EVALUACIÓN DE RIESGOS EN CUENCAS URBANAS

Jaime I. Vélez, Humberto Caballero, Verónica Botero, Ricardo A. Smith,
Claudia C. Rave, Jorge E. Patiño y Dimas Escobar
Escuela de Geociencias y Medio Ambiente, Facultad de Minas
Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín
jivelezu@unalmed.edu.co

Recibido para evaluación: 11 de Julio de 2003 / Aceptación: 25 de Septiembre de 2003 / Recibida versión final: 10 de Octubre de 2003

RESUMEN

Se presenta una propuesta de zonificación del riesgo en cuencas altamente intervenidas. Ésta se traduce metodológicamente en la combinación de una amenaza específica con los indicadores de vulnerabilidad que le son propios, para producir la estimación del riesgo ante esa amenaza. La propuesta se apoya en la construcción de mapas temáticos para las amenazas y vulnerabilidades específicas, producto de las metodologías diseñadas para cada caso, lo cual permitirá realizar múltiples combinaciones por medio del álgebra de mapas para la estimación de riesgos específicos. Esta metodología propuesta se contrapone a la metodología tradicional de zonificación del riesgo consistente en la construcción de un único mapa de riesgo, producto de la combinación mediante ponderaciones, de un mapa de amenaza total y un mapa de vulnerabilidad total. Se presenta la forma de evaluar el riesgo como producto de la combinación de las diferentes amenazas y vulnerabilidades mediante reglas lógica de decisión. Finalmente se presentan algunos de los resultados obtenidos con la aplicación de esta metodología a un caso particular en una cuenca urbana de la ciudad de Medellín, Colombia.

PALABRAS CLAVES: Riesgo, Amenaza, Vulnerabilidad, Planificación de Cuencas, Toma de Decisiones.

ABSTRACT

A risk zonification proposal for urban watersheds is presented. The proposed methodology combines specific hazards with vulnerability indicators to produce risk evaluations for that specific hazard. The proposal is based in the elaboration of hazard and vulnerability maps for specific hazards, as a result of a methodology designed for each case which allows multiple map combinations for the estimation of specific natural risks. The proposed methodology solves the limitations of the traditional methods for risk mapping where only one risk map was constructed as a combination of one total hazard and one total vulnerability maps. Here the form to evaluate risk by combining different hazards and vulnerabilities maps by using decision rules is presented. Finally some results are presented from the application of the proposed methodology to a urban watershed located in the city of Medellín, Colombia.

KEY WORDS: Risk, Hazards, Vulnerability, Watershed Planning, Decision Making.

1. INTRODUCCIÓN

La zonificación del riesgo en una cuenca se constituye como uno de los pilares de su ordenamiento ya que condiciona el uso del suelo y ofrece las pautas para encaminar los planes estratégicos de desarrollo en las mismas. La zonificación adecuada del riesgo para los fines del ordenamiento territorial debe contemplar el estudio de los riesgos específicos que por la acción de cada una de las amenazas naturales identificadas se presentan en la cuenca. Cada una de las amenazas existentes tendrá un impacto particular sobre las diferentes componentes en el sistema, lo que condicionará la definición de la vulnerabilidad y así se estará estimando el riesgo específico por acción de amenazas y vulnerabilidades específicas interrelacionadas entre sí.

La propuesta se traduce metodológicamente en la combinación de una amenaza específica con los indicadores de vulnerabilidad que le son propios, para producir la estimación del riesgo ante esa amenaza. Por ejemplo, la vulnerabilidad socioeconómica de una comunidad, se redefine de diferentes formas según las características espacio temporales de la amenaza, es decir, la amenaza sísmica tiene un dominio geográfico más grande que la amenaza por inundación y por tanto las vulnerabilidades social y económica serán diferentes respecto a cada una.

La metodología tradicional de zonificación del riesgo consiste en la construcción de un único mapa de riesgo, producto de la combinación de un mapa de amenaza total y un mapa de vulnerabilidad total. Dichos mapas resultan de la ponderación de las diferentes amenazas o vulnerabilidades, según el caso, en un sólo mapa. Ese esquema tiene grandes desventajas a la luz del ordenamiento territorial puesto que en general enmascaran los problemas. Muchos de los fenómenos a considerar en la amenaza y la vulnerabilidad involucran diferentes escalas temporales y espaciales, y normalmente las combinaciones no son lineales. Reunir en un sólo mapa todos los eventos puede resultar, a la luz de un proyecto concreto a evaluar, en sobreestimación o subestimación del riesgo, limitando las posibilidades de desarrollo en la zona para el primer caso o en la exposición inadecuada en el segundo.

La propuesta, entonces, consiste operativamente, en el la construcción de mapas temáticos para las amenazas y vulnerabilidades específicas definidas mediante metodologías establecidas para ello y, apoyados en un sistema de información realizar múltiples combinaciones por medio del álgebra de mapas para la estimación de riesgos específicos, usando reglas lógicas de decisión. Este esquema propuesto permite al planificador hacer un seguimiento más detallado de los rasgos que determinan el riesgo en la cuenca lo cual puede ser de gran utilidad en la toma de decisiones.

2. DEFINICIONES GENERALES

La propuesta general se apoya en las siguientes definiciones (UNDRO[1], 1979).

Se entiende por *amenaza (A)* la probabilidad de ocurrencia de un evento natural o antrópico en un área específica dentro de un período de tiempo, que afecte desfavorablemente de manera directa o indirecta, a una comunidad o a los bienes de ésta. La amenaza se define en función de la magnitud del evento y de su recurrencia en el tiempo. Para fines del ordenamiento contemplado en este trabajo, se evaluarán y cualificarán las amenazas *hidrológica, sísmica*, por *movimientos en masa y sanitaria.*

La *vulnerabilidad (V)* es el grado de exposición que tiene una comunidad y sus bienes materiales ante un evento amenazante. Tal y como se define, es un concepto social y es función de la preparación, entendimiento del entorno e inhabilidad por parte de la comunidad para afrontar los impactos derivados de la ocurrencia del evento amenazante. Se disminuye al llevar a cabo obras de mitigación (estructuras civiles, educación de la comunidad, etc.). En este trabajo se estiman vulnerabilidades para las variables sociocultural e institucional, económica y físico espacial.

El *riesgo (R)* es el valor esperado de las pérdidas o daños cuando se considera la ocurrencia del evento amenazante ante una determinada comunidad. Se mide en términos de pérdidas de vidas humanas, heridos, daños a estructuras civiles, deterioro de la economía, etc. Es función de la amenaza y la vulnerabilidad y han sido propuestas diferentes maneras de relacionarlas, siendo la más común $\mathbf{R = A \times V}$.

1 United Nations Disaster Relief Office (Oficina de las Naciones Unidas para el Auxilio en Desastres)

3. PROPUESTA OPERATIVA (SIG) PARA EVALUACIÓN DEL RIESGO

Acorde con la propuesta realizada, la evaluación del riesgo tendrá como resultado mapas temáticos de riesgos específicos ante cada amenaza. Los mapas temáticos elaborados, de acuerdo a las metodologías que se expondrán en este artículo para las amenazas y vulnerabilidades, serán mapas vectoriales de polígonos. El álgebra de mapas a realizarse, será de superposiciones tipo unión, que generarán campos nuevos en las tablas de atributos de los mapas resultado usando las reglas de decisión que definen el atributo del riesgo en cada caso. Las reglas de decisión serán lógicas, del tipo SI/ ENTONCES.

