

## Mapeo del peligro de inundación en ríos de montaña, caso de estudio del río Burgay

*Luis M. Timbe C., Edison P. Timbe C.*

Grupo de Ciencias de la Tierra y del Ambiente, Dirección de Investigación (DIUC), Universidad de Cuenca, Cuenca, Ecuador

Autor para correspondencia: luis.timbe@ucuenca.edu.ec

Fecha de recepción: 30 de junio 2012 - Fecha de aceptación: 27 de julio 2012

### RESUMEN

En este estudio se ha realizado la simulación de crecidas y el mapeo de inundaciones en un tramo de 10 km del río Burgay usando el modelo hidráulico unidimensional HEC-RAS. El análisis de los resultados muestra que el modelo es capaz de simular los eventos de crecidas e inundaciones en ríos de la región interandina, a pesar de la escasa información disponible. Los gobiernos locales (p.e. municipios) pueden utilizar los mapas de zonificación de peligro de inundación para realizar una planificación y manejo sustentable de las llanuras aluviales, mediante medidas estructurales y/o no-estructurales (p.e. ordenanzas de uso del suelo) que consideren las características físicas de los márgenes del río.

Palabras clave: Crecidas, manejo de planicies aluviales, mapas de inundación, peligro de inundación.

### ABSTRACT

HEC-RAS, an one-dimensional hydraulic model, was used to simulate and map floods along a 10 km stretch of the Burgay river. Analysis of the results reveals that the model is capable of simulating the flood and inundation situation along rivers in the Andean region, notwithstanding scarcity of information. Local governments (e.g. municipalities) can use the flood hazard zoning maps for the sustainable management of alluvial plains, through the planning and implementation of structural or non-structural measures (e.g. land use planning) considering the physical conditions of the riverbanks.

Keywords: Floods, floodplain management, inundation maps, flood hazard.

## 1. INTRODUCCIÓN

En las últimas décadas las inundaciones están recibiendo mayor atención, al ser uno de los fenómenos naturales más comunes y frecuentes, representando aproximadamente el 40% de todos los desastres naturales a nivel mundial y ocasionando alrededor de la mitad de todas las muertes por desastres naturales (Ohl y Tapsell, 2000; Di Baldassarre y *col.*, 2010; Di Baldassarre y Uhlenbrook, 2012). Igualmente, las pérdidas económicas ocasionadas por crecidas extraordinarias de ríos se han visto incrementados considerablemente en los últimos años (Douben, 2006; Mosquera-Machado y Ahmad, 2007; Cunha y *col.*, 2011; Erwann y Howard, 2011; Gilles y *col.*, 2012).

El incremento en el riesgo de inundación ha sido atribuido principalmente a las actividades humanas, nuevos asentamientos humanos que incluyen medidas de protección (p.e. diques) que son establecidos en las llanuras aluviales (Stoica y Iancu, 2010), incrementando los niveles aguas arriba y la velocidad de flujo aguas abajo. También aumenta la escorrentía debido a que cambia el uso del suelo en la cuenca de drenaje (p.e. incremento del área impermeable) (Fleming, 2002; Kron, 2002; Di Baldassarre y Uhlenbrook, 2012). Algunos estudios también sugieren que el cambio climático está

afectando las crecidas (Nott, 2006; Feyen y col., 2011; Simonsson y col., 2011). La variabilidad, intensidad y frecuencia de la lluvia puede haber aumentado debido al cambio climático como un impacto directo de los diferentes componentes del ciclo hidrológico (p.e. evaporación, escorrentía) (Robson, 2002; Fleming, 2002). En su investigación Robson (2002) no encontró tendencias en los registros de crecidas más largos en el Reino Unido. Sin embargo, existen tendencias en las series de crecidas recientes que podrían explicarse por la variabilidad climática. Por otro lado, las predicciones de incremento de la precipitación (y extremos) parecen posibles, y hay un vínculo observado entre lluvia e inundación.

Con el objetivo de prevenir, mitigar y disminuir los riesgos de inundación y sus consecuencias, organismos como la FEMA (Federal Emergency Management Agency) en los Estados Unidos, la FDEC (Flood Directive of the European Commission) en la Comunidad Europea, entre las más importantes, han establecido medidas y regulaciones a ser ejecutadas por los diferentes actores (a nivel local, regional y nacional) en la implementación de los planes de manejo del riesgo de inundación (Samuels y col., 2006; Smemoe y col., 2007; Apel y col., 2009; Heintz y col., 2012). Una de las principales regulaciones es la elaboración o actualización de mapas de las áreas propensas a inundaciones a lo largo de las planicies aluviales; estos mapas son obtenidos para eventos de crecidas con diferentes períodos de retorno. Con fines de diseño y de manejo de las planicies de inundación, el evento con un intervalo de recurrencia de 100 años es la norma reglamentaria de la FEMA, también conocido como inundación/crecida base (Haested Methods, 2007; Smemoe y col., 2007; FEMA, 2009; Bedient y col., 2012). Este evento se emplea en la delimitación del área que se supone será inundada, en promedio, al menos una vez cada 100 años; siendo esta información un componente clave en la aplicación de medidas no estructurales (manejo del suelo) o estructurales (manejo del agua) en las llanuras aluviales. En la actualidad, se promueve la adopción de medidas no estructurales (Pinter, 2005; Samuels y col., 2006; Sun y col., 2012), esta clase de medidas como indica Kundzewicz (2002) están de acuerdo con un “desarrollo sustentable, son más reversibles, comúnmente aceptable y amigable con el ambiente”. Lund (2012) presenta un listado bastante completo de varias opciones de medidas estructurales y no estructurales a las que llama medidas de *protección* y de *reducción de la vulnerabilidad* respectivamente; con una sub-clasificación en acciones preparatorias, de respuesta y recuperación. La construcción de diques, reservorios, trasvases, corredores de inundación, son algunos ejemplos de medidas de protección; mientras que las medidas de reducción de la vulnerabilidad pueden ser la zonificación de la planicie de inundación (ordenanzas/regulaciones), códigos de construcción, reubicación de actividades humanas en áreas vulnerables, seguro contra inundaciones, sistemas de evacuación y de alerta temprana contra inundaciones, entre otras. Lund (2012) también indica que un programa de manejo de inundaciones efectivo y rentable generalmente involucrará una combinación de estas dos clases de medidas, que sean apropiadas a las condiciones locales.

