

# Determinación de Zonas de Riesgo por Inundaciones y Avenidas Torrenciales

## Mario Enrique Moreno Castiblanco

Ingeniero Civil, MSc. Recursos Hídricos  
Profesor Instructor Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental, Universidad de los Andes  
Investigador – CIACUA, Universidad de los Andes, mario-mo@uniandes.edu.co

## Gustavo Adolfo Hernández Cortés

Ingeniero Civil, MSc. Recursos Hídricos  
Profesor Departamento de Ingeniería Civil, Universidad del Magdalena  
Investigador – CIACUA, Universidad de los Andes, gust-her@uniandes.edu.co

## XVIII Seminario Nacional de Hidráulica e Hidrología

### Sociedad Colombiana de Ingenieros Universidad Nacional de Colombia

Bogotá, 22, 23 y 24 de mayo de 2008

**Resumen.** En este artículo se presenta una metodología para la evaluación y zonificación de riesgo por inundaciones y avenidas torrenciales en Colombia. En la metodología se establece la información que debe ser recopilada, las herramientas a utilizar y el tipo de análisis que se debe realizar para generar los mapas de amenaza y de riesgo por inundación. La zonificación por inundaciones se realiza de acuerdo con los resultados obtenidos de la modelación matemática del cuerpo de agua y su planicie de inundación, de la profundidad de la lámina de agua y de la velocidad de flujo para diferentes períodos de retorno de los eventos de precipitación. Para generar el mapa de riesgo se tienen en cuenta los resultados de la modelación hidráulica y la información de los predios susceptibles de inundación. Por último se muestra un ejemplo de aplicación de la metodología en la Quebrada Limas de la ciudad de Bogotá, Colombia, como caso de estudio.

