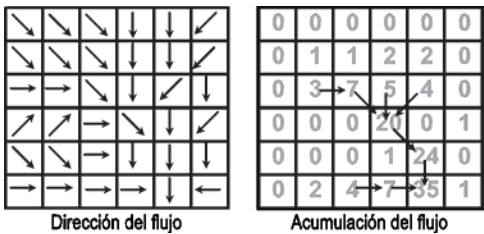


Figura 1.10 Interpretación de la acumulación del flujo

Las celdas con grandes acumulaciones de flujo son áreas de concentración del flujo, y pueden ser usadas para identificar corrientes y cursos de agua, mientras que las celdas con una acumulación de flujo de cero son elevaciones topográficas locales y pueden ser usadas para identificar el parteaguas.

Al dar clic sobre la opción **Flow Accumulation**, aparece la siguiente ventana (Figura 1.11), en la que se especifica el nombre del archivo que contiene la dirección del flujo (**Flow Direction**), así como el nombre del archivo de resultados.



Figura 1.11 Ventana de la opción Flow Accumulation

Una vez que el proceso ha finalizado, el resultado se muestra en la Figura 1.12. Nótese que conforme el número de celdas acumuladas es mayor, el color tiende a ser más oscuro, por lo que las corrientes de agua se notan claramente en el raster que resulta.

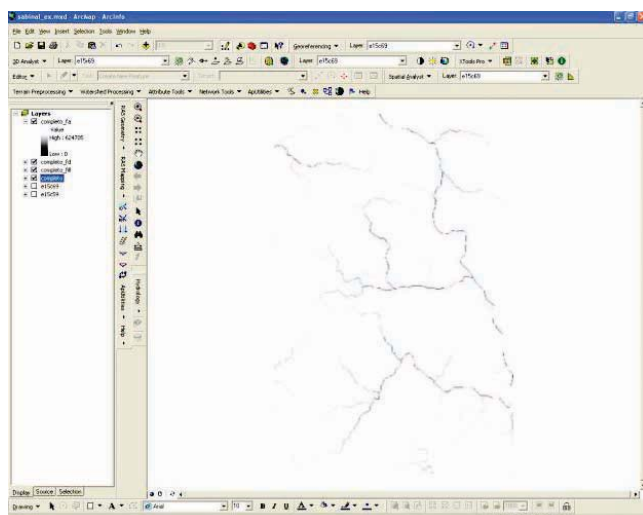


Figura 1.12 Resultado del proceso Flow Accumulation

1.1.7 Red de drenaje (Stream Network)

La red de drenaje de la zona de estudio se obtiene con base en un umbral predefinido, que le indica al programa cuántas celdas se requiere acumular para aceptar que se forme una corriente; si ese número se iguala o rebasa, el conjunto de celdas en cuestión se toma como una corriente, en caso contrario, no existe nada y se continúa con la búsqueda (Figura 1.13).

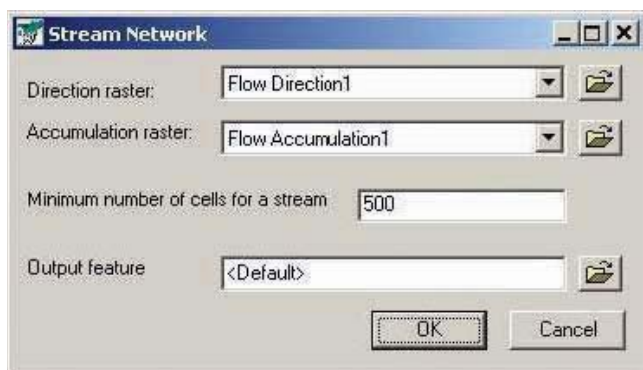


Figura 1.13 Ventana de la opción Stream Network

Recordando que en el CEM del INEGI el tamaño de la celda es de 30 x 30 m y tomando un umbral de 500 celdas, para definir la formación o no de una corriente, el resultado que se obtiene es:

$$500 \times 30 \times 30 = 450,000 \text{ m}^2 = 0.45 \text{ km}^2$$

y se muestra en la Figura 1.14.

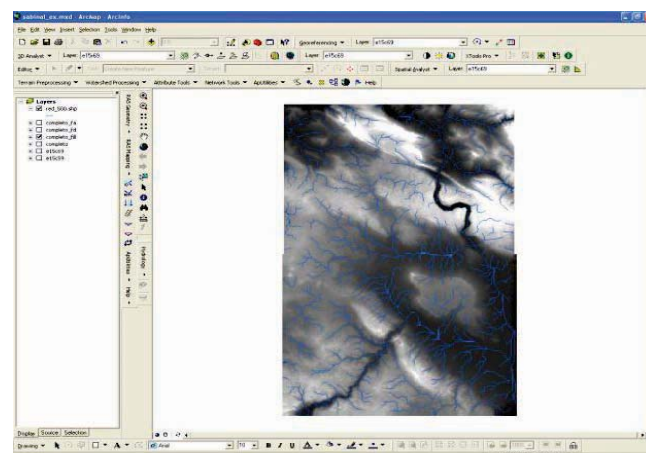


Figura 1.14 Ventana de la opción Stream Network

Todas las corrientes definidas en la última figura tienen un área de aportación al menos de 0.45 km². De esta manera, dependiendo del tamaño de la cuenca que se requiera analizar, se definirá el umbral con el que se identifica cada una de las corrientes en el MDT (Tabla 1.1).

Tabla 1.1 Umbral para definir la red de drenaje, en función del tamaño de la cuenca requerida

No. de celdas	11,111	5,555	2,222	1,111	555	500*
Tamaño de la cuenca tributaria (km ²)	10.00	5.00	2.00	1.00	0.50	0.45

* Valor predeterminado para el umbral

NOTA: Dependiendo de la resolución del MDT, cambiará el número de celdas necesarias para realizar el cubrimiento del área deseada. Los datos de la **Tabla 1.1** sólo son válidos para usar con el Continuo de Elevaciones de México del INEGI.

Lo anterior implica que a medida que el valor del umbral usado sea mayor, la red de drenaje que se obtiene es menos densa, es decir, que sólo se definen las principales corrientes en el MDT.

1.1.8 Delimitación de cuencas (Watershed)

Para identificar las subcuencas que existen dentro del área de estudio, se debe usar la opción **Watershed** de la herramienta Hydrology Modelling (Figura 1.15).



Figura 1.15 Ventana de la opción Watershed

NOTA: Para lograr un ensamble adecuado entre las subcuencas y la red de drenaje, es recomendable usar el mismo umbral para definir ambas características.

Para visualizar cada una de las cuencas identificadas en el MDT es necesario reclasificar el *raster* resultante. Para ello, se selecciona la capa en cuestión, se da un clic al botón derecho del *mouse* y se escoge la opción *propiedades* (Properties) (Figura 1.16). En la ventana mostrada se escoge la opción *valores únicos* (Unique Values), se da clic en los botones añadir todos los valores (Add All Values), Aplicar y Aceptar (en esta misma secuencia).

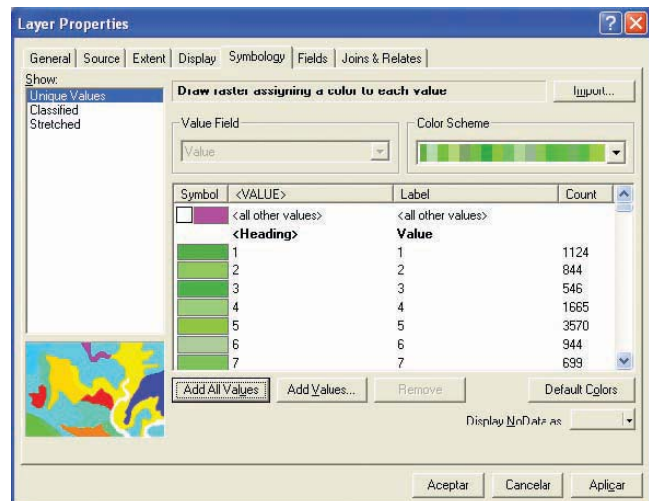


Figura 1.16 Reclasificación para identificar cada una de las subcuencas obtenidas

El resultado se presenta en la Figura 1.17. Al sobreponer la red de drenaje con la capa de subcuencas (definidas con el mismo umbral), se observa que para cada cauce existe una subcuenca.

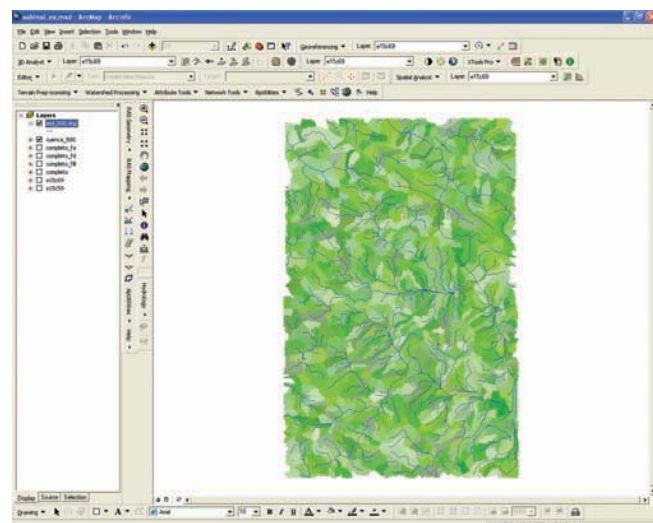
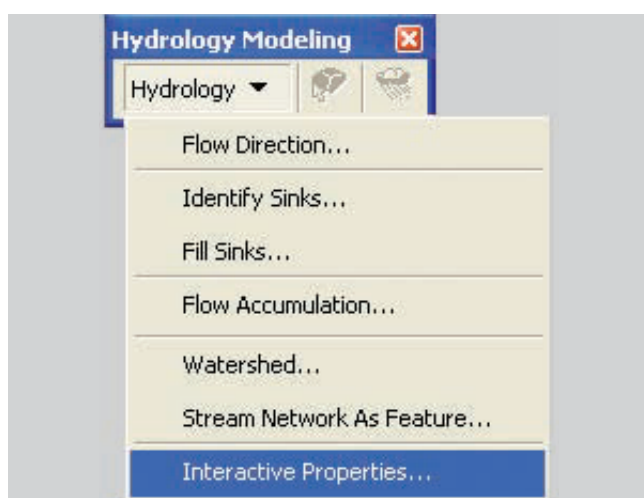


Figura 1.17 Subcuencas obtenidas una vez que se ha reclasificado el *raster*

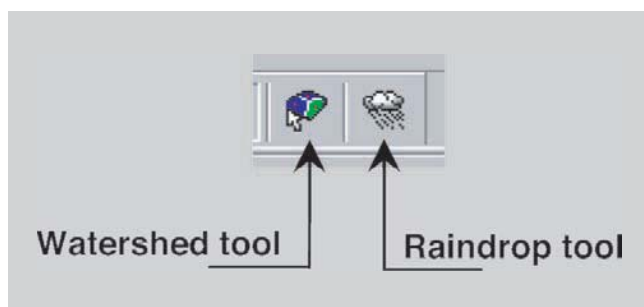
NOTA: Al igual que en todas las opciones anteriores, el *raster* de salida es un archivo que se almacena en el directorio temporal de Windows y estará ahí durante la sesión vigente. Una vez que se apague la computadora, se borrará el archivo, por lo que es conveniente guardar el archivo con los resultados del análisis en algún subdirectorio de trabajo.

1.1.9 Identificación de la cuenca tributaria

Para delimitar la cuenca de aportación hacia cualquier sitio dentro del MDT se elige el botón **Interactive Properties** dentro del menú de la herramienta Hydrology Modelling. Con ello se activan las herramientas: **Watershed Tool** y **Raindrop Tool** (Figura 1.18).



a) Activación de las propiedades interactivas



b) Identificación de las herramientas interactivas

Figura 1.18 Herramienta Interactive Properties

Al activar la opción **Watershed** y luego seleccionar la línea que representa al río en el mapa, en el sitio hasta donde se desea definir la cuenca de aportación del punto de interés (localidad, ciudad, etc.), se obtendrá un archivo *raster* en el que se define la cuenca de aportación hasta el sitio elegido, como se muestra en la figura siguiente.

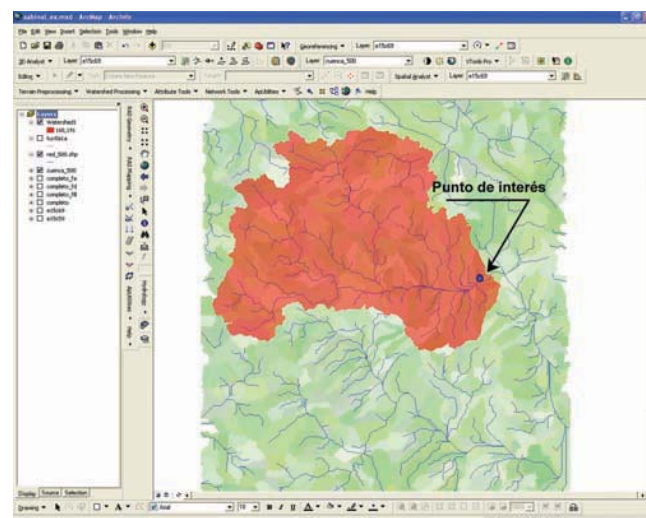


Figura 1.19 Raster de la cuenca de aportación, obtenido con la herramienta Watershed

1.1.10 Conversión del conjunto de celdas que delimitan la cuenca en un polígono

Hasta aquí se ha identificado la cuenca de aportación hasta el sitio de interés; sin embargo, la capa que se tiene es un *raster*. Es conveniente, para posteriores aplicaciones, convertir esa capa en otra con formato *feature* (polígono). Para ello se usa la opción **Convert** de la herramienta 3D Analyst, que se muestra en la figura siguiente.

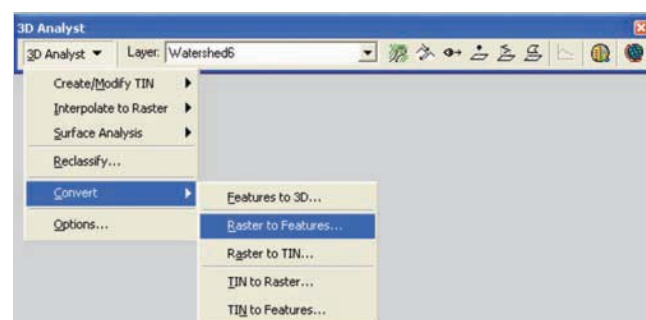


Figura 1.20 Herramienta para conversión de archivos *raster* a archivos de polígonos

De las opciones disponible en el menú *Convert* se debe seleccionar **Raster to Features**. A continuación, en la pantalla se desplegará una nueva capa como en la figura siguiente.

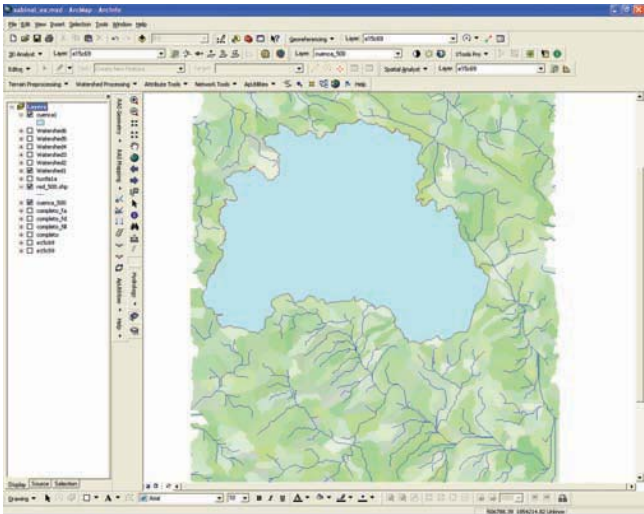


Figura 1.21 Polígono de la cuenca de aportación, obtenido a partir de un raster

La cuenca que se acaba de delimitar será tan precisa como la resolución del MDE lo permita.

1.1.11 Delimitación de las subcuencas

El mismo procedimiento usado para delimitar la cuenca general se usa para definir la cuenca de cada tributario, por lo que los puntos 1.1.9 y 1.1.10 se repiten tantas veces como tributarios lleguen al colector general (Figura 1.22).

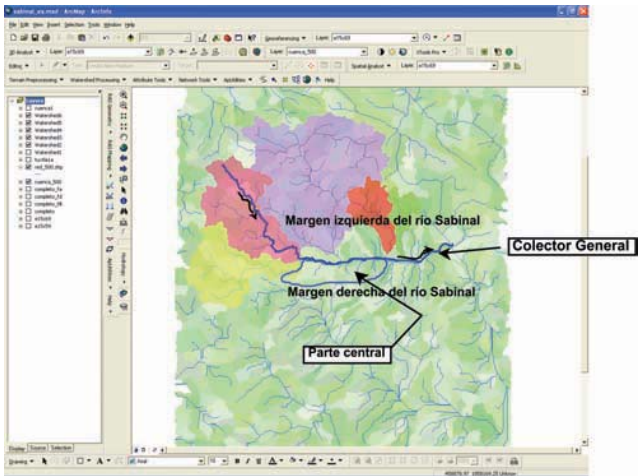


Figura 1.22 Raster de las subcuencas de aportación obtenido con la herramienta Watershed

Los pequeños huecos que se observan, entre subcuencas adyacentes, representan la cuenca propia del colector general en esas zonas.

Cada una de las subcuencas es un archivo *raster*, es decir, que la subcuenca está formada con muchos cuadros. Después se convierte en un polígono y luego cada uno de los polígonos que representa una cuenca diferente se puede agregar en un solo archivo con formato *feature* (formato de puntos, líneas o polígonos) en el que finalmente estarán contenidas todas las cuencas.

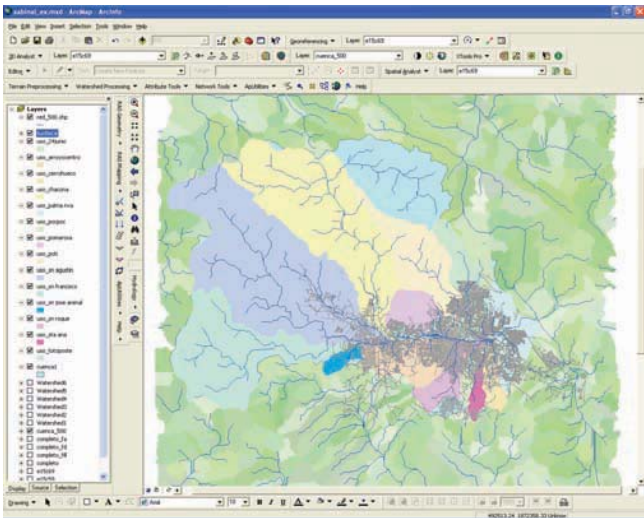


Figura 1.23 Polígonos de las subcuencas de aportación obtenidos a partir de archivos raster

Hasta este punto se cuenta con cada una de las cuencas que aportan hacia el sitio de interés.

1.1.12 Características fisiográficas de las subcuencas

Una vez que cada subcuenca ha sido delimitada, el siguiente paso es extraer sus características fisiográficas, para ello se usa la herramienta *XTools Pro*.



Figura 1.24 Barra de la herramienta XTools Pro

En el caso de las subcuencas, una característica importante es la superficie de aportación. En el menú *Table Operations*, seleccionar la opción **Calculate Area, Perimeter, Length, Acres and Hectares** (Figura 1.25).

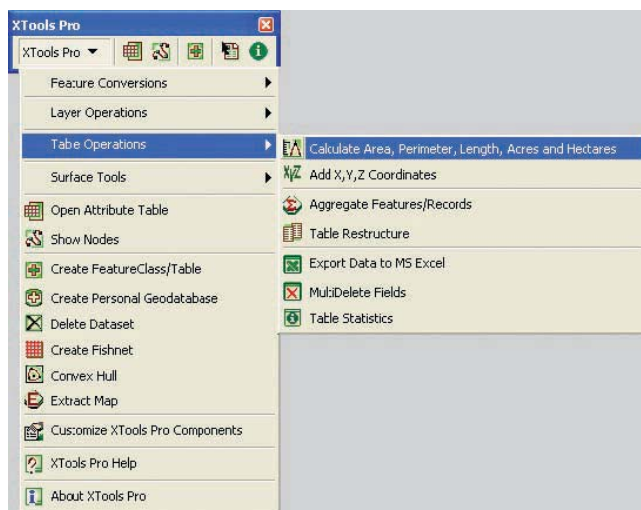


Figura 1.25 Cálculo del área y el perímetro de la cuenca tributaria

La ventana que se muestra (Figura 1.26) sirve para especificar el archivo con el que se va a trabajar, las unidades en las que está el mapa y aquéllas en las que se prefiere que sea expresado el resultado. Adicionalmente, se puede modificar el nombre de cada columna (AREA y PERIMETER).

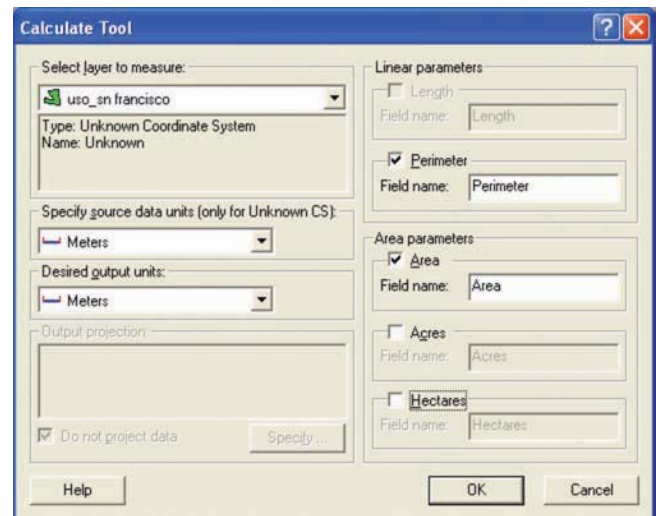


Figura 1.26 Definición de parámetros para calcular la superficie de aportación de la cuenca

En la tabla de atributos del archivo en uso, se observa un par de columnas adicionales (AREA y PERIMETER) en las que se indica el valor de tales variables para cada una de las subcuencas contenidas en el archivo.

FID	Shape	AREA	PERIMETER	E15_11F_E0	E15
0	Polygon	30313408.68137	53520.15397	0	
1	Polygon	3026348.18628	10306.9913	0	
2	Polygon	272087.43915	2776.36656	0	
3	Polygon	764748.37721	5156.32036	0	
4	Polygon	500603.77658	2855.07991	0	
5	Polygon	735439.39745	4823.85834	0	
6	Polygon	1032260.90824	5876.95751	0	
7	Polygon	8676775.53929	15867.22751	0	
8	Polygon	2021150.65238	8582.95691	0	

Figura 1.27 Parámetros de la cuenca de aportación calculados (área y perímetro)

NOTA: Las unidades de las variables calculadas, mostradas en la tabla de atributos corresponden con las definidas en la Figura 1.26, es decir, son metros.

Posteriormente, para extraer las características de los tributarios (longitud y pendiente) se emplea el archivo correspondiente a la red de drenaje, del cual se requiere separar el cauce y los tributarios de la cuenca de interés (Figura 1.28). Para lo cual se selecciona **Editor | Start editing**, y desde

la tabla de atributos de la capa de la red de drenaje, se seleccionan y borran las líneas que no se encuentren dentro de la cuenca tributaria.

Para obtener la longitud de cada uno de los tramos de río nuevamente se selecciona en el menú de *XTools Pro | Table Operations*, la opción **Calculate Area, Perimeter, Length, Acres and Hectares**.

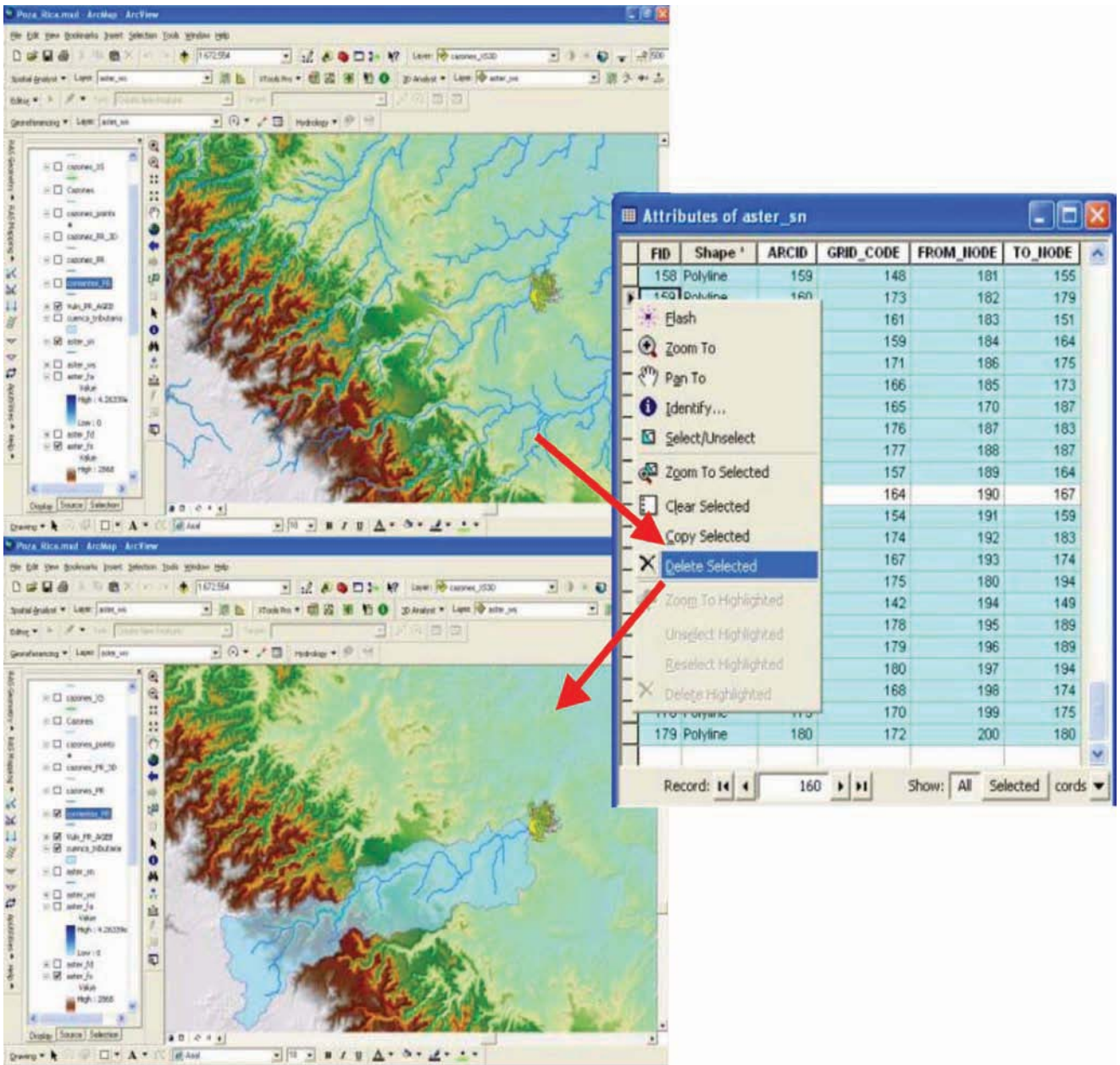


Figura 1.28 Depuración de la red de drenaje

En la ventana que se muestra (Figura 1.29) se especifica el archivo que se empleará, la opción *Length* y las unidades en la que se desea que esté expresado el resultado.

