

Evaluación Holística del Riesgo Sísmico de la Ciudad de Bogotá

Torres-Acosta Andrei, Díaz-Parra Fernando

*Fondo de Prevención y Atención de Emergencias de Bogotá FOPAE - Coordinación de Investigación y Desarrollo
Enero de 2012*

Resumen

La holística es una aproximación conceptual y metodológica para la evaluación del riesgo en la que se considera que el comportamiento de un sistema expuesto a una amenaza debe ser determinado mediante un análisis integral y multidisciplinario de las partes que lo componen y basado en la integración total de sus propiedades y relaciones. Esta aproximación ha sido empleada por algunos autores para la evaluación del riesgo sísmico de Bogotá en las que el riesgo se expresa como la combinación de factores de exposición física, fragilidad socioeconómica y falta de resiliencia. El presente trabajo complementa los resultados de estos anteriores en tres aspectos: 1) mediante el uso de los resultados de los estudios más recientes de amenaza sísmica y de escenarios de daño, 2) a través de información actualizada sobre las características sociales y económicas de la ciudad y 3); utilizando dos escalas de análisis (Localidades y Unidades de Planeamiento Zonal).

En este documento se presenta una síntesis de los enfoques conceptuales y metodologías existentes para la evaluación del riesgo y de los resultados obtenidos por los estudios previos y una metodológica complementaria basada en una propuesta de indicadores de riesgo y evaluación multicriterio EMC. En total se formularon y evaluaron 19 indicadores de riesgo físico, 11 indicadores de fragilidad socioeconómica y 18 de falta de resiliencia. La evaluación se realizó para las dos escalas de análisis enunciadas y para cuatro escenarios de amenaza sísmica. Los resultados de la evaluación que se presentan en términos de índices relativos de riesgo físico, fragilidad socioeconómica, falta de resiliencia y riesgo total por sismo permiten comparar cuantitativamente los factores de riesgo y el riesgo total por sismo entre las diferentes unidades administrativas con el fin de identificar y priorizar acciones dentro de un modelo de gestión integral del riesgo.

1 INTRODUCCIÓN

La Coordinación de Investigación y Desarrollo del Fondo de Prevención y Atención de Emergencias FOPAE de la ciudad de Bogotá, tiene a cargo adelantar diferentes actividades para la gestión integral del riesgo. Específicamente, bajo la actividad de “Identificación del Riesgo” se realizan diferentes estudios técnicos para mejorar el conocimiento sobre amenazas naturales y antrópicas no intencionales. El plan de acción del año 2011 contempló la ejecución de un estudio cuyo objetivo fue establecer un marco conceptual y un modelo de evaluación del riesgo sísmico desde una perspectiva holística, en la que el riesgo se expresa como la combinación de factores de exposición física, fragilidad socioeconómica y resiliencia mediante un análisis integral y multidisciplinario.

Existen varios estudios cuyo objetivo ha sido el de mejorar el conocimiento del factor exposición física por sismo entre los cuales están el “Estudio General de Amenaza Sísmica” (AIS, 1996), la “Microzonificación Sísmica de Santafé de Bogotá” (Ingeominas & Universidad de los Andes, 1997), escenarios de amenaza y escenarios de daño por sismo (Cardona O. D., 1997), (JICA, 2002), (CEDERI, 2005), y el “Estudio General de Amenaza Sísmica” (AIS, 2009). Respecto a la evaluación holística del riesgo sísmico para la ciudad existen las investigaciones “Estimación holística del riesgo sísmico utilizando sistema dinámicos complejos” (Cardona O. D., 2001), “Técnicas innovadoras para la evaluación del riesgo sísmico y su gestión en centros urbanos” (Carreño, 2006) y el proyecto “Indicators of disaster risk and disaster risk management” (IDB-IDEA-ERN, 2008).

Este trabajo busca complementar los resultados de los trabajos anteriores en tres aspectos: 1) mediante el uso de los resultados de los estudios “Zonificación de la Respuesta Sísmica de Bogotá” (FOPAE, 2010), y “Actualización y sistematización de escenarios de daños por terremoto para Bogotá” (DPAE, 2009), (FOPAE, 2010) los cuales presentan información actualizada sobre escenarios de amenaza y riesgo

físico por sismo; 2) a través del uso de información más reciente (años 2007 a 2011) sobre las características sociales y económicas de la ciudad y 3); realizando la evaluación a una escala más detallada (Unidad de Planeamiento Zonal). El resultado de este ejercicio permite contar con información más adecuada para definir estrategias de gestión del riesgo sísmico y establecer futuras líneas de acción e investigación.

La primera parte del documento presenta una descripción de los diferentes enfoques conceptuales y metodologías existentes para la evaluación del riesgo, así como una síntesis de los resultados obtenidos por los estudios de evaluación del riesgo sísmico de la ciudad. En la segunda parte del documento se presenta la propuesta metodológica adoptada para la ejecución del presente estudio la cual está basada en metodologías de evaluación holística mediante indicadores de riesgo y EMC aplicadas previamente en Bogotá (Cardona, 2001; Carreño, 2006). Con base en los escenarios de daño por terremoto (DPAE, 2009; FOPAE, 2010; FOPAE, 2011) se formularon y evaluaron 19 indicadores de riesgo físico, a partir de la información socioeconómica actualizada de la ciudad se evaluaron 11 indicadores de fragilidad y 18 indicadores de capacidad de respuesta partir de información del SDPAE. De acuerdo con la división administrativa de la ciudad la evaluación se realizó en dos escalas de análisis: una general a escala de localidad (19 unidades) y una más detallada a escala de Planeamiento Zonal (119 unidades). Los resultados de la evaluación se presentan en términos de índices relativos de riesgo físico, fragilidad socioeconómica, capacidad de respuesta y riesgo total por sismo y permiten comparar cuantitativamente los factores de riesgo y el riesgo total por sismo entre las diferentes unidades de análisis y para los diferentes escenarios de amenaza sísmica considerados.

Finalmente se presenta una discusión sobre la metodología implementada y los resultados obtenidos por este estudio y se hacen una serie de recomendaciones con la finalidad de establecer estrategias de reducción del riesgo sísmico y futuras líneas de trabajo e investigación.

2 EVALUACION HOLÍSTICA DEL RIESGO

2.1 Holística

La holística es una aproximación científica para el análisis de sistemas complejos en la que se considera que las propiedades de un sistema no pueden ser determinadas mediante el análisis individual de las partes que lo componen sino mediante una concepción basada en la integración total de sus propiedades e interrelaciones.

Esta aproximación ha sido empleada en diferentes campos de la ciencia para el análisis de diversos problemas y en consecuencia no cuenta con una única definición, sin embargo es posible identificar tres características fundamentales: 1) El objeto de estudio es un sistema complejo, 2) El análisis es multidisciplinario y 3) Se reconoce la importancia de las interrelaciones entre las partes para determinar el comportamiento del sistema.

Desde esta perspectiva se busca llenar los vacíos que presenta la aproximación analítica (o reduccionista), en la que el análisis de un sistema complejo se limita al análisis de las propiedades individuales de sus partes.

2.2 Enfoques conceptuales y la aproximación holística para el análisis del riesgo

La evaluación del riesgo es una disciplina que se empezó a desarrollar en la década de 1980. Desde entonces se han empleado diferentes enfoques conceptuales, aproximaciones científicas y metodologías de análisis que han evolucionado a medida que mejora el conocimiento, las herramientas y los recursos técnicos de investigación.

Para el análisis de riesgos naturales se pueden identificar tres enfoques conceptuales: el tecnocrático en el que el riesgo de un sistema se expresa únicamente en términos de su grado de exposición a una amenaza dada; el estructural en el que el riesgo se expresa en términos de exposición, vulnerabilidad y capacidad del sistema frente a dicha amenaza y el de la complejidad en el que se reconoce que el análisis del riesgo debe incluir además el análisis de las relaciones entre los diversos elementos presentes en el sistema expuesto (Botero, 2009).

Los dos primeros enfoques han dado origen a diferentes modelos para la evaluación y cuantificación del riesgo basadas principalmente en la caracterización de amenazas naturales y de la vulnerabilidad y capacidad del sistema frente a dichas amenazas. Entre estos se encuentran los modelos de escenarios de daño (Chambers, 1992), el modelo riesgo externo - riesgo interno (Bohle, 2001) y el modelo amenaza - vulnerabilidad - riesgo (Turner, 2003).

Los modelos desarrollados bajo el enfoque de la complejidad han tenido un desarrollo más reciente y se han centrado, de acuerdo con su definición, en el análisis de las causas subyacentes del riesgo y las de interrelaciones entre los componentes del sistema (Hilhorst and Bankoff, 2003). Entre estos se encuentran las metodologías de análisis holístico mediante EMC (Davidson, 1997; Cardona, 2001; Carreño, 2006), redes neuronales artificiales (Cardona, 2001), análisis de componentes principales (Chardon, 1999), lógica difusa (García, 2003), árboles de decisión (Smith, 2005), modelo de causalidad (Wisner, 2004) y el marco metodológico Unión (Bogardi, 2004) y BBC (Birkmann, 2006) del Instituto para la Seguridad Humana y del Ambiente de las Naciones Unidas.

Dentro de esta diversidad de metodologías, la evaluación holística (Cardona, 2001; Carreño, 2006) ha resultado ser la más útil en términos prácticos para la cuantificación del riesgo en diferentes contextos urbanos (e.g. Earthquake and Megacities Initiative EMI, International Strategy for Disasters Reduction – ISDR, Sistema de Indicadores de Riesgo y Gestión del Riesgo del Banco Interamericano de Desarrollo). Desde este enfoque el riesgo se considera como la serie de potenciales consecuencias causadas por factores de exposición (riesgo físico ante una amenaza dada) y capacidad (en términos de fragilidad socioeconómica y falta de resiliencia). Esta noción implica que existen vínculos causales entre acciones y efectos, y que efectos indeseables pueden ser evitados o reducidos si las acciones causales son evitadas o modificadas.

