

EFFECTOS DE LA BASE CARTOGRÁFICA EN LA SIMULACIÓN HIDRÁULICA DE LAS INUNDACIONES FLUVIALES. CASO DE ESTUDIO: RÍO BACONAO

Anders Pérez Brugal⁽¹⁾, Juan F. Weber⁽²⁾, Yaismil R. Castellanos³

⁽¹⁾Universidad de Oriente. Facultad de Construcciones. Sede Mella. Departamento de Ingeniería Hidráulica. Ave. Las Américas, s/n, CP 90900, Santiago de Cuba. e-mail: anders@fco.uo.edu.cu

⁽²⁾Laboratorio de Hidráulica, Departamento de Ingeniería Civil, Facultad Regional Córdoba, Universidad Tecnológica Nacional. Maestro M. López esq. Cruz Roja Argentina. Ciudad Universitaria - CP (X5016ZAA). Córdoba. Argentina. e-mail: jweber@civil.frc.utn.edu.ar

⁽³⁾GeoCuba Oriente Sur, agencia Catastro, Santiago de Cuba

RESUMEN

En la investigación se analizó el efecto de la cartografía en los resultados de la simulación hidráulica de inundaciones con HEC-RAS. Se crearon cinco Modelos Digitales del Terreno derivados de fuentes diferentes: cuatro, a partir de cartografía vectorial de curvas de nivel a varias escalas, y uno, obtenido 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 Km² respectivamente, lo que demuestra que la cartografía con que se modela el terreno determina en gran medida los resultados de la simulación.

Palabras clave: HEC-RAS, Simulación Hidráulica, Inundaciones, Modelos Digitales del Terreno, SIG.

ABSTRACT

This research examines the effect of mapping in the results of hydraulic simulation with HEC-RAS software. Five Digital Terrain Models were created from different sources: four from vector mapping contours at various scales, and one obtained from a survey with GPS in conjunction with a Total Station. The latter was established as a baseline to determine the errors imposed by the use of such cartography in the representation of the main channel and floodplains and reveal their influence on the results of the simulation. Finally, depending on the map used, the differences to represent the same point on the ground were from 2.88 to 18.82 m in height, which significantly influence the calculation of water surface elevation and flooded area, with errors founded 1.6 to 2.6 m and 0.039-0.283 km² respectively. It shows that mapping largely determines the outcome of the simulation.

Keywords: HEC-RAS, Hydraulic Simulation, Floods, Digital Terrain Models, GIS.

INTRODUCCIÓN

Las inundaciones, eventos naturales y recurrentes para un río, se producen cuando lluvias intensas o continuas sobrepasan la capacidad de retención e infiltración del suelo, el volumen máximo de transporte del río es superado y el cauce principal se desborda e inunda los terrenos cercanos a los propios cursos de agua. Para la implementación de medidas que permitan mitigar sus devastadores efectos es necesario calcular los niveles de agua, los caudales y velocidades del flujo en cada una de las secciones de cálculo definidas a lo largo de los cauces considerados. Se pueden distinguir diversos métodos de cálculo que pueden ir desde el uso de ecuaciones del régimen uniforme hasta las ecuaciones del régimen variado. Para llevarlos a cabo, se presentan dos situaciones: si se conoce la cota de la superficie libre del agua, se determina el caudal; o viceversa dado el caudal se determina el tirante real del flujo.

La Hidráulica de Canales clásica desde sus inicios se basó en la aproximación unidimensional al problema del flujo en conducciones libres, lo cual es bastante razonable en la medida en que las dimensiones transversales a la dirección del flujo sean despreciables frente a la escala longitudinal. León (2000), Chow (2004) y Weber (2003) coinciden en que para muchas aplicaciones prácticas las variaciones espaciales de la velocidad pueden resolverse simplificando el campo de velocidades a un campo unidireccional y en otros casos bidimensional, lo cual permite que se empleen formas más simples de las ecuaciones básicas del flujo con acierto. No obstante, Weber (2003) asevera que en el caso de canales con planicies de inundación, la aproximación unidimensional se puede ver seriamente limitada debido a que normalmente estas zonas presentan mayor resistencia al flujo por tener profundidades bajas, presencia de vegetación, etc. De todos modos, numerosos modelos matemáticos unidimensionales han surgido intentando representar el flujo en estas condiciones, y en la gran mayoría de los proyectos de simulaciones fluviales que se llevan a cabo hoy día en todo el mundo, se utiliza este tipo de modelos.

Entre los más utilizados en la práctica a nivel internacional están: Mike-11, Sobek, WES, Dambrk, HEC-RAS, etc. Este último probablemente sea el más empleado en la actualidad. Con este sistema se puede calcular el perfil de la superficie de agua en régimen gradualmente variado o rápidamente

variado para flujo permanente e impermanente en una red completa de canales abiertos, ya sean naturales o artificiales. En el caso de trabajar con el régimen permanente, el perfil de flujo es calculado de una sección a otra por la aplicación iterativa de la ecuación de energía mediante el denominado método del paso estándar. Pero si el estudio que se va a realizar necesita modelar flujo en régimen impermanente, el programa resuelve las ecuaciones de Saint-Venant completas mediante el método de diferencias finitas implícitas. Para ello utiliza el esquema de Preissmann. Dicha solución se resuelve iterativamente con el uso de la técnica de Newton-Raphson (Brunner, 2008).