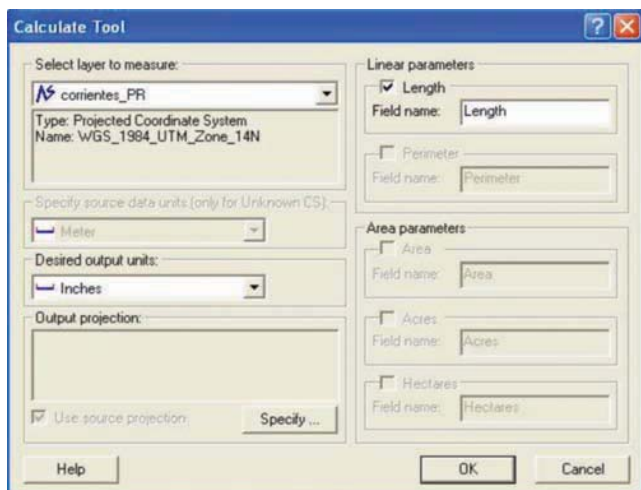


Figura 1.29 Definición de la longitud de los tributarios

A continuación, en la tabla de atributos del archivo en uso, se muestra una nueva columna (LENGTH), en la cual se indica la longitud de cada uno de los tramos del río.

Attributes of corrientes_PR							
FID	Shape	ARCID	GRID_CODE	FROM_NODE	TO_NODE	Length	
0	Polyline	86	92	100	96	9616.234695	
1	Polyline	90	94	103	100	2257.30872	
2	Polyline	95	98	109	103	4930.172041	
3	Polyline	96	100	110	112	15189.460761	
4	Polyline	97	93	112	100	18636.595125	
5	Polyline	100	103	115	110	15542.675114	
6	Polyline	106	97	120	103	13405.354808	
7	Polyline	108	104	122	110	9830.677234	
8	Polyline	109	107	124	112	16065.486631	
9	Polyline	110	108	126	115	9279.750895	
10	Polyline	113	106	132	115	21089.244569	
11	Polyline	116	121	134	136	6372.256664	
12	Polyline	117	113	136	132	11638.580811	
13	Polyline	119	129	137	140	6293.603514	
14	Polyline	121	124	140	134	3740.946682	

Figura 1.30 Longitud de los tributarios

Para obtener la pendiente de los cauces, se requiere un archivo de puntos, obtenido a través del menú de XTools Pro. En la opción *Features Conversions*, se selecciona **Convert Features to Points** (Figura 1.31).

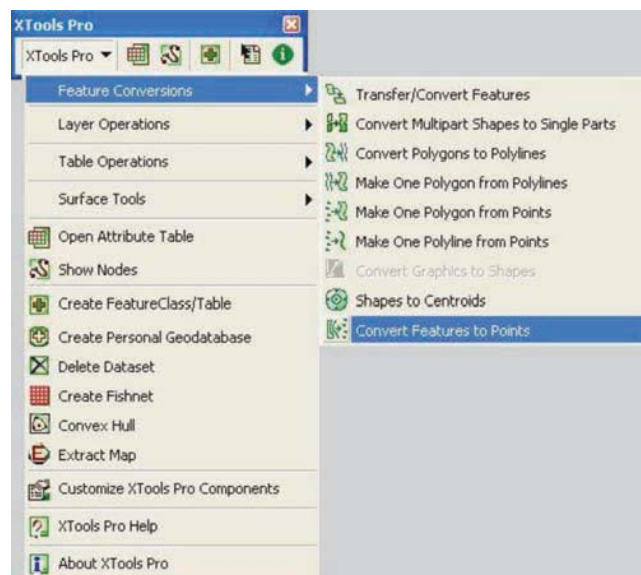


Figura 1.31 Conversión de un archivo de líneas a puntos

En la ventana que aparece (Figura 1.32) se selecciona el archivo que se desea convertir y las opciones *End Points*, *Form* y *To*. Con esto se genera un punto al inicio y otro al final de cada uno de los tramos de la red de drenaje.

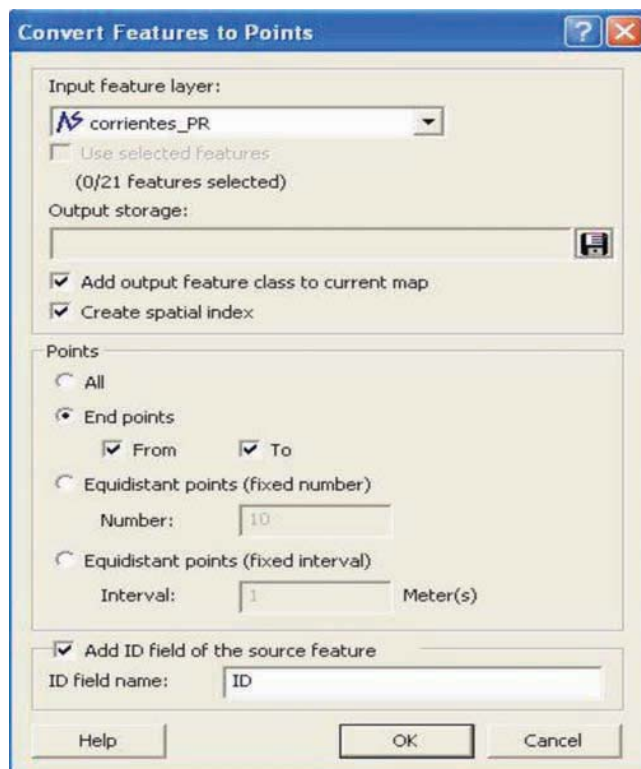


Figura 1.32 Conversión de un archivo de líneas a puntos

Dado que el cálculo de pendientes de cualquier tramo involucra la diferencia de elevaciones entre sus puntos extremos, es necesario relacionar los valores del modelo digital de elevaciones con el archivo de puntos que se creó recientemente. Para ello, se emplea el menú *3D Analyst* y de la opción *Convert* se usa **Features to 3D** (Figura 1.33). En la ventana que se despliega se selecciona el archivo de puntos y el DEM con el que se asociarán.

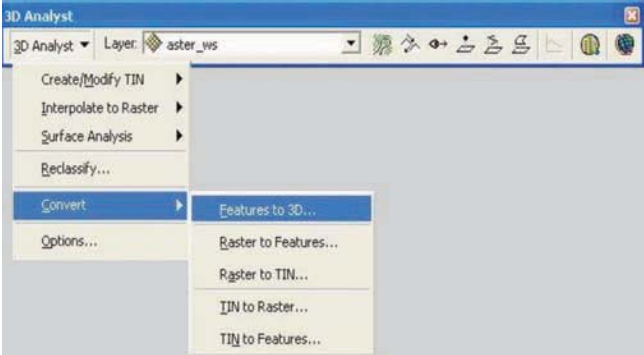


Figura 1.33 Conversión de un shape en dos dimensiones a uno de tres

Para agregar las coordenadas y las elevaciones en el archivo en uso, del menú *XTools Pro*, se elige la opción **Table operations | Add X, Y, Z Coordinates** (Figura 1.34).

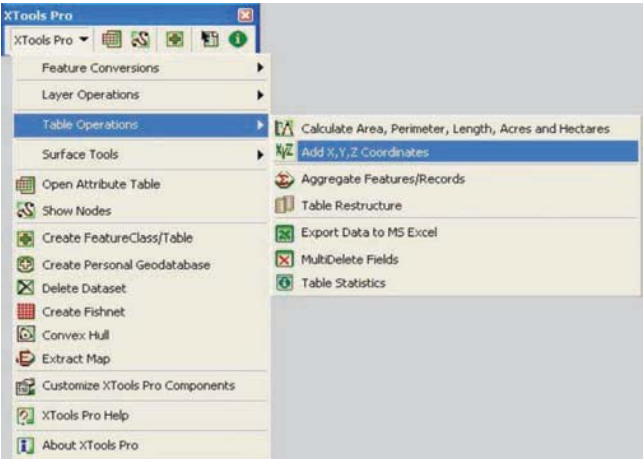


Figura 1.34 Adición de coordenadas a un archivo de puntos

El resultado es que la tabla de atributos del archivo contiene tres nuevas columnas que corresponden a las coordenadas X, Y y Z de cada punto (Figura 1.35).

Attributes of puntos_3D							
	GRID_CODE	FROM_NODE	TO_NODE	Length	X	Y	Z
	92	100	96	9616.234695	650556.126909	2265788.64999	67
	92	100	96	9616.234695	657758.532902	2268580.88709	48
	94	103	100	2257.30872	650608.318257	2264040.23984	95
	94	103	100	2257.30872	650556.126909	2265788.64999	67
	98	109	103	4930.172041	651104.136061	2259303.87503	95
	98	109	103	4930.172041	650608.318257	2264040.23984	95
	100	110	112	15189.460761	630592.936385	2258977.6791	168
	100	110	112	15189.460761	639517.656855	2256524.68576	103
	93	112	100	18636.595125	639517.656855	2256524.68576	103
	93	112	100	18636.595125	650556.126909	2265788.64999	67
	103	115	110	15542.675114	618380.161006	2255272.09341	229
	103	115	110	15542.675114	630592.936385	2258977.6791	168
	97	120	103	13405.354808	648507.616509	2252205.85173	102
	97	120	103	13405.354808	650608.318257	2264040.23984	95
	104	122	110	9830.677234	626091.432639	2251762.22527	296
	104	122	110	9830.677234	630592.936385	2258977.6791	168

Figura 1.35 Coordenadas asociadas a un archivo de puntos

Por último, es necesario agregar un campo en la tabla de atributos anterior, el cual se nombra (PENDIENTE). Dado que dicha tabla cuenta con la longitud de cada tramo y la elevación en cada punto, para calcular la pendiente se selecciona esa nueva columna (PENDIENTE) y luego se da *clic* al botón derecho del ratón para que aparezca un menú del que se emplea la opción **Field Calculator...** (Figura 1.36).

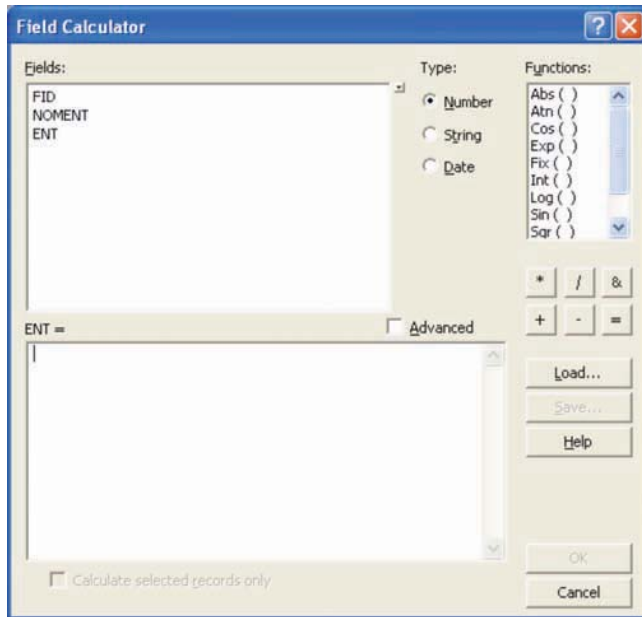


Figura 1.36 Ventana donde se calcula la pendiente de cada tramo de la red de drenaje

1.2 Gastos de diseño

Para estimar los caudales de diseño en cualquier cuenca, se requiere cualquiera de las siguientes opciones de información:

- Mapas de isoyetas, elaborados por el Instituto de Ingeniería de la U.N.A.M. y el CENAPRED, o bien,
- Curvas $h_p - d - T_r$, o
- Curvas $i - d - T_r$, o incluso
- Estudio hidrológico de la zona

La primera puede descargarse de la página del CENAPRED:

<http://www.cenapred.unam.mx/es/Publicaciones/archivos/12122006Captulolanexoss.pdf>

Las otras tres opciones son el resultado de algún estudio hidrológico particular realizado en la zona de interés.

La metodología descrita a continuación es válida para cualquiera de los tres primeros casos. En el cuarto caso se deben presentar los gastos para los diferentes periodos de retorno.

1.2.1 Tiempo de concentración

El tiempo de concentración de una cuenca se obtiene con la fórmula de Kirpich (Aparicio, 2001):

$$t_c = 0.000325 \frac{L^{0.77}}{S^{0.385}} \quad (1.1)$$

donde:

- L longitud del cauce principal, (m)
- S pendiente del cauce principal, (adim)

En el inciso anterior se obtuvieron ambas características fisiográficas del cauce principal, por lo que es fácil calcular el tiempo de respuesta de la cuenca, conocido como *tiempo de concentración*.

1.2.2 Precipitación e intensidad

Para obtener este valor, es necesario contar con cualquiera de las cuatro opciones enlistadas al principio de este inciso. En esta metodología se supondrá que se cuenta con la primera de ellas, es decir, los mapas de precipitación del CENAPRED, mapas asociados a distintos periodos de retorno con distintas duraciones, (Anexo 1 de Eslava *et al.*, 2006).

Los mapas del Anexo 1 fueron elaborados sólo para duraciones de 1 y 24 h; sin embargo, el tiempo de concentración generalmente resulta diferente a cualquiera de esas dos duraciones, por lo que la necesidad de interpolar los valores de precipitación leídos de los mapas será muy frecuente. Para ello, deberán seguirse los pasos descritos en Eslava, 2006:

- Ubicar en cada mapa el sitio de interés (localidad o salida de la cuenca)
- Leer en cada mapa (20 en total, 10 para $d = 1$ h y 10 para $d = 24$ h) el valor de la precipitación asociada con un determinado periodo de retorno
- Llenar las dos primeras columnas de la tabla que se muestra a continuación:

Tabla 1.2 Extrapolación de la precipitación para una duración igual al tiempo de concentración

Tr (años)	Precipitación (mm)		
	hp_1 (d = 1 h)	hp_{24} (d = 24 h)	hp_{tc} (d = t_c)
2			
5			
10			
25			
50			
100			
250			
500			
1000			
2000			

- Para cada periodo de retorno, aplicar la siguiente ecuación:

$$hp_{tc} = \frac{hp_{24} - hp_1}{3.1781} (\ln(t_c)) + hp_1 \quad (1.2)$$

donde:

hp_{tc} valor de la precipitación para una duración igual al tiempo de concentración de la cuenca en estudio, mm

hp_{24} valor de la precipitación para una duración de 24 horas y un determinado periodo de retorno, mm

hp_1 valor de la precipitación para una duración de 1 hora y un determinado periodo de retorno, mm

t_c tiempo de concentración de la cuenca en estudio, h

- El resultado obtenido cada vez que se aplica la ec. 1.2, corresponde a la precipitación para un periodo de retorno y una duración igual al tiempo de concentración de la cuenca, y se anota en la columna **$d = t_c$** .
- Finalmente, la intensidad es igual a la cantidad de agua que se precipita por unidad de tiempo, por lo que ésta se obtiene dividiendo la lámina de precipitación entre su duración, que para fines de diseño es igual al tiempo de concentración (1.3).

$$i = \frac{hp_{tc}}{d} \quad (1.3)$$

1.2.3 Gastos o caudales

Para obtener el gasto de diseño existen varios métodos, pero dado el tamaño de cuenca con la que se trabajará (menor de 100 km²), la literatura recomienda el uso de la fórmula racional.

La fórmula racional es una de las más antiguas y probablemente una de las más utilizadas actualmente. Este método considera que el gasto máximo se alcanza cuando la precipitación se mantiene con una intensidad constante durante un tiempo igual al tiempo de concentración. La fórmula racional es:

$$Q_p = 0.278 C i A \quad (1.4)$$

donde:

C coeficiente de escurrimiento. Representa la fracción de la lluvia que escurre en forma directa. Varía entre 0 y 1 (Tabla 1.3)

i intensidad media de la lluvia para una duración igual al tiempo de concentración de la cuenca, mm/h

A área de la cuenca, km²

Tabla 1.3 Valores para el coeficiente de escurrimiento (Aparicio, 1987)

Tipo de área drenada	Coeficiente de Escurrimiento	
	Mínimo	Máximo
Zonas comerciales:		
Zona comercial	0.75	0.95
Zonas mercantiles	0.70	0.90
Vecindarios	0.50	0.70
Zonas residenciales:		
Unifamiliares	0.30	0.50
Multifamiliares espaciados	0.40	0.60
Multifamiliares compactos	0.60	0.75
Semiurbanas	0.25	0.40
Casas habitación	0.50	0.70
Zonas industriales:		
Espaciado	0.50	0.80
Compacto	0.60	0.90
Cementerios y parques	0.10	0.25
Campos de juego	0.20	0.35
Patios de ferrocarril y terrenos sin construir	0.20	0.40
Zonas suburbanas	0.10	0.30
Calles:		
Asfaltadas	0.70	0.95
De concreto hidráulico	0.80	0.95
Adoquinadas o empedradas, juntas con cemento	0.70	0.85
Adoquín sin juntar	0.50	0.70
Terracerías	0.25	0.60
Estacionamientos	0.75	0.85
Techados	0.75	0.95
Praderas:		
Suelos arenosos planos (pendientes: 0.02 ó menos)	0.05	0.10
Suelos arenosos con pendientes medias (0.02 - 0.07)	0.10	0.15
Suelos arenosos escarpados (0.07 ó más)	0.15	0.20
Suelos arcillosos planos (0.02 ó menos)	0.13	0.17
Suelos arcillosos con pendientes medias (0.02 - 0.07)	0.18	0.20
Suelos arcillosos escarpados (0.07 ó más)	0.25	0.35

1.2.4 Hidrogramas para diferentes periodos de retorno

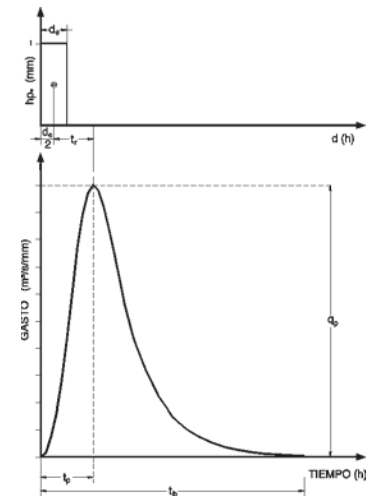
Después de estimar el gasto máximo para diferentes periodos de retorno, es necesario definir la forma del hidrograma de escurrimiento directo, para ello existen diferentes modelos que pueden ser usados, entre ellos:

- Hidrograma unitario adimensional
- Hidrograma unitario geomorfológico
- Hidrograma unitario triangular
- Método de Chow

La opción propuesta en esta metodología es usar el Hidrograma Unitario Adimensional (HUA, Tabla 1.4); sin embargo, puede ser cualquiera otra.

Tabla 1.4 Coordenadas del HUA

t / t_p	q / q_p
0.00	0.000
0.10	0.01
0.20	0.075
0.30	0.160
0.40	0.280
0.50	0.430
0.60	0.600
0.70	0.770
0.75	0.830
0.80	0.890
0.90	0.970
1.00	1.000
1.10	0.980
1.20	0.920
1.25	0.880
1.30	0.840
1.40	0.750
1.50	0.660
1.60	0.560
1.75	0.450
1.80	0.420
2.00	0.320
2.20	0.240
2.25	0.220
2.40	0.180
2.50	0.150
2.60	0.130
2.75	0.105
2.80	0.098
3.00	0.075
3.25	0.053
3.50	0.036
3.75	0.026
4.00	0.018
4.25	0.012
4.50	0.009
4.75	0.006
5.00	0.004



Características del H.U.A.

Las características del HUA se obtienen a partir de las siguientes expresiones (Aparicio, 1987):

Tiempo de retraso:

$$t_r = 0.6 t_c \quad (1.5)$$

Tiempo de pico:

$$t_p = \frac{d_e}{2} + t_r \quad (1.6)$$

Tiempo base:

$$t_b = 2.67 t_p \quad (1.7)$$

Gasto de pico:

$$q_p = \frac{0.208 A_c}{t_p} \quad (1.8)$$

El hidrograma que debe transitarse a través del río se define multiplicando los valores obtenidos con las ecuaciones 1.6 y 1.8 por cada una de las coordenadas de la Tabla 1.4.

1.3 Generación de escenarios de peligro

Para conocer los cambios que ocurren sobre una corriente o una planicie de inundación (profundidad del agua, velocidad de la corriente, zona inundada, etc.) durante el paso de una crecida, se debe llevar a cabo el tránsito de la ave-

nida. Para ello se cuenta con diferentes programas de computadora, en algunos casos mejores que en otros.

1.3.1 Clasificación de modelos de simulación

Como se mencionó arriba, para simular una inundación existen diferentes modelos que son producto de las hipótesis simplificadoras aceptadas para resolver las ecuaciones que definen el comportamiento del fenómeno. De acuerdo con lo anterior, se cuenta con modelos hidráulicos y modelos hidrológicos, siendo los primeros los que mejores resultados obtienen. Más aún, dentro de los hidráulicos se tienen modelos que analizan el comportamiento del flujo en una, dos y tres dimensiones; obviamente su precisión mejora en función de las dimensiones usadas para su análisis; sin embargo, también los requerimientos de información son mayores.

Los programas empleados en esta parte de la metodología han sido seleccionados debido a su facilidad de uso y, aunque es software libre, cuentan con un buen soporte técnico. El modelo hidráulico propuesto para ser usado es HecRAS, propuesto por el Cuerpo de Ingenieros de los Estados Unidos (USACE, 2002) debido a que:

- 1) Es un modelo ampliamente reconocido y por ende está validado,
- 2) Es público, lo que significa que no tiene ningún costo y
- 3) Pese a que es un modelo unidimensional, en la mayoría de los casos esta hipótesis no tiene mayores repercusiones; sin embargo, habrá algunos casos en los que sea necesario emplear algún modelo bidimensional. En este sentido, actualmente se está revisando el programa de cómputo Mike Flood y, aunque no es el único en su tipo, es una opción para el modelado de flujo bidimensional. El uso de esta herramienta y la adecuación de sus resultados está fuera del alcance de este trabajo, por lo que serán motivo de un futuro manual.

A continuación se presentan los requerimientos para esta parte de la metodología:

- ArcGIS 8.0 ó mayor
- HecRAS 3.1.3 ó mayor
- Spatial Analyst 8.0 ó mayor

- Hec GeoRAS 4.1 ó mayor (Extensión)
- Hydrology Modelling (Extensión)
- Modelos Digitales del Terreno (MDT)
- Xtools Pro for ArcGIS 2.2.0 ó mayor

En esta parte de la metodología se detalla el uso de la herramienta Hec GeoRAS (Figura 1.37):

- Extracción desde un SIG de los datos básicos, como se muestra en la primera parte de esta guía metodológica (inciso 1.1).
- Completado de la información mínima requerida para simular en HecRAS las avenidas calculadas en el inciso anterior (1.2).
- Importación de los resultados obtenidos en HecRAS para su interpretación en ArcGIS.

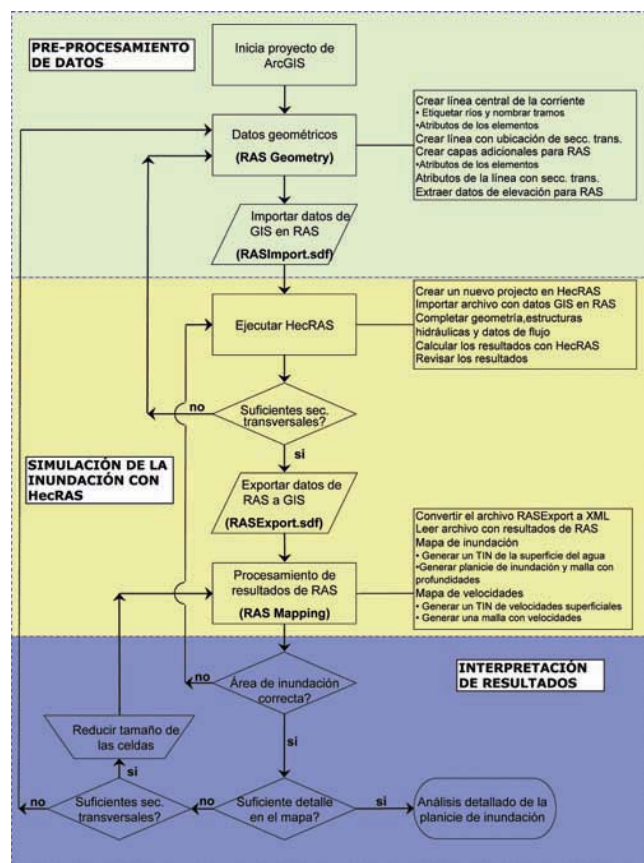


Figura 1.37 Diagrama de flujo del proceso para usar Hec GeoRAS (USACE, 2005)

NOTA: Parte de estas notas ha sido tomada del manual de usuario de *Hec GeoRAS* (USACE, 2005)

1.3.2 Preparación de archivos en Arc GIS

Cuando se carga la extensión *Hec GeoRAS*, la barra de herramientas añadida a la interfase de *ArcGIS* es la que se muestra en la Figura 1.38.



Figura 1.38 Barra de herramienta de Hec GeoRAS

El preprocesamiento de los datos geométricos desde *ArcGIS*, para su posterior exportación hacia HecRAS, se realiza con el menú **RAS Geometry**.

