

METODOLOGÍAS FOTOGRAMÉTRICAS E HIDROLÓGICAS PARA ESTIMAR LA AMENAZA Y VULNERABILIDAD DE INUNDACIÓN EN LA CUENCA DEL RÍO PURIRES, CARTAGO, COSTA RICA

Rafael Arce Mesén^{1*} rarce@cariari.ucr.ac.cr
Christian Birkel Dostal^{2*} Christian.birkel@hotmail.com
Denis Gerardo Durán Vargas^{3*} duranvar@yahoo.com
Marixsaud Samudio Araúz^{4*} marixsaud@yahoo.es

Fecha de recibido: 17 de agosto 2006 / Fecha de aceptación: 25 de setiembre 2006

Resumen

En el presente artículo, se describen los pasos seguidos para la implementación de un modelo hidráulico en un sector de la cuenca baja del río Purires, ubicado en Cartago, Costa Rica. Además del trabajo de campo para la recolección de datos, y la utilización del programa DVP para el proceso de fotogrametría y de fotointerpretación, se describen las metodologías utilizadas para la generación de datos de caudales en cuatro períodos de retorno (10, 20, 50 y 100 años; la utilización de otros programas como ArcView y HEC-GeoRAS, para la digitalización de elementos esenciales (río principal, secciones transversales, zonas inundables y otros), para la utilización del modelo hidráulico HEC-RAS y la confección de mapas de áreas de inundación. Se hace además, un análisis de los resultados que conducen a prevenir futuros problemas por inundaciones en la zona de estudio.

Palabras clave: Fotogrametría, HEC-RAS, Inundaciones, Llanura de inundación, Modelo hidráulico, Periodos de retorno, Río Purires, Vulnerabilidad

Abstract

This article presents the following implementation of the hydraulic model in HEC-RAS in a floodplain study of the low drainage basin of the river Purires, located in Cartago, Costa Rica. The authors describe the field work, the use of the DVP software for the photogrametric and photointerpretation process, the methodologies used for the generation of flow data in four return periods (10, 20, 50 y 100 years), the use of the ArcView extension HEC-GeoRAS to determine the main components of the fluvial system (stream, overbanks, transversal sections, floodplains, and others) to use the HEC-RAS hydraulic model, and the making of maps of floods areas. It also presents the analysis of the results visualized by flood area and risk mapping in order to prevent future problems in the study area.

Key words: Floods, Floodplain, HEC-RAS, Hydraulic model, Photogrametry, Purires River, Return periods, Vulnerability

1 * Escuela de Geografía, Universidad de Costa Rica.

4 * Escuela de Geografía, Universidad de Costa Rica.

3 * Liceo de Puriscal, Costa Rica.

4 * Egresada. Maestría en Geografía. Escuela de Geografía, Universidad de Costa Rica.

Introducción

La destrucción de la cobertura vegetal natural, para la creación de campos de cultivo y pastos, ha generado una serie de problemas ambientales en Costa Rica. Si a este factor se le agregan relieves con pendientes acusadas y precipitaciones abundantes, se crean las condiciones necesarias para que se presenten amenazas como inundaciones y deslizamientos. La desestabilización del medio natural contribuye a la alteración de los procesos hidrológicos naturales, y se aumenta así, la posibilidad de eventos catastróficos en las cuencas del país.

En la cuenca del río Purires se presentan estas condiciones. Ubicada en su mayoría en la provincia de Cartago e incluye unos pequeños sectores del cantón de Desamparados de la provincia de San José. Ésta es una cuenca muy montañosa, la cual ha sufrido mucha alteración por la acción humana. Esta circunstancia genera preocupación en cuanto a las condiciones que se puedan presentar en la zona ante situaciones de precipitaciones excesivamente abundantes, sobre todo, si se toma en cuenta que existen datos históricos referentes a inundaciones en el lugar.

Algunos autores han trabajado en esta zona. Carrillo y Carrillo (2005) estudiaron la inestabilidad de laderas en la cuenca; Solís, Murillo y Oreamuno (1993) trabajaron la modelación hidrológica e hidráulica en el río Purires; y Zúñiga (1993) investigó acerca de la estabilidad del río. Como un aporte más a los estudios llevados a cabo en la cuenca del río Purires, utilizando un modelo hidráulico, se planteó el desarrollo de una investigación acerca de la posible ocurrencia de inundaciones en la parte baja de la cuenca de este río y sus posibles consecuencias. Para tal efecto, se plantearon los siguientes objetivos:

Objetivo general

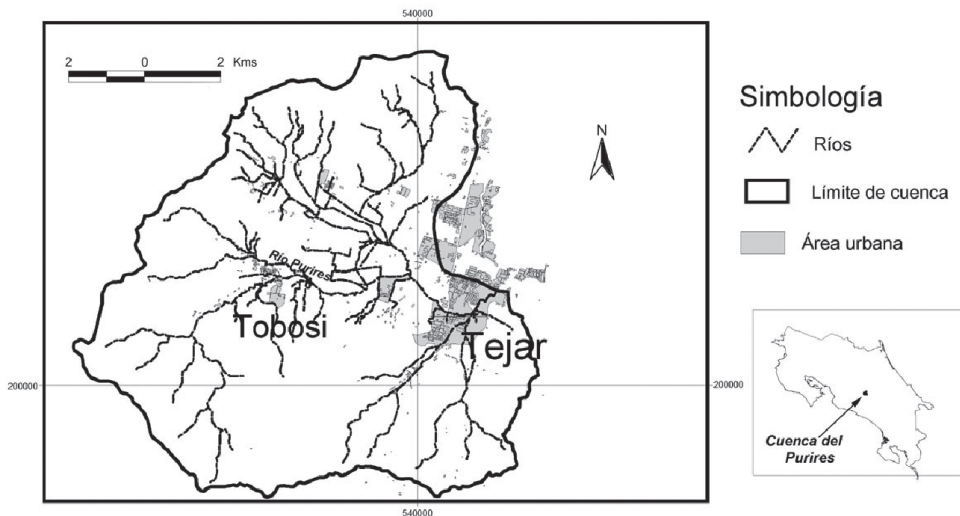
- a. Aplicar diferentes metodologías fotogramétricas e hidráulicas para estimar posibles inundaciones en un sector de la cuenca baja del río Purires.