Este estudio presenta la evaluación del modelo hidráulico HEC-RAS con el objetivo de (a) simular eventos de crecida extremos en ríos de montaña con datos limitados, (b) realizar el mapeo de zonas susceptibles a inundaciones, y (c) mostrar la utilidad de estos resultados en el manejo más sustentable de las planicies de inundación.

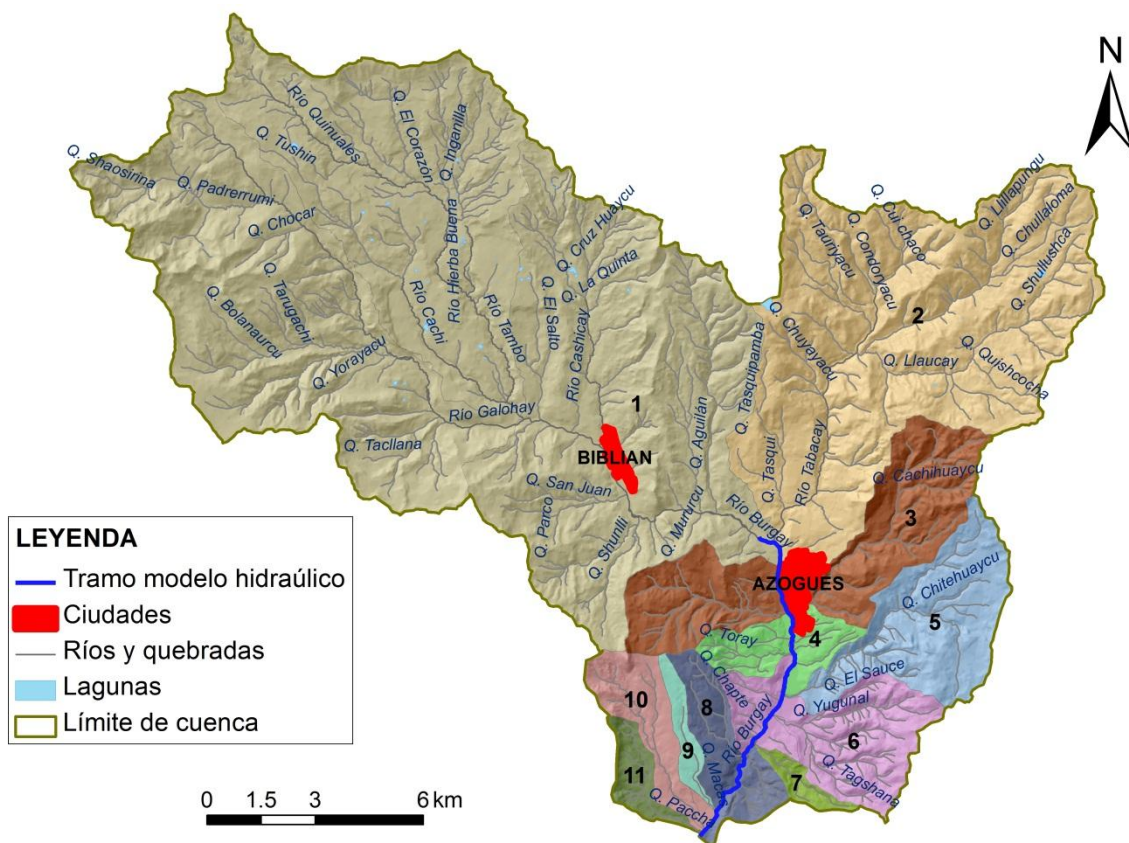
## 2. MATERIALES Y MÉTODOS

### 2.1. Área de estudio

La zona de estudio se encuentra ubicada en la subcuenca del río Burgay, con una superficie de 447 km<sup>2</sup>. La cuenca se caracteriza por tener un relieve montañoso, con un rango altitudinal que va desde los 2300 hasta los 4200 msnm y una pendiente media de 15,4%. La vegetación dominante corresponde a vegetación leñosa (23,9%), la cual se encuentra principalmente en la parte media de la cuenca; en la parte alta se tiene pastos (19,5%) y vegetación de páramo (13,9%); y en la parte baja de la cuenca se tiene predominio de eucalipto/matorral abierto (17%) y matorral intervenido (17%) (CG

Paute, 2008). Los principales núcleos de población se concentran en las ciudades de Azogues y Biblián (Fig. 1).

