

# Importancia de los modelos digitales del terreno en la simulación hidráulica de inundaciones

**Anders Pérez Brugal**

Correo electrónico: anders@fco.uo.edu.cu

Universidad de Oriente, Santiago de Cuba, Cuba

**Juan F. Weber**

Correo electrónico: jweber@civil.frc.utn.edu.ar

Universidad Tecnológica Nacional, Córdoba, Argentina

**Yaismil R. Castellanos**

Correo electrónico: yaismil@santiago.geocuba.cu

GeoCuba Oriente Sur, Agencia Catastro, Santiago de Cuba, Cuba

## Resumen

En la investigación se analizó la influencia de la precisión de los modelos digitales del terreno [MDT] en los resultados de la simulación hidráulica de inundaciones. Se crearon cuatro MDT derivados de fuentes diferentes: tres, a partir de cartografía vectorial de curvas de nivel a varias escalas y uno, producto de un levantamiento con GPS en conjunto con una estación total. Este último se estableció como punto de comparación para determinar los errores que impone el uso de dichos planos en la representación del cauce y las llanuras de inundación y revelar su influencia en los resultados de la simulación. Finalmente, en dependencia del plano utilizado, se obtuvieron divergencias de 2,88 hasta 18,82 m de altura al representar un mismo punto en el terreno, lo que influyó de manera significativa en el cálculo de altura de la lámina de agua y en la estimación del área inundada, ya que se encontraron errores de 1,6 hasta 2,6 m y de 0,039 hasta 0,283 km<sup>2</sup> respectivamente, lo que demuestra que la precisión del MDT con que se modela el terreno determina en gran medida los resultados de la simulación.

Palabras clave: simulación hidráulica de inundaciones, modelos digitales del terreno, SIG

Recibido: enero 2010

Aprobado: marzo 2010

## INTRODUCCIÓN

Los Sistemas de Información Geográfica [SIG] han marcado desde su creación una pauta en cualquier disciplina relacionada con el manejo de información espacial. Su papel en la evolución de la hidráulica fluvial es, sin duda alguna, de vital importancia. Felicísimo [1] los define como: "Un sistema de hardware, software y procedimientos, elaborados para facilitar la obtención, gestión, manipulación, análisis, modelado, representación y salida de datos espacialmente referenciados, con el objetivo de resolver problemas complejos de planificación y gestión".

Por otra parte, muchos modelos matemáticos de simulación hidráulica se han desarrollado con el apoyo en

algunos SIG debido a la gran potencia que poseen los Modelos Digitales del Terreno [MDT] para representar el relieve. Esta posibilidad abrió el camino para la modificación de los modelos matemáticos de simulación hidráulica en la incorporación de nuevas capacidades estrechamente relacionadas con la información espacial. Entre los SIG que presentan vínculos con estos modelos matemáticos se destacan: AutoCad Land, Grass, Pcraster, Mike 11, ArcGis, entre otros. Un ejemplo clásico de esta relación se encuentra en el desarrollo llevado a cabo por el HEC para la mejora de su modelo HEC-RAS. Como parte de este esfuerzo surgen las aplicaciones implementadas sobre el popular SIG ArcView: HEC-GeoRAS. Su utilización permite el cálculo

automatizado de buena parte de los parámetros que son necesarios para la operación de los modelos implementados en HEC-RAS, así se gana una mayor precisión al trabajar con una resolución espacial mucho más elevada que la que podría obtenerse mediante la introducción manual de los datos del terreno.

El registro de la realidad física de una zona y, en particular, de la información referente a elevaciones se ha realizado frecuentemente mediante el uso de modelos analógicos, tales como los mapas y planos por todos conocidos, situación que en los últimos tiempos ha variado sensiblemente con la introducción de modelos de naturaleza digital y en particular los MDT. En estos, el almacenamiento de la información es de tipo puramente numérico, lo que hace posible el desarrollo de un análisis más detallado y profundo del relieve en cada ámbito de estudio. Históricamente, estos modelos se han dividido en dos grupos en función de la concepción básica de la representación de los datos: vectoriales y raster.

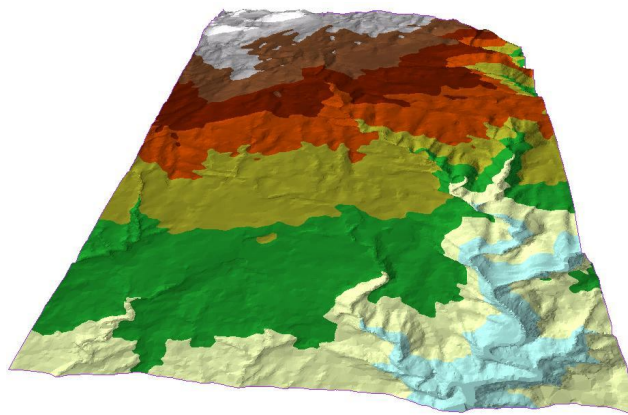
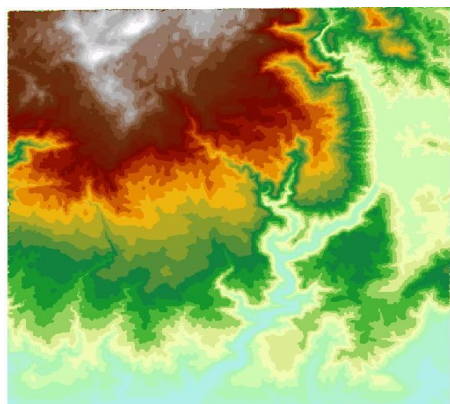
Numerosos estudios han demostrado que la descripción vectorial es más apropiada para representar variables discretas que, por su naturaleza, están limitadas por fronteras lineales claras, mientras las descripciones raster se adaptan mejor a la representación espacial de variables continuas, así como para otras con una naturaleza estadística o probabilística (figura 1). En este sentido, Casa *et al* [2] revelan, que el uso de mallas regulares para la representación de un modelo del terreno no es el adecuado para el análisis hidráulico de conducciones naturales debido a que este modo de representación del terreno no permite definir con detalle áreas con relieve complicado al no poder variar la resolución. De este modo, los vectoriales [TIN] resultan más acertados dado que están compuestos por una serie de puntos con valores  $x$ ,  $y$ ,  $z$  conocidos, y un conjunto de arcos que los unen para formar triángulos que permiten una mejor representación de la geometría del río al admitir el ajuste de la densidad de la red a la cantidad de variación de los datos [3].