Objetivos específicos.

- a. Generar un modelo topográfico de resolución fina para la zona baja de la cuenca del río Purires.

Figura 1.

Ubicación de la cuenca del río Purires.



- b. Estimar los caudales máximos del río Purires para eventos de máxima precipitación en periodos de retorno de 10, 20, 50 y 100 años.
- c. Utilizando el modelo hidráulico HEC-RAS, determinar los posibles efectos de eventos de máxima precipitación en la hidrodinámica del río Purires.
- d. Elaborar una cartografía con un mayor nivel de detalle en un mapa de amenazas de inundación en la cuenca baja del río Purires.

Este trabajo cobra importancia en cuanto puede brindar información que permita implantar acciones de alerta temprana, en caso de inundación, y puede servir de base a las instituciones involucradas en la prevención de desastres.

Área de estudio

La cuenca del río Purires se ubica al suroeste del Valle Central, su área aproximada es de 76.12 km², y se ubica entre las coordenadas Lambert 197000 – 209000 Norte y 532000 – 544000 Oeste (Figura 1). El río Purires nace en los cerros de Patio de Agua, cerca de la ciudad del Tejar del Guarco. Confluye con el río Reventado y da origen al río Aguacaliente, que a su vez desemboca en el

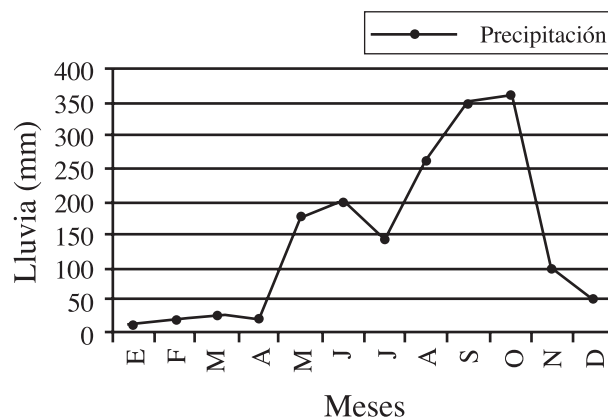
Reventazón. Los principales afluentes del Purires son el río Coris, y las quebradas Barahona, Lajas, Víbora, Cucaracha, Molejones y Cascajal (Carrillo y Carrillo, 2005).

Carrillo y Carrillo (2005) identificaron 9 unidades geomorfológicas que incluyen laderas y colinas denudacionales ubicadas sobre diferentes tipos de unidades geológicas, colinas y montañas, taludes de erosión, piedemonte, áreas de movimientos en masa (deslizamientos), llanura aluvial y terrazas.

El sector de la cuenca donde se realizó el trabajo corresponde a estas dos últimas unidades geomorfológicas. La llanura aluvial está compuesta por depósitos aluviales con topografía plana, y con pendientes suaves (menores a 8°). Las terrazas se ubican en ambas márgenes del río con una topografía casi horizontal o suavemente inclinada. Las pendientes más fuertes se encuentran en la cuenca alta, donde predominan los bosques, pastos y cultivos aislados. La cuenca baja, formada por el Valle del Guarco, tiene suaves pendientes con explotaciones agrícolas intensivas, entre ellas floricultura. Como producto de la destrucción de los bosques, para el establecimiento de pastos y cultivos, se han incrementado los procesos erosivos en la cuenca, ocasionando el aumento de los caudales máximos con el consecuente incremento en los problemas de inundaciones, socavación de cauces, erosión y sedimentación (Zúñiga, 1993).

Figura 2.

Promedios mensuales de precipitación para la estación Coris



(Fuente: Carrillo y Carrillo (2005))

En cuanto a la precipitación, la cuenca presenta un régimen de lluvias típico del Pacífico de Costa Rica, con una estación seca de diciembre a abril, y máximas de precipitación en los meses de setiembre y octubre. Sería en esos meses de máxima precipitación, donde se podrían presentar las inundaciones. En la figura 2 se representan los promedios mensuales de lluvia para la estación Coris.

Durante la época lluviosa (mayo a octubre), el promedio de temperatura varía entre 19.5 y 20°C. De noviembre a abril (época seca), las temperaturas promedio oscilan entre los 18 y 19°C (Carrillo y Carrillo, 2005).

El modelo hidráulico se aplicó solo a la zona "inundable", porque el presente trabajo fue un proyecto piloto con el fin de analizar la viabilidad de aplicar el modelo para toda la cuenca. Se seleccionó un sector de la parte baja, abarcando un área de 26.85 km², en el cual se incluye el poblado de Tobosi. No se pudo generar un hidrograma por medio de datos observados para el ingreso al modelo hidráulico, sino que se tuvo que estimar un hidrograma sintético.