**Palabras clave.** Inundaciones, Avenidas Torrenciales, Zonas de Amenaza y de Riesgo

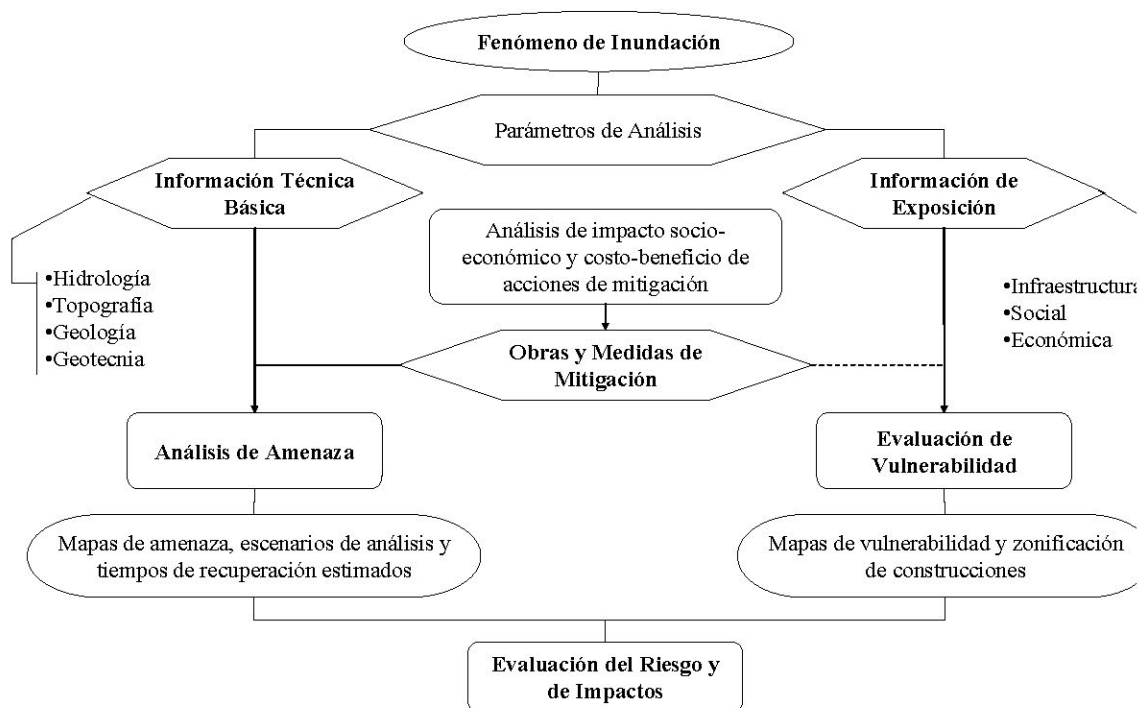
## 1. Introducción

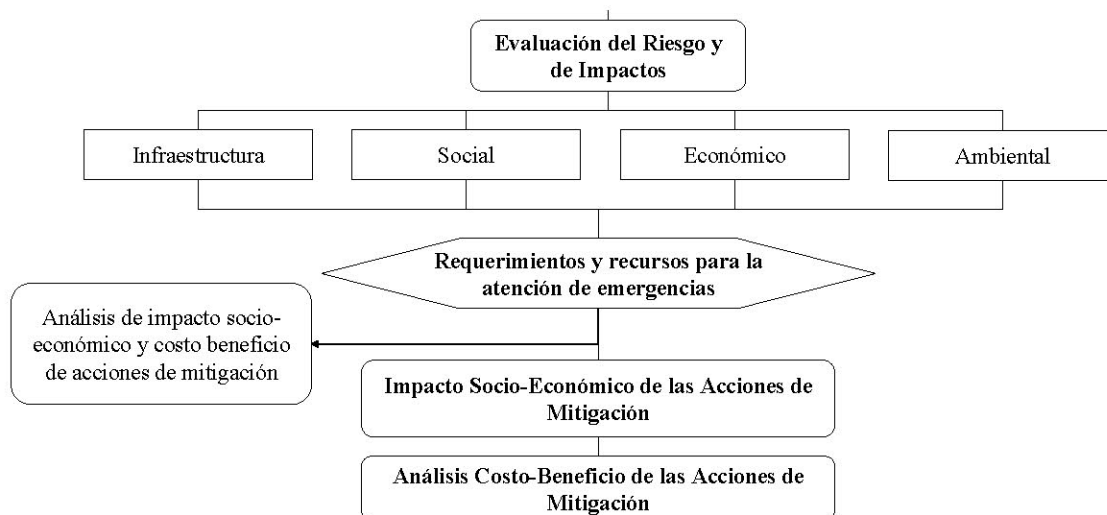
Colombia es considerada como uno de los países de América Latina con mayor número de desastres, dentro de los cuales el 30 % ésta asociado a inundaciones y avenidas torrenciales. Además de esto, los casos de inundaciones son cada vez más frecuentes y sus impactos que éstas producen en la economía, la población y el medio ambiente son cada vez más importantes. Esto se debe a la simultaneidad de varios factores, entre los que se pueden mencionar las condiciones climatológicas del país, la continua intervención y ocupación de los cauces de los ríos y quebradas, la afectación y cambio de uso de los humedales, la desprotección de los suelos, la alteración de la morfología de las cuencas debido a diferentes actividades humanas, la mayor concentración de la población en zonas propensas a inundación y el inadecuado control por parte de las entidades responsables de este tema.

En el presente artículo se expone una metodología para la evaluación, zonificación y reducción de riesgos por inundaciones desarrollada en conjunto con el Ministerio de Medio Ambiente y Desarrollo Territorial de Colombia y con la financiación del Banco Mundial. En la metodología desarrollada se presentan los pasos de búsqueda y procesamiento de información, el desarrollo de diversos estudios técnicos y la aplicación de modelos conceptuales, matemáticos, estadísticos y computacionales para generar los planos de amenaza, vulnerabilidad y riesgo por inundaciones y avenidas torrenciales.

## 2. Metodología para la Zonificación de Riesgos por Inundaciones y Avenidas Torrenciales

La metodología planteada utiliza como estructura tecnológica de soporte un sistema de información geográfica alimentado por bases de datos del mismo tipo. En la Figura 1 se presenta el esquema conceptual desarrollado para la evaluación y zonificación de riesgos.





**Figura 1.- Diagrama de flujo de la metodología propuesta.**

### **2.1.Amenaza por inundación**

Generalmente, los métodos para determinar la amenaza por inundación están basados en la interpretación estadística de registros de crecientes existentes, con lo que se genera una estimación de flujos pico con probabilidades de ocurrencia asociadas. Con base en dichos estimativos se adelanta normalmente una modelación analítica de tránsito de crecientes a lo largo de la cuenca, con lo cual se puede definir el nivel de amenaza para diferentes períodos de retorno de análisis. Por lo general, los resultados incluyen la delimitación de las áreas inundables, la profundidad máxima de inundación y el tiempo requerido para el drenaje de dichas aguas ante ciertas consideraciones específicas, todo lo anterior asociado a cada uno de los períodos de retorno de análisis.

