

Visualización de zonas de desborde usando HEC-GeoRAS. Microcuenca del río la Pedregosa, estado Mérida-Venezuela

*Visualization of overflow areas using HEC-GeoRAS.
Pedregosa river microbasin, Mérida State-Venezuela*

Quiñones Esneira¹ y Dal Pozzo Francesco²

Recibido: febrero 2011 / Aceptado: noviembre 2011

Resumen

Se determinaron zonas de desborde con la interface HEC-GeoRAS y un modelo de elevación digital (MED) construido a partir de curvas de nivel con equidistancia de 5 y 20 metros. En la simulación hidráulica se consideraron 20 secciones transversales transitando un caudal simulado de 206,05 m³/s. Con el análisis y la visualización de las zonas de desborde se estimó la posible afectación de 26 ha (25%) de las áreas residenciales. Debido a la imposibilidad de disponer con información detallada, para la construcción del MED y a la ausencia de datos meteorológicos e hidrológicos, la aplicación de la interface se realizó con la información mínima necesaria. Sin embargo, las zonas de desborde simuladas muestran una alta coincidencia espacial con las zonas afectadas en el año 2001, ofreciendo una orientación sobre los posibles daños ante futuros eventos.

Palabras clave: Zonas de desborde; HEC-RAS; HEC-GeoRAS; río la Pedregosa.

Abstract

Overflow areas were determined on the HEC-GeoRAS interface, using a Digital Elevation Model (DEM) built from 5 and 20-meter equidistant contour lines. On the hydraulic simulation 20 transverse sections were considered on a simulated flow of 206,05 m³/s. Analysis and visualization of the overflow areas allowed to estimate a possible 26 ha (25%) of urban areas affected. Since accurate and detailed information were not available for the construction of DEM, and meteorological and hydrologic data were absent, the interface was built with the minimum required information. Nonetheless, the simulated overflow areas showed a high space coincidence with the areas affected back in 2001, offering a valuable orientation for future events.

Key words: Overflow areas; HEC-RAS; HEC-GeoRAS; la Pedregosa River.

1 Universidad de Los Andes, CIDIAT. Mérida-Venezuela. Correo electrónico: info@dalpozzo.com

2 Universidad de Los Andes, Facultad de Ciencias Forestales y Ambientales, Instituto de Geografía y Conservación de Recursos Naturales. Mérida-Venezuela. Correo electrónico: qesneira@ula.ve

1. Introducción

El reporte N° 01-0276 del USGS (Schuster y Highland, 2001) señala que en Venezuela se tiene conocimiento de deslizamientos ocurridos en la costa norte del país en los años, 1693, 1789, 1798, 1804, 1808, 1812, 1890, 1892, 1902, 1912, 1914, 1927, 1933, 1945, 1946, 1951, 1956, 1962, 1963 y 1987 (este reporte se publicó antes de la tragedia de Vargas en 1999). Sólo para la década de 1970, se registraron trece de estos eventos.

Aun cuando se tiene el conocimiento histórico sobre el riesgo que existe por deslizamientos e inundaciones en la costa central, en Venezuela se vivieron tragedias muy recientes en esa región, específicamente

en los estados Aragua (1987), Vargas (1999) y, en los Andes venezolanos, en el estado Mérida (2005); la ubicación relativa de estas regiones se presenta en la figura 1.

Si bien es cierto que los desastres más graves a nivel nacional se han presentado en la región centro-norte del país; también es cierto que el riesgo de deslizamientos es alto en la zona andina en cuya geografía predominan pendientes abruptas y conos aluviales producidos por cauces torrenciales. Los deslizamientos en las cuencas de alta montaña del estado Mérida ocurren como consecuencia de las crecidas de ríos y torrentes. Los mismos están asociados a las lluvias y licuefacción de las nevadas que caen en las altas montañas. Son



Figura 1. Ubicación relativa de los eventos ocurridos en los estados Vargas y Mérida

fenómenos recurrentes cuya sucesión y magnitud está asociada a la probabilidad de ocurrencia de la precipitación, a los movimientos de masa, socavación de cauces y represamientos de caudales por taponamiento de piedras y troncos, lo cual no está comprendido totalmente, e introduce un factor grande de incertidumbre en su análisis (Hernández y Valbuena, 2004).

En Mérida, estado andino de Venezuela, sólo en la última década han ocurrido dos desastres por inundación particularmente graves. El primero, tuvo lugar en la población de Pueblo Llano, en junio de 2003, cuando las quebradas la Sucia, el Chimborazo y el río Santo Domingo aumentaron su caudal y devastaron los sectores de La Primavera y otros poblados (Diario Frontera, 2003). Las cifras oficiales, a 3 días de haber ocurrido la tragedia, reflejaban un total de 41 personas desaparecidas, 3 muertos y pérdida total de 5 viviendas. No se tienen cifras oficiales de pérdidas económicas.

El segundo desastre por inundación ocurrió entre los días 7 al 13 de febrero de 2005, en la zona del valle de Mocotíes. En ese período se concentraron lluvias intensas, las cuales presentaron un pico pronunciado (no existe registro instrumental del suceso) que duró entre 4 y 5 horas de actividad continua el día 11/02/05 en horas de la noche. Como resultado de estas lluvias varios de los afluentes más importantes del río Mocotíes, como la quebrada San Francisco, la Batallera, la Mejía y otros, aumentaron notablemente sus caudales y, por ende, el del río Mocotíes, generando graves daños

a la infraestructura urbana y ocasionando incluso pérdidas humanas. Las cifras reportadas el 20 de febrero de 2005 por el Cuerpo de Bomberos del Estado Mérida indican 48 muertos y 1.208 damnificados (Laffaille, 2005).

