



TOMO I
METODOLOGÍA DE MODELACIÓN PROBABILISTA DE
RIESGOS NATURALES

INFORME TÉCNICO ERN-CAPRA-T1-1
COMPONENTES PRINCIPALES DEL
ANÁLISIS DE RIESGO



CEPREDENAC



Inter-American Development Bank



opportunities for all



**Consortio Evaluación de Riesgos Naturales
- América Latina -
Consultores en Riesgos y Desastres**

Consortio conformado por:

Colombia

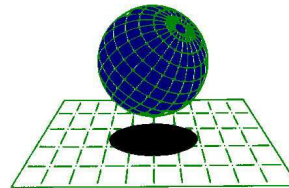
Carrera 19A # 84-14 Of 504
Edificio Torrenova
Tel. 57-1-691-6113
Fax 57-1-691-6102
Bogotá, D.C.



INGENIERIA TECNICA Y CIENTIFICA LTDA

España

Centro Internacional de Métodos Numéricos
en Ingeniería - CIMNE
Campus Nord UPC
Tel. 34-93-401-64-96
Fax 34-93-401-10-48
Barcelona



C I M N E

México

Vito Alessio Robles No. 179
Col. Hacienda de Guadalupe Chimalistac
C.P.01050 Delegación Álvaro Obregón
Tel. 55-5-616-8161
Fax 55-5-616-8162
México, D.F.



ERN Ingenieros Consultores, S. C.

ERN Evaluación de Riesgos Naturales - América Latina
www.ern-la.com

Dirección y Coordinación de Grupos de Trabajo Técnico – Consorcio ERN América Latina

Omar Darío Cardona A.
Dirección General del Proyecto

Luis Eduardo Yamín L.
Dirección Técnica ERN (COL)

Gabriel Andrés Bernal G.
Coordinación General ERN (COL)

Mario Gustavo Ordaz S.
Dirección Técnica ERN (MEX)

Eduardo Reinoso A.
Coordinación General ERN (MEX)

Alex Horia Barbat B.
Dirección Técnica CIMNE (ESP)

Martha Liliana Carreño T.
Coordinación General CIMNE (ESP)

Especialistas y Asesores – Grupos de Trabajo

Miguel Genaro Mora C.
Especialista ERN (COL)

César Augusto Velásquez V.
Especialista ERN (COL)

Karina Santamaría D.
Especialista ERN (COL)

Mauricio Cardona O.
Asistente Técnico ERN (COL)

Andrés Mauricio Torres C.
Asistente Técnico ERN (COL)

Diana Marcela González C.
Asistente Técnico ERN (COL)

Yinsury Sodel Peña V.
Asistente Técnico ERN (COL)

Andrei Garzón B.
Asistente Técnico ERN (COL)

Carlos Eduardo Avelar F.
Especialista ERN (MEX)

Benjamín Huerta G.
Especialista ERN (MEX)

Mauro Pompeyo Niño L.
Especialista ERN (MEX)

Isaías Martínez A.
Asistente Técnico ERN (MEX)

Edgar Osuna H.
Asistente Técnico ERN (MEX)

José Juan Hernández G.
Asistente Técnico ERN (MEX)

Marco Torres
Asesor Asociado (MEX)

Johner Venicio Correa C.
Asistente Técnico ERN (COL)

Mabel Cristina Marulanda F.
Especialista CIMNE(ESP)

Jairo Andrés Valcárcel T.
Especialista CIMNE(ESP)

Juan Pablo Londoño L.
Especialista CIMNE(ESP)

René Salgueiro
Especialista CIMNE(ESP)

Nieves Lantada
Especialista CIMNE(ESP)

Álvaro Martín Moreno R.
Asesor Asociado (COL)

Mario Díaz-Granados O.
Asesor Asociado (COL)

Liliana Narvaez M.
Asesor Asociado (COL)

Asesores Nacionales

Osmar E. Velasco
Guatemala

Sandra Zúñiga
Nicaragua

Alonso Brenes
Costa Rica

Banco Mundial – Gestión de Riesgo de Desastres / Región Latinoamérica y el Caribe

Francis Ghesquiere
Coordinador Regional

Oscar A. Ishizawa
Especialista

Joaquín Toro
Especialista

Fernando Ramírez C.
Especialista

Edward C. Anderson
Especialista

Stuart Gill
Especialista

Banco Interamericano de Desarrollo – Medio Ambiente / Desarrollo Rural / Desastres Naturales

Flavio Bazán
Especialista Sectorial

Cassandra T. Rogers
Especialista Sectorial

Hori Tsuneki
Consultor Interno

Tabla de contenido

1	Introducción.....	1-1
2	Componentes del modelo probabilista de riesgo	2-1
2.1	Evaluación de amenazas	2-2
2.1.1	Generalidades.....	2-2
2.1.2	Módulos de amenaza	2-2
2.1.3	Identificación de amenazas y análisis de información histórica	2-3
2.1.4	Análisis probabilista de amenazas	2-4
2.1.5	Nivel de resolución en los análisis de amenaza	2-6
2.2	Caracterización de la exposición	2-7
2.2.1	Generalidades.....	2-7
2.2.2	Clasificación general de activos y valoración	2-8
2.2.3	Base de datos de edificaciones	2-8
2.2.4	Base de datos de componentes de infraestructura	2-9
2.2.5	Ajuste de la valoración de activos	2-9
2.2.6	Información para impacto social y económico indirecto	2-10
2.3	Caracterización de la vulnerabilidad.....	2-10
2.3.1	Generalidades.....	2-10
2.3.2	Funciones de vulnerabilidad.....	2-10
2.4	Estimación de daños y pérdidas	2-11
2.4.1	Generalidades.....	2-11
2.4.2	Parámetros de cuantificación del riesgo	2-12
3	Evaluación del riesgo desde una perspectiva holística	2-14
4	Retención y transferencia del riesgo financiero	3-1
5	Ordenamiento territorial y planeación física	3-2
6	Análisis beneficio-costos de la prevención-mitigación	3-3
7	Escenarios para la respuesta a emergencias	3-4
8	Tratamiento de la incertidumbre.....	2-13

Índice de figuras

FIGURA 2-1 MODELO PROBABILISTA DE RIESGO Y ALGUNAS APLICACIONES	2-1
FIGURA 2-2 MÉTODO DE MODELACIÓN DE AMENAZAS BASADO EN EVENTOS DETONANTES	2-5

Índice de tablas

TABLA 2-1 MÓDULOS DE AMENAZA	2-3
TABLA 2-2 RESUMEN DE DESASTRES NATURALES REPRESENTATIVOS EN NICARAGUA. 1906 – 2007	2-4
TABLA 2-3 PARÁMETROS DE INTENSIDAD CONSIDERADOS PARA LAS DIFERENTES AMENAZAS.....	2-6
TABLA 2-4 DISTRIBUCIÓN DE POBLACIÓN SEGÚN USO DE LA EDIFICACIÓN.....	2-10

1 Introducción

El desarrollo de procesos naturales que constituyan una amenaza para la población y la infraestructura expuesta en una región determinada, está inevitablemente asociado con pérdidas económicas y de vidas humanas, siempre como función de la intensidad local que genera el evento amenazante, las condiciones de exposición y la vulnerabilidad de los elementos expuestos ante el evento peligroso.