Para la generación del modelo de amenaza por inundaciones y avenidas torrenciales es necesario acopiar información básica tal como: antecedentes históricos, geología y geomorfología, suelos, hidrología, meteorología y climatología, vegetación y oceanografía, entre otros. Adicionalmente, se deben adelantar estudios técnicos de topografía del cauce y de la planicie de inundación, estudios geotécnicos para determinar el perfil estratigráfico de la zona y las características físico-mecánicas del suelo, estudios hidrológicos para determinar los caudales de amenaza y estudios hidráulicos encaminados a especificar las características del entorno que influyen en el comportamiento hidráulico del cauce.

La modelación hidráulica del cuerpo de agua a estudiar será el producto de la articulación de toda la información y de los estudios realizados dentro del marco del proyecto de generación de los mapas de amenaza de un municipio. La modelación hace referencia a incorporar toda esta información dentro de un modelo computacional que permitirá verificar y predecir el comportamiento hidráulico del cuerpo de agua y de su planicie de inundación bajo diferentes eventos de precipitación. Los modelos deberán representar de la manera más aproximada las características geométricas, topográficas e hidráulicas del cuerpo de agua, con base en las secciones transversales del río y las estructuras hidráulicas que allí se tengan. El modelo deberá estar calibrado con base en la información hidrométrica con que se cuente de niveles aguas abajo y caudales en el cauce del río.

Para el análisis de amenaza por el fenómeno de inundación, los parámetros de interés son, en términos generales, la altura de la lámina de agua, la velocidad del flujo y el tiempo de permanencia del agua en el área inundada. El resultado final de este proceso son mapas de amenaza y tiempos estimados de recuperación de la funcionalidad para fenómenos de inundación, los cuales se obtienen al realizar el proceso de zonificación típico (amenaza alta, media y baja) en términos de los parámetros seleccionados como índices de la magnitud o frecuencia.

La zona de Amenaza Alta corresponde al área geográfica delimitada por la línea de inundación correspondiente a crecientes con períodos de retorno de 10 años, la zona de Amenaza Media corresponde al área geográfica delimitada por la línea de inundación correspondiente a crecientes con períodos de retorno de 50 años y la zona de Amenaza Baja corresponde al área geográfica delimitada por la línea de inundación correspondiente a crecientes con períodos de retorno de 100 años; en los tres casos siempre se debe tener una profundidad de agua, una velocidad de flujo o una duración del fenómeno que pueda llegar a producir efectos de consideración en el uso de la tierra, en la infraestructura o en la población. Adicionalmente, se especifica una zona de Amenaza por Flujos Torrenciales como el área geográfica asociada a la planicie de inundación, en la cual se presenten velocidades de flujo superiores a 1.5 m/s para las crecientes con períodos de retorno de 100 años o para crecientes asociadas a fenómenos extremos como represamientos ocasionales.

## **2.2. Exposición**

Hace referencia al inventario completo de componentes, bienes, contenidos, personas y, en general, a todos los elementos que puedan llegar a sufrir daño a causa de algún tipo de fenómeno amenazante. La valoración de la exposición incluye todos los parámetros requeridos para caracterizar los elementos expuestos en términos de ubicación, propiedades físicas, calificaciones socio – económicas y tipificación de contenidos.

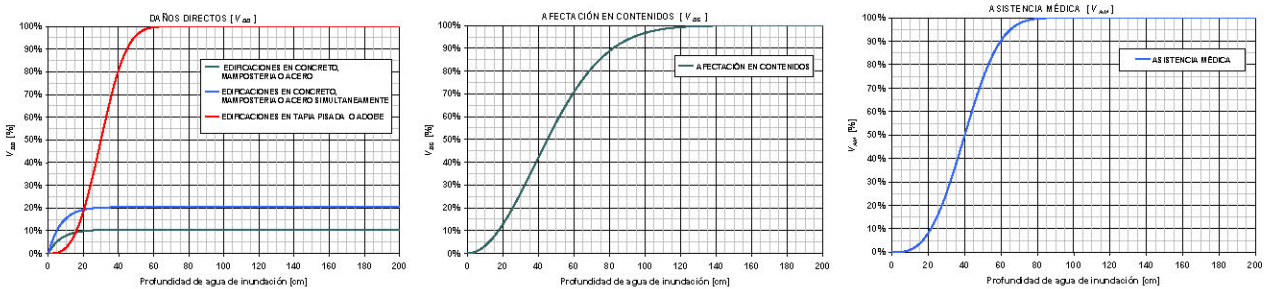
Para el caso de la infraestructura es necesario hacer un reconocimiento de ciertas características representativas tales como el estado (condición actual) y la capacidad de aceptar y soportar exigencias externas (resiliencia), así como también de la magnitud de los daños que podría sufrir (pérdidas), todo lo anterior acompañado de una adecuada descripción de su ubicación en términos de coordenadas geográficas (georeferenciación).