La Fig. 1 presenta la ubicación del tramo de estudio, el cual tiene una longitud aproximada de 10 km y una pendiente media del cauce de 1,31%, específicamente inicia 580 m aguas arriba del puente junto al mercado Sucre (738423, 9697983) hasta el sector del vivero del CREA (736760, 9689686). En la figura también se muestra las subcuencas (códigos 1 a 11) que drenan en el tramo evaluado. En la zona de estudio se dispone de un Modelo de Elevación Digital (MED) con una resolución de 20 m, mapa de cobertura/uso de suelo (CG Paute, 2008), y topografía a detalle 1:1000 del área urbana de la ciudad de Azogues en base a una aerofotogrametría aérea del año 2004 realizada por el IGM. Igualmente, se dispone de un estudio previo de caudales máximos (Estrella y Tobar, 1994).



**Figura 1.** Cuenca fluvial del río Burgay, tramo de estudio y subcuencas de drenaje.

## 2.2. Modelo hidráulico

En la modelación de inundaciones se puede utilizar diferentes metodologías, desde el uso de interpolación lineal (Apel y col., 2009) de registros de nivel en estaciones limnigráficas (0D) hasta el uso de modelos completamente hidrodinámicos unidimensionales (1D), bidimensionales (2D) e incluso tridimensionales (3D) (Pender y Néelz, 2007). La selección del modelo a utilizar depende de los requerimientos de información, las características del flujo, la escala y el tipo de aplicación específica. Hasta ahora los modelos 1D son los más usados, ya que tienen la ventaja de requerir poca información (secciones transversales, coeficiente de fricción), ser robustos y dar buenos resultados cuando el flujo ocurre alineado a lo largo del eje del cauce principal del río (Pender y Néelz, 2007; Vojinovic y col., 2011). En los últimos años los modelos 2D se están volviendo populares debido a la disponibilidad de mayor poder computacional e información (p.e. modelos de elevación digital basados en tecnología LiDAR) (Vojinovic y col., 2011). Sin embargo, los modelos 2D todavía se encuentran limitados a una escala mucho menor que los modelos 1D (Timbe y Willems, 2011), otras limitaciones de esta clase de modelos es la dificultad de incluir estructuras hidráulicas, mayores

tiempos computacionales y mayores requerimientos de datos (Cunha y *col.*, 2011; Pender y Néelz, 2007).

La simulación hidráulica del río Burgay se realizó con el sistema HEC-RAS (US-ACE, 2008), el cual permite realizar el cómputo de flujo estacionario y flujo no estacionario. HEC-RAS es un modelo 1D aceptado por la FEMA para realizar el análisis de crecidas y la determinación de las zonas inundables (FEMA, 2012), siendo uno de los modelos más usados a nivel mundial en este tipo de aplicaciones (Casas y *col.*, 2006; Mosquera-Machado y Ahmand, 2007; Smemoe y *col.*, 2007; Farahi, 2009; Stoica y Iancu, 2010; Gilles y *col.*, 2012). El componente de flujo estacionario permite calcular los perfiles de la lámina de agua de flujo gradualmente variado, el sistema puede manejar un tramo individual de un río o una red completa de canales. Este componente también permite modelar condiciones de flujo subcrítico, supercrítico y regímenes de flujo mixto. El procedimiento básico de cómputo está basado en la solución unidimensional de la ecuación de energía. La ecuación de momento se utiliza en situaciones cuando el perfil de la superficie del agua es rápidamente variado; estas situaciones incluyen cálculos de regímenes de flujo crítico (p.e. saltos hidráulicos), hidráulica de puentes, y la evaluación de perfiles en las *confluencias* de ríos. Los efectos de varios tipos de obstrucciones como puentes, drenajes de alcantarillado, vertederos, y otras estructuras en la planicie de inundación también pueden ser considerados en los cálculos. El sistema de flujo estacionario está diseñado para evaluar la ocupación/invasión del cauce de crecida y aplicar los resultados en el manejo de las planicies de inundación y en estudios de aseguramiento contra inundaciones.

Los perfiles de la lámina de agua de flujo estacionario son calculados mediante la solución de la ecuación de energía a través de un proceso iterativo llamado método de paso estándar (esquema implícito de Priessmann). La ecuación de energía se escribe como:

$$Z_2 + Y_2 + \frac{\alpha_2(V_2)^2}{2g} = Z_1 + Y_1 + \frac{\alpha_1(V_1)^2}{2g} + h_e$$

donde:  $Z_1, Z_2$ : elevación del fondo de la sección transversal con respecto a un nivel de referencia (m),  $Y_1, Y_2$ : calado del agua en las secciones (m),  $V_1, V_2$ : velocidad media (caudal total/área de flujo total) ( $m\ s^{-1}$ ),  $\alpha_1, \alpha_2$ : coeficientes de velocidad (-),  $g$ : gravedad ( $m\ s^{-2}$ ),  $h_e$ : pérdida de energía entre las dos secciones (m).

Los resultados del perfil superficial del agua obtenidos por HEC-RAS pueden ser procesados por HEC-GeoRAS (US-ACE, 2006), para obtener los mapas de inundación de los eventos analizados.

### 2.3. Implementación del modelo

El análisis hidráulico del tramo de estudio del río Burgay se ejecutó utilizando el modelo 1D HEC-RAS versión 4.0. Al ser un modelo 1D tiene la ventaja de requerir poca información, generalmente: (a) geometría del cauce, definida a través de perfiles transversales, (b) datos hidrométricos, y (c) coeficientes de rugosidad.