Paso 1. Crear las capas que se usarán para guardar la información exportada (Figura 1.39). Para ello existen dos caminos:

- Seleccionar, una por una, las capas que se usarán.
- Seleccionar la opción All, con la que se generarán las 14 capas que aparecen en el menú.

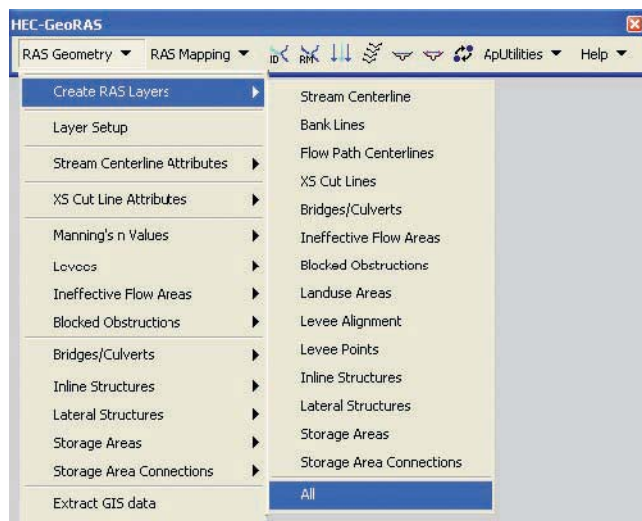


Figura 1.39 Barra de herramienta de Hec GeoRAS

La información mínima necesaria para usar HecRAS requiere que desde *ArcGIS* se exporten los archivos siguientes:

- Archivo con la trayectoria del río (**Stream Centerline**)
- Archivo con la ubicación y geometría de las secciones transversales (**XS Cut Lines**)

Dependiendo de la información disponible, o de la precisión de los resultados requeridos, se usan más capas de información; sin embargo, en esta guía sólo se plantea lo básico y, en caso de requerir detalles más específicos (importar capas con información ya existente, por ejemplo, estructuras hidráulicas etc.) deberá recurrirse al manual de usuario de *Hec GeoRAS* (USACE, 2005).

Paso 2. Dado que se cuenta con la red de drenaje de la cuenca en estudio (inciso 1.1.7), la primera capa que se creará es **Stream Centerline** (Figura 1.40).

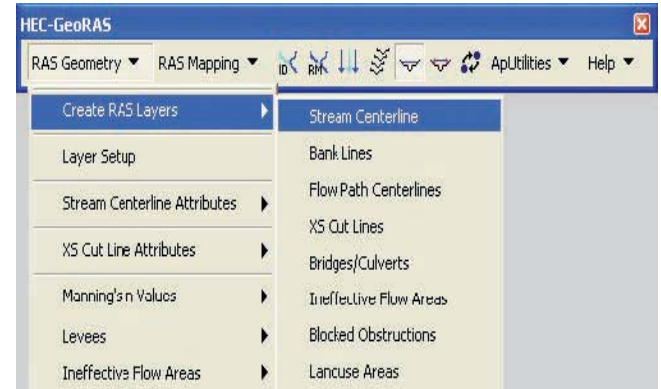


Figura 1.40 Opción para crear la capa que define la corriente principal

Añadida la capa anterior, el trayecto de la corriente se define digitalizando esa información. Para ello se selecciona **Editor | Start Editing**, enseguida la herramienta **Sketch Tool** (Figura 1.41) y comienzan a dibujarse los tramos del río, uno por uno (tratando de seguir el contorno de la corriente, como se muestra en la figura siguiente).

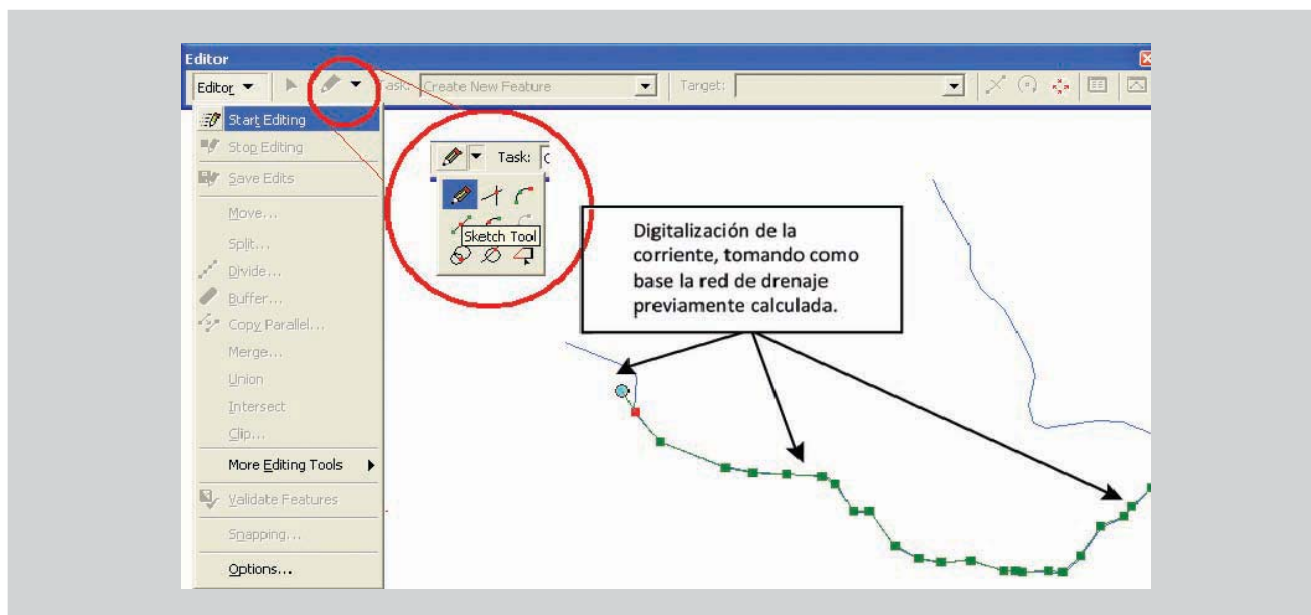


Figura 1.41 Opción para crear la capa que define la corriente principal

Para finalizar, se salva el dibujo (**Save Edits**) y se detiene la edición (**Stop Editing**).

La capa *Stream Centerline* no está completa hasta que se asigne un nombre a cada río y cada tramo del mismo. Para ello, en la barra de *Hec GeoRAS* se activa la herramienta **Reach and River ID** y con el ratón se elige el río o cada uno de los tramos que existan en la red de drenaje que se esté trabajando, para asignarles un nombre (Figura 1.42).



Figura 1.42 Identificación de ríos y tramos

Paso 3. La ubicación, origen y final de las secciones transversales se indican en un archivo que se crea desde la barra de menú de *Hec GeoRAS*, eligiendo **RAS Geometry | Create RAS Layers | XS Cut Lines**. Enseguida aparece la ventana de la Figura 1.43, en la que se define el nombre del archivo y se da **OK**.

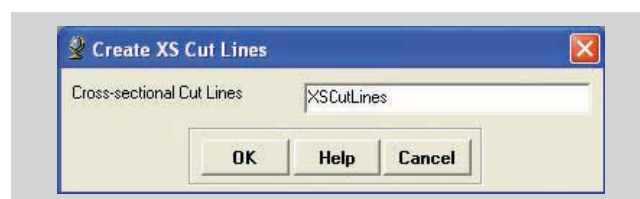
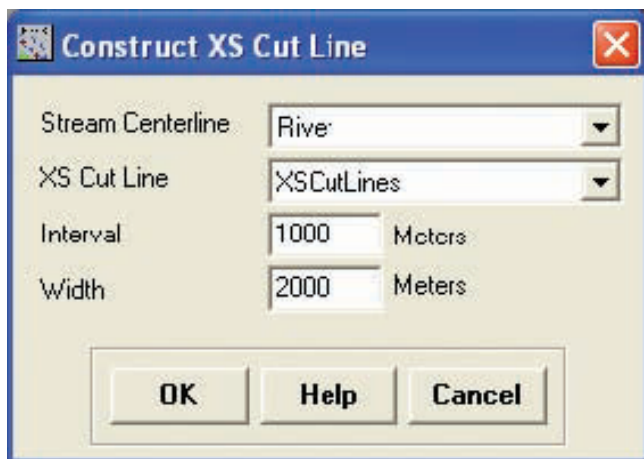


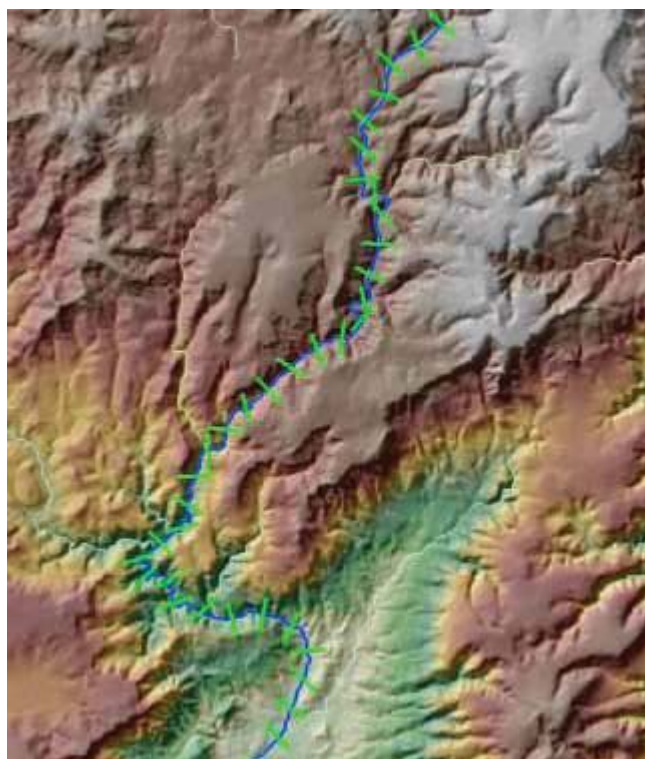
Figura 1.43 Capa con las secciones transversales del río

Para trazar las secciones se edita el archivo **XS CutLines** y se dibuja la ubicación de cada sección transversal. Para ello se tienen dos modalidades:

- Digitalizar las secciones
- Seleccionar la opción **Construct XS Cutlines**. Con esta opción se generan automáticamente secciones transversales a una cierta distancia que es especificada en un cuadro de diálogo (Figura 1.44a). El resultado puede verse en la Figura 1.44b.



a) Aquí se especifican las secciones deseadas



b) Generación automática de secciones

Figura 1.44 Construcción automática de secciones transversales

Paso 4. Una vez creados los archivos que van a ser utilizados en HecRAS, la identificación de cada uno de ellos se realiza con la opción **RAS Geometry | Layer Setup**, con la que se desplegarán las ventanas mostradas en la Figura 1.45. Éstas permiten seleccionar los archivos usados durante los procesos y la extracción de

la información, dado que usualmente se emplearán MDT del INEGI, deberá seleccionarse la opción Grid.

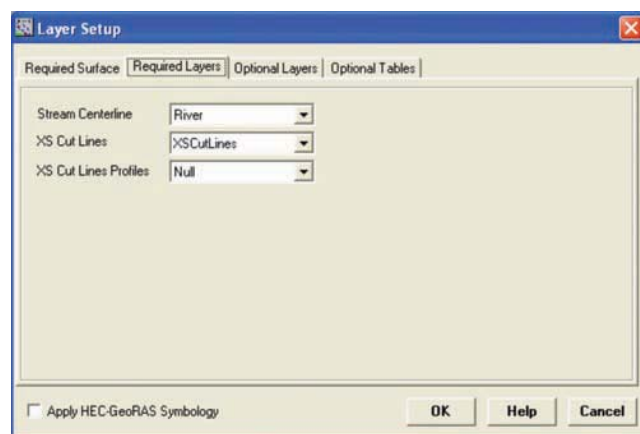
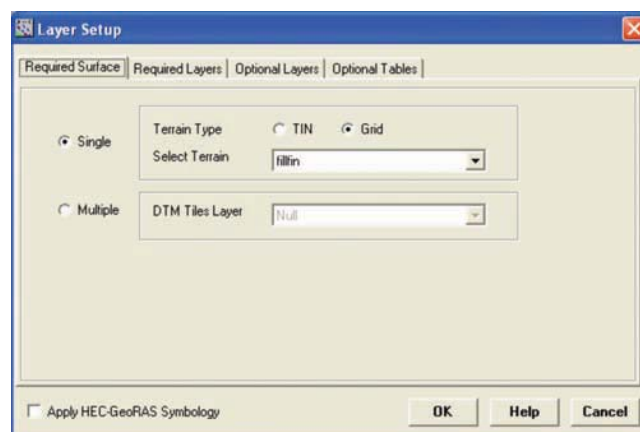


Figura 1.45 Identificación de los archivos que contienen la información

Una manera de corroborar que las secciones han sido definidas de manera adecuada, es mediante la herramienta **Plot Cross Section**. Con ella es posible observar su forma (Figura 1.46) y, en caso de ser necesario, modificarla.

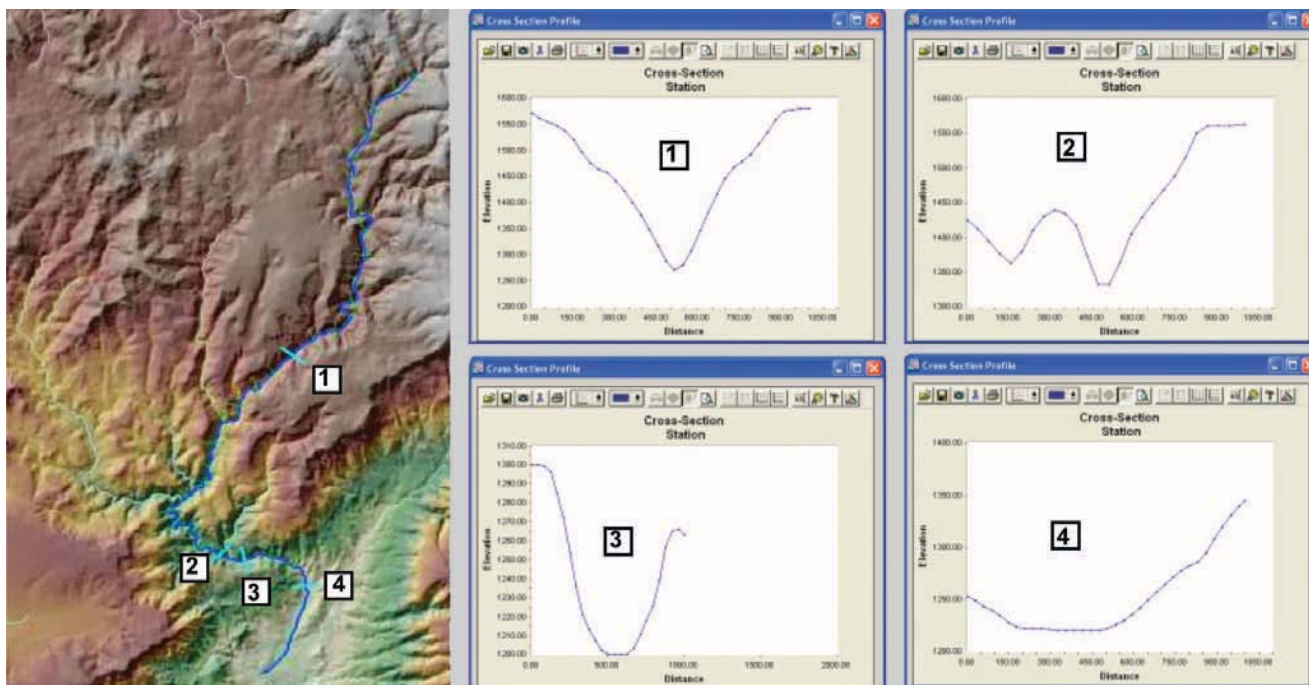


Figura 1.46 Verificación de que las secciones transversales son adecuadas

Si la forma y la ubicación de las secciones son las adecuadas, éstas se salvan (**Save Edits**) y se detiene la edición (**Stop Editing**).

Para este momento, los archivos requeridos para simular en *HecRAS* ya han sido creados y completados con información parcial. Lo que resta hacer es armar la topología del modelo.

Paso 5. Para terminar de llenar la tabla de atributos del archivo *Stream Centerline*, se debe seleccionar **RAS Geometry | Stream Centerline Attributes** y una por una, las opciones **Topology**, **Lengths/Stations** y **Elevations** que aparecen en el menú (Figura 1.47), con lo que se incorpora toda la información requerida.

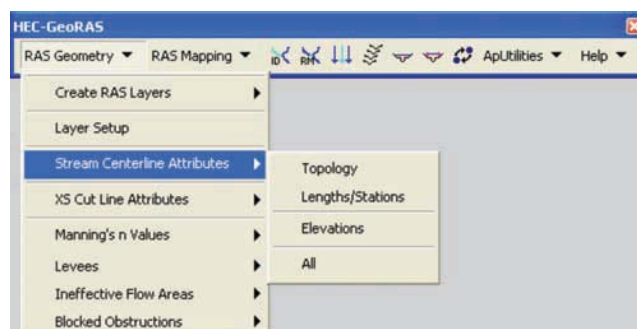


Figura 1.47 Completado de los atributos del archivo centerline

Paso 6. De igual manera, para completar el llenado de la tabla de atributos del archivo *XS Cut Line*, se debe seleccionar **RAS Geometry | XS Cut Line Attributes** y, seleccionar una por una las opciones **River/Reach Names**, **Stationing**, **Bank Stations**, **Downstream Reach Lengths** y **Elevations** que aparecen en el menú (Figura 1.48). Con ello, se completa el llenado de la tabla de atributos y se crea una tabla con las coordenadas x, y y z, que será usada más adelante, durante el proceso de exportación de los datos.

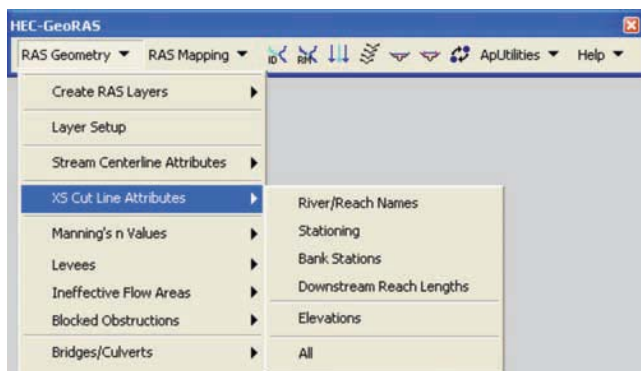


Figura 1.48 Completado de los atributos del archivo de secciones transversales

Paso 7. Finalmente, para exportar los datos desde *ArcGIS* hacia *HecRAS*, se debe seleccionar **RAS Geometry | Extract GIS Data** (Figura 1.49), con lo que aparecerá una ventana como la mostrada en la Figura 1.50; en ella deberá indicarse la ruta y el nombre con el que se desea guardar el archivo que contiene la información generada en *ArcGIS*.

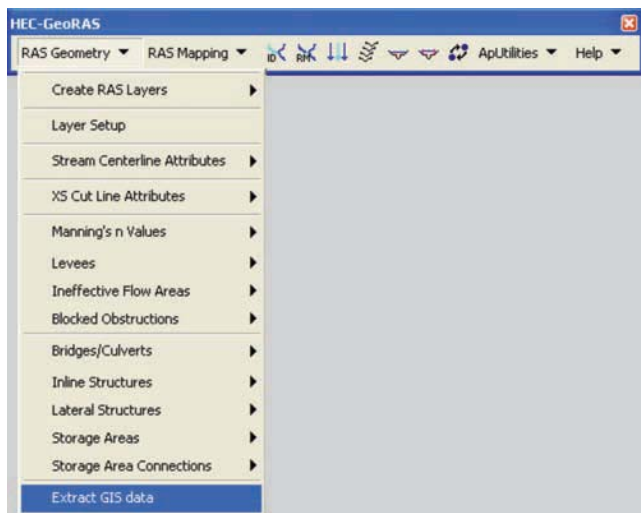


Figura 1.49 Extracción de datos desde ArGIS hacia HecRAS



Figura 1.50 Direccionamiento de los datos exportados

Hasta aquí el resultado será un par de archivos: uno en formato **SDF** y el otro en formato **XML**, los cuales serán usados a continuación para elaborar el proyecto en *HecRAS*.

1.3.3 Creación del proyecto en HecRAS (simulación del tránsito de avenidas)

La simulación del paso de las avenidas a lo largo del río, también conocido como tránsito de avenidas, y la exportación de los resultados hacia *ArcGIS*, se lleva a cabo en seis etapas:

- Importación de los datos geométricos en *HecRAS*
- Completado de la información geométrica
- Información de los caudales que serán simulados
- Condiciones de frontera en el río o tramo que será simulado
- Ejecución del programa e interpretación de resultados
- Verificación y exportación de los resultados hacia *ArcGIS*

1.3.3.1 Importación de datos

En esta etapa se lee el archivo que contiene la información geométrica del proyecto, generado en *ArcGIS*.

Paso 1. Crear un proyecto nuevo en *HecRAS* (Figura 1.51). Seleccionar el directorio de trabajo y salvarlo (en el ejemplo, el proyecto creado se llama Mezquital.prj, como se muestra en la Figura 1.52).

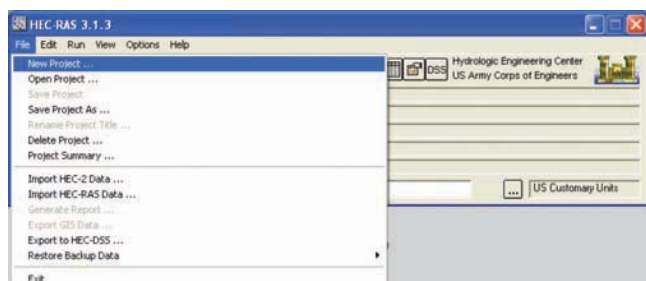


Figura 1.51 Creación de un nuevo proyecto en HecRAS

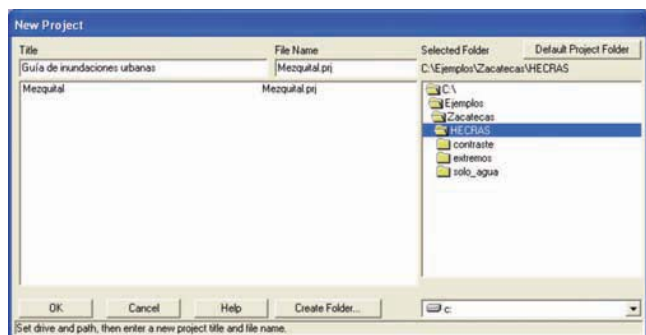


Figura 1.52 Definición del directorio de trabajo

Paso 2. Seleccionar la opción **Options | Unit system (US Customary/SI...)** y escoger **System International (Metric System)**, como se muestra en la Figura 1.53.

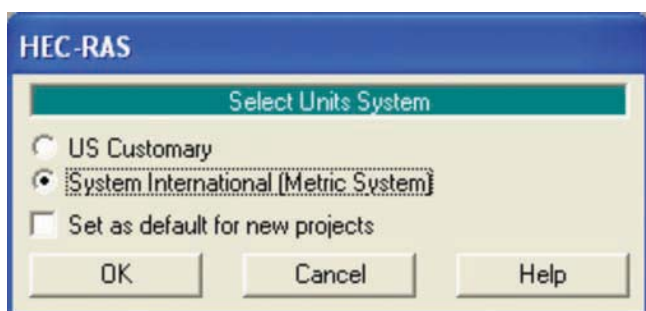


Figura 1.53 Selección del sistema de unidades que se usará

Paso 3. Para importar los datos extraídos desde ArcGIS, seleccionar la opción **Edit | Geometric Data ...** y, en la ventana que se despliega se elige **File | Import Geometry Data | GIS Format**. A continuación aparece una ventana como la mostrada en la Figura 1.54 con la que se buscará el archivo que se exportó desde ArcGIS, en el directorio de trabajo previamente especificado.

NOTA: Se debe recordar que los archivos creados en ArcGIS, con Hec GeoRAS, tienen extensiones **sdf** y **xml**. HecRAS identifica el primero de ellos.

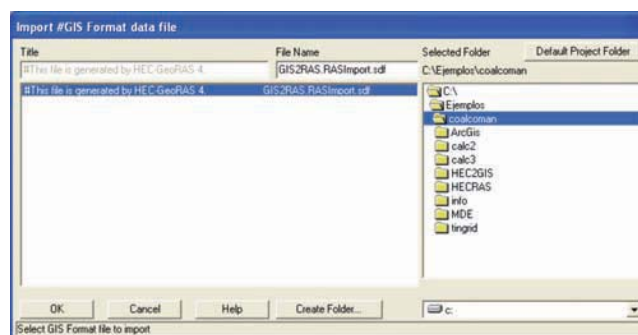


Figura 1.54 Identificación del archivo con los datos geométricos exportado desde ArcGIS

Una vez localizado el archivo con la información geométrica, se selecciona y se oprime el botón **OK**.

Paso 4. En ese momento los datos habrán sido leídos en un archivo temporal y pueden ser incorporados al archivo geométrico del proyecto.

En la pestaña **Intro**, de la ventana Import Options, se debe seleccionar la opción **SI (metric) units** (Figura 1.55).

