

**MODELO BASADO EN LÓGICA DIFUSA PARA LA CONSTRUCCIÓN DE
INDICADORES DE VULNERABILIDAD URBANA FRENTE A
FENÓMENOS NATURALES**



CARLOS EDUARDO GARCÍA LÓPEZ

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
INSTITUTO DE ESTUDIOS AMBIENTALES
MAESTRÍA EN MEDIO AMBIENTE Y DESARROLLO
MANIZALES
2003**

**MODELO BASADO EN LOGICA DIFUSA PARA LA CONSTRUCCIÓN DE
INDICADORES DE VULNERABILIDAD URBANA FRENTE A
FENÓMENOS NATURALES**

CARLOS EDUARDO GARCÍA LÓPEZ

**Tesis desarrollada para optar al título de
Magister en Medio Ambiente y Desarrollo**

**Director
Jorge Eduardo Hurtado Gómez
Ingeniero Civil, M.Sc., Ph. D.**

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
INSTITUTO DE ESTUDIOS AMBIENTALES
MAESTRÍA EN MEDIO AMBIENTE Y DESARROLLO
MANIZALES
2003**

Nota de aceptación

Presidente de Jurado

Jurado

Jurado

Manizales, Agosto de 2003

AGRADECIMIENTOS

El autor de la tesis expresa su agradecimiento a:

Jorge Eduardo Hurtado Gómez, director del trabajo por las orientaciones para su realización.

Anne Catherine CHARDON, por su colaboración y apoyo en la concreción del trabajo.

Diego Fernando Quintero López, por su colaboración y aporte en el desarrollo de los sistemas de lógica difusa y del modelo.

CONTENIDO

RESUMEN	XIII
ABSTRACT	XIV
1. INTRODUCCIÓN	15
2. JUSTIFICACIÓN	19
3. OBJETIVOS	
3.1. OBJETIVO GENERAL	21
3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	21
4. METODOLOGÍA	22
5. MARCO TEÓRICO	23
5.1. ESTUDIOS SOBRE DESASTRES: AMENAZAS, VULNERABILIDAD Y RIESGOS EN ESPACIOS URBANOS	23
5.1.1. Amenazas y su evaluación	23
5.1.2. La vulnerabilidad	26
5.1.3. Evaluación de la vulnerabilidad	35
5.1.4. Metodologías para evaluar la vulnerabilidad	38
5.1.5. Estudios y gestión de riesgos	45
5.1.6. Enfoques en el estudio de los desastres	51
5.1.7. Desastres y desarrollo	55
5.2. DINÁMICA DE SISTEMAS Y MODELACIÓN	58
5.2.1. La Teoría General de Sistemas	58
5.2.1.1. Los sistemas	59
5.2.1.2. Estructura elemental de un sistema	61
5.2.2. Dinámica de sistemas	64
5.2.3. Modelación de sistemas dinámicos complejos	66
5.2.4. Técnicas de modelación de sistemas dinámicos complejos	70
5.2.5. Teoría de los conjuntos difusos y sistemas de lógica difusa	71
5.2.5.1. Elementos de lógica difusa	71
5.2.5.2. Los Sistemas de Lógica Difusa (SLD)	76
5.3. EL SISTEMA URBANO COMO SISTEMA DINÁMICO COMPLEJO	80
5.3.1. Componentes del sistema urbano	83
5.3.1.1. El subsistema natural	88
5.3.1.2. El subsistema social	89

5.3.1.3.	El subsistema tecnológico	91
5.4.	ENFOQUE CONCEPTUAL PARA LA EVALUACIÓN DE LA VULNERABILIDAD URBANA	93
6.	PROPUESTA DE MODELO PARA LA OBTENCIÓN DE INDICADORES DE VULNERABILIDAD URBANA FRENTE A FENÓMENOS NATURALES	97
6.1.	MODELO DE SISTEMA URBANO	97
6.1.1.	El subsistema natural.	98
6.1.1.1.	Estructuras del subsistema natural	98
6.1.1.2.	Factores y variables en el subsistema natural	100
6.1.2.	El Subsistema tecnológico	100
6.1.2.1.	Estructuras del subsistema tecnológico	100
6.1.2.2.	Factores y variables del subsistema tecnológico	101
6.1.3.	El subsistema social	102
6.1.3.1.	Estructuras del subsistema social	101
6.1.3.2.	Factores y variables del subsistema social	103
6.1.4.	El modelo de sistema urbano	104
6.2.	MODELO PARA LA ESTIMACIÓN DE LA VULNERABILIDAD EN SISTEMAS URBANOS	106
6.2.1.	Elementos del modelo	106
6.2.2.	Características del modelo	109
6.2.3.	Propuesta de modelo de indicadores para la evaluación de la Vulnerabilidad de un sistema urbano	111
6.2.3.1.	Índice de Vulnerabilidad del Sistema Urbano (VSU)	112
6.2.3.2.	Índice de Vulnerabilidad del Subsistema Natural (VSN)	112
6.2.3.3.	Índice de Vulnerabilidad del Subsistema Tecnológico (VST)	114
6.2.3.4.	Índice de Vulnerabilidad del Subsistema Social (VSS)	115
6.2.3.5.	Modelo de indicadores	116
6.3.	IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE LÓGICA DIFUSA (SLD) PARA LA CONSTRUCCIÓN DE INDICADORES PARA LA EVALUACIÓN DE LA VULNERABILIDAD EN UN SISTEMA URBANO	118
6.3.1.	Sistemas de Lógica Difusa y el toolbox de control difuso	118
6.3.2.	Determinación de rangos en las funciones de pertenencia y establecimiento de las bases de reglas	122
6.3.3.	Esquema para la determinación de un SLD para la evaluación de la vulnerabilidad del sistema urbano	126
6.3.3.1.	SLD para evaluar la vulnerabilidad del subsistema natural	126
6.3.3.1.1.	Obtención de ESN	127
6.3.3.1.2.	Obtención de FSN	130
6.3.3.1.3.	Obtención de CRSN	133
6.3.3.1.4.	Obtención de VSN	134
6.3.3.2.	SLD para evaluar vulnerabilidad del subsistema tecnológico	136
6.3.3.2.1.	Obtención de EST	137