El fenómeno torrencial ha adquirido gran importancia en las zonas montañosas, especialmente en zonas con tendencia hacia el crecimiento urbano acelerado. El área de estudio seleccionada en esta investigación se corresponde con la microcuenca la Pedregosa, con un comportamiento típicamente torrencial, que ha servido como área de expansión urbana de la ciudad de Mérida.

Los días 30 y 31 de octubre de 2001 se suscitaron en el río la Pedregosa dos crecidas torrencales tipo *debris flow*, que acarrearón volúmenes considerables de caudal líquido y sólido; esto generó el desborde del cauce e inundación de los sectores aledaños. El informe de emergencia sobre la crecida del río la Pedregosa, elaborado por el Ministerio del Poder Popular para el Ambiente (MPPA, 2001) señala lo siguiente:

“Del análisis de la precipitación registrada en la estación Santa Rosa, ubicada al noreste de la microcuenca, se tiene que el promedio de precipitación mensual para el mes de octubre en el período 1955-1972 es de 245 mm. En el año 2001 se registró un total de precipitación, para ese mismo mes de 427 mm, superando en 75% el promedio anteriormente señalado. La mayor parte de esta precipitación se produjo entre el 6 y 8 de octubre, causando la saturación de la microcuenca y provocando que las

lluvias sucesivas originaran escorrentía. Esto unido al incremento del caudal base del río, dejó preparado el terreno para que los posteriores eventos de precipitación provocaran las situaciones de emergencia presentadas durante los días 30 y 31 del mismo mes”.

Se estima que la segunda crecida ocurrida el 31 de octubre superó los $100\text{m}^3/\text{s}$ en el puente la Mata, si se considera el caudal líquido más el caudal sólido. El material sólido proviene básicamente de procesos erosivos del mismo cauce con socavación lateral y de fondo (MPPA, 2001).

Históricamente se tiene conocimiento que en esta misma microcuenca han ocurrido crecidas de diferente magnitud en los años 1978, 1984 y 1993, pero no se dispone de información específica sobre los daños ocasionados.

En los últimos años, el avance en el campo de la computación ha revolucionado el enfoque y las técnicas de estudio de la hidrología. Estos avances han permitido no sólo optimizar cálculos en función del tiempo, sino también en la precisión de los resultados obtenidos. Con la incorporación de tecnologías de medición de la precipitación a través de radares, se ha llegado a realizar simulaciones casi a tiempo real sobre los procesos precipitación-escorrentía. La incorporación de tecnologías de Sistemas de Información Geográfica (SIG) y Sensores Remotos (SR) ha permitido el desarrollo vertiginoso de la aplicación de modelos distribuidos en estudios hidrológicos, los cuales tradicionalmente se realizaban bajo el enfoque de modelos agregados.

El objetivo fundamental de esta investigación es realizar un estudio hidrológico/hidráulico que permita visualizar la zona de desborde ocasionada por un evento extremo en la microcuenca del río la Pedregosa, en Mérida, estado Mérida, aplicando una metodología que incorpora las nuevas herramientas digitales, con la aplicación de modelos distribuidos, y que ofrecen resultados en áreas con escasa información climatológica e hidrológica.

Las limitaciones más importantes de esta investigación radican por una parte, en la imposibilidad de disponer de información con alto detalle para la construcción del modelo de elevación digital (MED), lo cual afecta de manera determinante la simulación de las zonas de desborde y, la ausencia de datos climatológicos e hidrológicos en el área de estudio, lo que impide validar los resultados obtenidos. Por otra parte, los resultados suponen sólo la visualización de las zonas de desborde referentes al caudal líquido sin considerar la presencia del caudal sólido. A pesar de esto, se considera útil evaluar los resultados de la simulación con el fin de ofrecer un escenario virtual sobre los posibles daños ante futuros eventos.

2. Materiales y métodos

2.1 Características generales del área de estudio

La microcuenca del río la Pedregosa ocupa un área aproximada de 32.6 km^2 y es afluente de la subcuenca del río Alba-

rregas, el cual es uno de los principales afluentes de la cuenca del río Chama en el estado Mérida, Venezuela (Figura 2). El río nace en el páramo de Los Conejos; la cuenca de recepción se caracteriza por un cauce de régimen permanente que transita a través de valles estrechos con pendientes pronunciadas; a partir de la parte media el río escurre por un cono-terrazza de origen aluvial.

El área representa una microcuenca de montaña, típica de paisajes de páramo, con elevadas pendientes, aproximadamente 55% de pendiente media. Según el Plan de Ordenación y Reglamento de Uso de la Zona Protectora de la subcuenca del río Albarregas, el 74% del área de estudio pertenece al Parque Nacio-

nal Sierra La Culata, el 6% pertenece al área urbana y el 20% restante es un área con severas restricciones de uso (MPPA, 2001).