La metodología propone un proceso de desagregación e integración mediante la abstracción de relaciones entre los factores involucrados mediante un modelo matemático dinámico (EMC mediante indicadores relativos de riesgo discriminados jerárquicamente). Este conjunto de indicadores corresponden a datos cualitativos o cuantitativos que se derivan de estudios de amenaza sísmica, escenarios de daño e información socioeconómica del contexto urbano a analizar. Los resultados de la evaluación se presentan en términos de índices relativos de riesgo físico, fragilidad socioeconómica, falta de resiliencia y riesgo total.

2.3 La evaluación del riesgo sísmico en Bogotá

Son varios los estudios que se han realizado para caracterizar el riesgo sísmico en términos de amenaza, daños probables, pérdidas y afectaciones y evaluación holística.

La evaluación de la amenaza sísmica de la ciudad de Bogotá ha sido adelantada mediante los proyectos “Estudio General de Amenaza Sísmica” (AIS, 1996) de escala nacional, “Microzonificación Sísmica de Santafé de Bogotá” (Ingeominas & Universidad de los Andes, 1997), “Estudio General de Amenaza Sísmica” (AIS, 2009) y el estudio “Zonificación de la Respuesta Sísmica de Bogotá” (FOPAE, 2010).

La evaluación de los daños probables ha sido adelantada por los trabajos Seismic microzonation and estimation of earthquake loss scenarios (Cardona, 1997), Seismic microzonation and estimation of earthquake loss scenarios (Cardona, 2000), The Study on Disaster Prevention in the Bogota Metropolitan Area in the Republic of Colombia (JICA, 2002), Escenarios de Riesgo y Pérdidas por Terremoto para Bogotá (CEDERI, 2005) y Actualización y Sistematización de los Escenarios de Daño por Terremoto para Bogotá (FOPAE, 2010; FOPAE, 2011).

Respecto a la evaluación holística del riesgo sísmico se encuentran los estudios Estimación Holística del Riesgo Sísmico utilizando Sistema Dinámicos Complejos (Cardona, 2001), Técnicas Innovadoras Para la Evaluación del Riesgo Sísmico y su Gestión en Centros Urbanos (Carreño, 2006) y el proyecto Indicators of disaster risk and disaster risk management” (IDB-IDEA-ERN, 2008).

Aunque estos últimos trabajos representan el estado del conocimiento respecto a riesgo sísmico de la ciudad de Bogotá, presentan una serie de limitaciones en términos de los resultados obtenidos tales como: Se considera un único escenario de amenaza sísmica, la evaluación se realiza a una escala general por localidades y considerando los resultados de los aquellos estudios de amenaza y escenario de daños realizados antes del año 2005.

En la figura 1 se ilustra el resultado obtenido por el estudio más reciente de evaluación holística del riesgo sísmico (Carreño, 2006). Los resultados se expresan en términos del Índice de Riesgo Total por Sismo evaluado a partir del Índice de Riesgo Físico obtenido para un escenario de daños correspondiente al de la falla frontal de la cordillera oriental (Magnitud 7.4, periodo de retorno de 500 años) (CEDERI, 2005) y un Coeficiente de Agravamiento evaluado a partir de indicadores de fragilidad social y falta de resiliencia. Los resultados de riesgo se representan a escala de localidad.

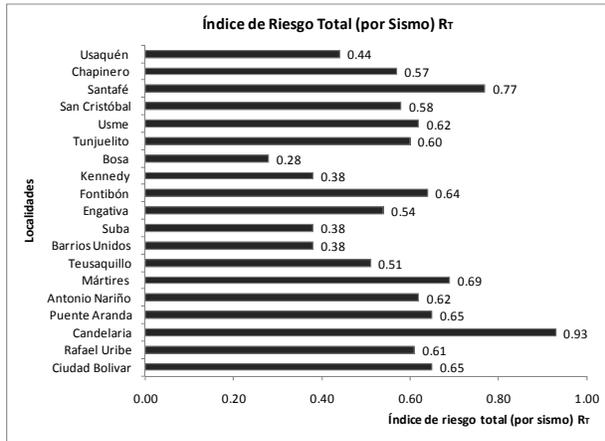


Figura 1. Evaluación holística del riesgo sísmico de la ciudad de Bogotá. Resultados por localidades (Carreño, 2006)

3 METODOLOGÍA DE EVALUACION

La propuesta metodológica para la presente evaluación holística del riesgo sísmico está basada en las empleadas por trabajos anteriores (Cardona, 2001; Carreño, 2006; IDB-IDEA-ERN, 2008) y sobre la base de la recopilación bibliográfica de indicadores de riesgo propuestos por estas y otras metodologías de evaluación del riesgo y fragilidades socioeconómicas (Davidson, 1997; Cardona, 2001; Dwyer, 2004; Carreño, 2006; EMI, 2006; Suárez, 2009; Botero, 2009).

La Figura 2 ilustra el enfoque conceptual: El riesgo R es función del daño físico potencial $D\phi$ y de un factor de impacto, I_f . El primero es función de la exposición y susceptibilidad de los elementos expuestos γD_i dada una serie de amenazas H_i de intensidad potencial I que ocurren en un periodo de tiempo t . El factor de impacto depende de las fragilidades sociales γF_i y de la falta de resiliencia (falta de capacidad de respuesta y recuperación) γR_i . Bajo este enfoque la gestión del riesgo requiere de un sistema de control (estructura institucional) y actuación (políticas y acciones públicas), que al intervenir en forma correctiva y prospectiva en los factores involucrados, permita identificar, reducir, atender y transferir el riesgo (Carreño, 2006).

La aproximación holística para el análisis de este modelo involucra un proceso de abstracción e integración de factores y relaciones mediante la técnica de evaluación multicriterio EMC, la cual es ampliamente utilizada para el análisis de problemas con base en criterios de competencia y conflicto.

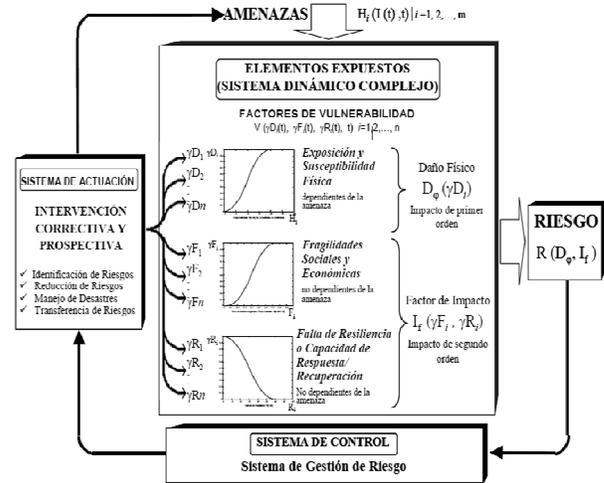


Figura 2. Modelo conceptual para la evaluación holística del riesgo (Carreño, 2006)

El modelo conceptual se descompone en una serie de factores los cuales están representados cuantitativamente por indicadores normalizados y de relaciones jerárquicas representadas cuantitativamente mediante factores de ponderación. Para el caso de evaluación holística del riesgo sísmico la técnica EMC se expresa matemáticamente mediante las ecuaciones 1, 2 y 3 (Carreño, 2006; IDB-IDEA-ERN, 2008).

$$R_T = R_F(1 + F) \quad [1]$$

$$R_F = \sum_{i=1}^p w_{RFi} \times F_{RFi} \quad [2]$$

$$F = \sum_{i=1}^m w_{FSi} \times F_{FSi} + \sum_{j=1}^n w_{FRj} \times F_{FRj} \quad [3]$$

El riesgo total R_T expresado como función del riesgo físico R_F y del factor de impacto $(1+F)$ se evalúa mediante la Ecuación 1. El riesgo físico R_F se obtiene mediante la suma de los indicadores normalizados de riesgo físico F_{RFi} multiplicados por los correspondientes factores de ponderación w_{RFi} mediante la Ecuación 2 y el coeficiente de agravamiento F se obtiene mediante la suma de los indicadores normalizados de fragilidad social F_{FSi} y falta de resiliencia F_{FRj} multiplicados por los factores de ponderación w_{FSi} y w_{FRj} mediante la Ecuación 3.

Los resultados de la evaluación para cada una de las unidades de análisis se presentan en términos de índices relativos de riesgo físico, fragilidad socioeconómica, falta de resiliencia y riesgo total.

3.1 Indicadores de riesgo

El conjunto de indicadores de riesgo empleados en la EMC corresponden a datos cualitativos o cuantitativos que se derivan de estudios de amenaza sísmica, escenarios de daño e información socioeconómica del contexto urbano a analizar. La selección de indicadores debe ser un proceso riguroso en el que cada una de dichas variables debe satisfacer las siguientes condiciones (Botero, 2008):

Validez. El indicador debe representar el concepto de manera precisa y provenir de una fuente de información verificable.

Disponibilidad. La información requerida para evaluar el indicador debe estar disponible y ser reproducible en el tiempo.

Sensibilidad. Debe medir cambios espacio-temporales del concepto en el contexto en el que se realiza la evaluación.

Claridad. Debe representar sin ambigüedades el concepto y ser comprensible para cada uno de los actores que participan en el proceso de evaluación y gestión del riesgo.

Cuantificación. Los indicadores deben ser medibles cuantitativa o cualitativamente mediante un método claramente establecido.

Objetividad. Aún si las técnicas de recolección, análisis y procesamiento de información cambian con el tiempo, el concepto del indicador debe permanecer inalterable.

La propuesta de descriptores se realizó con base a una recopilación bibliográfica de indicadores de riesgo propuestos por diferentes metodologías de evaluación del riesgo físico, fragilidades socioeconómicas y falta de resiliencia (Davidson, 1997; Cardona, 2001; Dwyer, 2004; Carreño, 2006; EMI, 2006; Suárez, 2009; Botero, 2009). En la Tabla 1 se presentan los indicadores propuestos para la evaluación del factor riesgo físico R_T los cuales fueron evaluados a partir de los resultados del estudio “Actualización y Sistematización de los Escenarios de Daño por Terremoto para Bogotá” (FOPAE, 2010; FOPAE, 2011)”.