Los devastadores impactos socioeconómicos sufridos durante las últimas décadas a raíz de desastres por fenómenos naturales, indican la alta vulnerabilidad que presentan las ciudades latinoamericanas, así como los niveles de protección financiera y social que se deben implementar para solventar el costo de las pérdidas económicas asociadas, no sólo referidas a las pérdidas directas, sino también a la disminución en la productividad de los sectores agrícola e industrial, la recesión en el ingreso tributario y la necesaria disposición de recursos para la atención de la emergencia.

La vulnerabilidad ante desastres naturales se ha incrementado en las últimas décadas en la región Centroamericana. El crecimiento poblacional, la expansión de las ciudades y el desarrollo de proyectos de infraestructura en general, han incrementado el número de activos expuestos, en una región afectada por una gran diversidad de fenómenos naturales peligrosos.

Desastres recientes, asociados a la ocurrencia de eventos de amenazas naturales, han resultado en pérdidas anuales en la región de más de un billón de dólares¹. Por ejemplo en 1998, el huracán Mitch pasó sobre Honduras y Nicaragua, dejando un saldo innumerable de víctimas humanas, y pérdidas económicas directas en toda la región centroamericana superiores a los 5 billones de dólares². Sólo en Honduras las pérdidas económicas directas están estimadas en el orden de los 2 billones de dólares. Más recientemente, el paso por la región del huracán Stan (2005) produjo pérdidas del orden de un billón de dólares tan sólo en Guatemala. Estos eventos son indicativos del inminente riesgo al que están sometidas un amplio número de ciudades y centros poblados en Centro América, dada su ubicación en zonas propensas a un amplio rango de amenazas naturales, cuyos impactos se hacen más notorios por los niveles de población e infraestructura ahí concentrados, así como los niveles de seguridad existentes.

A pesar de la considerable investigación que se ha desarrollado a nivel internacional en relación con el impacto de los desastres en el desarrollo, la incorporación formalmente del riesgo de desastre en los procesos de planificación ha sido hasta ahora muy tímida. Aunque en la región centroamericana, como en la mayoría de los países en desarrollo, se incluyen en su presupuesto algunas partidas, principalmente para la preparación y atención de

¹ Center for Research on the Epidemiology of Disasters, 2004

² U.S. National Oceanic and Atmospheric Administration, <http://lwf.ncdc.noaa.gov/oa/reports/mitch/mitch.html>

emergencias, y en algunos casos se hacen esfuerzos para orientar recursos hacia actividades de planificación referidas a la mitigación del riesgo, en muchos de ellos no se contabilizan las pérdidas probabilistas por sucesos naturales como un componente permanente de su proceso presupuestario. Ahora bien, si no se contabilizan las pérdidas contingentes potenciales se carece de la información necesaria para considerar y evaluar alternativas para reducir o financiar dichas pérdidas. Como consecuencia, las políticas encaminadas hacia la reducción del riesgo no reciben realmente la atención que requieren.

El hecho de no contar con modelos o indicadores adecuados que permitan cuantificar de alguna manera el riesgo, trae consigo una serie de implicaciones importantes: la más obvia es que al no valorar la exposición contingente ante las amenazas naturales se limita la capacidad del país para evaluar que tan deseables son las herramientas de planeamiento para hacer frente al riesgo. Estas herramientas requieren que el riesgo esté razonablemente cuantificado como condición previa a su empleo. Si bien es posible adoptar decisiones de política con cierto tipo de aproximaciones o sin estimaciones probabilistas³, el hecho de no cuantificar el riesgo cuando es posible hacerlo limita el proceso de toma de decisiones desde la perspectiva de la planificación física, la reducción y la financiación del riesgo.

³ Lo que permite establecer pérdidas máximas probables (PMP) y la pérdida anual esperada o prima pura de riesgo.

2 Componentes del modelo probabilista de riesgo

2.1 Introducción

De manera general se cuenta con una limitada cantidad de datos e información histórica acerca de eventos catastróficos, debido en algunos casos a la ocurrencia de desastres de baja frecuencia de repetición, y en otros casos a desastres con una ventana temporal de atención reciente y corta. Considerando la posibilidad de presentarse eventos futuros altamente destructivos, la estimación del riesgo debe enfocarse en modelos probabilistas, que permitan emplear la escasa información disponible para predecir posibles escenarios catastróficos en los cuales se considere la alta incertidumbre involucrada en el análisis. En consecuencia, la evaluación del riesgo debe seguir un enfoque prospectivo, anticipando eventos de ocurrencia científicamente probable que puedan presentarse en el futuro. Considerando las grandes incertidumbres asociadas a la estimación de la severidad y frecuencia de recurrencia de desastres naturales, la evaluación del riesgo se basa en formulaciones probabilísticas que incorporan la incertidumbre en la estimación del riesgo. La Figura 2-1 presenta el esquema general del modelo probabilista de evaluación del riesgo y algunas de las posibles aplicaciones directas en la gestión del riesgo.