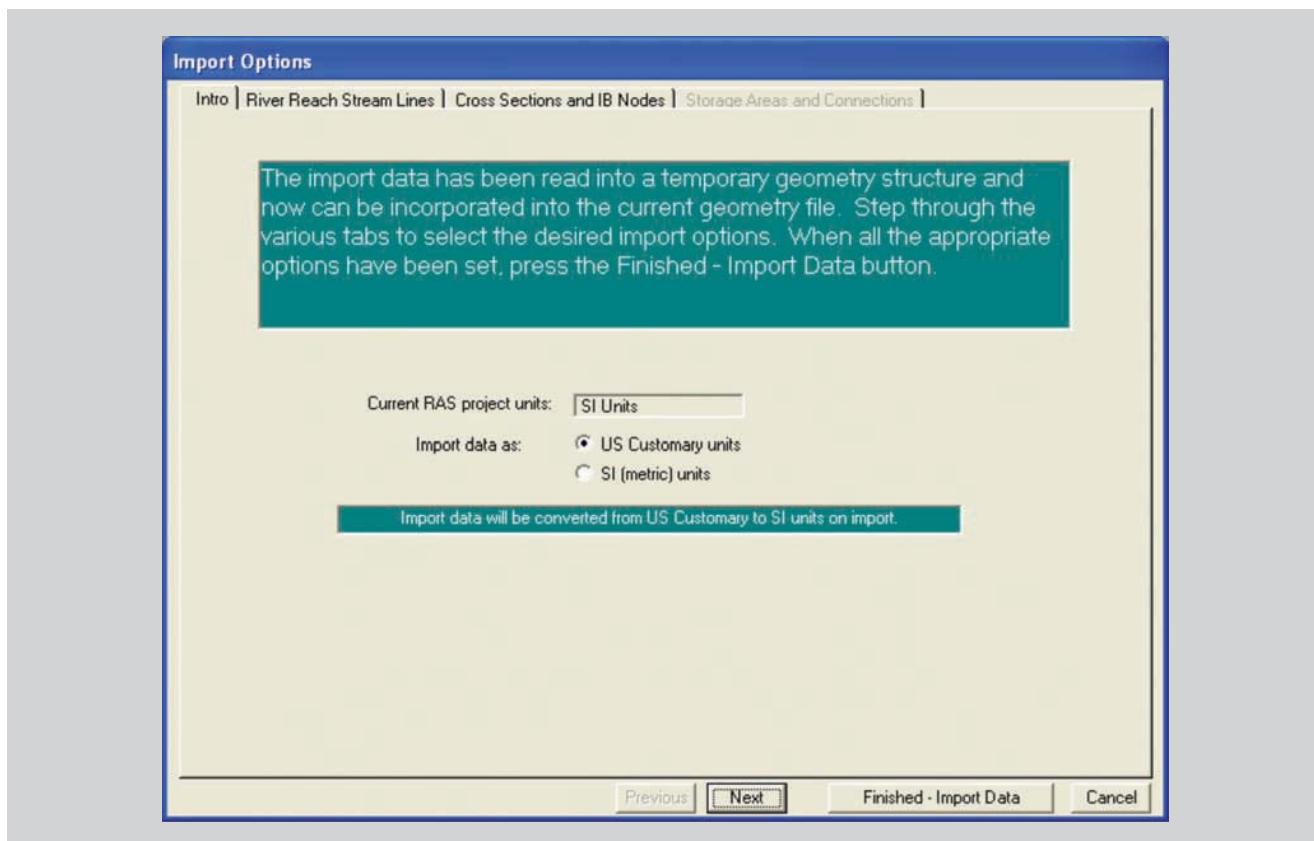


Figura 1.55 Verificación de la información importada. Sistema de unidades

Paso 5. En la pestaña **River Reach Stream Lines**, se verifica que el o los ríos y los tramos que fueron importados sean correctos (Figura 1.56).

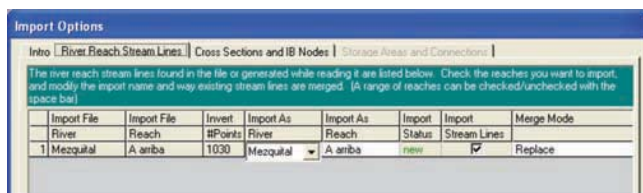


Figura 1.56 Verificación de la información importada. Ríos y tramos

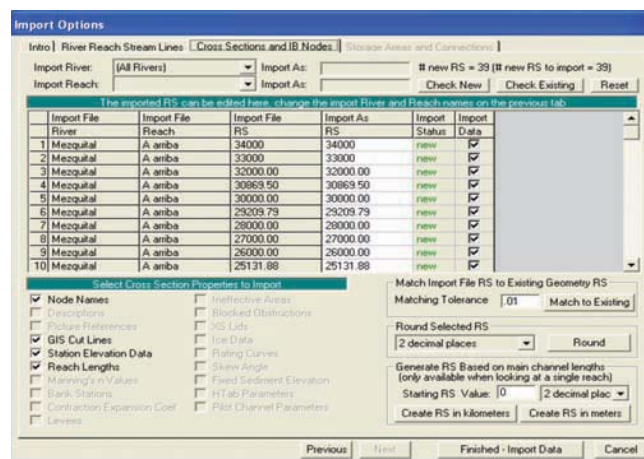


Figura 1.57 Verificación de la información importada. Secciones transversales

Paso 6. En la pestaña **Cross Sections and IB nodes** se confirma la información que tiene que ver con las secciones transversales (Figura 1.57).

Después de confirmar que toda la información que se está importando es correcta, se presiona el botón **Finished - Import Data**. En ese momento se desplegará el modelo que será simulado en HecRAS (Figura 1.58).

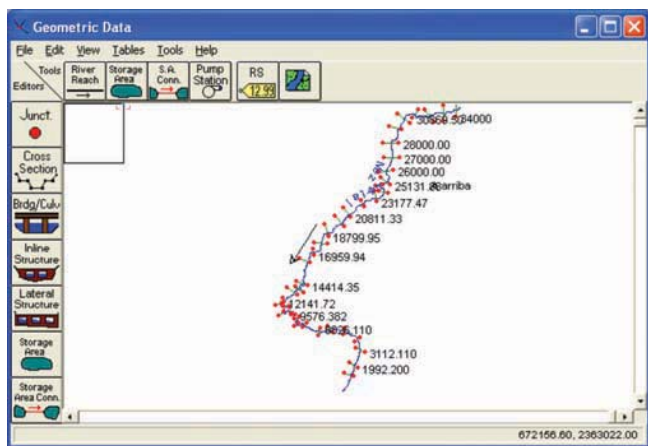
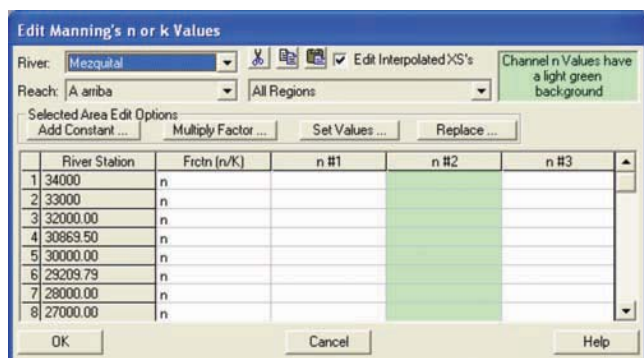


Figura 1.58 Geometría del cauce que será simulado

1.3.3.2 Completado de la información

El siguiente paso consiste en completar la información mínima requerida por HecRAS para realizar la simulación.

Paso 7. Para definir el coeficiente de rugosidad “n” de Manning en cada sección, desde la pantalla principal de HecRAS se elige el ícono **Edit/Enter geometric data**  y en la ventana que se despliega se debe escoger **Tables | Manning's n or k values**. Seleccionando **River** y **Reach** se despliega una tabla (Figura 1.59) que permite definir el valor del coeficiente, incluso por zonas, en cada sección.



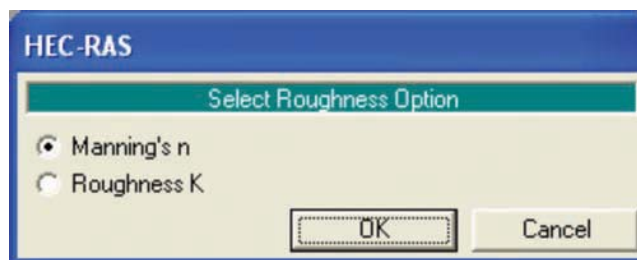
River Station	Frictn (n/K)	n #1	n #2	n #3
1 34000	n			
2 33000	n			
3 32000.00	n			
4 30869.50	n			
5 30000.00	n			
6 29209.79	n			
7 28000.00	n			
8 27000.00	n			

Figura 1.59 Ventana para definir el coeficiente de rugosidad

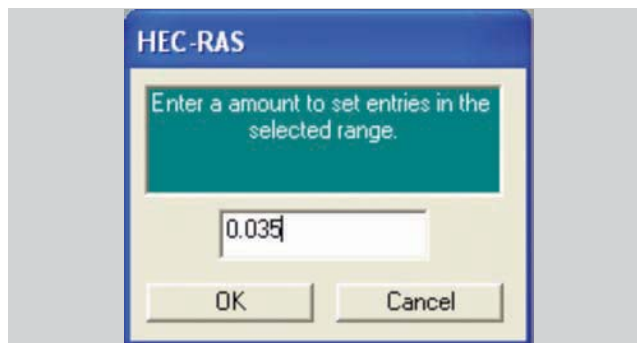
NOTA: El valor de la “n” de Manning puede variar y ser diferente para cada margen, para el centro del cauce o en cada sección, de acuerdo con los requerimientos del modelo, por lo que definirlo manualmente puede ser laborioso.

En este ejemplo se usará un mismo valor para las márgenes y otro para el centro del cauce.

Para definir el coeficiente de rugosidad, en la ventana Edit Manning's n or k Values se presiona el botón **Set Values**, con lo que se despliega una caja de texto (Figura 1.60a) en la que se elige **Manning's n**. Luego, para seleccionar una columna completa, se da un clic en la celda gris con encabezado (**n #1**, **n #2** ó **n #3**) y, finalmente, se elige **Set Values** para que en la caja de texto que aparece (Figura 1.60b) se teclee el valor de la “n” de Manning que corresponde a la zona del cauce en cuestión.



a) Selección del coeficiente de rugosidad



b) Definición del valor del coeficiente

Figura 1.60 Selección y definición del coeficiente de rugosidad

El resultado de la operación anterior se muestra en la Figura 1.61. De la misma manera se introducen los valores correspondientes para las otras columnas.

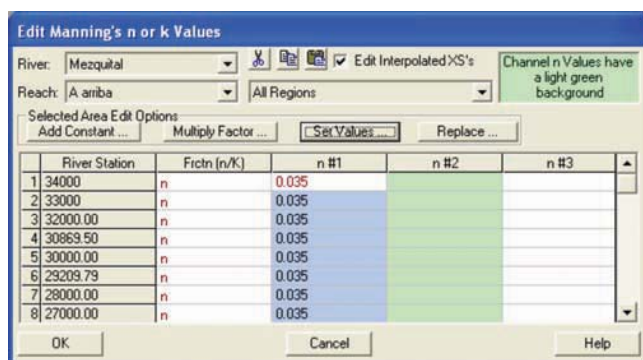


Figura 1.61 Selección y definición del coeficiente de rugosidad

NOTA: En el supuesto caso en el que existieran estructuras (canales laterales, alcantarillas, puentes, etc.) que no se extrajeron desde ArcGIS y se desea introducir directamente en HecRAS, se debe consultar el inciso Importing RAS Layers del Capítulo 3 del manual de usuario de *Hec GeoRAS* (USACE, 2005).

1.3.3.3 Gastos

Previamente se realizó el cálculo de los gastos asociados con diferentes periodos de retorno (inciso 1.2 Gasto de Diseño). Dependiendo del tipo de simulación que se pretenda realizar, la información de los caudales puede darse de dos maneras:

- Como un gasto constante (simulación en flujo permanente)
- Como un hidrograma (simulación en flujo no permanente)

Para este ejemplo sólo se mostrará el primer caso, para el segundo, se deberá consultar el manual de usuario de *HecRAS* (USACE, 2002).

En los pasos anteriores se obtuvo una tabla como la mostrada a continuación:

Tabla 1.5 Resultados obtenidos en el inciso 1.2

Tr (años)	hp (mm)	i (mm/h)	Q (m ³ /s)
2			
5			
...			
1000			
2000			

Los datos de la última columna de la Tabla 1.5 son los que se usarán para modelar en las avenidas en *HecRAS*.

Paso 1. La información referente a caudales se define a través del menú *Steady Flow Data*, que se activa seleccionando el ícono **Edit/Enter steady flow data**, desde la pantalla principal de *HecRAS*. Con lo anterior se despliega la ventana siguiente:

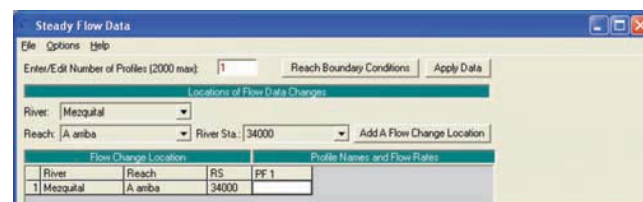


Figura 1.62 Ventana principal para introducir la información de gastos

Paso 2. El número de perfiles que se simularán corresponde a los gastos que se ingresarán a través de la opción **Enter/Edit Number of Profiles**. En esta metodología se obtienen 10 valores, correspondientes a 10 periodos de retorno, sección 1.3.3.3.

Después de teclear 10, seguido de un *enter*, en la parte baja de la ventana se genera una tabla con las 10 columnas en las que se introducirá el valor de los caudales, uno por columna, como se muestra en la Figura 1.63.

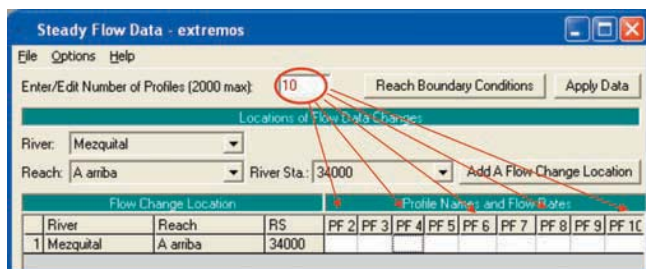


Figura 1.63 Definición del número de perfiles que serán simulados

Paso 3. Los caudales que se usarán para simular el comportamiento del río se especifican en cada una de las celdas blancas, colocando el cursor en ellas y escribiendo el valor deseado (Figura 1.64).

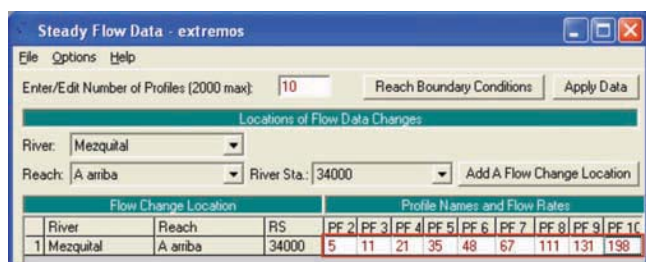


Figura 1.64 Definición del número de perfiles que serán simulados

Paso 4. Para identificar el periodo de retorno de cada gasto, se edita el encabezado de las columnas, seleccionando **Options | Edit Profile Names ...** (Figura 1.65)

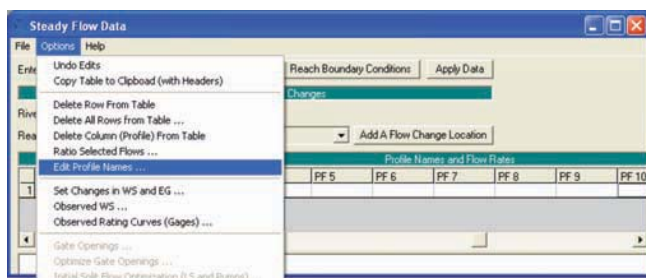


Figura 1.65 Opción para editar el nombre de cada perfil

Los encabezados de las columna se muestran en la Figura 1.66a. Para cambiar el contenido de las celdas blancas, se da doble clic sobre ellas y se re-escribe la información adecuada. Después de especificar el periodo de retorno de cada gasto, la tabla queda como se muestra en la Figura 1.66b, y con ello se termina de cargar la información de los caudales.

HEC-RAS

Edit Profile Names. (16 Characters Max)

	Profile #	Profile Name
1	1	PF 1
2	2	PF 2
3	3	PF 3
4	4	PF 4
5	5	PF 5
6	6	PF 6
7	7	PF 7
8	8	PF 8
9	9	PF 9
10	10	PF 10

OK Cancel

a) Encabezados por default

HEC-RAS

Edit Profile Names. (16 Characters Max)

	Profile #	Profile Name
1	1	Tr = 2 años
2	2	Tr = 5 años
3	3	Tr = 10 años
4	4	Tr = 25 años
5	5	Tr = 50 años
6	6	Tr = 100 años
7	7	Tr = 250 años
8	8	Tr = 500 años
9	9	Tr = 1000 años
10	10	Tr = 2000 años

OK Cancel

b) Encabezados editados

Figura 1.66 Edición del nombre de cada perfil

1.3.3.4 Condiciones de frontera

Las condiciones de frontera deben establecerse en todos los extremos de la red de drenaje.

Paso 1. En el menú Steady Flow Data, se da clic en el botón **Reach Boundary Conditions** y aparece la ventana de la Figura 1.67. En la tabla *Select Boundary Condition, Locations and Types*, por cada tramo de río habrá un renglón.

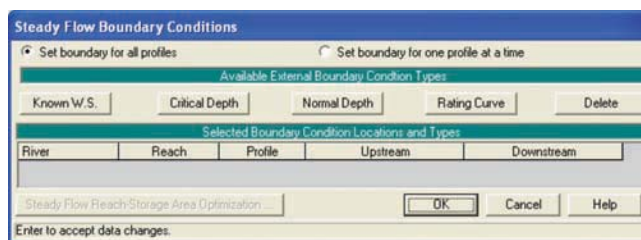
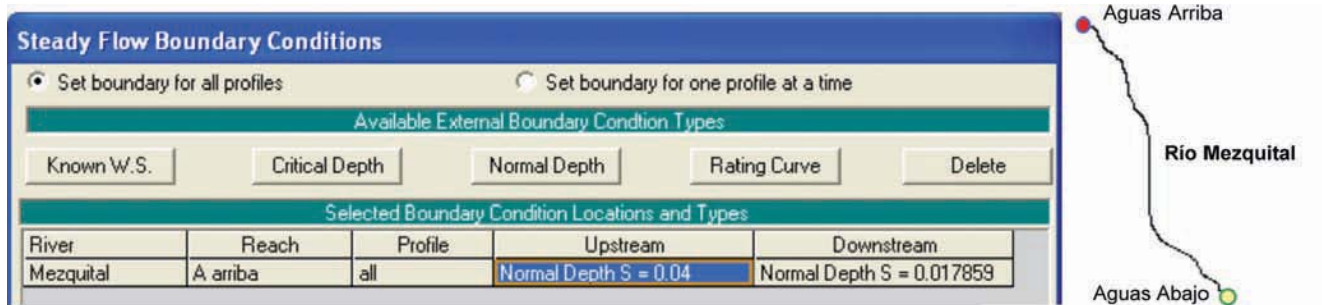
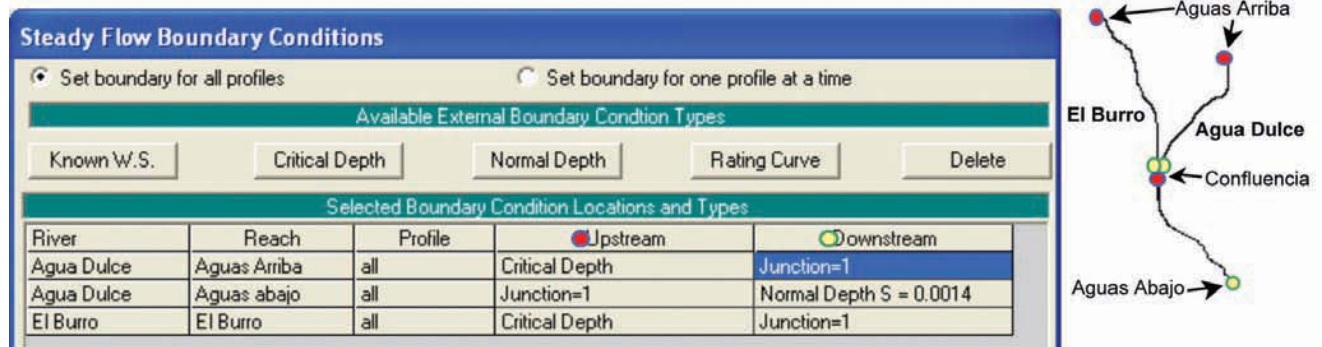


Figura 1.67 Pantalla para definir las condiciones de frontera

Un río puede tener varios tributarios y en cada uno de ellos se debe definir la condición de frontera de sus extremos. Así, si se trabaja con un río, sólo habrá un renglón (Figura 1.68a), pero a medida que aumenten los tributarios también lo harán los renglones de la tabla (Figura 1.68b).



a) Condiciones de frontera para un solo río



b) Condiciones de frontera para un río y un tributario

Figura 1.68 Muestra de la selección de las condiciones de frontera para diferentes arreglos

Paso 2. En el menú *Steady Flow Data* se da clic en la celda correspondiente al extremo en el que se va a definir la condición de frontera (el fondo de la celda cambiará a azul) y entonces podrá seleccionarse cualquiera de las opciones disponibles, dependiendo de las condiciones hidráulicas que imperen en cada caso:

- Nivel de agua Conocido (*Known W.S.*)
- Tirante crítico (*Critical Depth*)
- Tirante normal (*Normal Depth*)
- Curva elevaciones – gastos (*Rating Curve*)

En los extremos donde se junten dos o más tributarios, el programa lo identifica automáticamente y en esa unión coloca **Junction = n**, donde "n" es el número de la confluencia.

NOTA: Para cualquier tipo de frontera, excepto *Critical Depth*, se requieren algunos datos adicionales. Para más detalle, consultar el manual de usuario de HecRAS (USACE, 2002).

1.3.3.5 Ejecución del programa e interpretación de resultados

Hasta este momento se ha completado el llenado de datos para ejecutar el programa HecRAS. Ahora, para ejecutarlo, se elige el ícono de la simulación seleccionada:

- Flujo permanente (Perform a steady flow simulation) 
- Flujo no permanente (Perform an unsteady flow simulation) 

Para este ejemplo se explica el primero. Para la segunda opción se recomienda consultar el manual de usuario de HecRAS (USACE, 2002).

Paso 1. Al seleccionar la opción de flujo permanente se despliega una ventana como la de la Figura 1.69.

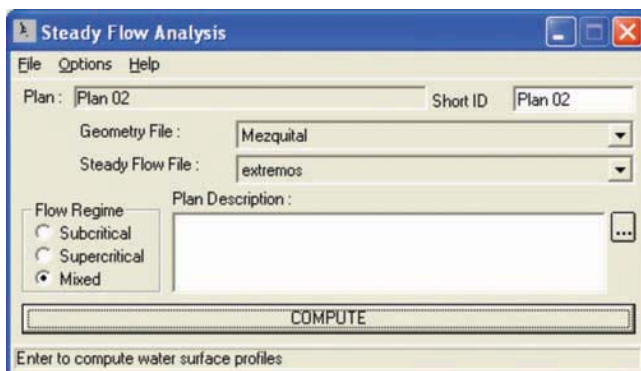


Figura 1.69 Ventana principal de la simulación en flujo permanente

Paso 2. En esta pantalla se debe asegurar que en la sección Flow Regime esté seleccionada la opción **Mixed**, para que el programa calcule libremente las condiciones en las que se encuentra el río y no sea forzado a un solo régimen. Hecho lo anterior, se oprime el botón **COMPUTE**.

Paso 3. El tiempo que demora el programa en realizar los cálculos, está en función del modelo que se trabaje (número de ríos, tramos, secciones transversales, puntos de las secciones, número de

gastos, estructuras hidráulicas incluidas, etc.). Después de presionar el botón **COMPUTE**, aparece una ventana que indica el avance de la simulación (Figura 1.70).

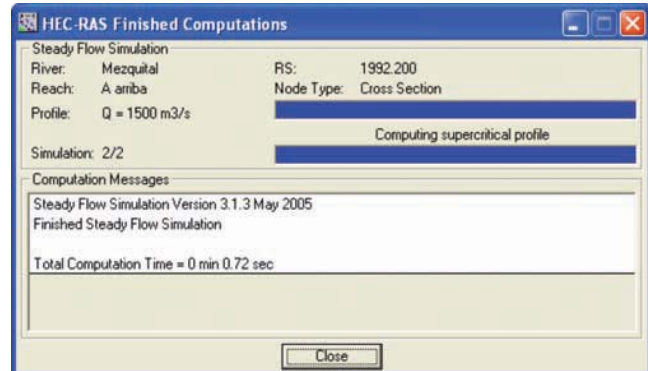


Figura 1.70 Ventana que indica el avance de la simulación

En caso de existir errores durante la incorporación de la información, en la ventana anterior se mostrará una serie de comentarios referentes a dichos errores. Si no fuera el caso, entonces aparecerá la figura anterior y esto será indicativo de que los cálculos han finalizado.

1.3.3.6 Verificación y exportación de resultados

Después de simular el paso de las avenidas y para verificar los resultados obtenidos, es posible usar las herramientas gráficas y tablas disponibles en HecRAS.

Antes de exportar el nivel que alcanza el agua con cada gasto, se debe revisar el polígono que delimita el área de inundación.

La información del mencionado polígono, para cada perfil, puede ser revisada en el editor de datos geométricos (Geometric Data Editor). Seleccionando el menú **Tools | Plot GIS Reach Profile Bounds**, es factible indicar el gasto y el tramo de río para los cuales se desean los resultados gráficos. Para el ejemplo se tiene un tramo único, por lo que en la Figura 1.71 en la opción **River**: se lee (All Rivers), mientras que en **Selected Locations** aparece Mezquital A. arriba.

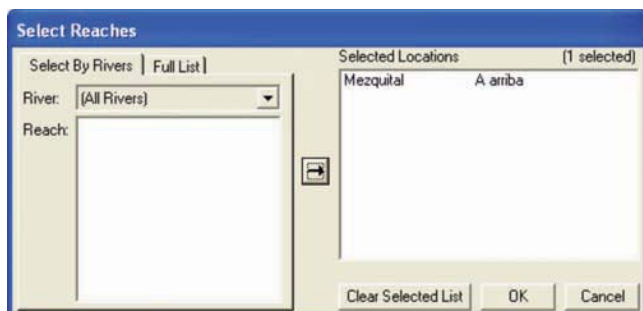


Figura 1.71 Selección del tramo y gasto para mostrar gráficamente

Después de seleccionar los tramos analizados, cuyos resultados interesa revisar, se oprime el botón **OK** y el resultado se muestra en una ventana como la de la Figura 1.72.