Metodología

El proceso metodológico, utilizado para la realización de la investigación, se dividió en varias etapas, cada una de ellas (subdividida en fases) se detallan a continuación.

Delimitación del área de estudio

Análisis de cartografía existente y preparación de salida de campo.

La generación de datos y la aplicación del modelo hidráulico se hicieron para un sector de la cuenca baja del río Purires. Analizando los mapas existentes de la zona, se definió el recorrido para la salida de campo y 14 puntos de recolección de datos, distribuidos en el sector alto, medio y bajo de la cuenca.

Trabajo de campo

Recolección de datos en el terreno

Con la utilización de GPS se obtuvieron los datos de elevación y localización por latitud

y longitud para cada uno de los 14 puntos. Estos datos se utilizarían posteriormente en el proceso de la orientación absoluta de las fotografías aéreas.

Observación general de las características de la cuenca

Además de la recolección de datos puntuales, también se realizó una observación sistemática de las características propias de la cuenca, identificando usos de la tierra, tipos de cultivo, infraestructura, características de asentamientos, extensión y grado de alteración de la cobertura vegetal, geomorfología, procesos erosivos, topografía y morfología fluvial. En fases posteriores del proceso de investigación, se tomaron algunas decisiones con base en esas observaciones realizadas durante la salida de campo, como por ejemplo, la estimación de los valores de rugosidad de Manning. Los valores de rugosidad son coeficientes de resistencia al paso del flujo de agua en el cauce de un río.

Para la cuenca del río Purires, se utilizaron los coeficientes de Manning. Estos fueron determinados por Harry Barnes Jr. en un período de 15 años de investigación, el cual finalizó con el establecimiento de los coeficientes para 50 tipos de canales naturales, para los cuales tomo en cuenta el tamaño de las partículas que forman la superficie de contacto del lecho del río (Ruberto, Carreras, Depettris, 2003).

Procesamiento de datos para generar el modelo hidráulico

Fotogrametría y fotointerpretación utilizando Digital Video Plotter

Para realizar el proceso fotogramétrico, se utilizaron varios pares de fotografías aéreas de la Misión Carta 2003, escala 1:4000, las cuales incluían un sector de la cuenca y sirvieron de base para realizar los estereomodelos -utilizando el Digital Video Plotter (DVP)-. El Digital Video Plotter es un paquete de software de fotogrametría que esta compuesto por diferentes módulos. En este caso particular, sólo se utilizaron dos de

ellos: el stereo orientación y el de vectorización. El primero fue utilizado para llevar a cabo las tres etapas de orientación de las fotos aéreas, y el segundo para digitalizar o marcar en las fotos los puntos o vectores para realizar el modelo de elevación del terreno.

Se utilizó este software, porque permite levantar punto de elevación con mayor precisión, ya que el proceso se hace en un modelo tridimensional y se aprecia mejor el relieve. Además, las curvas de nivel que se necesitaban para estimar los caudales no pueden ser mayor de 5 metros, las hojas topográficas las presentan cada 20 metros, con el DVP se obtuvieron cada 2 metros, con un margen de error de +/- 1 metro. La rectificación de las fotos aéreas se realizó en varias etapas.

Etapas de orientación de las fotos aéreas

- a. La orientación interna que describe la geometría particular de cada una de la fotografías y permite relacionar las coordenadas foto (mm) con las coordenadas imagen (píxel).
- b. La orientación relativa que permite determinar la disposición angular relativa y el desplazamiento de posición entre fotografías consecutivas al momento en que fueron tomadas. Para ello, se usaron al menos seis puntos de liga por estereomodelo, y se resolvieron las ecuaciones de colinearidad para eliminar la paralaje "Y", optimizando la visualización del estereomodelo y permitiendo el uso de la paralaje "X" como expresión de las diferencias altitudinales.
- c. La orientación absoluta es necesaria, debido a que el estereomodelo, desarrollado mediante los pasos de orientación interna y relativa, no está a escala, no está orientado y suele estar inclinado. Para corregir esas distorsiones geométricas y hacerlo compatible con la cartografía existente, es necesario tomar puntos de control en el terreno levantados con GPS u otros procedimientos, y hacer luego una transformación tridimensional de las coordenadas.

Al finalizar este proceso de orientación, se obtuvo el estereomodelo, el cual sirvió de base para iniciar el proceso de vectorización y fotointerpretación de la llanura de inundación. Después de levantar una serie de puntos, con los cuales se creó una capa de vectores, se procedió a exportar la información a ArcView para crear el modelo digital de elevación. La vectorización se hizo para generar curvas de nivel cada 2 metros. Se estableció este parámetro, porque comúnmente, en los mapas a escalas 1:50000 o 1:25000, la parte baja de la cuenca ofrece muy pocos datos de altitud, y estos son necesarios para implementar un modelo hidráulico de inundación.