Una de las formas de cuantificación del riesgo es a través de las pérdidas económicas que un posible desastre podría llegar a generar. Para una adecuada estimación de las pérdidas económicas de un escenario predefinido deben obtenerse valores unitarios (monetarios) relacionados con las características de los inmuebles y bienes en general que puedan resultar afectados. En esta valoración se tendrá en cuenta el valor del componente (E), el valor de los contenidos (C) y el valor del lucro cesante (L).

## **2.3. Vulnerabilidad**

Definida como la predisposición de un elemento o componente a sufrir afectación ante una situación de amenaza específica. Por otra parte, la vulnerabilidad posee una dimensión asociada con la resiliencia de un

grupo demográfico particular para responder a una condición amenazante, la cual está basada en propiedades inherentes a cada estructura y a rangos de edad en el caso de la población (vulnerabilidad social) y no depende de la amenaza, aunque varía de acuerdo con ella (una edificación puede ser poco vulnerable al sismo pero muy vulnerable a una inundación). En la metodología propuesta se determinaron funciones de vulnerabilidad para cada uno de los parámetros bajo análisis. A continuación se presentan algunas de las funciones de vulnerabilidad.



**Figura 2.- Curva de vulnerabilidad típica para estimar los daños directos (izquierda), afectación de los contenidos (centro), y asistencia médica (derecha).**

#### 2.4. Evaluación del riesgo

Considerando el riesgo como la probabilidad de ocurrencia de unos determinados efectos o impactos sobre la infraestructura y población expuesta, la evaluación del riesgo se plantea en términos de la función de vulnerabilidad que depende de un factor de amenaza y de la duración del evento, de la influencia de la fragilidad social y de la falta de resiliencia de la infraestructura.

Los impactos que genera un fenómeno de inundación están divididos generalmente en cuatro grandes grupos: impactos en la infraestructura física, impactos económicos, impactos sociales e impactos ambientales. Por otro lado, las afectaciones pueden ser de dos tipos: directas, las cuales ocurren en el corto plazo o indirectas, las cuales suceden en general en el mediano o largo plazo.

La zonificación se plantea de manera tal que se puedan clasificar las diferentes zonas afectadas en zonas de riesgo mitigable, no mitigable y aceptable. Para el efecto se propone la siguiente metodología de fácil aplicación:

1. Calcular mediante la metodología de zonificación por amenaza el escenario de inundación correspondiente al evento con 100 años de período de retorno.
2. Generar mapas de visualización de amenaza por inundación.
3. Identificar las áreas de inundación en las cuales se presente un índice de afectación para atención médica a nivel de edificaciones individuales, VAM, mayor que el 5 %. En zonas de bajo nivel de complejidad, esta área corresponde a zonas con una gran densidad de construcciones y donde el nivel de agua de inundación sea mayor a 10 cm.
4. Las zonas que no cumplan el criterio anterior serán declaradas zonas con riesgo aceptable y en éstas deberán realizarse labores de observación, mantenimiento, monitoreo y eventualmente instalación de sistemas de alarmas para minimizar posibles impactos.