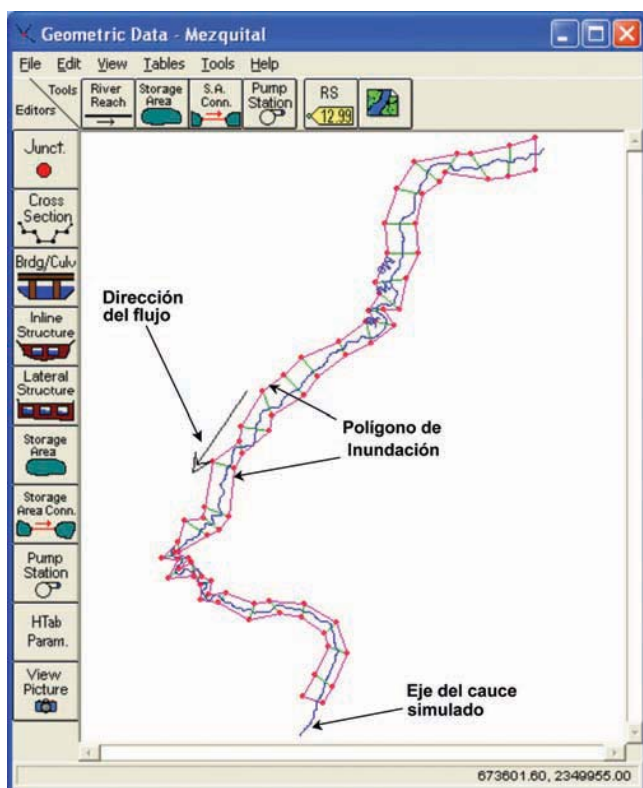


Figura 1.72 Resultado gráfico de la simulación

Esto es importante cuando el sistema de ríos cuenta con bordos que pueden ser rebasados al simular algunos gastos. Si alguno de los bordos ubicados en la parte de aguas arriba es rebasado, será necesario verificar que no ocurra lo mismo con aquéllos ubicados en la parte de aguas abajo.

Finalmente, los resultados de la simulación pueden ser exportados para procesarlos en ArcGIS, a través de la extensión *Hec GeoRAS*. Seleccionando el menú **File | Export GIS Data** se activa una ventana (Figura 1.73) en la que se puede escoger la ubicación del archivo en el que se escribirá la información para ArcGIS, así como las opciones de salida.

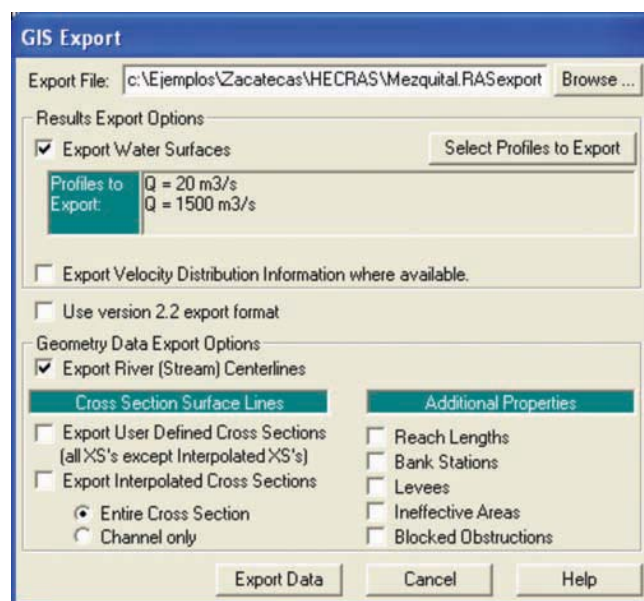


Figura 1.73 Ventana con las opciones para exportar los resultados de la simulación

NOTA: Es importante asegurarse que se hayan seleccionado los perfiles de interés, para ser exportados.

La información del archivo exportado de HecRAS hacia ArcGIS, será escrita en un archivo ***.RASExport.sdf**.

1.3.4 Mapas de inundación

Hec GeoRAS facilita la elaboración de mapas de inundación que muestran los límites de la zona de inundación y los tirantes de la misma, creados con los resultados de la simulación que se exporta desde *HecRAS*.

NOTA: Dado que *HecRAS* es un modelo de simulación unidimensional, los mapas de velocidades del flujo no pueden ser generados. Para ello se requiere el uso de modelos bidimensionales, como el *Mike Flood* (DHI, 2008), *Flo-2D* (Flo-2D, 2007) o el modelo *Flujo – áreas*, del Instituto de Ingeniería de la UNAM (Fuentes, 1997).

Los comandos del submenú **RAS Mapping** traducen los archivos de resultados generados en *Hec RAS* y ayudan para que *ArcGIS* los reinterprete (Figura 1.74).

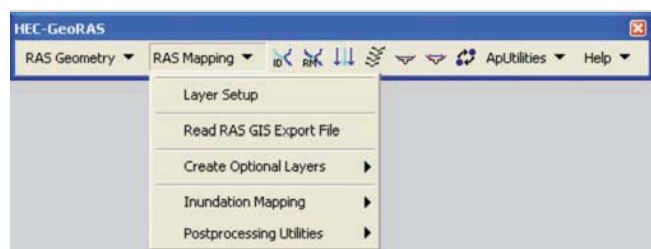


Figura 1.74 Opciones del submenú RAS Mapping

La elaboración de los mapas con los que se delimitan las zonas de inundación se lleva a cabo en cuatro etapas:

- Importación del resultado de la simulación
- Mapa de la zona de influencia
- Modelo tridimensional de la inundación
- Mapa de inundación

1.3.4.1 Importación del resultado de la simulación

El primer paso consiste en convertir el archivo ***.RASExport.sdf** (archivo de resultados de *HecRAS*) a formato **XML**.

Paso 1. En la barra de herramientas de *Hec GeoRAS* se selecciona el botón **Import RAS SDF File**. En seguida aparecerá la ventana mostrada en la Figura 1.75, donde se define el nombre y la ubicación del archivo convertido.

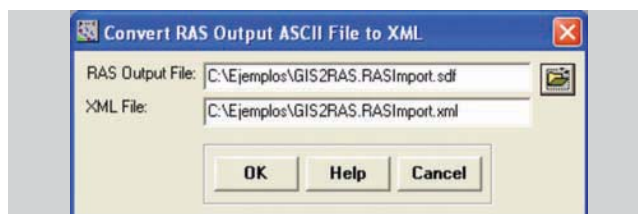


Figura 1.75 Ventana para convertir archivos SDF (de *HecRAS*) a formato XML

En la casilla **RAS output File** se especifica el archivo que contiene la información en formato *SDF* (el archivo exportado desde *HecRAS*), mientras que en la casilla **XML File**, se define automáticamente el nombre del archivo que resulte de la conversión (será el mismo y solamente cambiará su extensión, como se aprecia en la figura anterior). Después de ello, se presiona el botón **OK**.

Paso 2. Antes de procesar la información es necesario especificar el análisis que se va a realizar (un nuevo análisis, o bien, continuar con un análisis ya existente) a través de la opción **RAS Mapping | Layer Setup** (Figura 1.76).

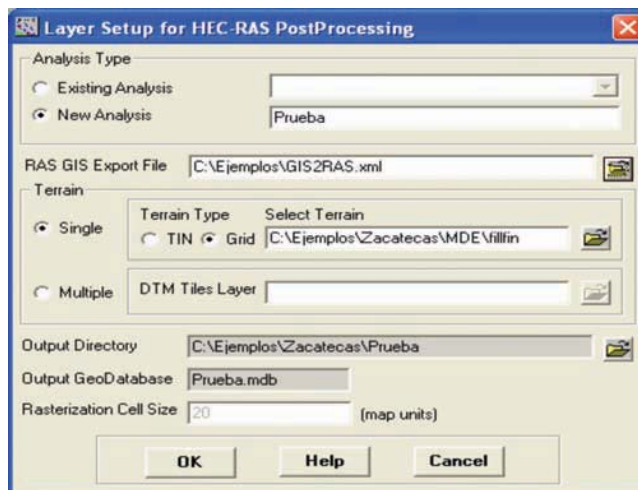


Figura 1.76 Ventana para especificar características del mapa de inundación

Analysis Type.

Define si es un proyecto ya existente, en cuyo caso selecciona el análisis indicado o, si se trata de uno nuevo, se especifica un nombre para identificarlo.

RAS GIS Export File. Especifica el archivo XML que contiene la información con la que se va a trabajar.

Terrain. Define el modelo digital con el que se trabajará para delimitar la zona de inundación.

Output Directory. Toma el nombre del proyecto, especificado arriba, y añade la ruta donde se guardará.

Output GeoDatabase. Se refiere al nombre de la base de datos en la que se guardarán todos los resultados del análisis. Toma el nombre especificado al inicio.

Rasterization Cell Size. Muestra el tamaño mínimo de las celdas usadas en los mapas.

Después de ingresar todos los datos requeridos, se oprime **OK**.

Adicionalmente, para una explicación detallada de cada una de las opciones que se muestran en la Figura 1.76 es recomendable consultar el manual de usuario de *Hec GeoRAS* (USACE, 2005).

Como resultado de lo anterior, el *Data Frame* (espacio de trabajo) en *ArcGIS* se minimiza y se crea uno nuevo con el nombre del análisis que se realiza y donde sólo se copia el *MDE* (Figura 1.77).

Paso 3. Después de crear el nuevo espacio de trabajo, lo siguiente es ingresar los resultados del análisis realizado en *HecRAS*. Para ello se usa la opción **RAS Mapping | Read RAS GIS Export File** (Figura 1.78). Las capas que se agregan son:

- La traza del río (o la red de drenaje). Con ella, se añade la información de los atributos de los ríos y los tramos.

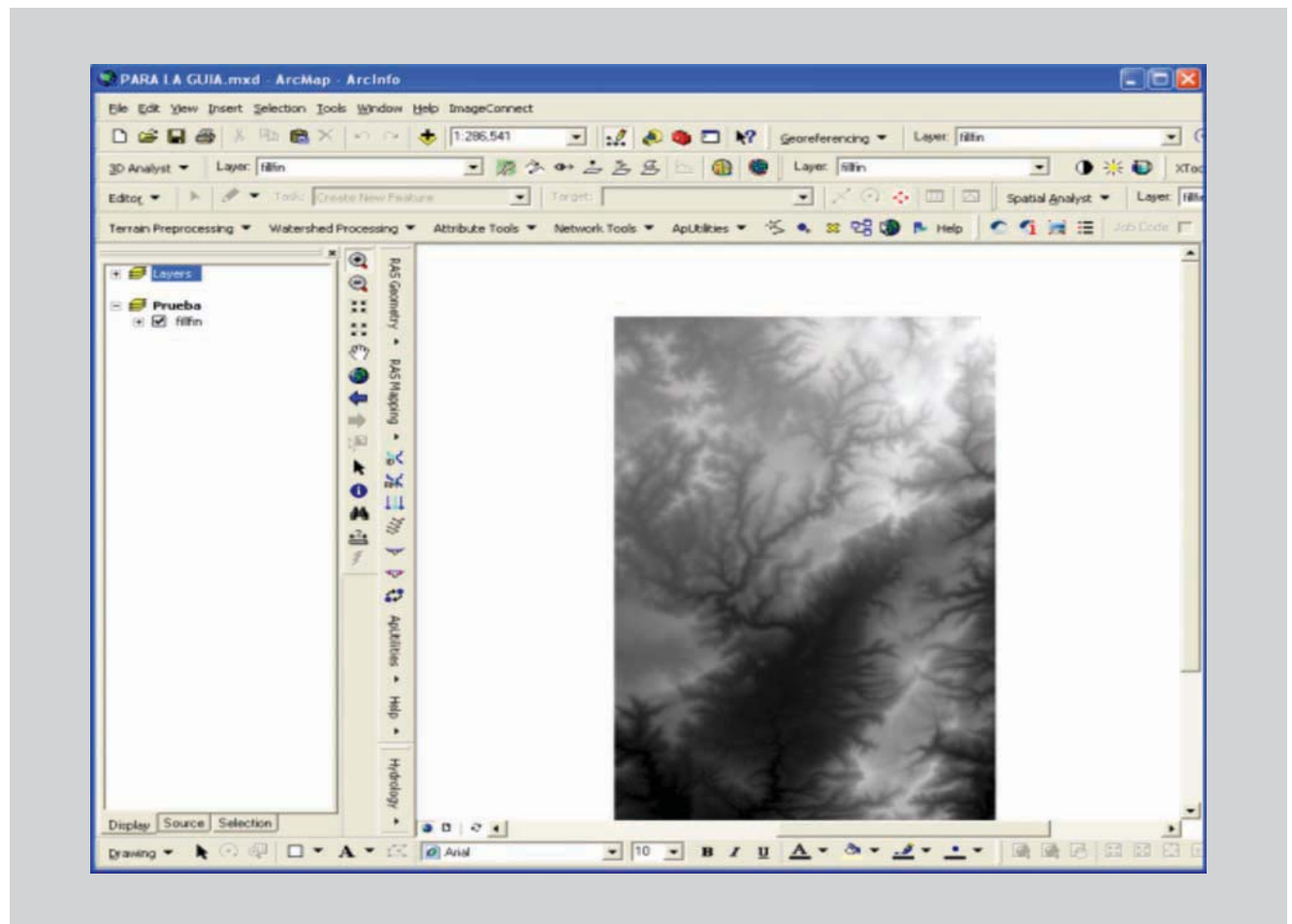


Figura 1.77 Nuevo Data Frame creado en ArcGIS

- Las secciones transversales. En esta capa se incluye, además de la localización de las secciones, la elevación que alcanza el agua en cada una de ellas, para cada gasto simulado.
- El polígono de la zona de inundación. En este caso, se incluye un polígono que representa la zona inundada para cada gasto simulado.

1.3.4.2 Mapas de inundación

Los mapas de inundación se elaboran tomando como base las elevaciones de la superficie del agua reportadas en la capa de secciones transversales y se delimitan con el polígono de la zona de inundación (ambas capas deben ser creadas antes de generar el mapa de inundación). Además, se requiere la topografía de la zona, ya que al usar el método de intersección de mallas se requiere que el *MDE* esté cargado en el proyecto.

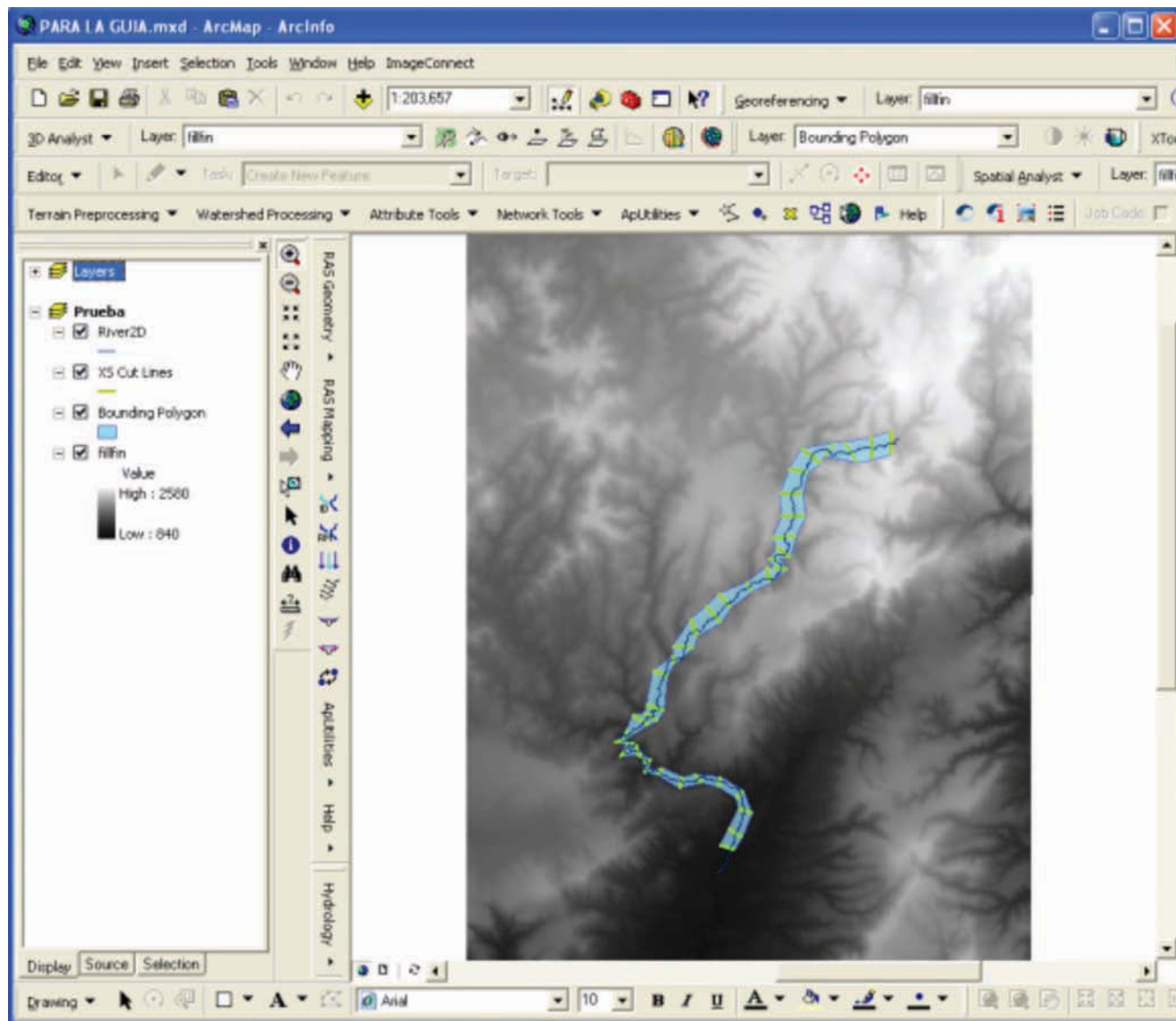


Figura 1.78 Lectura de los resultados exportados desde Hec RAS

A continuación se describen los pasos para crear un mapa de inundación.

Paso 1. Lo primero es crear un *TIN* de la elevación de la superficie del agua; esta información se extrae de la tabla de atributos de la capa de secciones transversales. Para ello se elige **RAS Mapping | Inundation Mapping | Water Surface Generation**, la ventana que se muestra en la Figura 1.79 permite seleccionar el gasto de interés.



Figura 1.79 Elección del gasto de interés para procesar

NOTA: TIN (del inglés Triangulated Irregular Network), es una malla de triángulos que describe la superficie del terreno.

De esa manera se creará un TIN de la superficie del agua para cada gasto, sin tomar en cuenta el MDT (Figura 1.80).

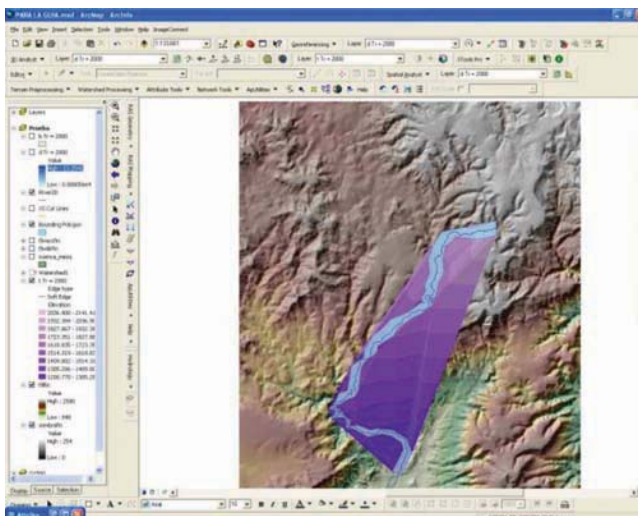


Figura 1.80 TIN de la superficie del agua

Paso 2. La delimitación de la planicie de inundación se realiza con la opción **RAS Mapping | Inundation Mapping | Floodplain Delineation | Gris Intersection**. Para delimitar la inundación, así como las profundidades de la misma, este comando usa la superficie del agua calculada y el MDT de la zona en estudio.

Después de seleccionar el comando anterior, se muestra una ventana en la que se elige el gasto para el cual se definirá la planicie de inundación (Figura 1.81).

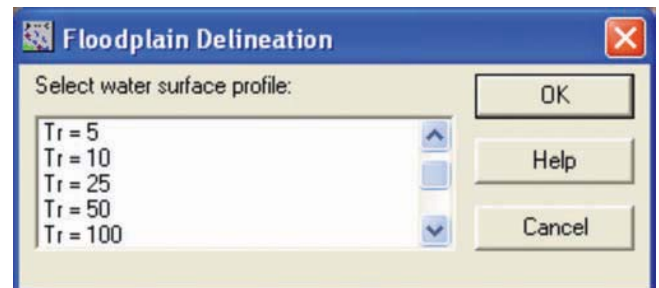


Figura 1.81 Elección del gasto para el que se delimita la planicie de inundación

Después de seleccionar el gasto, el programa genera un par de capas:

- La zona inundada. Es un archivo con polígonos que delimita las zonas afectadas por el gasto analizado (Figura 1.82). El programa lo nombra automáticamente **b Q = X m³/s**, donde X es el valor del caudal correspondiente para esa simulación.

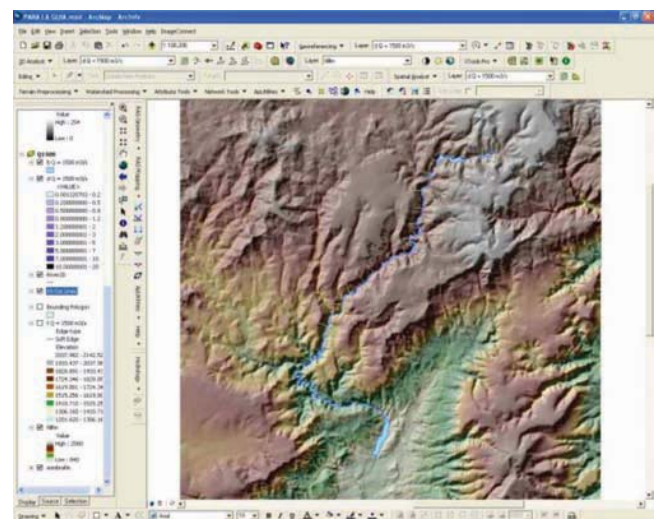


Figura 1.82 Delimitación de la planicie de inundación

- TIN de la inundación. Contiene la profundidad de la inundación en toda la zona afectada (Figura 1.83). El programa lo nombra automáticamente $dQ = X m^3/s$, donde X es el valor del caudal correspondiente para esa simulación.

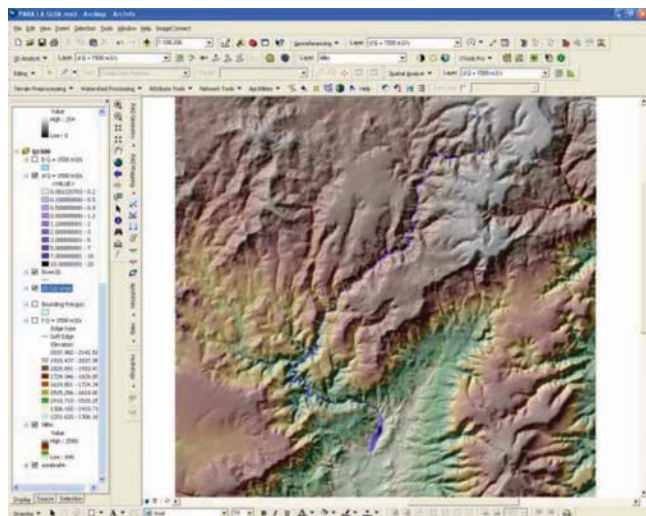


Figura 1.83 TIN con las profundidades del agua en toda la planicie de inundación

Paso 3. Finalmente, para tener un marco de referencia de la magnitud de la inundación conviene integrar en el mapa toda la información del lugar que esté disponible (Figuras 1.84 y 1.85).

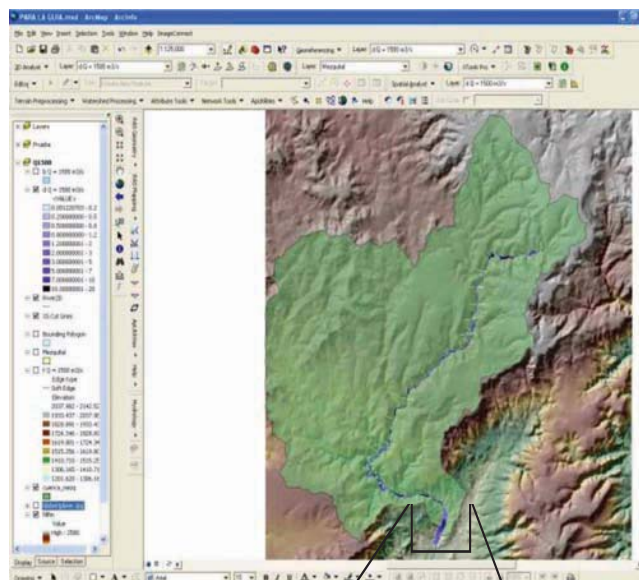


Figura 1.84 Mapa que muestra la planicie de inundación del río Mezquital, Zacatecas

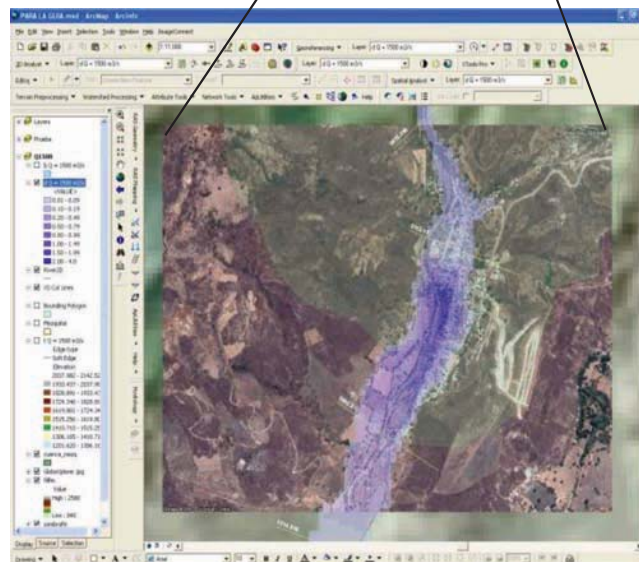


Figura 1.85 Detalle de la planicie de inundación en la comunidad de Mezquital del Oro, Zacatecas

Hasta aquí se termina la delimitación de la planicie de inundación para un escenario determinado. El mismo procedimiento se realiza para cada gasto que se desee analizar, con lo cual se estarán analizando diferentes escenarios de inundación.

El siguiente paso es definir la vulnerabilidad de la localidad en cuestión, ante inundaciones.

2. IDENTIFICACIÓN DE LA VULNERABILIDAD DE LA VIVIENDA ANTE INUNDACIONES

En el capítulo 1 se trabajó con el primer componente del riesgo: El peligro. En este segundo capítulo toca el turno de la vulnerabilidad.