Por otra parte, muchos de estos modelos se han desarrollado con el apoyo en algunos Sistemas de Información Geográfica (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. Como parte de este esfuerzo surge la aplicación HEC-GeoRAS implementada sobre el popular SIG ArcView. Su utilización permite el cálculo automatizado de buena parte de los parámetros necesarios para la operación del modelo matemático 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 información referente a elevaciones de una zona se ha realizado frecuentemente mediante el uso de modelos analógicos tales como los mapas y planos, situación que en los últimos tiempos ha variado 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, según Fernández y Geler (2004), Felicísimo (1994) y Olaya (2004), estos modelos se han dividido básicamente en dos grupos en función de la concepción básica de la representación de los datos: vectoriales y raster. La principal característica del modelo vectorial es el almacenamiento de coordenadas en dos o tres dimensiones con un

formato de números decimales de alta precisión. Estas coordenadas son la base para tipos de datos más complejos como son: puntos, líneas, polígonos, etc. Dicha estructura permite una gran flexibilidad en el manejo de la información debido a que esta puede tener distintas formas y características con menores limitaciones que en el caso raster.

El modelo raster representa los datos por medio de una matriz de celdas que conforman una malla en dos direcciones, en la que cada celda contiene un atributo. Los datos en formato raster son muy simples y su consumo de memoria es proporcional solo al tamaño de la matriz y no a la diversidad y distribución de los datos dentro de ella, lo que los hace adecuados para representar características que varían suavemente en el espacio.

Por otro lado, Olaya (2004) plantea que el inconveniente principal del modelo raster reside en la discretización del espacio a la que da lugar, responsable directa de una pérdida de precisión, la cual debe ser asumida desde un primer momento a la hora de trabajar bajo este modelo de almacenamiento.

Ambos tipos de modelos presentan variantes que permitieron la evolución a nuevas estructuras de organización de los datos, donde las más utilizadas son las mallas de celdas regulares (GRID) y la Red Irregular de Triángulos (TIN), (Fernández y Geler, 2004).

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. En este sentido, Casa et. al. (2005) revelan a partir del trabajo realizado por Bonham-Carter en 1996, 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 TIN resultan más acertados dado que consiguen una mejor representación de la geometría del río al permitir el ajuste de la densidad de la red a la cantidad de variación de los datos según Bates et. al. (1996). Igualmente un 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, cauces, afluentes, además de construcciones como carreteras y diques 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. Este proceso involucra diferentes métodos: directos e indirectos. 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 métodos. De la misma forma, 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 1:10000, 1:25000, 1:50000 y 1:100000 ya que estas son las más comunes en el país.

En los trabajos desarrollados por Chavarri (2004), Oleagordia et. al. (2005), Carrasco et. al. (2004), Etxeberria (2004), Rodríguez y González (2008), Etxeberria et. al. (2002) y Cárdenas (2000) se evidencia la utilización a nivel internacional de otras escalas; de ellas, las más usadas son: 1:100, 1:1000, 1:2000 y 1:5000. No obstante en las publicaciones de Oleagordia et. al. (2001), Cruz et. al. (2005) y Treviño y Ortiz (2004) se emplean planos 1: 10000. La amplia búsqueda bibliográfica realizada en relación con el tema, indica que es muy poco frecuente el uso de escalas más pequeñas que la anterior en trabajos que requieran llegar a resultados con un alto nivel de precisión. Esto se debe, principalmente, a que la exactitud y precisión de los MDT están determinadas por el modo en que han sido obtenidos los datos; así pues, a mayor escala, mayor precisión del modelo del terreno.

Diversas investigaciones abordan el efecto de la resolución espacial en modelos de simulación de inundación como los de Werner (2001), Bates y De Roo (2000), Marks y Bates (2000), Hardy et. al. (1999), Horritt y Bates (2001), Omer et. al. (2003) y Horritt (2000); pero sin dudas el que mejor caracteriza el efecto de la resolución espacial en modelos de inundación es el realizado por Casa et. al. (2005). En él 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. Es, por tanto, necesario, llevar a cabo un análisis de la influencia de diversas bases cartográficas en la simulación hidráulica de inundaciones a partir del uso de las escalas de trabajo más frecuentes en Cuba.

MATERIALES Y MÉTODOS

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. 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 Guaninicún; al oeste, con la cuenca del río San Juan y al sur, con el río La Anita, afluente del propio Baconao (Figura 1).

Se escogió esta zona, por la disponibilidad de información hidrometeorológica y física con que cuenta, al poseer una de las dos estaciones hidrométricas que existen en la provincia Santiago de Cuba. La información extraída, a partir de dicha estación, garantiza el sistema de datos necesarios para una adecuada simulación de la inundación, pues facilita, entre otras cosas, conocer valores reales de caudales y niveles del agua que circulan por el río. Toda esta información, necesaria para los propósitos académicos del presente estudio, fue suministrada por el Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos (INRH).

El tramo de río en estudio, presenta una longitud de 642 m con una pendiente media del cauce de 0.0018 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 km², perímetro de 84.68 km y una pendiente media de 343 ‰. El tramo de río exhibe una topografía empinada, donde se define, a simple vista, el límite entre el cauce principal y las llanuras de inundación. El caudal máximo registrado en dicha estación, ocurrió el 4 de julio de 1963, durante el paso del ciclón Flora, con un valor de 1109 m³/s, y elevó el nivel del agua a una altura de 6.7 m como se muestra en la Figura 2.