Así, es muy importante la definición de las unidades geográficas para la evaluación de cada una de las amenazas y vulnerabilidades en el sentido en que dichas unidades determinarán los polígonos de evaluación. Dichas unidades geográficas tendrán implícita toda la información de los mapas de información primaria tipo puntos, vector y raster.

En el caso de las amenazas, el dominio geográfico es muy claro. Para la amenaza por inundación las manchas para cada período de retorno definirán cada uno de los polígonos de amenaza. Para las amenazas sísmica y de movimiento en masa la clasificación de la amenaza, realizada sobre el territorio, definirá los polígonos.

Para todas las vulnerabilidades evaluadas se ha trascendido la noción de barrio, dado que en la ciudad los barrios no necesariamente representan unidades socioeconómica o físicamente homogéneas. Para las vulnerabilidades social y económica se toma el barrio como unidad geográfica excepto en las zonas de amenaza alta. Es decir, las zonas clasificadas de amenaza alta al interior de un barrio son tomadas como una unidad individual y el resto del barrio será otra unidad o polígono. Para la vulnerabilidad físico espacial se toma como unidad geográfica «unidades morfológicas homogéneas" desde el punto de vista urbanístico que hacen referencia a la morfología de los asentamientos que bien pueden unir diferentes barrios o delimitar diferentes unidades al interior de uno de estos. Por ejemplo, y como será ampliado en este artículo, la accesibilidad es un factor muy importante en el momento de evacuar o traer ayuda a una zona durante y después de una emergencia. Así, la evaluación de la accesibilidad en esa zona homogénea dará información sobre el grado de vulnerabilidad de la zona por contar con adecuadas vías de acceso o por prescindir de ellas.

4. AMENAZAS NATURALES

En las áreas urbanas existe una clara interrelación entre los procesos naturales y la acción humana. Para esta propuesta se han encaminado los estudios de las amenazas para desarrollar metodologías que sirvan de base al ordenamiento territorial. La misma complejidad hace difícil la estimación de las amenazas de forma integrada y se considera, como ya se ha enunciado, que la visión de las amenazas de forma independiente está más acorde con el esquema de sostenibilidad que se pretende dar a la planificación del territorio y particularmente a la zonificación del riesgo. Las amenazas naturales consideradas en las cuencas son, amenaza por inundación, por movimiento en masa y por sismo. A continuación se describe brevemente como se determina cada una de ellas en la construcción de los mapas de riesgos para la cuenca.

4.1. Amenaza por inundación

La definición de la *Amenaza por Inundación* en las cuencas es el resultado del modelamiento hidrológico - hidráulico del flujo por las corrientes en régimen gradualmente variado. Del modelamiento se obtienen las manchas de inundación para crecidas con diferentes períodos de retorno de los cuales la mancha de 100 años define el retiro hidrológico y la de 500 años definirá la zona de restricciones al uso del suelo por amenaza hidrológica, lo cual determina la definición del riesgo. Para la evaluación de la amenaza hidrológica se establecen diferentes evaluadores según la velocidad, la profundidad del flujo y la zona de ocurrencia dentro de la cuenca, es decir, que se evalúa de manera diferente la zona de montaña, la zona de transición (abanico aluvial) y la planicie aluvial, dadas las diferencias en sus características dinámicas. En la figura 1 del artículo "Definición de retiros en cuencas urbanas del Valle de Aburrá" presentado en este mismo número de esta revista (Vélez et al., 2003), se puede ver como se relacionan la profundidad y la velocidad del flujo para evaluar la amenaza hidrológica. En general la inundación es un evento amenazante debido a que la velocidad en la planicie está asociada al impacto directo del flujo y al poder erosivo de la corriente que puede exponer las cimentaciones de las estructuras hidráulicas y urbanas

afectadas;. A mayores profundidades de flujo mayores deberán ser las restricciones en la planicie y éstas deben ser tales que los daños sobre los bienes inmuebles sean mínimos y que los usos sobre la zona de inundación no comprometan peligrosamente la zona aguas abajo.

Así, la amenaza por inundación define las franja de retiro (Vélez et al, 2003)., y una zona llamada de *restricción al uso*. La zona de restricción al uso es un área en la que se permite el uso controlado del suelo para el desarrollo urbano. Del uso racional que se haga de esta zona dependerá en muchos casos el bienestar de las comunidades asentadas en la cuenca después de un evento de inundación, ya que, por ejemplo, si en ella se ubican instalaciones comerciales o industriales que manejen material biológico peligroso, químicos o hidrocarburos, la inundación tendrá consecuencias catastróficas sobre dichas actividades y aguas abajo de dichas instalaciones, o bien si en la zona de restricción al uso están localizados centros de atención hospitalaria, centros educativos o algún otro equipamiento, se verá afectado por la inundación y no serán útiles durante y después del evento.

Se establecen los siguientes evaluadores de la amenaza. (Vélez et. al., 2003). Para *las zonas de montaña y transición en la cuenca la zona de restricción al uso* queda determinada por la zona comprendida entre las manchas de inundación de 100 años y 500 años de periodo de retorno, para cualquier magnitud de velocidad y lámina de flujo. La zona así definida se considera como una zona de *amenaza moderada*. En el *abanico aluvial o llanura de inundación* y siguiendo los criterios de combinación de velocidad y profundidad, la zona comprendida entre las manchas de inundación de 100 y 500 años de periodo de retorno, definirá la *zona de restricciones al uso*. Si la combinación velocidad – profundidad de flujo corresponde a la zona de Daños Graves o Pérdida de Vidas se tomará como zona de amenaza moderada. Para la zona comprendida en amenaza baja o daños moderados y molestias, no se tendrán restricciones al uso.

4.2. Amenaza Sanitaria

La amenaza sanitaria está asociada a la duración del evento de inundación en un área específica, dado que una inundación muy prolongada puede poner en riesgo la salud humana y, en general, la infraestructura sanitaria en la zona, lo cual redundará nuevamente en la afección de la salud y la calidad de vida de la comunidad asentada en la zona.

De acuerdo con la magnitud del evento de crecida, la amenaza sanitaria puede abordarse desde dos perspectivas. Para crecidas con mayor recurrencia (menor período de retorno), e inclusive para los caudales medios, la presencia de microorganismos patógenos y sustancias de interés sanitario en altas concentraciones, como metales pesados en el flujo de agua y en los sedimentos del lecho del cauce, puede potenciar la amenaza sanitaria dada la baja dilución de dichos contaminantes en el flujo. Para los eventos de crecida de baja recurrencia (mayor periodo de retorno), las profundidades y velocidades del flujo durante la inundación pueden afectar la infraestructura sanitaria lo cual se manifestará en deterioro de la calidad de vida y la salud y, redundará en mayores complicaciones para superar la inundación entendida como desastre. Si la inundación es prolongada, pueden combinarse los efectos de ambas consideraciones. En un evento de inundación se presentan los siguientes eventos: *Dilución de la concentración* por el incremento en la cantidad de agua; Dispersión en el *terreno* y Concentración diferencial en el terreno, seguido de procesos de concentración por evaporación, drenaje y percolación.

Asociada a la concentración de contaminantes en el flujo, en la fase acuosa de la inundación, la amenaza está asociada con la inmersión, el contacto directo y la ingestión. Para la fase sólida (lodos depositados) la amenaza esta asociada con el contacto directo e indirecto y la ingestión.

Los contaminantes potenciales que pueden afectar las condiciones de salud de la población se evalúan según el tiempo de exposición, la concentración del contaminante y la relación Carga – Cantidad del Contaminante.