6.3.3.2.2.	Obtención de FST	139
6.3.3.2.3.	Obtención de CRST	140
6.3.3.2.4.	Obtención de VST	142
6.3.3.3.	SLD para evaluar la vulnerabilidad del subsistema social	144
6.3.3.3.1.	Obtención de ESS	145
6.3.3.3.2.	Obtención de FSS	147
6.3.3.3.3.	Obtención de CRSS	150
6.3.3.3.4.	Obtención de VSS	152
6.3.3.4.	SLD para Vulnerabilidad del Sistema Urbano	155
6.3.3.5.	Operadores difusos	158
7.	APLICACIÓN DEL MODELO	162
7.1.	ASPECTOS GENERALES	162
7.2.	EVALUACIÓN DE LA VULNERABILIDAD. Comuna 2	163
7.2.1.	Aspectos generales Comuna 2	163
7.2.2.	Valoración de entradas	165
7.2.2.1	Obtención de VSN	165
7.2.2.2.	Obtención de VST	167
7.2.2.3.	Obtención de VSS	168
7.2.3.	Simulación y resultados	169
7.2.4.	Análisis de resultados	169
7.3.	EVALUACIÓN DE LA VULNERABILIDAD. Comuna 6.	171
7.3.1.	Aspectos Generales Comuna 6. Municipio de Manizales	172
7.3.2.	Valoración de Entradas	172
7.3.2.1.	Obtención de VSN	172
7.3.2.2.	Obtención de VST	173
7.3.2.3.	Obtención de VSS	174
7.3.3.	Simulación y resultados	175
7.3.4.	Análisis de resultados	176
8.	CONCLUSIONES	178
9.	RECOMENDACIONES	182
10.	BIBLIOGRAFÍA	184
11.	BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA NO REFERENCIADA EN EL TEXTO	196

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Procesos de análisis, simulación y diseño de sistemas	68
Figura 2. Funciones de pertenencia en los conjuntos difusos	73
Figura 3. Funciones de pertenencia para un controlador de temperatura	74
Figura 4. Estructura de un sistema de lógica difusa	77
Figura 5. Defuzificación en conjunto difusos	79
Figura 6. Estructura del sistema urbano	97
Figura 7. Relaciones en el sistema urbano	105
Figura 8. Modelo para la evaluación de la vulnerabilidad en un sistema Urbano	110
Figura 9. Esquema para la implementación de un modelo de indicadores En la estimación de la vulnerabilidad del sistema urbano	111
Figura 10. Parámetros del Bloque de Simulink	119
Figura 11. Ventana principal del toolbox de control difuso	120
Figura 12. Ventana para la definición de entradas y salidas en el toolbox de control difuso	121
Figura 13. Operador difuso para estimar la vulnerabilidad del subsistema Natural	159
Figura 14. Operador difuso para estimar la vulnerabilidad del subsistema Tecnológico	160
Figura 15. Operador difuso para estimar la vulnerabilidad del subsistema Social	160
Figura 16. Operador difuso para estimar la vulnerabilidad del sistema urbano	161

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Ejemplo conjuntos para rangos en el establecimiento de un SLD	72
Tabla 2. Factores y variables del subsistema natural	100
Tabla 3. Factores y variables del subsistema tecnológico	102
Tabla 4. Factores y variables del subsistema social	104
Tabla 5. Esquema de descriptores e indicadores para la estimación de la vulnerabilidad en el sistema urbano	117
Tabla 6. Variables de entrada y salida en la determinación de la vulnerabilidad del subsistema natural	126
Tabla 7. Funciones de pertenencia para las entradas y la salida en la obtención de ESN	127
Tabla 8. Base de reglas y valoraciones de descriptores en estimación de ESN. D3 fijo Muy Alta y D2, D1 variable	128
Tabla 9. Base de reglas y valoraciones de descriptores. D3 fijo Alta y D2, D1 variables en estimación de ESN	128
Tabla 10. Base de reglas y valoraciones de descriptores en la obtención de ESN. D3 fijo Moderada y D2, D1 variables	129
Tabla 11. Base de reglas y valoraciones de descriptores. D3 fijo baja y D2, D1 variables en estimación de ESN	129
Tabla 12. Base de reglas y valoraciones de descriptores. D3 fijo Muy Baja y D2, D1 variables en estimación de ESN	129
Tabla 13. Funciones de pertenencia para entradas en la estimación de FSN	130
Tabla 14. Funciones de pertenencia para la salida en la estimación de FSN	131
Tabla 15. Base de reglas y valoraciones de descriptores. D2 fijo Muy Húmedo y D1, D3 variables en estimación FSN	131
Tabla 16. Base de reglas y valoraciones de descriptores. D2 fijo Húmedo y D1, D3 variables en estimación de FSN	132
Tabla 17. Base de reglas y valoraciones de descriptores. D2 fijo moderado y D1, D3 variables en estimación de FSN	132
Tabla 18. Base de reglas y valoraciones de descriptores. D2 fijo seco y D1, D3 variables en estimación de FSN	132
Tabla 19. Base de reglas y valoraciones de descriptores. D2 fijo muy seco y D1, D3 variables en estimación de FSN	133
Tabla 20. Funciones de pertenencia para entradas y salida en la estimación de FSN	134
Tabla 21. Base de reglas y valoraciones de descriptores. CRSN fija Muy Alta y ESN, FSN variables en estimación de VSN	135
Tabla 22. Base de reglas y valoraciones de descriptores. CRSN fija Alta y ESN, FSN variables en estimación de VSN	135
Tabla 23. Base de reglas y valoraciones de descriptores. CRSN fija moderada y ESN, FSN variables en estimación de VSN	135
Tabla 24. Base de reglas y valoraciones de descriptores. CRSN fija baja y ESN, FSN variables en estimación de VSN	136