Igualmente, el TIN admite datos adicionales como puntos de máxima cota o de depresiones y líneas de ruptura que permiten representar los elementos característicos del terreno como márgenes, cauce, afluentes, etc., que influyen de forma decisiva en el comportamiento hidráulico del río modelado.

La captura de la información hipsométrica constituye el paso inicial para transformar la realidad geográfica en una estructura digital de datos a través de la construcción de un MDT. Dicho proceso involucra diferentes métodos: directos e indirectos. Los directos toman la información sobre la superficie real del terreno y los indirectos se basan en un conjunto de documentos analógicos o digitales. En Cuba y en los países del tercer mundo o en vías de desarrollo se trabaja, por lo general, a través de la digitalización directa debido a los elevados precios de las tecnologías más avanzadas que suponen los restantes. Por lo que en la realidad cubana, los planos utilizados en la modelación de inundaciones están sujetos al uso de cartografía vectorial de curvas de nivel a escalas: 1: 10 000, 1: 25 000, 1: 50 000 y 1: 100 000 ya que estas son las más comunes en el país.

Diversas investigaciones se relacionan con el efecto de la resolución espacial en modelos de simulación de inundación como los de Casa *et al*, [2] Werner [4], Bates y De Roo [5], Marks y Bates [6], Hardy *et al* [7], Omer *et al* [8] y Horritt [9]. En esta bibliografía se manifiesta que la influencia de la topografía, tanto del cauce como de la llanura de inundación, constituye el factor limitante más importante en la modelación hidráulica y su representación como variable de entrada al modelo determina en gran medida la hidráulica de la crecida modelada y la extensión del área inundada.

El presente trabajo resulta de la necesidad de aplicar este tipo de investigación, en la cual se simulan las inundaciones, en el tramo del río Baconao que va desde la confluencia del Indio hasta la estación hidrométrica Trucucú. Con este propósito se toman como datos de entrada para la simulación algunas de las cartografías más utilizadas en Cuba [1: 10 000, 1: 25 000 y 1: 100 000].



**Fig. 1. Representación del relieve mediante celdas de resolución constante [GRID] y redes de triángulo irregulares [TIN] respectivamente.**

Teniendo en cuenta que no se conoce el grado de confiabilidad que impone en los resultados de la simulación cada una de estas escalas, se estableció como punto de comparación un levantamiento por posicionamiento global [GPS], apoyado por una estación total. Esto permitirá analizar los errores en los resultados de la simulación hidráulica asociados a la utilización de la cartografía con que se modela el terreno. De esta manera se podrán tomar, en el futuro, con un mayor nivel de confianza y rapidez, las medidas de prevención necesarias para mitigación y reducción de desastres por inundaciones al emplear adecuadamente los SIG y los modelos de simulación hidráulica.

## DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

La investigación se desarrolló en el tramo del río Baconao comprendido entre el afluente el Indio y la estación hidrométrica Trucucú (figura 2). La cuenca que tributa al río, se localiza al este de la ciudad de Santiago de Cuba, en la vertiente norte de la Sierra de la Gran Piedra. Limita al norte y al este con la cuenca del río Guantánamo; al noroeste, con la cuenca del río Guaninícun, al oeste con la cuenca del río San Juan y al sur, con el río La Anita, afluente del propio Baconao. Se escogió esta zona, por la disponibilidad de información hidrometeorológica y física, pues ahí se ubica una estación hidrométrica. La información extraída, a partir de dicha estación, garantiza el sistema de datos necesarios para una adecuada simulación de la inundación, pues facilita, entre otros, conocer valores reales de caudales y niveles del agua que circulan por el río. Toda esta información fue suministrada por el Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos [INRH].

El tramo de río en estudio, comprendido entre el afluente el Indio y la estación hidrométrica Trucucú, presenta una longitud de 642 m con una pendiente media de 0,001 8 m/m. El cierre de la estación se encuentra ubicado en las coordenadas Norte: 152,1 y Este: 637,7; hasta este punto la cuenca presenta una superficie de 167,8 km<sup>2</sup>, perímetro de 84,68 km y una pendiente media de 343 ‰. El río exhibe una topografía empinada, donde se define, a simple vista, el límite entre el cauce principal y las llanuras de inundación.

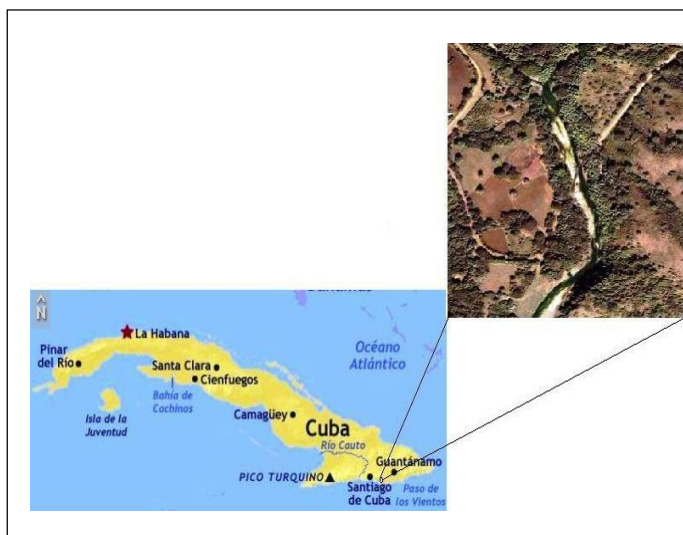


Fig. 2. Ubicación del tramo de río en estudio.

El río cuenta con una estación hidrométrica que pertenece al Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos [INRH], a través del cual se obtuvo la relación de los caudales máximos y la altura de la lámina del agua al 1, 5 y 20% de probabilidad (tabla 1). Con estos datos se estableció en esa sección del río la condición de contorno correspondiente a nivel de agua conocido [Known W.S.] y se simuló el perfil de la superficie del agua en régimen permanente. Se decidió ejecutar la simulación con los caudales máximos, teniendo en cuenta que este es el parámetro de diseño que más se emplea en proyectos para control de inundaciones en Cuba. [10]

Tabla 1

Relación de los caudales máximos y altura de la lámina del agua

| Probabilidad<br>p (%) | Período de retorno<br>T (años) | Caudal<br>Q (m <sup>3</sup> /s) | Nivel<br>y (m) |
|-----------------------|--------------------------------|---------------------------------|----------------|
| 1                     | 100                            | 1 025                           | 6,45           |
| 5                     | 20                             | 714                             | 5,52           |
| 20                    | 5                              | 436                             | 4,06           |

El caudal máximo registrado en dicha estación, ocurrió el 4 de octubre de 1963, durante el paso del ciclón Flora, con un valor de 1 109 m<sup>3</sup>/s, y elevó el nivel del agua a una altura de 6,7 m como se muestra en la figura 3.