Tabla 1. Indicadores de riesgo físico

Indicador	Unidad
Exposición física	
Área construida destruida	
XRF01 Área destruida de las edificaciones de uso residencial	%
XRF02 Área destruida de las edificaciones de uso comercial y de servicios	%
XRF03 Área destruida de las edificaciones de uso industrial	%
XRF04 Área destruida de las edificaciones de uso dotacional	%
Acueducto	
XRF05 Daño de la red de acueducto	No. de roturas/km2
Alcantarillado	
XRF06 Daño de la red de alcantarillado	No. de roturas/km2
Gas	
XRF07 Daño de la red de gas domiciliario	No. de roturas/km2
Red energía eléctrica	
XRF08 Daño de la red de energía eléctrica	km/km2
XRF09 Daño representativo de las torres de energía eléctrica	Estado de daño
XRF10 Daño representativo de los postes de energía eléctrica	Estado de daño
Red de telecomunicaciones	
XRF11 Daño de la red de telecomunicaciones	km/km2
XRF12 Porcentaje de área destruida de centrales telefónicas	%
XRF13 Daño representativo de los postes de telecomunicaciones	Estado de daño
Puentes	
XRF14 Daño representativo de los puentes vehiculares	Estado de daño
XRF15 Daño representativo de los puentes peatonales	Estado de daño
Exposición de la población	
XRF16 Víctimas	1/1.000 hab
XRF17 Heridos	1/1.000 hab
XRF18 Personas sin vivienda	1/1.000 hab
XRF19 Puestos de trabajo afectados	1/1.000 hab

En la Tabla 2 se presentan los indicadores propuestos los factores fragilidad socioeconómica FS y falta de resiliencia FR, los cuales se evaluaron a partir de la información recolectada durante el periodo 2007-2011 sobre las condiciones socioeconómicas de la ciudad y disponible en distintas entidades (Secretaría Distrital de Planeación, Departamento Nacional de Estadística DANE, Unidad Administrativa del Catastro Distrital, Secretaría de Hacienda Distrital, Instituto de Desarrollo Urbano IDU, FOPAE, Secretaría de Salud, Cruz Roja Colombiana, Defensa Civil Colombiana y Policía Metropolitana de Bogotá).

Tabla 2. Indicadores de fragilidad socioeconómica y falta de resiliencia

Indicador	Unidad
Fragilidad socioeconómica	
Vulnerabilidad Social	
XFS01 Densidad de población	hab/km2
XFS02 Tasa de mortalidad	1/10.000 hab
XFS03 Tasa de delincuencia	1/100.000 hab
XFS04 Área barrios marginales	%
XFS05 Índice de necesidades básicas insatisfechas NBI	NBI
XFS06 Índice parcial de disparidad social	Índice (0 a 1)
XFS07 Minorías	1/10.000 hab
XFS08 Población discapacitada	1/10.000 hab
XFS09 Índice de vulnerabilidad por edad de la población	Índice
Vulnerabilidad económica	
XFS10 Índice de dependencia económica	Índice
XFS11 Índice de Gini de disparidad económica	Índice (0 a 1)
Resiliencia	
Planeación	
XFR01 Plan de emergencia	Calificación (1,2,3,4,5)
XFR02 Participación simulacro distrital	%
XFR03 Nivel de sensibilización sobre prevención de riesgos	%
Operaciones	
XFR04 Capacidad hospitalaria	No. de camas/1.000 hab
XFR05 Recurso humano en salud	1/1.000 hab
XFR06 Número de ambulancias	1/10.000 hab
XFR07 Número de bomberos	1/1.000 hab
XFR08 Personal de búsqueda y rescate	1/1.000 hab
XFR09 Personal orden público	1/1.000 hab
Logística	
XFR10 Centro de manejo de emergencias	Calificación (1,2,3,4,5)
XFR11 Refugio	m2/hab
XFR12 Espacio público	%
XFR13 Densidad vial	%
Recuperación	
XFR14 Nivel de desarrollo	Índice (0 a 0.29)
XFR15 Ingreso per cápita	\$CO (millones)
XFR16 Nivel educativo	Índice (0 a 0.33)

3.2 Normalización de indicadores

El proceso de EMC implica llevar todos y cada uno de los descriptores a una escala común de cuantificación, procedimiento que se realiza mediante el uso de funciones de transformación de tipo sigmooidal o lineal. Las figuras 3 y 4 y las ecuaciones 4 y 5 ilustran dichas funciones (Carreño, 2006).

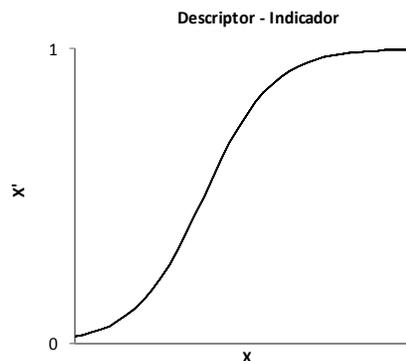


Figura 3. Función de transformación tipo sigmooidal para la normalización de indicadores de riesgo (Carreño, 2006)

$$X' = \frac{1}{1 + e^{-\beta \left(\frac{X-m}{M-m} - \mu \right)}} \quad [4]$$

donde,

- X: Valor inicial del indicador
- X': Valor normalizado del indicador
- e: Base del logaritmo natural
- β : Parámetro - pendiente de la curva
- M: Parámetro - valor máximo del indicador
- m: Parámetro - valor mínimo del indicador
- μ : Parámetro - punto de inflexión de la curva

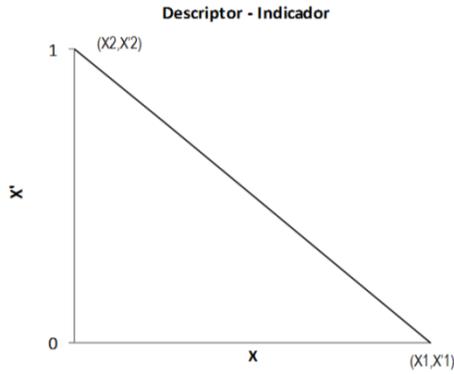


Figura 4. Función de transformación tipo lineal para la normalización de indicadores de riesgo

$$X' = \frac{X'1 - X'2}{X1 - X2} X + X'1 - \frac{X'1 - X'2}{X1 - X2} X1 \quad [5]$$

donde,

- X: Valor inicial del indicador
- X': Valor normalizado del indicador
- X1: Valor mínimo del indicador
- X2: Valor máximo del indicador
- X'1: Valor mínimo del indicador normalizado
- X'2: Valor máximo del indicador normalizado

Los valores de los parámetros que se emplean para la transformación de cada uno de los descriptores se obtienen a partir de los valores de referencia establecida mediante el consenso de expertos, revisión bibliográfica, observaciones efectuadas en eventos sísmicos en contextos urbanos o a partir del examen de las estadísticas del descriptor. En el presente caso se recurrió al uso de valores de referencia empleados en otros estudios (Cardona, 2001; Carreño, 2006; EMI, 2006; IDB-IDEA-ERN, 2008, Suárez, 2009) y al análisis de las estadísticas de los nuevos indicadores propuestos. En las Tablas 3 y 4 se presentan los valores empleados en cada caso.

3.3 Factores de ponderación

Los coeficientes de ponderación de los indicadores representan las relaciones de jerarquía (importancia relativa) en el proceso de agregación mediante EMC. La evaluación dichos coeficientes se efectúa mediante el proceso jerárquico analítico PJA el cual se basa en la comparación entre pares de indicadores para establecer cuantitativamente la importancia relativa de un indicador respecto al otro.

Estas comparaciones generan una matriz que permite calcular los factores de ponderación y verificar la consistencia del ejercicio a través del cálculo de los vectores y valores propios de dicha matriz. Como resultado se obtiene un conjunto de factores de ponderación que son menos sensitivos a errores de juicio y cuya consistencia puede ser determinada cuantitativamente (Saaty, 1987). Las Tablas 5 y 6 presenta los resultados del PJA en el que, al igual que en el caso anterior, se recurrió al uso de valores de referencia empleados en otros estudios (Cardona, 2001; Carreño, 2006; EMI, 2006; IDB-IDEA-ERN, 2008, Suárez, 2009) y complementando para los indicadores propuestos.

Tabla 3. Parámetros de las funciones de normalización de los indicadores de riesgo físico

Código	Descriptor	Tipo	máx.	min.	β	μ
Exposición física						
XRF01	Área destruida de las edificaciones de uso residencial	Sigmodal	20	0	7,57	0,50
XRF02	Área destruida de las edificaciones de uso comercial y servicios	Sigmodal	20	0	7,57	0,50
XRF03	Área destruida de las edificaciones de uso industrial	Sigmodal	20	0	7,57	0,50
XRF04	Área destruida de las edificaciones de uso dotacional	Sigmodal	20	0	7,57	0,50
XRF05	Daño de la red de acueducto	Sigmodal	10	0	7,57	0,50
XRF06	Daño de la red de alcantarillado	Sigmodal	10	0	7,57	0,50
XRF07	Daño de la red de gas domiciliario	Sigmodal	5	0	7,57	0,50
XRF08	Daño de la red de energía eléctrica	Sigmodal	0,2	0	7,57	0,50
XRF09	Daño representativo de las torres de energía eléctrica	Sigmodal	0,3	0	7,80	0,50
XRF10	Daño representativo de los postes de energía eléctrica	Sigmodal	0,3	0	7,80	0,50
XRF11	Daño de la red de telecomunicaciones	Sigmodal	0,2	0	7,57	0,50
XRF12	Porcentaje de área destruida de centrales telefónicas	Sigmodal	20	0	7,57	0,50
XRF13	Daño representativo de los postes de telecomunicaciones	Sigmodal	0,3	0	7,80	0,50
XRF14	Daño representativo de los puentes vehiculares	Sigmodal	0,25	0,07	7,80	0,50
XRF15	Daño representativo de los puentes peatonales	Sigmodal	0,25	0,07	7,80	0,50
Exposición de la población						
XRF16	Víctimas	Sigmodal	50	0	7,80	0,50
XRF17	Heridos	Sigmodal	75	0	7,72	0,50
XRF18	Personas sin vivienda	Sigmodal	500	0	8,08	0,50
XRF19	Puestos de trabajo afectados	Sigmodal	300	0	7,90	0,50