5. Las zonas que cumplan con el criterio del Numeral 3, son zonas que se clasifican como de alto riesgo de inundación y por lo tanto se pueden ejecutar una de dos alternativas en estas zonas:
  - a. Adelantar una obra de mitigación diseñada para el evento de 100 años de período de retorno.
  - b. Declarar la zona como de riesgo no mitigable e iniciar procesos de reubicación.
  - c. La decisión final sobre cualquiera de las dos alternativas anteriores dependerá de un análisis costo-beneficio que se adelante considerando los costos de las obras de mitigación en forma integral, los “ahorros” en pérdidas futuras considerando la construcción de las obras diseñadas para el evento de los 100 años de período de retorno, en comparación con la alternativa de evacuar la zona y reubicar la población a zonas de riesgo aceptable.
6. Para adelantar las actividades de reubicación y considerando los altos costos y el nivel de complejidad de este tipo de medidas, se recomienda realizar evaluaciones para períodos de retorno intermedios (por ejemplo 10, 20 o 50 años) y diseñar estos planes con base en áreas delimitadas por estos eventos con el fin de optimizar los recursos en el tiempo. De esta manera, los planes de reubicación se implementan paulatinamente en las áreas clasificadas como de riesgo no mitigable. Luego de un tiempo de haber adelantado una primera parte del plan, se pueden realizar evaluaciones y estimar la conveniencia o no de continuar con el plan completo hasta cubrir la zona inundable con período de retorno de 100 años.
7. Identificar de igual forma las zonas de amenaza por flujos torrenciales. Estas zonas deben clasificarse como zonas de riesgo no mitigable y las edificaciones y demás infraestructura allí ubicadas deben someterse a un proceso de reubicación.
8. Una vez definidas las zonas anteriores, se producirá un mapa general de zonificación de riesgos por inundación para un período de retorno de 100 años. De acuerdo con los criterios anteriores, en el mapa de riesgo se señalarán las siguientes tres zonas:
  - a. Zonas de riesgo aceptable
  - b. Zona de riesgo mitigable
  - c. Zona de riesgo no mitigable.

### **3. Aplicación de la Metodología Propuesta**

Para la aplicación de la metodología se utilizó como caso de estudio la Quebrada Limas que se encuentra ubicada en la localidad de Ciudad Bolívar al sur oriente de la ciudad de Bogotá, Colombia. La quebrada tiene una longitud de 10.5 kilómetros, en la parte alta de la cuenca tiene buena cobertura vegetal y suelos bien drenados que permiten una buena definición del cauce, pero, a medida que va descendiendo dentro de la cuenca, la quebrada presenta una alta intervención antrópica conformada por desarrollos urbanísticos que la convierte en un colector abierto de aguas residuales, especialmente a partir del punto de confluencia de la Quebrada Quiba. Además, en las proximidades del cauce se encuentran canteras de explotación de material para construcción.



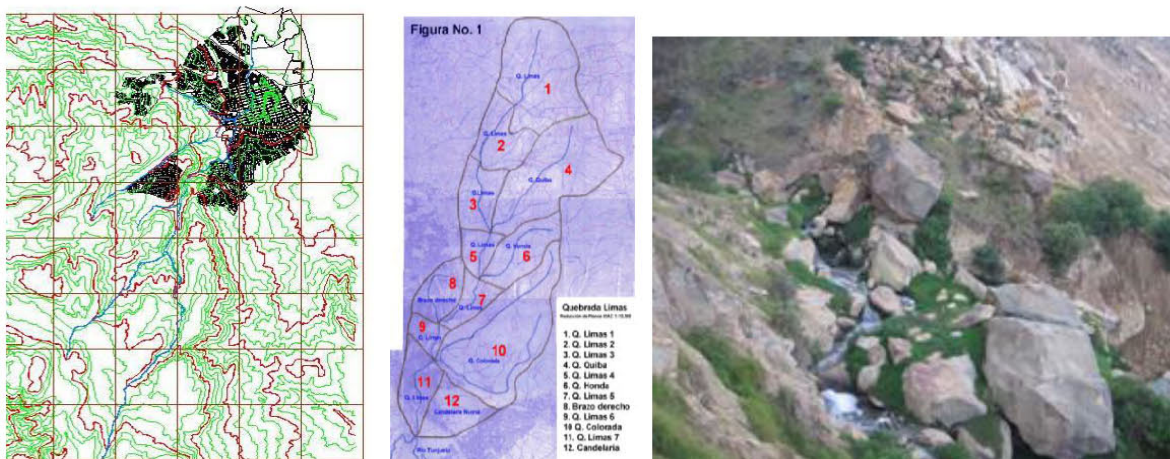
**Figura 3.- Características morfológicas de la Quebrada Limas.**

A la Quebrada Limas vierten sus aguas las quebradas Peña Colorada, Quiba, Cañada Honda y el Zajón Derecho. En estas quebradas se vierten aguas residuales y se depositan basuras de los barrios vecinos de cada una de las subcuencas. La Quebrada Limas descarga sus aguas al Río Tunjuelo, uno de los principales afluentes del Río Bogotá.