Geológicamente, el área presenta una variada litología. Se consiguen las formaciones Iglesias (Precámbrico), Palmarito (Carbonífero Paleozoico Superior), la Quinta (Triásico Jurásico) y Grupos del Terciario y Cuaternario (Peña, 1973).

Estructuralmente, la microcuenca presenta un intenso fallamiento y plegamiento de las diferentes formaciones litológicas que la conforman; fundamentalmente en la zona media, entre los 1.620 y los 1.800 msnm.

Una primera falla recorre longitudinalmente la microcuenca en dirección

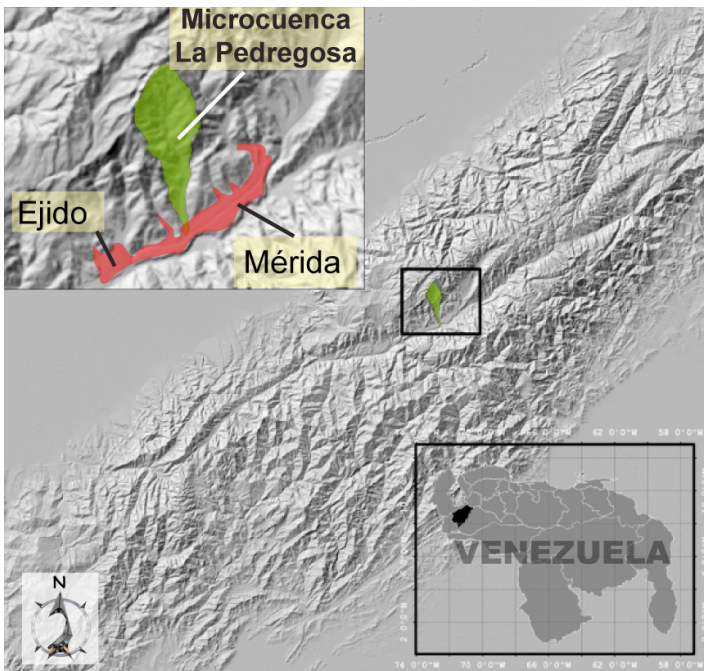


Figura 2. Ubicación relativa de la microcuenca del río la Pedregosa

Norte-Sur en su primer tramo y, posteriormente, en sentido Suroeste-Noreste; su longitud es de 3.5 km. La segunda falla tiene una dirección dominante Suroeste-Noreste con una longitud de 3.53 km. La tercera falla se consigue a una altitud de 1.750 msnm, con una dirección Suroeste-Noreste y cubre 0.76 km de longitud hasta alcanzar una altitud de 2.070 msnm. La cuarta falla se localiza en la margen derecha del cauce principal, partiendo de la cota 1.620 msnm en sentido Este-Oeste hasta la cota 1.800 msnm, en donde se inclina en dirección Sur-Este hasta la cota 1.950 msnm.

Geomorfológicamente se diferencian dos unidades de paisaje, la unidad de vertiente y el lecho de deyección que constituye un cono terraza con exposición Sur. En el lecho de deyección los procesos de lavado de material y deposición del mismo han desaparecido casi por completo. La vega del río constituye la zona de inundación periódica y se consiguen frecuentes procesos de arrastre de material por socavación lateral y de fondo. Los suelos de las vertientes presentan un suelo poco desarrollado típicamente ácido, con textura franco arenosa a franco arcillosa, con bajo porcentaje de materia orgánica y clasificado como *Troporthents*, del orden entisol con epipedon ocrico. En el fondo de valle se tienen suelos *Humitropet* de mayor desarrollo del orden molisol, pH ácido, presencia de materia orgánica, textura franco arcillosa a franco arcillo arenosa (Arellano y Castañeda, 1965).

La temperatura promedio anual es de 16 °C y la precipitación promedio anual es de 1.398 mm (Infante, 2001).

De acuerdo a la interpretación de una imagen TERRA-ASTER, año 2004, en la cobertura y uso actual de la microcuenca predomina el bosque denso siempre verde, con un valor aproximado de 54%; el bosque ralo cubre un 17%; los afloramientos rocosos (páramo) un 15%; las zonas intervenidas 6%; el matorral 4%; las áreas residenciales 3% y los cuerpos de agua el 1%.

2.2 Equipos y programas utilizados

Se utilizó el programa ArcGis (ESRI, 2005), cuya licencia pertenece al Centro Interamericano de Desarrollo e Investigación Ambiental y Territorial (CIDIAT) y la interfase HEC-GeoRAS (US Army Corp. of Engineers, 2008), distribuida de manera gratuita por el Centro de Ingeniería Hidrológica de Estados Unidos.

2.3 Simulación hidrológica

La simulación hidrológica se realizó con el programa lluvia-escorrentía EVENTO (Duque, 1988), considerando la tormenta ocurrida en la cuenca del río Limón, estado Aragua, Venezuela, el 06/09/1987. En esta tormenta se registró una precipitación inusualmente alta de 172 mm en menos de 5 horas, los registros se encuentran disponibles a nivel horario para 10 estaciones climatológicas (Cuadro 1).