Tabla 4. Parámetros de las funciones de normalización de los indicadores de fragilidad socioeconómica y falta de resiliencia

Código	Descriptor	Tipo	máx. / X1	min. / X2	β / Y1	μ / Y2
Fragilidad Socioeconómica						
XFS01	Densidad de población	Sigmodal	25000	400	6,87	0,5
XFS02	Tasa de mortalidad	Sigmodal	75	30	7,57	0,5
XFS03	Tasa de delincuencia	Sigmodal	1400	10	7,49	0,5
XFS04	Área barrios marginales	Sigmodal	75	0,2	7,57	0,5
XFS05	Índice de necesidades básicas insatisfechas NBI	Sigmodal	15	0	7,49	0,5
XFS06	Índice parcial de disparidad social	Lineal	0	1	0	1
XFS07	Minorías	Sigmodal	400	80	6,87	0,5
XFS08	Población discapacitada	Sigmodal	1000	0	6,87	0,5
XFS09	Índice de vulnerabilidad por edad de la población	Sigmodal	0,4	0,2	6,87	0,5
XFS10	Índice de dependencia económica	Sigmodal	3	0	7,49	0,5
XFS11	Índice de Gini de disparidad económica	Sigmodal	0,58	0,4	7,49	0,5
Resiliencia						
XFR01	Plan de emergencia	Lineal	5	0	0	1
XFR02	Nivel de preparación para un evento sísmico	Sigmodal	80	40	-7,58	0,5
XFR03	Nivel de sensibilización sobre prevención de riesgos	Sigmodal	40	0	-7,58	0,5
XFR04	Capacidad hospitalaria	Sigmodal	30	0	-7,58	0,5
XFR05	Recurso humano en salud	Sigmodal	15	0	-7,64	0,5
XFR06	Número de ambulancias	Sigmodal	15	0	-7,64	0,5
XFR07	Número de bomberos	Sigmodal	7	0	-7,65	0,5
XFR08	Personal de búsqueda y rescate	Sigmodal	2	0	-7,65	0,5
XFR09	Personal orden público	Sigmodal	7	0	-7,65	0,5
XFR10	Centro de manejo de emergencias	Lineal	5	0	0	1
XFR11	Refugio	Sigmodal	5	0	-7,63	0,5
XFR12	Espacio público	Sigmodal	15	0	-7,63	0,5
XFR13	Densidad vial	Sigmodal	20	1	-7,63	0,5
XFR14	Nivel de desarrollo	Sigmodal	0,1	0,23	-7,63	0,5
XFR15	Ingreso per cápita	Sigmodal	200.000	1.000.000	-7,49	0,5
XFR16	Nivel educativo	Lineal	0,2	0,13	-7,49	0,5

4 RESULTADOS

Para establecer el índice de riesgo físico sísmico R_F y el índice de riesgo sísmico total R_T es necesario evaluar los diferentes escenarios de amenaza sísmica probables.

La estrategia adoptada fue la de evaluar un índice de riesgo físico R_F para cada uno de los escenarios de amenaza sísmica que fueron establecidos por el estudio “Actualización y Sistematización de los Escenarios de Daño por Terremoto para Bogotá” y “Zonificación por respuesta sísmica para el diseño de edificaciones” (FOPAE, 2011). En la Tabla 7 se presentan las características de los cuatro escenarios considerados.

4.1 Riesgo físico R_F

El riesgo físico R_F se obtiene mediante la suma ponderada de los indicadores normalizados de riesgo físico mediante la Ecuación 2.

La figura 5 presenta los resultados de la evaluación efectuada a escala de localidad. Al comparar los resultados de los cuatro escenarios de amenaza se observa que las localidades que presentan los valores más altos del índice de riesgo físico son Candelaria, Chapinero, y Santafé. Las localidades que presentan los menores valores son Kennedy, Fontibón y Puente Aranda.

Tabla 5. Coeficientes de ponderación de los indicadores de riesgo físico

	Coefficiente de ponderación de la categoría	Código	Coefficiente de ponderación	Coefficiente de ponderación equivalente Wi
Exposición física				
Área construida destruida	0,29	XRF01	0,57	0,17
		XRF02	0,11	0,03
		XRF03	0,11	0,03
		XRF04	0,21	0,06
		Σ	1,00	
Acueducto	0,11	XRF05	1,00	0,11
		Σ	1,00	
Alcantarillado	0,11	XRF06	1,00	0,11
		Σ	1,00	
Gas	0,08	XRF07	1,00	0,08
		Σ	1,00	
Red energía eléctrica	0,06	XRF08	0,41	0,02
		XRF09	0,48	0,03
		XRF10	0,11	0,01
		Σ	1,00	
Red de telecomunicación	0,04	XRF11	0,41	0,02
		XRF12	0,48	0,02
		XRF13	0,11	0,00
		Σ	1,00	
Puentes	0,04	XRF14	0,83	0,03
		XRF15	0,17	0,01
		Σ	1,00	
Exposición de la población				
	0,26	XRF16	0,48	0,12
		XRF17	0,27	0,07
		XRF18	0,17	0,05
		XRF19	0,08	0,02
		Σ	1,00	
Σ	1,00			1,00

Tabla 6. Coeficientes de ponderación de los indicadores de fragilidad socioeconómica y falta de resiliencia

	Coefficiente de ponderación de la categoría	Código	Coefficiente de ponderación	Coefficiente de ponderación equivalente Wi	
Fragilidad socioeconómica					
Vulnerabilidad Social	0,45	XFS01	0,10	0,05	
		XFS02	0,11	0,05	
		XFS03	0,11	0,05	
		XFS04	0,14	0,06	
		XFS05	0,16	0,07	
		XFS06	0,22	0,10	
		XFS07	0,06	0,03	
		XFS08	0,05	0,02	
		XFS09	0,05	0,02	
		Σ	1,00		
Vulnerabilidad económica	0,22	XFS10	0,17	0,04	
		XFS11	0,83	0,19	
		Σ	1,00		
Resiliencia					
Planeación	0,08	XFR01	0,64	0,05	
		XFR02	0,26	0,02	
		XFR03	0,10	0,01	
		Σ	1,00		
Operaciones	0,08	XFR04	0,22	0,02	
		XFR05	0,22	0,02	
		XFR06	0,04	0,00	
		XFR07	0,22	0,02	
		XFR08	0,22	0,02	
		XFR09	0,07	0,01	
		Σ	1,00		
Logística		0,08	XFR10	0,61	0,05
			XFR11	0,21	0,02
	XFR12		0,09	0,01	
	XFR13		0,09	0,01	
	Σ		1,00		
Recuperación	0,08	XFR14	0,33	0,03	
		XFR15	0,33	0,03	
		XFR16	0,33	0,03	
		Σ	1,00		
Σ	1,00			1,00	

Tabla 7. Escenarios de amenaza sísmica considerados para la evaluación

	Escenario	Fuente	Magnitud MI	Distancia (km)	Profundidad (km)	Periodo de retorno (años)
1	Umbral de daño	Regional	6.5	50	25	30
2	Seguridad limitada	Regional	7.0	40	25	225
3	Diseño	Regional	7.3	35	25	475
4	Diseño especial	Cercana	6.5	15	15	1.000

La figura 6 presenta los resultados a escala de unidad de planeamiento zonal UPZ. Aquellas que presentan mayor nivel de riesgo físico son Chapinero, Comuneros, Diana Turbay, El Refugio, Candelaria, Gloria y Macarena. Las UPZ que presentan los valores más bajos son Aeropuerto, Calandaima, Granjas de Techo, Guaymaral, Jardín Botánico, Academia, Margaritas, Tintal Norte y Zona Franca.

4.2 Fragilidad socioeconómica y falta de resiliencia

El coeficiente de agravamiento F se obtiene mediante la suma de los indicadores normalizados de fragilidad social y falta de resiliencia mediante la Ecuación 3.

La figura 7 presenta los resultados de la evaluación efectuada a escala de localidad y UPZ. Las localidades que presentan los valores más altos de fragilidad socioeconómica son Santafé, Candelaria, Ciudad Bolívar y San Cristóbal y las localidades que presentan los menores valores de son Kennedy, Engativá, Puente Aranda y Teusaquillo. Respecto a falta de resiliencia, las localidades que presentan valores más altos son Bosa, Usme, Ciudad Bolívar y Tunjuelito, mientras que las mejor calificadas son Candelaria, Puente Aranda, Teusaquillo y Chapinero.

4.3 Riesgo total por sismo

El Riesgo Total por Sismo R_T se evalúa para cada una de las unidades de análisis como función del factor de exposición (Índice de riesgo físico R_F) y del factor de impacto mediante la Ecuación 1.

En las figuras 8 y 10 se presentan los resultados de la evaluación efectuada a escala de localidad. Al comparar los resultados de riesgo total por sismo para los cuatro escenarios de amenaza se observa que las localidades que presentan los valores más altos del índice de riesgo total son Candelaria, Chapinero, Santafé y Rafael Uribe. Las localidades que presentan el menor riesgo sísmico total son Fontibón, Puente Aranda y Kennedy.

La figura 9 presenta los resultados a escala de unidad de planeamiento zonal UPZ. Las UPZ que presentan el mayor nivel de riesgo total son Chapinero, Diana Turbay, Candelaria, Gloria, Macarena, Marruecos, Monteblando, Entrenubes, Sagrado Corazón y San Francisco. Los casos en que se presentan menores índices de riesgo total, son: Aeropuerto, Calandaima, Granjas de Techo, Guaymaral, Jardín Botánico, Academia, Margaritas, Parque Salitre, Paseo Libertadores, Tintal Norte y Zona Franca.