Generación de datos necesarios para la implementación del modelo hidráulico

Para correr el modelo hidráulico del Purires, se necesitaban datos de caudales máximos. Dado que se carecía de esa información, se utilizaron diferentes métodos para determinar los caudales máximos para periodos de retorno de 10, 20, 50 y 100 años. Villón (2004) define periodo de retorno como el intervalo de tiempo dentro del cual un evento de una magnitud determinada puede ser igualado o excedido por lo menos una vez en promedio. Se aplicaron cuatro métodos para definir caudales, a saber: regresión, Servicio de Conservación de Suelos (SCS), racional y MacMath. Estos métodos son descritos por autores como Birkel (sin publicar); Chow, Maidment, Mays (1994); Villón (2004); Ward, y Trimble (1995). De los datos que obtenidos, se seleccionaron aquellos que a criterio de los autores eran los más adecuados.

Método de regresión

Con el método de la regresión, se utilizaron parámetros ya definidos para 17 cuencas de Costa Rica con tamaños entre 70 y 4000 km², con base en los cuales, y utilizando ecuaciones regresivas, se puede calcular -para cualquier cuenca del país- los caudales máximos para los diferentes periodos de retorno (Birkel, 2005). Las ecuaciones son las siguientes:

T (10): $y = 0.517 x + 91.592$
 T (20): $y = 0.6703 x + 101.25$
 T (50): $y = 1.4734 x + 174.06$
 T (100): $y = 1.677 x + 203.57$

A = Área de la cuenca (km²)
 Para determinar el valor de la escorrentía (Q), se utilizó la fórmula:
 $Q = (N (P + 50,8) - 5080)^2 / N (N (P - 203,2) + 20320)$

Método del Servicio de Conservación de Suelos de los Estados Unidos (SCS)

Este método, descrito por Villón (2004), fue desarrollado por el Servicio de Conservación de Suelos de los Estados Unidos (SCS) y utiliza la siguiente ecuación:

$Q_{max} (m^3/s) = q * Q * A$
 donde: q = Gasto unitario (m³/s/mm/km²)
 Q = Escorrentía (mm)

Para determinar el gasto unitario (q), fue necesario definir el tiempo de concentración para la cuenca del Purires. Como no se contaba con datos observados, se utilizaron varios métodos sintéticos para conseguirlo. En el cuadro 1, se detallan las fórmulas utilizadas en cada método y los resultados obtenidos. El dato utilizado fue el adquirido con el método australiano, porque al promediar los tres datos obtenidos el resultado es muy similar al del método citado.

Cuadro 1.

Métodos utilizados para calcular el tiempo de concentración en la cuenca del río Purires

Método	Fórmula	Valor del tiempo de concentración (minutos)
Kirpich	$t_c = 0,0195 * (L3/H)^{0,389}$	55.8177
Australiano	$t_c = 58 * L/(A^{0,1} * S^{0,2})$	95.1593
SCS	$t_c = 0,02872 * L_{0,2} (1000/N-9)^{1,17}/S_{0,5}$	127.952

L = Máxima longitud de recorrido del río. (m)
 H = Diferencia de elevación del cauce principal. (m)
 A = Área. (ha)
 S = Pendiente promedio del cauce principal. (%)
 N = Número de curva.
 Con todos estos datos se aplicó la fórmula $Q_{max} = q * Q * A$.

donde: C = Coeficiente de escorrentía
 I = Intensidad máxima de lluvia (mm / h)
 A = Área (km²)

Método Racional

En este método se utiliza la siguiente ecuación:

$Q = (C * I * A) / 3.6$

Para determinar el valor de C, se debe tomar en cuenta la cobertura vegetal, la pendiente y el tipo de suelo. Para este caso, se utilizó la tabla de valores de coeficiente de escorrentía (Villón, 2004) y el valor asignado fue de 0.54. Para la intensidad máxima, se utilizó la fórmula descrita por Villón (2004) basándose en los parámetros establecidos para la zona de Cartago, Costa Rica.

$I_{max} = 156,892 - 28,4612 * \ln (t_c) + (42,2027 - 8,0731 * \ln (t_c)) * \ln (T)$

ln (tc) = Logaritmo del tiempo de concentración.

ln (T) = Logaritmo de cada periodo de retorno.

Los resultados de caudales con la fórmula del método racional se detallan en el cuadro 1.

Método MacMath

La fórmula utilizada en este método es la siguiente

$$Q = 0.0091 * C * I * A^{0.8} * S^{0.2}$$

C = Coeficiente de escorrentía
 I = Intensidad máxima de lluvia (mm / h)

A = Área (ha)

S = Pendiente promedio del cauce principal (%)

Los caudales obtenidos con este método se presentan en el cuadro 2.

Selección de valores de caudales

Con cada método se obtuvieron diferentes valores de caudales máximos para cada periodo de retorno. Fue necesario, por lo tanto, decidir cuáles de esos valores se utilizarían para la implementación del modelo hidráulico. En el cuadro 2, se presentan los resultados alcanzados por cada método y para cada periodo de retorno.

Cuadro 2.

Caudales máximos del río Purires para periodos de retorno de 10, 20, 50 y 100 años utilizando cuatro diferentes métodos.

Método	Período de retorno			
	10 años	20 años	50 años	100 años
Regresión	105.49	119.25	213.62	248.60
SCS	65.50	84.51	112.21	134.89
Racional	160.00	175.15	195.17	194.74
MacMath	201.20	220.25	245.43	264.47
Promedio	133.05	149.79	191.61	210.67

Se decidió tomar un promedio de los resultados de los cuatro métodos. Se hizo así, porque los datos conseguidos fueron muy variados en cada uno de los métodos, por lo que se consideró que la mejor manera de definir los caudales era haciendo un promedio entre ellos. En cuanto al margen de error, se determinó la desviación estándar para cada uno de los promedios de cada período de retorno, y este valor fue convertido en porcentaje. El porcentaje más alto fue de 38.86 por ciento para el periodo de 10 años. El más bajo fue de 24.12 por ciento para un periodo de retorno de 100 años (Cuadro 3).