Para la evaluación de la amenaza sanitaria se define la frecuencia del evento, de acuerdo al tiempo de retorno (T_R: 2.33, 5, 10, 25, 50, 100 años) y se obtienen los caudales máximos con los cuales se calcula la concentración de microorganismos de interés sanitario empleando la ecuación de continuidad. Para cada una de las frecuencias consideradas se define, entonces, el área afectada, la función de presencia de microorganismos y la función de presencia de contaminantes. Se asume una distribución espacial homogénea en concentración. Igualmente, para las sustancias contaminantes se

consideran la carga orgánica y la carga de metales pesados como los parámetros de interés. Con los resultados obtenidos con el modelo se realizan las comparaciones con base en los valores o indicadores de referencia para clasificar la amenaza sanitaria por inundaciones en alta, media o baja, según la Tabla 1.

Parámetro	Valor de Referencia	Calificación de Amenaza
	$< 1*10^3$	B
(*NMP*/mL)	$1*10^3$ $1*10^5$	M
	$> 1*10^5$	A

TABLA 1.
Amenaza sanitaria por Microorganismos

4.3. Amenaza Sísmica

La definición de la amenaza sísmica se basó en el trabajo "Instrumentación y Microzonificación Sísmica del Área Urbana de Medellín", publicado por el grupo sismológico de Medellín, la Alcaldía de Medellín y el SIMPAD. En este trabajo se definieron catorce zonas homogéneas cuyo espectro de respuesta (aceleración pico efectiva horizontal medida en porcentajes de g[2]) es similar en función de las características geológicas, geomorfológicas, morfodinámicas y otras.

De lo anterior, para clasificar la amenaza sísmica en la ciudad de Medellín, se establece un criterio cualitativo, alto, medio o bajo, de acuerdo con la zona homogénea en la que se encuentre la cuenca y la aceleración de la gravedad correspondiente según el trabajo mencionado (Ver Tabla 2). Las microcuencas que se encuentren inmersas completamente en una zona homogénea tendrán un sólo valor de amenaza sísmica, mientras que las microcuencas que se encuentren en dos o más zonas homogéneas, deben asignar los valores de amenaza sísmica correspondientes a cada una de las zonas en las que se divide. Esta información debe ser consignada en un mapa temático a la escala adecuada (Zonas urbana y de expansión 1:5000 y rural 1:10000). Para las áreas rurales se tomará la calificación de la amenaza dada por la Norma Sismorresistente Colombiana, NSR–98.

Zona Homogénea	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
A max (Fracciones de g)	0.3	0.3	0.0	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.3	0.4	0.3	0.3	0.3	0.2
Zona amenaza sísmica	A	A	A	M	M	M	M	M	A	A	A	A	A	M

Tabla 2.
Cualificación de la amenaza sísmica para el área urbana de Medellín según el valor de Amax en cada zona homogénea

4.4. Amenaza por Movimientos en masa

La zonificación de la *amenaza por movimientos en masa*, se apoya en el enfoque geomorfológico y discrimina la cuenca en zonas de amenaza alta, moderada y baja. Dicha clasificación es importante en cuanto a que la amenaza por movimiento en masa condiciona el uso del suelo mediante restricciones de tipo constructivo, de protección, de conservación del uso actual o de cambio hacia otro uso acorde con el nivel de amenaza, entre otras.

En cada una de las zonas geomorfológicamente homogéneas clasificadas en la cuenca será determinada la morfodinámica, la cual relaciona la erosión, cantidad, grado de actividad y volúmenes movidos por los deslizamientos o movimientos en masa cartografiados en la cuenca. Se tendrá entonces un valor cualitativo de la morfodinámica para cada zona homogénea que corresponderá, al ser cartografiada en el mapa, a la zonificación de la amenaza por movimientos en masa. La zonificación puede realizarse sobre áreas en las que se tiene información de la ocurrencia de deslizamientos o sobre áreas en las cuales no se tiene información de deslizamientos en el pasado pero en las que se requiere predecir la posibilidad de amenazas hacia el futuro, para lo cual la zonificación se basa en un mapeo indirecto con base en los factores que contribuyen a su ocurrencia.
La metodología combina una serie de mapas para producir el de zonificación de amenaza por movimientos en masa, tal como lo muestra la Figura 1.

2. g: *aceleración de la gravedad. g = 9.8 m/s2.*

FIGURA 1.
Metodología para la zonificación de amenaza por movimientos en masa

La superposición de los mapas se realiza mediante reglas lógicas y generará una segmentación de la zona de estudio tal que se definen las zonas con diferentes niveles de amenaza por movimientos en masa. Esta zonificación se basará en los siguientes criterios:

Amenaza Alta: es una zona homogénea de morfodinámica A o M y con un uso del suelo tal que lo mantenga sin protección ante los agentes meteóricos (cultivos estacionales o limpios) o que le genere cambios en la estabilidad de su masa (banqueos, cortes y movimientos de tierra debidas a ocupación no planificada o taludes de carreteras sin diseño adecuado). *Amenaza Media:* es una zona homogénea con morfodinámica media o baja y con uso del suelo tal que proteja el terreno (cultivos permanentes o uso residencial normalizado) o que no lo proteja, respectivamente. *Amenaza Baja:* es una zona homogénea con morfodinámica baja y sin intervención humana o que ésta sea poco agresiva con el terreno.

5. VULNERABILIDADES

La forma en que los seres humanos entienden, conviven, enfrentan y son afectados por las amenazas, depende a su vez de variables tan diversas como la economía, la interacción con otras personas o grupos sociales, las creencias religiosas y políticas, los conflictos armados y su postura ante ellos, la educación, la edad, el sexo, etc. Estas condiciones humanas hacen que cada grupo social sea más o menos vulnerable a la ocurrencia de eventos amenazantes y determinan la manera de aproximarse al conocimiento de dicha vulnerabilidad.

La propuesta encaminada a determinar los grados de exposición social, económica y físico-espacial específicos ante cada una de las amenazas naturales, pretende considerar tantas implicaciones y consecuencias, como sea posible, ante la ocurrencia de un evento natural en un lugar y tiempo dados y lograr mejor utilización y/o planificación del territorio por parte de las comunidades asentadas allí.

Para tal fin, se han estudiado los ya mencionados dominios espacial y temporal de las amenazas y se han identificado las condiciones sociales, económicas y físico espaciales que se les relacionan y determinan la vulnerabilidad ante ellas. Por citar algunos ejemplos, la vulnerabilidad ante un sismo está en función, ente otras cosas, del tipo de edificación y el número de personas que la habiten, de la existencia de brigadas de socorro y planes de contingencia y de la capacidad de recuperarse de las pérdidas de vidas y bienes materiales que puedan presentarse, mientras que la vulnerabilidad ante un evento de inundación está en función de la proximidad a los cauces, de la existencia de alarmas y planes de evacuación hacia lugares elevados y alejados, de la altura y estilo constructivo de las edificaciones asentadas en las riberas de las corrientes y de su ubicación en el contexto de la cuenca. Adicionalmente, el dominio geográfico de la amenaza al sismo es, en general, más amplio que el dominio espacial de la amenaza de inundación, lo que consecuentemente condiciona la vulnerabilidad ante ellos y el dominio temporal es más grande pues la recuperación de un evento sísmico puede prolongarse por más tiempo.

5.1. Vulnerabilidad Sociocultural

La *vulnerabilidad social* es función del grado de organización de la comunidad y del bienestar y conformación de la misma. Los factores de vulnerabilidad social buscan determinar el grado de organización y

cohesión interna de las comunidades y su capacidad para prevenir, mitigar o responder a situaciones de desastre. Para determinar el nivel de vulnerabilidad social en la microcuenca, se evalúan diferentes indicadores estimados a partir de información primaria y secundaria disponible. A nivel de información primaria se diseñó una encuesta socioeconómica por hogar (Universidad Nacional, Corantioquia, Mi Río, 2003).