La Quebrada Limas presenta situaciones particulares de riesgo debido a diferentes factores tales como: deforestación en las partes altas; desarrollo no controlado de zonas y planicies de inundación de la quebrada; gran cantidad de zonas de canteras que generan escorrentías aceleradas y flujos de lodos considerables por aporte de sedimentos; poco mantenimiento a obras de arte, pasos, bancas y taludes, con lo cual se generan obstrucciones, pérdidas de sección, acumulación de basuras, etc.; desarrollo no planificado de obras y edificaciones en cercanías del cauce.

### 3.1. Estudios realizados

Para generar el modelo hidráulico se recopiló información básica que se encontraba en entidades gubernamentales; adicionalmente, se realizaron estudios topográficos, hidrológicos, hidráulicos y geotécnicos para generar un modelo más robusto.



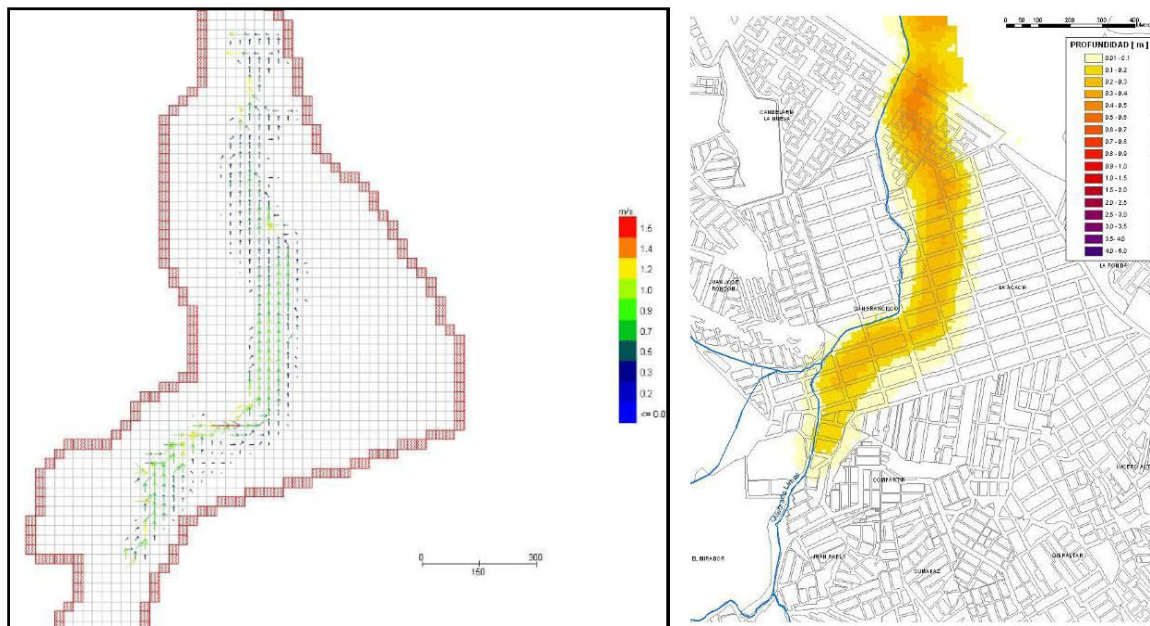
**Figura 4.- Mapas de los estudios realizados: a) topográfico, b) hidrológico y c) geotécnico.**

### 3.2. Modelación hidráulica

La modelación hidráulica se realizó en el programa FLO-2D, el cual permite modelar el cuerpo de agua (Quebrada Limas) y la planicie de inundación (Barrios aledaños a la quebrada) por medio de diferencias finitas en 2 dimensiones. El programa incluye un módulo hidrológico y otro hidráulico, los cuales se conjugan de manera adecuada para entregar como resultado una herramienta capaz, entre otras cosas, de transitar crecientes en cuencas, modelar el transporte de sedimentos en cuerpos de agua, modelar el comportamiento hidráulico de flujos con alta concentración de sólidos suspendidos y simular el comportamiento hidráulico del cuerpo de agua luego de la ruptura de un dique o presa.

Para el modelo se estimaron las elevaciones promedio de cada celda, la rugosidad del cauce de la quebrada y de la planicie de inundación, los hidrogramas de entrada de cada uno de los afluentes de la quebrada, las condiciones aguas abajo de la quebrada (niveles de agua en el río receptor) y la información batimétrica de la quebrada.