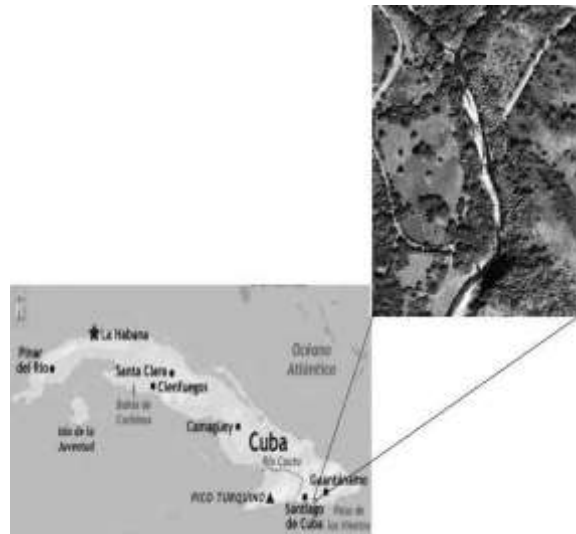


Figura 1. Ubicación del tramo de río en estudio.



Figura 2. 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 a dar 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: 1:100000, 1:50000, 1:25000 y 1:10000 (Figuras 3, 4, 5 y 6). Estas se obtuvieron en la empresa GeoCuba Oriente Sur a través de la agencia Catastro.

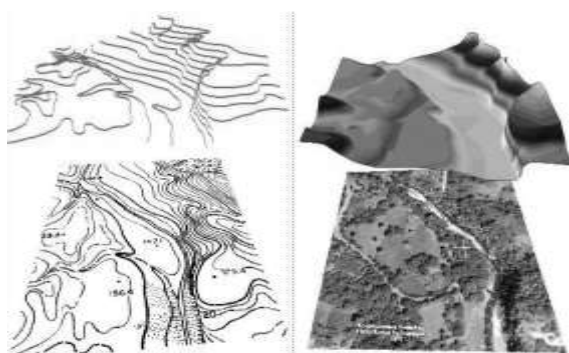


Figura 3. Curvas de nivel del plano 1:10000 y MDT.

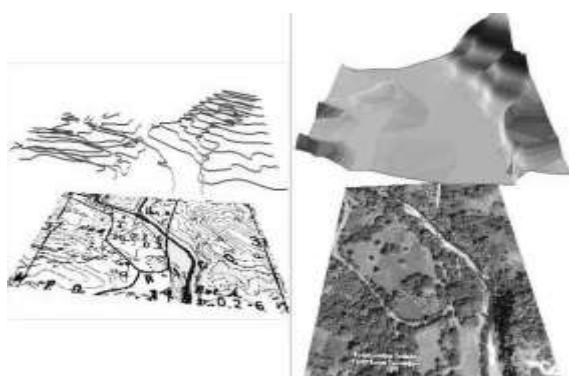


Figura 4. Curvas de nivel del plano 1:25000 y MDT.

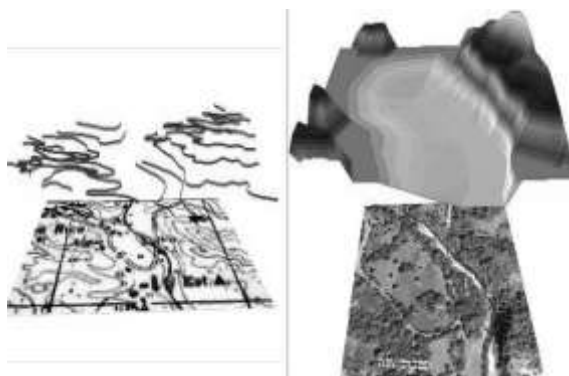


Figura 5. Curvas de nivel del plano 1:50000 y MDT.

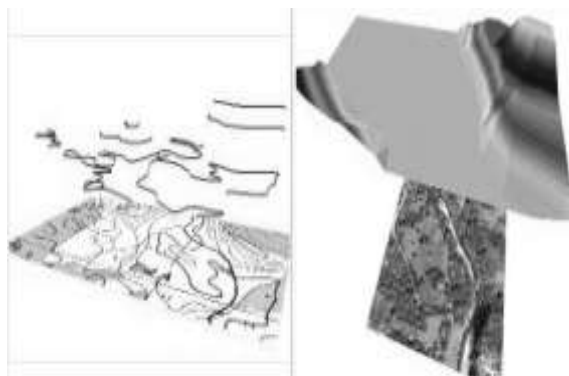


Figura 6. Curvas de nivel del plano 1:100000 y MDT.

Para establecer la precisión de los cuatro modelos del terreno y determinar su influencia en los resultados de la simulación, se construyó un quinto TIN a partir de los puntos obtenidos con un levantamiento de alta resolución por posicionamiento global (GPS) en conjunto con una Estación Total del tramo de río en estudio (Figura 7).