La vulnerabilidad que aquí se analiza se refiere a vulnerabilidad física, y corresponde al análisis de las viviendas en la localidad de estudio para conocer qué tan susceptibles son a las inundaciones.

2.1 Antecedentes

La Subdirección de Riesgos Hidrometeorológicos del CE-NAPRED realizó una metodología para definir la vulnerabilidad de la vivienda en localidades rurales, a nivel de predio, la cual se basa en la inspección física de cada una de las viviendas que conforman la localidad en estudio (Eslava, 2006). Este informe presenta una metodología para identificar y cuantificar la vulnerabilidad de una población urbana, ante la ocurrencia de una inundación. Aunque las ideas usadas en una y otra metodología son similares, la principal diferencia consiste en que la primera (para zonas rurales) determina la vulnerabilidad para cada vivienda mediante una inspección física de la misma, en cambio para la segunda (para zonas urbanas) la vulnerabilidad se obtiene a través de la información del Censo General de Población y Vivienda (CGPV) y, dependiendo de la información cartográfica que se tenga, puede plasmarse a nivel de vivienda, manzana o área geoestadística básica (AGEB).

La metodología que se propone se aplicó, a nivel de manzanas, para la ciudad de Acapulco, Gro. y, a nivel de AGEB, en la cabecera municipal de Mezquital del Oro, Zac.

En el subcapítulo 2.2 se habla de una tipología de la vivienda, es decir, se pretende definir algunos grupos en los que sea posible clasificar toda la gama de viviendas que pueden ser encontradas a lo largo y ancho del territorio nacional.

En el subcapítulo 2.3 se define el menaje promedio que podría encontrarse en cada grupo de viviendas y se muestra la función de vulnerabilidad por menaje para cada tipo de vivienda, con la cual, de acuerdo con el escenario de inundación que se analice, es posible estimar los daños esperados en la vivienda.

El subcapítulo 2.4 muestra la manera de clasificar la vivienda con base en los datos del censo de población y vivienda del INEGI y se presenta un ejemplo de aplicación.

Finalmente, se dan algunas conclusiones de la metodología presentada así como de sus resultados. Asimismo, se plantean algunas recomendaciones tendientes a mejorar lo presentado hasta el momento.

2.2 Tipología de la vivienda

Los materiales usados para la construcción de una vivienda representan una variable muy importante en la estimación de la vulnerabilidad de ésta. Por ello, en este capítulo, primero se enlistan los diferentes tipos de materiales que se utilizan en el país y, posteriormente, las combinaciones que resultan entre los materiales de construcción usados en los muros o en el techo de la vivienda serán tipificadas y evaluadas en función de su comportamiento ante una inundación.

2.2.1 Materiales comúnmente usados para el techo y los muros de las viviendas

Dada la diversidad de tipos de vivienda que pueden ser encontrados en todo el país, considerando los materiales usados en sus muros y techo, el objetivo de este subcapítulo es agrupar las combinaciones que se pueden encontrar.

De acuerdo con datos del Censo General de Población y Vivienda del 2000 (INEGI, 2000), los materiales más usados en los muros de la vivienda en nuestro país son ocho (Tabla 2.1).

Tabla 2.1 Materiales comunes usados en los muros de las viviendas

Tipo	Material
M1	Material de desecho
M2	Láminas de cartón
M3	Lámina de asbesto o metálica
M4	Carrizo, bambú o palma
M5	Embarro o bajareque
M6	Madera
M7	Adobe
M8	Tabique, ladrillo, block, piedra, cantera, cemento o concreto

De igual forma, en nuestro país los materiales más usados para el techo de la vivienda son seis (Tabla 2.2).

Tabla 2.2 Materiales comunes usados en el techo de las viviendas

Tipo	Material
T1	Material de desecho
T2	Láminas de cartón
T3	Lámina de asbesto o metálica
T4	Palma, tejamanil o madera
T5	Teja
T6	Losa de concreto, tabique, ladrillo o terrado con viguería

La hipótesis del presente análisis es que el mayor porcentaje (si no es que la totalidad) de la vivienda es el resultado de alguna de las combinaciones entre las Tablas 2.1 y 2.2; sin embargo, no se descarta la posibilidad de encontrar otros materiales, por lo que deberán especificarse y evaluarse para, posteriormente definir su vulnerabilidad correspondiente.

2.2.2 Combinaciones posibles

Una vez definidos los materiales usados tanto en techo como en muros, el siguiente paso es identificar las posibles combinaciones para generar el tipo de vivienda. El resultado se presenta a continuación:

Tabla 2.3 Combinaciones posibles entre el material para el techo y para

		M U R O S							
T E C H O		M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8
	T1	1	X	X	X	X	X	X	X
	T2	X	2	4	5	7	10	12	16
	T3	X	3	X	6	8	11	13	17
	T4	X	X	X	X	9	X	14	18
	T5	X	X	X	X	X	X	15	19
	T6	X	X	X	X	X	X	X	20

los muros

De la Tabla 2.3 se debe interpretar lo siguiente:

Cada cuadro, representado por la combinación de muro (columnas M1, M2,..., M8) y techo (renglones T1, T2,..., T6), corresponde a un posible arreglo que define un tipo de vivienda. Por ejemplo, el arreglo que resulta de la columna correspondiente al tipo M5 (que son muros de embarro o bajareque) y el renglón T4 (techo a base de palma, tejamanil o madera), tienen como resultado una “vivienda con muros de bajareque y techo de palma”.

Aunque las potenciales combinaciones son 48, varias de ellas no son posibles (por ejemplo, el caso extremo corresponde a una vivienda con muros tipo M1, material de desecho, con techo tipo T6, losa de concreto). Por lo anterior, el número de combinaciones se reduce quedando sólo las 20 que se presentan en la tabla anterior. La descripción de cada una de ellas se presenta en la tabla siguiente:

Tabla 2.4 Combinaciones para los diferentes tipos de vivienda, de acuerdo con los materiales usados en el techo y en los muros

Combinación	Combinaciones del tipo de material para el techo y para los muros
1	Vivienda con muros y techo de material de desecho
2	Vivienda con muros y techo de lámina de cartón
3	Vivienda con muros de lámina de cartón y techo de lámina de asbesto o metálica
4	Vivienda con muros de lámina de asbesto o metálica y techo de lámina de cartón
5	Vivienda con muros de carrizo, bambú o palma y techo de lámina de cartón
6	Vivienda con muros de carrizo, bambú o palma y techo de lámina de asbesto o metálica
7	Vivienda con muros de barro o bajareque y techo de lámina de cartón
8	Vivienda con muros de barro o bajareque y techo de lámina de asbesto o metálica
9	Vivienda con muros de barro o bajareque y techo de palma, tejamanil o madera
10	Vivienda con muros de madera y techo de lámina de cartón
11	Vivienda con muros de madera y techo de lámina de asbesto o metálica
12	Vivienda con muros de adobe y techo de lámina de cartón
13	Vivienda con muros de adobe y techo de lámina de asbesto o metálica
14	Vivienda con muros de adobe y techo de lámina de palma, tejamanil o madera
15	Vivienda con muros de adobe y techo de lámina de teja
16	Vivienda con muros de tabique, ladrillo, block, piedra, cantera, cemento o concreto y techo de lámina de cartón
17	Vivienda con muros de tabique, ladrillo, block, piedra, cantera, cemento o concreto y techo de lámina de asbesto o metálica
18	Vivienda con muros de tabique, ladrillo, block, piedra, cantera, cemento o concreto y techo de palma, tejamanil o madera
19	Vivienda con muros de tabique, ladrillo, block, piedra, cantera, cemento o concreto y techo de teja
20	Vivienda con muros de tabique, ladrillo, block, piedra, cantera, cemento o concreto y techo de losa de concreto, tabique, ladrillo o terrado con viguería

2.2.3 Vulnerabilidad de las combinaciones

Con base en su comportamiento ante la presencia de agua, cada una de las combinaciones resultantes se clasifica y se agrupa en alguna de las combinaciones definidas en la Tabla 2.5.

Tabla 2.5 Clasificación de la vulnerabilidad de la vivienda

		M U R O S							
T E C H O		M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8
	T1	1	X	X	X	X	X	X	X
	T2	X	2	4	5	7	10	12	16
	T3	X	3	X	6	8	11	13	17
	T4	X	X	X	X	9	X	14	18
	T5	X	X	X	X	X	X	15	19
	T6	X	X	X	X	X	X	X	20

Como se puede observar en la tabla anterior, se definen cuatro categorías a las que se les asocia un nivel de vulnerabilidad (Tabla 2.6).

Tabla 2.6 Vulnerabilidad de la vivienda ante inundaciones. Primer filtrado

Color	Vulnerabilidad
Rojo	Muy Alta
Naranja	Alta
Amarillo	Media
Verde	Baja

La vulnerabilidad Baja corresponde a la combinación M8T6; de ella se obtendrán dos categorías (Baja y Muy Baja) que a diferencia de las tres anteriores, donde sólo se consideran los materiales de construcción, tomarán en cuenta la posesión de automóvil y computadora en cada vivienda.

Lo anterior significa que las viviendas que cumplan con la combinación M8T6 automáticamente serán clasificadas como Tipo IV y, si cuentan con automóvil y computadora, pasarán al Tipo V (Tabla 2.7).

Tabla 2.7 Vulnerabilidad de la vivienda ante inundaciones

Tipo	Color	Vulnerabilidad
I	Rojo	Muy Alta
II	Naranja	Alta
III	Amarillo	Media
IV	Verde	Baja
V	Verde	Muy Baja

La razón de desagregar la vulnerabilidad de la vivienda en cinco niveles es para manejar sólo cinco diferentes tipos de vivienda y no los 20 que resultan de las combinaciones de materiales para techo y muros, más las que tienen computadora y automóvil y las que no.

Una vez definidos los tipos de vivienda, el resultado se muestra en la Tabla 2.8

Tabla 2.8 Discretización del tipo de vivienda, según el material usado en techo y muros

COMBINACIÓN	TIPO DE VIVIENDA	COMBINACIONES ENTRE TIPO DE MATERIAL PARA EL TECHO Y PARA LOS MUROS
1	I	Vivienda con muros y techo de material de desecho
2	I	Vivienda con muros y techo de lámina de cartón
3	I	Vivienda con muros de lámina de cartón y techo de lámina de asbesto o metálica
4	II	Vivienda con muros de lámina de asbesto o metálica y techo de lámina de cartón
5	II	Vivienda con muros de carrizo, bambú o palma y techo de lámina de cartón
6	II	Vivienda con muros de carrizo, bambú o palma y techo de lámina de asbesto o metálica
7	II	Vivienda con muros de barro o bajareque y techo de lámina de cartón
8	II	Vivienda con muros de barro o bajareque y techo de lámina de asbesto o metálica
9	II	Vivienda con muros de barro o bajareque y techo de palma, tejamanil o madera
10	II	Vivienda con muros de madera y techo de lámina de cartón
11	III	Vivienda con muros de madera y techo de lámina de asbesto o metálica
12	II	Vivienda con muros de adobe y techo de lámina de cartón
13	III	Vivienda con muros de adobe y techo de lámina de asbesto o metálica
14	III	Vivienda con muros de adobe y techo de lámina de palma, tejamanil o madera
15	III	Vivienda con muros de adobe y techo de lámina de teja
16	II	Vivienda con muros de tabique, ladrillo, block, piedra, cantera, cemento o concreto y techo de lámina de cartón
17	III	Vivienda con muros de tabique, ladrillo, block, piedra, cantera, cemento o concreto y techo de lámina de asbesto o metálica
18	III	Vivienda con muros de tabique, ladrillo, block, piedra, cantera, cemento o concreto y techo de palma, tejamanil o madera
19	III	Vivienda con muros de tabique, ladrillo, block, piedra, cantera, cemento o concreto y techo de teja
20	IV	Vivienda con muros de tabique, ladrillo, block, piedra, cantera, cemento o concreto y techo de losa de concreto, tabique, ladrillo o terrado con viguería

2.3 Tipificación del menaje y funciones de vulnerabilidad

Para estimar la función de vulnerabilidad para cada tipo de vivienda, se propone una serie de muebles y enseres menores, posteriormente, se lleva a cabo una cuantificación del porcentaje de los daños ocasionados en cada caso, en función del nivel que alcance el agua que entra en la casa. Ese porcentaje de daños es, finalmente la vulnerabilidad de la vivienda ante inundaciones.

Aquí sólo se mostrará la función de vulnerabilidad para cada tipo de vivienda, así como su tabla correspondiente.

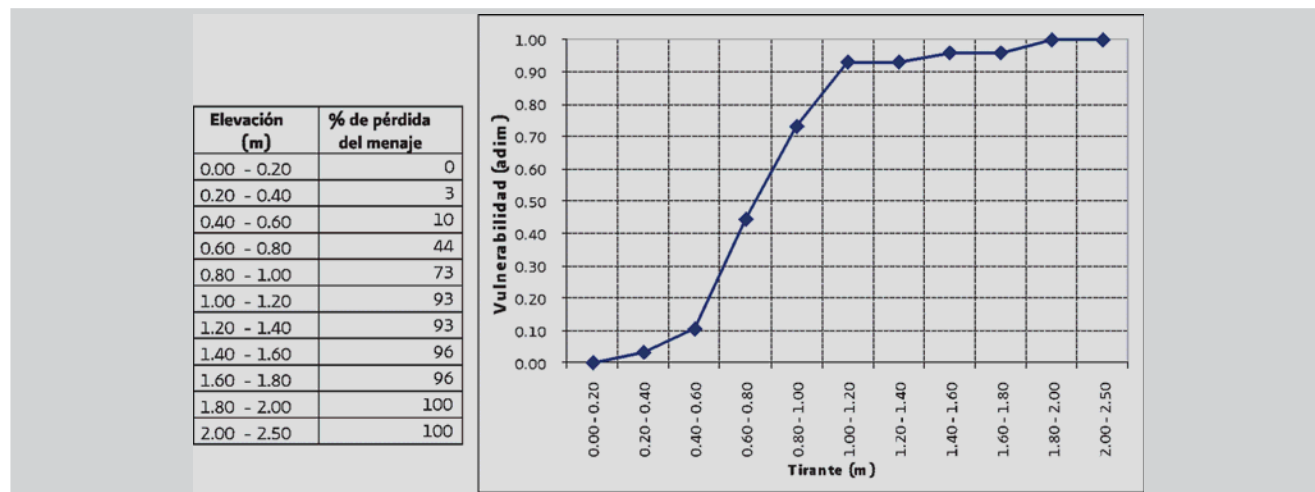


Figura 2.1 Función de vulnerabilidad para vivienda Tipo I

La Figura 2.1 muestra claramente que el rango donde ocurre la mayoría de las pérdidas, para la vivienda Tipo I, está entre los 0.60 m y los 1.20 m.

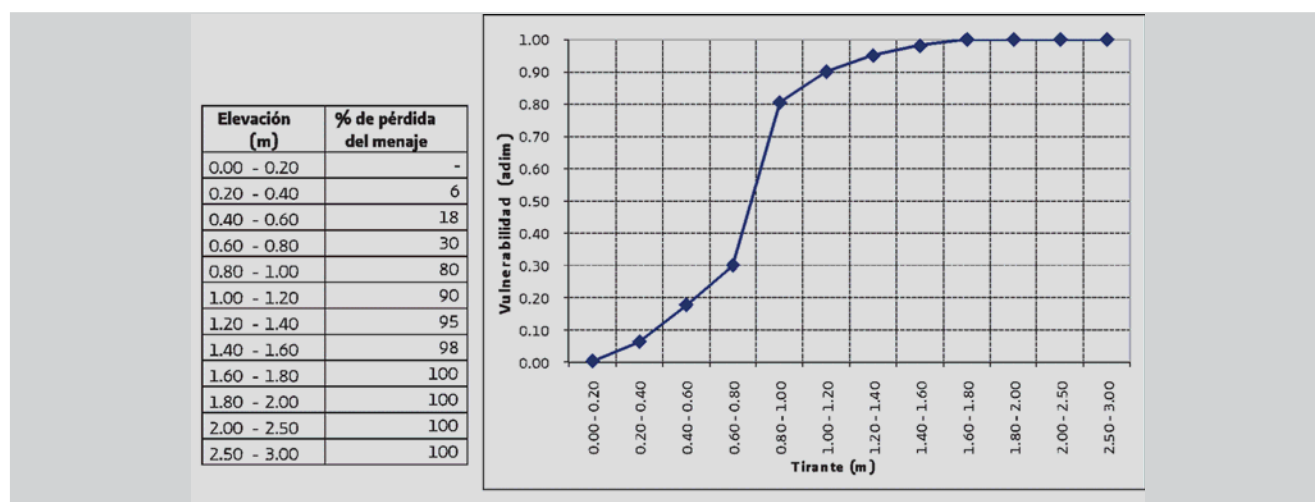


Figura 2.2 Función de vulnerabilidad para vivienda Tipo II

En la Figura 2.2, correspondiente al tipo de vivienda II, se observa que la mayor pérdida de los bienes ocurre cuando el tirante de agua en la inundación alcanza de 0.60 m a 1.00 m.

Elevación (m)	% de pérdida del menaje
0.00 - 0.20	-
0.20 - 0.40	3
0.40 - 0.60	8
0.60 - 0.80	31
0.80 - 1.00	74
1.00 - 1.20	81
1.20 - 1.40	97
1.40 - 1.60	98
1.60 - 1.80	99
1.80 - 2.00	100
2.00 - 2.50	100
2.50 - 3.00	100

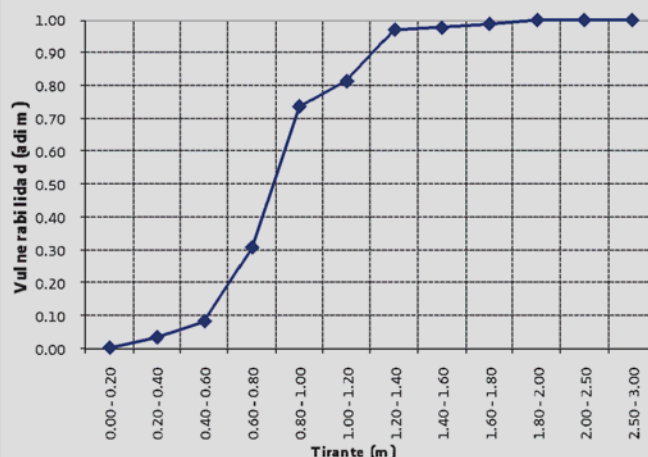


Figura 2.3 Función de vulnerabilidad para vivienda Tipo III

Para el caso de la vivienda Tipo III, el rango que provoca las mayores pérdidas está comprendido de los 0.40 m a los 1.00 m.

Elevación (m)	% de pérdida del menaje
0.00 - 0.20	0
0.20 - 0.40	2
0.40 - 0.60	5
0.60 - 0.80	7
0.80 - 1.00	40
1.00 - 1.20	43
1.20 - 1.60	47
1.60 - 1.80	47
1.80 - 2.00	47
2.00 - 2.50	47
2.50 - 3.00	52
3.00 - 4.00	94
4.00 - 5.00	100
5.00 - 6.00	100

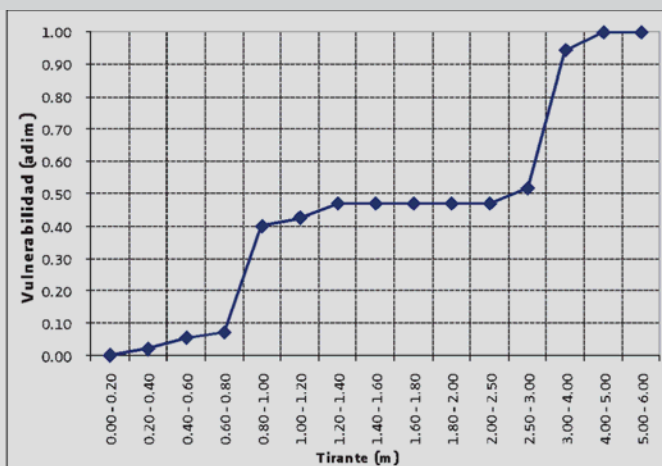


Figura 2.4 Función de vulnerabilidad para vivienda Tipo IV

De acuerdo con la clasificación aceptada en el presente estudio, al hablar de vivienda Tipo IV, se hace referencia a viviendas con dos o más niveles, por lo que en la Figura 2.4 se observa que la función de vulnerabilidad es casi horizontal de los 0.80 m a los 2.50. Lo anterior se debe a que más allá del primer metro de inundación, el porcentaje de pérdida en estas viviendas es mínimo, hasta que alcanza el segundo piso de la misma y, nuevamente vuelve a dispararse.

Elevación (m)	% de pérdida del menaje
0.00 - 0.20	0
0.20 - 0.40	2
0.40 - 0.60	10
0.60 - 0.80	13
0.80 - 1.00	53
1.00 - 1.20	59
1.20 - 1.40	63
1.40 - 1.60	63
1.60 - 1.80	63
1.80 - 2.00	63
2.00 - 2.50	63
2.50 - 3.00	66
3.00 - 4.00	95
4.00 - 5.00	99
5.00 - 6.00	100
6.00 - 7.00	100
7.00 - 8.00	100
8.00 - 9.00	100
9.00 - 10.00	100

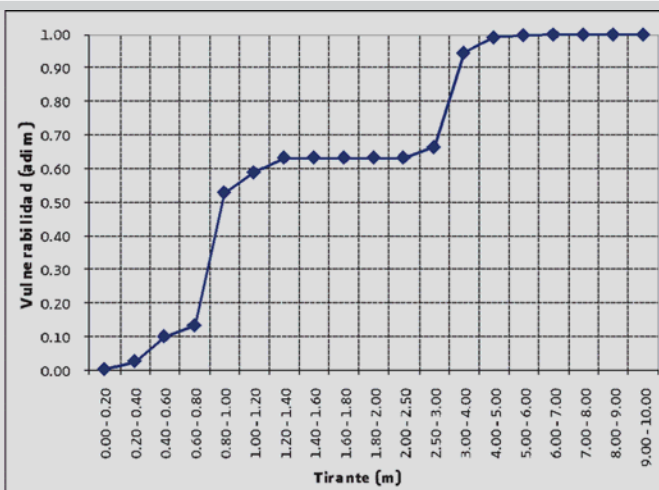


Figura 2.5 Función de vulnerabilidad para vivienda Tipo V

Para cada caso se presenta sobre el eje de las abscisas (x) el nivel alcanzado por el agua, en metros, mientras que en el eje de las ordenadas (y) el valor corresponde al porcentaje de daños esperados en la vivienda.

2.4 Inferencia de la vulnerabilidad a partir de datos del censo del INEGI

Para llevar a cabo una clasificación vulnerabilidad para la vivienda en México, sería necesario analizar casa por casa para anotar los materiales usados en su construcción y, posteriormente clasificarla, tal y como está planteado en la metodología para localidades rurales.

Con la idea de automatizar esta clasificación para tener la capacidad de realizarla a nivel nacional, sin necesidad de trasladarse al sitio para inspeccionar las viviendas, se pensó en usar los datos del Censo General de Población y Vivienda (CGPV) del INEGI; sin embargo, se observó que aunque dentro de los cuestionarios del censo aparece lo relativo a los materiales de construcción, la información reportada en el censo (INEGI, 2000) es parcial y no tiene el grado de desagregación requerido, por lo que se recurrió a la base de datos a nivel registro de dicho censo (INEGI, 2006).

La metodología que a continuación se presenta para elaborar los mapas de vulnerabilidad por inundación considera cumplida una serie de requerimientos:

- ArcGIS 8.0 ó mayor
- Bases de datos del Censo General de Población y Vivienda 2000, a nivel de registros
- Traza urbana de la ciudad que se estudiará (a nivel de manzanas o AGEB)

2.4.1 Base de datos usada para extraer las características de las viviendas

En esta referencia, el INEGI presenta las Bases de datos a nivel registro de los Estados Unidos Mexicanos por población, hogares y viviendas.

Esta base de datos presenta la información estadística a nivel de registro de cada uno de los habitantes captados en el operativo del censo. Incluye toda la información recolectada con el cuestionario censal, permitiendo identificar geoestadísticamente cada registro en niveles de desagregación desde entidad federativa hasta vivienda y hogar.

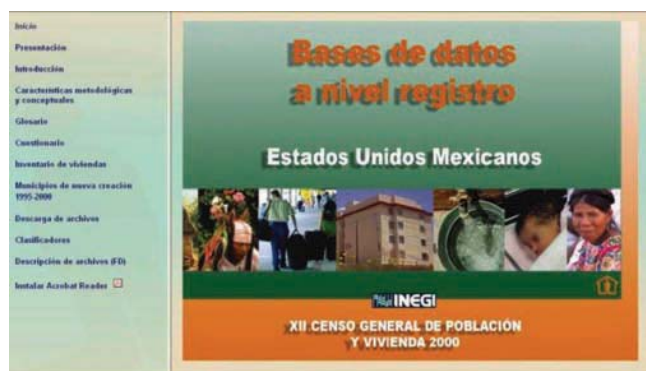


Figura 2.6 Bases de datos del censo de población y vivienda, a nivel de registros

2.4.2 Definición de la vulnerabilidad

La información usada para definir la vulnerabilidad de la vivienda se extrae como se describe a continuación:

Paso 1. En el menú principal (Figura 2.6) se selecciona la opción **Descarga de archivos**. Después de ello, la pantalla muestra la ventana siguiente:



Figura 2.7 Selección del estado del cual se desea extraer la información del censo de población y vivienda, a nivel de población, vivienda u hogares

Paso 2. En la ventana de la Figura 2.7 se selecciona primero el estado del cual se requiere la información y a continuación el tipo de la misma (Población, Vivienda u hogares), que para el caso que nos ocupa será **Vivienda**.

Una vez seleccionada la información requerida, se despliega otra ventana que contiene un archivo de base de datos con el sufijo **Viv##.DBF** que debe copiarse al directorio de trabajo (Figura 2.8).