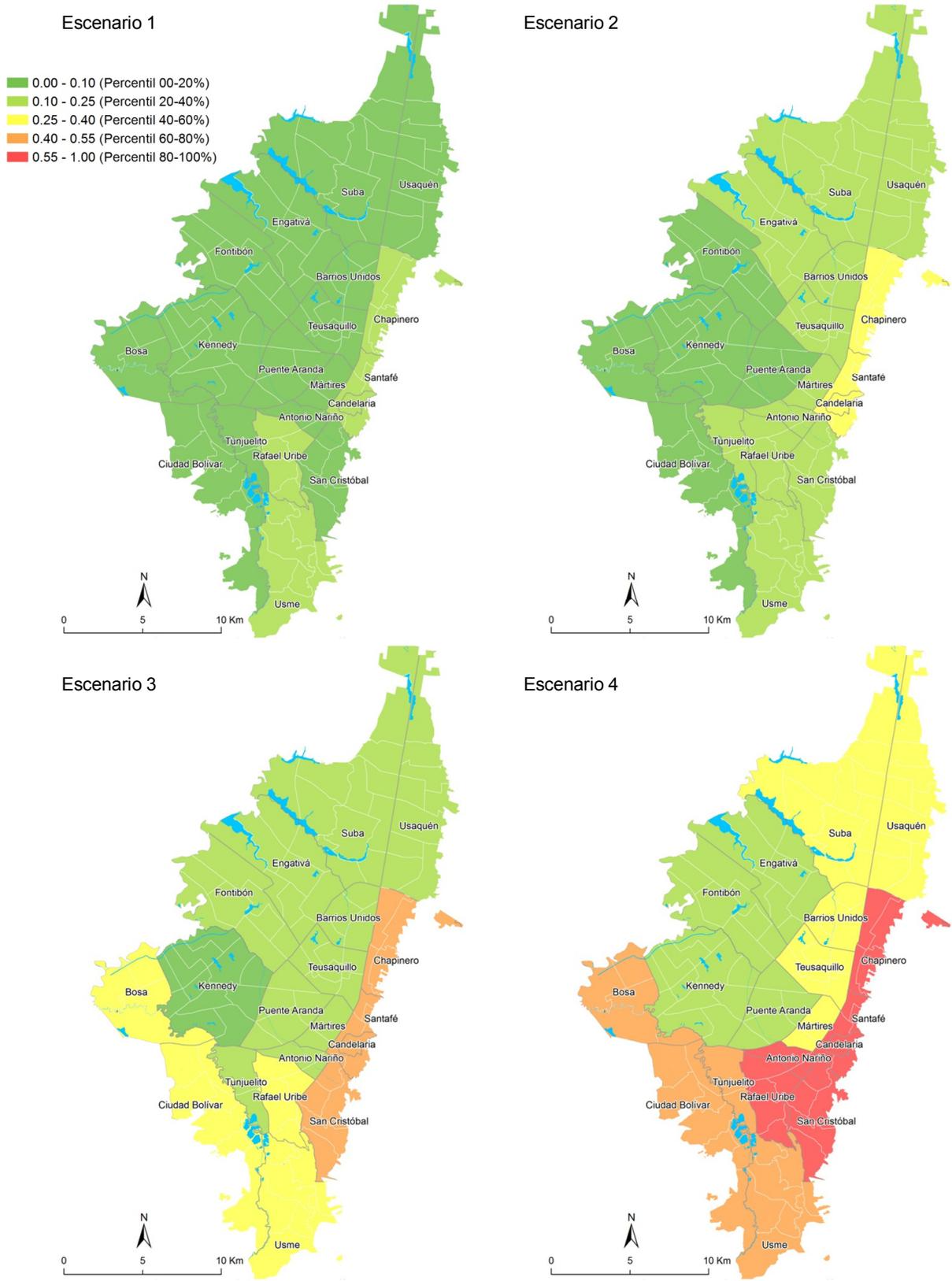


Figura 5. Riesgo físico R_f . Resultados por localidad

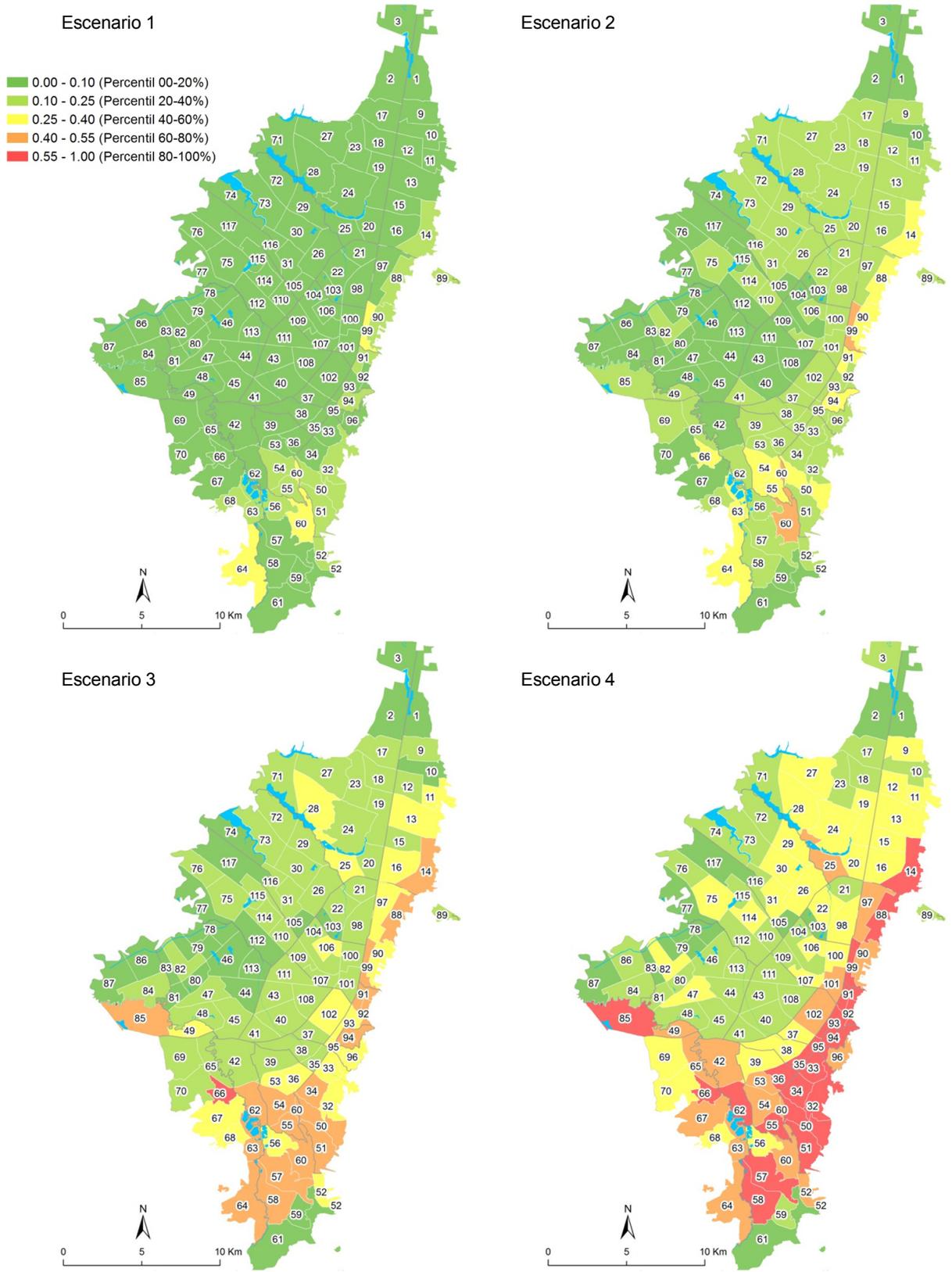


Figura 6. Riesgo físico Rf. Resultados por UPZ

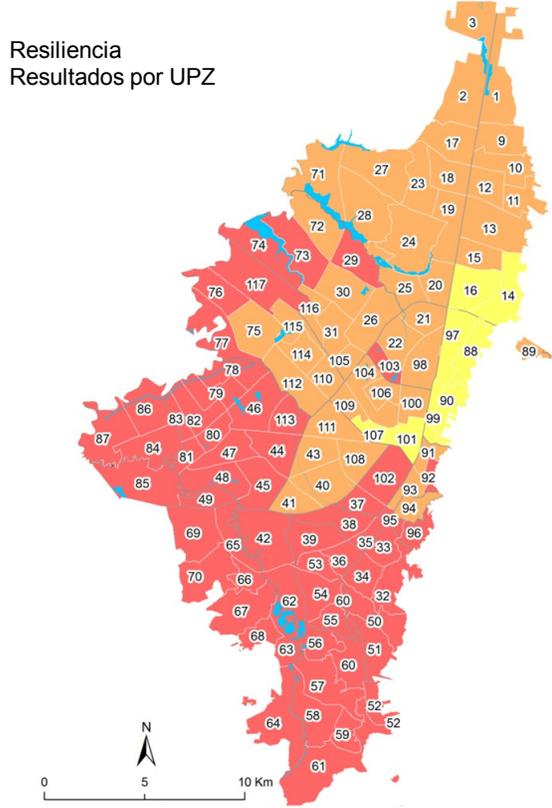
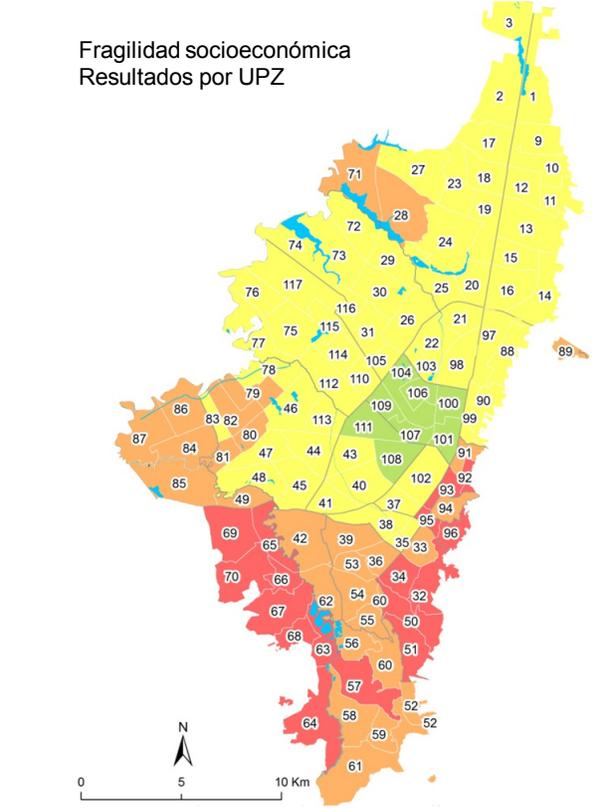
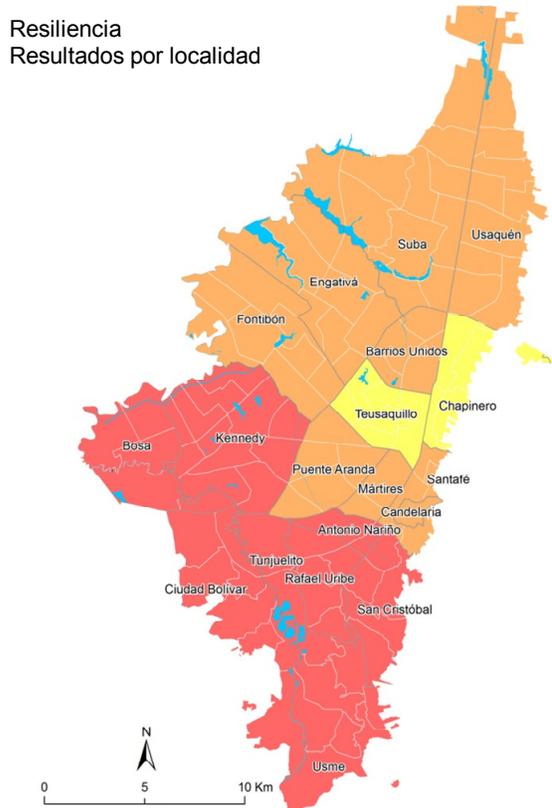
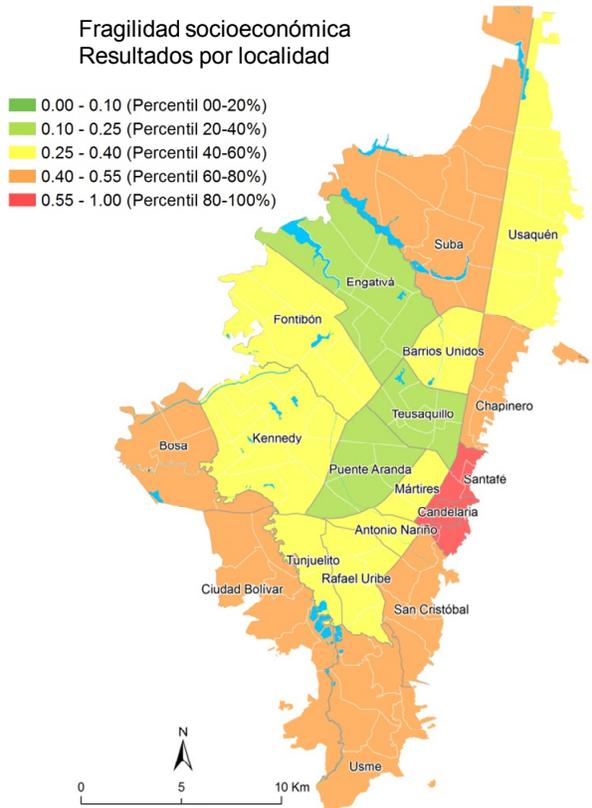


Figura 7. Fragilidad socioeconómica y falta de resiliencia. Resultados por localidad y UPZ