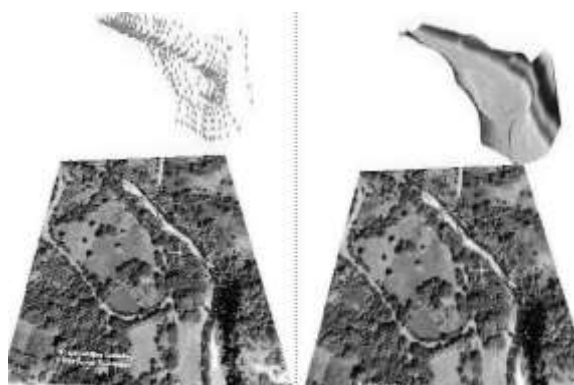


Figura 7. Puntos medidos con el GPS y la Estación Total, y Modelo Digital del Terreno construido a partir de ellos.

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 de 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 de 1500/2000 m y una precisión 10 mm ppm + 2 mm.

Simulación y representación de la inundación

Luego de delimitar las secciones transversales del río se determinó el perfil de la superficie de agua a lo largo del río a través de la simulación hidráulica con el HEC-RAS. Una de las cuestiones transcendentales para obtener una buena estimación del mismo es el establecimiento de condiciones de contorno apropiadas, ya que la localización de estas está gobernada por el estado del flujo y su inadecuada colocación impondrá un estado del flujo incorrecto.

El HEC-RAS admite tres zonas para establecer las condiciones de contorno: 1) Aguas arriba, cuando se prevé la existencia de un flujo supercrítico. En este tipo de flujo las fuerzas inerciales predominan sobre las de gravedad y se describe usualmente como rápido o torrencial. 2) Aguas abajo, cuando se prevé la existencia de un flujo subcrítico. En este estado del flujo el papel desempeñado por las fuerzas gravitacionales es más pronunciado, por tanto el flujo tiene una velocidad baja y a menudo se describe como de corriente lenta. 3) En los extremos aguas arriba y aguas abajo, si se prevén cambios de régimen, es decir, si el canal o río a estudiar tiene tramos en régimen subcrítico y otros en supercrítico.

En el río se cuenta con una estación hidrométrica, a través de la cual se obtuvo la relación de los caudales máximos y 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.

Tabla 1. Relación de los caudales máximos y altura de la lámina del agua.

Probabilidad	Caudal	Nivel
p (%)	Q (m ³ /s)	y (m)
1	1025	6.45
5	714	5.52
20	436	4.06

Una vez determinado el perfil del flujo en las secciones transversales, se delimitaron las zonas inundadas con ArcView. 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. A continuación 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 (Figuras 8 a 12).

ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Para evaluar la precisión de los modelos cartográficos construidos a partir de la cartografía vectorial de curvas de nivel, 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, este se considera el más representativo de la geometría del cauce y las llanuras de inundación, al encontrarse adecuadamente distribuidos los puntos por toda la zona de estudio y

poseer una elevada precisión. 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 que se muestran en las Figuras 3, 4, 5 y 6. En total se compararon 467 puntos, cuyos resultados se exhiben en la Tabla 2.

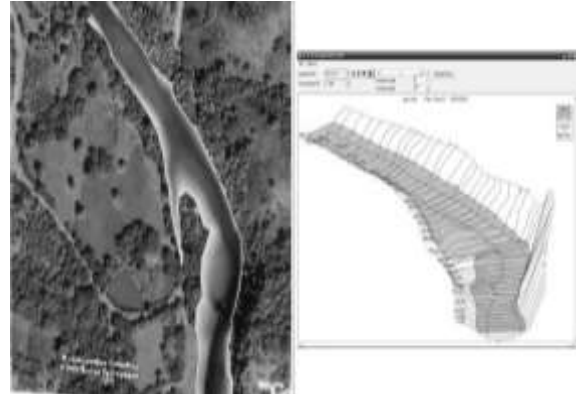


Figura 8. Gráfico de la zona inundada y la altura del agua, para un caudal correspondiente al 20% de probabilidad, empleando el TIN del levantamiento con GPS y Estación Total.

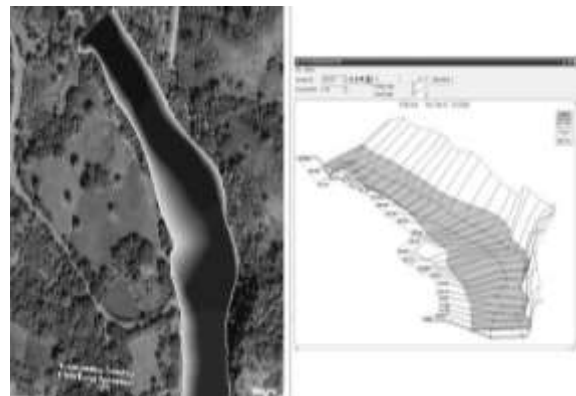


Figura 9. Gráfico de la zona inundada y la altura del agua, para un caudal correspondiente al 20% de probabilidad, empleando el TIN del plano 1:10000.

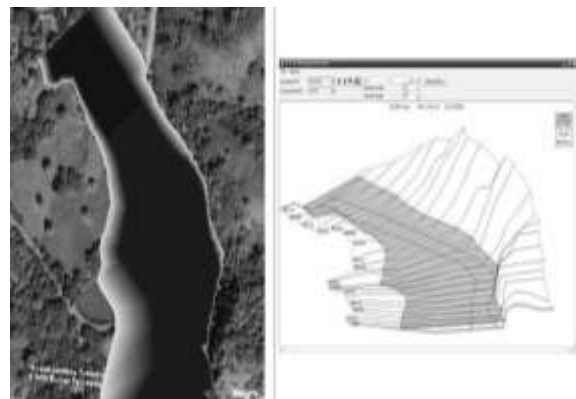


Figura 10. Gráfico de la zona inundada y la altura del agua, para un caudal correspondiente al 20% de probabilidad, empleando el TIN del plano 1:25000.