El modelo EVENTO conceptualiza a la cuenca hidrográfica como un sistema compuesto por segmentos de escurrimiento y segmentos de escorrentía. Los segmentos de escurrimiento o vertientes son aquellos en los cuales ocurre flujo

Cuadro 1. Tormenta ocurrida en el río Limón (06/09/1987)

Estación	Tiempo (horas)										Total (mm)
	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	
	Precipitación (mm)										
Topo El Guayabo	1,2	19,9	31,9	52,0	54,0	54,6	54,9	55,2	55,4		55,4
Gonzalito			1,1	31,5	45,4	47,1	47,2	47,4	47,5		47,5
Rancho Grande	13,1	70,1	93,0	126,9	171,5	178,5	181,7	181,8	181,9	182,1	182,1
Choroní Cabecera	6,9	30,9	51,3	88,1	100,0	103,3	103,7	103,8	103,9	104,0	104,0
Base Sucre				4,0	32,2	37,5	38,9	39,1	39,3	39,5	39,5
CENIAP				39,4	55,8	61,0	61,6	61,8	61,8	62,0	62,0
Santa Rita		1,6	2,6	3,2	6,3	10,2	30,0	33,1	38,0	38,8	38,8
Hda. El Manglar		0,1	0,2	2,7	3,6	7,3	9,8	14,5	14,9	15,3	15,3
Borburata	6,3	7,7	7,7	14,3	16,6						16,6
Guacara				0,1	4,5	10,7	13,5	14,6	14,8		14,8

Fuente: Ministerio del Ambiente y de los Recursos Naturales Renovables (MARNR, 1994)

en su superficie; es decir, interceptan la precipitación. Los segmentos de escoorrentía, o cauces principales, recogen el flujo proveniente de los segmentos de escurrimento. Cada uno de estos segmentos tiene parámetros hidrológicos uniformes tales como rugosidad, pendiente, impermeabilidad y sección.

El modelo lluvia-escoorrentía, se basa en la técnica del Número de Curva (CN) del Servicio de Conservación de Suelos, SCS, de Estados Unidos, y tiene dos componentes principales: el cálculo de la lluvia efectiva y el tránsito de los caudales.

A continuación se describen las ecuaciones básicas que rigen los dos componentes principales del modelo.

Lluvia efectiva

$$P_e = \frac{(P - 0.2S)^2}{P + 0.8S} \tag{1}$$

$$S = \frac{25400}{CN} - 254 \tag{2}$$

donde:

P_e es la precipitación efectiva, en mm; P es la precipitación media, en mm; S es la infiltración potencial, en mm; y CN es el número de curva, valor empírico tabulado por el SCS para diferentes combinaciones del complejo suelo-cobertura vegetal.

El tránsito de caudales se calcula a través del método cinemático simplificado, el cual se basa en las ecuaciones fundamentales del flujo: continuidad y cantidad de movimiento, cuando en esta última se desprecian los términos de inercia y presión, simplificándose el proceso de resolución mediante la combinación de las siguientes expresiones:

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q_L \tag{3}$$

$$Q = \frac{1}{n} S_o^{1/2} R^{2/3} A \quad (4)$$

donde:

A es el área mojada en la sección transversal; t es el tiempo; Q es el caudal instantáneo; x es la distancia horizontal, en el sentido del flujo; q_L es el caudal lateral; n es el coeficiente de rugosidad de Manning; S_o es la pendiente del fondo del canal; y R es el radio hidráulico en la sección transversal.

El modelo aplica las expresiones (1) y (2) para determinar la lluvia efectiva o escurrimiento directa de los segmentos de escurrimiento y calcula el caudal lateral, q_L , aplicando las expresiones (3) y (4), estando en este caso, la expresión (3) igualada a cero. Finalmente, aplica las expresiones (3) y (4) al segmento de escurrimiento, para determinar el hidrograma de crecida a la salida del sector de flujo.

Para efectos de la simulación hidrológica, la microcuenca del río la Pedregosa se conceptualizó en 2 segmentos de escurrimiento, vertientes, y 1 segmento de escurrimiento, cauce principal.

Para cada segmento de escurrimiento se estimó la superficie, longitud, pendiente media, número de curva (CN) y rugosidad n de Manning. El CN se calcula como un valor ponderado de acuerdo a los tipos de vegetación y uso de la tierra y a las unidades de suelo presentes en cada segmento (USDA-SCS, 1986). La información sobre cobertura y uso se obtuvo a partir de la imagen de satélite TERRA-ASTER, año 2004, utilizando la banda espectral VNIR. La información del tipo de suelo se obtuvo de Arellano y Castañeda (1965). La rugosidad n de

Manning para la vertiente se determina como un valor ponderado según los tipos de uso de la tierra. El cuadro 2 resume los parámetros de entrada al modelo tanto para los segmentos de escurrimiento como para el segmento de escurrimiento.

Cuadro 2. Parámetros de entrada al modelo EVENTO. Segmentos de escurrimiento y escurrimiento

Segmento	Área (km²)	Long. (m)	CN	N Manning	Pendiente (m/m)
101	22,02	760,16	64	0,61	0,25
102	10,57	1583,60	62	0,15	0,65
10	-	13.905	-	0,035	0,05

Fuente: Elaboración propia

2.4 Simulación hidráulica

La simulación hidráulica se realizó con el modelo *Hydrologic Engineering Center River Analysis System* (HEC-RAS). HEC-RAS (US Army Corp. of Engineers, 2008) es un modelo matemático hidrodinámico que calcula las alturas del nivel de agua, en función de caudales preestablecidos a régimen permanente o variable y las condiciones topográficas del cauce natural.

