

# Modelo Basado en Lógica Difusa para la Construcción de Indicadores de Vulnerabilidad Urbana Frente a Fenómenos Naturales

Recibido para evaluación: 15 de Septiembre de 2003  
Aceptación: 24 de Noviembre de 2003  
Recibido versión final: 26 de Noviembre de 2003

Carlos Eduardo García L.<sup>1</sup>  
Jorge Eduardo Hurtado G.<sup>2</sup>

## RESUMEN

A partir de considerar holísticamente la vulnerabilidad de un sistema urbano, integrando en su estimación factores naturales, tecnológicos y sociales, se estableció un modelo basado en un sistema de lógica difusa que permite estimar la vulnerabilidad que un sistema determinado presenta ante la ocurrencia de un fenómeno natural.

El modelo busca integrar variables de tipo cuantitativo y cualitativo en un sistema dinámico, en el que las variaciones en alguna de ellas tienen un impacto positivo o negativo sobre las otras. Se diseñó un modelo de sistema urbano y un modelo de indicadores para determinar la vulnerabilidad del mismo ante fenómenos naturales.

**PALABRAS CLAVE:** Sistema Urbano, Sistema de Lógica Difusa, Vulnerabilidad Holística, Riesgo de Desastre

## ABSTRACT

Upon considering the vulnerability of a urban system in a holistic way and taking into account some natural, technological and social factors, a model based upon a system of fuzzy logic, allowing to estimate the vulnerability of any system under natural phenomena potentially catastrophic is proposed.

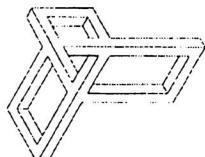
The model incorporates quantitative and qualitative variables in a dynamic system, in which variations in one of them have a positive or negative impact over the rest. An urban system model and an indicator model to determine the vulnerability due to natural phenomena were designed.

**KEY WORDS:** Urban System, Fuzzy Logic, Holistic Vulnerability, Natural Disasters, Disaster Risk

- 
1. Geólogo. Mgr. Medio Ambiente y Desarrollo. IDEA Manizales  
Universidad Nacional de Colombia
  2. Profesor  
Instituto de Estudios Ambientales  
IDEA Manizales  
Universidad Nacional de Colombia  
jhurtado14@epm.net.co

## 1. INTRODUCCIÓN

La vulnerabilidad, como uno de los aspectos fundamentales en la reducción de las causas de los desastres, ha sido considerada de manera global, desde los inicios de la década de los 90, tomando en cuenta para su evaluación diferentes facetas del contexto referidas a aspectos naturales, físicos, económicos, sociales, políticos, técnicos, ideológicos, culturales, educativos, ecológicos e institucionales, trascendiendo la concepción naturalista e ingenieril de décadas anteriores.



La vulnerabilidad es el principal proceso y sin duda sobre el que deberá profundizarse de manera decidida en la gestión de riesgos a nivel mundial y nacional. Pero, es necesario que la profundización en su estudio, especialmente en espacios urbanos, integre de manera significativa y operativa todos los elementos que conforman un sistema urbano, tanto sus componentes naturales, sociales como tecnológicos.

Para la evaluación de la vulnerabilidad de los sistemas urbanos frente a fenómenos naturales, es necesario establecer y conceptualizar el sistema urbano como un sistema dinámico complejo. Un sistema en el que interactúan elementos poblacionales con estructuras naturales y tecnológicas, cuyas características tienen variaciones en el tiempo y el espacio, que no obedecen a comportamientos lineales, sinó que expresan la necesaria incursión en nuevos campos del análisis matemático, para poder integrar variables de dichos elementos que tienen características diferentes, en cuanto a su capacidad de procesamiento y sistematización.

La integración de la información de las variables referidas en un sistema urbano, generalmente tiene inconvenientes al relacionar matemáticamente información inexacta, imprecisa o producto de valoraciones de expertos, que puede ser juzgada como subjetiva. El diseño de un modelo de sistema difuso permite una aproximación a solucionar éste problema, facilitando el procesamiento de las valoraciones dadas por expertos, de tipo cualitativo por medio de operadores difusos, que permiten pasar de información cualitativa a cuantitativa y viceversa, y puede permitir la construcción de un índice de vulnerabilidad en sistemas urbanos.

En síntesis, a partir de una revisión de los principales desarrollos teóricos y metodológicos en estudios sobre desastres, centrando la documentación en las conceptualizaciones sobre amenazas, vulnerabilidad y riesgo y la asociación con los sistemas urbanos, se busca plantear un modelo para evaluar la vulnerabilidad urbana frente a fenómenos naturales, utilizando los sistemas de lógica difusa como herramienta para la interacción de las variables de tipo cualitativo y cuantitativo que determinan un sistema urbano.

## 2. ESTUDIOS SOBRE DESASTRES: AMENAZAS, VULNERABILIDAD Y RIESGO EN ESPACIOS URBANOS

En la comprensión de los desastres es fundamental una conceptualización sobre los procesos y las dinámicas que los conforman en términos de los estudios sobre amenazas, vulnerabilidad y riesgo, bajo una concepción integral y desde una perspectiva sistémica, resaltando la importancia de la vulnerabilidad como eje integrador del debate sobre el análisis y la gestión de riesgos y el estudio de los desastres (Lavell, 2000 a).

En primer lugar, una amenaza se refiere a un peligro latente o factor de riesgo externo de un sistema o de un sujeto expuesto, que puede tener una expresión matemática como la probabilidad de exceder un nivel de ocurrencia de un suceso con una cierta intensidad, en un sitio específico y durante un tiempo de exposición determinado (Cardona, 2001). Este término tiene diferentes connotaciones en función del origen del suceso, como lo plantea la clasificación propuesta por Allan Lavell, (1996) en amenazas naturales, sionaturales, antrópico-contaminantes y antrópico-tecnológicas.

La evaluación de amenazas se basa en análisis cualitativos: en los que la evaluación de componentes es realizada subjetivamente por expertos, asignando rangos de intensidad que

permiten establecer niveles con criterios subjetivos brindados por la experiencia y la experticia, en esta metodología es fundamental el conocimiento de la ocurrencia histórica de fenómenos en tiempo, intensidad y espacialidad; y los análisis cuantitativos, en los que las variables involucradas se cuantifican mediante estimaciones físicas o modelaciones matemáticas.

En segundo lugar la vulnerabilidad se puede considerar como "la predisposición o susceptibilidad física, económica, política o social que tiene una comunidad de ser afectada o sufrir daños en caso de que se manifieste un fenómeno desestabilizador de origen natural o antropogénico" (Cardona, 2001). Es importante considerar que la vulnerabilidad es un proceso dinámico y de construcción histórica de la sociedad. La existencia, ubicación, estructura y organización de la sociedad desequilibrados con un desastre, no son procesos anacrónicos (Lavell, 1996)<sup>1</sup>, y son justamente estos procesos construidos en el tiempo los que configuran la vulnerabilidad.

La vulnerabilidad en una concepción dinámica, sugiere la necesidad de examinar factores interdependientes que son construidos en la sociedad, y en sus procesos dinámicos tanto internos como externos para la adaptación y transformación del entorno natural y construido. Así mismo, la vulnerabilidad como concepto dinámico, cambia en el tiempo en la medida en que la sociedad incorpora respuestas frente a la presencia de nuevas amenazas; se puede considerar la vulnerabilidad como una medida relativa de niveles críticos que pueden diferir unos de otros en su estructura causal, evolución y severidad (Downing y Bakker, 1999)<sup>2</sup>.

La vulnerabilidad aparece como un sistema articulado que, bajo un enfoque cualitativo, requiere de la identificación y análisis de los factores que la constituyen y que surgen frecuentemente como: crecimiento demográfico y urbano, modos de uso del suelo, factores socio-económicos, psico-sociológicos, cultura, historia de las sociedades expuestas (Metzger, 1996), al igual que factores técnicos, funcionales, institucionales y político administrativos (d'Ercole, 1994)<sup>3</sup>. Siguiendo a Wilches – Chaux (1.989), quien considera la vulnerabilidad como "la incapacidad de una comunidad para absorber, mediante el autoajuste, los efectos de un determinado cambio en su medio ambiente, o sea su inflexibilidad o incapacidad para adaptarse a ese cambio". La interacción de factores y características en su configuración, permiten comprender la vulnerabilidad como un sistema dinámico, que puede ser analizado desde diferentes ángulos, expresados en términos de las características naturales, físicas, económicas, sociales, políticas, ideológicas, culturales, educativas, ecológicas e institucionales que un sistema urbano en su conjunto tiene.

En este mismo sentido Peduzzi (2000), conceptualiza la vulnerabilidad a partir de la integración y la interacción de tres componentes: factores físicos (biológicos, geológicos, climáticos), factores socioeconómicos (densidad de población, calidad de infraestructura, organización social, actividades económicas, sistema político) y la capacidad de respuesta (prevención, sistemas de alerta temprana, de mitigación, capacidad de ayuda y de intervención).

Diversos autores han relacionado aspectos de tipo socioeconómico, natural y físicos para la comprensión de la vulnerabilidad, puede resaltarse el trabajo de Anderson y Woodrow (1989), Cannon (1991), Nicholls y Hoozemans (2000) y el de Downing y Bakker (1999) que igualmente conciben la vulnerabilidad desde una causalidad tripartita entre la conjunción de las estructuras social, económica y política. Una concepción compleja de los factores de la vulnerabilidad bajo un enfoque multicriterio los reagrupa en cinco grandes conjuntos: factores naturales, factores socioeconómicos, factores técnicos, factores coyunturales (día, hora, situación política), factores funcionales e institucionales (Chardon, 2002). Esta concepción introduce un análisis profundo del enfoque sistémico en el estudio de la vulnerabilidad referidos a escalas de tiempo y espacio específicos. Como lo plantean Watss y Bohle (1993) citados por Vatsa (2000), al definir la vulnerabilidad como un espacio multiestratificado y multidimensional que se centra en la determinación de las capacidades políticas, económicas e institucionales de las personas en sitios y tiempos específicos.

Según Cardona (2001 b), los factores que originan la vulnerabilidad son:

- La exposición, referida a la susceptibilidad del asentamiento humano debida a su fragilidad física o a su proximidad a la zona de influencia de los fenómenos peligrosos.
- La fragilidad social, referida al nivel de marginalidad y segregación social del asentamiento

<sup>1</sup> En *Ciudades en Riesgo*, capítulo *Degrado ambiental, riesgo y desastre urbano. Problemas y conceptos. Hacia la definición de una agenda de Investigación*.

<sup>2</sup> Citado por Krishna Vatsa (2000) para referir elemento claves de la vulnerabilidad.

<sup>3</sup> Citado por Pascale Metzger en *Medio Ambiente Urbano y Riesgos: Elementos para la Reflexión. Compilado en el libro Ciudades y Riesgo. LA RED: 1996*.