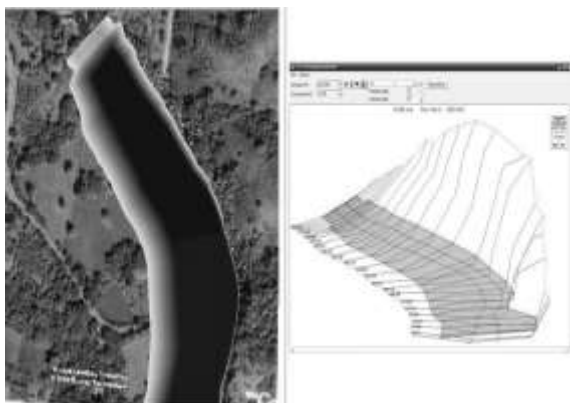


Figura 11. Gráfico de la zona inundada y la altura del agua, para un caudal correspondiente al 20% de probabilidad, empleando el TIN del plano 1:50000.

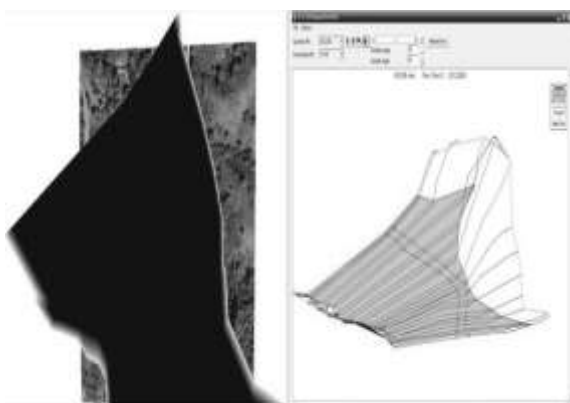


Figura 12. Gráfico de la zona inundada y la altura del agua, para un caudal correspondiente al 20% de probabilidad, empleando el TIN del plano 1:100000.

Tabla 2. Estadísticos de los errores (m) de los diferentes Modelos Digitales del Terreno.

	Cartográficos			
	10 000	25 000	50000	100 000
Puntos de control	467	467	467	467
Error Máximo	10.63	12.77	10.73	22.77
Error Mínimo	0.11	0.02	0.01	0.11
Error Medio	5.20	8.75	2.10	18.46
Error Medio Cuadrático	5.46	9.22	2.88	18.82

Como consecuencia se obtuvo la precisión en z de todos los planos y, como era de esperarse, esta fue disminuyendo a medida que lo hizo la escala. Resalta el hecho de que al emplearse el plano 1:50000 no se cumple esta tendencia, si se tiene en cuenta que con este se obtuvo un error medio cuadrático (EMC) de 2.88 m, mientras que con la utilización de los otros planos de mayor precisión (1:10000 y 1:25000) se alcanzaron valores de 5.46 y 9.22 m respectivamente. Esta desigualdad se debe a que en el plano 1:50000 la curva de nivel más

próxima al río tiene valor de altura ($z_{\min} = 140$ m), menor que la encontrada en planos más precisos como el 1:10000 y 1:25000, en los que los valores de z mínimos fueron 145 y 150 m respectivamente.

La presencia de esta curva deja muchas dudas acerca de la calidad de la información que contiene el plano 1:50000, no solo por tener un valor de z inferior al de otros planos más precisos, sino también, porque es el único plano que contiene en el tramo de río analizado una curva que corta al río y es precisamente la que se está analizando, todo lo cual rompe con la semejanza que presentan los otros planos en el trazado de sus curvas, lo que puede estar dado, entre otras causas, por un error cometido en la construcción de dicha cartografía. Estos aspectos influyeron de manera significativa en que el TIN del plano 1:50000 alcanzara errores en z inferiores a los que podrían esperarse.

Llama la atención que, al calcular el EMC, en cada uno de los planos se obtuvo 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 real (Tabla 3).

Tabla 3. 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: 50 000	6.67 m	2.88 m	-3.79 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 que deberían poseer, y que alcanza la mayor desigualdad al utilizar los planos 1:25000 y 1:100000, pues con ellos se lograron valores de 5.89 y 5.52 m respectivamente. Sin embargo, al recurrir a los planos 1:10000 y 1:50000 se obtuvo coincidentemente la misma diferencia de precisión, con un valor de 3.79 m. Una vez más se corrobora el hecho de que la utilización del 1:50000 conduce a resultados ilógicos, pues es en el único caso en el que se obtiene mayor precisión que la establecida por GeoCuba (3.79 m por encima).

En sentido general se evidenció la manifestación de grandes diferencias entre los TIN como consecuencia del cambio de escala. Esto se debe a que están compuestos por una serie de puntos con

valores x , y , z y un conjunto de arcos que los unen para formar los triángulos, por lo que a medida que disminuye la escala, aumenta la equidistancia y la distancia entre las curvas de nivel. Toda esta situación conlleva a un aumento significativo de la distancia entre los puntos así como de sus valores de altura, de esta manera 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 13 resulta representativa para mostrar el efecto de los diferentes modelos en una sección transversal cualquiera del tramo, y pone de manifiesto que las desigualdades entre las superficies van a influir de manera significativa en los resultados de la simulación hidráulica.