En la Figura 5 se presentan algunos de los resultados obtenidos en la Quebrada Limas luego de realizar la simulación del modelo hidráulico en el programa FLO-2D para el período de retorno de 100 años.



**Figura 5.-** Vectores de velocidad en la planicie de inundación para el período de retorno de 100 años (izquierda) y mapa de profundidades en la planicie de inundación para el mismo período de retorno (derecha).

Una vez se han realizado las simulaciones hidráulicas para los períodos de retorno de 10, 50 y 100 años, se procede a determinar el mapa de amenaza por inundación de acuerdo con las zonas afectadas en la modelación de cada uno de los tres períodos de retorno. En la Figura 6 parte izquierda se puede observar el mapa de amenaza por inundación de acuerdo con las zonas establecidas en el numeral de Amenaza por inundación, mientras que en la parte derecha se encuentra un mapa de evaluación del riesgo en cuanto al porcentaje de afectación de los contenidos de las edificaciones de la cuenca.



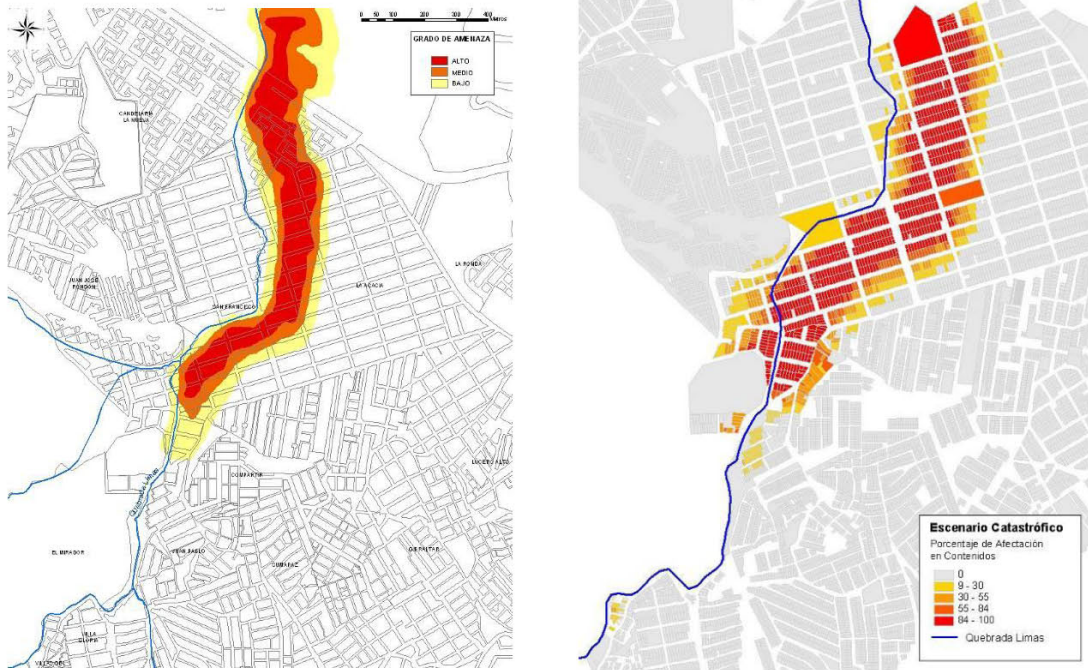


Figura 6.- Mapa de amenaza por inundación (izquierda) y mapa de evaluación del riesgo – porcentaje de afectación de contenidos (derecha).

Una vez se sigue la metodología propuesta para el caso de estudio de la Quebrada Limas, se puede obtener un mapa de clasificación del riesgo como se muestra en la Figura 7. Este mapa se obtiene a partir de los resultados obtenidos al seguir los pasos del 1 al 9 de la metodología de evaluación del riesgo.