- humano y sus condiciones de desventaja y debilidad relativa por factores socioeconómicos.
- La falta de resiliencia, que expresa las limitaciones de acceso y movilización de recursos del asentamiento humano, su incapacidad de respuesta y sus deficiencias para absorber el impacto.

La evaluación de la vulnerabilidad es un estudio de la capacidad de un elemento o sistema para resistir o absorber el impacto de un suceso que caracteriza una amenaza (Cardona, 2001). Planteada así, la evaluación de la vulnerabilidad busca establecer la posibilidad que tiene cada uno de los componentes de un sistema de resistir, responder y recuperarse ante los efectos generados por la ocurrencia de un fenómeno natural o antrópico. En términos de Lavell (2000 – b), "es establecer la propensidad de sufrir daños y medir las dificultades de una sociedad para recuperarse del daño sufrido".

En la evaluación de la vulnerabilidad es necesario partir de criterios técnicos y sociales. El criterio técnico en cuanto a la factibilidad de cuantificación de elementos físicos y funcionales, como sismoresistencia en edificaciones e infraestructura en líneas vitales, estudios técnicos del suelo, obras de bioingeniería para estabilización de terrenos, así como de la consideración de criterios mas amplios en términos del análisis de exposición de dicha infraestructura, para indicar si el elemento se encuentra en el área de influencia del fenómeno. En segundo lugar, el criterio social en términos de la falta de resiliencia, o la capacidad de absorber el impacto; su estimación puede ser cualitativa o relativa, debido a que está relacionada con aspectos económicos, educativos, culturales, etc. (Cardona, 2001). Es necesario hacer énfasis en que la evaluación de la vulnerabilidad desde un criterio social, implica una valoración de las condiciones de la sociedad humana en términos ideológicos, educativos, culturales, económicos, políticos e institucionales (Wilches Chaux, 1989).

Para la OEA (2000), específicamente para el IACNDR y el VAI<sup>4</sup>, la evaluación de la vulnerabilidad debe responder a una estructura y a una función específicas. En la estructura se incluyen factores como población, amenazas naturales, el sector involucrado, medidas de impacto, el foco geográfico (construcciones específicas o tipo de construcciones, infraestructura de redes, ciudad, estado o provincia). La función incluye impactos posibles y condiciones relativas de la población en general o de grupos específicos tales como la pobreza; necesidades de desarrollo en escenarios de prioridades, metas y políticas; información pertinente para evaluaciones de impacto ambiental y para el acceso al aseguramiento y a la clasificación, así como información pertinente para proyectos de inversión en cualquiera de las fases e información pertinente para la asistencia en la reconstrucción postdesastre, a nivel de proyecto en cualquiera de las fases.

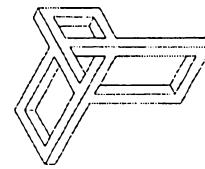
Con el objetivo de analizar avances metodológicos en la evaluación de la vulnerabilidad, el Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD) ha realizado en los últimos años, encuentros de expertos tendientes a establecer el estado del arte a nivel mundial sobre la construcción de modelos en la evaluación de la vulnerabilidad y, especialmente, en la construcción de un índice mundial de vulnerabilidad<sup>5</sup>. De esta manera los trabajos de Vatsa (2000), Guha – Sapir y Michellier (2000), Girot (2000), Davidson y Lambert (2000) Davidson y Lambert (2000), Cardona y Hurtado (2000), Smolka, Allmans y Ehrlicher (2000), Crowards (2000), Wisner (2000), Palm (2000) y Peduzzi (2000) entre otros, han fortalecido la discusión internacional sobre la reducción de desastres, a la vez que han evidenciado el trabajo decidido en la construcción de indicadores de vulnerabilidad como una estrategia fundamental en la búsqueda de dicho fin.

En tercer lugar el estudio del riesgo, requiere inicialmente de la consideración de características como la convolución que se da entre amenaza y vulnerabilidad, siguiendo a Cardona (2001) "es importante señalar que la convolución es un término matemático que se refiere a la concomitancia y mutuo condicionamiento, en este caso, la amenaza y la vulnerabilidad. Dicho de otra forma no se puede ser vulnerable si no se está amenazado, y no existe una condición de amenaza para un elemento, sistema o sujeto si no está expuesto y es vulnerable a la acción potencial que representa dicha amenaza. En otras palabras, no existe amenaza o vulnerabilidad independientemente, ya que son situaciones mutuamente condicionantes que se definen en forma conceptual de manera independiente para efectos metodológicos y para una mejor comprensión del riesgo". Cada una de las expresiones, a pesar de su estrecha e interdependiente relación, tiene aspectos conceptuales y metodológicos propios.

4. Interamerican Committee on Natural Disaster Reduction (IACNDR) es un grupo de trabajo en la OEA en el tema de la Evaluación e Indexación de la Vulnerabilidad (VAI).

5. El Índice de Vulnerabilidad Global, como una iniciativa del PNUD para establecer, desde la Investigación y los diferentes países, un indicador que integrara todo tipo de elementos en la vulnerabilidad y que pudiera tener aplicación en todos los países del mundo.

La integración de este elemento en los procesos de gestión de riesgos, entendidos como el planeamiento y ejecución de actividades y estrategias orientadas a reducir las pérdidas que se dan sobre la población, bienes, servicios o el ambiente, evidencian la necesidad de avanzar en sistemas de gestión que evalúen la vulnerabilidad, realicen predicciones de los efectos y formulen medidas adecuadas de intervención. Este marco de acción según los planteamientos de Freeman y Martin (2001) puede establecer un sistema amplio para el manejo de desastres en el que se cuente con los siguientes elementos: identificación de riesgos, reducción de riesgos, transferencia de riesgo, preparación, respuesta a emergencias, rehabilitación y reconstrucción.



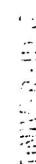
Se debe hacer un especial énfasis en la importancia que tiene la reducción de la vulnerabilidad para la disminución de pérdidas de vidas humanas y daños como consecuencia de peligros naturales, hecho fundamental y fuertemente considerado en el establecimiento de la estrategia internacional para la reducción de desastres; en otras palabras, los desastres pueden prevenirse si se adoptan medidas deliberadas destinadas a reducir la vulnerabilidad (Naciones Unidas, 2001).

Finalmente y desde los enfoques dados por las ciencias naturales, las ciencias aplicadas y las ciencias sociales y desde una concepción holística, sugerida por la dialéctica de éstas, una definición formal de desastre se puede plantear según Cardona (2001) como "una situación o proceso social que se desencadena como resultado de la manifestación de un fenómeno de origen natural, tecnológico o provocado por el hombre que, al encontrar condiciones propicias de vulnerabilidad en una población, causa alteraciones intensas en las condiciones normales de funcionamiento de la comunidad"<sup>6</sup>. En otras palabras, un desastre representa la materialización del riesgo o la probabilidad de pérdidas futuras, determinadas por la existencia de factores de amenaza y de vulnerabilidad, construidos en la sociedad, con los procesos que en ella se dan.



### 3. ENFOQUE CONCEPTUAL PARA LA EVALUACIÓN DE LA VULNERABILIDAD URBANA

En la estructuración de una propuesta para evaluar la vulnerabilidad urbana a partir de un modelo de indicadores basado en lógica difusa, se tiene como referencia un marco conceptual soportado en planteamientos alrededor los sistemas urbanos, los aspectos esenciales en estudios de vulnerabilidad.



En primer lugar, se concibe un sistema urbano como una red que se establece a partir de las relaciones que se dan entre componentes sociales, tecnológicos y naturales. El sistema urbano se estructura a partir de sus objetivos y fines que se pueden señalar a partir de la centralización y concentración de la actividad social en términos políticos y económicos. Igualmente y como lo plantea Latorre (1996), a pesar de la autonomía y poder de uno de los componentes en el sistema, la realidad del sistema urbano se establece a partir de la consideración integral de los componentes, de su retroalimentación o afectación interdependiente, por su sinergia y su comprensión desde el estudio de las interrelaciones de los componentes. En síntesis los estudios sobre los sistemas urbanos o referidos a ellos, implican el estudio de las construcciones del ser humano en su perspectiva social, tecnológica y natural, o en un sentido más amplio en su perspectiva ambiental.

Esta concepción de sistema urbano como un sistema dinámico complejo, fundamentalmente representa un esquema de evolución y desarrollo en escalas espacial y temporal a partir de las relaciones de sus componentes.

Este enfoque sistémico en el estudio de los espacios urbanos ha sido la base para una aproximación teórica a la complejidad de éstos y ha permitido avanzar en la formulación de soluciones a las dificultades en la definición de modelos que permitan simular su comportamiento frente a posibles variaciones internas o externas, que pueden afectar su funcionamiento. Estas dificultades obedecen a que desde el enfoque sistémico es necesario integrar en el análisis de estos sistemas variables de tipo cuantitativo generalmente asociadas con los subsistemas natural y tecnológico, con variables de tipo cualitativo asociadas al subsistema social. Así mismo, y dadas las condiciones en algunos sistemas urbanos, estas dificultades se pueden dar por la inexistencia de información

6. La definición presentada por el autor relaciona el término alteraciones para representar el significado de perdida de vidas y de salud de la población, destrucción o perdida de bienes de la colectividad y daños severos en el ambiente.

objetiva o por ambigüedad generando, para procesos convencionales de simulación, inconvenientes por la incertidumbre en el manejo y procesamiento de la información.

El enfoque conceptual planteado para los sistemas urbanos, se propone en la perspectiva de evaluar la vulnerabilidad que éstos presentan frente a fenómenos naturales. En este sentido, se considera que para la propuesta se privilegia el uso conceptual de vulnerabilidad en la perspectiva de un enfoque integral y holístico, que permita establecer una metodología consecuente con la propuesta del modelo de sistema urbano al que se evaluará.

La relación de términos como amenaza, vulnerabilidad y riesgo se plantea desde una concepción diferenciadora de los términos, que replanteando a Cardona (2001), en el sentido de considerar la amenaza como *un peligro latente asociado con las características y dinámica de los componentes social, natural y tecnológico del sistema y de su entorno, que pueden desencadenar un suceso que afecte su estructura y funcionamiento, con una intensidad y en un espacio específicos y durante un periodo de tiempo determinado*. La vulnerabilidad, como *la medida de la factibilidad o susceptibilidad que tiene el sistema (y por tanto sus componentes) de ser afectado estructural y funcionalmente por el fenómeno que caracteriza la amenaza*; el riesgo como *las pérdidas potenciales en términos cuantitativos y cualitativos del sistema, expresado matemáticamente como la probabilidad de exceder un nivel de consecuencias sociales, naturales y tecnológicas*.

El enfoque conceptual para una propuesta metodológica en la evaluación de la vulnerabilidad de un sistema urbano, integra los factores que la originan en términos de considerar la exposición, fragilidad y capacidad de respuesta de cada uno de los subsistemas.