Estos valores indican un margen de error aceptable para los resultados de los caudales máximos.

Generación de datos topográficos par el ingreso al modelo hidráulico

Con los vectores que se generaron en el levantamiento de terreno realizado con el DVP, se procedió a crear un modelo digital de elevación utilizando ArcView. Posteriormente, se creó un mapa de contornos. Se procedió a trabajar con HEC-GeoRAS. Esta es una extensión del programa ArcView diseñada para procesar datos geoespaciales que puedan ser utilizados en el Sistema de Análisis de Ríos del Centro de Ingeniería Hidrológica (HEC-RAS por sus siglas en inglés).

Con esta extensión se pueden crear archivos que contengan datos geométricos, a partir de

un modelo digital de elevación, los cuales pueden ser procesados en el HEC-RAS (Ackerman, 2002).

Utilizando como base el modelo digital de elevación, se delineó el cauce principal del río (stream), los límites de cauce (banks) y los

centros de masa en las llanuras de inundación (flowpaths). También se editaron las secciones transversales (xscutlines) que serían la base para correr el modelo hidráulico en la llanura de inundación. Finalmente, se generó un archivo de importación para utilizar en HEC-RAS.

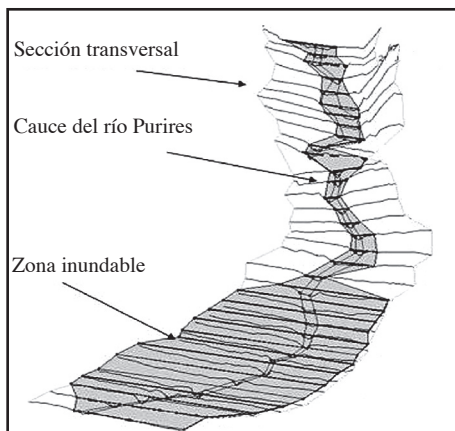
Cuadro 3.

Estimación del margen de error para los caudales máximos de cada periodo de retorno

Período de retorno	Caudal promedio	Desviación estándar	Porcentaje de error
10 años	133.05	51.71	38.86
20 años	149.79	51.97	34.69
50 años	191.61	49.24	25.69
100 años	210.67	50.82	24.12

Figura 3.

Áreas inundables definidas con la aplicación del HEC-RAS



Análisis del modelo HEC-RAS

Se utilizó el modelo HEC-RAS “River Analysis System” para procesar los datos importados de ArcView. Esta es una herramienta informática que permite el uso de diferentes programas para la modelación y análisis hidráulico, desarrollado por el Centro de Ingeniería Hidrológica

del Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los Estados Unidos (Brunner, 2002). Con el archivo de importación, creado en HEC-GeoRAS, se definieron perfiles de flujo y áreas de inundación para cada uno de los periodos de retorno seleccionados, y con base en los caudales máximos que se habían definido anteriormente (Figura 3). Con los datos obtenidos con el HEC-RAS, se creó un archivo de exportación para utilizar en ArcView y elaborar los mapas de inundación.

Análisis de la información

Confección de mapas

Con los datos exportados de HEC-RAS, se creó una capa de información para cada periodo de retorno, en la cual se identificaron las áreas inundables en la sección del río estudiada, con profundidades oscilantes entre los 0 y los 10 metros. Al sobreponer estas capas sobre la ortofoto del Valle del Guarco, se pudo realizar un análisis de las posibilidades de inundación y sus efectos en la parte baja de la cuenca del Purires. Tomando en cuenta que las mayores extensiones de área inundable corresponden al periodo de

retorno de 100 años, se utilizó esa información para generar un mapa de vulnerabilidad ante posibles inundaciones. También, se tomó en cuenta el hecho de que el margen de error para los caudales, correspondientes a este período de retorno, era el más bajo.

Este mapa se creó utilizando ArcView mediante la sobreposición y combinación de diferentes capas de información utilizando la extensión GeoProcessing. Primero, se combinaron las capas de uso de la tierra con la de áreas inundables, para obtener una nueva que incluía los niveles de inundación para cada zona de uso de la tierra en el área de estudio. El siguiente paso, fue definir niveles de vulnerabilidad de inundación tomando en cuenta la categoría de uso de la tierra y la profanidad de la capa de agua. En la zona de estudio se dan cinco categorías de uso de la tierra. Considerando que la vulnerabilidad es mayor para aquellas zonas donde puede haber mayores

efectos negativos para las actividades humanas, se le dio un valor numérico a cada categoría de uso, tal como se detalla a continuación: 5- Área urbana, 4- Cultivos permanentes, 3- Uso mixto (combina área urbana con algunos cultivos), 2- Pastos, 1- Charral y tacotal.

Los niveles de inundación varían de 0 a 10 metros de profundidad. Estos se agruparon en cuatro categorías, a cada una de las cuales se les dio un valor numérico de uno a cuatro, correspondiendo el valor mayor al nivel de profundidad que representa mayor vulnerabilidad para las actividades humanas. Sumando los valores de cada categoría de uso, con el respectivo nivel posible de inundación, se obtuvo una matriz numérica que permitió definir cuatro niveles de vulnerabilidad. En el cuadro 4 se resume esta información y se indican los valores para cada nivel de vulnerabilidad.