Se establecieron un total de 20 secciones transversales, cuyos datos geométricos se obtuvieron a través de la interfase HEC-GeoRAS, a partir de un modelo de elevación digital (MED), representado a través de una red de triángulos irregulares. El MED se elaboró combinando información topográfica vectorial de curvas de nivel con espaciamiento de 5 metros disponible en la carta N° ME5F_09, elaborada por el Instituto de Protección Civil y Administración de Desastres del

Estado Mérida, (INPRADEM, 1996) y curvas de nivel con equidistancia de 20 metros disponibles en las cartas a 5941 I SO, 5941 I NO y 5942 II SO, elaboradas por la Dirección de Cartografía Nacional (DCN, 1952); la figura 3 muestra la diferencia de detalle entre estas dos fuentes de información. Los valores de n de Manning se establecieron de acuerdo a observaciones hechas en campo, asumiendo cifras de 0.035 y 0.05 para el cauce y los bordes, respectivamente.

2.5 Simulación de zonas de desborde

HEC-GeoRAS es un conjunto de procedimientos, herramientas y utilidades para procesar datos a través de Sistemas de Información Geográfica (SIG) en el programa ArcGis, usando una interfase gráfica. Esta interfase permite la preparación de una serie de temas necesarios para realizar la simulación hidráulica en HEC-RAS. Los temas a ser creados incluyen el cauce principal (*stream centerline*), los

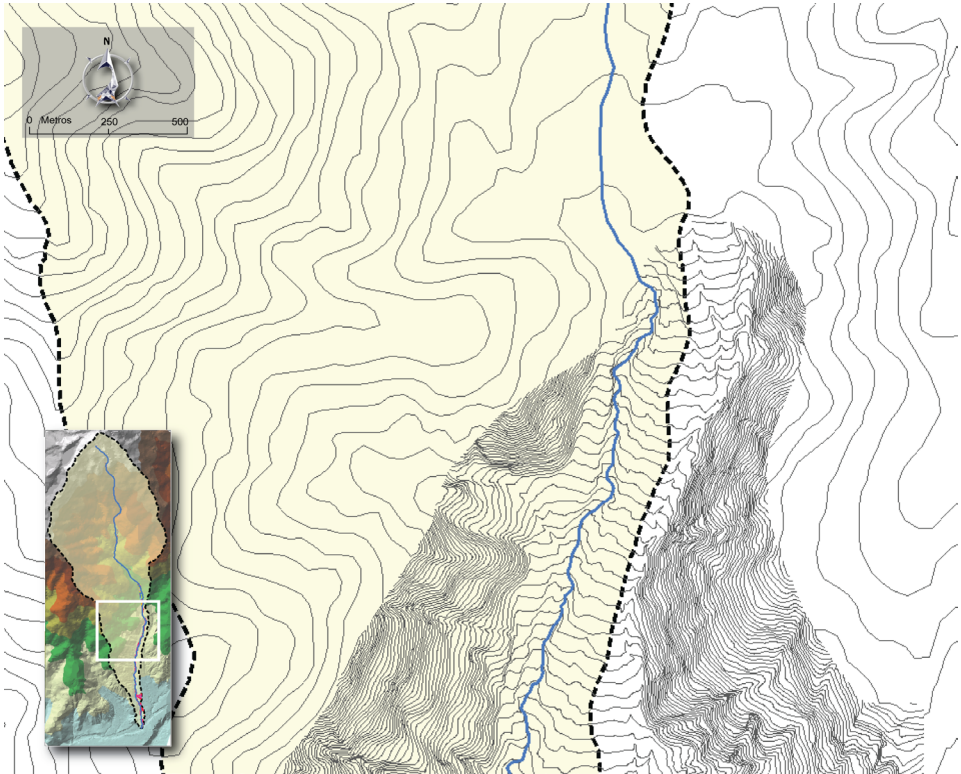


Figura 3. Curvas de nivel con equidistancia de 20 metros y curvas de nivel con equidistancia de 5 metros. Fuente. Elaboración propia a partir de carta N° ME5F_09 escala 1: 5.000, elaborada por el Instituto de Protección Civil y Administración de Desastres del Estado Mérida, (INPRADEM, 1996); y hojas a 5941 I SO, 5941 I NO y 5942 II SO, escala 1:25.000 elaboradas por la dirección de Cartografía Nacional (1952; 1952a)

caminos de flujo (*flowpath*), bancos del cauce principal (*main channel banks*) y las secciones transversales (*cross section cut lines*). Igualmente, la interfase permite crear y/o usar temas adicionales para extraer datos geométricos complementarios para ser importados hacia HEC-RAS, estos temas incluyen el uso de la tierra, las áreas no efectivas de flujo, localizadas por ejemplo, en secciones transversales que corten edificaciones y que por lo tanto, pueden ser representadas como áreas bloqueadas y de almacenamiento.

Las simulaciones realizadas en HEC-RAS pueden ser exportadas a través de un archivo de datos que contiene las superficies y velocidades del agua. Este archivo es procesado por HEC-GeoRAS para realizar análisis SIG de cartografía de planicies inundables, estimaciones de daños por inundación, restauración de ecosistemas, entre otras aplicaciones.