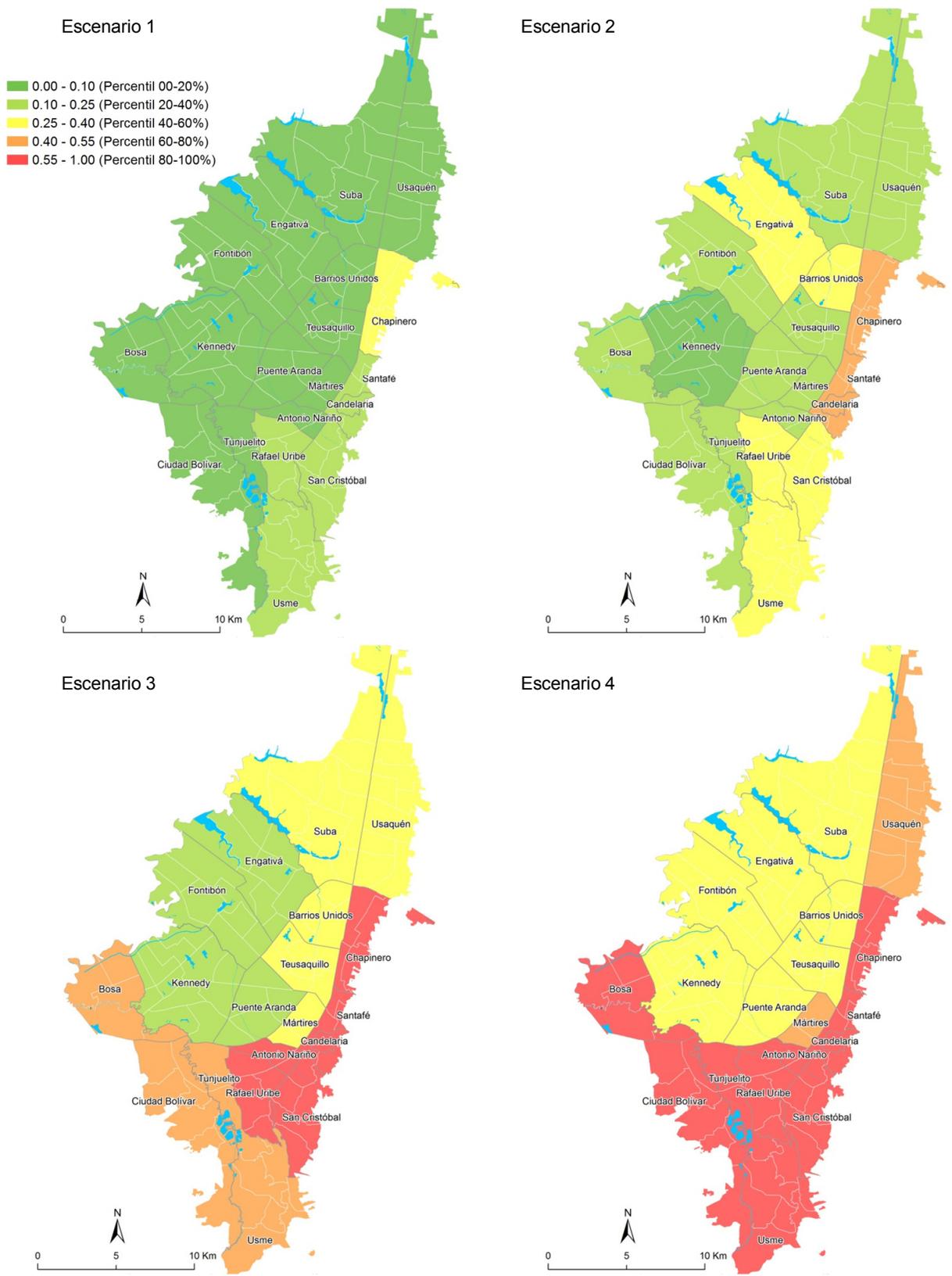


Figura 8. Riesgo total por sismo Rr. Resultados por localidad

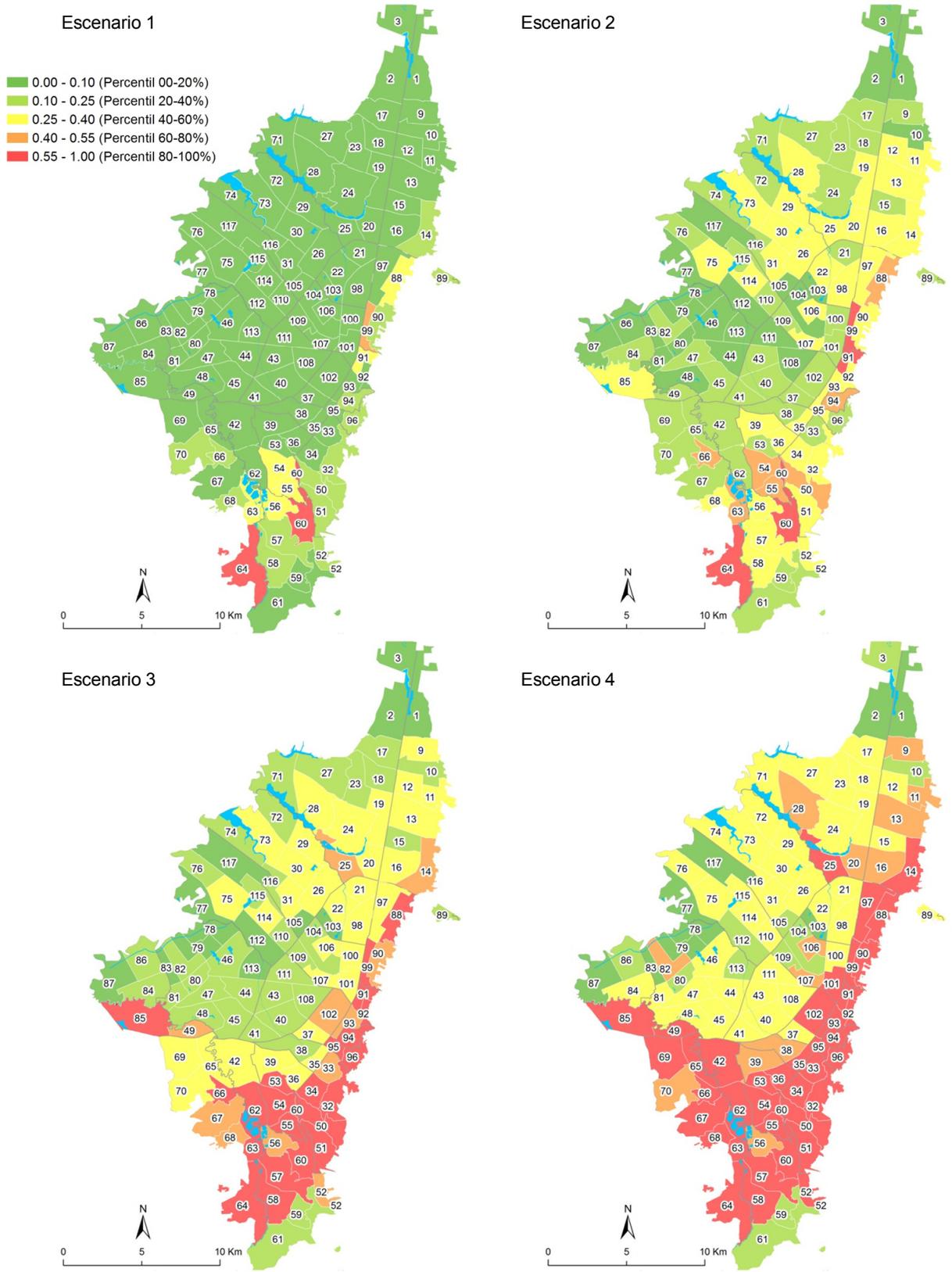
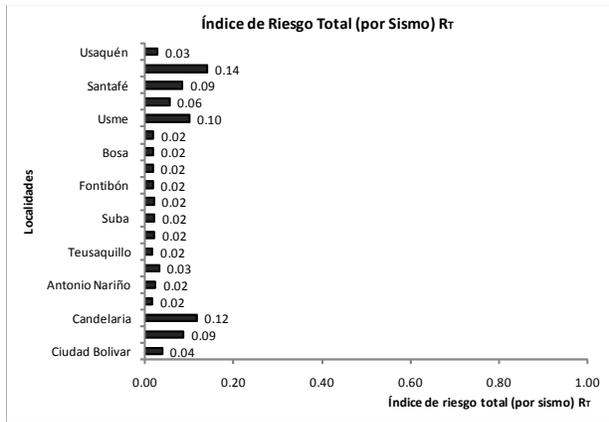
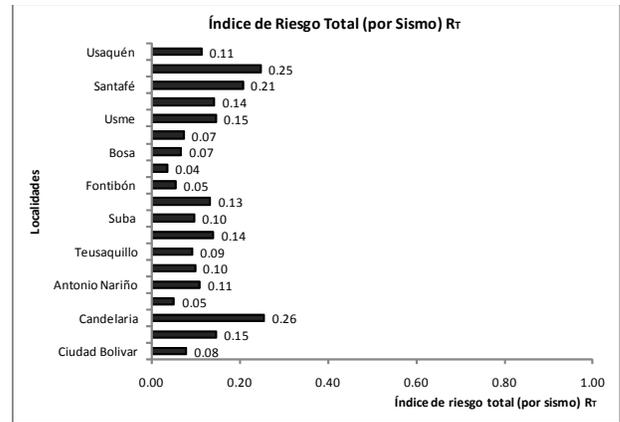


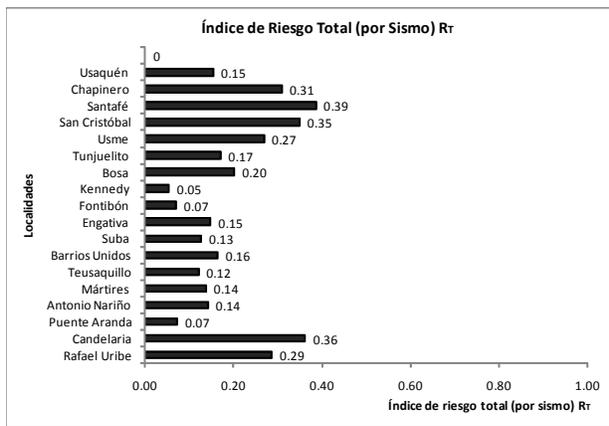
Figura 9. Riesgo total por sismo Rr. Resultados por UPZ



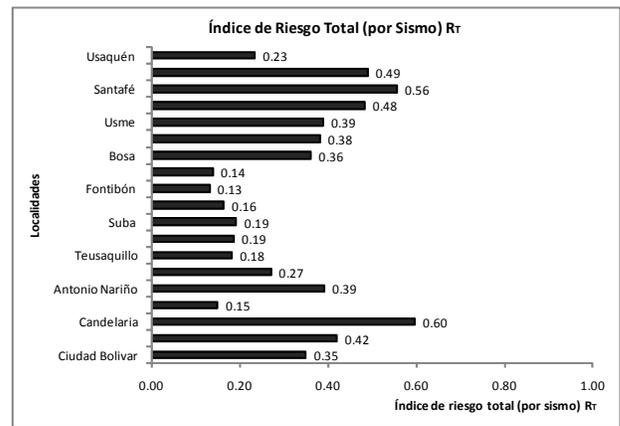
Escenario 1



Escenario 2



Escenario 4



Escenario 4

Figura 9. Riesgo total por sismo Rr. Resultados por localidad

5 DISCUSIÓN

El propósito del presente trabajo fue el de establecer una propuesta metodológica que complementara los estudios anteriores de evaluación holística del riesgo sísmico de la ciudad de Bogotá haciendo uso de información actualizada proveniente de estudios más recientes de amenaza sísmica, escenarios de daño, condiciones socioeconómicas, y capacidad de respuesta y recuperación de la ciudad de Bogotá.

Se optó por implementar una metodología basada en indicadores de riesgo que se derivan a partir de modelos escenario de daño y de información sobre las condiciones socioeconómicas y capacidad de respuesta del contexto. Si bien estos indicadores pueden no representar cuantitativa y objetivamente el riesgo “real”, sí constituyen información que permite valorar y comparar el nivel de riesgo relativo de diferentes áreas o unidades de análisis y permiten establecer órdenes de prioridad entre unidades administrativas, determinar factores claves para mitigar y reducir el riesgo y hacer seguimiento mediante un sistema de gestión y actuación basado en información cuantitativa.

Son numerosos los aspectos que se deben considerar durante el proceso de evaluación holística. El primero de ellos tiene que ver con la formulación y selección de indicadores, durante el cual es necesario conciliar factores de calidad, disponibilidad y costo de producción de la información. En el presente caso se

contó con información amplia y suficiente para realizar la evaluación, sin embargo se considera que es posible mejorar los siguientes aspectos: 1) Escenario de daños: Si bien los últimos estudios (DPAE, 2009; FOPAE, 2010; FOPAE, 2011) representan un avance significativo en el conocimiento del riesgo físico de la ciudad, aún es necesario desarrollar y validar metodologías de evaluación de la vulnerabilidad, daño y afectaciones acordes con las condiciones locales; incluir elementos de la infraestructura urbana que no han sido analizados hasta el momento; realizar el análisis detallado de la vulnerabilidad y el riesgo sísmico de los elementos esenciales y establecer escenarios de riesgo a escala regional teniendo en cuenta la interdependencia física, social y económica de la ciudad. 2) Condiciones socioeconómicas y de gestión del riesgo: A pesar de que las entidades distritales cuentan con información actualizada, en algunos casos no es posible obtener un nivel adecuado de resolución espacial. Generalmente la información se encuentra disponible a escala de localidad, en varios casos a escala de ciudad y en muy pocos casos a escala de UPZ.