Así mismo, de las metodologías revisadas para evaluar la vulnerabilidad, se dan algunas bases que permiten avanzar en nuevas herramientas y construcción de metodologías, para relacionar con intensidad y precisión variables de tipo cuantitativo y cualitativo. Evidenciándose la necesidad de profundizar en un enfoque global de la vulnerabilidad e igualmente de profundizar en el diseño de modelos de evaluación de vulnerabilidad que partan de la consideración de las sociedades humanas con enfoques sistémicos, dinámicos y complejos, que Metodológicamente se pueden procesar con herramientas matemáticas como la lógica difusa.

## 4. PROPUESTA DE MODELO PARA LA OBTENCIÓN DE INDICADORES DE VULNERABILIDAD URBANA FREnte A FENÓMENOS NATURALES

### 4.1. Modelo de Sistema Urbano

Con el objetivo de relacionar criterios de la vulnerabilidad de los sistemas urbanos frente a fenómenos naturales, se plantea un modelo de sistema urbano en el que se integren relaciones estructurales y funcionales de todos los componentes en tres subsistemas: natural, tecnológico y social.

#### 4.1.1. El subsistema natural

En el subsistema natural interactúan las estructuras: geológica, hidrológica, climatológica y biológica. La interacción de estas estructuras configuran geomorfológica y topográficamente el suelo y establecen las condiciones naturales para el desarrollo de un sistema urbano determinado. Las interacciones entre el tipo de suelo, los procesos erosivos, las características topográficas, las características climáticas, la actividad hidrológica y las características biológicas de una zona determinada, entre otras se convierten en el soporte natural de los diferentes procesos que tienen lugar en un sistema urbano.

Los Factores y variables propuestos para el subsistema natural se expresan en la Tabla 1.

#### 4.1.2. El subsistema tecnológico

Las estructuras propuestas para el subsistema tecnológico son: edificaciones, obras civiles y equipamientos y líneas vitales: energía, transporte, agua y comunicaciones. Estas estructuras se establecen como aquellas aplicaciones que le permiten al ser humano la transformación del medio natural en la realización de las actividades de tipo social, cultural, económico y político.

FACTOR	VARIABLES
Suelo	Formaciones superficiales y horizontes de suelo
	Conductividad hidráulica del suelo
	Fallas y sistemas de microfallas
	Estructura geológica interna y externa (actividad tectónica y volcánica)
	Geomorfología y geología regional
Agua	Topografía – morfometría
	Ríos, quebradas, lagos, embalses, mares.
	Red hídrica
	Escorrentía y caudales
	Flujos sobre el terreno y almacenamiento subterráneo
Aire	Infiltración
	Clima y meteorología (Dinámica atmosférica)
	Precipitación
	Humedad
Biodiversidad	Flora
	Fauna
	Procesos biológicos

Tabla 1.  
Factores y variables del subsistema natural

En los sistemas urbanos es evidente la relación entre el ser humano y su medio natural a través de la artificialidad, es por medio de la tecnología que el ser humano modifica las condiciones de la naturaleza para generar condiciones de calidad de vida.

Uno de los elementos que limitan los sistemas urbanos tiene que ver con el alcance en el diseño y el trazado de las redes de servicios domiciliarios, de manera que representen continuidad y contigüidad. Convirtiéndose en límites técnicos y físicos para cerrar el perímetro urbano de una unidad territorial determinada.

Los factores y variables propuestos para el subsistema tecnológico se muestran en la Tabla 2.

FACTORES	VARIABLES
Edificaciones y Equipamientos	Unifamiliares, bifamiliares y multifamiliares
	Industriales y comerciales
	Equipamientos colectivos (Escuelas, colegios, universidades, hospitales, clínicas, centros de culto, centros de gobierno, centros de cultura, centros de deporte)
	Acueducto Red de agua potable y saneamiento básico
	Red de Alcantarillado
Líneas Vitales	Energía Red Eléctrica
	Transporte Red de Gas Domiciliario
	Red Vial
Comunicaciones	Acropuertos
	Puertos Fluviales y Marítimos
	Red Telefónica
Obras Civiles	Red Fibra Óptica
	Red Radio y TV
	Restauración
Estabilización	Estabilización
	Adecuación

Tabla 2.  
Factores y variables del subsistema tecnológico

#### 4.1.3. El subsistema social

Las estructuras propuestas para el subsistema social son: Estructura Poblacional, Económica, Educativa, en Salud, de Gobierno y Cultural. Estas estructuras del subsistema social soportan el desarrollo de la institucionalidad del ser humano y representan: las características demográficas de la población, las características de los sectores económicos, las características del sistema educativo y de salud, las características del esquema de gobierno y la dinámica institucional sobre seguridad urbana, así como las autoconcepciones de la sociedad referidas en religión, ideologías y cultura.

Estas estructuras interactúan y determinan las características del subsistema como tal. En los términos planteados por Gutiérrez (2000), la dinámica de cada una de estas estructuras no define de por sí el sistema, sinó que ésto se logra por la interacción de todas. Un aspecto fundamental de las estructuras del subsistema social son las complejas relaciones que se dan en su interior, y las permanentes retroalimentaciones que se dan entre ellas, en el sentido de las implicaciones que tiene la variación en el tiempo de una de ellas sobre cualquiera de las otras. Este es un aspecto fundamental en la consideración del subsistema social como un sistema dinámico.

Los factores y variables propuestos para el subsistema social se muestran en la Tabla 3.

Tabla 3.  
Factores y variables del  
subsistema social

FACTORES	VARIABLES
Población	Número Genero y edad Organización Estratificación Ingresos económicos / Seguridad pública y recreación
Salud	Cobertura Calidad Sistema de seguridad social
Educación	Escolaridad Calidad Cobertura
Gobierno e Instituciones	Gobernabilidad – eficiencia del sistema de gobierno. Eficiencia y operatividad Estructura local y regional
Cultura e Ideología	Rigidez o Flexibilidad Símbolos y representaciones colectivas Sectores: extractivo, manufactura y servicios
Economía	Microeconomía Relaciones en macroeconomía
Bienestar	Seguridad pública Recreación

#### 4.1.4. *El modelo de sistema urbano*

El modelo sugerido considera a la ciudad, siguiendo a Carmona (2002), como un procesador sistémico, en el que el flujo de entrada de recursos ingresa en un procesador caracterizado por estructuras socioeconómicas y de recursos, que están fuertemente influenciados por las condiciones naturales, y que tienen como objetivo la obtención de servicios y productos transformados. En otras palabras, las relaciones entre *biogeoestructuras, socioestructuras y tecnoestructuras*, tienen un fin último en la satisfacción de necesidades expresadas en términos de oferta y demanda de bienes y servicios.

Los sistemas urbanos, como sistemas, responden a una estructura fundamental y a unas características que expresan su funcionalidad (Latorre, 1996). El sistema urbano tiene un entorno referido a otros sistemas que lo condicionan y con los cuales tiene límites establecidos. Así mismo, los subsistemas propuestos en su composición tienen una entidad física y conceptual que los identifica, y que de una u otra manera, su organización genera algún tipo de estabilidad en el tiempo, que puede ser conocida y que además puede ser alterada por la ocurrencia de cualquier fenómeno de tipo natural, antrópico o tecnológico. De su organización depende igualmente la capacidad para resistir los cambios producidos por el entorno o por disfunciones de alguno de sus componentes. El modelo planteado se presenta en la Figura 1.

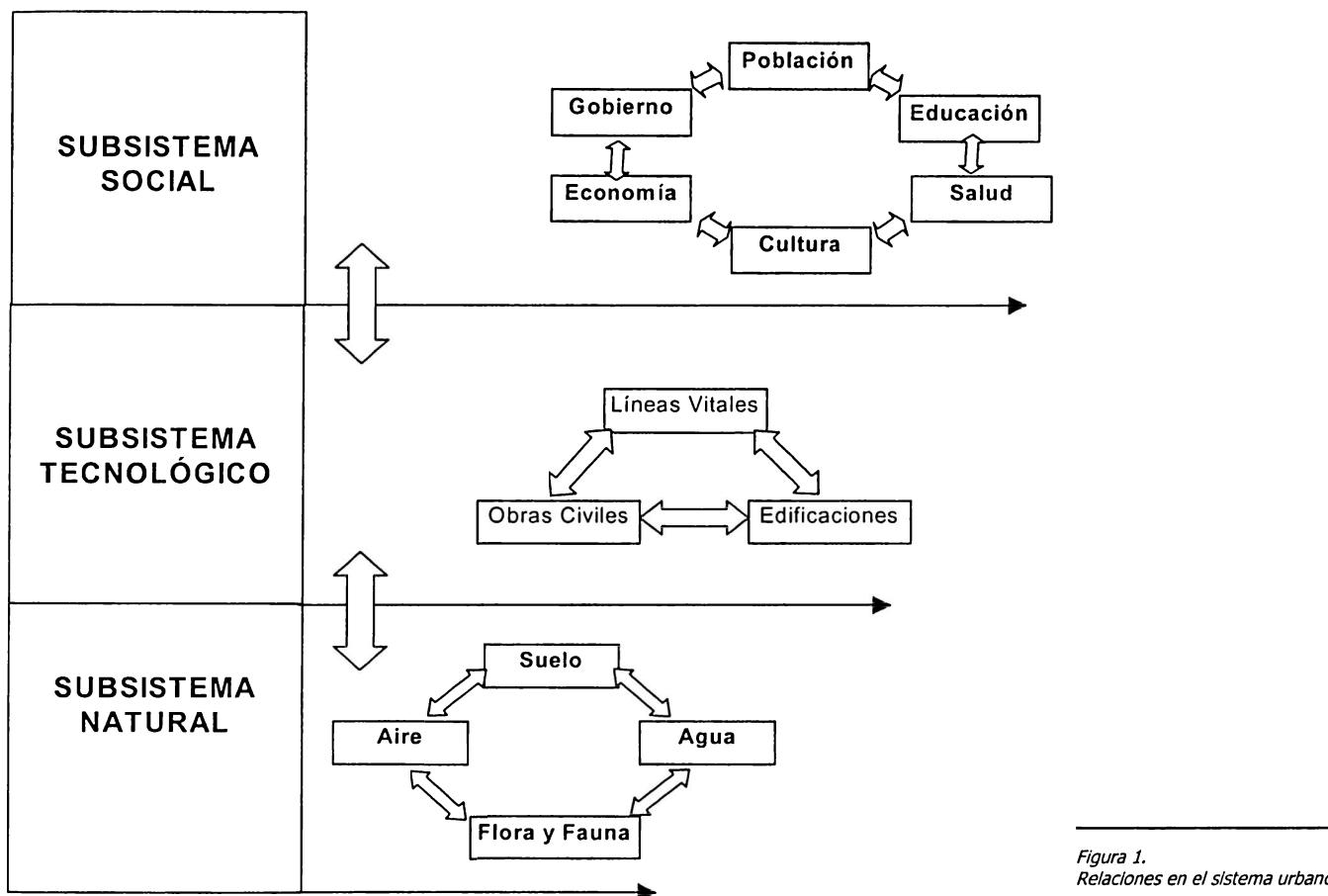


Figura 1.  
Relaciones en el sistema urbano

#### 4.2. Modelo para la evaluación de la vulnerabilidad en sistemas urbanos

##### 4.2.1. Elementos del modelo

El primer elemento en la construcción del modelo para evaluar la vulnerabilidad, es justamente considerar a ésta como el desequilibrio y desajuste, en igual medida, de la estructura social y el medio físico – construido y natural que lo rodea (Lavell, 1996). Esta definición involucra los tres subsistemas propuestos en el modelo de sistema urbano anteriormente planteado.