Cuadro 4.

Estimación de niveles de vulnerabilidad según categoría de uso y profundidad

Nivel de profundidad	Menos de 1 m (1)	De 1 a 2 (2)	De 3 a 4 (3)	De 5 a 10 (4)
Categoría de uso				
Área urbana (5)	6	7	8	9
Cultivo permanente (4)	5	6	7	8
Uso mixto (3)	4	5	6	7
Pastos (2)	3	4	5	6
Tacotal y charral (1)	2	3	4	5

Niveles de vulnerabilidad

- Baja 2 a 3 - Mayor 6 a 7
- Media 4 a 5 - Grave 8 a 9

Utilizando una vez más la extensión GeoProcessing de ArcView, se manejaron los datos definidos en la tabla anterior y se generó el mapa de vulnerabilidad.

Análisis de los datos

Posibles inundaciones

Como es de esperar, la mayor extensión de área inundable está en el sector bajo de la cuenca, donde la topografía es más plana. En cambio, en las partes montañosas, prácticamente, se incluye nada más el sector del lecho de inundación del

río. La extensión del área inundable en el sector bajo de la cuenca podría ser mayor. Pero como en este caso el modelo hidráulico se generó a partir de los datos obtenidos en el campo, se ve limitada el área a los sectores en los cuales se pudo obtener la información. De contar con más datos, se hubiera tenido un área más amplia cubierta por el agua.

Analizando las capas de información generadas para cada periodo de retorno, se nota que las variaciones en el área inundable son mínimas. Por ejemplo, hacia el oeste, en el sector donde la topografía es un poco más abrupta, se nota una pequeña variación en una curva hecha por el río, sobre todo al comparar la información correspondiente a los periodos de retorno de 10 y 100 años. En la zona plana, se observa, también, una pequeña ampliación del área inundable en el sector este.

Los cambios en el nivel de profundidad también son mínimos al comparar los cuatro periodos de retorno. Las mayores profundidades se encuentran en sectores de la parte baja, muy cercanos al lecho del río, cubriendo un área reducida que se amplía levemente para el periodo de retorno de 100 años. Esta condición tiene sentido en la medida en que a mayor periodo de retorno, mayor es el caudal del río ante eventos de precipitación extrema.

Resulta interesante observar como los niveles de profundidad que se alcanzarían en las áreas inundables serían muy altos. En las zonas cercanas al cauce, se puede llegar a tener una capa de agua de hasta nueve metros de profundidad, pero en la mayor parte del área cubierta por el agua, se alcanzarían profundidades de 1 metro al menos. Incluso los sectores de mayores pendientes de la zona de estudio quedarán cubiertos por un nivel de agua superior al metro. Considerando el error de 50 por ciento en la topografía, generada por medio de fotogrametría, y el error de 25 por ciento de la estimación de los caudales máximos para el periodo de retorno de 100 años, se puede asumir un intervalo de incertidumbre en las profundidades obtenidas por el modelo hidráulico HEC-RAS de casi dos metros. Una diferencia de dos metros puede empeorar o aliviar una inundación presente, pero la amenaza para toda la zona inundable se mantiene igual.

El área más propensa a inundaciones se encuentra en la parte baja de la zona de estudio, la cual corresponde a las áreas donde hay mayor

cantidad de población. Por lo tanto, se ha de esperar pérdidas cuantiosas en cuanto a infraestructura ante una inundación. Gran parte de la población de Tobosi quedaría bajo una capa de agua de al menos dos metros de profundidad. Casas, carreteras, puentes, alumbrado público, vehículos y campos de cultivo podrían ser destruidos por la fuerza de la corriente.

Ya anteriormente, se señaló que a lo largo de toda la extensión de la cuenca, el nivel de alteración de los recursos, como por ejemplo los bosques y el suelo, es bastante fuerte, y autores como Carrillo y Carrillo (2005) han identificado deslizamientos activos en la zona.

Se puede mencionar, también, que históricamente las cuencas de los ríos Purires y Coris han sido escenarios de inundaciones en épocas pasadas. De hecho, el antiguo emplazamiento de Cartago estuvo ubicado en la confluencia de ambos ríos, y después de varias inundaciones, la ciudad tuvo que ser trasladada a su ubicación actual. Por tal razón, a ese primer emplazamiento de Cartago se le ha llamado la "Ciudad del Lodo". (Meléndez, 1962; Xirinachs, 1964). Solís, Murillo y Oreamuno (1993) citan, además, que en el año 1988 como producto de los huracanes Gilbert y Juana, se dieron inundaciones productoras de pérdidas estimadas en 50 millones de colones.

Tomando en cuenta los niveles de alteración de la cuenca y los deslizamientos, que en ella se presenta, ante eventos de máxima precipitación podría presentarse un aporte bastante significativo de material lodoso que sería arrastrado por el río y se depositaría en las partes bajas de la cuenca donde se ubica el poblado de Tobosi.

Del análisis de los mapas de áreas inundables, se pueden señalar como aspectos fundamentales los enumerados a continuación:

1. La cuenca del río Purires es un área donde la amenaza de inundación es una realidad, y para el caso del área de estudio, el poblado de Tobosi es el que se encuentra en condiciones de mayor vulnerabilidad ante avenidas máximas del río.
2. Los niveles de profundidad, que alcanzaría la corriente de agua al salirse de su cauce en la zona baja del área de estudio, permiten pronosticar un evento catastrófico de gran magnitud.