Previo a la implementación del modelo hidráulico se realizó el levantamiento de las secciones transversales del río. En total se levantaron 225 perfiles transversales a lo largo de los 10 km del río, con una separación entre secciones de 30 a 50 m en función de los cambios en (i) la sección del cauce o (ii) la dirección del eje del río. Las secciones transversales se levantaron aproximadamente perpendiculares al eje del río e incluyen el cauce principal y las llanuras de inundación, de tal manera que los niveles de crecida estén dentro de la sección levantada. También se realizó el levantamiento de las estructuras existentes a lo largo del cauce, desde el punto de vista hidráulico los más importantes son los puentes, ya que generalmente este tipo de estructuras producen una reducción de la sección hidráulica disponible para el flujo, ocasionando un incremento del nivel de la superficie del agua hacia aguas arriba. En total se levantaron 8 puentes y un azud, la mayoría de los puentes, 6 en total, se encuentran ubicados en la parte inicial del tramo, en el área urbana de la ciudad de Azogues.

Los coeficientes de rugosidad (Manning) se estimaron mediante inspección visual de cada una de las secciones y de las fotografías aéreas del año 2004, en función del tamaño de agregados del cauce y de la cobertura vegetal predominante en las márgenes (Chow, 1959). En el cauce principal se adoptó un coeficiente de Manning de 0,04 (gravas, piedras y algunos cantos rodados), mientras que en las

planicies de inundación se adoptaron valores de acuerdo al tipo/uso del suelo dominante, con valores desde 0,03 (suelo sin cobertura) a 0,15 (sauce denso).

La estimación de los caudales máximos de crecida se realizó empleando los resultados del estudio realizado por Estrella y Tobar (1994), que establecen caudales máximos para períodos de retorno de 10, 20 y 50 años en los puntos (1) Burgay en la confluencia con el Tomebamba y (2) Déleg en la confluencia con el Burgay. En la determinación de los caudales máximos, estos autores, utilizaron como base los datos de la estación Tomebamba en Monay, que tiene registros confiables de caudal durante el período 1964-1987. Con esta información se estimaron los caudales en el río Burgay antes de la junta con el Déleg, y posteriormente se calcularon los caudales de las 11 subcuencas de aporte a lo largo de la zona de estudio (ver Fig. 1). La Tabla 1 presenta los caudales máximos de crecida de las subcuencas de drenaje en el tramo de estudio para eventos de crecida con períodos de retorno de 5, 25, 50, 100 y 200 años. Como se puede observar, las cuencas Burgay alto y Tabacay en conjunto representan el 75,6% del área drenaje; el caudal de estas cuencas se incorporó en los puntos iniciales del modelo hidráulico; mientras que en el caso de los drenajes menores los caudales se ingresan en el modelo en los puntos medios de cada una de las subcuencas. Con estos caudales se realizó la modelación hidráulica de flujo estacionario en HEC-RAS y se determinó el nivel de la superficie del agua (nivel de inundación) de cada uno de los caudales de crecida.

**Tabla 1.** Caudales de crecida de las subcuencas de drenaje en el tramo de estudio ( $m^3 s^{-1}$ ).

Cuenca	Código	Área [ $km^2$ ]	Área [%]	Período de retorno [años]				
				5	25	50	100	200
Burgay alto	1	179,7	54,8	36,4	53,4	60,7	68,0	75,4
Tabacay	2	68,3	20,8	13,8	20,3	23,1	25,9	28,6
Drenajes menores	3-11	79,9	24,4	16,2	23,8	27,0	30,3	33,5
Total		327,9	100	66,4	97,5	110,8	124,2	137,5