Así mismo Lavell (2000 – b), sugiere seis contextos de los sistemas urbanos, necesarios para comprender la vulnerabilidad: concentración y densidad, complejidad e interconectividad, la informalidad de la ciudad, degradación ambiental urbana y vulnerabilidad estructural, debilidad política e institucional y la falta de participación social en la política y planificación. Un análisis profundo de los contextos de la vulnerabilidad de los sistemas urbanos planteados por Lavell, puede señalar que todos están referidos a elementos de tipo natural, tecnológico y social.

Los elementos de un modelo según Sarabia (1995), se establecen a partir de la determinación de los objetivos que se buscan con el mismo, en este caso la relación para el modelo de los planteamientos de Lavell (1996 y 2000-b), se establecen con el objetivo de evaluar la vulnerabilidad en un contexto específico: un sistema urbano.

Por otra parte, siguiendo a Cardona (2001) y teniendo claridad sobre los elementos del modelo del sistema urbano, se considera que los factores que originan la vulnerabilidad en un sistema urbano son la interacción de la exposición, la fragilidad social y la falta de resiliencia, de los que se plantean las siguientes concepciones: (Figura 2)

- Exposición: se refiere a la cantidad de los elementos expuestos en cada uno de los subsistemas y a su proximidad con el área de influencia de la amenaza o del peligro natural.
- Fragilidad: se refiere a la debilidad y/o susceptibilidad y/o tendencia de fallar de cada subsistema, al ser impacto por la amenaza o el peligro natural.
- Capacidad de Respuesta: se refiere a la existencia y la operatividad de los procesos de preparación, prevención, atención, respuesta y recuperación que tiene cada uno de los subsistemas, así como los procesos de autorregulación que como sistemas tienen establecidos frente a la eventualidad de un fenómeno natural.

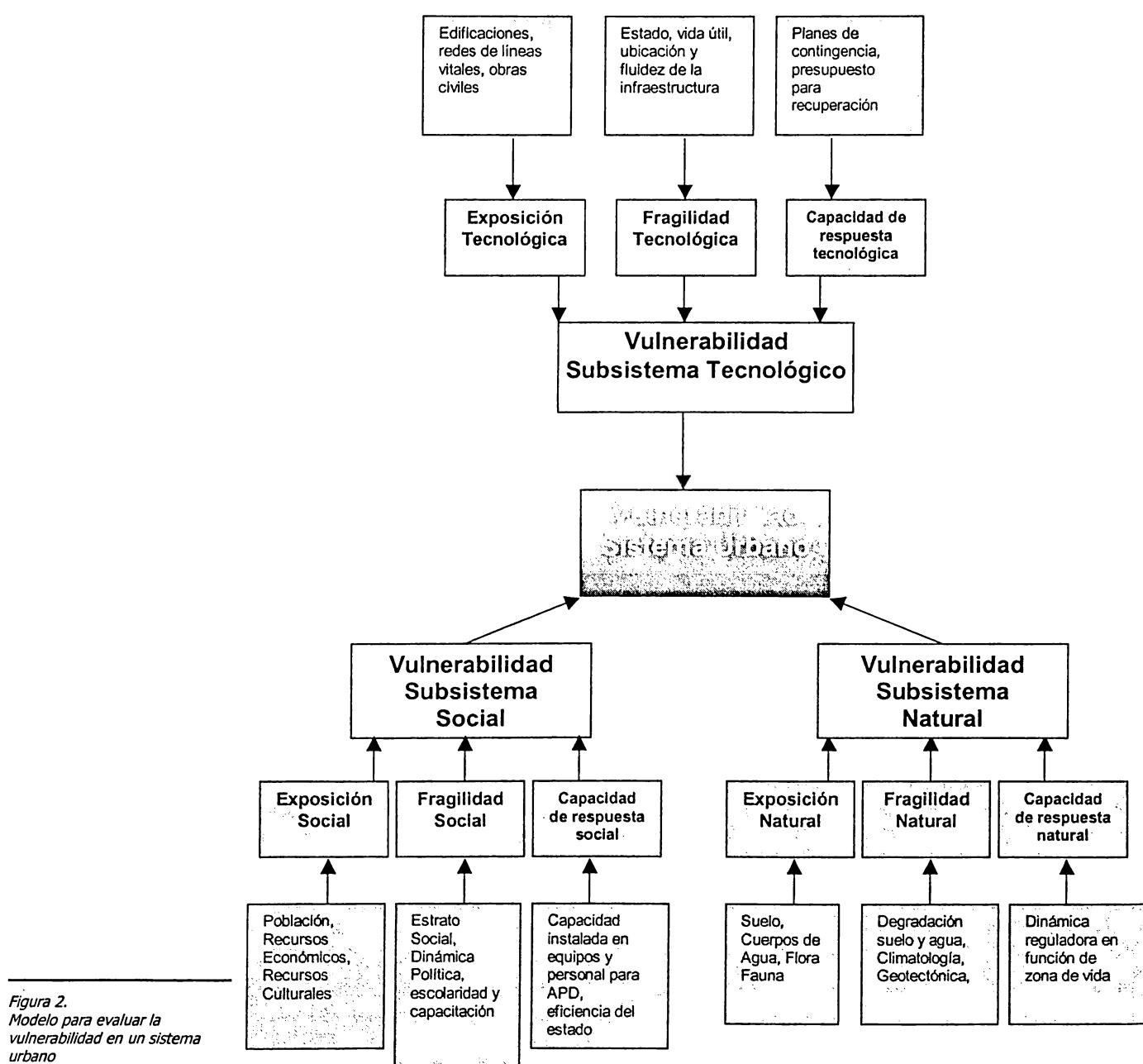


Figura 2.  
Modelo para evaluar la vulnerabilidad en un sistema urbano

#### 4.2.2. Propuesta de modelo de indicadores para evaluación de la vulnerabilidad de un sistema urbano

El esquema general del modelo de indicadores se presenta en la Tabla 4. En dicho esquema se presenta la forma en la que se establecen los diferentes indicadores para la obtención del índice de vulnerabilidad del sistema urbano. Cada uno de los descriptores permitirán establecer una valoración para la exposición, fragilidad y capacidad de respuesta de cada uno de los subsistemas (ESN, FSN, CRSN, EST, FST, CRST, ESS, FSS y CRSS). A su vez, los datos obtenidos en cada uno de éstos, se constituyen en los valores que determinan la vulnerabilidad de cada uno de los subsistemas (VSN, VST y VSS) y finalmente la vulnerabilidad del sistema urbano (VSU). A continuación se relaciona cada uno de los indicadores planteados, su sentido y significado y las bases para su obtención.

SISTEMA	SUBSISTEMA	INDICADORES	DESCRIPTORES
Indice de Vulnerabilidad del Sistema Urbano (VSU)	Subsistema Natural (VSN)	Exposición Subsistema Natural (ESN)	Suelo – formaciones superficiales Red hidrica Inventario florofaunístico Actividad hidrogeológica – erosión – degradación
		Fragilidad Subsistema Natural (FSN)	Degradación y contaminación hídrica Dinámica climática – cambios Extinción y deforestación, falta de cobertura del suelo.
		Capacidad de Respuesta Subsistema Natural (CRSN)	Procesos de homeostasis ecosistémica. Resiliencia, resistencia, estabilidad en flora y fauna.
	Subsistema Tecnológico (VST)	Exposición Subsistema Tecnológico (EST)	Extensión y área de redes de líneas vitales: electricidad, gas, acueducto, alcantarillado, vías, comunicaciones Número de edificaciones Ubicación de obras civiles
		Fragilidad Subsistema Tecnológico (FST)	Estado, vida útil, ubicación, fluidez y mantenimiento de redes de líneas vitales Características estructurales y tipología de las edificaciones Mantenimiento de obras civiles
		Capacidad de Respuesta Subsistema Tecnológico (CRST)	Capacidad para recuperar y establecer fluidez posterior al evento catastrófico. Planes de recuperación según complejidad de la obra.
	Subsistema Social (VSS)	Exposición Subsistema Social (ESS)	Población número y género Economía: producción, manufactura, comercio. Materias primas Bienes culturales Estrato social Nivel de pobreza – hacinamiento- desempleo Grado de cohesión y organización social – integración política
		Fragilidad Subsistema Social (FSS)	Escolaridad y capacitación frente a los desastres – cobertura y calidad de la educación Cobertura de la seguridad social, seguros Presencia institucional Características culturales e ideológicas Organización y funcionalidad de los CLOPAD y CREPAD, organismos de rescate. Agilidad en toma de decisiones
		Capacidad de Respuesta Subsistema Social (CRSS)	Capacidad instalada en equipos de rescate, centros de atención hospitalaria Personal capacitado en APD, sistemas de rescate, de recuperación, asistencia médica. Dinámica económico financiera de la unidad territorial Planes de contingencia

Tabla 4.  
Descripción de descriptores e indicadores para la evaluación de la vulnerabilidad en el sistema urbano

### **Indice de Vulnerabilidad del Sistema Urbano (VSU)**

Este índice se construye a partir de la determinación de los índices de vulnerabilidad de cada uno de los subsistemas. Indica las condiciones de vulnerabilidad total, en su determinación cada uno de los factores y variables del sistema urbano son interdependientes y tienen la capacidad de acrecentar o atenuar a los otros. Este es un hecho esencial en la obtención del índice, debido a que en la estructura del mismo están implícitos los factores que lo determinan y a partir de su conocimiento poder definir las acciones para la mitigación de la vulnerabilidad.

### **Indice de Vulnerabilidad del Subsistema Natural (VSN)**

El Indice VSN se obtiene a partir de la determinación y relación de:

- Indice de Exposición del Subsistema Natural (ESN). Indica el volumen, área o cantidad de suelo, cuerpos de agua, y recursos bióticos que se exponen directamente ante el impacto de un fenómeno natural o antrópico, además de la ubicación relativa en el área de influencia del fenómeno.
- Indice de Fragilidad del Subsistema Natural (FSN). Indica la predisposición que tiene el suelo, los cuerpos de agua o los recursos floro - faunísticos de ser afectados por la ocurrencia de fenómenos naturales o antrópicos. Dadas sus características estructurales, dinámicas y estado de degradación.
- Indice de Capacidad de Respuesta del Subsistema Natural (CRSN). Implica los procesos homeostáticos de los ecosistemas y su capacidad de recuperación, que se da después de su afectación por la dinámica misma de la naturaleza. La estabilidad de la vegetación y su capacidad de recuperación están referidas a características de las especies mismas, como a las de los otros recursos naturales como: la estabilidad del recurso hídrico, la madurez y estabilidad del suelo, la permeabilidad del suelo, la internalización de nutrientes y la reproducción de las especies principales.