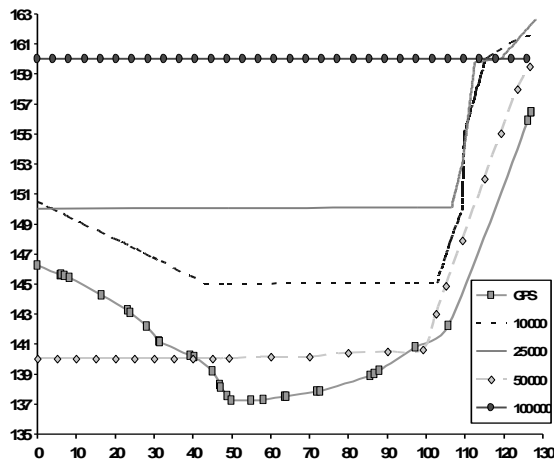


Figura 13. Geometría de la sección transversal 1.299 representada por los distintos planos.

Teniendo en cuenta esta situación, se pone de manifiesto que las desigualdades entre las superficies del terreno van a influir de manera significativa en los resultados de la simulación hidráulica, por lo que los autores consideran que los errores que impone el uso de dichas cartografías en los resultados de la simulación, 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 incurriría 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 1:10000 es el único

adecuado entre todos para representar el terreno en proyectos que no requieran tanta precisión.

Influencia de la precisión de los planos en el cálculo de la altura del agua y el área de inundación

Para determinar la influencia que ejerce la pérdida de precisión de los planos en el cálculo de la altura del agua y del área de inundación, se tomó como patrón de comparación el TIN construido con los puntos tomados en el terreno y, como consecuencia, se obtuvieron los valores de elevación de la lámina de agua con respecto al nivel medio del mar y al fondo del río, los perfiles de la altura del agua y los gráficos de las zonas inundadas en cada plano. Con estos valores se calcularon las desigualdades al emplear la cartografía vectorial de curvas de nivel para representar el terreno (Figuras 14 y 15).

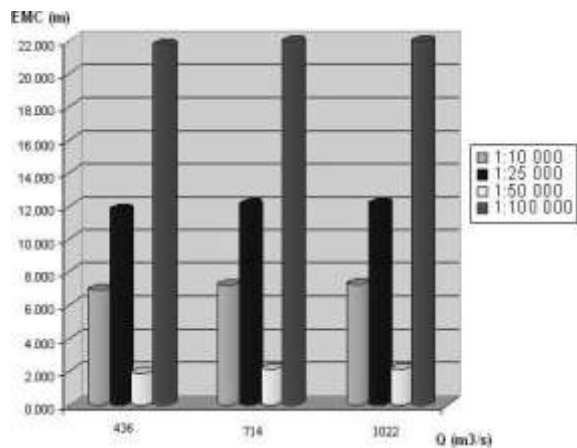


Figura 14. Error Medio Cuadrático (m) en la determinación de la altura del agua con respecto al nivel medio del Mar.

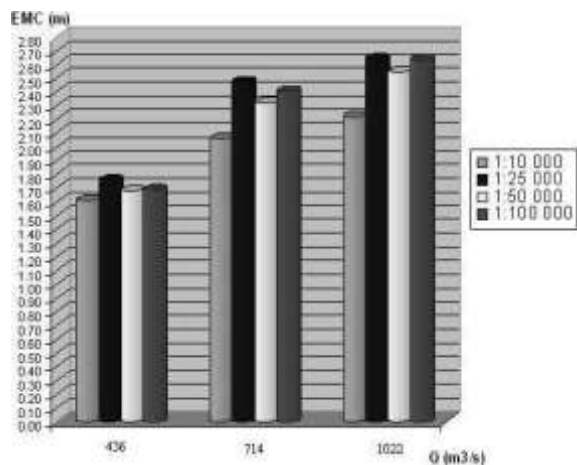


Figura 15. Error Medio Cuadrático (m) en la determinación de la altura del agua con respecto al fondo del río.

Como puede observarse, al recurrir al MDT del plano 1:10000 se alcanzó un EMC de 6.96 m en la altura de la lámina de agua con respecto al nivel medio del mar. Este se incrementa considerablemente a medida que se trabaja con planos de menor escala hasta obtener un valor máximo de 22.1 m con el empleo del plano 1:100000. Una vez más esta tendencia no se manifestó al utilizar el cartográfico 1:50000, pues se obtuvo un EMC igual a 2.18 m, resultado que los autores consideran inconcebible puesto que es menor al alcanzado con el empleo del plano 1:10000, lo cual puede deberse a los errores cometidos en la construcción del plano 1:50000 como se explicó anteriormente.

Por otro lado, si se analiza el error en la altura que alcanza el agua sin tener en cuenta el que introduce la cota del terreno se llega a resultados muy interesantes, pues aproximadamente se introduce el mismo error a pesar de utilizarse planos diferentes, pues se obtuvieron diferencias que oscilan entre 1.6 y 2.6 m; lo que revela que cuando se trabaje con uno de estos planos se estará introduciendo, como promedio, dichos errores en la simulación y por tanto, se puede afirmar que sus resultados dependen en gran medida de la cartografía de partida con que se modela el terreno. No obstante, es necesario resaltar que la menor diferencia obtenida se produjo, como en las demás ocasiones, al emplear el cartográfico 1:10000.