El segundo aspecto está relacionado con las funciones y parámetros empleados para la normalización y ponderación de los indicadores de riesgo. Los trabajos más recientes han tratado de estandarizar la metodología mediante el uso de una serie reducida de indicadores expresados en valores absolutos y los valores de los parámetros que se emplean para la

transformación y ponderación de los indicadores se obtienen a partir del consenso de expertos, observaciones efectuadas en eventos sísmicos en diferentes contextos urbanos (Carreño, 2006; EMI, 2006; IDB-IDEA-ERN, 2008). Dado que el propósito del presente estudio es el de realizar un análisis local, los parámetros de normalización se establecieron estadísticamente en aquellos casos en los que no existen valores de referencia. Este hecho debe considerarse en caso de que se desee analizar y comparar con otros centros urbanos.

Los resultados del estudio se presentan a escala de localidad y UPZ para los cuatro escenarios de amenaza sísmica establecidos por el último estudio de escenario de daños (FOPAE, 2010; FOPAE, 2011). En total se evaluaron 19 indicadores de exposición física y de la población, 11 de fragilidad socioeconómica y 18 de falta de resiliencia. El análisis de correlación y covarianza no demostró que exista fuerte interdependencia entre los indicadores.

Los resultados de la evaluación se presentan en términos de índices normalizados de riesgo físico, fragilidad socioeconómica, falta de resiliencia y riesgo total calculados mediante EMC. En este caso se presenta una fuerte correlación espacial entre los resultados de riesgo físico y riesgo total por sismo, en general para las localidades de Candelaria, Chapinero, Santafé, Rafael Uribe, San Cristóbal, Usme y Kennedy, el índice de riesgo total está determinado por el índice de riesgo físico. En los demás casos esta condición no necesariamente se cumple, es decir que la influencia de los índices de fragilidad socioeconómica y falta de resiliencia es más importante en estas otras localidades.

6 RECOMENDACIONES

De acuerdo con lo expuesto en este documento la gestión del riesgo requiere de un sistema de control (estructura institucional) y actuación (políticas y acciones públicas) que intervenga en forma correctiva y prospectiva en los factores involucrados a través de su identificación, cuantificación y monitoreo.