### **Indice de Vulnerabilidad del Subsistema Tecnológico (VST)**

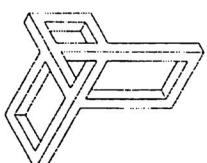
El Indice VST se obtiene a partir de la determinación y relación de:

- Indice de Exposición del Subsistema Tecnológico (EST). Indica la exposición de la infraestructura física en términos de numero de edificaciones, cobertura y extensión de vías, redes eléctricas y gas, redes de acueducto y alcantarillado, a los equipamientos colectivos involucrados y a las obras civiles presentes.
- Indice de Fragilidad del Subsistema Tecnológico (FST). Este aspecto de la vulnerabilidad, indica la susceptibilidad y predisposición que tiene la infraestructura tecnológica para fallar y ser afectada por la ocurrencia de un fenómeno natural o antrópico. Se puede establecer a partir de la determinación de: estado, características estructurales, la vida útil, ubicación y mantenimiento de toda la infraestructura asociada al sistema urbano.
- Indice de Capacidad de Respuesta del Subsistema Tecnológico (CRST). Este aspecto indica las posibilidades tecnológicas y técnicas que tiene las estructuras físicas de ser recuperadas y puestas en funcionamiento. Este aspecto que aparentemente puede estar condicionado por las características del sistema social, específicamente del gobierno, puede estar condicionado por las especificaciones técnicas de diseño y construcción, que limitan la posibilidad de las instituciones de recuperarla y por tanto pueden dificultar la fluidez normal durante y posterior al evento.

### **Indice de Vulnerabilidad del Subsistema Social (VSS)**

El Indice VSS se obtiene a partir de la determinación y relación de:

- Indice de Exposición del Subsistema Social (ESS). Indican la población, recursos económicos en bienes y materiales y los valores culturales expuestos.
- Indice de Fragilidad del Subsistema Social (FSS). Indica las condiciones de indefensión que la población pueda tener como: pobreza, hacinamiento, enfermedad física y sicológica, edades (niños y ancianos), discapacidad, condiciones nutricionales, desintegración social, falta de representación política, preparación y capacitación, y el aspecto cultural e ideológico.
- Indice de Capacidad de Respuesta del Subsistema Social (CRSS). Indica la potencialidad que tiene la sociedad de prevenir, preparar, enfrentar y recuperarse del impacto de un fenómeno natural o antrópico. Dados el estrato socioeconómico, la organización y



operatividad del gobierno y los organismos de socorro y rescate, la capacidad instalada que tiene el sistema urbano y su área de influencia, en recursos humanos capacitados, recursos técnicos, recursos económicos.

#### 4.3. Implementación de un Sistema de Lógica Difusa para la construcción de indicadores en la evaluación de la vulnerabilidad de un sistema urbano

Las características de un sistema urbano y la necesidad de relacionar variables con cierto grado de imprecisión e incertidumbre en el modelo propuesto para evaluar la vulnerabilidad, sustentan la necesidad de implementar un sistema de control difuso, de manera que se superen los inconvenientes ocasionados por la integración de variables cualitativas y cuantitativas en la evaluación de la vulnerabilidad.

##### 4.3.1. Establecimiento de los Sistemas de Lógica difusa (SLD) y el toolbox de control difuso

Un Sistema de Lógica Difusa (SLD), se define como un algoritmo que tiene información de entrada que ingresa en un motor de inferencia, para el que se han establecido unas bases de reglas y que generan resultados numéricos concretos (Portilla, 2002). Los datos de entrada y de salida, son datos concretos, aunque dentro de la estructura del SLD, están representados por medio de una variable lingüística. El conjunto de las variables de entrada, se denomina universo de entrada y al conjunto de las variables lingüísticas de salida, se le conoce como universo de salida.

Un SLD, se puede entender como una estructura basada en los conceptos y procedimientos de la teoría de conjuntos difusos y lógica difusa. Está conformado por cuatro componentes estructurales: módulo difusor, base de reglas, motor de inferencia y módulo congresor. Cada uno de estos elementos se encuentra implementado en el toolbox de control difuso desarrollado por Quintero y Villa (1998).

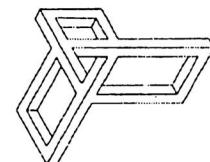
##### 4.3.2. Determinación de rangos en las funciones de pertenencia y establecimiento de las bases de reglas

El establecimiento de rangos para las valoraciones de los descriptores, es un proceso esencial en la implementación del sistema de lógica difusa, teniendo en cuenta que con la lógica difusa se pretende ampliar la posibilidad de valoración a las diferentes variables de entrada y de salida del sistema analizado. En el establecimiento de los rangos se determinan los límites de los conjuntos difusos que operaran la valoración dada a una regla específica, y que determinan el grado de pertenencia o no a uno de los conjuntos específicos.

Con la propuesta del Sistema de Lógica Difusa en la evaluación de la vulnerabilidad de un sistema urbano, se busca pasar de un esquema tradicional en el que se determina si el sistema ES o NO ES vulnerable, o si la vulnerabilidad del sistema es ALTA, MEDIA o BAJA, a un esquema más amplio en el que se puedan incluir el procesamiento de un número mayor de posibilidades de valoración en términos de calificativos como MUY ALTA, ALTA, MODERADA, BAJA y MUY BAJA y que metodológicamente permitan el procesamiento de la diversidad de las variables sugeridas para la valoración de expertos.

Para las valoraciones de cada una de las variables de entrada que determinan los diferentes elementos que permiten establecer el índice de vulnerabilidad del sistema urbano, se plantean cinco rangos: 0-20, 20-40, 40-60, 60-80 y 80-100; con expresiones lingüísticas Muy Baja (MB), Baja (B), Moderada (M), Alta (A) y Muy Alta (MA) respectivamente. A partir del establecimiento de los rangos para la valoración, quedan definidas las funciones de pertenencia que el toolbox de control difuso procesará, basados en las bases de reglas que se determinen. Las bases de reglas definidas como las diferentes combinaciones que se dan entre los descriptores, se presentan como proposiciones de la forma Si...Entonces.

En la composición de proposiciones con los descriptores, particularmente cuando se implican tres, se opta operativamente por dejar uno de ellos fijo y los otros dos variables en una matriz en la que la valoración está referida a lo que se esperaría del criterio de expertos. Si en la determinación de un indicador, éste se obtiene a partir de la relación de tres descriptores la matriz se construye teniendo en



cuenta los rangos de las variables de entrada y de salida y a partir de los siguientes criterios:

- D1, D2 y D3 son los descriptores que determinan un Índice particular (IVX)
- Cada uno de los descriptores es valorado por uno o varios expertos a partir de la información disponible, de acuerdo con los rangos establecidos.
- En la determinación del hipotético IVX se componen proposiciones de la forma: Si D1 es (MA, A, M, B o MB) y D2 es (MA, A, M, B o MB) y D3 es (MA, A, M, B o MB), Entonces IVX es (MA, A, M, B o MB), en la composición de ésta proposición, el criterio de los expertos es fundamental, debido a que se está determinando en teoría el valor del indicador de acuerdo con las valoraciones dadas a cada uno de los descriptores y de la manera en que éstas se puedan combinar. Para el caso de tres descriptores, cada uno con 5 posibles rangos de valoración, las posibilidades de obtener un valor para IVX son 125, (Si se tienen dos descriptores los posibles valores de IVX serán 25 y si es un descriptor los posibles valores de IVX serán 5).
- Cada una de las proposiciones obtenidas, para este caso 125 posibles, se ingresan en el toolbox de control difuso en la opción "Reglas". La proposición tiene implícitas las variables de entradas (descriptores) y la variable de salida (IVX).

#### 4.3.3. Operadores difusos

Los operadores difusos son representaciones de los sistemas y están constituidos por diagramas de bloques elaborados en el Simulink, soportados por los algoritmos desarrollados en MatLab, que responden a la estructura para determinar la vulnerabilidad del sistema urbano y de cada uno de los subsistemas natural, tecnológico y social como se muestra en las Figuras 3, 4, 5 y 6. Cada uno de los operadores difusos diseñados se compone de :

- Bloques con valores reales de entrada (X).
- Bloque de multiplexación para adaptación de las entradas al sistema difuso
- Bloque difuso que contiene las bases de reglas, las estrategias de defuzzificación de entradas y salidas, el tipo de implicación y la manera en que se operan todos los conjuntos. En síntesis, este bloque es realmente el FKBS.
- Bloque con el valor de salida (Yout).
- Bloque para el almacenamiento de los resultados.
- Bloque de graficación.

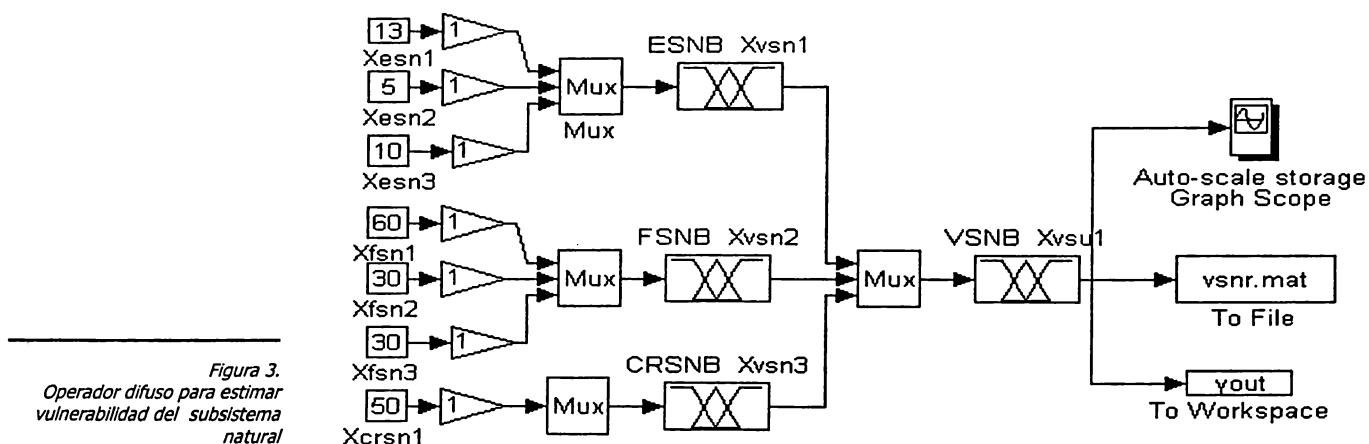


Figura 3.  
Operador difuso para estimar  
vulnerabilidad del subsistema  
natural