Fig. 3. Nivel máximo del agua en la estación hidrométrica Trucucú, durante el paso del ciclón Flora.

## MODELACIÓN Y EXPORTACIÓN DEL TERRENO

En el análisis del flujo en conducciones libres, el primer paso está encaminado a obtener con precisión la geometría del río y las llanuras de inundación a partir de un TIN. Para facilitar el trabajo se generó con ArcView 3.3 y su extensión 3d Analyst un total de cuatro TIN de la zona de estudio. Para ello se utilizaron como fuente de datos las escalas: 1: 10 000, 1: 25 000 y 1: 100 000.

Es importante resaltar que cualquier proceso de generalización manual introduce errores en los mapas tradicionales, los cuales se trasladan posteriormente a los sistemas de información geográfica cuando son convertidos al formato digital. El origen de estos errores puede ser muy diverso; pueden estar provocados por los procesos de generalización cartográfica, por la vectorización y rasterización de datos; por los cambios de escala, entre otros. Morad y Treviño [11] han investigado los errores ocasionados por un proceso de digitalización manual, y sus resultados evidencian que los mapas digitalizados por varias personas, o por personas sin experiencia, tienden a acumular importantes errores geográficos, lo cual evidentemente ocasiona la propagación de errores durante la construcción del modelo del terreno.

Atendiendo a esa posibilidad se hace necesario conocer la precisión de los planos con los cuales se trabaja, pues, como los errores son consustanciales a los propios datos, obviamente, los SIG no pueden obtener resultados con una resolución de salida mejor que la de entrada. Según datos de GeoCuba, los planos: 1: 10 000, 1: 25 000 y 1: 100 000, poseen una precisión en la determinación de la altura [z], igual a 1/3 de la equidistancia, y una precisión en x, y igual a 0,22 mm a la escala del plano (tabla 2).

Por todo lo antes expuesto, se construyó un cuarto modelo, para establecer una comparación con los tres modelos del terreno antes mencionados y determinar su influencia en los resultados de la simulación. Con este objetivo se escogieron como datos de entrada, los puntos obtenidos en un levantamiento de alta resolución, con GPS en conjunto con una Estación Total en el tramo de río en estudio. Dicho levantamiento se llevó a cabo con un GPS Leyca sr20 en modo diferencial para garantizar la precisión que requería (figuras 4 y 5).

| Tabla 2<br>Valores de la precisión en z, x, y de los planos utilizados |               |             |                |
|------------------------------------------------------------------------|---------------|-------------|----------------|
| Escala                                                                 | Equidistancia | Precisión z | Precisión x, y |
| 1: 10 000                                                              | 5 m           | 1,67 m      | 2,2 m          |
| 1: 25 000                                                              | 10 m          | 3,33 m      | 5,5 m          |
| 1:100 000                                                              | 40 m          | 13,3 m      | 2,2 m          |

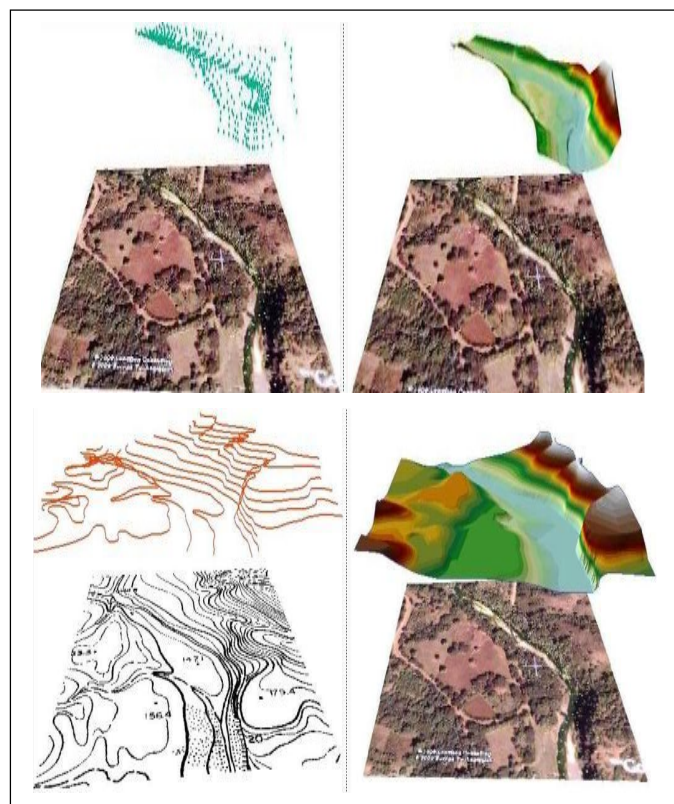


Fig. 4. Puntos medidos con el GPS y la estación total, y curvas de nivel del plano 1: 10 000, así como los modelos digitales del terreno construidos a partir de ellos.

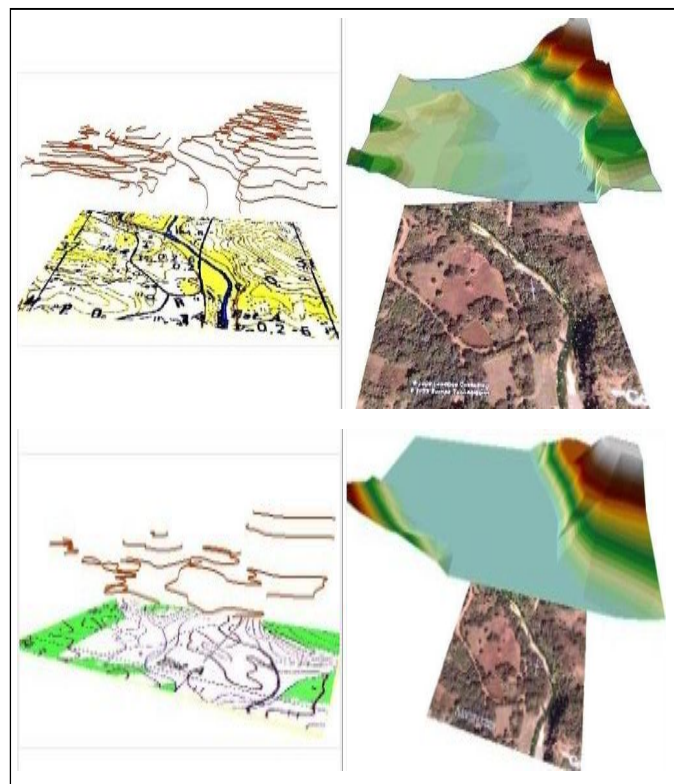


Fig. 5. Curvas de nivel de los planos 1:25 000 y 1: 100 000, así como los modelos digitales del terreno construidos a partir de ellos.