### 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

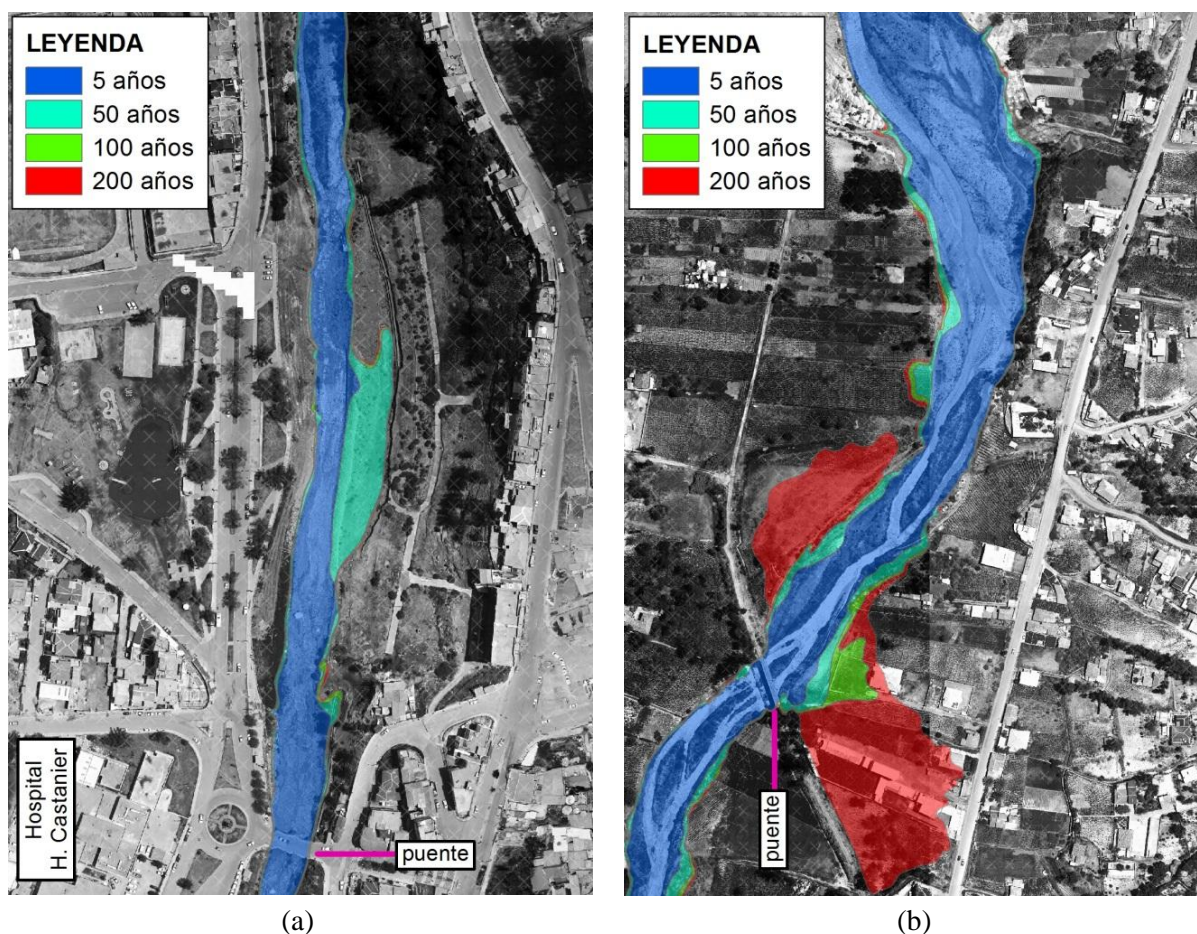
El modelo hidráulico del río Burgay implementado en HEC-RAS se utilizó en la simulación de eventos de crecida extremos (5, 25, 50, 100 y 200 años). Debido a la ausencia de estaciones limnigráficas o mapas históricos de inundación en el tramo modelado, no fue posible realizar una calibración tradicional (ajuste del coeficiente de Manning) del modelo hidráulico; por lo tanto, los resultados del mapeo de inundación fue validado en campo con información proporcionada por los habitantes del sector sobre la extensión aproximada de las inundaciones producidas en la última década. Los principales resultados del modelo son el nivel de inundación, profundidad de inundación máxima, velocidad del flujo y área del flujo. Los resultados de nivel de inundación y la topografía sirvieron para realizar el mapeo de inundación mediante un proceso de interpolación en HEC-GeoRAS y así obtener los mapas preliminares de peligro de inundación de cada uno de los eventos de crecida. La delimitación de las zonas inundadas fue ajustada empleando la topografía a detalle disponible (curvas de nivel cada metro), de esta forma se obtuvieron los mapas de inundación finales. A lo largo del tramo de estudio se puede distinguir tres zonas con características diferentes.

#### 3.1. Zona alta

Comprendida entre las abscisas 0+000 y 2+900, y corresponde a la zona urbana del tramo modelado. En esta zona el río posee cauces bien delimitados por márgenes profundas, la planicie de inundación natural de la margen derecha es inexistente debido a la presencia de rellenos. Estas características impiden la presencia de áreas inundables en eventos de grandes avenidas fluviales, y en contraposición ayudan al incremento de la velocidad del flujo en zonas en las cuales el ancho activo del río es estrecho. Las mayores velocidades del flujo, en este tramo, se registran entre el puente de



acceso al hospital Homero Castanier y el puente del mercado del Recinto Ferial, dichas velocidades superan los  $3,5 \text{ m s}^{-1}$  y  $4 \text{ m s}^{-1}$  para períodos de retorno de 5 y 200 años respectivamente. La magnitud de la velocidad del flujo es un factor importante en la erosión del lecho y la socavación de sus márgenes, lo cual representa un factor de riesgo para las estructuras ubicadas en las inmediaciones del río, como puentes, cuya densidad es importante en la zona urbana. La Fig. 2a presenta las características típicas de esta zona, vegetación escasa y pequeñas áreas de desbordamiento del cauce principal, las cuales ayudan a disipar la energía de flujos de crecientes mediante la reducción de la velocidad de flujo, por lo cual deberían ser preservadas de cualquier tipo de obstáculos, construcciones o rellenos. Esta figura también permite observar que existe una pequeña diferencia del área inundada entre el evento de 5 y 50 años, mientras que entre los eventos de 50, 100 y 200 años el área de inundación es prácticamente la misma; por las características topográficas de las planicies aluviales en esta zona.



**Figura 2.** Zonas de inundación del tramo aguas arriba del puente (a) Hospital Homero Castanier, (b) del ferrocarril (Charasol).