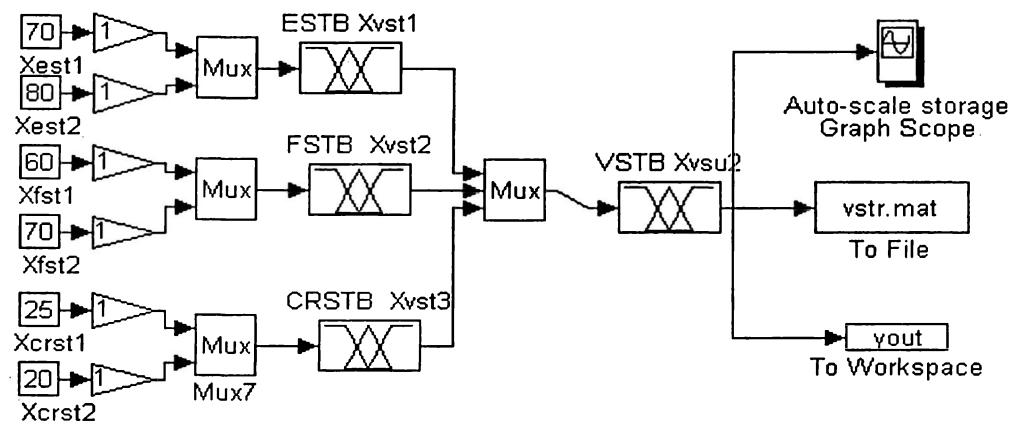


Figura 4.  
Operador difuso para estimar  
Vulnerabilidad del Subsistema  
Tecnológico

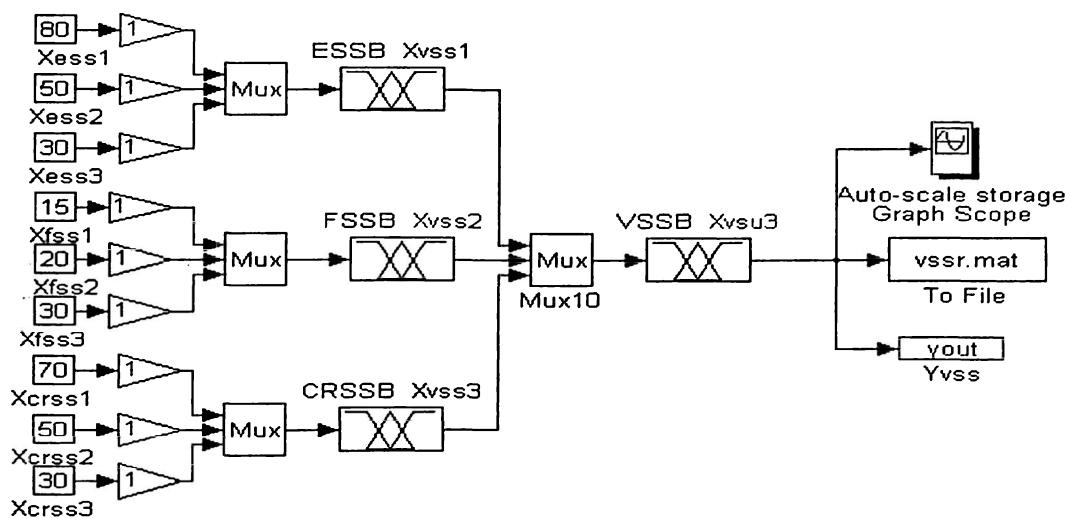
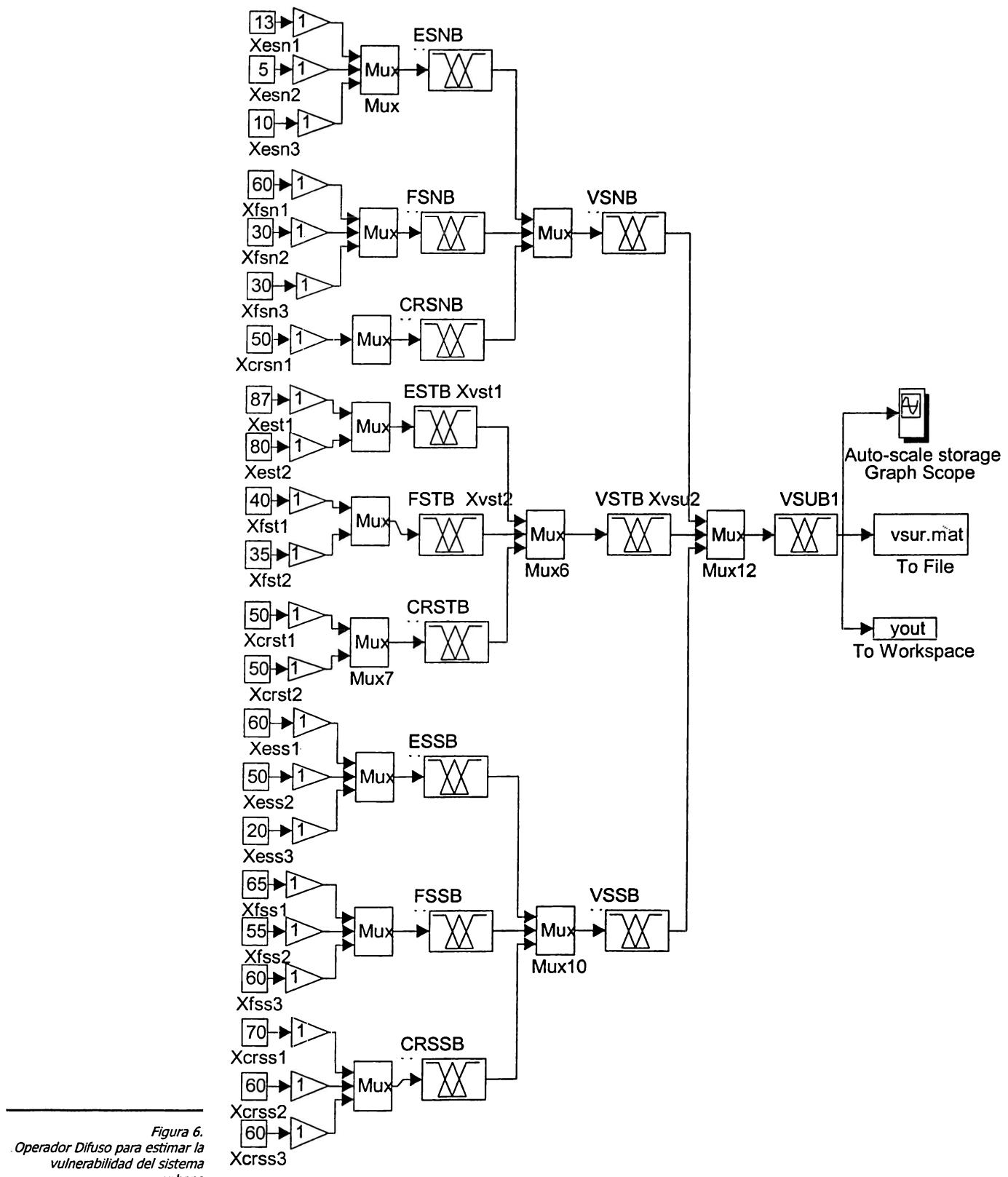


Figura 5.  
Operador Difuso para estimar la  
vulnerabilidad del Subsistema  
Social



## 5. APPLICACIÓN DEL MODELO

A partir del modelo de sistema urbano y el SLD implementados para evaluar la vulnerabilidad, se realizaron simulaciones con los datos respectivos de cada uno de los subsistemas, basados en la información de dos comunas de la ciudad de Manizales - Colombia.

### 5.1. Aspectos generales

La ciudad de Manizales pertenece a la región centro sur del departamento de Caldas en el centro occidente colombiano, se ubica sobre la vertiente occidental de la cordillera central caracterizándose por una topografía muy pendiente.

De las once comunas en las que se ha dividido Manizales, se han seleccionado dos: Comuna 2, al Norte de la ciudad de Manizales y un sector de la Comuna 6 al Nororiente. La selección de las comunas se hizo procurando tener elementos de contraste, específicamente en las características de los subsistemas natural, tecnológico y social.

Las principales amenazas de tipo natural establecidas para la ciudad de Manizales, según su plan de ordenamiento territorial son: los deslizamientos y los sismos, en menor escala se presentan las inundaciones y los incendios.

Manizales presenta inestabilidad de laderas, como una respuesta a las características litológicas y estructurales de tipo regional y local, la morfología del terreno (pendientes generalmente mayores a 50%), el clima (alta precipitación 2000 mm/año, evapotranspiración) y los procesos antrópicos (uso, manejo del suelo, cortes y llenos inadecuados (CORPOCALDAS, 2002). Hechos que históricamente han favorecido la ocurrencia de deslizamientos en diversos sectores de la ciudad. Así mismo, la presencia de fuentes sismogénicas (Sistemas de fallas de Romeral, Manizales – Aranzazu y El Perro) y la historia sísmica, permiten señalar que todo el municipio presenta "Alta amenaza sísmica".

### 5.2. Evaluación de la vulnerabilidad Comuna 2. Municipio de Manizales.

La comuna dos está conformada por 8 barrios. Los estratos sociales predominantes son 1 y 2, presenta una densidad poblacional alta en la ciudad, entre 500 – 700 hab/Ha. Cuenta con una población aproximada de 32000 habitantes y un número promedio de habitantes por vivienda de 5,18.

El suelo que conforma el área de la comuna se caracteriza por presentar pendientes entre moderadas y altas (Mayores a 20°) y se caracteriza por tener zonas altamente impactadas por deslizamientos, así como por haber presentado intensidades entre 6 y 7 en la escala de Mercalli modificada para los sismos más recientes (1979 y 1999) presentados en la ciudad de Manizales (Pareja J.F. 2000).

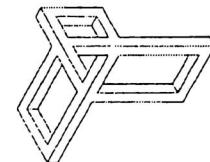
Las edificaciones en su mayoría se caracterizan por una tipología constructiva mixta (Bahareque – Mampostería). La cobertura de servicios públicos alcanza similares porcentajes a los que se encuentran promedio en la ciudad de Manizales, destacándose aseo, energía eléctrica, agua potable y alcantarillado con porcentajes de cobertura entre el 95 y 100%. La red vial, presenta dificultades en algunos sectores como el barrio Colón y San José, por la permanente invasión de las vías con ventas informales y flujo continuo de todo tipo de vehículos y en sectores como los barrios Estrada, Asís, Sierra Morena y Avanzada, por la estrechez de las vías y por la inaccesibilidad de vehículos de alta capacidad.