Tabla 25.	Base de reglas y valoraciones de descriptores. CRSN fija muy baja y ESN, FSN variables en estimación de VSN	136
Tabla 26.	Variables de entrada y salida en la estimación de la vulnerabilidad del sistema tecnológico	137
Tabla 27.	Funciones de pertenencia para entradas y salida en la estimación de EST	137
Tabla 28.	Base de reglas y valoraciones de descriptores en estimación de EST	138
Tabla 29.	Funciones de pertenencia para las entradas en la estimación de FST	139
Tabla 30.	Funciones de pertenencia para la salida en la estimación de FST.	139
Tabla 31.	Base de reglas y valoraciones de descriptores en estimación de EST	140
Tabla 32.	Funciones de pertenencia para las entradas y salida en la estimación de CRST	141
Tabla 33.	Base de reglas y valoraciones de descriptores en estimación de CRST	141
Tabla 34.	Funciones de pertenencia para las entradas y salida en la estimación de VST	142
Tabla 35.	Base de reglas y valoraciones de descriptores en la obtención de VST. CRST fija Muy Alta y EST, FST variables	143
Tabla 36.	Base de reglas y valoraciones de descriptores en la obtención de VST. CRST fija Alta y EST, FST variables	143
Tabla 37.	Base de reglas y valoraciones de descriptores en la obtención de VST. CRST fija moderada y EST, FST variables	143
Tabla 38.	Base de reglas y valoraciones de descriptores en la obtención de VST. CRST fija baja y EST, FST variables	144
Tabla 39.	Base de reglas y valoraciones de descriptores en la obtención de VST. CRST fija Muy baja y EST, FST variables	144
Tabla 40.	Funciones de pertenencia para las entradas y salida en la obtención de ESS	145
Tabla 41.	Base de reglas y valoraciones de descriptores en estimación de ESS. D3 fijo Muy Alta y D1, D2 variables	146
Tabla 42.	Base de reglas y valoraciones de descriptores en estimación de ESS. D3 fijo Alta y D1, D2 variables	146
Tabla 43.	Base de reglas y valoraciones de descriptores en estimación de ESS. D3 fijo moderada y D1, D2 variables	146
Tabla 44.	Base de reglas y valoraciones de descriptores en estimación de ESS. D3 fijo bajo y D1, D2 variables	147
Tabla 45.	Base de reglas y valoraciones de descriptores en estimación de ESS. D3 fijo muy bajo y D1, D2 variables	147
Tabla 46.	Funciones de pertenencia para las entradas y salidas en la obtención de FSS	148
Tabla 47.	Base de reglas y valoraciones de descriptores en estimación de FSS. D3 fijo Muy Alto y D1, D2 variables	148
Tabla 48.	Base de reglas y valoraciones de descriptores en estimación de FSS. D3 fijo Alto y D1, D2 variables	149

Tabla 49.	Base de reglas y valoraciones de descriptores en estimación de FSS. D3 fijo moderado y D1, D2 variables	149
Tabla 50.	Base de reglas y valoraciones de descriptores en la obtención de FSS. D3 fijo bajo y D1, D2 variables	149
Tabla 51.	Base de reglas y valoraciones de descriptores en la obtención de FSS. D3 fijo muy bajo y D1, D2 variables	150
Tabla 52.	Funciones de pertenencia para las entradas y salidas en la obtención de CRSS.	150
Tabla 53.	Base de reglas y valoraciones de descriptores en la obtención de CRSS. D3 fijo muy alto y D1, D2 variables	151
Tabla 54.	Base de reglas y valoraciones de descriptores en la obtención de FSS. D3 fijo alto y D1, D2 variables	151
Tabla 55.	Base de reglas y valoraciones de descriptores en la obtención de FSS. D3 fijo moderado y D1, D2 variables	152
Tabla 56.	Base de reglas y valoraciones de descriptores en la obtención de FSS. D3 fijo bajo y D1, D2 variables	152
Tabla 57.	Base de reglas y valoraciones de descriptores en la obtención de FSS. D3 fijo muy bajo y D1, D2 variables	152
Tabla 58.	Funciones de pertenencia para las entradas y salidas en la obtención de VSS	153
Tabla 59.	Base de reglas y valoraciones de descriptores en la obtención de VSS. CRSS fijo Muy Alto y ESS, FSS variables	154
Tabla 60.	Base de reglas y valoraciones de descriptores en la obtención de VSS. CRSS fijo Alto y ESS, FSS variables	154
Tabla 61.	Base de reglas y valoraciones de descriptores en la obtención de VSS. CRSS fijo moderado y ESS, FSS variables	154
Tabla 62.	Base de reglas y valoraciones de descriptores en la obtención de VSS. CRSS fijo bajo y ESS, FSS variables	155
Tabla 63.	Base de reglas y valoraciones de descriptores en la obtención de VSS. CRSS fijo Muy bajo y ESS, FSS variables	155
Tabla 64.	Funciones de pertenencia para las entradas y la salida en la obtención de VSU	156
Tabla 65.	Base de reglas y valoraciones de descriptores en la obtención de VSU. VSN fijo muy alto y VST, VSS variables	156
Tabla 66.	Base de reglas y valoraciones de descriptores en la obtención de VSU. VSN fijo alto y VST, VSS variables	157
Tabla 67.	Base de reglas y valoraciones de descriptores en la obtención de VSU. VSN fijo moderado y VST, VSS variables	157
Tabla 68.	Base de reglas y valoraciones de descriptores en la obtención de VSU. VSN fijo bajo y VST, VSS variables	157
Tabla 69.	Base de reglas y valoraciones de descriptores en la obtención de VSU. VSN fijo muy bajo y VST, VSS variables	158
Tabla 70.	Valoración de descriptores en la estimación de la vulnerabilidad del subsistema natural. Caso comuna 2. Manizales.	166
Tabla 71.	Valores de entrada y de salida para la simulación de VSN. Comuna 2.	166
Tabla 72.	Valoración de descriptores en la estimación de la vulnerabilidad del subsistema tecnológico. Caso comuna 2. Manizales.	167