La captura de los puntos se basó en el levantamiento sistemático de los perfiles transversales de interés, espaciados en función de los cambios en la geomorfología del río. Se tomaron los puntos de fuerte cambio de pendiente, los bancos de arena encontrados en el cauce, los cambios en la forma de la sección transversal del cauce, etc. El fondo del río fue medido de manera directa debido a que se realizó la medición en el período seco y este presentaba un nivel del agua muy bajo. En algunas zonas el levantamiento se vio afectado por las dificultades del terreno, la vegetación que impedía la visibilidad de los satélites y la gran inversión de tiempo que se necesitó. Como alternativa se complementó el levantamiento con la ayuda de una estación total Leyca tps 805, con un alcance 1500 /2000 m y una precisión 10 mm ppm + 2 mm.

## ANÁLISIS DE LA PRECISIÓN DE LOS MODELOS CARTOGRÁFICOS

Para evaluar la precisión de los modelos cartográficos, se utilizaron como puntos de control los medidos a través del levantamiento con GPS en conjunto con una estación total porque, como se explicó anteriormente, dicho levantamiento se considera el más representativo de la geometría del cauce y las llanuras de inundación. El error de cada MDT se calculó hallando la diferencia entre los valores tomados como puntos de control y los interpolados en los TIN construidos con ArcView. En total se compararon 467 puntos, cuyos resultados se presentan en la tabla 3.

| Tabla 3<br>Estadísticos de los errores (m) de los diferentes modelos digitales del terreno |        |        |         |
|--------------------------------------------------------------------------------------------|--------|--------|---------|
| Estadísticos                                                                               | 10 000 | 25 000 | 100 000 |
| No. de puntos de control                                                                   | 467    | 467    | 467     |
| Error máximo                                                                               | 10,63  | 12,77  | 22,77   |
| Error mínimo                                                                               | 0,11   | 0,02   | 0,11    |
| Error medio                                                                                | 5,20   | 8,75   | 18,46   |
| Error medio cuadrático                                                                     | 5,46   | 9,22   | 18,82   |

Finalmente, se obtuvo la precisión en z de todos los planos, y como se suponía, esta fue disminuyendo a medida que lo hizo la escala; llama la atención que, al calcular el EMC, en cada uno de los planos utilizados se obtuvo siempre una apreciable desigualdad de precisión en relación con la establecida por GeoCuba como norma. Ante esta situación imprevista se consideró necesario obtener la diferencia de precisión que deberían mostrar los planos con respecto a la alcanzada en realidad (tabla 4).

Tabla 4

Comparación de la precisión en z

| Escala     | Precisión en z |           |            |
|------------|----------------|-----------|------------|
|            | GeoCuba        | Calculada | Diferencia |
| 1: 10 000  | 1,67 m         | 5,46 m    | + 3,79 m   |
| 1: 25 000  | 3,33 m         | 9,22 m    | + 5,89 m   |
| 1: 100 000 | 13,3 m         | 18,82 m   | + 5,52 m   |

En la comparación anterior se observa claramente que ninguno de los mapas presenta la precisión requerida. En sentido general se evidenció la manifestación de grandes diferencias entre los TIN como consecuencia del cambio de escala. Esto se debe a que estos se encuentran compuestos por una serie de puntos con valores x, y, z y un conjunto de arcos que los unen para formar los triángulos y a medida que disminuye la escala, aumenta la equidistancia y la distancia entre las curvas de nivel. Toda esta situación conduce a un aumento significativo de la distancia entre los puntos, así como de sus valores de altura, por lo que queda cada vez menos detallada la topografía del cauce y las llanuras, lo que se pone en evidencia principalmente, en un aumento significativo del ancho del cauce y de la altura con respecto a la real. La figura 6 resulta representativa para mostrar el efecto de los diferentes modelos en una sección transversal, y pone de manifiesto que las desigualdades entre las superficies van a influir de manera significativa en los resultados de la simulación hidráulica.

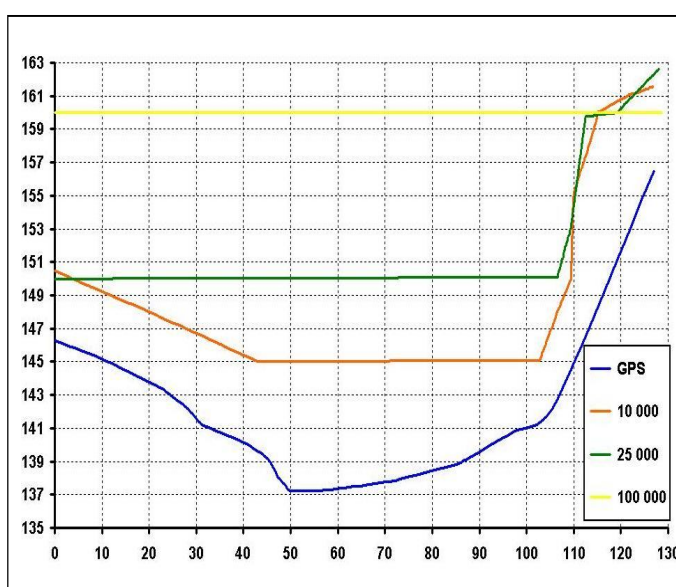


Fig. 6. Geometría de la sección transversal 1,299 representada por los distintos planos.

Teniendo en cuenta todo lo antes expuesto, los autores consideran que los errores que impone el uso de dichas cartografías en la representación del terreno y su influencia en los resultados de la simulación hidráulica de inundaciones, no pueden admitirse en proyectos que necesiten un alto nivel de precisión, pues aunque estaría trabajándose del lado de la seguridad, al sobreestimarse los resultados, se incurrirá en grandes gastos si se fuera a proyectar una obra o en la movilización innecesaria de recursos humanos y materiales que se verían afectados. Todo ello evidentemente descarta esos planos como base cartográfica para realizar proyectos a nivel de ingeniería de detalle. Se considera, además, que el 1: 10 000 es el único adecuado para representar el terreno en proyectos que no requieran un elevado nivel de detalle.