3. Resultados y discusión

3.1 Simulación hidrológica

En el cuadro 3 se presenta el caudal pico obtenido en la microcuenca del río la Pedregosa, considerando una tormenta como la ocurrida en la cuenca del río Limón en septiembre de 1987. A través de la simulación hidrológica se estimó un caudal pico de 206,05 m³/s lo cual representa un poco más del 200% del caudal estimado por la Sección de Hidrología del MPPA para la crecida ocurrida en el mes de octubre de 2001.

Cuadro 3. Resultados del modelo EVENTO: caudal pico, escorrentía y tiempo pico para el segmento de salida

Segmento	Caudal pico (m ³ /s)	Escorrentía (m ³ *10 ⁶)	Tiempo pico (min)
10	206,05	2,310988	312,453

3.2 Simulación hidráulica y visualización de zonas de desborde

La utilización de la interface HEC-GeoRAS, el MED del área de estudio y los niveles de agua generados por el programa HEC-RAS, permitieron la obtención y visualización de las zonas de desborde correspondiente a un caudal de régimen supercrítico ($NF > 1$); es decir, un flujo de alta velocidad propio de cauces de gran pendiente o ríos de montaña (Figura 4).

La figura 4 muestra la importante influencia que tiene el detalle del MED en la representación de los resultados obtenidos. En esta figura puede apreciarse como la zona de desborde generada sobre el MED, creado a partir de curvas de nivel con equidistancia de 20 m, no tiene una correcta correspondencia espacial con el lecho del río. Para efectos de esta investigación se desestimaron los resultados obtenidos en los tramos sujetos a esta condición. Esta característica se ve mejorada en la parte baja de la microcuenca, de la cual se dispone de un MED generado a partir de curvas de nivel con equidistancia de 5 m. La imagen utilizada para la ubicación relativa de estos dos sectores fue tomada de Google Earth en su versión libre.

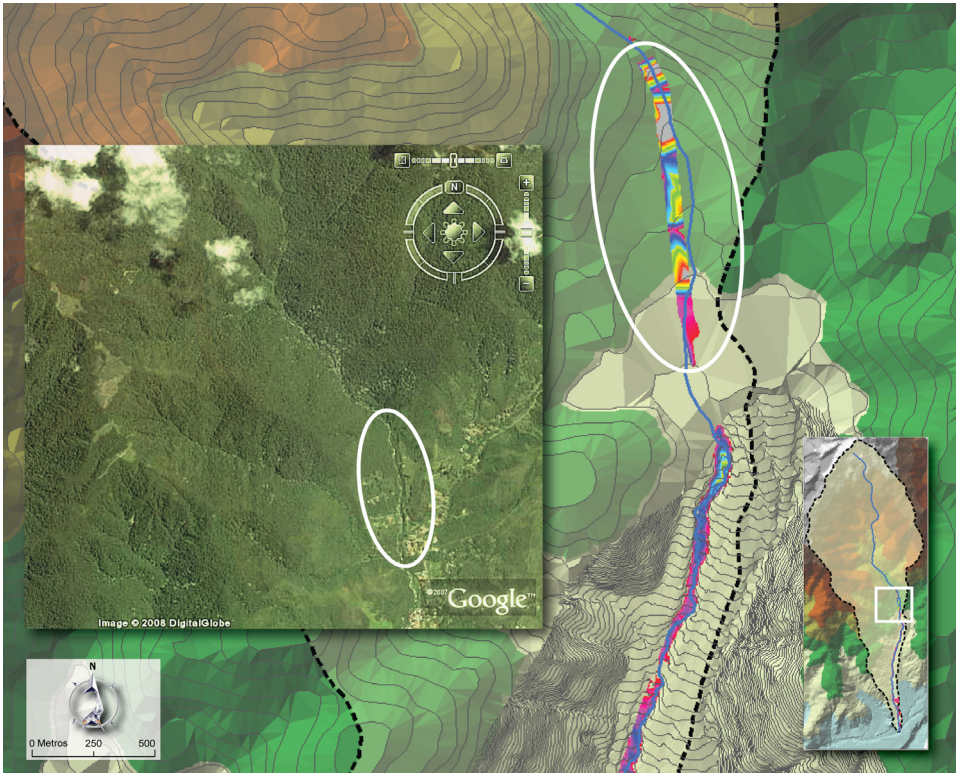


Figura 4. Desfase de las zonas de desborde en el MED con curvas de nivel cada 20 m

Al revisar las fuentes de información disponibles sobre desbordamientos en el río la Pedregosa, se encontraron noticias de lugares alcanzados por el agua que se corresponden espacialmente con las zonas de desborde simuladas por la interfase HEC-GeoRAS. Estos datos se han usado como contraste de los resultados del modelo, pues no se dispone de mediciones de las alturas alcanzadas por los eventos de desborde ni de los caudales generados por los mismos.

La figura 5 es particularmente significativa dado que muestra como las zonas de desborde, obtenidas en la simulación,

afectan áreas residenciales ubicadas en la parte baja de la microcuenca y con una alta tendencia al crecimiento urbano. Otras apreciaciones visuales de los posibles efectos de las zonas de desborde sobre el uso residencial, se observan en la figura 6, donde se ha utilizado como mapa de fondo el Orthophoto Digital N° ME5F_09 a escala 1:5.000; además, se destaca en esta figura, la correspondencia espacial entre las zonas de desborde simuladas y las afectadas durante el evento ocurrido en el año 2001.