Los indicadores considerados para determinar la vulnerabilidad social son: *educación* (asociado con la variables: grado de escolaridad de los jefes de hogar, índice de ausentismo escolar, los programas de educación y prevención de desastre y el programa de educación en salud), *factor poblacional* (asociado con las variables: densidad de población, característica etáreas de la población, número de hogares por vivienda y promedio de personas que habitan por vivienda) y *factor organizativo comunitario* (asociado con las variables: dinámica organizativa de las comunidades, su niveles de interacción con otras organizaciones y su capacidad para formular, ejecutar y hacerle seguimiento a programas en prevención, mitigación y atención de desastres).

En las Tablas 3, 4 y 5 se presentan las calificaciones dadas para cada uno de los criterios asociados a los indicadores población, educación y factor organizativo comunitario, ante cada tipo de amenaza. En las Tablas 6 y 7 se presentan las reglas lógicas de decisión que permitirán reclasificar la vulnerabilidad social de manera integrada en B, M o A, para cada amenaza.

El proceso de construcción de las reglas se basó en un ejercicio de jerarquización de la importancia que sobre la vulnerabilidad tienen los diferentes indicadores. Por ejemplo el indicador *Grupos Etáreos* puede decidir sobre la vida humana ante un evento de emergencia sanitaria caracterizado por enfermedad en la población más joven, o ser determinante durante la inundación. Sin embargo durante un evento sísmico, la población de todas las edades puede ser igualmente afectada.

Población		Vulnerabilidad			
Criterios evaluadores		**A I**	**A S**	**A MM**	**A Sanitaria**
Densidad de población Hab/ha	Entre 301 y 400	A	A	A	
	Entre 201 y 300	A	A	A	A
	Entre 1 y 200	M	M	M	M
Características de la población por grupos de edad	Menores de 14 años	A		A	A
	Mayores de 64 años	A		A	A
	De 40 a 64 años	M		M	M
	De 15 a 35 años	M		M	M
Número de personas por vivienda	Menos de 5 personas	M	M	M	M
	Más de 5 personas	A	A	A	A

TABLA 3.
Evaluadores de vulnerabilidad social. Indicador Población

Educación			Vulnerabilidad			
Criterios evaluadores			**A I**	**A S**	**A MM**	**A Sanitaria**
Grado de escolaridad de los jefes de hogar		Primaria completa	M		M	M
		Algún grado de primaria	A		A	M
		Ningún grado de escolaridad	A		A	A
Cobertura educativa en básica primaria y básica secundaria	En básica primaria	> 30% de niños por fuera del sistema educativo	A		A	A
		Entre 20 y 30%	A		A	A
		Menor del 20%	M		M	M
	En básica secundaria	> 30% de jóvenes por fuera del sistema educativo	A		A	A
		Entre 20 y 30%	M		M	M
		Menor del 20%	M		M	B
Plan y programa en educación y prevención de desastre a nivel escolar		Sin formular	A		A	A
		Formulado sin implementar	A		A	M
		En ejecución	M		M	M

TABLA 4.
Evaluadores de vulnerabilidad social. Indicador Educación

TABLA 5. Evaluadores de vulnerabilidad social. Indicador Organización Comunitaria

Organización Comunitaria	Vulnerabilidad			
Criterios evaluadores	A I	A S	A MM	A Sanitaria
Interactúan con organismos de socorro y/o con el Sistema Municipal de Prevención, (comités de emergencia)	B	M	M	B
Interactúan con otras organizaciones del sector, incluyendo el educativo	M	A	M	M
Organizaciones que actúan independientemente de las demás y no tienen ningún plan de emergencias y desastres	A	A	A	A

Con base en la definición de los indicadores, se obtiene una clasificación para la vulnerabilidad ante la inundación; así por ejemplo si el indicador *número de personas por vivienda* es clasificado como de vulnerabilidad A ante la inundación (más de 5 personas por vivienda, Tabla 3), entonces la vulnerabilidad ante la inundación de la zona evaluada es A sin importar otros criterios. Si el mismo indicador es clasificado como moderado se darán otras combinaciones, por ejemplo, si los grupos etáreos presentes en la zona son clasificados como de vulnerabilidad A (menores de 14 años, mayores de 64 años, Tabla 3), no existe organización comunitaria (Tabla 5) y hay más de 200 hab/ha (Tabla 3) la vulnerabilidad social seguirá siendo A ante la inundación. En las columnas siguientes de la Tabla 6 se presentan los casos en que la vulnerabilidad social ante la inundación es M y B. En la Tabla 7 se presenta la vulnerabilidad ante el sismo, para la cual interesan principalmente dos factores, la densidad de población y el grado de organización comunitaria. Si al menos uno de ellos es clasificado como de vulnerabilidad A, entonces la vulnerabilidad social ante el sismo es A.

TABLA 6. Reglas de decisión para la vulnerabilidad social ante la inundación

	Clasificación de vulnerabilidad social ante la inundación			
Densidad de población		A - M	M	M
Grupos etáreos		A		M
Número de personas por vivienda	A	M	M	M
Organización comunitaria		A	M	B
Vulnerabilidad	A	A	M	B

TABLA 7. Reglas de decisión para la vulnerabilidad social ante el sismo

	Clasificación de vulnerabilidad social ante el sismo		
Densidad de población	A		M
Organización comunitaria		A	M
	A	A	M

5.2. Vulnerabilidad Económica

La *vulnerabilidad económica* determina la capacidad de respuesta de los habitantes y la comunidad en su conjunto para atender, con medios propios, acciones de prevención y mitigación o en casos más desafortunados los efectos de un desastre, por sismo, inundación y/o deslizamiento.

Los indicadores considerados para determinar el nivel de vulnerabilidad económica son: *usos y tenencia de vivienda o predio, ingreso y empleo*, calculadas según los datos de la encuesta por hogar (Universidad Nacional, Corantioquia, Mi Río, 2003).

El indicador *usos y tenencia de vivienda o predio* se refiere a los usos y características de tenencia de la vivienda o predio en una comunidad, urbana o rural, según sea el caso. Está en función al *uso* (proporción de viviendas o predios con actividad productiva de bienes y/o servicios de los sectores primario, secundario o terciario a menor escala) y *tenencia* (forma de apropiación de la vivienda: propia, en arriendo, invasión y otra forma). El *ingreso* mide la capacidad económica de las familias de un asentamiento para prevenir, soportar o afrontar los efectos de una amenaza natural. Se establece a través del ingreso familiar conformado por los ingresos monetarios percibidos por los hogares, valorados en salarios mínimos legales vigentes (smlv). Para su cálculo se requiere: información actualizada a un año base, medición por salario mínimo/hogar del año respectivo y desagregación con la unidad de análisis. El *empleo* se refiere a la estructura de empleo y posibilidades

de acceso a fuentes de trabajo que caracterizan a una comunidad. Está en función del *Índice de dependencia* (relación entre el número de personas activas de la familia con empleo y las personas activas desocupadas) y el *Índice de desempleo* (proporción de la población económicamente activa que se encuentra desempleada). Los criterios evaluadores para la vulnerabilidad económica tienen los mismos pesos para todas las amenazas. Sin embargo, entre amenazas estos mismos indicadores reciben una calificación distinta, debido a que las posibles pérdidas económicas difieren mucho si se trata de un sismo, una inundación o un deslizamiento. La vulnerabilidad económica se considera según los siguientes criterios:

- Si los cinco criterios evaluadores económicos son A, independientemente del tipo de amenaza, la vulnerabilidad económica se considera A.
- Si los cinco criterios evaluadores económicos son M, independientemente del tipo de amenaza, la vulnerabilidad económica se considera M.
- Si de los cinco criterios evaluadores económicos a lo máximo dos de ellos (1 ó 2) son M o B y los restantes son A, independientemente del tipo de amenaza, la vulnerabilidad económica se considera A.
- Si de los cinco criterios evaluadores económicos al menos tres de ellos (3 ó 4) son M y los restantes son A, independientemente del tipo de amenaza, la vulnerabilidad económica se considera M.
- Si de los cinco criterios evaluadores económicos a lo máximo dos de ellos (1 ó 2) son B y los restantes son M, independientemente del tipo de amenaza, la vulnerabilidad económica se considera M.
- Si de los cinco criterios evaluadores económicos al menos tres de ellos (3 ó 4) son B y los restantes son M, independientemente del tipo de amenaza, la vulnerabilidad económica se considera B.
- Si de los cinco criterios evaluadores económicos al menos tres de ellos (3 ó 4) son B y los restantes son A, independientemente del tipo de amenaza, la vulnerabilidad económica se considera M.

5.3. Vulnerabilidad Físico Espacial

La *vulnerabilidad físico espacial* se refiere a la localización de los asentamientos humanos en zonas de amenaza y a las deficiencias en las estructuras físicas existentes allí para "absorber" los efectos de las amenazas consideradas. La vulnerabilidad física se da por dos causas básicas: la *ubicación* de las áreas urbanas sobre zonas que estén, o puedan estar, bajo amenaza (ocurrencia de evento) y por las *condiciones de la construcción* o capacidad de la infraestructura urbana de soportar un fenómeno adverso (magnitud del evento).

Los criterios propuestos para definir la vulnerabilidad físico espacial son: forma urbana, estructura urbana, accesibilidad, espacio público, edificaciones, áreas articuladoras, equipamiento, e infraestructura de servicios básicos. Para su evaluación se requiere de trabajo de campo tomando como unidades de análisis las unidades morfológicas homogéneas desde el punto de vista urbanístico.

La *Forma urbana* corresponde con la morfología de los sectores analizados, dentro de los cuales se propone la siguiente clasificación: urbanización planificada, áreas urbanas desarrolladas sin claros procesos de planificación y procesos de invasión. *Estructura urbana*, se refiere a la estructura de funcionamiento de cada uno de los barrios y de la morfología que ellos generan. Se evalúa de acuerdo con la existencia o no de centralidades (presencia de al menos una centralidad, inexistencia de centralidades). La *Accesibilidad* se refiere a la facilidad con que se cuenta para evacuar o atender a la población en caso de ocurrencia de algún evento que bien sea sismo, deslizamiento o inundación. Se evalúa en función a: la articulación con un sistema vial, al menos por una vía arteria; articulación con el sistema vial, al menos por una vía colectora; desarticulado; presencia de transporte público; ausencia de transporte público. El *Espacio Público* hace alusión a las áreas articuladoras y se evalúa en función a: la presencia de más de un espacio público efectivo, presencia de al menos un espacio público efectivo y ausencia de espacios públicos efectivos. Las *Edificaciones* son un criterio en función a la tipología urbana y usos del suelo. Las *Áreas articuladoras* se refiere, especialmente, a las vías, y sólo se analizan ante las amenazas de inundación y deslizamiento, pues ante estas amenazas, las condiciones de las vías pueden llegar a facilitar la evacuación o en el caso de la inundación acentuar los efectos del evento, pues la red vial puede asimilarse a la red de drenaje. El *Equipamiento* se analiza en función de la presencia de al menos un equipamiento de salud y/o educación, por fuera de las áreas de amenaza o ausencia total de equipamientos de educación y/o salud. Se considera que su localización en áreas de amenaza alta, es comparable con la ausencia total del equipamiento. Para la *Infraestructura básica de servicios* se consideran que las

siguientes son redes de servicios públicos cuyo daño aumenta la vulnerabilidad de la comunidad: energía eléctrica (forma como se realizan las instalaciones), acueducto, alcantarillado y transporte de hidrocarburos.

En las Tablas 8, 9 y 10 se presentan las reglas lógicas de decisión que permitirán reclasificar la vulnerabilidad físico espacial de manera integrada en baja (B), moderada (M) o alta (A), para cada amenaza, una vez calificados cada uno de los evaluadores.

TABLA 8.
Reglas de decisión para la vulnerabilidad físico espacial ante la inundación

	Clasificación de vulnerabilidad físico espacial ante la inundación															
Forma	A	M	M		M				M				M			
Estructura																
Accesibilidad					A - M				B				B			
Espacio Público																
Vías				A $_{\text{lámina}}$ / A $_{\text{velocidad}}$			M $_{\text{lámina}}$ / M $_{\text{velocidad}}$				B $_{\text{lámina}}$ / B $_{\text{velocidad}}$					
Infraestructura de servicios		A			M				B				B			
Edificaciones	A															
	A	A	A		A				M				B			

TABLA 9.
Reglas de decisión para la vulnerabilidad físico espacial ante el sismo

	Clasificación de vulnerabilidad físico espacial ante el sismo							
Forma	A	M	M		M	M	M	B
Estructura		A	M		M	A		B
Accesibilidad		A	M		M - B	M		B
Infraestructura de servicios				A	M	M	A	B
Edificaciones			A	M	M	M	B	B
	A	A	A	A	M	M	M	B

TABLA 10.
Reglas de decisión para la vulnerabilidad físico espacial ante el movimiento en masa

	Clasificación de vulnerabilidad físico espacial ante el movimiento en masa					
Forma	A	M	M	M	M - B	B
Estructura						
Accesibilidad		A	M	M	M	M - B
Espacio Público						
Vías			A	M	M	B
Infraestructura de servicios			A		M	B
Edificaciones				M	M	B
	A	A	A	M	M	B

Fuente: El proyecto Universidad Nacional, 2003.

6. RIESGO

Como se dijo anteriormente, la amenaza y la vulnerabilidad responden a fenómenos complejos y el riesgo no es la excepción. La manera misma en que estos dos elementos se combinan es difícil de establecer y entender, a pesar de que se ha generalizado el uso de una relación directa entre ellas, es decir, que riesgo es igual a amenaza por vulnerabilidad ($R = A \times V$).

La estimación del riesgo (valor esperado de la pérdida) se puede basar en modelos estadísticos, en comparaciones con los resultados de eventos anteriores sobre comunidades diversas o en combinaciones de éstos, entendiendo que en cualquier método utilizado hay incertidumbres asociadas que no siempre son detectables, medibles o controlables. Además, tradicionalmente, se han hecho análisis que implícitamente consideran a la amenaza y la vulnerabilidad como conceptos totales, generando sub o sobreestimaciones del riesgo que afectan desfavorablemente las políticas de uso del territorio o que exponen a la comunidad más allá de lo permisible. Para la definición de cada uno de los riesgos específicos considerados, se presentan las Tablas de decisión para cada combinación vulnerabilidad - amenaza, ya que dicha combinación no es trivial sino que el resultado, riesgos altos, medios y bajos, dependerá de los impactos espaciales y temporales de la Vulnerabilidad y la Amenaza en cada caso. Para el riesgo se obtendrá entonces, un mapa específico para cada amenaza, por ejemplo mapa de riesgo ante la inundación, movimiento en masa o sismos. A continuación se presentan las Tablas de decisión para la construcción de cada uno de los mapas de riesgo y los mapas base para dicha construcción