### 3.2. Zona media

Se ubica a continuación del puente Che Guevara hasta el sector del puente de Rumiurco, entre las abscisas 2+900 y 7+500 respectivamente. Las características predominantes en esta zona son las márgenes bajas, y áreas con llanuras aluviales más amplias en comparación a la zona alta. También se evidencian tramos con presencia de rellenos, y socavación de las márgenes y del cauce. La Fig. 2b presenta las características generales de las áreas susceptibles a inundación en esta zona. En la parte superior de la figura se puede observar una amplia zona inundable en la margen izquierda, en términos de superficie inundable no existe diferencia entre los eventos de crecida analizados debido a las características topográficas. Por otro lado, la presencia del puente de ferrocarril ubicado en la parte

inferior de la Fig. 2b nos permite evaluar y cuantificar el efecto de esta estructura en el riesgo de inundación. Generalmente, los puentes reducen la sección del flujo de agua, ocasionando el represamiento y el consiguiente incremento del nivel del agua hacia aguas arriba durante eventos extremos. Como se puede observar en la figura, en esta zona se incrementa considerablemente el área inundada para la crecida de 200 años en comparación al evento de 100 años. Igualmente se puede observar que un centro educativo se encuentra ubicado en esta área de alto riesgo. La zona media tiene un menor grado de urbanización en comparación a la zona alta, por lo tanto se debe evitar el establecimiento de nuevas viviendas o urbanizaciones en aquellas áreas identificadas con riesgo de inundación mediante una planificación apropiada del uso de suelo (p.e. ordenanzas). Como se ha indicado, el desbordamiento del río permite disipar la energía y por lo tanto su poder destructivo. Las velocidades máximas del flujo en este tramo raramente sobrepasan los  $3 \text{ m s}^{-1}$ , mientras que el flujo que desborda del cauce principal tiene una velocidad baja, generalmente menor a  $1 \text{ m s}^{-1}$ . La Fig. 2b muestra un cauce muy inestable, con la presencia de erosión en las márgenes, migración del cauce principal y la presencia de cauces entrelazados e islas. Es necesario estabilizar las márgenes mediante obras de bioingeniería que mejore las condiciones de la vegetación de ribera.

### 3.3. Zona baja

La zona baja, se ubica entre el puente de Rumiurco (7+500) hasta el sector de la granja del INIAP en Chuquipata (10+000). Esta zona posee márgenes altas, bien definidas y generalmente estables; por lo tanto, no se producen desbordes importantes del flujo del cauce principal. La Fig. 3 presenta los mapas de inundación típicos en esta zona, como se puede observar el flujo está confinado en el cauce principal del río, con una diferencia mínima del área inundada entre los cuatro eventos de crecida analizados. Esta zona presenta la que mejor cobertura de bosque y matorral de ribera, en consecuencia no se tiene problemas de erosión/socavación de las márgenes (a excepción de un lugar puntal de extracción de áridos). Se recomienda mantener las condiciones actuales y no permitir el establecimiento de viviendas o urbanizaciones junto a las márgenes.

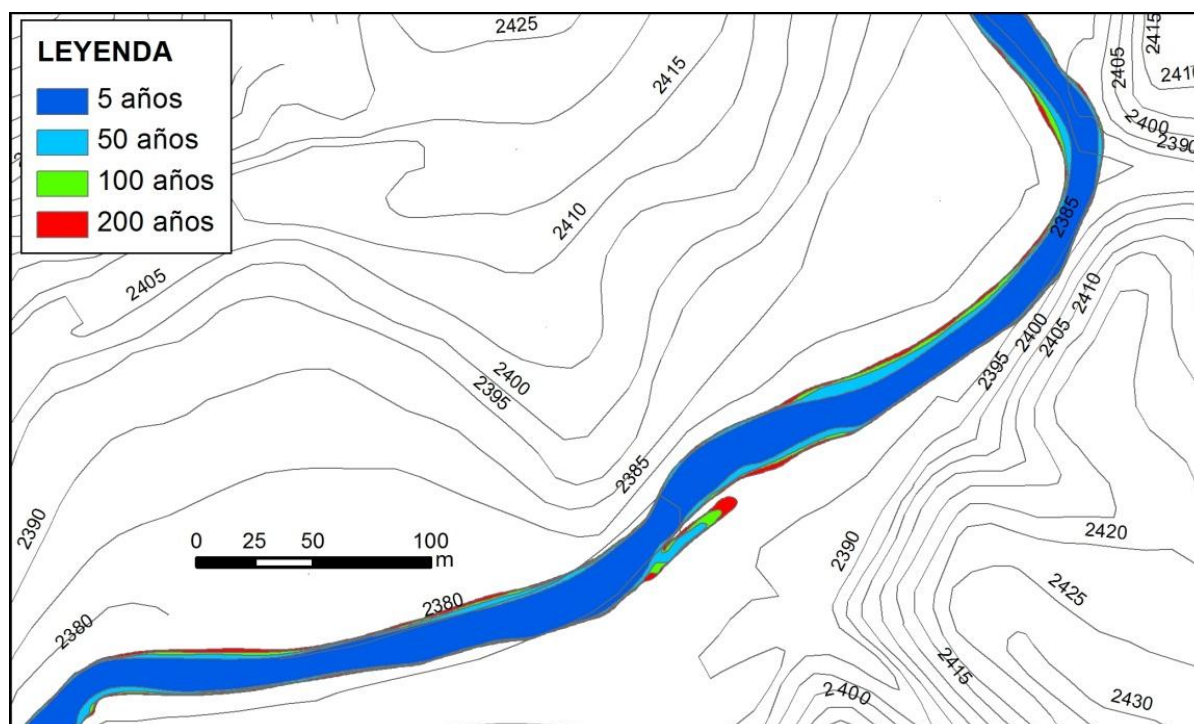


Figura 3. Zonas de inundación en el tramo final del área de estudio.