De acuerdo con la clasificación de la vulnerabilidad y el riesgo para las diferentes comunas de la ciudad presentada en el Plan de Ordenamiento Territorial del Municipio de Manizales (2001) y el Plan de Ordenamiento del Territorio de la Cuenca del Río Chinchiná (1999), los barrios que componen la comuna presentan una alta vulnerabilidad frente a eventos como deslizamientos, sismos e incendios. Es importante señalar que estas valoraciones se han establecido a partir de la relación de elementos fundamentalmente físicos y a su grado de exposición y posibilidad de pérdida.

La clasificación de los barrios de Manizales según su vulnerabilidad a los diferentes tipos de factores naturales, socioeconómicos y la debida al conjunto de factores presentada por Chardon (2002), señala a los barrios de la comuna como muy vulnerables, especialmente a deslizamientos y a sismos.

### 5.3. Valoración de entradas en el SLD

En la Tablas 5, 6, 7, 8, 9 y 10 se presentan las valoraciones dadas a los descriptores así como los datos obtenidos en la simulación realizada para VSN, VST y VSS. Dados los resultados de ESN, FSN,



CRSN, EST, FST, CRST, ESS, FSS y CRSS. Los valores obtenidos para cada uno de los subsistemas se ingresan en el operador difuso para la simulación de la vulnerabilidad del sistema urbano. (Tabla 11).

Tabla 5.  
Valoración de descriptores  
vulnerabilidad del subsistema  
natural. Caso comuna 2.  
Manizales.

Indice	DESCRIPTORES – Características de las Entradas	Valoración Entradas	Simulación Salidas
ESN	Suelo: área en alto porcentaje construida, bajo porcentaje de suelo para procesos de expansión urbana.	0.15	
	Red hidrática: principal característica es la Q. Olivares como límite al norte de la Comuna. Escasos cuerpos de agua.	0.10	0.13 - MB - 13
	Área de zonas verdes escasas, con vegetación secundaria y escasos recursos florofaunísticos expuestos.	0.15	
FSN	Formaciones superficiales caracterizadas por llenos y suelo con alto potencial de licuefacción y áreas con potencialidad para la inducción de deslizamientos. Altas pendientes. Intensidades altas en los últimos registros sísmicos (1979 y 1999).	0.80	
	La dinámica climática es variable con períodos de lluvia fuertes.	0.50	0.693- A -69,3
CRSN	Suelo contaminado por actividades humanas y desestabilizado por dinámica erosiva del pasado e inadecuado mantenimiento y manejo de obras de estabilización. Alta intervención para la urbanización con llenos. El recurso hídrico (Q. Olivares) altamente contaminado.	0.70	
	Las características climáticas húmedas y de la zona de vida dan una capacidad de recuperación Moderada sin embargo, la alta degradación de los recursos naturales afecta este valor.	0.30	0.333– B – 33.3

Tabla 6.  
Valores de entrada y de salida  
para la simulación de VSN

	VALORES DE ENTRADA	VALOR DE SALIDA EN LA SIMULACIÓN VSN
X1 esn	13	
X2 fsn	69	0.6278- A - 63
X3 crsn	33	

Tabla 7.  
Valoración de descriptores  
vulnerabilidad del subsistema  
tecnológico. Caso comuna 2.  
Manizales.

FACTOR	DESCRIPTORES – Características de las Entradas	Valoración Entradas	Resultado Simulación Salidas
EST	Líneas vitales: Alta cobertura en servicios de acueducto, alcantarillado y energía eléctrica. Red vial deficiente en extensión.	0.70	
	Viviendas en laderas y en zonas de rellenos. El área edificada es alta y expuesta	0.80	0.8623 – MA - 86
FST	Red de acueducto y alcantarillado en deficiente estado (GASTADA), red eléctrica y de comunicaciones superficial, vías en mal estado y demasiado estrechas. No mantenimiento de obras civiles.	0.60	
	Edificaciones con tipología en bahareque y mixta con deficiente estado estructural. Edificaciones muy antiguas.	0.70	0.7735 – A - 77
CRST	Inoperatividad de planes de mejoramiento y de contingencia para el reforzamiento estructural de edificaciones.	0.20	
	Bajo porcentaje de edificaciones asegurada. Los procesos de reubicación de viviendas para reubicación no se concretan.	0.20	0.172 – MB - 17

Tabla 8.  
Valores de entrada y de salida  
para la simulación de VST

	VALORES DE ENTRADA	VALOR DE SALIDA EN LA SIMULACIÓN VST
X1 EST	86	
X2 FST	77	0.8687- MA – 87
X3 CRST	17	

INDICE	DESCRIPTORES – Características de las Entradas	Valoración Entradas	Resultado Simulación Salidas
ESS	Alta densidad de población por unidad de área construida, alto porcentaje de niños y ancianos.	0.80	
	Recursos económicos en comercio, pocas industrias.	0.50	0.5386 – M – 54
	Moderado valor arquitectónico e histórico para la ciudad. Representatividad cultural.	0.20	
FSS	Estratos sociales predominantes 1 y 2.	0.15	
	Bajo nivel de escolaridad y de capacitación frente a desastres.	0.20	0.8693 – MA - 87
CRSS	Alta presencia institucional, aunque baja posibilidad de intervención del gobierno por problemas sociales y culturales. Alta ineficiencia de los programas gubernamentales. Alta Inseguridad.	0.15	
	Para la ciudad de Manizales existe un satisfactorio funcionamiento y operatividad de CLOPAD y de los organismos de rescate.	0.50	
	La capacidad instalada en recursos humanos y técnicos para la APD es medianamente satisfactoria.	0.50	0.3715 - M - 37
	Actualmente la capacidad económica del Municipio es limitada. Igualmente la capacidad económica para recuperación de la comuna es muy baja.	0.20	

Tabla 9.  
Valoración de descriptores vulnerabilidad del subsistema social. Caso comuna 2. Manizales.

VALORES DE ENTRADA	VALOR DE SALIDA EN LA SIMULACIÓN VSS
X1 ESS 54	
X2 FSS 87	0.6835 – A - 68
X3 CRSS 37	
VALORES DE ENTRADA	VALOR DE SALIDA EN LA SIMULACIÓN VSU
X1 VSN 63 – A	
X2 VST 87 – MA	0.69 - A - 69
X3 VSS 68 – A	

Tabla 10.  
Valores de entrada y de salida para la simulación de VSS

Tabla 11.  
Valores de entrada y de salida para la simulación de VSU

#### 5.4. Análisis de los Resultados

Las valoraciones realizadas a los diferentes descriptores y el proceso de simulación estableció un valor para el índice VSU de 0.69, lo que representa una vulnerabilidad ALTA.

Los resultados del índice de vulnerabilidad para cada una de los subsistemas (Tabla 12), indican que la vulnerabilidad del subsistema natural, tecnológico y social son alta, muy alta y alta respectivamente. Este resultado se obtiene a partir de lo establecido en la base de reglas según la cuál: Si VSN es A, VST es MA y VSS es A, Entonces VSU es ALTA.

Los aspectos mas influyentes en cada subsistema en el resultado total del sistema urbano se refiere a:

- La fragilidad del sistema social con un valor de 0.87, expresada como Muy Alta. Dada por aspectos como las condiciones sociales de la comuna caracterizadas por el estrato social predominante, las condiciones económicas de la población, las condiciones de inseguridad y la poca representatividad política, han determinado y consolidado la ocupación de suelos de baja calidad para la urbanización, así como la tipología de la infraestructura.
- La exposición (0.86 - Muy Alta) y la fragilidad (0.77 - Alta) del sistema tecnológico, representada por las condiciones estructurales y tipología de las edificaciones, el estado de las vías y las líneas vitales y la exposición de este subsistema en altas pendientes, suelos con rellenos e inestables.
- La fragilidad del sistema natural con un valor de 0.69, considerado alto y representado por las

características geológicas del suelo y la dinámica erosiva propia del tipo de suelo, acelerada por las condiciones topográficas del terreno y el avanzado estado de degradación.

Los descriptores para la exposición, fragilidad y capacidad de recuperación de cada uno de los subsistemas se relacionan para entrelazar un esquema de vulnerabilidad holística. De hecho, la consideración reducida de la vulnerabilidad puede establecer que las características de la infraestructura en dicha comuna, ubicada en zonas de altas pendientes y la estratificación social, serían suficientes argumentos para calificar la comuna con una vulnerabilidad Muy Alta. Sin embargo, factores como la presencia institucional y la dinámica operativa del gobierno frente al tema, así como la realización de obras civiles de estabilización de taludes y el control a los procesos erosivos, establecen elementos que atenúan o potencian la vulnerabilidad en la comuna.

Tabla 12.  
Resultados en el cálculo de la vulnerabilidad de la comuna 2.

Descriptores		Entradas Subsistema		Vulnerabilidad Subsistema	Vulnerabilidad Sistema
D1	Muy Bajo	0.15			
D2	Muy Bajo	0.10	ESN Muy Bajo	0.13	
D3	Muy Bajo	0.15			
D1	Alto	0.80			
D2	Medio	0.50	FSN Alto	0.69	
D3	Alto	0.70			
D1	Bajo	0.30	CRSN Bajo	0.33	
D1	Alto	0.70			
D2	Muy Alto	0.80	EST Muy Alto	0.86	
D1	Alto	0.60			
D2	Alto	0.70	FST Alto	0.77	
D1	Bajo	0.20			
D2	Bajo	0.20	CRST Muy Bajo	0.17	
D1	Muy Alto	0.80			
D2	Medio	0.50	ESS Medio	0.54	
D3	Bajo	0.20			
D1	Muy Bajo	0.15			
D2	Bajo	0.20	FSS Muy Alto	0.87	
D3	Muy Bajo	0.15			
D1	Medio	0.50			
D2	Medio	0.50	CRSS Bajo	0.37	
D3	Bajo	0.20			

## 6. CONCLUSIONES

- Los sistemas de lógica difusa pueden ser aplicados para el diseño y modelación de sistemas que presentan dificultades para ser modelados matemáticamente y que requieren del manejo y procesamiento integrado de información lingüística, proveniente de opiniones y valoraciones de expertos, y numérica que se refiere a información que se obtiene de monitoreos, mediciones, trabajos de campo y pruebas de laboratorio.
- El desarrollo de un modelo de sistema urbano, así como del sistema de lógica difusa que operativiza la evaluación de la vulnerabilidad, es una aproximación valiosa para relacionar variables cuantitativas y cualitativas; sin embargo, es necesario considerar que dada la novedad y la promisoria utilidad de la lógica difusa, es necesario avanzar en la identificación de los descriptores que determinaron los índices propuestos, con el fin de afinar y garantizar que las valoraciones dadas por expertos, tengan poco error y se sustenten en el conocimiento científico, social y tecnológico que se tenga del sistema urbano o de la unidad territorial analizada.
- Los sistemas urbanos y los subsistemas natural, tecnológico y social han sido explorados desde el estudio de los sistemas dinámicos complejos, convirtiéndose dichos estudios en una metodología excelente para el estudio y la modelación de sistemas con variables interdependientes que cambian en el tiempo. La dinámica de un sistema urbano, no excluye las características y la dinámica propia de cada uno de los subsistemas. Así como lo tecnológico es una consecuencia de los procesos de desarrollo de la población, ésta se condiciona a las características de sus recursos naturales y a la vez toda la infraestructura es un proceso de adaptación que el ser humano realiza en su medio.