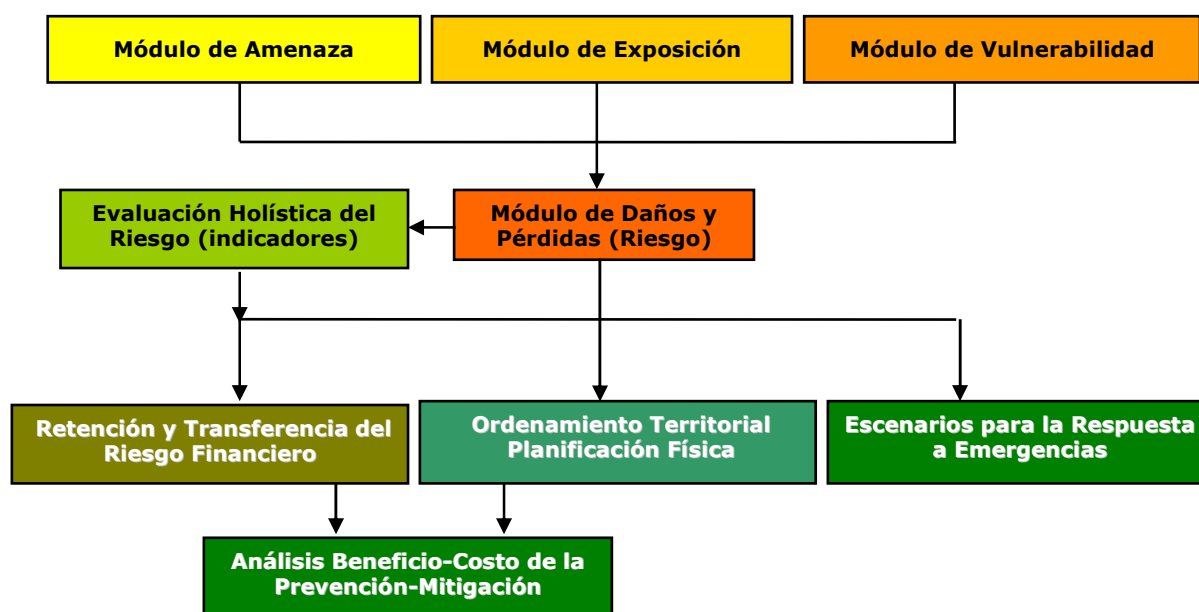


Figura 2-1
Modelo probabilista de riesgo y algunas aplicaciones

2.2 Evaluación de amenazas

2.2.1 Generalidades

La identificación de las amenazas que pueden afectar una región determinada constituye un paso preliminar al análisis de riesgos que es de muy alta relevancia. El conocimiento de las condiciones regionales de ocurrencia de eventos peligrosos, así como las características reportadas sobre eventos históricos importantes, proveen una primera idea del potencial destructivo de los fenómenos que amenazan la región, y permite conocer anticipadamente, de manera aproximada, los periodos de retorno de los eventos más importantes.

La amenaza asociada con un fenómeno natural se mide mediante la frecuencia de ocurrencia y la severidad medida mediante algún parámetro de intensidad del peligro determinado en una ubicación geográfica específica. El análisis de amenaza está basado en la frecuencia histórica de eventos y en la severidad de cada uno de ellos. Una vez se definen los parámetros de amenaza, es necesario generar un conjunto de eventos estocásticos que definen la frecuencia y severidad de miles de eventos, representando así los parámetros principales de la amenaza en la región. El análisis de amenaza genera valores de los parámetros de intensidad definidos para cada una de las amenazas estudiadas y para cada uno de los eventos estocásticos planteados, mediante la modelación analítica de cada uno de los fenómenos.

Los avances actuales en el desarrollo y presentación de la información geográfica y georeferenciada, permiten adelantos importantes en los análisis de amenaza de eventos recurrentes. La distribución espacial de intensidades asociadas a fenómenos naturales adversos, es un insumo fundamental para la posterior evaluación del riesgo. El manejo de este tipo de información por medio de capas en formato raster⁴, permite la automatización de los procesos de cálculo de riesgo, así como una comunicación simple y ágil de resultados.

2.2.2 Módulos de amenaza

El cálculo de la amenaza exige por lo tanto la generación de una serie de eventos estocásticos, cada uno con una frecuencia definida de ocurrencia, y que representen de manera adecuada las diferentes posibilidades de eventos de diferentes intensidades y en diferentes ubicaciones geográficas. Se desarrollan entonces una serie de modelos analíticos probabilistas para los principales fenómenos naturales tales como sismo, huracanes, lluvias intensas, inundaciones, deslizamientos y volcanes. Adicionalmente y dado que cada uno de estos fenómenos de la naturaleza producen diferente tipos de eventos asociados, se consideran en general los eventos que pueden desencadenar situaciones de desastre incluidos en la Tabla 2-1.

⁴ Estructura de datos que representa una malla rectangular de pixeles o celdas cada una con un valor determinado.

Tabla 2-1
Módulos de amenaza

No	Detonante	Evento de amenaza
1	Sismo	Movimiento del terreno
2	Sismo	Tsunami
3	Huracán	Vientos fuertes
4	Huracán	Marea de tormenta
5	Huracán	Lluvias huracanadas
6	Precipitación	Tormentas de lluvias no huracanadas
7	Inundación	Inundación detonada por precipitación
8	Deslizamientos	Deslizamientos detonados por lluvias o sismos
9	Volcán	Caída de cenizas
10	Volcán	Flujos piroclásticos
11	Volcán	Flujo de lavas

La evaluación de las amenazas se hace en términos de las intensidades asociadas a la capacidad destructiva de los eventos de amenaza considerados. Se plantean modelos probabilistas de evaluación, que se basan en la definición de escenarios particulares de diferente magnitud, caracterizados por una frecuencia de ocurrencia específica, que corresponde con las tendencias históricas observadas de recurrencia de la amenaza bajo análisis.

2.2.3 Identificación de amenazas y análisis de información histórica

Para una adecuada caracterización de las amenazas es necesario realizar un análisis exhaustivo de la información histórica y registros de la región en relación con la ocurrencia de todas las amenazas incluyendo sismos (movimiento del terreno y tsunami), huracanes (vientos, marea de tormenta o lluvias intensas), precipitaciones intensas, inundaciones deslizamientos y erupciones volcánicas de cualquier tipo.

La Tabla 2-2 presenta un resumen de los desastres naturales de mayor importancia ocurridos en los últimos 100 años que han producido más de US \$6 billones en daños en Nicaragua (US\$, 1998). Es evidente el alto impacto de diferentes desastres naturales en el país.

Tabla 2-2

Resumen de desastres naturales representativos en Nicaragua. 1906 - 2007
(Fuente: CRED/EM-DAT <http://www.emdat.be/> - Université Catholique de Louvain)

Tipo de desastre	N° de eventos	No de muertos	No de heridos	No de damnificados	Total afectados	Pérdidas estimadas US\$ (miles)
Sismo	9	12,686	20,534	305,660	735,894	887,000
<i>Promedio por evento</i>		1,410	2,282	33,962	81,766	98,556
Huracán	15	3,864	556	67,563	1,649,125	1,756,180
<i>Promedio por evento</i>		258	37	4,504	109,942	117,079
Inundación	11	404	0	10,369	351,207	2,050
<i>Promedio por evento</i>		37	0	943	31,928	186
Deslizamiento	1	29	18	0	5,769	0
<i>Promedio por evento</i>		29	18	0	5,769	0
Erupción volcánica	5	1	75	600	321,370	2,722
<i>Promedio por evento</i>		0	15	120	64,274	544

Para cada tipo de evento específico, se revisa la información existente a nivel nacional acerca de la recurrencia y magnitud asociadas, con el fin de establecer probabilidades de ocurrencia. Con esta información se conforma una base de datos que es útil para el análisis de frecuencias de las diferentes amenazas naturales. Se generan curvas estadísticas confiables de intensidad-frecuencia para cada una de las amenazas relevantes. La información relacionada con los eventos históricos debe incluir tanto información relativa a parámetros de ubicación e intensidad del evento, como información relacionada con los efectos y las pérdidas producidas por el evento, información que es importante para la calibración y validación de los modelos de análisis.