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. Como resultado del cálculo del área de inundación se puede apreciar que a medida que disminuye la precisión del MDT ocurre un aumento significativo del área inundada debido a que con la disminución de la escala del plano aumenta el ancho del cauce. Es por esta razón que la menor área inundada se obtuvo al utilizar el levantamiento con GPS y Estación Total y la mayor al emplear el plano 1:100000 como se muestra en la Tabla 4.

Tabla 4. Área de inundación (Km²) para caudales con probabilidades al 20, 5 y 1%.

Q (m ³ /s)	Cartografía				
	GPS	10 000	25 000	50 000	100 000
436	0.039	0.056	0.098	0.087	0.269
714	0.048	0.065	0.109	0.100	0.277
1022	0.053	0.070	0.116	0.108	0.283

Finalmente, con el objetivo de hallar el error que se comete en el cálculo del área inundada al utilizar cualquiera de los planos provenientes de la cartografía vectorial de curvas de nivel, se tomó como muestra un total de 467 puntos. De esta manera se procedió a establecer una comparación entre las zonas inundadas calculadas con el empleo del TIN construido a partir del levantamiento con GPS y Estación Total con las obtenidas a partir del empleo de los planos 1:10000, 1:25000, 1:50000 y 1:100000.

Una vez más se pone de manifiesto que el 1:10000 es el más adecuado de todos (1:25000, 1:50000 y 1:100000) para representar el terreno, pues con su uso la diferencia del área inundada con respecto al valor real fue la menor, se alcanzó un valor de 0.016 Km², mientras que con la utilización de las restantes cartografías, incluyendo el 1:50000, estas desigualdades aumentaron considerablemente hasta llegar a un valor máximo de 0.230 Km², en el caso del MDT menos preciso (Figura 16).

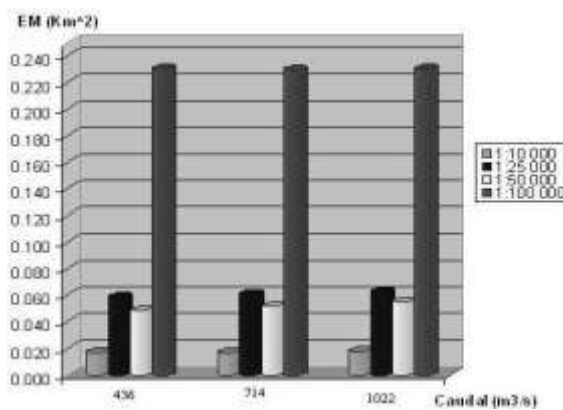


Figura 16. Error Medio (Km²) en el cálculo del área de inundación.

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 1:10000, 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 sólo es de 642 m. Por otro lado es importante aclarar que este tramo presenta una topografía muy abrupta, aspecto que favorece el aumento de las diferencias debido a que en este tipo de planos el cauce y las llanuras de inundación quedan apenas representados en profundidad y extensión, y por tanto, el agua ocupa desproporcionadamente más espacio de la llanura de inundación como se puede apreciar en las Figuras 7, 8, 9, 10 y 11.

CONCLUSIONES

Se calculó la diferencia existente entre los valores de altura de cada uno de los obtenidos a partir de los planos: 1:10000, 1:25000, 1:50000 y 1:100000, y el levantamiento hecho con GPS y Estación Total. Se obtuvo un EMC de 5.46 m cuando se empleó el 1:10000. 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 1:100000. Esta tendencia no se evidenció con el 1:50000 pues se alcanzó el menor EMC (2.88 m).

La tendencia a que el EMC aumente con la disminución de la escala no se evidencia con el uso del plano 1:50000. Esto se debe a que la curva de nivel más próxima al río tiene valor de altura menor a la encontrada en planos con mayor precisión como el 1:10000 y 1:25000, lo que puede estar dado por un error cometido en la construcción de dicha cartografía y/o de cambios en la topografía de la zona con el paso del tiempo, todo lo cual influye de manera significativa en los resultados mostrados, al alcanzarse errores inferiores a los que podrían esperarse con el uso de ese plano.

Los resultados de la modelación hidráulica dependen en gran medida de la cartografía de partida con que se modela el terreno, pues se ha obtenido un EMC de 6.96 m en la determinación de la altura de la lámina de agua con respecto al nivel medio del mar al recurrir al modelo cartográfico 1:10000, el cual se incrementa a 7.29 m al aumentar el caudal en la simulación. Por otro lado se evidencia que dicho error aumentó considerablemente cuando se trabajó con los planos de menor escala, hasta llegar a un EMC máximo de 22.1 m con el uso del 1:100000. Una vez más esta tendencia no se manifestó con el uso del 1:50000 al alcanzar un valor de 2.16 m.

Al analizar el error en la altura que alcanza el agua sin tener en cuenta el que introduce la cota del terreno, se evidencia que aproximadamente se produce el mismo error en la simulación a pesar de utilizarse planos diferentes, pues se alcanzaron valores que oscilan entre 1.6 y 2.6 m de diferencia, lo que revela que cuando se trabaje con uno de estos planos se estará introduciendo, como promedio, dichos errores en la simulación.