Ser humano en proceso socio-cultural, tecnología y recursos naturales se convierten en una triada inseparable en la comprensión del sistema urbano; de la manera en que las relaciones se den y de la manera en la que el ser humano interprete y transfiera su tecnología en la adaptación a los recursos naturales se pueden establecer los elementos que determinan que tan susceptibles a ser afectados son ante la dinámica de la misma naturaleza o de sus propias actividades.

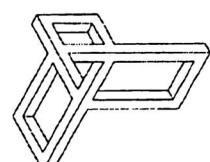
- La evaluación de la vulnerabilidad de un sistema urbano desde una perspectiva de estudio que sea holística, tiene que relacionar aspectos como la exposición, la fragilidad y la capacidad de respuesta del sistema en conjunto, buscando establecer los aspectos pertinentes de los subsistemas natural, tecnológico y social en las etapas y procesos pre – durante y posterior a la eventualidad de ocurrencia de un fenómeno peligroso.
- La determinación de la vulnerabilidad de un sistema urbano, tiene como objetivo fundamental establecer las acciones prioritarias que deberán realizarse para disminuir el riesgo. El modelo establecido permite determinar las acciones prioritarias, en función de los valores de vulnerabilidad que estén en el rango de altos y muy altos en cada uno de los subsistemas.

En el establecimiento de las acciones prioritarias, igualmente es necesario considerar que en la estructura y funcionamiento del sistema urbano, existen elementos que desencadenan impactos favorables en otros. Específicamente, al hablar de la reducción de la vulnerabilidad, todo programa o plan de capacitación en atención y prevención de desastres que se realice con la población, conducirá al mejoramiento de condiciones sociales y culturales, y permitirá generar mayor conciencia sobre la ocupación de terrenos inestables o sobre la necesidad de realizar mejoras en las viviendas y edificaciones; un hecho como éste disminuye la vulnerabilidad en el subsistema social y a la vez en el subsistema tecnológico.

- El modelo planteado para la comprensión de un sistema urbano promueve un trabajo interdisciplinario que incluya el diálogo de las ciencias naturales, sociales y las tecnologías, excluyendo toda mirada parcial y reducida desde uno de los componentes y que integre los procesos investigativos y de desarrollo desde la interacción de modelos cuantitativos y cualitativos.
- Los valores obtenidos de la vulnerabilidad en las comunas 2 y 6 de la ciudad de Manizales, reflejan una aproximación a la susceptibilidad que tienen dichas unidades frente a amenazas naturales muy cercana a las estimaciones y valoraciones que se dan en el Plan de Ordenamiento Territorial del Municipio. Este hecho muestra la funcionalidad y aplicabilidad del modelo establecido y las múltiples posibilidades que tienen los Sistemas de Lógica Difusa en los procesos de planeación del desarrollo y gestión de riesgos en los sistemas urbanos.
- Una adecuada evaluación de la vulnerabilidad es una poderosa herramienta que permite establecer en prospectiva, las actividades necesarias para mitigar y disminuir el posible y probable impacto de la ocurrencia de fenómenos naturales en sistemas urbanos, hecho fundamental frente a los planteamientos de la sostenibilidad del desarrollo. De acuerdo con la estructura y función de la evaluación de la vulnerabilidad, se puede establecer su importancia en el momento de considerar políticas de desarrollo para cualquier sociedad humana. Debido, en esencia, a que una evaluación de la vulnerabilidad es la determinación de las condiciones de debilidad de una comunidad específica en un proceso de construcción histórica, a partir de las cuales se pueden establecer objetivos, metas y estrategias concretas para el desarrollo de dicha comunidad.

## 7. BIBLIOGRÁFÍA

- Anderson M.B. y Woodrow P.J. 1989. *Rising from the Ashes: Development Strategies in Times of Disaster*. Citado por Cardona. Omar Dario. Concepto, Tipología y Características de la Vulnerabilidad y el Riesgo. En *Curso sobre Gestión de Riesgos*. Universidad Nacional de Colombia. Manizales. 2001.
- Briguglio, L. 1999. *Measuring Vulnerability*. University of Malta.
- Cannon, T. 1991. *A Hazardneed not a Disaster make Hazard 91 Conference*, Perugia, Italy. Citado en Cardona. Omar Dario. Concepto, Tipología y Características de la Vulnerabilidad y el Riesgo. En *Curso sobre Gestión de Riesgos*. Universidad Nacional de Colombia. Manizales. 2001.
- Cardona, O. y Hurtado, J. E. 2000. *Holistic Seismic Risk Estimation of a Metropolitan Center. Application for Bogotá, Colombia*” *Proceedings 12<sup>th</sup> World Conference of Earthquake Engineering*, January – February 2000, Auckland, New Zealand.
- Cardona, O. D. 2001. *Estimación Holística del Riesgo Sísmico utilizando sistemas dinámicos complejos*.



- Tesis Doctoral. Universidad Politecnica de Catalunya. Barcelona. Junio de 2001.
- Chardon, A.-C., 2002. Un enfoque geográfico de la vulnerabilidad en zonas urbanas expuestas a amenazas naturales. El Ejemplo Andino de Manizales, Colombia. Editorial Centro de Publicaciones Universidad Nacional de Colombia. Manizales. Colombia. 174 p.
- CORPORACIÓN AUTONOMA REGIONAL DE CALDAS. 2002. Agenda para la Gestión Ambiental del Municipio de Manizales. Manizales.
- Crowards, Tom. 1999. Comparative Susceptibility to Natural Disasters in The Caribbean. Central Bank of Barbados Annual Review Seminar.
- Davidson, R. A. and Lambert, K. B. 2000. Comparing The Hurricane Disaster Risk of Coastal Counties in the US. Natural Hazards Review. July of 2000.
- Downing, T. E. and Bakker, K. 1999. Drought Discourse and Vulnerability. Environmental Change Unit. Universidad de Oxford. Oxford. UK.
- Freeman, P., K. Martin y Leslie A. 2001. Sistemas Nacionales y Mecanismos Institucionales de Manejo de Riesgo de Desastres. Fase I. Documento de Trabajo. BID – Dialogos Regionales de Política.
- Girot, P. O. 2000. Towards an Integrated Approach to Environmental and Risk Information Systems: Lesson from Central America. United Nations Development Program. Expert Meeting on Vulnerability and Risk Analysis and Indexing.
- Guha S., Debarati y Michellier C. 2000. Conflicts, Disasters and Their Implications for Development. Documento preparado por el CRED Centro para la Investigación en Epidemiología de los Desastres. Universidad de Louvain. Bélgica.
- Lavell, Allan. 1996. Degradación Ambiental, Riesgo y Desastre Urbano. Problemas y Conceptos hacia la Construcción de una Agenda de Investigación. En Ciudades en Riesgo. Fernández, María Augusta. 1996. LA RED. pp. 12 – 42.
- Lavell, A. 2000. Desastres y Desarrollo: Hacia un Entendimiento de las Formas de Construcción Social de un Desastre: El Caso del Huracán Mitch en Centroamérica. Capítulo a publicarse en libro editado por el BID.
- Lavell, A. 2000 a. Desastres Durante una Década. Lecciones y avances conceptuales y prácticos en América Latina (1990 – 1999). Anuario Político Social de América Latina. No.3. FLACSO – LA RED. 2000.
- Mansilla, E. 2000. Riesgo y Ciudad. Universidad Nacional Autónoma de México. Facultad de Arquitectura. 2000.
- Metzger, P. 1996. Medio Ambiente Urbano y Riesgo. Elementos para la reflexión. Documento compilado en Ciudades en Riesgo. María Augusta Fernández. Red Latinoamericana de Estudios Sociales en Prevención de Desastres – LA RED. pp. 43 – 56.
- Naciones Unidas. 2001. Aplicación de la Estrategia Internacional de Reducción de Desastres. Informe del Secretario General. 22p. Consejo económico y social. Periodo de sesiones. 2001. En [www.un.org/spanish/documents/ga/56/a5668](http://www.un.org/spanish/documents/ga/56/a5668).
- Nicholls, R. J y Hoozemans y Frank M.J. 2000. Global Vulnerability Analysis. Encyclopedia of Coastal Science. En [www.survas.mdx.ac.uk.pdf](http://www.survas.mdx.ac.uk.pdf).
- Palm, E. 2000. United Nations. International Strategy for Disaster Reduction. (CSD)Comission for Sustainable Development. Review of natural disaster indicator for CSD programme.
- Pareja, J. F. 2000. Elaboración del Mapa de Isosistas del Sismo Ocurrido el 25 de Enero de 1999, para el Municipio de Manizales. Trabajo de Grado. Ingeniería Civil. Universidad Nacional de Colombia. Manizales. 107 p.
- Peduzzi, P. 2000. Insight on Common/key Indicators for Global Vulnerability Mapping. United Nations Environment Programme. Expert Meeting on Vulnerability and Risk Analysis and Indexing. Suiza.
- Peduzzi, P. D., H. H. C. 2002. Global Risk And Vulnerability Index Trends per Year. United Nation Environment Programme, Global Resource Information Database – Geneva (UNEP/DEWA/GRID-Geneva)
- Portilla, M. 2002. Aplicación de los Sistemas de Lógica Difusa en la Evaluación de la Amenaza por Erosión Superficial en Villa de Leyva (Boyacá – Colombia). Simposio Latinoamericano sobre Control de Erosión. Bucaramanga. Colombia.
- Quintero L. Diego Fernando, Villa Ramírez José Luis. (1998) "Desarrollo de un Toolbox de Control Difuso para MATLAB y Diseño e Implementación de un Controlador Difuso Adaptativo. Trabajo de Grado. Universidad Nacional de Colombia. Manizales.
- Sarabia, A. A. (1995). La Teoría General de Sistemas. ISDEF. 1<sup>a</sup>. Edición. Madrid.
- Smolka, A. Allman, A. y Ehrlicher, S. 2000. An Absolute Earthquake Risk for Insurance Purposes. Proc., 12<sup>o</sup> World Conf. On Earthquake Engineering, Auckland, New Zealand. Paper No. 706.
- Vatsa, Krishna S. 2000. Notes on Vulnerability. Documento presentado en Encuentro de Expertos en Suiza. PNUD.
- Wilches – Chaux, G. 1989. La Vulnerabilidad Global. Recopilado en "Los Desastres No son Naturales" por Andrew Maskrey (1993).
- Wisner, B. 2000. Issues and Challenges in Vulnerability and Risk Indexing. Expert Meeting on Vulnerability Risk and Indexing. UNPD. Geneve.