La base de datos debe incluir adicionalmente la información generada por entidades e instituciones relacionadas con la recopilación de información de eventos a nivel nacional e internacional, la revisión exhaustiva de estudios existentes, mapas de amenazas a nivel regional y nacional, y en general toda información útil para cuantificar la intensidad y los efectos de cada uno de los eventos.

2.2.4 *Análisis probabilista de amenazas*

El objetivo principal del análisis probabilista de amenazas es proporcionar la información necesaria de amenazas con el fin de calcular en forma confiable los diferentes parámetros probabilistas relacionados con las pérdidas y efectos de los diferentes fenómenos naturales, para diferentes periodos de retorno en el rango entre 10 y 1000 años siempre que sea posible, aunque pueden usarse periodos mayores en ciertos casos específicos como el de erupciones volcánicas.

Para el presente caso se emplea un enfoque basado en el análisis multi-riesgos de manera que se consideren los diferentes peligros con base en un enfoque basado en fenómenos detonantes que permite al analista capturar en forma probabilística el rango completo de daños posibles que pudieran atribuirse a un desastre natural mayor (ver Figura 2-2). En particular, el enfoque basado en eventos detonantes permite al analista la flexibilidad para determinar bien sea:

- Las pérdidas anuales totales o pérdidas máximas probables asociadas a un peligro específico (incluyendo pérdidas asociadas a todos los eventos secundarios), por ejemplo:

Pérdidas totales probabilísticas asociadas a Huracán = Suma de pérdidas probabilísticas asociadas a viento, marea de tormenta, inundación y deslizamientos

- Las pérdidas totales asociadas a una categoría de peligro relacionada con diferentes eventos detonantes, como por ejemplo:

Pérdidas totales probabilísticas asociadas a Deslizamientos = Suma de pérdidas probabilísticas asociadas a deslizamientos detonados por lluvias, terremoto y lluvias huracanadas.

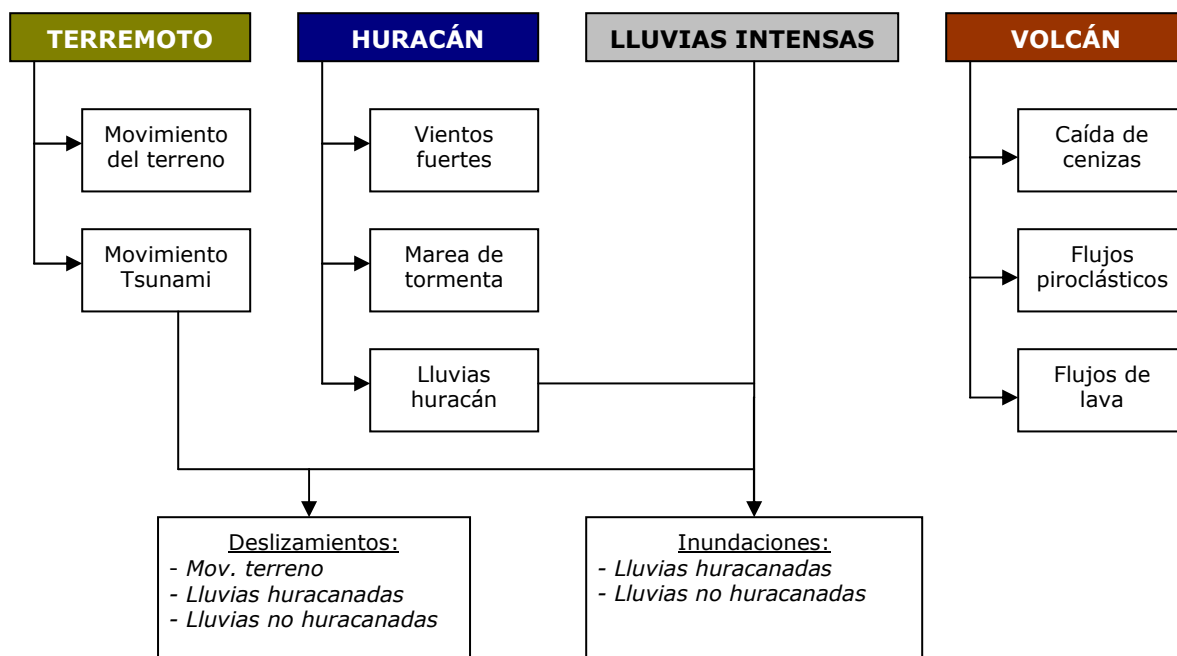


Figura 2-2
Relación entre fenómenos de la naturaleza y eventos de amenaza

Para cada uno de los peligros se construye un conjunto de escenarios estocásticos cada uno de ellos calificado con su frecuencia y severidad con base en la mejor información disponible al igual que en la opinión general de expertos en los diferentes campos.

El resultado de la evaluación de la amenaza es una base de datos para cada uno de los peligros estudiados, que contiene un conjunto de eventos estocásticos, característicos de la amenaza global, mutuamente excluyentes y colectivamente exhaustivos, que corresponden a todos los posibles escenarios de amenaza que pueden presentarse en la región

Cada uno de los análisis de amenaza arroja una distribución geográfica en un área de influencia determinada de valores de intensidad particulares, de acuerdo con lo presentado en la Tabla 2-3.

*Tabla 2-3
Parámetros de intensidad considerados para las diferentes amenazas*

Amenaza	Efecto	Parámetro de Intensidad
Sismo	Movimiento del terreno	Aceleración, velocidad y desplazamiento máximos del terreno, y espectrales para diferentes periodos estructurales
Sismo	Tsunami	Profundidad y extensión del área de inundación
Huracán	Vientos huracanados	Distribución de velocidades de viento pico para ráfagas de 3 segundos
Huracán	Marea de tormenta	Profundidad y extensión del área de inundación
Huracán	Lluvia huracanada	Distribución de la profundidad de la precipitación
Lluvias no huracanadas		Distribución de la profundidad de la precipitación en tormentas
Inundación		Profundidad y extensión del área de inundación
Deslizamientos		Distribución del Factor de Inseguridad o indicador de susceptibilidad al deslizamiento
Erupción volcánica	Caída de cenizas	Distribución de espesores de ceniza
Erupción volcánica	Flujos de lava	Distribución del área de afectación
Erupción volcánica	Flujos piroclásticos	Distribución del área de afectación

2.2.5 Nivel de resolución en los análisis de amenaza

Los análisis de amenaza se realizan mediante una grilla de dimensión variable, seleccionada para capturar de manera precisa variaciones en la severidad de la amenaza, en condiciones locales requeridas para el análisis, en las propiedades de uso y cubrimiento de la tierra o en la distribución y densidad de elementos expuestos incluyendo activos físicos o población. En los centros poblados principales se recomienda una dimensión mínima de

análisis de la grilla en el orden de 1 a 3 km. Para zonas rurales poco habitadas el tamaño máximo de la grilla debe ser del orden los 10 km, aunque cada caso particular definirá los requerimientos de densidad de mallado.