Por otra parte, considerando la información sobre cobertura y uso prove-

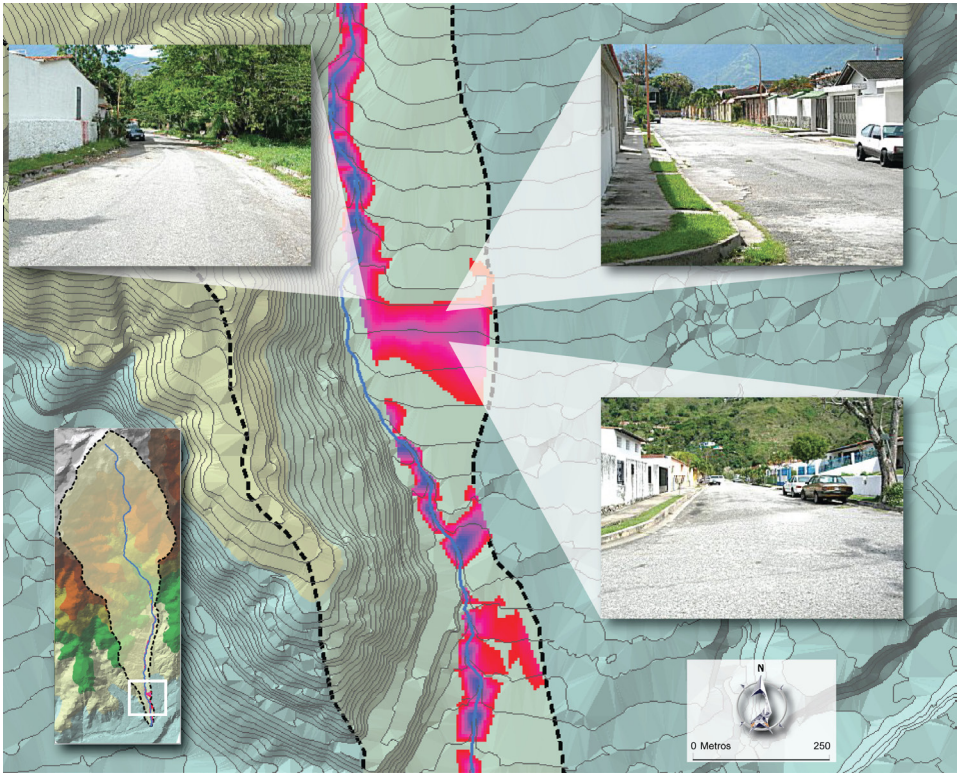


Figura 5. Zonas de desborde obtenidas en la simulación y áreas urbanizadas potencialmente afectadas

niente de la interpretación de la imagen de satélite TERRA-ASTER, se analizó la incidencia y afectación de las zonas de desborde simuladas sobre diferentes coberturas y usos. Este análisis indica un total de afectación de 26,3 ha, distribuidas de la siguiente manera: 13,9 ha de afectación sobre zonas residenciales, lo cual representa el 25% de las zonas residenciales del área de estudio; 7,3 ha de zonas intervenidas, referidas fundamentalmente a vegetación secundaria ubicada a los márgenes del cauce; 2,7 ha de bosque ralo; 1,7 ha de matorrales; menores superficies de afectación se refieren a

cuerpos de agua y afloramientos rocosos, con 0,5 y 0,2 ha respectivamente.

4. Conclusiones

Los SIG proveen una poderosa herramienta en la visualización y procesamiento de fenómenos espaciales. En particular, la interface para SIG, HEC-GeoRAS, provee procedimientos, herramientas, y aplicaciones que permiten el desarrollo y análisis de modelos hidrológico / hidráulicos que no sólo son útiles para los ingenieros hidráulicos sino que



Figura 6. Correspondencia espacial entre las zonas de desborde obtenidas en la simulación y las áreas afectadas en el año 2001

pueden ser de gran ayuda en etapas tempranas de planificación y ordenamiento territorial a nivel urbano.

Donde el detalle del MED lo permite, y de manera preliminar, las zonas de desborde simuladas muestran una alta coincidencia espacial con las zonas afectadas en el año 2001, por lo que esta investigación puede ofrecer una orientación general sobre la posible afectación ante futuros eventos, o ser utilizados como indicadores espaciales de riesgo ante crecidas.

Los resultados obtenidos son producto de una simulación que tiene dos limi-

taciones fundamentales: la primera se refiere a la imposibilidad de disponer de información con alto detalle para la construcción del MED, lo cual afecta de manera determinante la simulación de las zonas de desborde. La segunda se refiere a la ausencia de datos climatológicos e hidrológicos en el área de estudio, lo que impide validar los resultados obtenidos.

En Venezuela, la escasez de información supone una limitación importante para la planificación y el ordenamiento territorial. Al no disponer de información topográfica a escala detalla, ni de información climatológica sobre eventos ex-

tremos estos planes pueden sustentarse en principio, en estudios realizados con información espacial a escala pequeña que ya se encuentra disponible de manera gratuita, por ejemplo, MED, imágenes de satélite, entre otros.