#### 4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En el presente estudio se han simulado diferentes eventos de crecida en un tramo de 10 km del río Burgay empleando el modelo HEC-RAS. Este tipo de modelos resulta apropiado para la simulación hidráulica de ríos en nuestra región, debido a que no se tienen llanuras aluviales grandes y no existen diques a lo largo de las márgenes; por lo tanto, se puede considerar adecuado las condiciones de flujo 1D. Esto no ocurre en ríos de la costa, en los que generalmente se tienen diques en las márgenes y las llanuras aluviales pueden tener varios cientos de metros o incluso kilómetros de ancho; con estas condiciones se debería utilizar modelos 2D o cuasi-2D (Timbe, 2007; Timbe y Willems, 2011).

Los mapas de inundación obtenidos en base a los resultados de los niveles de crecida del modelo hidráulico son aceptables, considerando la poca información disponible. En la zona de estudio no existe información histórica de niveles o mapas de inundación que permita realizar una evaluación cuantitativa del desempeño del modelo. Los resultados del mapeo de inundaciones muestran que debido a las características morfológicas (topográficas) de la zona de estudio existe una diferencia muy pequeña en el área inundada entre los eventos de crecida de 100 y 200 años. Por lo tanto, se puede asumir que la incertidumbre debida a valores no óptimos del coeficiente de Manning no sería significativa. Para mejorar la precisión del modelo hidráulico es necesario realizar el monitoreo de los niveles de agua a lo largo del río y evaluar cuantitativamente la sensibilidad e incertidumbre de los resultados del modelo. También es recomendable que los gobiernos locales, luego de un evento de crecida, realicen un mapeo rápido de las zonas afectadas por inundaciones, este tipo de información será muy útil a futuro en la validación de los mapas de inundación obtenidos del modelo hidráulico.

Finalmente, los resultados del modelo hidráulico y los mapas de inundación permiten identificar zonas críticas, en las cuales se deberían realizar un manejo adecuado mediante la adopción de medidas estructurales o no estructurales (Kundzewicz, 2002; Lund, 2012; Dawei, 2011) con el objetivo de disminuir o mitigar el riesgo de inundación. En nuestra región y país no existe una política en el tema del manejo de las planicies de inundación como las ya adoptadas en varios países (Samuels y col., 2006; Smemoe y col., 2007; Apel y col., 2009; Tingsanchali y Karim, 2010; Heintz y col., 2012); por lo tanto, la adopción de este tipo de normas en el país es algo necesario y urgente.

#### AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al CG PAUTE por permitir usar parte de los resultados del estudio “Análisis de vulnerabilidad a eventos de crecida y diseño de obras físicas para la protección de márgenes e infraestructura del río Burgay”. El estudio indicado es propiedad del CG PAUTE y fue realizado por el primer autor mediante el contrato de consultoría No. 005-2009.

#### BIBLIOGRAFÍA

- Apel, H., G.T. Aronica, H. Kreibich, A.H. Thielen, 2009. Flood risk analysis - how detailed do we need to be? *Nat. Hazards*, 49, 79-98.
- Bedient, P.B., W.C. Huber, B.E. Vieux, 2012. Hydrology and floodplain analysis. 5<sup>th</sup> edition, *Pearson Education*, 801 pp.
- Casas, A., G. Benito, V.R. Thorndycraft, M. Rico, 2006, The topographic data source of digital terrain models as a key element in the accuracy of hydraulic flood modeling. *Earth Surf. Process. Landforms*, 31, 444-456.
- CG Paute, 2008. Aplicaciones de la información temática digital de la Cuenca del Río Paute. *CG Paute*, Ecuador, DVD-ROM.
- Chow, Ven Te, 1959. Open channel hydraulics. 1<sup>st</sup> edition. *McGraw-Hill*, New York, 500 pp.