Los resultados del análisis de amenaza se almacenan en archivos con formato AME⁵, que se emplean en fases subsecuentes del análisis, junto con la exposición y la vulnerabilidad para el cálculo de las pérdidas.

2.3 Caracterización de la exposición

2.3.1 Generalidades

La exposición se refiere principalmente a los componentes de infraestructura o a la población expuesta que puede verse afectada por un evento determinado. Para realizar la caracterización de la exposición es necesario identificar los diferentes componentes individuales incluyendo su ubicación geográfica, sus características geométricas, físicas e ingenieriles principales, su vulnerabilidad ante el evento amenazante, su valoración económica y el nivel de ocupación humana que puede llegar a tener en un escenario de análisis determinado.

Los valores de exposición de bienes en riesgo se estiman a partir de fuentes de información secundaria como bases de datos existentes, o pueden ser derivados por medio de procedimientos simplificados basados en información social y macro económica general, como densidad poblacional, estadísticas de construcción o información particular más específica. Los modelos simplificados de exposición se utilizan cuando la información específica activo por activo no se encuentra disponible. Con base en la información disponible, se crea una base de datos de exposición, construida de manera geo-referenciada, donde se incluye toda la información específica requerida para el análisis. Se pueden incluir parámetros adicionales con alto nivel de detalle a la base de datos, para mejorar la confiabilidad general de los resultados. Rutinas especiales permiten la visualización de la información contenida en la base de datos y el cálculo de índices de interpretación general.

Por otro lado pueden utilizarse una serie de herramientas útiles para levantar información a partir de imágenes satelitales, fotografías aéreas o directamente mediante visitas de campo. Estas herramientas permiten conformar bases de datos georeferenciadas con algunas características básicas tales como tipo constructivos, área y número de pisos, lo cual puede luego complementarse con estadísticas de la zona, con zonificaciones previas de los tipos constructivos en la ciudad o mediante observaciones directas de campo. Este es un campo de mucho desarrollo en la actualidad en el cual sistemas como el Google Earth® y dispositivos móviles con GPS y capacidades de tomar fotografías y de conexión por Internet generan amplias posibilidades para generar bases de datos de exposición de alta confiabilidad y relativo bajo costo.

⁵ Formato raster para almacenamiento multiescenario de amenazas naturales. Desarrollado por ERN. Ver www.ern-la.com o www.ecapra.org

Adicionalmente a lo anterior y con el fin de estimar la afectación humana de posibles eventos amenazantes, se define una ocupación humana determinada a cada uno de los componentes que forman la base de datos de exposición. La ocupación máxima y el porcentaje de ocupación a diferentes horas del día, se definen con el fin de realizar análisis para diferentes situaciones particulares de ocupación como puede ser una ocupación típica diurna, una nocturna o cualquier otra que se quiera definir. Cuando no se cuenta con información específica sobre ocupación, se puede emplear la densidad aproximada de ocupación de determinado tipo constructivo para completar dicha información, o cualquier otro modelo simplificado de densidad demográfica.

2.3.2 *Clasificación general de activos y valoración*

El análisis debe en general incluir todos los activos físicos sujetos a riesgo por cuenta de cualquiera de las amenazas mencionadas. Dentro de los activos se incluyen las obras de infraestructura principales:

- (a) Edificaciones en las poblaciones principales
- (b) Instalaciones industriales importantes
- (c) Vías y Puentes
- (d) Sistema eléctrico incluyendo generación, subestaciones y transmisión
- (e) Sistema de comunicaciones
- (f) Sistemas de tuberías importantes
- (g) Obras de infraestructura relevantes

Se conforma una base de datos la cual debe incluir información relacionada con el tipo de activo, su localización y parámetros de valoración. Para la conformación de la base de datos se utilizan las siguientes fuentes de información según la disponibilidad de las mismas:

- Bases de datos de edificaciones a nivel de ciudades.
- Información de sensores remotos.
- Estadísticas demográficas y económicas.
- Algoritmos para asignación de información según índices, tendencias y estadísticas de información.

2.3.3 *Base de datos de edificaciones*

Para construir la base de datos de edificaciones se requiere principalmente la información disponible a nivel catastral o de censos recientes. Considerando que la información disponible rara vez incluye todos los datos relevantes requeridos, se aplican algoritmos de complementación y ajuste de información que permitan contar con una base de datos completa y consistente.

2.3.4 Base de datos de componentes de infraestructura

El inventario de elementos expuestos incluye también información relevante de otros componentes entre los cuales se pueden nombrar los siguientes:

- Tuberías, oleoductos y gasoductos
- Subestaciones del sistema de gasoductos y oleoductos
- Vías principales y secundarias divididas en tramos uniformes
- Puentes
- Túneles
- Presas y embalses
- Proyectos hidroeléctricos
- Centros industriales importantes
- Subestaciones eléctricas
- Líneas de transmisión eléctricas
- Subestaciones de comunicaciones
- Torres importantes
- Estaciones pluviométricas
- Instalaciones industriales importantes tales como refinerías, centrales termoeléctricas, subestaciones

Para la modelación de algunos de los anteriores componentes se utilizan normalmente analogías con otros componentes similares modelados y se realiza una descomposición de los elementos característicos que componen una instalación determinada. Por ejemplo el proyecto típico de generación hidroeléctrica incluye una presa, túneles, tuberías de conducción y de carga, subestación eléctrica, cuarto de máquinas y tubería de descarga.

2.3.5 Ajuste de la valoración de activos

Una vez realizada la valoración de cada uno de los componentes individuales de infraestructura se deben realizar verificaciones globales de los valores en riesgo con base en índices económicos generales. Para el efecto se utilizan parámetros tales como indicadores de valores per cápita o normalizados con el PIB del país o región, el stock de capital, valoración general de obras de infraestructura para efectos de seguros y otros.

La valoración incluye tanto el valor del bien como tal (elementos estructurales y no estructurales principales) como la valoración de contenidos susceptibles al daño. Por ejemplo para el caso de inundaciones normalmente los daños están asociados a los contenidos y a una porción de la estructura que requiere reparación y mantenimiento después de ocurrido el desastre.

2.3.6 Información para impacto social y económico indirecto

Con el fin de calcular el impacto social, se estima información general referente a la ocupación de edificaciones. Cuando no se dispone de información específica sobre ocupación, se puede emplear información aproximada para completar los datos, en función del tipo de construcción que se está analizando. La Tabla 2-4 presenta alguna información de referencia sobre ocupación general en ciudades intermedias colombianas (valores de referencia determinados por ERN).