Tabla 73.	Valores de entrada y de salida para la simulación de VST. Comuna 2.	167
Tabla 74.	Valoración de descriptores en la estimación de la vulnerabilidad del subsistema social. Caso comuna 2. Manizales.	168
Tabla 75.	Valores de entrada y de salida para la simulación de VSS. Comuna 2 .	169
Tabla 76.	Valores de entrada y de salida para la simulación de VSU.Comuna 2	169
Tabla 77.	Resultados en el cálculo de la vulnerabilidad de la comuna 2.	171
Tabla 78.	Valoración de descriptores en la estimación de la vulnerabilidad del subsistema natural. Caso comuna 6. Manizales.	173
Tabla 79.	Valores de entrada y de salida para la simulación de VSN.Comuna 6 .	173
Tabla 80.	Valoración de descriptores en la estimación de la vulnerabilidad del subsistema tecnológico. Caso comuna 6. Manizales.	174
Tabla 81.	Valores de entrada y de salida para la simulación de VST.Comuna 6	174
Tabla 82.	Valoración de descriptores en la estimación de la vulnerabilidad del subsistema social. Caso comuna 6. Manizales.	175
Tabla 83.	Valores de entrada y de salida para la simulación de VSS.Comuna 6 .	175
Tabla 84.	Valores de entrada y de salida para la simulación de VSU.Comuna 6 .	176
Tabla 85.	Resultados índice de vulnerabilidad del sistema urbano. Comuna 6.	177
Tabla 86.	Planes de acción para la mitigación de la vulnerabilidad del sistema urbano.	183

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 Claves: Sistema urbano, sistema de lógica difusa, vulnerabilidad holística, riesgo de desastre.

ABSTRACT

Upon considering the vulnerability of a urban system in a holystic 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, holystic vulnerability, natural disasters, disaster risk.

1. INTRODUCCIÓN

A nivel mundial, una de las preocupaciones crecientes tiene que ver con el incremento de eventos catastróficos debidos a fenómenos naturales ocurridos en las últimas dos décadas, de hecho la década de los años 90, fue declarada como el decenio internacional para la reducción de desastres. Organizaciones como la ONU y la OEA, han promovido permanentemente la realización de eventos y reuniones en los que se busca integrar los estudios y avances que se tienen en cada país y en las diferentes regiones, con el objetivo de construir indicadores globales que permitan enfrentar las causas de los desastres de manera contundente, buscando establecer las condiciones de vulnerabilidad que las sociedades humanas y su contexto pueden tener.

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, sino 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.

Igualmente, la diferencia y características específicas de los diferentes elementos de un sistema urbano, y por ende de los aspectos fundamentales de la evaluación de la vulnerabilidad, hace necesario el trabajo con metodologías matemáticas que permitan analizar, modelar y diseñar sistemas dinámicos, en los que la información sea proveniente de la valoración de expertos en el tema. De hecho, aspectos como la exposición, la fragilidad y la capacidad de respuesta de los componentes de un sistema urbano, que requieren de la valoración de datos y variables cualitativas y cuantitativas, ha conducido a presentar dificultades de tratamiento por los métodos matemáticos convencionales. La propuesta es trabajar con Sistemas de Lógica Difusa (SLD), a partir de los cuales se pueda construir un Sistema Difuso Basado en Conocimiento que permita el procesamiento de valoraciones cualitativas, para la obtención y establecimiento de indicadores que permitan evaluar la vulnerabilidad de una manera integral.

Existe una imperiosa necesidad de avanzar en una concepción holística de la vulnerabilidad, como lo han venido planteando autores como Wilches-Chaux, Lavell y Cardona en la última década, al encontrar que en la gran mayoría de los desastres que se presentan, existen condiciones de vulnerabilidad construidas social y culturalmente, que estuvieron al margen del análisis y el estudio, y han abierto un espacio para la investigación en metodologías y en la construcción de indicadores para la

evaluación de la vulnerabilidad con criterios de integralidad, en las que interactúen condiciones naturales, sociales y tecnológicas.

Este trabajo parte de una revisión conceptual de diferentes enfoques sobre las amenazas, la vulnerabilidad, el riesgo y los desastres, que permiten establecer lineamientos para avanzar en una concepción holística de la vulnerabilidad en sistemas urbanos.