- Cunha, L.K., W.F. Krajewski, R. Mantilla, L. Cunha, 2011. A framework for flood risk assessment under nonstationary conditions or in the absence of historical data. *J. Flood Risk Manage.*, 4, 3-22.
- Di Baldassarre, G., G. Schumann, P.D. Bates, J.E. Freer, K.J. Beven, 2010. Flood-plain mapping: a critical discussion of deterministic and probabilistic approaches. *Hydrol. Sci. J.*, 55(3), 364-376.
- Di Baldassarre, G., S. Uhlenbrook, 2012. Is the current flood data enough? A treatise on research needs for the improvement of flood modelling. *Hydrol. Process.*, 26, 153-158.
- Douben, K., 2006. Characteristics of river floods and flooding: a global overview, 1985-2003. *Irrig. & Drain.*, 55, S9-S21.
- Dawei, H., 2011. Flood risk assessment and management. *Bentham Science Publishers*, 158 pp.
- Erwann M-K., K. Howard, 2011. Redesigning flood insurance, *Science*, 333, 408-409.
- Estrella, R., V. Tobar, 1994. Actualización de los estudios hidrológicos, Tomo II: Hidrología, Planes Maestros de Agua Potable y Alcantarillado del Área Metropolitana de la Ciudad de Cuenca, ETAPA, Cuenca, Ecuador.
- Farahi, G., S.R. Khodashenas, B. Ghahraman, K. Esmaeeli, 2009. Flood inundation extent in storage cell mode. *Sci. China Ser. E-Tech. Sci.*, 52(11), 3376-3381.
- FEMA, 2009. NFIP Floodplain management guidebook. 5<sup>th</sup> edition. *FEMA - Region 10*, Washington, 63 pp.
- FEMA, 2012. Numerical models meeting the minimum requirement of NFIP. [http://www.fema.gov/plan/prevent/fhm/en\\_hydra.shtm](http://www.fema.gov/plan/prevent/fhm/en_hydra.shtm) el 25 junio de 2012.
- Feyen, L., R. Dankers, K. Bódis, P. Salomon, J.I. Barredo, 2011. Flood risk in Europe in present and future climates. *Climate Change*, DOI 10.1007/s10584-011-0339-7.
- Fleming, G., 2002. How can we learn to live with rivers? The findings of the Institution of Civil Engineers Presidential Commission on Flood-risk management. *Phil. Trans. R. Soc. London A*, 360, 1527-1530.
- Gilles, D., N. Young, H., Schroeder, J. Piotrowski, Y. Chang, 2012. Inundation mapping initiatives of the Iowa Flood Center: statewide coverage and detailed urban flooding analysis. *Water*, 4, 85-106.
- Haestad Methods (Gary Dyhouse, Jennifer Hatchett, Jeremy Benn), 2007. Floodplain modeling using HEC-RAS. *Haestad Press*, Waterbury, CT USA, 658 pp.
- Heintz, M.D., M. Hagemeier-Klose, K. Wagner, 2012. Towards a risk governance culture in flood police-findings from the implementation of the "Floods Directive" in Germany. *Water*, 4, 135-156.
- Kron, W., 2002. Keynote lecture: Flood risk = hazard x exposure x vulnerability, Flood defense '2002. In: Wu *et al.* (Eds.), *Science Press Ltd.*, New York, ISBN 1-880132-54-0, 82-97.
- Kundzewicz, Z.W., 2002. Non-structural flood protection and sustainability. *Water Int.*, 27(1), 3-13.
- Lung, J.R., 2012. Flood management in California, *Water*, 4, 157-159.
- Mosquera-Machado, S., S. Ahmad, 2007. Flood hazard assessment of Atrato river in Colombia. *Water Resour. Manage.*, 21, 591-609.
- Nott, J., 2006. Extreme events: A physical reconstruction and risk assessment. *Cambridge University Press*, New York, 297 pp.
- Ohl, C., S. Tapsell, 2000. Flooding and human health: the dangers posed are not always obvious. *Brit. Med. J.*, 321, 1167-1168.
- Pender, G., S. Néelz, 2007. Use of computer model of flood inundation to facilitate communication in flood risk management. *Environ. Hazard*, 7, 106-114.
- Pinter, N., 2005. One step forward, two steps back on US floodplains. *Sci. Mag.*, 308, 207-208.
- Robson, A.J., 2002. Evidence for trends in UK flooding. *Phil. Trans. R. Soc. London A*, 1327-1343.
- Samuels, P., F. Klijn, J. Dijkman, 2006. An analysis of the current practice of policies on river flood risk management in different countries. *Irrig. & Drain.*, 55, S141-S150.

- Simonsson, L., A. Gerger Swartling, K. André, O. Wallgren, R.J.T. Klein, 2011. Chapter 23, Perceptions of Risk and Limits to Climate Change Adaptation: Case Studies of Two Swedish Urban Regions. In: Ford, J.D., L. Berrang-Ford (Eds.), *Climate Change Adaptation in Developed Nations: From Theory to Practice. Adv. Global Change Res.*, 42, 321-334.
- Smemoe, C.M., E.J. Nelson, A.K. Zundel, A.W. Miller, 2007. Demonstrating floodplain uncertainty using flood probability maps. *J. Am. Water Resour. As.*, 43(2), 359-371.
- Stoica, A.E., I. Iancu, 2010. Flood vulnerability assessment based on mathematical modeling. *Sci. J. Math. Model. Civil Engin.*, 5, 265-272.
- Sun, D., D. Zhang, X. Cheng, 2012. Framework of national non-structural measures for flash flood disaster prevention in China. *Water*, 4(1), 272-282.
- Tingsanchali, T., F. Karim, 2010. Flood hazard assessment and risk-based zoning of a tropical flood plain: case study of the Yom River, Thailand. *Hydrol. Sci. J.*, 55(2), 145-161.
- Timbe, L., 2007. River flooding analysis using quasi-2D hydraulic modelling and geospatial data. *PhD-Thesis, ISBN 978-90-5682-848-6*, KU Leuven, Bélgica, 276 pp.
- Timbe, L., P. Willems, 2011. Desempeño de modelos hidráulicos 1D y 2D para la simulación de inundaciones. *MASKANA*, 2(1), 91-98.
- US-ACE, 2008, HEC-RAS: River Analysis System. Hydraulic Reference Manual-Version 4.0. *U.S. Army Corps of Engin.*, 411 pp.
- US-ACE, 2006. HEC-GeoRAS: GIS tools for support of HEC-RAS using ArcGIS. User Manual-Version 4.1.1. *U.S. Army Corps of Engin.*, 154 pp.
- Vojinovic Z., S.D. Seyoum, J.M. Mwalwaka, R.K. Price, 2011. Effects of model schematization, geometry and parameter values on urban flood modeling. *Water Sci. Technol.*, 63(3), 462-467.