Los resultados del análisis demuestran que el riesgo sísmico total está determinado principalmente por el factor de exposición física. Consecuentemente las actividades para la gestión del riesgo se deberían concentrar en principio en reducir la exposición (localización de los elementos en función de la amenaza sísmica) y vulnerabilidad sísmica de los elementos expuestos. Estas actividades deben priorizarse por localidades y UPZ de acuerdo con los resultados de riesgo físico que se presentan en el numeral 4.

Respecto a los factores de fragilidad socioeconómica y falta de resiliencia existen dos observaciones importantes. La primera es que a partir de la información suministrada por las entidades distritales no se evidencia que exista un sistema de información socioeconómica y gestión del riesgo diferenciado por localidades y UPZ que permita identificar y cuantificar las realidades particulares de cada una de estas unidades administrativas (ver figuras 7 y 8). Es necesario mejorar el nivel de conocimiento de dichas características a través de un sistema de información socioeconómica y de gestión del riesgo orientado en dicho sentido.

La segunda observación de importancia es que los valores de los indicadores de riesgo por fragilidades socioeconómicas y falta de resiliencia evaluados a partir de dicha información son en muchos casos superiores a los valores de referencia establecidos por las otras investigaciones, es decir que persisten

en la ciudad condiciones sociales y económicas que incrementan el riesgo total ante la ocurrencia de un evento sísmico y que la capacidad de respuesta y recuperación es aún limitada (ver figuras 7 y 8).

Es difícil generar recomendaciones para mejorar las condiciones de fragilidad socioeconómica a partir de los resultados de este estudio ya que estas son la manifestación de una serie de procesos económicos, políticos, sociales y culturales que requerirían ser intervenidos desde una perspectiva mucho más amplia.

En el corto y mediano plazo es necesario mejorar aquellos aspectos relacionados con capacidad de respuesta y recuperación de acuerdo con los resultados de riesgo físico que se presentan en el numeral 4 y teniendo en cuenta que se debe implementar un sistema de información y gestión que permita, como ya se ha indicado, identificar y cuantificar las realidades particulares de cada una de localidades y UPZ de la ciudad.

A pesar de que el enfoque conceptual y la propuesta metodológica adoptada en el presente estudio han tenido una amplia aceptación, no existe aún consenso sobre su uso y aplicación. Esto se hace evidente al comparar los estudios realizados anteriormente en Bogotá y en otras ciudades en los que se utilizan diferentes descriptores e indicadores de riesgo, diferentes parámetros de normalización y escalas de evaluación. En este sentido la recomendación más importante es la de socializar resultados e integrar las actividades adelantadas por la entidad con las redes de investigación que trabajan en este tema.

Aunque generalmente los modelos de gestión aceptan que un desastre presenta tres fases: impacto, atención y recuperación; las metodologías de identificación y evaluación del riesgo no proveen aún información que permitan caracterizar escenarios diferenciados para cada una de estas fases. Un modelo de evaluación del riesgo orientado en este sentido permitiría establecer deficiencias, acciones y recursos necesarios para atender cada fase.

El alcance del modelo conceptual empleado es el de realizar la evaluación del riesgo total en un contexto urbano considerando diferentes amenazas. Tanto los estudios precedentes de evaluación holística del riesgo (Cardona, 2001; Carreño 2006; IDB-IDEA-ERN, 2008) como el presente estudio representan un avance importante en la evaluación del riesgo sísmico, sin embargo otros riesgos importantes presentes en la ciudad deben ser integradas en la evaluación (e.g. remoción en masa, inundación, riesgos antrópicos).

La valoración de las fuentes y de la calidad de la información empleada se realizó de manera implícita y en términos cualitativos durante el proceso de recopilación de información y formulación de indicadores. El problema fundamental de la información recopilada durante este estudio es que ésta es producida por las entidades gubernamentales con fines administrativos. Es necesario implementar metodologías y desarrollar proyectos de recolección de información cuyo objetivo específico sea el de adquirir información para la identificación y gestión del riesgo incluyendo la evaluación de los aspectos técnicos de los datos y de su usabilidad para este propósito específico y en la que participen todos los actores involucrados en las tareas de recolección, producción, administración, procesamiento y uso final de información.

REFERENCIAS

- AIS. "Estudio General De Amenaza Sísmica." Bogotá: Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica, 2009.
- AIS. "Estudio General De Amenaza Sísmica De Colombia." ed. Comité AIS 300. Bogotá, Colombia: Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica, 1996.
- Atkins. "A Commonwealth Vulnerability Index for Developing Countries: The Position of Small States." *Commonwealth Economic* 40 (2000).
- Birkmann. "Measuring Vulnerability to Natural Hazards." 524. Honk Kong, 2006.
- Bogardi. "Vulnerability Assessment: The First Step Towards Sustainable Risk Reduction." In *Disasters and Society - From hazard assessment to risk reduction*, edited by D. Malzahn and T. Plapp, 75-82. Berlin, 2004.
- Bohle. "Vulnerability and Criticality: Perspectives from Social Geography." In *IHDP Newsletter: IHDP*, 2001.
- Botero. "Geo-Information for Measuring Vulnerability to Earthquakes." PhD Thesis, University of Utrecht, 2009.
- Cardona. "Estimación Holística Del Riesgo Sísmico Utilizando Sistemas Complejos." Barcelona, España: Universidad Politécnica de Cataluña, 2001.
- Cardona. "Seismic Microzonation and Estimation of Earthquake Loss Scenarios: Integrated Risk Mitigation Project of Bogotá." edited by Earthquake Spectra. Bogotá, 1997.
- Carreño. "Técnicas Innovadoras Para La Evaluación Del Riesgo Sísmico Y Su Gestión En Centros Urbanos." Barcelona, España: Universidad Politécnica de Cataluña, 2006.
- CEDERI. "Escenarios De Riesgo Y Pérdidas Por Terremoto Para Bogotá D.C." Bogotá, Colombia: Universidad de los Andes, 2005.
- Chambers. "Sustainable Rural Livelihoods: Practical Concepts for the 21st Century." In *Discussion Paper 296*. Brighton, UK: Institute of Development Studies, 1992.
- Chardon. "Amenaza, Vulnerabilidad, Riesgo, Desastre, Mitigación, Prevención. Primer Acercamiento a Conceptos, Características Y Metodologías De Análisis Y Evaluación." Manizales, Colombia: Universidad Nacional de Colombia, 2002.
- Davidson. "A Multidisciplinary Urban Earthquake Disaster Risk Index." 211-23, 1997.
- DPAE. "Zonificación De La Respuesta Sísmica De Bogotá Para El Diseño De Sismoresistente De Edificaciones." Bogotá, Colombia: Dirección de Prevención y Atención de Emergencias, 2010.
- Dwyer. "Quantifying Social Vulnerability: A Methodology for Identifying Those at Risk to Natural Hazards." 101. Camberra, Australia, 2004.
- EMI. "Enhancing Local Partnership and Stakeholders' Ownership: Implementing the Drmm in Metro Manila." edited by Earthquakes and Megacities Initiative: Kobe University, Pacific Disaster Center, ProVention Consortium, United Nations Development Programme (UNDP), 2006.
- FEMA. "Hazard Loss Estimation Methodology." edited by FEMA. Washington, 2003.
- FOPAE. "Actualización Y Sistematización De Escenario De Daños Por Terremoto Para Bogotá Fase 2. Informe Final (Fases I Y II)." Bogotá, Colombia: Fondo de Prevención y Atención de Emergencias, 2010.
- FOPAE. "Escenarios De Daños Por Terremoto Para Bogotá. Informe Final." Bogotá, Colombia: Fondo de Prevención y Atención de Emergencias, 2011.
- García. "Modelo Basado En Lógica Difusa Para La Construcción De Indicadores De Vulnerabilidad Urbana Frente a Fenómenos Naturales." *Gestión y medio ambiente* 6, no. 2 (2003): 1-22.
- Hilhorst. "Complexity and Diversity: Unlocking Social Domains of Disaster Response." In *Vulnerability and Resilience in Natural Disasters*, edited by Earthscan, 52-66. London, 2004.
- IDB-IDEA-ERN. "Indicators of Disaster Risk and Disaster Risk Management - Main Technical Report." In *Indicators of disaster risk and disaster risk management*, edited by Banco Interamericano de Desarrollo. Manizales, Colombia - Washington, USA: Convenio IDEA Universidad Nacional de Colombia Sede - Manizales, Banco Interamericano de Desarrollo, 2008.
- Ingeominas-Uniandes. "Microzonificación Sísmica De Santafé De Bogotá." In *Convenio 01-93*. Bogotá: Ingeominas, Universidad de los Andes, 1997.
- International, Geo-hazards. "Radius - Guidelines for the Implementation of Earthquake Risk Management Projects." 1999.
- Jakobsson. "The Role of Quality in Spatial Data Infrastructures." edited by Eurogeographics. Moscow, 2007.
- JICA. "The Study on Disaster Prevention in the Bogota Metropolitan Area in the Republic of Colombia." edited by Japan International Cooperation Agency. Bogotá, Colombia: Japan International Cooperation Agency, Pacif Consultants international, OYO Corporation, Alcaldía Mayor De Bogotá, 2002.
- Saaty. "The Analytic Hierarchy Process." New York, 1980.
- Smith. "Risk Assessment in Urban Areas." Paper presented at the III International Symposium of Flood Defence, Nijmegen, The Netherlands, 2005.
- Suárez. "Diagnóstico Del Riesgo Urbano Y La Gestión Del Riesgo Para La Planificación Y El Mejoramiento De La Efectividad a Nivel Local: Aplicación a La Ciudad De Manizales." Tesis de maestría, Universidad Nacional de Colombia, 2009.
- Turner. "A Framework for Vulnerability Analysis in Sustainability Science." Paper presented at the The National Academy of Sciences of the United States of America, 2003.
- UNDP. "The Disaster Risk Index." United Nations, 2004.
- Whitman. "Damage Probability Matrices for Prototype Buildings." In *Structures Publication*. Boston: M.I.T., 1973.
- Wisner. "At Risk: Natural Hazards, People Vulnerability and Disasters." edited by Routledge, 469. New York, 2004.