A partir de las consideraciones sobre las diferentes facetas de la vulnerabilidad en los sistemas urbanos, se presenta una mirada desde los sistemas dinámicos complejos que permita establecer un modelo de sistema urbano, en el que se consideren y relacionen los aspectos fundamentales para la evaluación de la vulnerabilidad. Se presenta en este trabajo un modelo de sistema urbano particular y un modelo para la evaluación de vulnerabilidad de éste, en el que se busca la integración de variables de tipo natural, tecnológico y social.

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. Para los fines de este trabajo, se presenta el diseño de un modelo de sistema difuso que permite aproximarse 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 permitió la construcción de un índice de vulnerabilidad en sistemas urbanos.

Finalmente, en el trabajo se presentan dos aplicaciones del modelo de indicadores para evaluar la vulnerabilidad en sistemas urbanos, realizadas en la ciudad de Manizales, a partir de las cuales y basados en

todo el proceso de diseño del modelo, se establecen las conclusiones alrededor de los sistemas de lógica difusa, los sistemas urbanos y la construcción de indicadores para evaluar la vulnerabilidad.

2. JUSTIFICACIÓN

El documento CONPES – 3146 (2001), presenta la estrategia para consolidar la ejecución del Plan Nacional para la Atención y Prevención de Desastres –PNPAD en Colombia, y presenta como una de las actividades fundamentales, el fortalecimiento de la investigación en temas como la vulnerabilidad del país frente a riesgos de origen natural y antrópico. La investigación requerida se soporta en el trabajo interdisciplinario e interinstitucional, aspecto que centra la necesidad de avanzar en estudios holísticos de la vulnerabilidad. Evidentemente, las recomendaciones del documento obedecen a sintetizar los planteamientos que se han venido realizando no sólo desde las diferentes organizaciones mundiales relacionadas con el tema de los desastres y su relación con el desarrollo social y económico, sino de los centros de investigación y grupos de trabajo académico multidisciplinario de universidades en el mundo.

En este sentido, el presente trabajo es un aporte conceptual y metodológico para la evaluación de la vulnerabilidad en sistemas urbanos desde una visión holística. El establecimiento de la vulnerabilidad de un sistema determinado frente a fenómenos naturales, desde la perspectiva aquí planteada, se convierte en una herramienta de trabajo fundamental para la promoción y ejecución de programas y proyectos de desarrollo en las unidades territoriales del orden municipal y departamental.

La importancia de la propuesta del trabajo, radica en la posibilidad de partir de valoraciones de expertos, para evaluar globalmente un sistema urbano en cuanto a su posibilidad de falla ante fenómenos naturales, permitiendo analizar desde sus componentes naturales, tecnológicos y

sociales, los factores determinantes de la vulnerabilidad. De esta manera, el trabajo pretende trascender la visión fisicalista con la que ha sido abordado el tema en procesos de planeación para el desarrollo y en los planes de ordenamiento territorial y genera condiciones de acercamiento a la actualidad conceptual y metodológica en el orden mundial.

3. OBJETIVOS

3.1. OBJETIVO GENERAL

Establecer un modelo basado en lógica difusa para la evaluación de la vulnerabilidad de sistemas urbanos frente a fenómenos naturales con miras a su mitigación.

3.2. OBJETIVOS ESPECIFICOS

- Plantear un modelo para la comprensión del sistema urbano en perspectiva de evaluar su vulnerabilidad frente a fenómenos naturales.
- Establecer los criterios necesarios para construir indicadores en la evaluación de la vulnerabilidad urbana a partir de valoraciones de expertos.
- Construir un sistema de indicadores que permita evaluar la vulnerabilidad urbana, en el que se integren factores determinantes naturales, sociales y tecnológicos por medio de la lógica difusa.
- Elaborar el modelo de indicadores a partir del sistema establecido para evaluar vulnerabilidad.
- Aplicar el modelo construido para la obtención de indicadores en la evaluación de la vulnerabilidad en un sistema urbano.

4. METODOLOGÍA

La metodología se basa en el análisis, diseño y simulación de un modelo de indicadores para la estimación de la vulnerabilidad en un sistema urbano, basado en los Sistemas de Lógica Difusa.

El desarrollo del trabajo se resume a continuación:

- Construcción conceptual de un modelo de sistema urbano.
- Documentación sobre aspectos conceptuales de la vulnerabilidad en el sistema urbano frente a los fenómenos naturales.
- Revisión y análisis de los avances teóricos y conceptuales en la construcción de indicadores para la evaluación de la vulnerabilidad en sistemas urbanos.
- Recopilación de valoraciones de expertos en áreas de amenazas, vulnerabilidad, riesgos y desastres relacionando en el análisis criterios científicos, sociales, económicos y políticos, por medio de entrevistas directas.
- Establecimiento de variables indispensables, desde los conceptos de expertos, para el análisis de la vulnerabilidad por medio de la lógica difusa.
- Aplicación de la lógica difusa en la determinación de los sistemas difusos que permitan ponderar los indicadores que faciliten la interpretación integral de la vulnerabilidad. Aplicación de software especializados para el procesamiento.
- Aplicación del modelo de indicadores para la estimación de la vulnerabilidad en sistemas urbanos, en una comuna específica de la ciudad de Manizales (Colombia).

5. MARCO TEORICO

5.1. 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 y que pueden expresarse en términos de los estudios sobre amenazas, vulnerabilidad y riesgo. En esta primera parte, se exploran conceptos y estudios alrededor de estos términos, con el fin de establecer un panorama para las relaciones entre cada uno de los procesos en el estudio de los desastres y de sus implicaciones en el desarrollo de sistemas urbanos.

Igualmente se presenta una relación de los elementos teóricos como argumentos para una contextualización de la amenaza y vulnerabilidad desde una perspectiva integral en la construcción holística del riesgo. 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).