*Tabla 2-4
Distribución de población según uso de la edificación*

Uso	Total de personas		Personas dentro del edificio	
	Día	Noche	Día	Noche
	[%]	[%]	[%]	[%]
Residencial	20	80	90	100
Comercial, Industrial, otros	80	20	90	100
Salud	15 m ² /persona		100	100
Educación	3 m ² /persona		100	0

2.4 Caracterización de la vulnerabilidad

2.4.1 Generalidades

La caracterización de la vulnerabilidad se realiza mediante la generación de funciones que relacionan el nivel de daño de cada componente con la intensidad del fenómeno de amenaza. La función de vulnerabilidad debe estimarse para cada uno de los tipos constructivos característicos, de manera que puedan asignarse a cada uno de los componentes de la base de datos de exposición. Mediante las funciones de vulnerabilidad asignadas es posible cuantificar el daño o afectación producida en cada uno de los activos ante la acción de un evento determinado, caracterizado por alguno de los parámetros de intensidad. Cada función de vulnerabilidad está caracterizada por un valor medio y una varianza con lo cual es posible estimar su función de probabilidad respectiva.

2.4.2 Funciones de vulnerabilidad

El cálculo de las funciones de vulnerabilidad para los diferentes tipos constructivos característicos de una zona o país se realiza teniendo en cuenta los siguientes conceptos:

- Materiales que constituyen la estructura principales y los elementos de fachada, divisiones internas y recubrimiento.
- Geometría general

- Tipo estructural principal
- Tipo de terminados y conexiones
- Fecha de construcción y norma de diseño utilizada
- Estado y posible ocurrencia de daños previos
- Defectos o debilidades específicas
- Obras de reforzamiento previas
- Comportamiento inelástico esperado

La estimación de la afectación o daño se mide normalmente en términos de la relación media de daño, RMD (en inglés *Mean Damage Ratio*, MDR). La RMD se define como la relación entre el costo esperado de reparación del elemento afectado y el costo de reposición del mismo. La función o curva de vulnerabilidad se define como la relación entre la RMD y el parámetro de intensidad seleccionado para el evento en consideración, más la curva equivalente para la varianza de los valores de pérdida para cada nivel de intensidad del evento. Cada componente de un sistema dado tendrá asignada una función de vulnerabilidad diferente, en términos probabilistas, para cada uno de los eventos de amenaza a los que puede estar sometido.

En general las funciones de vulnerabilidad se definen utilizando uno o varios de los siguientes tipos de información:

- Modelos analíticos calibrados que permitan estimar el comportamiento inelásticos de componentes o estructuras.
- Ensayos de laboratorio sobre componentes, elementos o estructuras
- Observaciones del comportamiento de componentes o estructuras durante eventos de intensidad conocida o estimada.
- Opinión de expertos cuando ninguna de las anteriores está disponible.

2.5 Estimación de daños y pérdidas

2.5.1 Generalidades

Con base en los modelos de amenaza probabilistas propuestos y en el inventario y valoración de activos expuestos con sus funciones de vulnerabilidad correspondientes, se desarrolla un modelo de análisis de riesgo probabilista o modelación de pérdidas probabilística para el país o zona de análisis.

Para calcular las pérdidas asociadas a un evento determinado, la relación media de daño, RMD obtenida de la función de vulnerabilidad, se convierte en pérdida económica multiplicándola por el valor de reposición del componente. Esta operación se repite para cada uno de los activos o elementos en el inventario de activos expuestos para cada uno de los eventos analizados. Posteriormente las pérdidas se van agregando, siguiendo una aritmética adecuada para funciones de densidad de probabilidad, según lo requerido.

Para el caso de cálculos de pérdida asociados con el tema de transferencia de riesgo y aseguramiento, deben tenerse en cuenta los parámetros respectivos tales como deducibles, límites máximos, coaseguros y otros.

2.5.2 Parámetros de cuantificación del riesgo

Para calcular las pérdidas, el porcentaje de daño obtenido del modulo de vulnerabilidad, es traducido a pérdidas económicas multiplicándolo por el valor de reposición del bien en riesgo, operación que se repite para cada tipo de activo, en cada localización, para después integrar las pérdidas según lo requerido. El resultado es una medida del riesgo que permite a las entidades encargadas de la toma de decisiones, contar con información esencial para la gestión de riesgos futuros. Las principales medidas del riesgo en términos económicos se describen a continuación:

Pérdida Anual Esperada: la PAE se calcula como la suma del producto entre las pérdidas esperadas para determinado evento, y la probabilidad de ocurrencia de dicho evento en un periodo de un año, para todos los eventos estocásticos considerados. En términos probabilistas, la PAE es la esperanza matemática de la pérdida anual.

Prima Pura de Riesgo: la PPR corresponde al valor de la PAE dividido por el valor de reposición del activo. Indica el costo que debe ser pagado anualmente para cubrir las pérdidas esperadas en un evento futuro. Se expresa en porcentaje o milésimas del valor de reposición.

Curva de Excedencia de Pérdida: la CEP representa la frecuencia anual promedio con que determinada pérdida económica se verá excedida. Es la medida más importante en el manejo del riesgo, dado que brinda información básica para la planeación y destinación de recursos necesarios para cumplir con los objetivos de gestión particulares. La CEP se puede calcular a partir del mayor evento probable en un año, o de manera uniforme para todos los eventos posibles, en función de su periodo de retorno. Generalmente se prefiere el segundo enfoque, dado que permite considerar más de un evento catastrófico al año.

Pérdida Máxima Probable (Probable Maximum Loss): la PML representa el valor de pérdida global en el portafolio para una tasa de excedencia dada. Dependiendo de la capacidad de la entidad para manejar el riesgo, se puede optar por gestionar pérdidas hasta determinado periodo de retorno.

Por otra parte, en adición a la evaluación probabilística de las pérdidas económicas, es también relevante en una gestión integral del riesgo y reducción de vulnerabilidad, considerar escenarios determinísticos de eventos naturales, como eventos históricos o estocásticos generados a partir de la evaluación de la amenaza. Esto es particularmente importante en la generación de planes de respuesta y atención de emergencias, y como análisis indicativo de los lugares de concentración de daños y personas afectadas.