Amenaza por inundación	Vulnerabilidad físico - espacial	Vulnerabilidad económica	Vulnerabilidad sociocultural	Riesgo asociado a la inundación	Amenaza por inundación	Vulnerabilidad físico - espacial	Vulnerabilidad económica	Vulnerabilidad sociocultural	Riesgo asociado a la inundación
A	A			A	M	A			M
	M	A		A		M	A		M
	M	M	A	A		M	M	A	M
	M	M	M	M		M	M	M	B
	M	M	B	M		M	M	B	B
	M	B	A	M		M	B	A	B
	M	B	M	M		M	B	M	B
	M	B	B	B		M	B	B	B
	B	A		A		B	A		M
		M	A	M			M	A	B
			M - B	B				M - B	B
		B	A	M			B	A	B
			M - B	B				M - B	B

TABLA 11.
Reglas lógicas de decisión para la definición del riesgo asociado a la inundación

Amenaza Sanitaria asociada a la inundación	Vulnerabilidad físico - espacial	Vulnerabilidad económica	Vulnerabilidad sociocultural	Amenaza por movimiento en masa	Amenaza por movimiento en masa	Vulnerabilidad físico - espacial	Vulnerabilidad económica	Vulnerabilidad sociocultural	Riesgo asociado al movimiento en masa
A	A			A	M	A			M
	M	A		A		M	A		M
	M	M	A	A		M	M	A	M
	M	M	M	M		M	M	M	B
	M	M	B	M		M	M	B	B
	M	B	A	M		M	B	A	B
	M	B	M	M		M	B	M	B
	M	B	B	B		M	B	B	B
	B	A		A		B	A		M
	B	M	A	M		B	M	A	B
	B	B	M - B	B		B	B	M - B	B

TABLA 12.
Reglas lógicas de decisión para la definición del riesgo sanitario asociado a la inundación

Amenaza sísmica	Vulnerabilidad físico - espacial	Vulnerabilidad económica	Vulnerabilidad sociocultural	Riesgo asociado al sismo	Amenaza sísmica	Vulnerabilidad físico - espacial	Vulnerabilidad económica	Vulnerabilidad sociocultural	Riesgo asociado al sismo
A	A			A	M	A			M
	M	A		A		M	A		M
	M	M	A	A		M	M	A	M
	M	M	M	M		M	M	M	B
	M	M	B	M		M	M	B	B
	M	B	A	M		M	B	A	B
	M	B	M	M		M	B	M	B
	M	B	B	B		M	B	B	B
	B	A		A		B	A		M
		M	A	M			M	A	B
			M - B	B				M - B	B
		B	A	M			B	A	B
			M - B	B				M - B	B

TABLA 13.
Reglas lógicas de decisión para la definición del riesgo asociado al sismo

TABLA 14.
Reglas lógicas de decisión para la definición del riesgo asociado al movimiento en masa

Amenaza por movimiento en masa	Vulnerabilidad físico - espacial	Vulnerabilidad económica	Vulnerabilidad sociocultural	Riesgo asociado al movimiento en masa	Amenaza por movimiento en masa	Vulnerabilidad físico - espacial	Vulnerabilidad económica	Vulnerabilidad sociocultural	Riesgo asociado al movimiento en masa
A	A			A	M	A			M
	M	A		A		M	A		M
	M	M	A	A		M	M	A	M
	M	M	M	M		M	M	M	B
	M	M	B	M		M	M	B	B
	M	B	A	M		M	B	A	B
	M	B	M	M		M	B	M	B
	M	B	B	B		M	B	B	B
	B	A		A		B	A		M
		M	A	M			M	A	B
			M - B	B				M - B	B
		B	A	M			B	A	B
			M - B	B				M - B	B

6. APLICACIÓN

Se presentan a continuación los resultados obtenidos para la definición del riesgo en la parte baja de la microcuenca de la quebrada La Iguana, ciudad de Medellín, Colombia. La cuenca presenta una situación ambiental general bastante compleja, siendo los problemas de índole social los más críticos. Hay predominancia de asentamientos en los estratos medios a bajos, con altos índices de desempleo, y donde se han asentado diferentes actores del conflicto armado de la ciudad, generando una situación de conflicto entre estos grupos bastante activa y con tendencia a agravarse, impidiendo, incluso, la entrada del Estado a ciertas zonas de la cuenca. Se encuentran los problemas típicos de la ocupación urbana tales como: hacinamiento, ocupación de zonas de retiro y de alto riesgo, espacio público inadecuado, deficiente cobertura vial, servicios de transporte público limitado, desempleo, altos índices de violencia, generalización del conflicto, poca o ninguna presencia institucional, bajos índices de escolaridad, poca o ninguna participación ciudadana, zona rural muy intervenida, cobertura de servicios públicos (especialmente de agua potable) en algunas zonas deficiente, vertimientos directos a las quebradas, manejo inadecuado de los residuos sólidos, ausencia de programas de educación ambiental o de apoyo a la comunidad.

En las figuras 2 a 7 se presentan los mapas temáticos resultado de la aplicación de la metodología y correspondientes al riesgo asociado a cada una de las amenazas. En dichas figuras se resalta la línea del cauce de la quebrada La Iguaná. Las convenciones de color se conservan en todos ellos, siendo el rojo para la calificación de ALTA (vulnerabilidad, amenaza y/o riesgo Alto), el naranja o amarillo para Moderado y el verde para Bajo. El amarillo claro es para zonas sin información.