5.1.1. Amenazas y su evaluación. En términos generales, 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, a continuación se relaciona una clasificación propuesta por Allan Lavell, (1996)¹:

- Amenazas naturales: obedecen a la dinámica del planeta tierra expresada en procesos hidrogeológicos, atmosféricos y biológicos.
- Amenazas socionaturales: generadas por la intervención del ser humano a la naturaleza, que induce a la ocurrencia de ciertos procesos generalmente considerados naturales. Eventos como deslizamientos, inundaciones, desertificación o hundimientos son expresiones de este tipo de amenazas.
- Amenazas antrópico- contaminantes: Referidas a procesos de contaminación ocasionados por derrames, emisiones o dispersiones de sustancias tóxicas hacia el aire, suelo y agua.
- Amenazas antrópico – tecnológicas: referidas a posibles fallas en procesos industriales e infraestructurales en espacios urbanos o que se realizan en cercanía a ellos.

Una clasificación más general de las amenazas basada en sus causas, puede sintetizarse en Amenazas Naturales y Amenazas Antrópicas, relacionando los fenómenos que puedan dar su origen². Esta clasificación

¹ Documento compilado por Maria Augusta Fernandez en libro Ciudades en Riesgo, 1996.

² Los fenómenos que pueden generar amenazas naturales se pueden clasificar en: - Fenómenos geodinámicos: sismos, erupciones volcánicas, tsunamis o maremotos y los fenómenos de deformación del suelo producidos por el movimiento de fallas geológicas. Igualmente fenómenos de remoción en masa: caída y volcamiento de rocas, deslizamientos, reptaciones, flujos de escombros, avalanchas, subsidencias y hundimientos. - Fenómenos Hidrológicos: inundaciones lentas en planicie, inundaciones de régimen torrencial, desbordamientos de ríos y lagos, anegamiento de zonas bajas por aumento de caudales, la erosión terrestre y costera, la sedimentación, salinización, desertificación y las sequías. - Fenómenos Atmosféricos: tornados y vendavales, lluvias torrenciales y tormentas, heladas, granizadas, cambios fuertes de temperatura e incendios forestales, huracanes (ciclones). - Fenómenos Biológicos: Epidemias y Plagas. Los fenómenos que pueden generar amenazas antrópicas: - Fenómenos Tecnológicos: Fallas en sistemas por descuido, falta de mantenimiento, errores de operación, fatiga de materiales o mal funcionamiento mecánico. - Fenómenos Contaminantes: Por acción de agentes tóxicos o peligrosos para el ser humano y en general para el medio ambiente. -

que se realiza con fines analíticos, no ignora la concatenación de los fenómenos en su posibilidad de afectación y de desencadenamiento de fenómenos antrópicos a partir de los naturales y viceversa.

Cardona (2001), plantea que evaluar una amenaza es "pronosticar la ocurrencia de un fenómeno con base en el estudio de su mecanismo generador, el monitoreo del sistema perturbador y/o el registro de eventos en el tiempo. Un pronóstico puede ser a corto plazo, generalmente basado en la búsqueda e interpretación de señales o eventos premonitorios; a mediano plazo, basado en la información probabilística de parámetros indicadores, y a largo plazo, basado en la determinación del evento máximo probable en un período de tiempo que pueda relacionarse con la planificación del área potencialmente afectable".

La evaluación de amenazas es un proceso que busca determinar la probabilidad de ocurrencia y la severidad de un evento en un tiempo específico y en un área determinada (Cardona, 2001 b). Según el autor se puede hablar en términos generales de dos metodologías para evaluar amenazas:

- **Análisis cualitativos:** en los que la evaluación de componentes es realizada subjetivamente por expertos, asignando rangos de intensidad que permiten establecer niveles de amenaza con criterios subjetivos brindados por la experiencia y la experticia. Actualmente esta metodología se basa en herramientas como la lógica difusa, las redes neuronales y la determinación de índices o indicadores relativos. En esta metodología es fundamental el conocimiento de la ocurrencia histórica en tiempo, intensidad y la espacialidad.

Fenómenos Antrópicos y Conflictos: Guerras, acciones terroristas, vandalismo, conflictos civiles y militares.(CARDONA, 2001b).

- Análisis cuantitativos, las variables involucradas se cuantifican mediante estimaciones físicas o modelaciones matemáticas. Los fenómenos naturales implican la consideración de la probabilidad de ocurrencia y en muchos casos no obedecen a patrones establecidos en cuanto a períodos de retorno. Puede plantearse que la comprensión de la dinámica terrestre escapa a la predicción con exactitud de las intensidades, magnitudes y duración, y se convierten en fenómenos predecibles por la posibilidad de establecer modelos de simulación, basados en estudios sobre su funcionamiento, pero no permiten tener mucha certeza sobre el tiempo y espacio de ocurrencia. Un fenómeno natural puede determinarse como amenaza según el estudio de los factores internos, los posibles eventos detonantes y el potencial de energía destructiva interna, así como por la probabilidad de impacto sobre un sistema social o tecnológico determinado.

El estudio y la evaluación de las amenazas es un proceso fundamental en la gestión del riesgo y por ende en la evaluación de la vulnerabilidad, a partir del conocimiento que de éstas se tengan, se puede iniciar la exploración de las condiciones específicas de debilidad y de susceptibilidad de ser afectada, que tenga una comunidad o un sistema determinado ante la ocurrencia de un fenómeno caracterizado como amenaza.