## INFLUENCIA DE LA PRECISIÓN DE LOS PLANOS EN EL CÁLCULO DE LA ALTURA DEL AGUA Y EL ÁREA DE INUNDACIÓN

La determinación de la influencia que ejerce el cambio de escala de la cartografía vectorial de curvas de nivel en el cálculo de la altura del agua y el área de inundación está dada por la incidencia directa que ejerce esta en la pérdida de precisión de los MDT, evidenciado esto principalmente, como ya se demostró, por un aumento significativo del ancho del cauce y de la altura con respecto a la real, por lo que constituye una incógnita la influencia de estos factores en los resultados de la simulación hidráulica de inundaciones.

Para establecer un patrón de comparación se tomó el TIN construido con los puntos tomados en el terreno, debido a la precisión centimétrica con que fue ejecutado dicho levantamiento. Finalmente, para obtener el perfil de la superficie del agua, se simuló en régimen permanente, para lo cual se utilizaron como variables de entrada al modelo, caudales al 1%, 5% y 20% de probabilidad, y se estableció, en la sección transversal del río que representa la zona donde se realizan las mediciones en la estación hidrométrica, la condición de contorno nivel de agua conocido, ya que esta es la adecuada si se conoce la altura real del agua en alguna sección transversal, como es el caso. Como consecuencia de la simulación se obtuvieron los valores de elevación de la lámina de agua, los perfiles de la altura del agua. Con estos valores se calcularon las desigualdades entre los obtenidos al utilizar el TIN más preciso (GPS y estación total), y los alcanzados al emplear la cartografía vectorial de curvas de nivel para representar el terreno como se muestra en las figuras 7 y 8.

En este análisis se llega a resultados muy interesantes, pues como se puede apreciar en la tabla 5, aproximadamente se introduce el mismo error en el cálculo de la altura del agua, a pesar de utilizarse escalas diferentes. No obstante, es necesario resaltar que estas diferencias aumentan si se

trabaja con un tramo de río más largo con curvas de nivel que lo corten, ya que en ese punto existiría un cambio brusco de la pendiente de fondo del río directamente proporcional a la equidistancia del plano. Esta situación traería como resultado una caída hidráulica en dicha zona, lo cual incrementaría el error en el cálculo de la altura real del agua a medida que disminuya la escala del plano, como es de esperar.

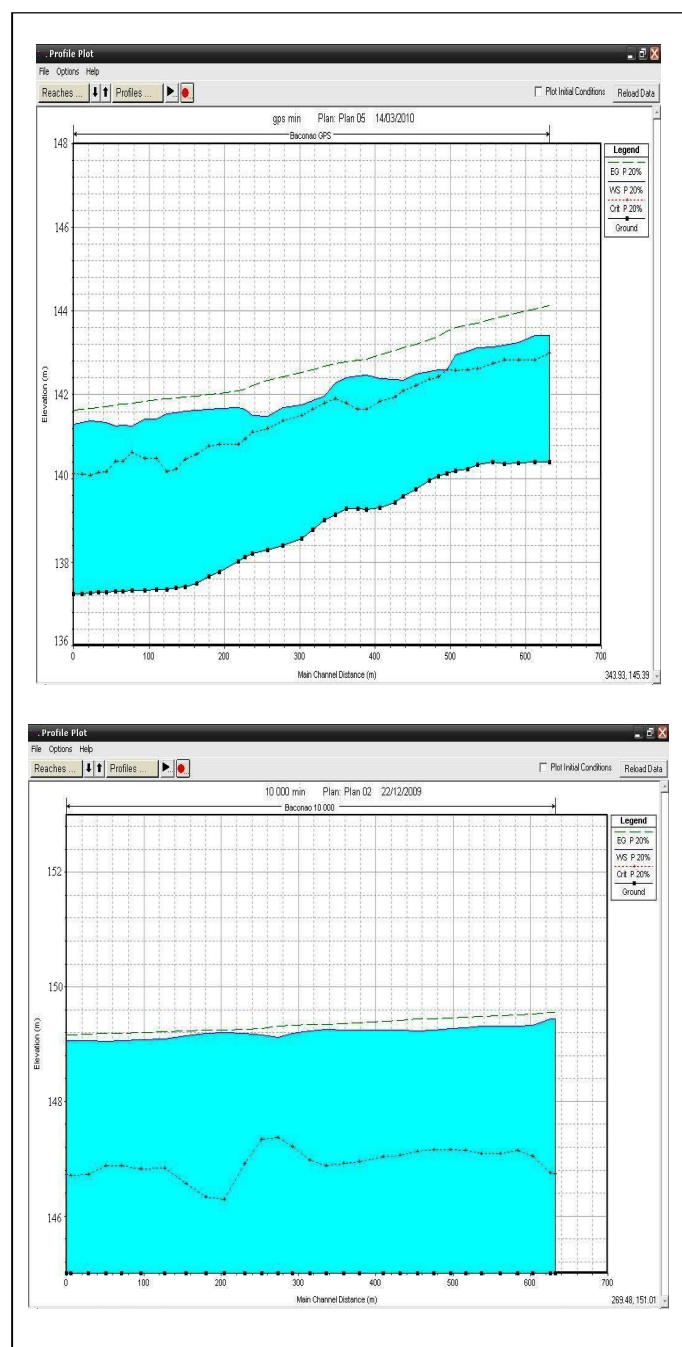
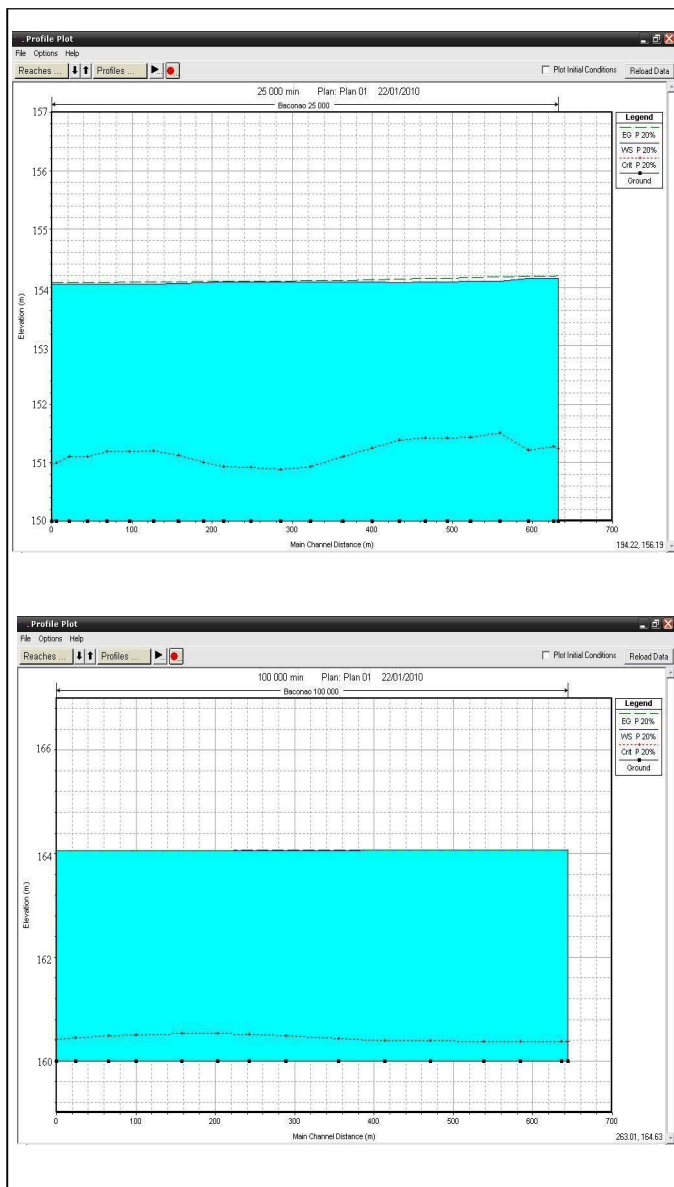