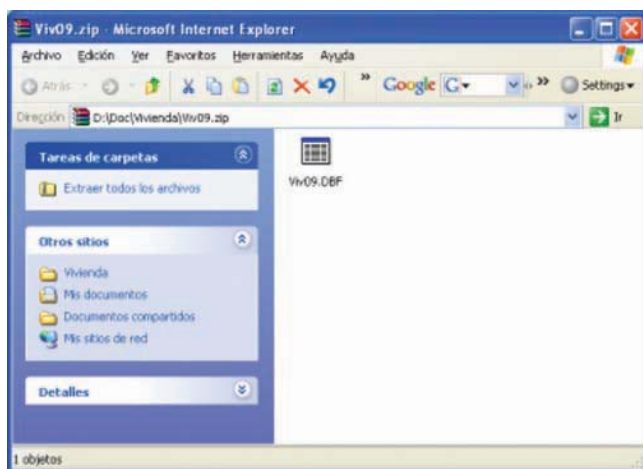


Figura 2.8 Extracción de la información

Paso 3. El archivo descargado puede abrirse con cualquier manejador de bases de datos. La Figura 2.9 muestra parte de la información contenida en él.

En ella, las partes que más interesan para realizar el análisis de vulnerabilidad son tres:

- Ubicación geográfica. Definida por las columnas **Ent, Mun, Loc, Ageb, Mza y Num_vivien**
- Materiales de construcción. Que se especifican en las columnas **Mat_pared y Mat_techo**
- Posesión de automóvil y computadora. Que se especifica en las columnas **Dis_automo y Dis_comput (no visible en la Figura 2.9)**

Viv01 - Microsoft Visual FoxPro

File Edit View Tools Program Table Window Help

	Ent	Id_vivien	Mun	Loc	Ageb	Mza	Segmento	Num_vivien	Apellido	Tothog_viv	Tot_cuest	Claviv_rec	Mat_pared	Mat_techo	Mat_piso	Tiene_coci	Uticoe_dor	Cuar_dormi	Num_cuarto	Dis	
1	01	00295382	001	0001	2028	027	N	0049	5	1	0001	01	8	6	3	1	9	01	04	1	
	01	00295383	001	0001	0229	001	N	0001	0	1	0001	01	8	6	3	1	4	02	13	1	
	01	00295384	001	0001	0229	001	N	0002	0	1	0001	01	8	6	2	1	4	02	03	1	
	01	00295385	001	0001	0229	001	N	0003	0	1	0001	01	8	6	2	1	4	01	02	1	
	01	00295386	001	0001	0229	001	N	0004	0	1	0001	01	8	6	2	1	4	02	03	1	
	01	00295387	001	0001	0229	001	N	0005	0	1	0001	01	8	6	2	1	4	01	03	1	
	01	00295388	001	0001	0229	001	N	0007	0	1	0001	01	8	6	2	1	4	01	02	1	
	01	00295389	001	0001	0229	001	N	0008	0	1	0001	01	8	6	2	1	4	04	06	1	
	01	00295390	001	0001	0229	001	N	0010	0	1	0001	01	8	6	3	1	3	04	07	1	
	01	00295391	001	0001	0229	999	N	0001	0	2	0002	01	8	6	2	1	3	02	02	1	
	01	00295392	001	0001	0229	006	N	0001	0	1	0002	01	8	6	2	1	4	02	04	1	
	01	00295393	001	0001	0229	006	N	0002	0	1	0001	01	8	6	3	1	4	02	03	1	
	01	00295394	001	0001	0229	006	N	0004	0	1	0001	01	8	6	1	2		01	01	1	
	01	00295395	001	0001	0229	006	N	0006	0	1	0002	01	8	6	3	1	9	03	04	1	
	01	00295396	001	0001	0229	006	N	0007	0	1	0001	01	8	6	1	2		02	02	1	
	01	00295397	001	0001	0229	006	N	0008	0	1	0001	01	8	6	2	2	1	3	01	02	2
	01	00295398	001	0001	0229	006	N	0009	0	1	0001	01	8	6	3	1	9	03	07	1	
	01	00295399	001	0001	0229	006	N	0010	0	1	0002	01	8	6	2	1	3	03	03	1	
	01	00295400	001	0001	0229	007	N	0001	0	1	0001	01	8	6	2	1	4	03	04	1	
	01	00295401	001	0001	0229	007	N	0002	0	1	0002	01	8	6	2	2		02	02	1	
	01	00295402	001	0001	0229	007	N	0003	0	1	0002	01	8	6	3	1	4	05	06	1	
	01	00295403	001	0001	0229	007	N	0004	0	1	0001	01	8	6	2	1	3	01	01	1	
	01	00295404	001	0001	0229	007	N	0005	0	1	0001	01	8	6	2	1	4	03	04	1	
	01	00295405	001	0001	0229	007	N	0006	0	1	0001	01	8	6	2	1	4	01	04	1	
	01	00295406	001	0001	0229	007	N	0007	0	1	0002	01	8	6	2	1	4	02	03	1	

Viv01 [c:\cenapred\hido\2008\proye\Record: 1/200673 Exclusive

NUM

Figura 2.9 Formato de la información contenida en los archivos extraídos

Paso 4. Con la información disponible, y con una rutina en **ArcGIS**, una macro de **Excel** o consultas en la base de datos se identifica la combinación de materiales para cada caso, y con ella el tipo de vulnerabilidad de la vivienda. Para los casos en los que resulte **Tipo IV** se realiza un paso adicional; verificar la posesión de automóvil y computadora. (Figura 2.10).

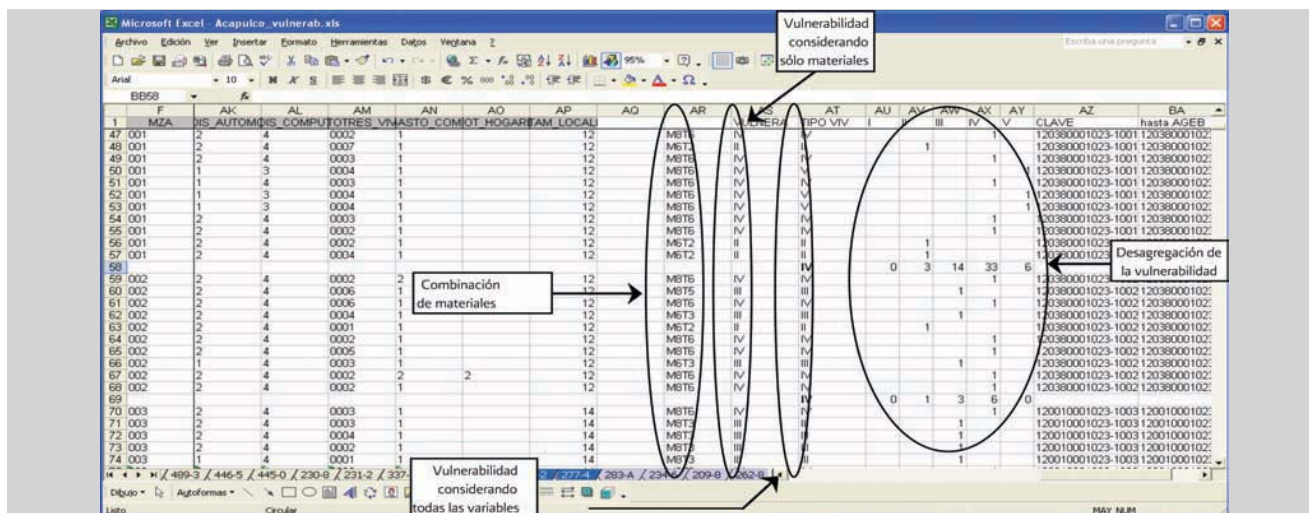


Figura 2.10 Identificación de la vulnerabilidad por vivienda

Luego de comprobar la posesión de automóvil y computadora en la vivienda clasificada como Tipo IV, ésta pasará al Tipo V, de lo contrario, se quedará como Tipo IV.

cada grupo y asignando este valor para todo el conjunto (Figura 2.11), con la finalidad de usar cualquiera de esos dos niveles de desagregación.

Paso 5. Dado que la información de la traza urbana con la que generalmente se contará hará referencia a AGEB o, cuando más a manzanas, se requiere que después de obtener la vulnerabilidad de cada vivienda se agrupen los registros, primero por manzana y luego por AGEB, verificando cuál es el tipo de vulnerabilidad que más se repite en

NOTA: Cabe aclarar que a la base de datos se le aplica la Ley Federal de Protección de Datos Personales, por lo que aun teniendo datos a nivel de vivienda, espacialmente el registro más pequeño con el que se cuenta es la manzana, es decir, no se deben ubicar las casas.

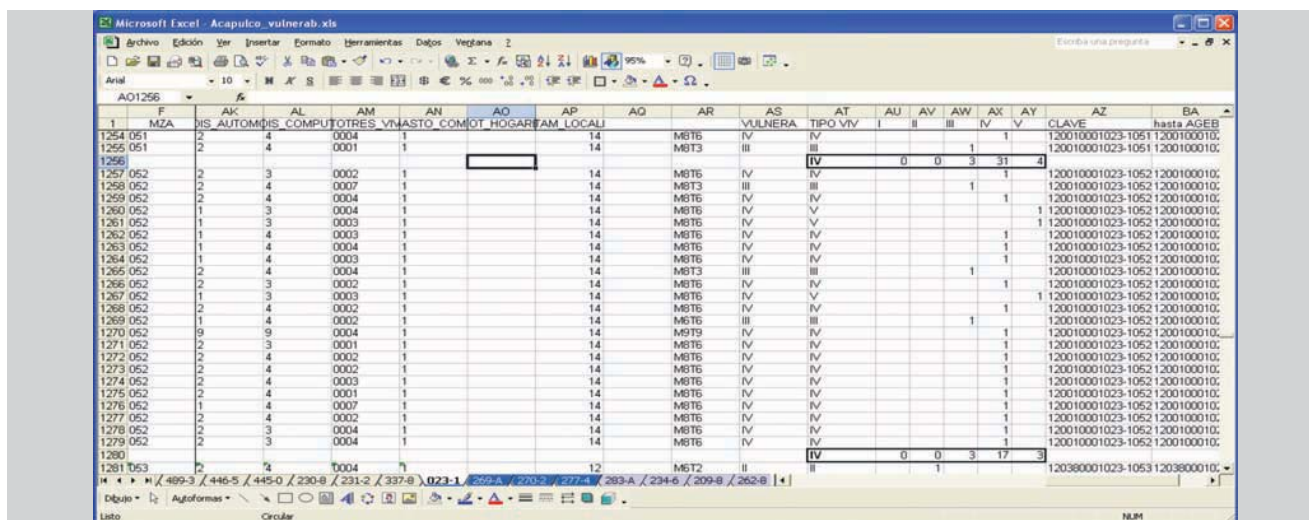


Figura 2.11 Tipificación de la vulnerabilidad por manzana

De la Figura 2.11 en la primera columna aparece el número de la manzana, mientras que en las columnas de la AR a la AY se define la vulnerabilidad de cada vivienda.

Por ejemplo, la manzana no. 052 cuenta con 23 viviendas con la siguiente caracterización:

Tabla 2.9 Vulnerabilidad de la manzana 052

Tipo	No. de viviendas
I	0
II	0
III	3
IV	17
V	3
Total	23

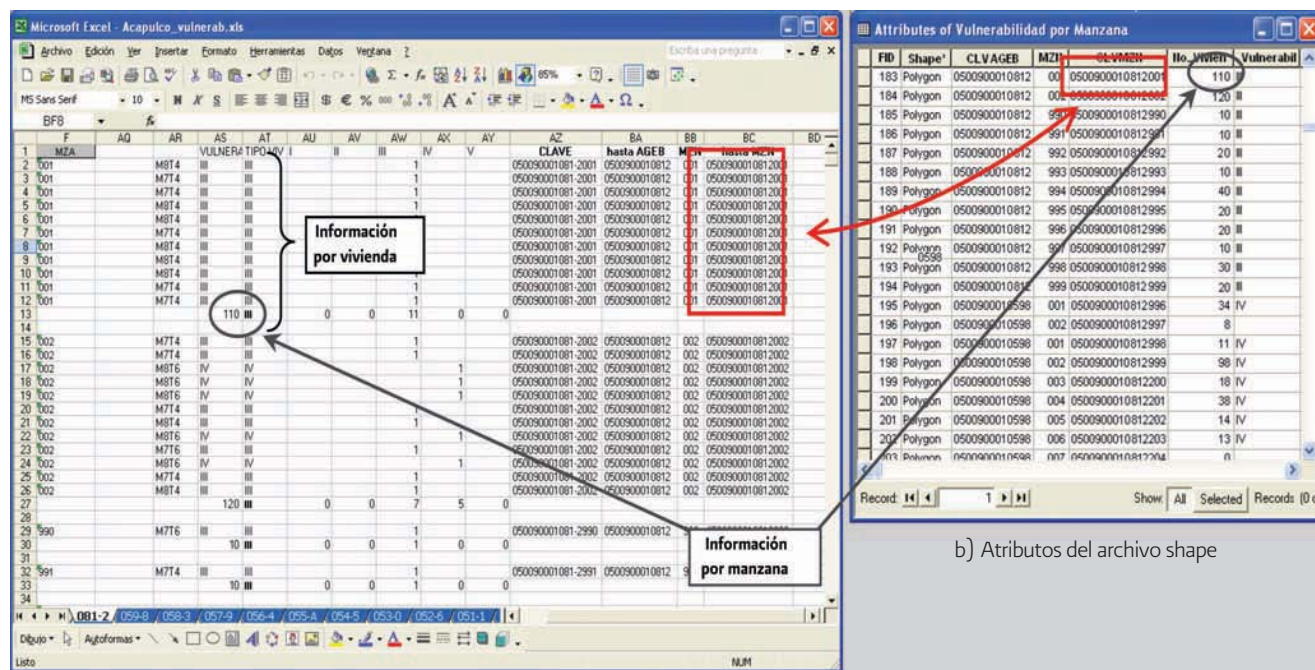
Por lo tanto, a la manzana 052 se le asigna vulnerabilidad Tipo IV y dentro de los cálculos de riesgo, se trabajará con una manzana de 23 viviendas Tipo IV.

2.4.3 Despliegue gráfico

Una vez definida la vulnerabilidad por vivienda, lo siguiente es ligar el resultado del análisis con el archivo de la traza urbana, que contiene la información georreferenciada. Para lo cual es necesario tomar en cuenta lo siguiente:

- La base de datos del Censo General de Población y Vivienda 2000 a nivel de registros, presenta la información por predio, es decir, de cada una de las viviendas.
- La traza urbana disponible, o con la que se cuente, generalmente estará asociada con información a nivel de AGEB o, en el mejor de los casos, de manzanas.

Después de obtener la vulnerabilidad por vivienda, ésta se agrupa por manzanas (Figuras 2.12 y 2.13) o por AGEB (Figuras 2.14 y 2.15).



a) Definición de la vulnerabilidad

Figura 2.12 Vulnerabilidad estimada y archivo con información georreferenciada a nivel de manzanas

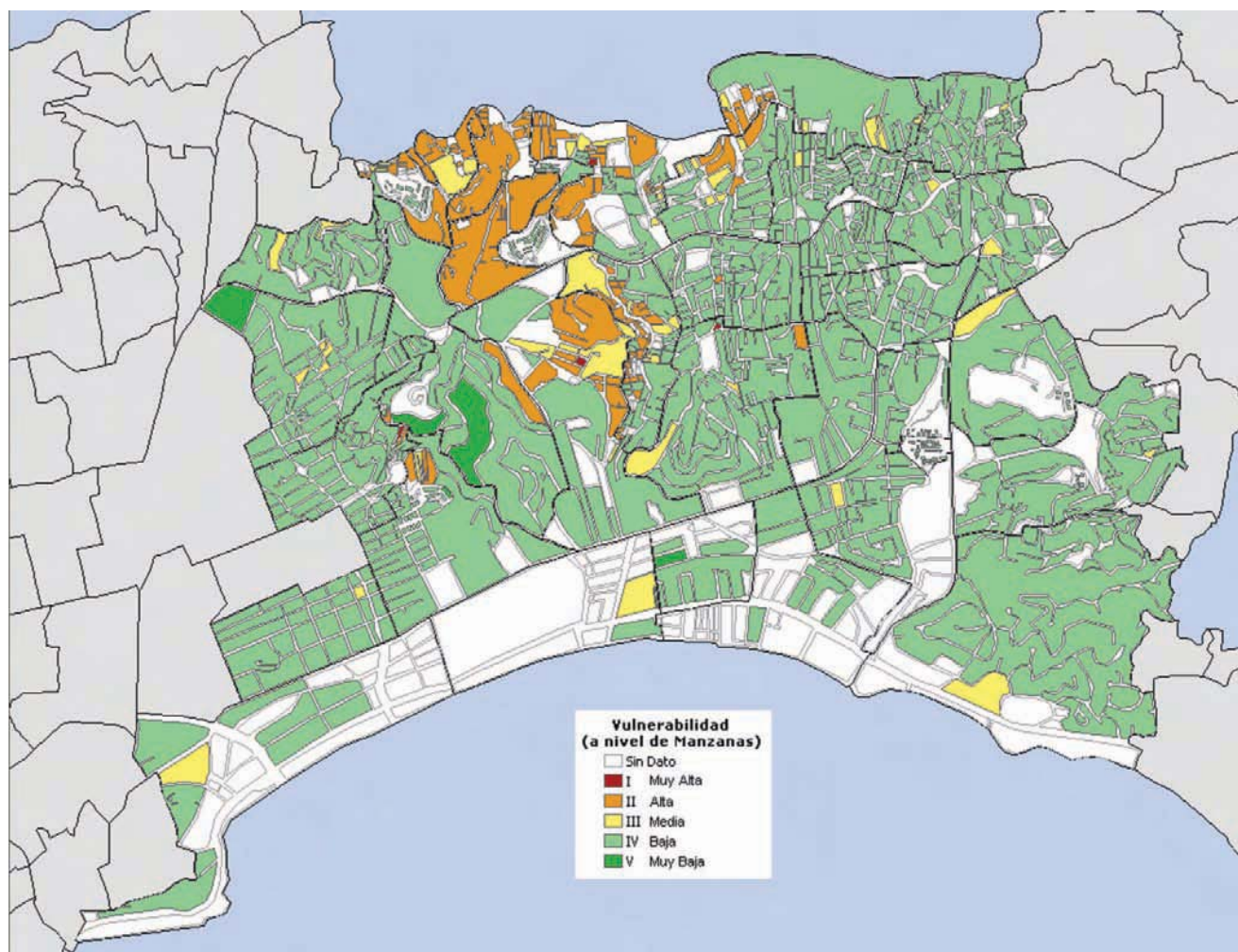


Figura 2.13 Vulnerabilidad por manzana de una parte de Acapulco, Gro.

De acuerdo con el ejemplo para la manzana 001 de la AGEB 081-2, que cuenta con 110 viviendas, se obtiene una vulnerabilidad de III; para la 002, con 120 viviendas, es III, etc. Mientras que la vulnerabilidad de la AGEB completa es III (12 manzanas y 420 viviendas que resultan de sumar los 12 primeros renglones de la Tabla 2.12b).

De igual manera, después de realizar el análisis de vulnerabilidad de la localidad de Tlaltenango de Sánchez Román, Zac., para representarlo gráficamente a nivel de AGEB, resulta lo siguiente:



NOTA: Para mostrar visualmente el resultado del análisis, el número de viviendas y la vulnerabilidad de cada manzana o AGEB, son asignados por medio de la función **relación de tablas** o **unión de tablas**, de ArcGIS.



3. EVALUACIÓN DEL RIESGO

La elaboración de los mapas de riesgo (R) por inundación en localidades urbanas se llevará a cabo con los mapas de peligro (P) y de vulnerabilidad (V).

Es importante comentar que el parámetro seleccionado para estimar el riesgo por inundaciones es el tirante. Esto significa que los daños esperados dependen del tirante de la inundación y, al mismo tiempo, el riesgo $R(i)$ es a su vez función de la vulnerabilidad $V(i)$ y del peligro $P(i)$, como se plantea a continuación.

3.1 Definición de riesgo

El riesgo en general está dado por la expresión:

$$R = CVP \quad (3.1)$$

donde:

- C valor de los bienes expuestos
- V vulnerabilidad o porcentaje de daños en una vivienda, debidos a una inundación
- P peligro o probabilidad de que ocurra un determinado evento

Dado que la vulnerabilidad así como el peligro son variables adimensionales, las unidades del riesgo serán las mismas que las del valor de los bienes expuestos, que generalmente están dadas en unidades monetarias, en nuestro caso pesos.

El análisis del riesgo R, o la presentación de los resultados puede realizarse de varias maneras, como se mostrará a continuación.

3.1.1 Riesgo para un escenario particular

En este análisis se estudia una situación en particular, por ejemplo, un periodo de retorno de particular interés. Suponiendo que el periodo de retorno por analizar sea 100 años, el riesgo estará dado por la expresión siguiente:

$$R = CV_{Tr100}P_{Tr100} \quad (3.2)$$

donde:

- C valor de los bienes expuestos
- P_{Tr100} probabilidad de que se presente un evento asociado con un periodo de retorno de 100 años
- V_{Tr100} vulnerabilidad asociada con el tirante de la inundación correspondiente a un periodo de retorno de 100 años

3.1.2 Valor esperado de los daños anuales

En este caso se estima el valor esperado, de los daños en los bienes expuestos, que se tiene año con año, mediante la sumatoria del producto de las funciones de vulnerabilidad, peligro y el valor de los bienes expuestos de cada vivienda, de manera que se puede calcular el riesgo con la expresión siguiente.

$$R_j = \sum_{i=1}^m C_j P(i) \cdot V_i(Y_i) \quad (3.3)$$

donde:

- i periodo de retorno por analizar
- j vivienda en la que se realiza el análisis
- $Y(i)$ tirante asociado a diferentes periodos de retorno
- $P(i)$ función de peligro
- $V_i(Y_i)$ función de vulnerabilidad

En esta metodología, al igual que para zonas rurales, se propone analizar 10 periodos de retorno. En la Tabla 3.1 se muestran los periodos de retorno y su correspondiente función de peligro (para más información, ver anexo 2 de Es-lava, 2006).

Tabla 3.1 Función de peligro P(i)

Intensidad i (no.)	Tr(i) (años)	P(i)
1	2	0.60
2	5	0.20
3	10	0.12
4	25	0.04
5	50	0.02
6	100	0.012
7	250	0.004
8	500	0.002
9	1000	0.001
10	2000	0.0006

Cada uno de los eventos de la Tabla anterior está asociado a un periodo de retorno y genera una superficie inundada a partir de la cual se calcula la altura de la inundación (tirante) en cada vivienda. Adicionalmente, y con base en el tipo de vivienda, se usa la correspondiente función de vulnerabilidad para estimar el porcentaje de los daños en la misma.

La Figura 3.1 muestra las funciones de peligro y vulnerabilidad para las viviendas de una localidad cualquiera. La obtención de las funciones de peligro y vulnerabilidad está ampliamente descrita en los capítulos anteriores (capítulos 1 y 2).

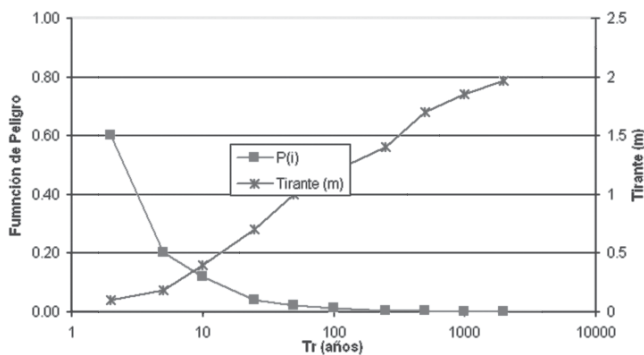


Figura 3.1 Funciones de peligro y vulnerabilidad (daños)

Considerando los periodos de retorno mostrados en la Figura 3.1 (de 2 a 2,000 años), el límite superior de la sumatoria m, de la ecuación 3.3, será igual a 10 y las funciones de peligro y de vulnerabilidad estarán dadas por la Tabla 3.2.

Tabla 3.2 Ejemplo de función de peligro y vulnerabilidad con 10 niveles de peligro por inundación

i	Tr (años)	Probabili- dad	Tirante promedio (m)	Vulnera- bilidad	Probabilidad x Vulnerabi- lidad
1	2	0.6000	0.10	0.04	0.0240
2	5	0.2000	0.18	0.24	0.0480
3	10	0.1200	0.40	0.32	0.0384
4	25	0.0400	0.70	0.44	0.0176
5	50	0.0200	1.00	0.53	0.0106
6	100	0.0120	1.20	0.74	0.0089
7	250	0.0040	1.40	0.81	0.0032
8	500	0.0020	1.70	0.94	0.0019
9	1000	0.0010	1.85	0.98	0.0010
10	2000	0.0006	1.97	1.00	0.0006
Suma:					0.1542

Para una vivienda en particular, el valor del riesgo queda definido de la manera siguiente:

$$R_j = \sum_{i=1}^{10} C_j P(i) \cdot V_j(Y_i) = C_j \times 0.1542 \quad (3.4)$$

En caso de que lo que se quiera estimar sea el riesgo para toda la localidad, es necesario sumar el riesgo de cada una de las viviendas. El resultado es:

$$R_{localidad} = \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^m C_j P(i) \cdot V_j(Y_i) \quad (3.5)$$

donde:

- n número total de viviendas en la localidad
- m periodos de retorno analizados

El mapa de riesgo por inundación permite zonificar la localidad con miras a:

- a) Identificar las zonas críticas para cuantificar el daño potencial, desde el punto de vista de inundaciones,

- b) al proyectar cualquiera de las medidas de protección, ya sean estructurales o institucionales, estar en posibilidad de llevar a cabo un análisis costo beneficio (comparando los costos de la solución proyectada vs. los daños potenciales),
- c) en muchos casos es inminente la necesidad de obras de protección; sin embargo, la falta de presupuesto hace que la construcción de este tipo de obras se postergue indefinidamente. Ante esto, un sistema de monitoreo en tiempo real que le permita a las autoridades conocer cuándo y dónde evacuar a la población y resguardar algunos de sus bienes, es de suma utilidad.

3.1.3 Índice de riesgo

Eventualmente, se pueden expresar los resultados en un mapa mediante un índice de riesgo para cada localidad de la manera siguiente:

$$I_{R_j} = \frac{R_j}{C_{MAX}} \quad (3.6)$$

donde:

R_j valor de los bienes expuestos dentro de la localidad

C_{MAX} máximo valor del bien expuesto dentro de la localidad

I_{R_j}	será Alto	si	$0.67 < I_{R_j} < 1.0$,
I_{R_j}	será Medio	si	$0.33 < I_{R_j} < 0.67$
I_{R_j}	será Bajo	si	$0 < I_{R_j} < 0.33$

lidad

De hecho se puede asociar un color a cada valor del índice de riesgo, por ejemplo rojo para alto, amarillo para medio y verde para bajo. Hay que recordar que los valores son relativos por lo que son comparables únicamente dentro de la misma localidad. Una vez hechos los cálculos se puede regresar a la traza urbana y pintar cada vivienda con el color correspondiente según su índice de riesgo, peligro o vulnerabilidad (Figura 3.5).