2.6 Tratamiento de la incertidumbre

Los eventos catastróficos son aleatorios e impredecibles en su naturaleza y por lo tanto para la estimación de su frecuencia, severidad e impacto es necesario tener en cuenta la incertidumbre. Las incertidumbres pueden clasificarse en tres categorías diferentes dependiendo del punto de vista en que se consideren. Cada uno de los peligros se trata de manera diferente en relación con su incertidumbre dependiendo de la calidad y robustez de la información disponible. Los principales elementos a tener en cuenta en la estimación de las incertidumbres son los siguientes:

- (a) *Incetidumbre primaria vs. secundaria*: la incertidumbre asociada con el número y tipo de eventos que pueda ocurrir se denomina incertidumbre primaria. Por ejemplo cuando se analiza la incertidumbre asociada con la ocurrencia de terremotos, no es posible saber cuándo va a ocurrir el evento, y si este ocurre, en dónde y con qué intensidad. La incertidumbre primaria está asociada entonces a si el evento va a ocurrir, en dónde, y con qué intensidad. La incertidumbre secundaria está asociada a la cuantía de las pérdidas, dada la ocurrencia de un evento específico. Aunque la magnitud de las pérdidas siguen una determinada tendencia, existe un nivel de incertidumbre asociado a la determinación exacta de los efectos. Las mayores fuentes de incertidumbre en esta categoría corresponden a la incertidumbre asociada a las amenazas, las incertidumbres asociadas a las vulnerabilidades, el nivel de resolución en el cual se desarrolla el análisis y la incertidumbre asociada a la calidad de la información de los activos.

- (b) *Incetidumbre aleatoria vs. epistémica*: la incertidumbre aleatoria corresponde a la variación inherente asociada a un sistema o fenómeno físico. También se llama incertidumbre irreducible o estocástica. Por ejemplo ningún tipo de estudio o dato permitirá reducir la incertidumbre del 50% asociada a obtener una “cara” cuando se lanza una moneda al aire. Por otro lado la incertidumbre epistémica corresponde a la incertidumbre asociada a la falta de conocimiento en las cantidades o procesos del sistema físico del fenómeno. También se llama incertidumbre del modelo. Por ejemplo cuando se simula un movimiento del terreno, la selección de una determinada ecuación de atenuación puede no ser la adecuada debido a la falta de mediciones y datos que la corroboren. Las desviaciones del modelo, por ejemplo al sobreestimar la intensidad del movimiento en el campo cercano se aplicará de manera sistemática a todas las modelaciones de eventos obteniéndose como resultado una estimación “desviada” del movimiento del terreno. Datos o información complementaria pueden potencialmente reducir o eliminar las desviaciones. Sin embargo la incertidumbre aleatoria permanecerá reflejando siempre la característica aleatoria del proceso.

- (c) *Incetidumbre correlacionada vs. no correlacionada*: cuando la respuesta de dos sistemas está correlacionada, entonces la incertidumbre asociada a su comportamiento combinado también está correlacionada. Esto significa que si por ejemplo la respuesta de un sistema tiene una incertidumbre de una desviación estándar por encima de la media, la respuesta del segundo sistema será similar.

Cuando se considera la respuesta combinada de varios sistemas (por ejemplo al determinar las pérdidas de edificaciones), tanto los valores medios de la respuesta como la incertidumbre son aditivas llevando a un coeficiente de variación constante. Para sistemas no correlacionados (independencia de eventos), la respuesta media es aditiva pero la agregación de incertidumbres sigue la regla de la raíz cuadrada de la suma de los cuadrados, llevando a un coeficiente de variación decreciente. En general, la incertidumbre en la respuesta de las construcciones ante catástrofes relacionadas con fenómenos naturales se modela como una combinación de incertidumbres correlacionadas y no correlacionadas.

La incorporación de la incertidumbre para cada uno de los peligros estudiados se hace en términos de la variabilidad esperada de cada uno de los parámetros clave a través de los coeficientes de variación respectivos. Esta incertidumbre se agrega en varios niveles del proceso de modelación para llegar a la estimación de un nivel global de incertidumbre aplicable a los valores finales de pérdida estimados. Estos valores de incertidumbre tienen como fin recoger toda la incertidumbre asociada al proceso integral de modelación del riesgo.

3 Aplicaciones del análisis de riesgo

3.1 Evaluación del riesgo desde una perspectiva holística

La evaluación holística del riesgo se fundamenta en afectar el riesgo físico por un factor de impacto que depende de las condiciones propias del contexto socioeconómico en el cual se presenta el desastre, las cuales empeoran el escenario inicial de pérdidas físicas. Se puede acomodar este enfoque a la evaluación del riesgo por cualquier tipo de amenaza natural, a partir de la evaluación inicial del daño físico potencial asociado al fenómeno. En seguida se consideran las condiciones sociales que agravan los efectos físicos del fenómeno. De esta manera, el riesgo se establece para cada unidad de análisis, por medio de factores de impacto que modifican el riesgo físico asociado a la vulnerabilidad de edificaciones o infraestructura, para tener en cuenta las condiciones socioeconómicas de cada unidad de análisis.

Una vez realizada la evaluación para determinado centro poblado, es sencillo identificar los aspectos más relevantes en el índice total de riesgo. Pueden establecerse las prioridades de mitigación en función de modificar aquellas condiciones (sub-indicadores) que tienen una mayor influencia en el riesgo. Esta técnica permite comparar el riesgo bajo diferentes condiciones socioeconómicas particulares. Debe enfocarse hacia el control del riesgo en lugar de obtener una precisa evaluación del mismo. El objetivo último es brindar información que permita una mejor toma de decisiones en relación a la priorización y efectividad de las mismas en el tiempo.

3.2 Retención y transferencia del riesgo financiero

Cualquier tipo de riesgo catastrófico implica una afectación financiera no sólo para las compañías aseguradoras y reaseguradoras, sino también para los gobiernos quienes son responsables de asumir o retener los niveles de riesgo no asegurables. En esta medida, los modelos de estimación de riesgo constituyen una importante y poderosa herramienta en el desarrollo de las actividades propias de las instituciones de planeación económica y financiera. La retención y transferencia del riesgo debe ser un proceso estudiado, planeado y controlado, dado que es posible que la magnitud de una catástrofe particular exceda la capacidad financiera y de respuesta por parte del gobierno, en especial en países en desarrollo.

El modelo de retención y transferencia del riesgo debe estar basado en una cooperación entre las instituciones gubernamentales y los pobladores mismos, quienes serán los directos propietarios de las pólizas de aseguramiento de sus respectivos bienes. Este modelo puede considerar aportes por subsidios cruzados para solventar las primas asociadas a los bienes de estratos socioeconómicos con poca capacidad de pago, los cuales son recaudados por las administraciones municipales a través de impuestos, y transferidos a las compañías aseguradoras.

El análisis establece las condiciones de aseguramiento requeridas, valiéndose de los resultados obtenidos del módulo de daños y pérdidas, como pérdida máxima probable y

prima pura de riesgo, y de los parámetros característicos de la estrategia adoptada tales como deducibles, límites máximos, coaseguros y otros.