Fig. 7. Perfiles de la lámina de agua, para un caudal correspondiente al 20% de probabilidad, empleando los TIN del levantamiento con GPS y estación total, y 1: 10 000 respectivamente.



**Fig. 8.** Perfiles de la lámina de agua, para un caudal correspondiente al 20% de probabilidad, empleando los TIN de los planos 1:25 000 y 1: 100 000 respectivamente.

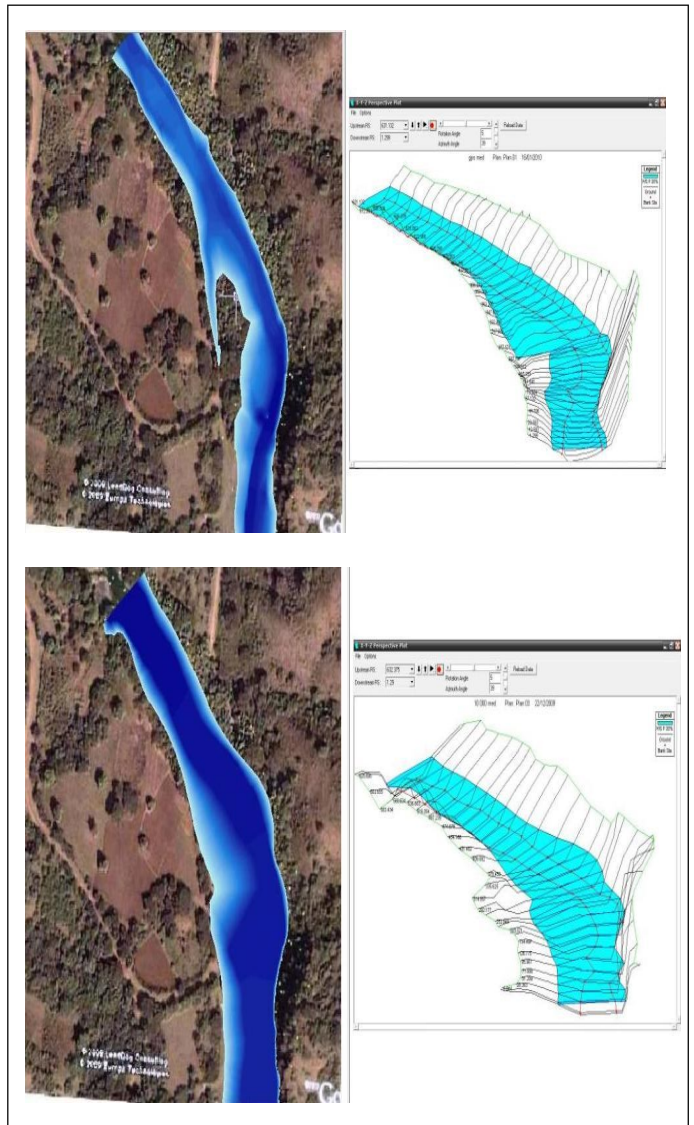
**Tabla 5**

Error medio cuadrático (m) en el cálculo de la altura del agua, tomando como referencia la alcanzada al utilizar el TIN más preciso

| Q (m <sup>3</sup> /s) | Cartografía |           |            |
|-----------------------|-------------|-----------|------------|
|                       | 1: 10 000   | 1: 25 000 | 1: 100 000 |
| 436                   | 1,61        | 1,76      | 1,69       |
| 714                   | 2,06        | 2,47      | 2,40       |
| 1 022                 | 2,22        | 2,62      | 2,63       |

Una vez efectuado el cálculo de la elevación de la lámina de agua se crea de manera automática con ArcView un mapa del área inundada. Este realiza una superposición de la altura que alcanza la superficie del agua sobre el terreno y una operación de resta de alturas que tiene como finalidad delimitar la extensión de la mancha de inundación. En las figuras 9 y 10 se muestran gráficamente algunos resultados de la simulación, en los que se evidencia las diferencias existentes en los resultados con tan solo variar el TIN.

Como resultado se estableció una comparación entre los valores de áreas inundadas alcanzados con el uso de los diferentes planos y se demostró que a medida que disminuye la precisión del MDT ocurre un aumento significativo del área inundada. Esto se debe a que a medida que disminuye la escala, aumenta el ancho del cauce y la altura del terreno. Es por esta razón que la menor área inundada se obtuvo al utilizar el levantamiento más preciso (GPS y estación total) y la mayor área al emplear el plano 1: 100 000 como se muestra en la tabla 6 y la figura 11.



**Fig. 9.** Zona inundada, para un caudal correspondiente al 20% de probabilidad, empleando los TIN del levantamiento con GPS y estación total, y 1: 10 000 respectivamente.