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 TIN a menores escalas, 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 Km² al utilizar el modelo cartográfico 1:10000 mientras que con las cartografías elaboradas a partir de escalas más pequeñas, estas desigualdades aumentaron considerablemente hasta llegar a un valor máximo de 0.21 Km² en el caso del 1:100000.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Bates, P.B., Anderson, D.A., Price, D.A., Hardy, R.J., Smith, C.N. 1996. Análisis and Development of Hydraulic Models for Floodplain Flows. En: Anderson, D.A., Walling, D.E. and Bates, P.B. eds. Floodplain Processes, John Wiley & Sons Ltd.
- Bates, P.B., y De Roo, A.P.J. 2000. A simple raster-based model for flood inundation simulation. *Journal of Hydrology*, 236, pp.54-77.
- Brunner, G. 2008. HEC-RAS, River Analysis System. Hydraulic reference manual. Versión 4.0, EE.UU. 411pp.
- Cárdenas, A. 2000. Aplicación de Sistemas de Información Geográfica para el modelamiento de zonas con riesgo de inundación. Caso Estudio Río Lurin. Inédito (13 páginas).
- Carrasco, S., Pérez, R., Sánchez, M. 2004. Inundaciones en Jimaní, Río Soliette. Diagnóstico del Problema. Inédito (103 páginas).
- Casa, A.; Benito, G. et al. 2005. Efectos de las Fuentes Cartográficas en los resultados de la modelación hidráulica de crecidas. Inédito (12 páginas).
- Chavarri, E. A. 2004. Modelos matemáticos en hidrología. Tesis de Maestría en Recursos Hídricos, Escuela de Postgrado, Universidad Nacional Agraria La Molina.
- Chow, V. T. 2004. Hidráulica de los canales abiertos. Editorial Nomos S. A. Santafé de Bogotá, Colombia.
- Cruz, E. y otros 2005. Inundaciones Fluviales. Mapas de Amenazas. Recomendaciones Técnicas para su elaboración, Managua, Nicaragua. Inédito (71 páginas).
- Etxeberria, P., Brazaola, A., Edeso, J. M. 2002.: Cartografía de peligro de inundación mediante Sistemas de Información Geográfica y modelos Hidrológicos e Hidráulicos, Santander, España. Inédito (9 páginas).
- Etxeberria, P. 2004. Metodología para la creación de cartografía de peligros naturales en Gipuzkoa. Aplicación al valle de Oiartzun. Tesis doctoral, Universidad del País Vasco.

- Fernández, R., Geler, T. 2004. Modelo Digital de Elevación de la Zona Emergida del Ecosistema Sabana Camagüey, Cuba, /s.e/ (14 páginas).
- Felicísimo, A. 1994. Modelos Digitales de Terreno. Introducción y aplicación en las ciencias ambientales. U. Oriente, Santiago de Cuba.
- Hardy, R.J., Bates, P.D. y Anderson, M.G. 1999. The importance of spatial resolution in hydraulic models for floodplain environments. *Journal of Hydrology*, 216, pp. 124-136.
- Horritt, M.S. 2000. Development of physically based meshes for two-dimensional models of meandering channel flow. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 47, pp. 2019-2037.
- Horritt, M.S., Bates, P.D. 2001. Effects of spatial resolution on a raster based model of flood flow. *Journal of Hydrology*, 253, pp. 239-249.
- León A y Estopiñan A 1989. Hidráulica de Canales. Editorial Pueblo y Educación. Cuba.
- León A. 2000. Hidráulica de las conducciones libres. Editorial Pueblo y Educación. Cuba.
- Marks, K., Bates, P. 2000. Integration of high resolution topographic data with floodplain flow models. *Hydrological Processes*, 14, pp. 2109-2122.
- Olaya, V. 2004. Hidrología Computacional y Modelos Digitales de Terreno. Edición 0.95. licencia Creative Common Attribution Share-alike. Madrid.
- Oleagordia, I., Rodríguez, R., Navarro, J., Del Castillo, V. 2001. Estudio Hidrológico del Río Arlanzón a su paso por el Término Municipal de Burgos. Inédito (9 páginas).
- Oleagordia, I., Rodríguez, R., Navarro, J. 2005. Estudio Hidrológico del río Arlanzón a su paso por el Término Municipal de Burgos. Inédito (9 páginas).
- Omer, C.R., Nelson, E.J. y Zundel, A.K. 2003. Impact of varied data resolution on Hydraulic Modeling and Floodplain Delineation. *Journal of the American Water Resources Association*, pp. 467-475.
- Rodríguez, E. A., González, R. A. 2008. Propuesta metodológica para la generación de mapas de inundación y clasificación de zonas de amenaza. Caso de estudio en la parte baja del río Las Ceibas. Inédito (25 páginas).
- Treviño, A., Ortiz, S. 2004. Metodología para la modelación distribuida de la Escorrentía Superficial y la delimitación de zonas inundables en ramblas y ríos-rambla mediterráneos. Inédito (18 páginas).
- Weber, J. F. 2003. Modelación integrada uni y bidimensional de flujo en planicies de inundación. Maestría en Ciencias de la Ingeniería – Mención en Recursos Hídricos, Universidad Nacional de Córdoba, Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales.
- Werner, M.G.F. 2001. Impact of grid size in GIS based flood extent mapping using a 1D flow model. *Phys.Chem.Earth (B)*, Vol. 26, No 7-8, pp.517-522.

Artículo recibido el 05/2010 y aprobado para su publicación el 09/2010.