3.3 Ordenamiento territorial y planeación física

La planificación del ordenamiento territorial constituye una de las estrategias más importantes de las autoridades regionales para orientar el desarrollo hacia metas de sostenibilidad y seguridad. La planeación del desarrollo permite constituir un modelo de ocupación del territorio en el mediano y largo plazo, el cual establece las condiciones de organización, estructura básica y acciones necesarias para la adecuada expansión de regiones urbanas y rurales pertenecientes a una entidad territorial específica.

El proceso de planeación del territorio permite incorporar criterios de reducción de riesgos, especificando condiciones sostenibles y seguras de uso y ocupación, en armonía con los objetivos ambientales, sociales y económicos de la entidad territorial correspondiente. Por tal motivo, el análisis de riesgos se posiciona como uno de los insumos fundamentales que los planificadores municipales deben incluir en la definición de los planes de desarrollo territorial. La previsión de los efectos adversos que los fenómenos naturales peligrosos pueden imponer sobre asentamientos humanos o elementos de infraestructura locales, permiten definir las zonas del territorio donde la ocupación y explotación es más segura. La inclusión de estos análisis en los procesos de ordenamiento territorial, derivan en la protección y mejoramiento de la calidad de vida de los habitantes, y la protección económica, ambiental, social y política del municipio.

Cabe resaltar que, dentro de la gestión integral de riesgo, es necesario tomar en cuenta los riesgos futuros que podría afrontar el municipio por la explotación del territorio y la expansión de sus asentamientos humanos. Los planes de preparación a emergencias y mitigación de riesgos actuales, no constituyen una medida de protección en el largo plazo, si no se consideran adecuadamente los riesgos futuros. Es más, una planificación territorial inadecuada podría encaminar al municipio a una situación de generación constante de riesgos para su población e infraestructura.

Las restricciones de ocupación de territorio resultantes de la incorporación de la gestión del riesgo en los planes de ordenamiento territorial, deben estar pensadas de tal manera que maximicen los beneficios obtenidos por el municipio en el largo plazo, tales como conocimiento claro y detallado de las condiciones locales de amenaza, vulnerabilidad y riesgo, zonificación de las áreas urbanizadas en términos de zonas susceptibles a sufrir afectaciones importantes por efecto de fenómenos naturales, zonificación de las áreas rurales y de expansión en términos de la seguridad y sostenibilidad que pueden proveer al municipio, y en general una reglamentación clara de ocupación y uso del territorio.

3.4 Análisis beneficio-costo de la prevención-mitigación

El análisis costo-beneficio aplicado en la estimación del riesgo constituye una herramienta sistemática para la evaluación de decisiones y políticas relacionadas con el manejo estratégico del riesgo. El análisis se realiza dependiendo del tipo y calidad de la información disponible. En este estudio se emplea un procedimiento simplificado de cinco pasos:

1. *Especificar la naturaleza del problema:* en el presente caso, la vulnerabilidad de las construcciones incluidas en el portafolio, sin considerar medidas de reforzamiento o mitigación. Este es usualmente el punto de referencia que permitirá establecer que tan benéficas son otras alternativas.
2. *Determinar los costos directos de las medidas de mitigación:* para cada medida de mitigación propuesta se debe especificar el costo directo de implementación. Si la financiación se hace por medio de un préstamo, se debe incluir el costo de capital. Las medidas de mitigación deben definirse en términos de costos directos de implementación, y reducción de la vulnerabilidad.
3. *Determinar los beneficios de las medidas de mitigación:* los beneficios esperados por la implementación de determinada medida, son en principio una reducción en el nivel de vulnerabilidad (en algunos casos puede disminuirse en parte el nivel de amenaza), lo cual implica una reducción en el daño estructural, reducción en pérdidas indirectas, reducción en la magnitud del lucro cesante asociado a la no utilización del activo, y reducción en el número de víctimas esperadas. La condición rehabilitada se incluye en la base de exposición, representada por medio de un sistema estructural menos vulnerable.
4. *Calcular el atractivo de las diferentes alternativas de mitigación planteadas:* el atractivo es calculado por medio de la relación entre el costo de la implementación de la medida y los beneficios asociados a dicha implementación. Se emplea una tasa de descuento representativa que permita convertir los beneficios futuros y posibles costos futuros a valor presente neto (VPN) o relación beneficio-costo (B/C). Se considera atractiva una medida de mitigación desde un punto de vista económico, cuando el VPN es positivo, o de manera equivalente, la relación B/C es mayor a uno.
5. *Escoger la mejor alternativa de mitigación:* la mejor alternativa entre opciones mutuamente excluyentes, corresponderá a la que presente un mayor VPN, o equivalentemente una mayor B/C.

Dado que la ocurrencia de eventos naturales desastrosos se considera de manera probabilística, la relación beneficio-costo debe entenderse como una variable aleatoria. En consecuencia, su función de densidad de probabilidad (FDP) debe calcularse a partir del VPN de la suma de pérdidas futuras probables, comparativamente con los beneficios esperados de la aplicación de un plan de mitigación del riesgo. En este último caso la

decisión o resultado final estará asociado a un nivel de probabilidad aceptable de que la relación beneficio-costos sea mayor que 1.0.

3.5 Escenarios para la respuesta a emergencias

En el proceso de conocimiento y evaluación de los riesgos ocasionados por amenazas naturales, es posible identificar condiciones en las ciudades en cuanto a la exposición del capital físico y humano, la vulnerabilidad física y social y su distribución geográfica y los daños y pérdidas esperados por tales eventos. A través de procedimientos de evaluación de amenazas y análisis del riesgo y su adecuada cuantificación y visualización, se genera la información necesaria para una adecuada toma de decisiones por parte de los encargados de la planeación y desarrollo de la comunidad al determinar la magnitud del impacto en el desarrollo de una ciudad. Así mismo, se establecen parámetros para la formulación de planes dentro de la gestión ex ante y ex post del riesgo.

La evaluación del riesgo para la respuesta a emergencias, debe realizarse de manera determinista, identificando el peor o los peores escenarios posibles en términos de pérdidas económicas y de vidas humanas asociadas, en función de las amenazas que pueden ocurrir en el área urbana de análisis. Los resultados permitirán la definición de planes de contención de la emergencia en lo que se refiere a la identificación de alberges potenciales, establecimiento de puntos de atención médica urgente, rutas de movilidad del personal de emergencias, capacidad operativa post-desastre de los sistemas públicos y de comunicaciones, inspección estructural de construcciones e infraestructura, y disposición de los recursos económicos y humanos.

Normalmente los escenarios de pérdida y riesgo se establecen para un evento determinado el cual se selecciona en función del nivel de preparación al cual se desea llegar. Como en términos generales siempre existirá una situación de desbalance entre las capacidades de las entidades a cargo de la atención de emergencias y los peores posibles escenarios de destrucción y daño que pueden llegar a presentarse, la política de preparación en el largo plazo debe incluir escenarios cada vez más exigentes, dentro de una política continua y duradera de reducción del riesgo.