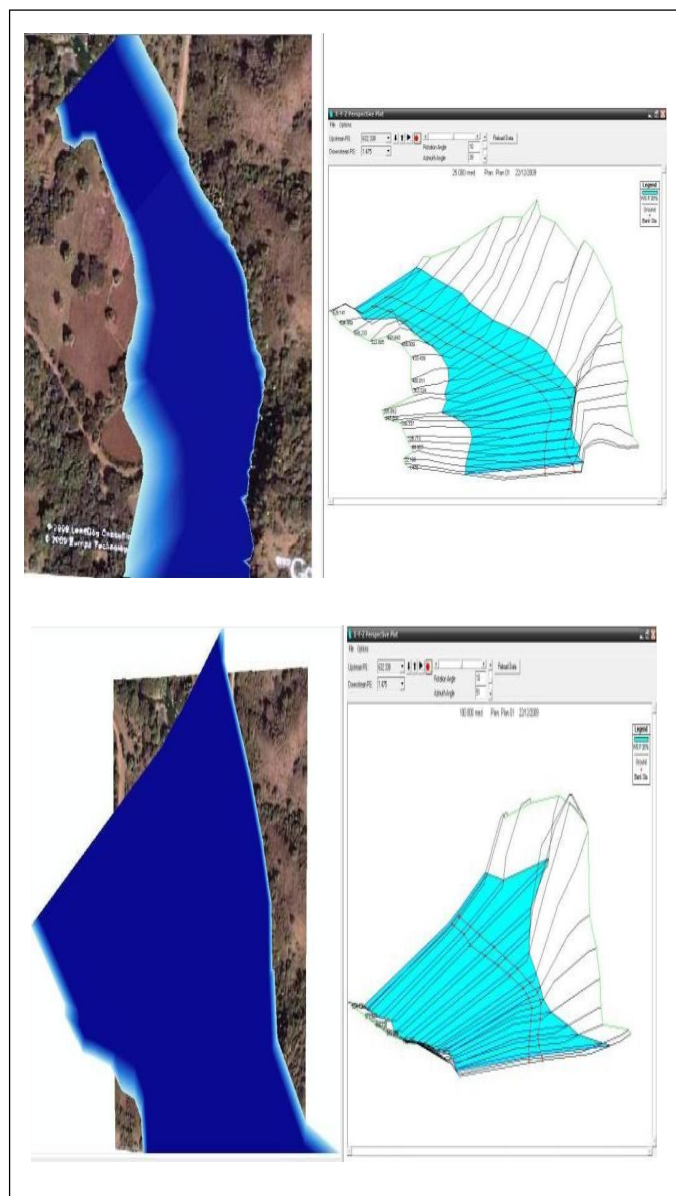


Fig. 10. Zona inundada, para un caudal correspondiente al 20% de probabilidad, empleando los TIN de los planos 1:25 000 y 1: 100 000 respectivamente.

| Tabla 6<br>Área de inundación (km <sup>2</sup> ) para caudales con probabilidades al 20,5 y 1% |             |            |           |           |
|------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------|------------|-----------|-----------|
| Q (m <sup>3</sup> /s)                                                                          | Cartografía |            |           |           |
|                                                                                                | GPS         | 1: 10 0 00 | 1: 25 000 | 1: 10 000 |
| 436                                                                                            | 0,039       | 0,056      | 0,098     | 0,269     |
| 714                                                                                            | 0,048       | 0,065      | 0,109     | 0,277     |
| 1 022                                                                                          | 0,053       | 0,070      | 0,116     | 0,283     |

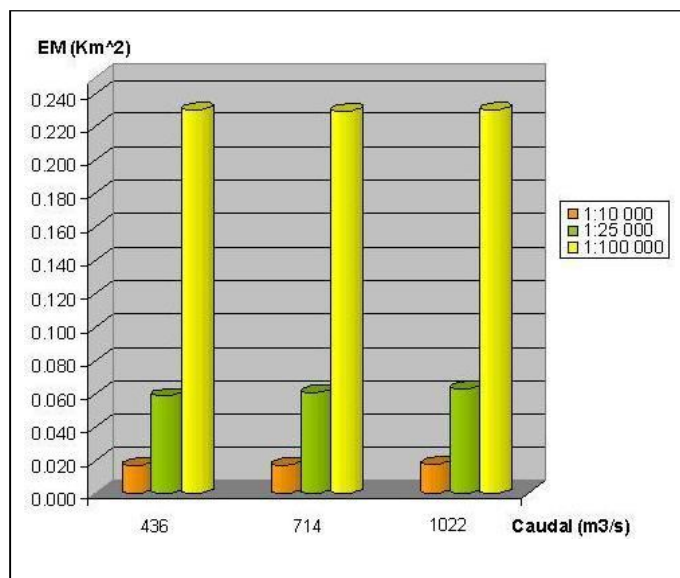


Fig. 11. Error medio (km<sup>2</sup>) en el cálculo del área de inundación.

Una vez más se evidencia que el 1: 10 000 es el más adecuado para representar el terreno, pues con su uso la diferencia del área inundada con respecto al valor real fue la menor, mientras que con la utilización de las restantes cartografías estas desigualdades aumentaron considerablemente hasta llegar a un valor máximo de 0,230 km<sup>2</sup>, en el caso del TIN menos preciso, construido a partir del plano 1: 100 000.

No obstante, es importante señalar que a pesar de que la menor diferencia obtenida en el cálculo del área inundada se haya alcanzado con el uso del cartográfico 1: 10 000, resalta el hecho de que la desigualdad es considerable, sobre todo si se tiene en cuenta que el tramo de río en estudio es bastante corto, pues solo es de 642 m. También es conveniente aclarar que este tramo presenta una topografía muy abrupta, aspecto que favorece el aumento de las diferencias debido a que en este tipo de mapas el cauce y las llanuras de inundación quedan apenas representados en profundidad y extensión, como se puede apreciar en la figura 5, y por tanto, el agua ocupa desproporcionadamente más espacio de la llanura de inundación.

Por todo lo antes expuesto, los autores consideran que ninguno de estos planos debe utilizarse para realizar proyectos que necesiten llegar a resultados con un elevado nivel de detalle, como lo requieren el diseño de alcantarillas, diques, y presas, entre otros. Sin embargo, existen otros que no necesitan tan alto nivel de precisión; este es el caso de estudios que solamente precisan ubicar zonas con determinado riesgo de inundación. En esa situación se recomienda la utilización del plano 1: 10 000, siempre que se consideren los errores que impone su uso en la determinación de la altura del agua y el área inundada. Los demás planos no son apropiados debido a las grandes divergencias que con ellos se obtiene en los resultados.