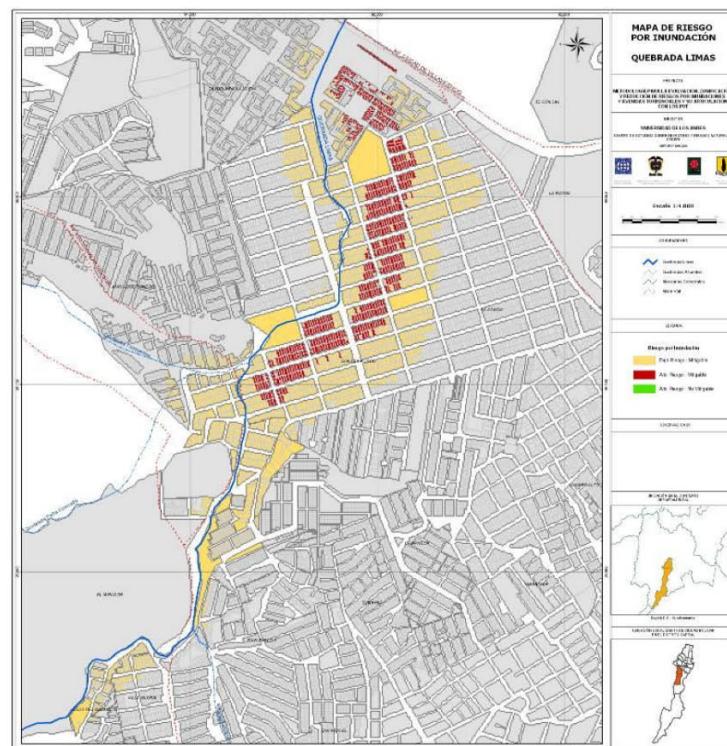


Figura 7.- Mapa de riesgo para la Quebrada Limas.

#### 4. Conclusiones

La problemática social, económica y ambiental alrededor del manejo de las planicies de inundación obliga a la definición de políticas claras de manejo de la misma, mediante criterios generales que consideren las diferentes dimensiones del problema. Dichas políticas deben estar orientadas por dos grandes conceptos. El primero, disminuir las eventuales consecuencias inmediatas que una creciente pueda tener en áreas habitadas, tales como impactos en la infraestructura, en lo social o en lo económico y la eventual destrucción del medio ambiente. El segundo, realizar la planeación necesaria a largo plazo para la utilización económica óptima de las planicies de inundación, considerando aspectos tales como el impacto ambiental y los impactos socio- económicos.

Para cumplir estos dos propósitos fundamentales, los tomadores de decisión deben no solamente evaluar la conveniencia de proteger las inversiones ya realizadas mediante obras físicas e inversiones económicas, sino también estudiar y seleccionar las alternativas de desarrollo que minimicen el impacto ambiental adverso y que redunden en un beneficio de los habitantes de las planicies de inundación.

Un elemento fundamental dentro de la alternativa propuesta del manejo integral de la cuenca es la adecuada evaluación del riesgo. El conocimiento de las amenazas (intensidad, frecuencia, etc.) es el primer paso para iniciar un proceso que conllevará a la utilización sostenible del recurso hídrico y demás recursos renovables y no renovables al interior del ecosistema en el que se constituye una cuenca hidrográfica.

La convolución de los elementos de amenaza, exposición y vulnerabilidad se constituye en una medida de lo que una o más unidades de territorio se puede ver afectada en un escenario futuro sino se toman las medidas adecuadas. Por esto, la estimación realizada a través de la metodología planteada se convierte en una herramienta de primer nivel para el estudio del territorio que se esté administrando.

La metodología propuesta para la evaluación y zonificación de riesgos incluye actividades como recolección de información técnica detallada, modelación de flujos de agua y tránsito de crecientes, generación de mapas de amenaza, generación de mapas de riesgo, estrategias para adelantar obras de mitigación o para desarrollar programas de reubicación cuando se trate de zonas de alto riesgo no mitigable y finalmente el desarrollo de programas integrales para la reducción de riesgos.

#### 5. Agradecimientos

Los autores de esta investigación agradecen al Ministerio de Medio Ambiente y Desarrollo Territorial de Colombia y al Banco Mundial por su apoyo económico, y al CIACUA por su colaboración.

#### 6. Referencias

- Fleming, G.** Flood Risk Management, Learning to live with rivers. Edited by Thomas Telford. 2002.
- Grijzen, J. G.** An information system for flood early warning, Amsterdam: Delf Hydraulics, c1993.
- Miller, John B.** Floods: people at risk, strategies for prevention, New York: United Nations, 1997.
- O'Brien, J.S.** 1999. FLO-2D Users Manual, Tetra Tech ISG, Nutrioso, AZ.
- Rosbjerg, Dan.** Risikoanalyse of videsystemet: risk evaluation of a natural flood control reservoir, Lyngby, Denmark: Technical University of Denmark, c1973.