3. Los registros históricos dan cuenta de inundaciones en la zona de confluencia entre el Purires y el Coris, las cuales destruyeron varias veces la primera ciudad de Cartago. Si esta situación se presentó en momentos en que el nivel de alteración de las laderas de la cuenca por acción humana era mínimo, las posibilidades de que una gran avenida se presente nuevamente son muy altas.
4. Las variaciones entre los diferentes periodos de retorno son mínimas en cuanto a extensión del área inundable y profundidad del agua.

Vulnerabilidad

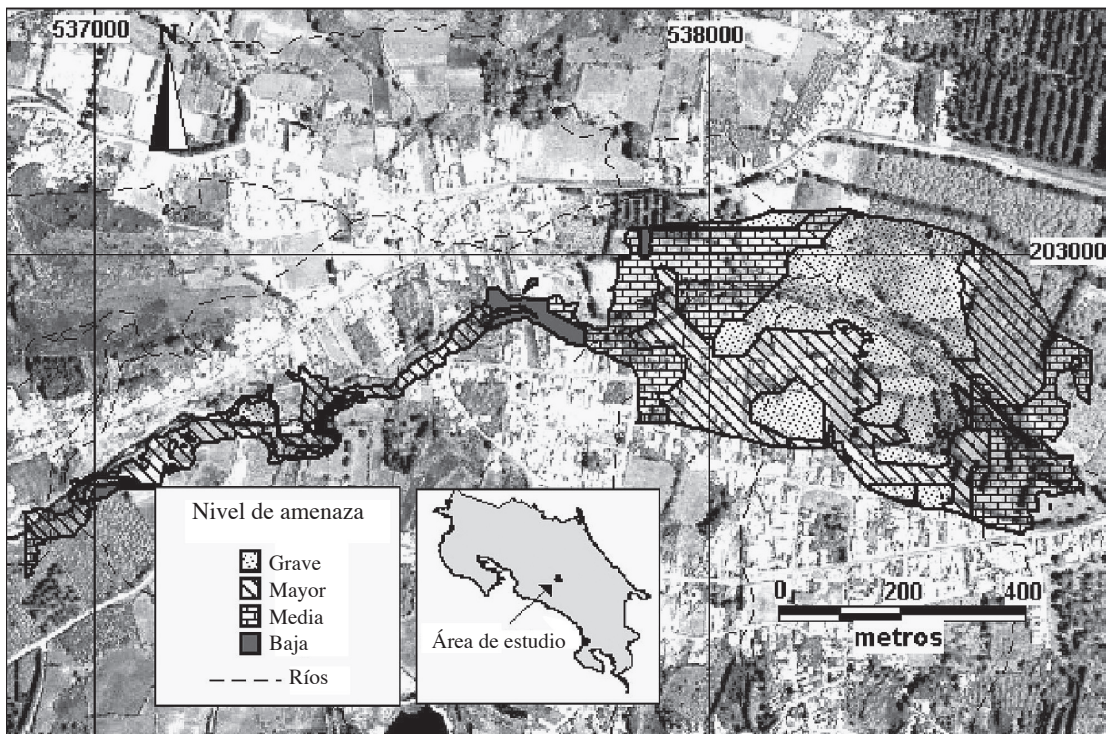
Bell, Sarmiento y Segura (2003) aportan unas breves definiciones de los conceptos de amenaza, vulnerabilidad y riesgo. Amenaza es el potencial de ocurrencia de un suceso de origen

natural o generado por la acción humana que puede manifestarse en un lugar específico con una intensidad y una duración determinadas. Vulnerabilidad es la condición de un sujeto, objeto o sistema expuesto a una amenaza, que corresponde a su disposición intrínseca a ser dañado. Riesgo se define como la probabilidad de exceder un valor específico de daños sociales, ambientales y económicos, en un lugar específico y durante un tiempo de exposición determinado. El riesgo se basa en la cuantificación del daño esperado ante la manifestación de una amenaza específica.

Para este caso, se definieron diferentes categorías de vulnerabilidad ante inundaciones para la parte baja de la cuenca del río Purires, las cuales se representan en la figura 4. Obsérvese que en la zona de estudio, los niveles de amenaza se ubican en su mayoría de “media” a “grave”. Las zonas que se verían afectadas comprenden principalmente las áreas urbanas y los cultivos permanentes ubicados en la zona.

Figura 4.

Niveles de Vulnerabilidad ante inundaciones en un sector de la cuenca baja del río Purires



Esta figura nos indica que amplios sectores de la llanura de inundación del Purires se ubican dentro de niveles de vulnerabilidad mayor y grave, correspondiendo principalmente a los terrenos ocupados por categorías de uso urbano, mixto y cultivos permanentes. El establecimiento de las actividades humanas, descritas en una zona donde la amenaza de inundación es elevada, los hace altamente vulnerables ante la presencia de avenidas máximas del río Purires. Queda de manifiesto la necesidad de implementar acciones tendientes a un manejo del riesgo en esta zona, pues claramente, se puede tener una idea de la magnitud de la destrucción que puede causar una avenida de las proporciones que en él se representa. Además de infraestructura como carreteras, puentes, viviendas, escuelas y otros, la destrucción también se extendería a zonas de cultivos, acabando con la fuente de sustento de muchos de los pobladores de la zona.