5.1.2. La vulnerabilidad. El marco conceptual sobre el cual se desarrolla el trabajo, requiere de la revisión a los diferentes enfoques construidos para los estudios de la vulnerabilidad, es a partir de éstos que se pretende tener una aproximación al planteamiento de una teoría holística de la vulnerabilidad, en la que se integren los diferentes avances realizados desde las ciencias naturales, ciencias aplicadas y ciencias sociales.

En cada uno de los campos anteriormente referenciados, se han construido interpretaciones y metodologías de intervención en la mitigación de condiciones de debilidad de las sociedades humanas.

Inicialmente puede definirse la vulnerabilidad 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). Partir de una concepción holística de la vulnerabilidad o de una visión de vulnerabilidad global (Wilches -Chaux, 1993), no exime la necesidad de analizar sectorialmente el concepto, relacionando las discusiones desde las perspectivas social, física, económica y política, como se plantea en el concepto precedente.

Aspectos fundamentales en la concepción de la vulnerabilidad, como el tiempo y el desarrollo histórico de la sociedad, hacen que la vulnerabilidad no sea una imagen instantánea de las debilidades de una comunidad, sino que la convierte en un proceso dinámico e histórico de construcción de la misma sociedad. La existencia, ubicación, estructura y organización de la sociedad desequilibrados con un desastre, no son procesos anacrónicos (Lavell, 1996)³, y son justamente estos procesos construidos en el tiempo los que configuran la vulnerabilidad.

La consideración de la vulnerabilidad como un sistema dinámico establece 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

³ En Ciudades en Riesgo, capítulo Degradación ambiental, riesgo y desastre urbano. Problemas y conceptos. Hacia la definición de una agenda de investigación.

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)⁴.

En términos de Metzger (1996), 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, al igual que factores técnicos, funcionales, institucionales y político administrativos (d'Ercole, 1994)⁵.

Un análisis detallado de la concepción holística de la vulnerabilidad puede enfocarse desde el planteamiento de “vulnerabilidad global” introducido por Gustavo Wilches – Chaux (1993), considerando que en esta concepción se requiere de la relación de diferentes campos del conocimiento. Para el autor referido, la vulnerabilidad es entendida 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 (“vulnerabilidades”⁶).

Los ángulos de la vulnerabilidad, planteados por Wilches – Chaux (1989) son:

⁴ Citados por Krishna Vatsa (2000) para referir elemento claves de la vulnerabilidad.

⁵ Citado por Pascale Metzger en *Medio Ambiente Urbano y Riesgos: Elementos para la Reflexión*. Compilado en el libro Ciudades y Riesgo. LA RED: 1996.

⁶ Wilches – Chaux sugiere dividir la Vulnerabilidad Global en “vulnerabilidades” advirtiendo que cada una de ellas constituye un ángulo especial para analizar el fenómeno global y que ellas están estrechamente interconectadas entre sí.

- Vulnerabilidad natural: referida a las características orgánicas de todo ser vivo y determinada por los límites ambientales dentro de los cuales es posible la vida. Este ángulo de la vulnerabilidad se ha incrementado en la última década debido en esencia a la desaparición de especies vegetales resistentes a condiciones ambientales severas y a su reemplazo por otras especies menos resistentes, con mayor valor comercial, y por tanto más vulnerables a condiciones extremas.
- Vulnerabilidad física: se refiere a las características de ubicación en áreas propensas y a deficiencias de resistencia de los elementos expuestos, en función de la cual se encuentra la capacidad de resistir la acción de un evento considerado como amenaza. Son ejemplos de este ángulo de la vulnerabilidad, la sismoresistencia de una edificación, la ubicación de una comunidad en el área de influencia de un deslizamiento o en el cauce de un río.
- Vulnerabilidad económica: se refiere a la situación económica de la sociedad en términos de pobreza, ingresos, desempleo, dificultad de acceso a los servicios. Igualmente se refiere a la falta de diversificación económica, a los inconvenientes comerciales regionales e internacionales y a la imposición de políticas monetarias.
- Vulnerabilidad social: se refiere al grado de cohesión social y representa la capacidad de reaccionar como grupo organizado, por procesos de autoorganización o con intereses particulares.
- Vulnerabilidad política: expresa el nivel de autonomía que tiene una comunidad con respecto a sus recursos, así como en la toma de decisiones que la afectan. Esquemas de gobierno centralistas en la toma de decisiones hacen más vulnerables las sociedades. En la medida en que las comunidades tengan mayor capacidad de participación en la toma de decisiones se hacen menos vulnerables.
- Vulnerabilidad ideológica: se relaciona con las ideas o creencias que tienen las personas sobre el devenir y los hechos del mundo. Actitudes pasivas y fatalistas de la comunidad debilitan una acción

transformadora y propositiva frente a temas como la prevención e incluso la atención de las emergencias que se presenten.

- Vulnerabilidad cultural: se refiere a la forma en que los individuos se ven así mismos en la sociedad y como colectividad. En este ángulo de la vulnerabilidad, juega un papel importante los medios de comunicación por su contribución en el manejo sesgado de imágenes y la transmisión imprecisa de información sobre el medio ambiente, la sociedad y los desastres.
- Vulnerabilidad educativa: las deficiencias de la educación, como la falta de cobertura, la falta de calidad, la ausencia de conocimiento sobre causas, efectos y razones por las que se presentan los desastres, el desconocimiento de la historia, la falta de socialización de la información y la falta de preparación se convierten en aspectos que hacen que una comunidad sea más vulnerable.
- Vulnerabilidad ecológica: la vulnerabilidad aumenta cuando las actividades humanas se realizan mediante la explotación inadecuada y la destrucción de los recursos naturales. El deterioro de ecosistemas conlleva a que éstos pierdan su capacidad de autoajustarse para compensar los efectos directos e indirectos de la acción humana o de la misma naturaleza.
- Vulnerabilidad institucional: referida a las dificultades de las instituciones para hacer la gestión del riesgo, expresada en la falta de planes para la preparación, la mitigación o la intervención, sobre la vulnerabilidad o sobre el riesgo.