Finalmente, debe resaltarse la potencialidad y versatilidad de la interface Hec-GeoRAS para el análisis de cuencas de montaña en zonas tropicales con escasa información climatológica e hidrológica. Esta interface permite a usuarios de SIG tener una representación hidrológica / hidráulica del sistema bajo estudio, ayudando a solventar problemas de ingeniería y facilitando la comunicación entre los responsables políticos y los actores sociales que participan en la formulación de planes y proyectos a nivel local.

5. Referencias citadas

- ARELLANO, G. y J. CASTAÑEDA. 1965. *Estudio de reconocimientos de suelos de la cuenca del río la Pedregosa*. Facultad de Ciencias Forestales. Universidad de Los Andes. Mérida-Venezuela. Trabajo Especial de Grado, 99 p. (Inédito).
- DIRECCIÓN DE CARTOGRAFÍA NACIONAL. 1952. La Punta, *Ejido*. Caracas: Dirección de Cartografía Nacional. Hoja 5941 I SO. Escala 1:25.000, 70x56 cm.
- DIRECCIÓN DE CARTOGRAFÍA NACIONAL. 1952. *Mérida*. Dirección de Cartografía Nacional. Hoja 5941 I NO. Escala 1:25.000, 70x56 cm. Caracas-Venezuela.
- DIRECCIÓN DE CARTOGRAFÍA NACIONAL. 1952a. *Páramos: Los Conejos, Los Leones, La Culata*. Dirección de Cartografía Nacional. Hoja 5942 II SO. Escala 1:25.000, 70x56 cm. Caracas-Venezuela.
- DIARIO FRONTERA. 2003. *Tragedia en el páramo*. Prensa Gobernación, (Junio 4; P.A1).
- DUQUE, R. 1988. *Modelo EVENTO*. Centro Interamericano de Desarrollo e Investigación Ambiental y Territorial (CIDIAT). Universidad de Los Andes. Mérida-Venezuela.
- ESRI. 2005. *ArcGIS ArcView 9.1*. Caracas: ESRI-Venezuela. Usado: 2008-2009. Disponible en: http://www.esri.com/newsite/html/producto_arcgis_desktop.asp.
- HERNÁNDEZ, E. y J. VALBUENA. 2004. *Las amenazas naturales, los riesgos y la vulnerabilidad ambiental del poblamiento en el eje Chama-Mocoties*. Mérida-Venezuela.
- INFANTE, E. 2001. *Caracterización físico natural y calidad de agua de la cuenca la Pedregosa, estado Mérida*. Facultad de Ciencias Forestales. Universidad de Los Andes. Mérida-Venezuela. Trabajo Especial de Grado, 98 p. (Inédito).
- INSTITUTO DE PROTECCIÓN CIVIL Y ADMINISTRACIÓN DE DESASTRES DEL ESTADO MÉRIDA (INPRADEM). 1996. *Área metropolitana de Mérida*. Mérida: INPRADEM. Hoja Ortofotos del área metropolitana de Mérida, ME5E_09. Escala 1:5.000, 90x90 cm.
- INSTITUTO DE PROTECCIÓN CIVIL Y ADMINISTRACIÓN DE DESASTRES DEL ESTADO MÉRIDA (INPRADEM). 1996. *Área metropolitana de Mérida*. INPRADEM. Hoja Ortofotos del área metropolitana de Mérida, ME5F_09. Escala 1:5.000, 90x90 cm. Mérida-Venezuela.
- MINISTERIO DEL AMBIENTE Y DE LOS RECURSOS NATURALES RENOVABLES (MARNR). 1994. *MAESTRO. Programa informático de base de datos climatológica*.

- ca. (Usado: 14 noviembre 2003). Caracas-Venezuela.
- MINISTERIO DEL PODER POPULAR PARA EL AMBIENTE (MPPA). 2001. *Informe de emergencia crecida del río La Pedregosa*. Dirección Estatal Ambiental - Mérida. División de Cuencas Hidrográficas. 4. Mérida-Venezuela.
- LAFFAILLE, J. 2005. *La crecida del Río Mocotíes. ¿El río invadió las casas o las casas habían invadido al río? Boletín de la Sociedad Venezolana de Ecología*. Año 2 (3): 2-3.
- PEÑA, G. 1973. *Análisis hidrológico forestal de las cuencas del río la Pedregosa y quebrada la Resbalosa, estado Mérida*. Facultad de Ciencias Forestales. Universidad de Los Andes. Mérida-Venezuela. Trabajo Especial de Grado, 131 p. (Inédito).
- SCHUSTER, R. and L. HIGHLAND. 2001. *Socioeconomic and Environmental Impacts of Landslides in the western hemisphere*. Open-File Report 01-0276. U.S. Geological Survey, U.S.A. [On line] <http://pubs.usgs.gov/of/2001/ofr-01-0276/> Recuperado el 17 de septiembre de 2003.
- UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE - SOIL CONSERVATION SERVICE (USDA-SCS). 1986. *Urban Hydrology for Small Watersheds*. Technical Release 55. [On line] www.cpsc.org/reference/tr55.pdf Recuperado el 2 de octubre de 2003.
- UNITED STATES ARMY CORPS OF ENGINEERS. 2008. HEC-GeoRAS 4.1.1 for Arc GIS 9.1. Institute for Water Resources Hydrologic Engineering Center. California-U.S.A. Disponible en: <http://www.hec.usace.army.mil/software/hec-ras/hec-georas.html>.