3.2 Ejemplo de aplicación

3.2.1 Ubicación de la zona

A continuación se presenta, a manera de ejemplo, la aplicación de la metodología que aquí se propone. Para ello fue seleccionada la localidad de Mezquital del Oro, en el municipio del mismo nombre, en el estado de Zacatecas (Figura 3.2).

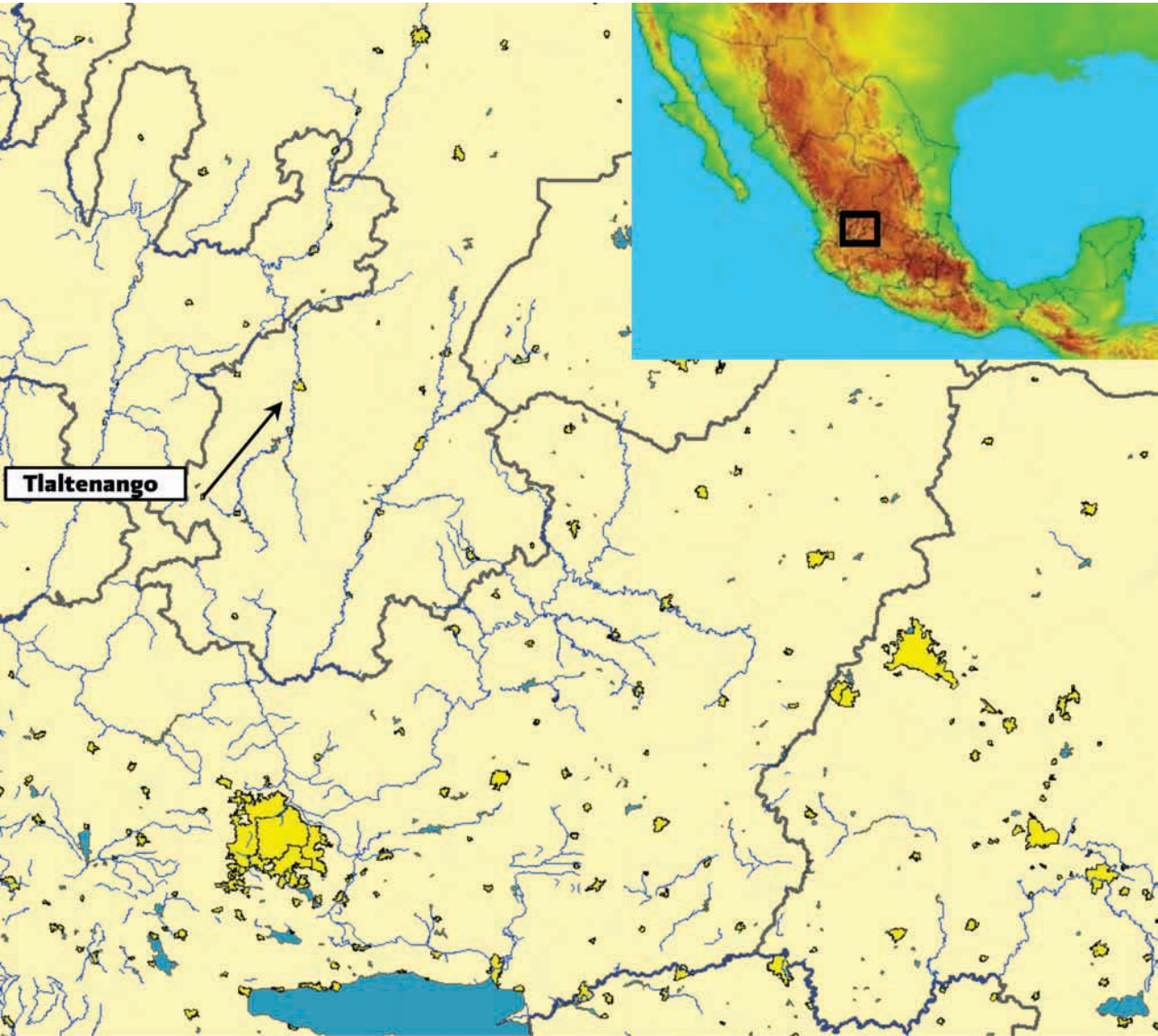


Figura 3.2 Ubicación de Mezquital del Oro, Zacatecas

3.2.2 Mapa de peligro

Una vez ubicada la zona de interés, se identifica la cuenca de aportación, se obtienen sus características fisiográficas y los valores máximos de precipitación para diferentes periodos de retorno, con ayuda de los mapas de isoyetas del Anexo 1 de la Guía Básica para la Elaboración de Atlas Estatales y Municipales de Peligro y Riesgo.

El siguiente paso es transformar la lluvia en escurrimiento y definir el gasto de diseño para cada periodo de retorno. Posteriormente, se organiza el modelo en HecRAS para llevar a cabo la simulación de los diferentes caudales y obtener las áreas de inundación y sus correspondientes tirantes de agua.

Finalmente, esos resultados se importan en *ArcGIS* y se elabora el mapa de peligro. La Figura 3.3 muestra el resultado de la simulación correspondiente a un periodo de retorno de 100 años.

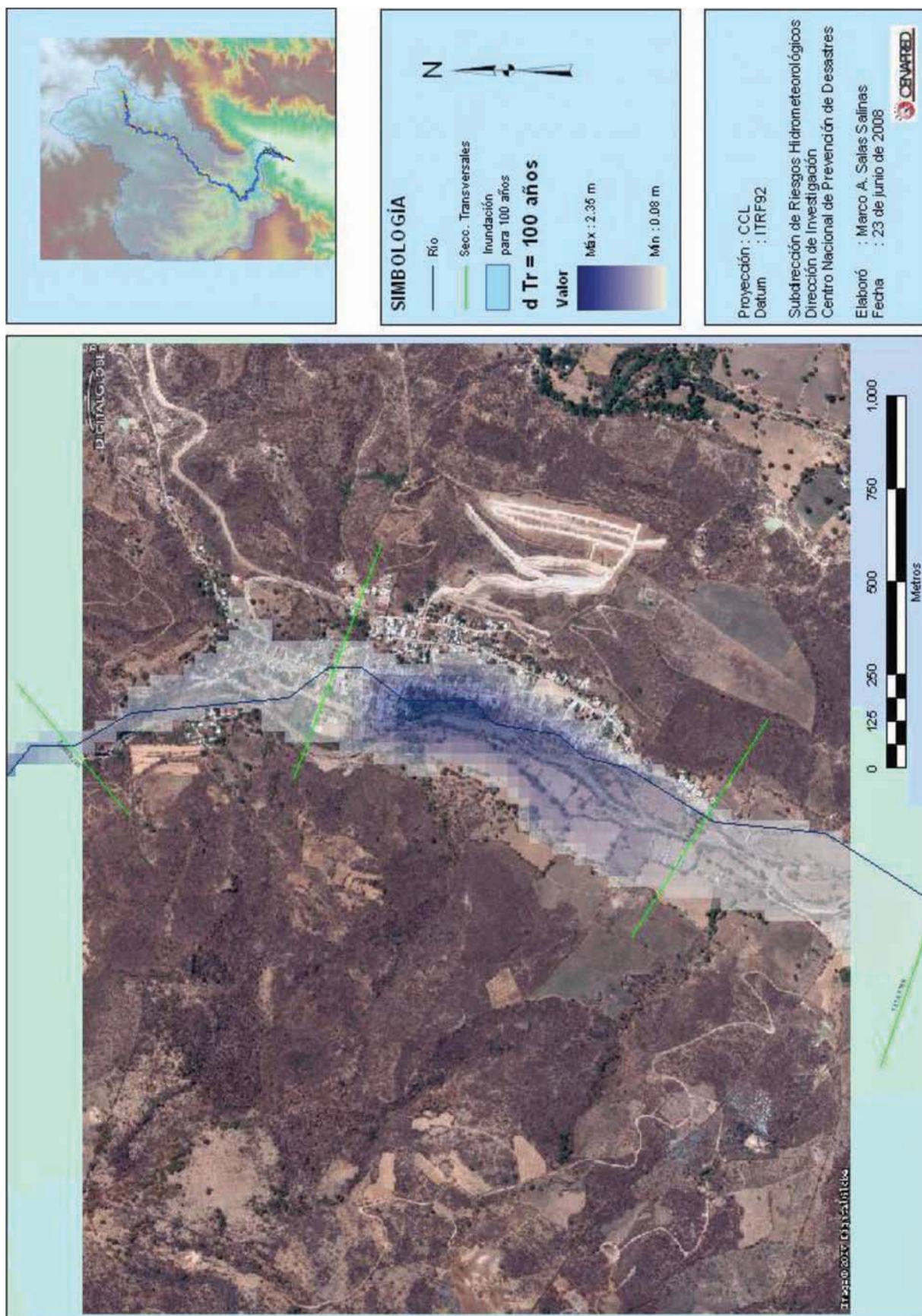


Figura 3.3 Mapa de peligro por inundaciones en Mezquital del Oro, Zacatecas

3.2.3 Mapa de vulnerabilidad

A continuación, de la base de datos del Censo General de Población y Vivienda 2000 a nivel de registros se extrae primero el estado de Zacatecas y de ese listado se filtran los datos correspondientes a la localidad de Mezquital del Oro, en el estado de Zacatecas.

Con esa base de datos se lleva a cabo el análisis de vulnerabilidad descrito en el capítulo 2 y, dado que para este caso la traza urbana con la que se cuenta es a nivel de manzana, los resultados que se generen serán a ese mismo nivel. Luego de definir la vulnerabilidad de cada manzana en la localidad, éstos se ligan con la traza urbana para generar el mapa de vulnerabilidad de la localidad (Figura 3.4).

3.2.4 Mapa de riesgo por inundación

Finalmente, una vez que se cuenta con los mapas de peligro y de vulnerabilidad, el mapa de riesgo por inundaciones para la comunidad de Mezquital del Oro se define con base en la ecuación (3.5).

La Figura 3.5 muestra los daños esperados para un escenario con una inundación de 100 años de periodo de retorno.

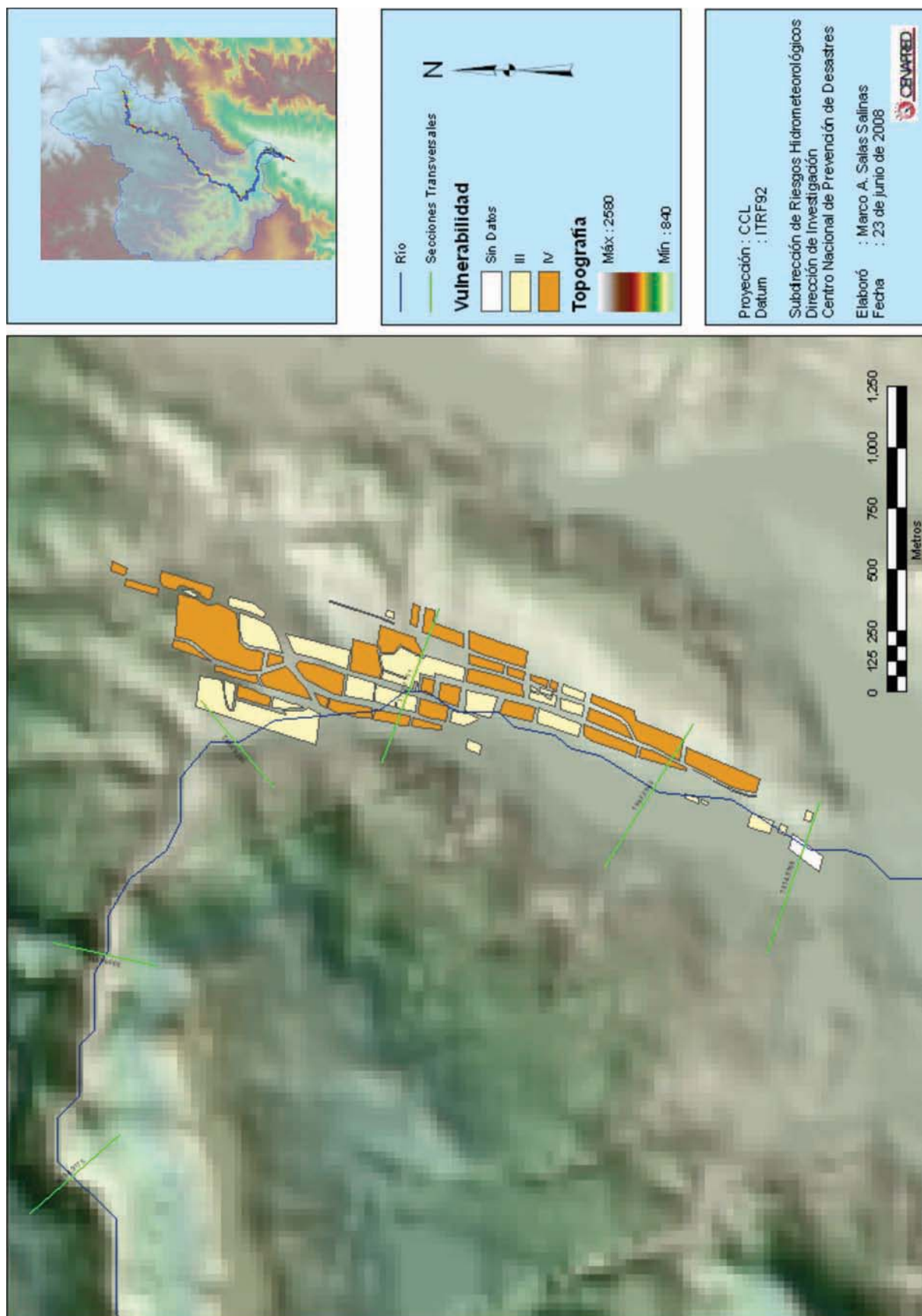


Figura 3.4 Mapa de vulnerabilidad por inundaciones en Mezquital del Oro, Zacatecas

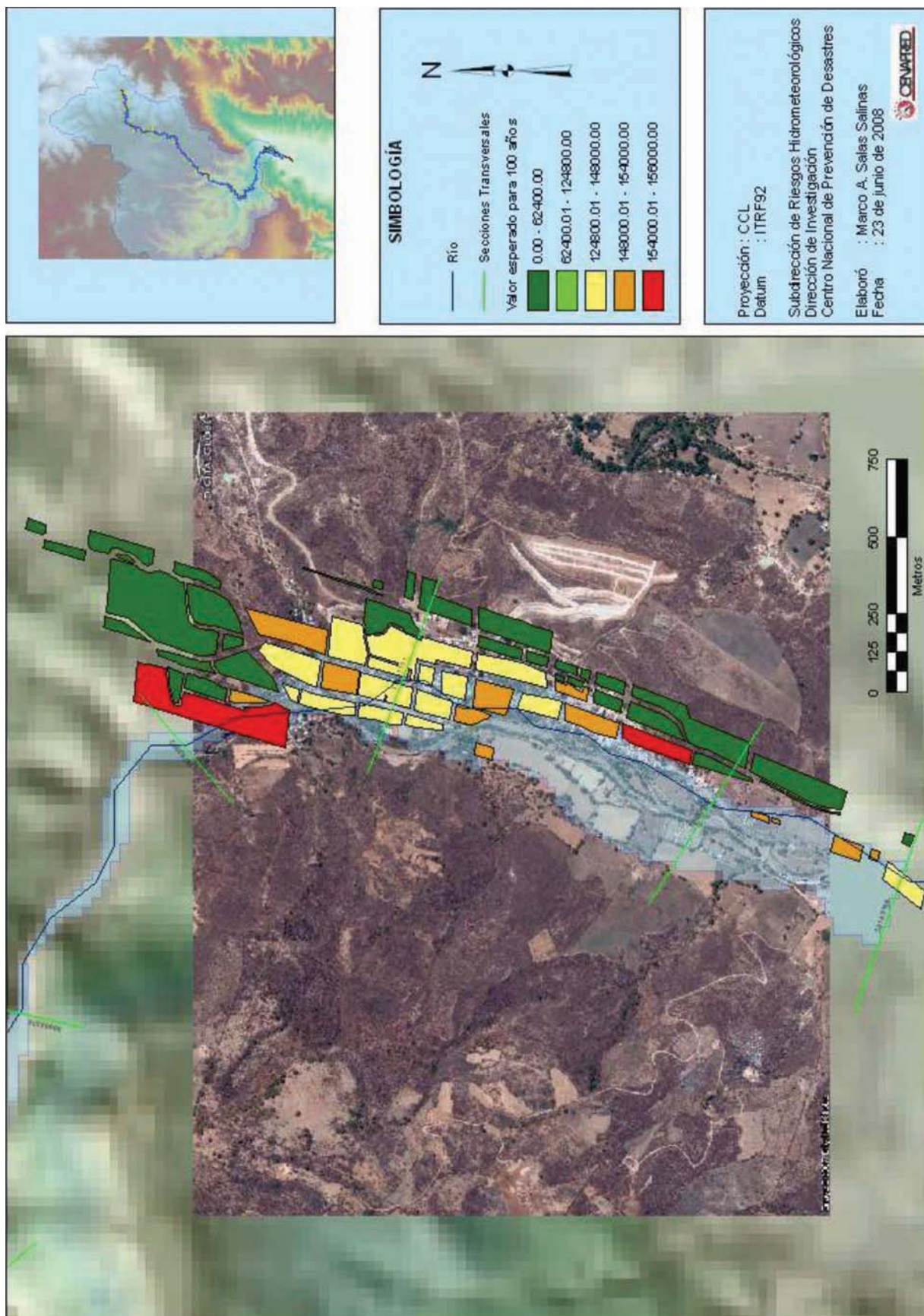


Figura 3.5 Mapa de riesgo por inundaciones en Mezquital del Oro, Zacatecas

De acuerdo con los resultados que se muestran en los tres mapas, se observa lo siguiente:

- Las menores inundaciones se presentan tanto en la parte inicial de la comunidad como al final de la misma, mientras que los mayores tirantes de agua tienen lugar en el centro de la población (Figura 3.3).
- Con respecto a la vulnerabilidad, se observa que en la mayoría de las manzanas ésta se clasifica como alta (nivel IV) y el resto de los casos es media (nivel III).
- Es importante mencionar que en ocasiones la información usada para el estudio pudo haber sido generada en diferentes fechas, lo que traería como consecuencia algunas incompatibilidades. Por ejemplo, la base de datos podría contener información que no se encuentre referenciada en la traza urbana o viceversa.

En el caso de Mezquital del Oro se tuvo ese problema. Nótese que algunas de las manzanas que aparecen en la Figura 3.4 se clasifican como *sin dato*. Lo anterior se debe seguramente a que hubo una actualización de la base de datos, pero no se hizo lo mismo con la traza urbana.

Para esos casos es conveniente determinar la causa de las diferencias. En algunos casos corresponden a explanadas o jardines, en otros son centros comerciales, cines, edificios de gobierno, terrenos baldíos etc. y, en otros más, simplemente hay diferencias entre la base de datos y la planimetría.

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Debido a que la aplicación de esta metodología, desarrollada especialmente para zonas urbanas, conlleva el uso de un modelo matemático para definir el comportamiento hidráulico de las inundaciones, así como de un sistema de información geográfica, el estudio de los diferentes escenarios es relativamente simple. Además, dado que la vulnerabilidad se define con base en los datos del censo general de población y vivienda a nivel de registro, es posible elaborar de manera expedita el mapa correspondiente, llevando a cabo la automatización de un proceso que identifique las características de cada predio. Por todo lo anterior, cuando se requiera analizar localidades de tamaño medio o grande, o bien, el río sea importante o se tenga una serie de ríos que afecte a la comunidad, se recomienda usar esta metodología.

La metodología para definir la vulnerabilidad de las viviendas trata de englobar las características de los diferentes tipos de casas que pueden encontrarse en el país, para que cualquier vivienda pueda ser clasificada en uno de los cinco tipos propuestos y sea posible caracterizar, hasta un nivel de manzana, su vulnerabilidad en una localidad urbana.

Para aplicar de manera correcta esta metodología se requiere de un conjunto de especialistas en SIG, hidrología, hidráulica y topografía que deben actualizar continuamente sus conocimientos y capacidades al respecto.

La información y las herramientas de trabajo no provienen de una sola fuente, y no son gratuitas, por lo que es necesario invertir recursos para adquirir traza urbana, software, etc.

Los algoritmos propuestos para la parte de identificación del peligro son relativamente fáciles de realizar, y dado que los programas usados (*ArcGIS* y *HecRAS*) son ampliamente utilizados en todo el mundo, los resultados del adecuado uso de los mismos están garantizados, salvo en aquellos casos en los que las condiciones requieran un tratamiento especial (por ejemplo para definir la red de drenaje en zonas planas, o bien, al simular el paso de avenidas en planicies de inundación).

Los mapas de precipitación para 1 y 24 h representan un considerable ahorro de tiempo y dinero en la parte correspondiente al análisis hidrológico, donde se obtienen los caudales asociados para diferentes periodos de retorno.

Debido a que en una ciudad es más complicado llevar a cabo una inspección casa por casa, en esta metodología el análisis se basa en los datos del censo general de población y vivienda de localidades urbanas a nivel de registro (INEGI, 2006), por lo que la principal diferencia con respecto a la metodología para identificar la vulnerabilidad de viviendas en localidades rurales (Eslava, 2006) es que se prescinde de la inspección física de las mismas.

Los resultados del análisis se pueden presentar a nivel de manzana o de AGEB, con lo que se ahorrará tiempo y dinero. A cambio de eso, no será posible ubicar las viviendas más vulnerables en la localidad.

Es conveniente probar otros modelos que simulen el tránsito de las avenidas con la finalidad de seleccionar el óptimo, no sólo desde el punto de vista de la simulación misma, sino considerando los costos de adquisición y la conectividad con el resto de los programas usados en esta metodología.

No se debe de olvidar que el objetivo de un mapa de riesgo por inundaciones es identificar las zonas con base en el riesgo estimado en cada una de ellas, cuantificar los daños potenciales bajo diferentes escenarios y posibilitar un análisis costo - beneficio que involucre diferentes propuestas de solución, en otras palabras, es la base para proponer medidas de mitigación ante inundaciones (Salas, 1999).

Finalmente, para completar esta metodología se llevará a cabo la aplicación de la misma en alguna ciudad del país y los resultados obtenidos se reportarán en una publicación posterior.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aparicio, J., (2001), "Fundamentos de Hidrología de superficie", Décima reimpresión, Limusa, México.
- DHI, (2008), "A modeling system for Rivers and Channels", User's Guide, Danish Hydraulic Institute, Denmark.
- Eslava H., Jiménez M., Salas M. A., García F., (2006), "Guía Básica para la elaboración de atlas estatales y municipales de peligro y riesgos", *Fenómenos hidrometeorológicos*, Serie del Atlas Nacional de Riesgos, Centro Nacional de Prevención de Desastres, México.
- <http://www.cenapred.unam.mx/es/Publicaciones/archivos/12122006CapituloI.pdf>
- ESRI, (2002), "Working with ArcGIS Spatial Analyst (for ArcView 8, ArcEditor 8 and ArcInfo 8)", apuntes del curso de análisis espacial, SIGSA, México.
- Flo-2D, (2007), "Flo – 2D", User's Manual, Flo – 2D Software Inc., Arizona.
- http://www.flo-2d.com/wp-content/uploads/Mapper_Net-Manual-2009-.pdf
- Fuentes, Ó. y Franco, E., (1997), "Modelo matemático de áreas de inundación", serie: Cuadernos de investigación, CENAPRED, Coordinación de Investigación, Área de Riesgos Hidrometeorológicos, México.
- <http://www.cenapred.unam.mx/es/Publicaciones/archivos/3112011modelomat.pdf>
- INEGI, (2000), "Resultados del censo de población y vivienda del 2000", Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática, Aguascalientes, México.
- INEGI, (2006), "Resultados del censo de población y vivienda del 2000", *Base de datos a nivel registro*, Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática, Aguascalientes, México.
- Salas S., M. A., (1999), "Obras de protección contra inundaciones", No. 49, Serie Cuadernos de investigación, CENAPRED, Coordinación de Investigación, Área de Riesgos Hidrometeorológicos, México, noviembre.
- <http://www.cenapred.unam.mx/es/Publicaciones/archivos/292010obras.pdf>
- Salas S., M. A. y Jiménez E., M., (2003), "Obtención de Mapas de Precipitación con duraciones de 1 y 24 h y Tr = 5 años, aplicados en la protección civil", XIII Congreso Nacional de Meteorología, Los Cabos, México, noviembre.
- USACE, (2002), "HEC-RAS", *River Analysis System*, version 3.1, Hydraulic Reference Manual, Hydrologic Engineering Center, Davis, CA, November.
- http://www.hec.usace.army.mil/software/hecras/documents/HEC-RAS_4.1_Reference_Manual.pdf
- USACE, (2005), "HEC-GeoRAS", *GIS tools for support of HEC-RAS using ArcGIS*, User's Manual, Hydrologic Engineering Center, Davis, CA.
- http://www.hec.usace.army.mil/software/hecras/documents/HEC-GeoRAS42_UsersManual.pdf
- Viessman, W., (1977), "Introduction to Hydrology", Harper and Row Publisher, New York.

INFORMACIÓN CARTOGRÁFICA

INEGI, Continuo de Elevaciones de la República Mexicana

<http://www.inegi.org.mx/sistemas/usuarios/login.aspx?s=geo&sistema=mde>

INEGI, Fotografía aérea, esc. 1:5000

INEGI, (2000), Marco Geoestadístico Nacional

INEGI, (2000), Marco Geoestadístico Estatal

INEGI, (2000), Marco Geoestadístico Municipal

INEGI, (2000), Manzanas de Localidades Urbanas



**Secretaría de Gobernación
Coordinación General de Protección Civil
Centro Nacional de Prevención de Desastres**

Av. Delfín Madrigal No.665,
Col. Pedregal de Sto. Domingo, Del. Coyoacán,
México D.F., C.P. 04360

www.gobiernofederal.gob.mx

www.gobernacion.gob.mx

www.cenapred.unam.mx