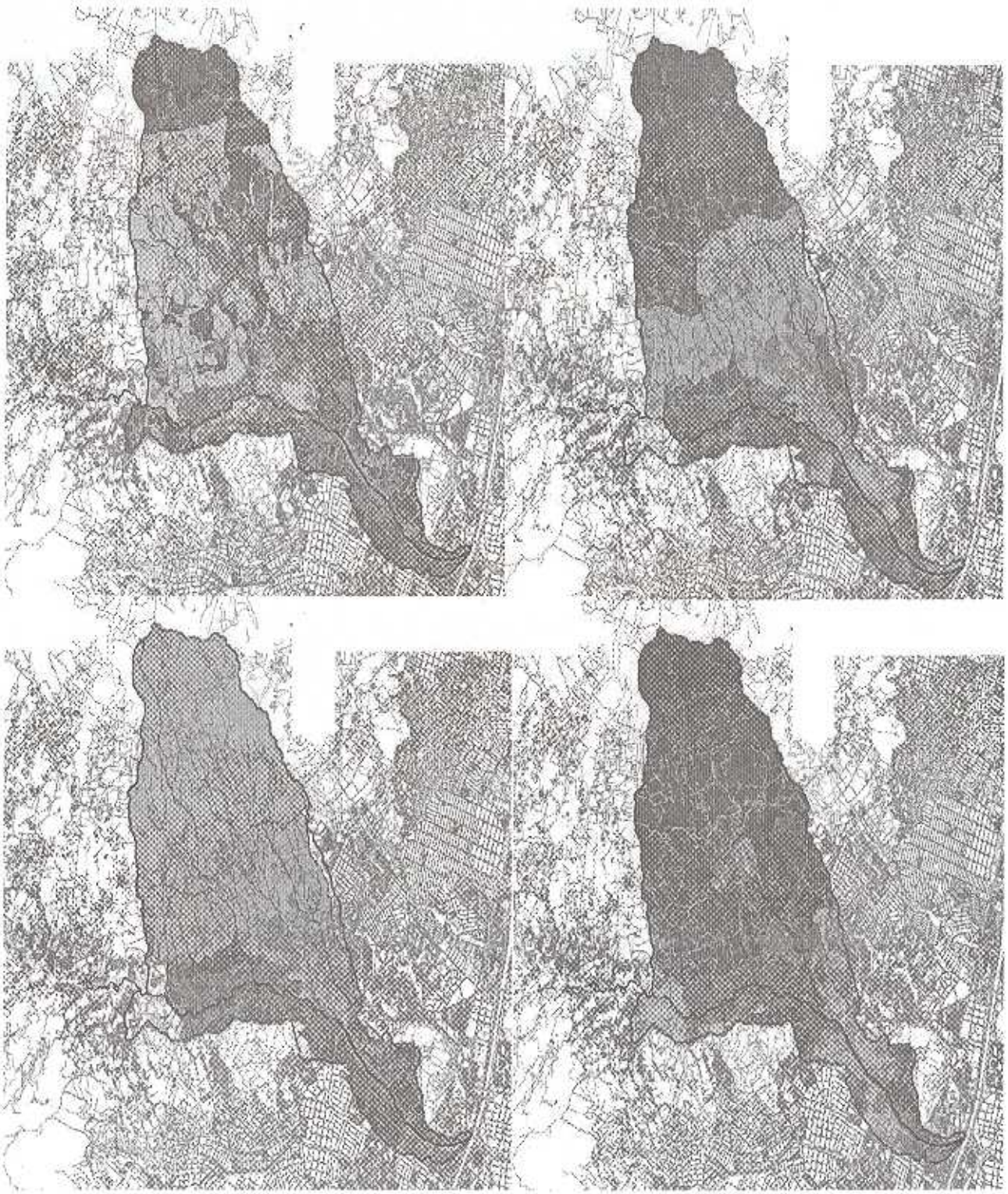

FIGURA 2.
Secuencia de mapas temáticos para la definición del riesgo por Movimiento en Masa.
Arriba izquierda: Mapa de Amenaza por MM.
Arriba derecha: Mapa de Vulnerabilidad Social por MM.
Abajo izquierda: Mapa de Vulnerabilidad Económica por MM.
Abajo derecha: Mapa de Vulnerabilidad Físico Espacial por MM

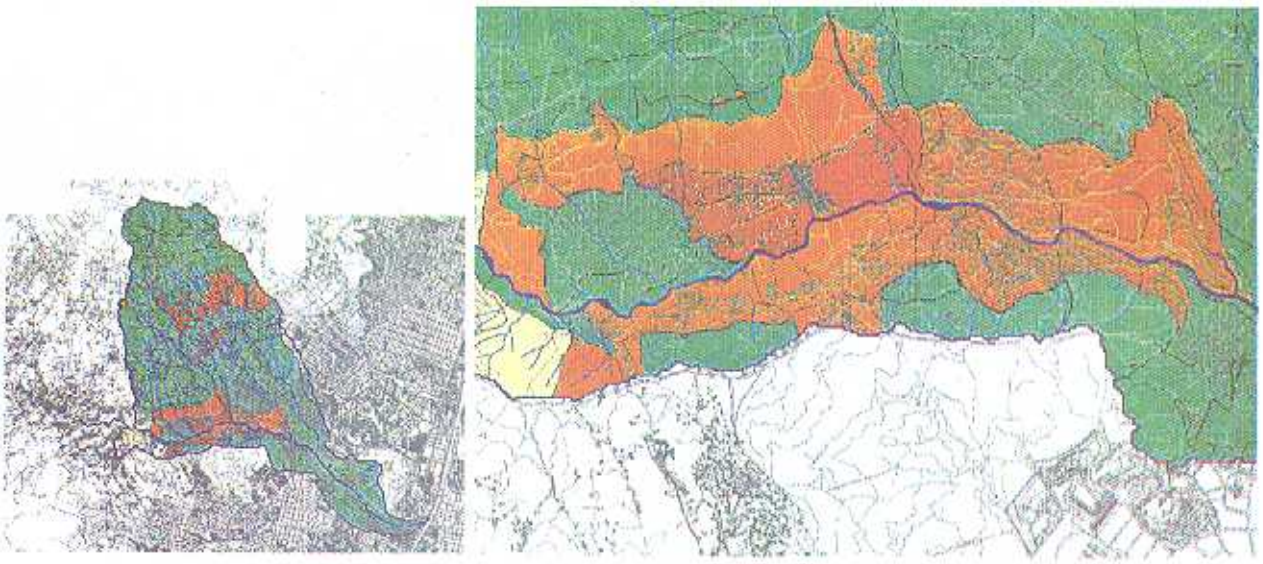

FIGURA 3.
Riesgo asociado al movimiento en masa. Nótese en el recuadro la divisoria de la zona de estudio.

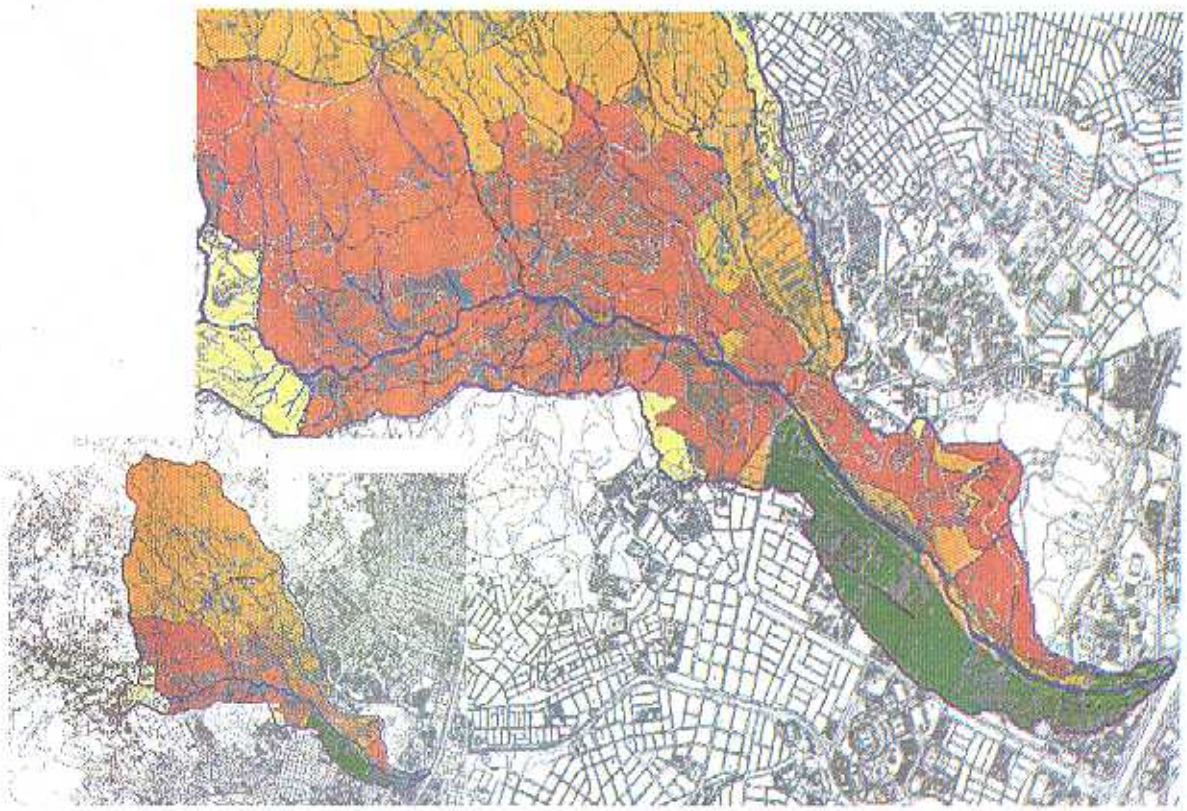

FIGURA 4.
Riesgo asociado al sismo. Ampliación de la zona urbana de la cuenca de la quebrada La Iguaná