## CONCLUSIONES

1. Se calculó la diferencia existente entre los valores de altura de cada uno de los TIN obtenidos a partir de los planos a escala: 1: 10 000, 1: 25 000 y 1: 100 000, y el levantamiento hecho con GPS y estación total. Se obtuvo un EMC de 5,46 m cuando se empleó el 1: 10 000. Dicha desigualdad fue aumentando simultáneamente con la utilización de planos de menor escala hasta llegar a un máximo de 18,82 m de altura con el 1: 100 000, por lo que se obtuvo siempre una apreciable desigualdad de precisión en relación con la establecida por GeoCuba como norma.

2. Al analizar el error en la altura que obtuvo el agua, se evidencia que aproximadamente se produce el mismo error en la simulación a pesar de utilizarse diferentes escalas, pues se alcanzaron valores que oscilan entre 1,6 y 2,6 m. No obstante, es necesario resaltar que estas diferencias aumentan si se trabaja con un tramo de río más largo con curvas de nivel que lo corten, ya que en ese punto existiría un cambio brusco de la pendiente de fondo del río directamente proporcional a la equidistancia del plano. Esta situación traería como resultado una caída hidráulica en dicha zona, lo cual incrementaría el error en el cálculo de la altura real del agua a medida que disminuye la escala.

3. Con la utilización del 1: 10 000 el EMC en la determinación de la altura del agua para diferentes caudales varió 0,61 m. Sin embargo, al emplear el 1: 100 000, se encontró que para los mismos caudales la desigualdad aumentó a 0,94 m. Por tanto, a medida que se aumenta el caudal y se trabaja con planos menos precisos, las diferencias en el cálculo de la altura del agua serán más significativas.

4. Los resultados de la modelación hidráulica dependen mayormente de la cartografía con que se modele el terreno, pues al comparar el área inundada obtenida con el TIN creado a partir del levantamiento con GPS y estación total, con las áreas inundadas alcanzadas con el empleo de la cartografía vectorial convencional, se observa que aumentan las desigualdades a medida que disminuye la escala, sin importar el caudal que se emplee. Se encontraron divergencias de 0,017 km<sup>2</sup> al utilizar el modelo cartográfico 1: 10 000, mientras que con las elaboradas a partir de escalas más pequeñas, estas desigualdades aumentaron considerablemente hasta llegar a un valor máximo de 0,21 km<sup>2</sup> en el caso del 1: 100 000.

## REFERENCIAS

1. FELICÍSIMO, A. *Modelos digitales de terreno. Introducción y aplicación en las ciencias ambientales*. Oviedo, España: 1994, p.122.
2. CASA, A. *et al.* "Efectos de las fuentes cartográficas en los resultados de la modelación hidráulica de crecidas". *Ingeniería del agua*. 2005, vol. 12, nº 4, p. 12.

3. BATES, P. B. *et al.* *Analysis and development of hydraulic models for floodplain flows*. 1996.
4. WERNER, M. G. F. "Impact of grid size in GIS based flood extent mapping using a 1D flow model". *Phys.Chem.Earth* (B). 2001, vol. 26, nº 7-8, p. 522.
5. BATES, P. B. and DE ROO, A. P. J. "A simple raster-based model for flood inundation simulation". *Journal of Hydrology*. 2000, nº 236, p. 54-77.
6. MARKS, K. and BATES, P. "Integration of high resolution topographic data with floodplain flow models". *Hydrological Processes*. 2000, nº 14, p. 2122.
7. HARDY, R. J. *et al.* "The importance of spatial resolution in hydraulic models for floodplain environments". *Journal of Hydrology*. 1999, nº 216, p. 136.
8. OMER, C. R. *et al.* "Impact of varied data resolution on Hydraulic Modeling and Floodplain Delineation". *Journal of the American Water Resources Association*. 2003, p. 475.
9. HORRITT, M. S. and BATES, P. D. "Effects of spatial resolution on a raster based model of flood flow". *Journal of Hydrology*. 2001, p.249-253.
10. GONZÁLEZ, S. L. *et al.* "Eventos hidrológicos extremos". *Hidrología Superficial para Ingenieros, CIH, Ciudad de la Habana, Cuba*. 2000. p.1-145.
11. MORAD, M. and TREVIÑO, A. "Sistemas de información geográfica y modelizaciones hidrológicas: Una aproximación a las Ventajas y dificultades de su aplicación". *Boletín de la AGE*. 2001, p. 31-46.

## AUTORES

### Anders Pérez Brugal

Ingeniero Hidráulico, Profesor Instructor, Departamento de Ingeniería Hidráulica, Facultad de Construcciones, Universidad de Oriente, Santiago de Cuba, Cuba

### Juan F. Weber

Ingeniero Civil, Máster en Ciencias de la Ingeniería, Profesor Titular, Investigador y Consultor en Hidrología e Hidráulica. Laboratorio de Hidráulica, Facultad Regional de Córdoba, Universidad Tecnológica Nacional, Córdoba, Argentina

### Yaismil R. Castellanos

Ingeniero Mecánico, Profesor Adjunto, Departamento de Capacitación, Centro de Estudios, Universidad de Oriente, Agencia GeoCuba Oriente Sur, Santiago de Cuba, Cuba

## **Importance of Digital Models of Soil Surface in the Flooding Hydraulic Simulation**

### **Abstract**

Investigation analysed the influences of MDT's precision in the results of the hydraulic simulation of floodings. Four digital models of soil surface were created from different sources: three starting from vectorial cartography by contour lines of few scales and one getting from GPS devices and total station measuring. The comparison to the estimated measured error due to the utilization of simple vectorial cartography paper for the representation of riverbed and flood valleys, with the last model utilized, may assume its influence in flood simulation results. One conclusion was probed; height differences in the representation of soil surface to the same point were very wide [2,88 to 18,82 m], then the estimated water level as well the simulation of flooding area depend of the obtained cartography method, due that were found errors from 1,6 to 2,6 m and from 0,039 to 0,283 km<sup>2</sup>, that demonstrates the precision of the MDT with that the plot of land is modeled determines the results of the simulation to a large extent.

Key words: flooding hydraulic simulation, digital model of the soil surface, SIG