Conclusiones

El uso del HEC-RAS se puede convertir en una herramienta valiosa en el ámbito de la prevención de desastres. Tal como se demostró en la aplicación del modelo hidráulico para la cuenca del Purires, el programa permite utilizar información, de muy diversa índole, del área de estudio para crear un modelo que pone de manifiesto las serias amenazas presentes en esta cuenca, en cuanto a las inundaciones. La información que se puede obtener, a partir del uso del HEC-RAS, será valiosísima para la implementación de programas de prevención y mitigación de desastres en diversas cuencas del país.

Para el caso específico del Purires, se pudo generar un mapa de vulnerabilidad, el cual será una herramienta de planificación muy valiosa para instituciones como municipalidades, ministerios y otras entidades interesadas en los problemas de desastres en la zona. Con esta herramienta, se pueden diseñar rutas de evacuación e incluso se puede proponer la construcción de algún tipo de infraestructura que contribuya a reducir los efectos de una posible inundación, por ejemplo, diques.

También, sería interesante aplicar el modelo hidráulico a casos en que la precipitación no fue extrema, para analizar las posibilidades de inundación. Aunque es una herramienta muy útil,

en el caso del presente trabajo hubo muchas trabas por superar para llevar a cabo la investigación, las cuales de una u otra manera pudieron afectar la calidad de los resultados. Por ejemplo, la falta de datos hizo que se redujera considerablemente el área de trabajo.

Otro obstáculo fue la referente a los márgenes de error. Datos fundamentales para la implementación del modelo hidráulico, como son los caudales, hubo que generarlos a partir de la poca información disponible, y no se pudieron utilizar valores reales. Para generarlos, se utilizaron diversas fórmulas desarrolladas para ambientes diferentes al que hay en la cuenca del Purires. Se trató de disminuir un poco el margen de error haciendo un promedio entre todos los datos obtenidos.

También existe cierto margen de error en cuanto a la extensión de las áreas inundables. Esto, porque el modelo hidráulico las definió utilizando como base los datos topográficos que se generaron con la fotointerpretación. Pero hubo sectores donde no había suficiente información, por lo tanto, en las zonas más alejadas al cauce del río los datos topográficos no son del todo precisos. Esta particularidad de la información topográfica, también pudo influir en los valores finales que generó el modelo en cuanto a los niveles de profundidad.

Anteriormente, se mencionó la condición de proyecto piloto de la presente investigación. Los resultados obtenidos han sido valiosos, pues se han identificado aquellos aspectos que se pueden mejorar para una futura investigación extendida en toda el área de la cuenca del río Purires.

Bibliografía

- Ackerman, C. 2002. HEC-GeoRAS. User's manual. Version 3.1. Hydrologic Engineering Center. US Army Corps of Engineers. 142 p.
- Bell, P; J. Sarmiento, J y N. Segura. 2003. Gestión de riesgos. En Conferencia hemisférica para la reducción de riesgos: Contribución al seguimiento de la "Tercera Cumbre de las Américas". INTERNEM. San José, Costa Rica.

- Birkel, C. 2005. Manual del modelo HEC-RAS para la docencia. Universidad de Costa Rica. Escuela de Geografía. Sin publicar.
- Brunner, G. 2002. HEC-RAS, River Analysis System User's Manual. Version 3.1. Hydrologic Engineering Center. US Army Corps of Engineers. 442 p.
- Carrillo, S y M. Carrillo. 2005. Estudio de la amenaza de inestabilidad de laderas y desarrollo de un escenario preliminar de la afectación de la infraestructura vital. Microcuenca del río Purires, provincia de Cartago, Costa Rica. Tesis de Licenciatura. Universidad de Costa Rica. San Pedro de Montes de Oca. 148 p.
- Chow V; D. Maidment y L. Mays. 1994 Hidrología aplicada. McGraw-Hill, Santa Fé de Bogota, Colombia. 584 p.
- Meléndez, C. 1962. La Ciudad del Lodo: estudio acerca del primitivo asiento de la ciudad de Cartago en el Valle del Guarco. Departamento de Publicaciones de la Universidad de Costa Rica, San Pedro de Montes de Oca. 48 p.
- Ruberto, A.; J. Carreras; C. Depettris. 2003. Estudio exploratorio de la sensibilidad del coeficiente de rugosidad en un río de llanura. Departamento de Hidráulica, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional del Nordeste, Argentina, 4/06/06, <http://www1.unne.edu.ar/cyt/2003/comunicaciones/07-Tecnologicas/T-046.pdf#search=%22valores%20de%20rugosidad%20mannig%22>
- Solíís, H.; W. Murillo y R. Oreamuno. 1993. Modelación hidrológica e hidráulica para el control de inundaciones en Centroamérica: Casos río Purires y Turrialba. CATIE. Turrialba. 36 p.
- Villón, M. 2004. Hidrología. Editorial Tecnológica de Costa Rica, Cartago. 474 p.
- Xirinachs, M. 1964. Fundamentos que ubican "Ciudad del Lodo" junto a los ríos Coris y Purires. 2. ed. Complementada. Imprenta Nacional, San José, Costa Rica. 39 p.
- Ward, A; Trimble, S. 1995. Environmental hydrology. 2ª ed. Lewis Publishers, United States. 475 p.
- Zúñiga, J. 1993. Metodología para la determinación de la estabilidad de un río (caso del río Purires). Tesis de Licenciatura. Universidad de Costa Rica, San Pedro de Montes de Oca. 127 p.