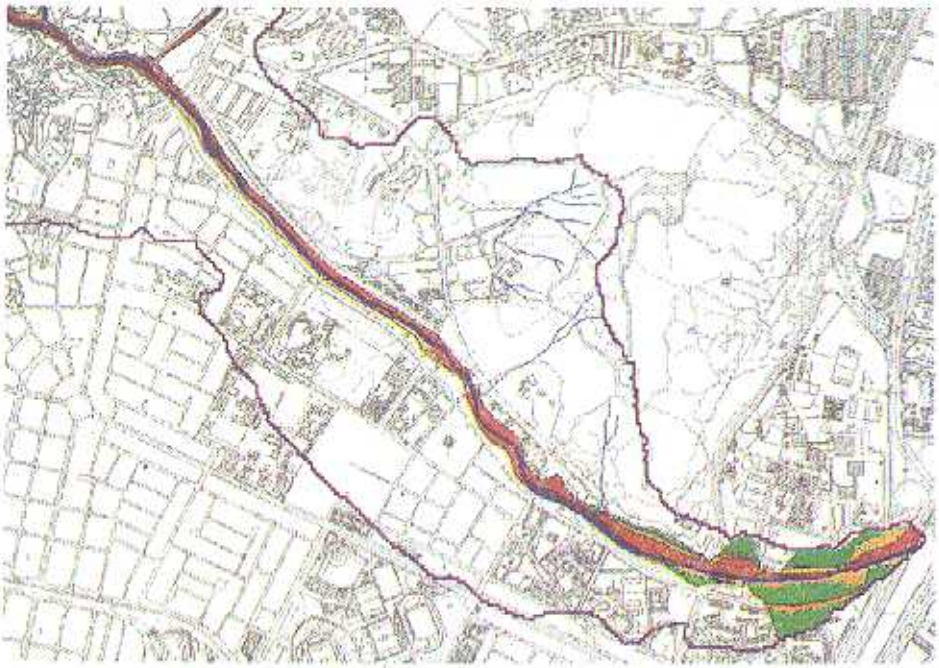

FIGURA 5.
Riesgo asociado a la inundación. Izquierda: Ampliación de la zona de llanura de inundación de la cuenca de la quebrada La Iguaná.

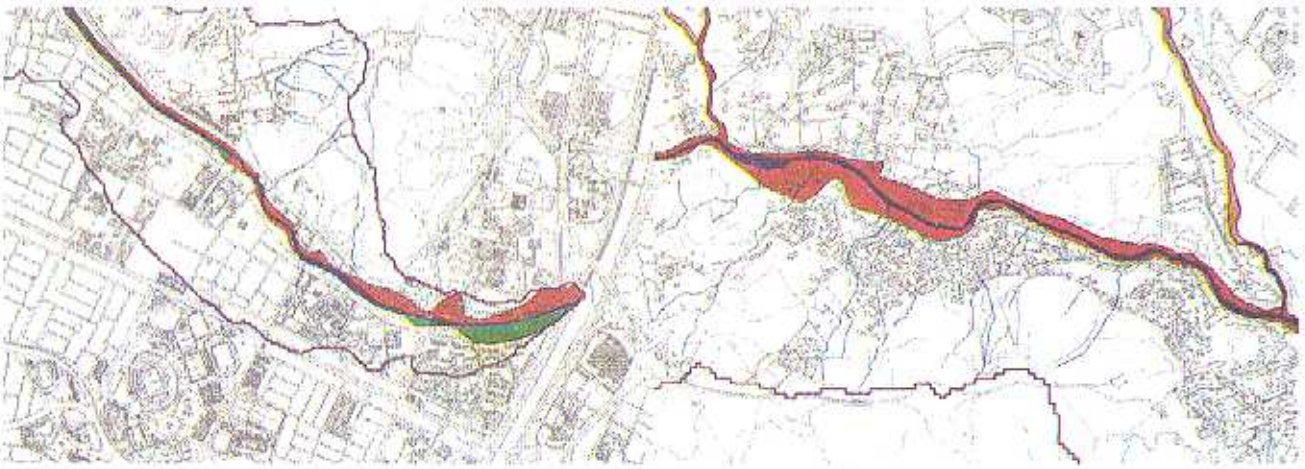

FIGURA 6.
Riesgo sanitario asociado a la inundación.
Izquierda: Ampliación de la zona de llanura de inundación de la microcuenca.
Derecha: Ampliación de la zona de montaña de la cuenca

7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Se desarrolló una metodología para la evaluación del riesgo acorde con los objetivos de uso sostenible del territorio, partiendo de las cuencas como elementos estructurantes del mismo, en las que los elementos naturales y culturales están en continua interacción. La metodología propuesta permite a los decisores tener un conocimiento preciso de los elementos que componen el riesgo en la cuenca y por ende hacer un uso diferencial y adecuado del territorio. La propuesta consiste en evaluar las combinaciones amenaza – vulnerabilidad, para las amenazas por inundación, sismo y movimiento en masa y las vulnerabilidades social, económica y físico espacial, de manera separada presentando no un mapa de riesgo total sino 3 mapas de riesgo asociados a la inundación, al sismo y al movimientos en masa en la cuenca. Lo anterior es importante ya que todos estos riesgos

considerados tienen dominios espaciales y temporales diferentes y por tanto exigen tratamientos específicos en cuanto a restricciones al uso del suelo, planificación y proyectación urbana y políticas sociales.

La metodología fue aplicada en la cuenca de la quebrada La Iguana, en la ciudad de Medellín, Colombia y se espera sea el modelo para el ordenamiento de cuencas en la ciudad en el futuro. La metodología, por estar soportada en SIG, permite adaptar y mejorar las reglas de decisión en el tiempo de acuerdo a las necesidades de la ciudad y su medio natural y social.

La cuenca de la quebrada La Iguaná, es una cuenca urbana, que por sus características naturales y socio culturales, es uno de los ejemplos mas interesantes y complejos de la ciudad; con una altisima presión por el suelo urbano, la propuesta de evaluación de riesgos por separado permitirá realizar la planificación del desarrollo sobre la cuenca minimizando la exposición de la comunidad, al mismo tiempo que se logrará realizar un diagnóstico preciso de la situación actual de las comunidades en la misma.

8. AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Instituto Mi Río y a la Secretaría del Medio Ambiente de la ciudad de Medellín y a la corporación autónoma regional CORANTIOQUIA por el apoyo brindado en el análisis y propuesta metodológica para la definición de retiros en cuencas altamente intervenidas, dentro del proyecto Metodología para los Planes Integrales de Ordenamiento y Manejo - PIOM – y su Aplicación a la parte baja de la Microcuenca de la quebrada La Iguaná.

9. BIBLIOGRAFÍA

ÁREA METROPOLITANA, 2002. Microzonificación sísmica del Valle de Aburrá y definición de amenaza por movimientos en masa en el Valle de Aburrá. Medellín. INGEOMINAS, INTEGRAL, Universidad EAFIT, Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Minas, SIMPAD.

Universidad Nacional de Colombia, CORANTIOQUIA, Instituto Mi Río en liquidación, 2003. Diseño de la Metodología para la Formulación de Planes de Ordenamiento y Maneo de Microcuencas – PIOM – y su aplicación a la parte baja de la Cuenca de la quebrada La Iguana. Informe Final. Medellín, Colombia.

UNDRO, 1979. Natural disasters and vulnerability analysis, Report of Experts Group Meeting. Ginebra.