Una interpretación similar es presentada por Wisner (2000), quien considera que la vulnerabilidad puede estudiarse desde diferentes enfoques, específicamente:

- Vulnerabilidad material / económica, entendida como la dificultad de acceso a recursos.

- Vulnerabilidad social, referida a la desintegración de patrones sociales.
- Vulnerabilidad ecológica, referida a la degradación del medio ambiente y a la incapacidad para protegerlo.
- Vulnerabilidad educacional, entendida como la incapacidad de acceso a información y conocimiento.
- Vulnerabilidad actitudinal y motivacional, entendida como la incapacidad de concientización pública.
- Vulnerabilidad política, acceso limitado al poder político y a la representación.
- Vulnerabilidad cultural, referido a la costumbres y a las creencias.
- Vulnerabilidad física, referida a las construcciones o edificaciones individuales débiles.

Otro planteamiento que se puede relacionar con una visión holística de la vulnerabilidad es el realizado por Peduzzi (2000), según el cual la vulnerabilidad para un área sensible o amenazada por fenómenos naturales o antrópicos, se conceptúa 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).

Así mismo, en una visión holística, es necesario resaltar el papel en la vulnerabilidad de las actividades y las conductas humanas, si se considera que la vulnerabilidad describe la susceptibilidad o resistencia de un sistema socioeconómico a los efectos de los peligros naturales y los desastres tecnológicos y ambientales conexos (Naciones Unidas, 2001). Desde esta concepción, para establecer el grado de vulnerabilidad es necesario partir de una combinación de factores como: la conciencia del peligro, las condiciones de los asentamientos humanos y la

infraestructura, la política oficial y la administración pública y las capacidades organizadas en caso de desastre.

Con el objetivo de complementar la argumentación sobre una concepción holística de la vulnerabilidad, a continuación se presenta la relación de factores que originan la vulnerabilidad, de acuerdo con el trabajo de algunos autores:

Para Nicholls y Hoozemans (2000), el concepto de vulnerabilidad comprende: la susceptibilidad de un sistema a cambios físicos y ecológicos, los impactos potenciales de los cambios de los sistemas naturales sobre los sistemas socioeconómicos y la capacidad para resistir los impactos incluyendo la capacidad de prevenir y reducir los impactos (capacidad adaptativa).

Anderson y Woodrow (1989), consideran aspectos de carácter: físico material (medio ambiente, infraestructura, tecnología, el capital), social organizacional (actividades económicas y sociales, estructuras políticas) y motivacional actitudinal (autoconcepción de las comunidades). Aspectos que afectan en el largo plazo la capacidad de las comunidades para responder a los eventos peligrosos.

Cannon (1991) refiere la vulnerabilidad a tres aspectos: La vulnerabilidad de los sistemas de vida, la autoprotección y la protección social. Considerando factores como el estado de salud y de nutrición de una sociedad, el nivel de preparación del individuo y de la colectividad para enfrentar la amenaza y a la acción del estado en todos sus niveles para proteger a la población, reflejada en normas de construcción, ordenamiento territorial, esquemas de seguros, etc.

Una concepción fiscalista de la vulnerabilidad puede encontrarse en los

planteamientos de Wong, Samudio y Mora (2001)⁷, para quienes la vulnerabilidad se analiza desde tres aspectos: estructural (grado en que pueden afectarse los elementos estructurales de una edificación; aspectos ingenieriles de un edificio; No Estructural (sistemas arquitectónicos de la edificación que causan inhabilitación para su buen funcionamiento o para su ocupación temporal), Vulnerabilidad Funcional (se da en términos de efectos sobre buen funcionamiento de una edificación para el fin que tiene propuesto). Esta visión de la vulnerabilidad decididamente fisicalista por su relación con edificaciones, permite establecer un elemento fundamental y relacionable en una perspectiva integral de la vulnerabilidad y más hacia un enfoque sistémico la relación de términos como estructura y funcionalidad.

Para Downing y Bakker (1999), los determinantes de la vulnerabilidad en centros poblados son: el crecimiento de la población, los patrones de asentamiento y de migración, el desarrollo económico, la infraestructura en salud, la mitigación y la preparación, la alerta temprana de emergencia, la asistencia y la recuperación. 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 and Bohle (1993) citados por Vatsa (2000), al definir la vulnerabilidad como un

⁷ w.w.w.utp.ac.pa. David Woong Diaz, Regina Samudio y Hugo Mora en el artículo: Determinación de la Vulnerabilidad y Estimación de Daños ante los Desastres Naturales

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, la fragilidad social y la falta de resiliencia, entendidos como:

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

Este planteamiento intenta integrar de manera holística la lectura de las ciencias físicas y las ciencias sociales, y permite tener una visión completa de los factores que dan origen a la vulnerabilidad y la refieren a etapas pre – durante y posterior a los eventos. La vulnerabilidad es una característica de una sociedad que se construye en el tiempo y que refleja condiciones pasadas, presentes y futuras frente a un evento peligroso.

Frente a situaciones de riesgo y desastre es necesario la reflexión y la discusión entorno a tres tipos de problemas estrechamente relacionados: el primero, el problema de los factores causales de los desastres; el segundo, el problema de la respuesta social a los desastres una vez ocurridos; el tercero, la problemática de la reconstrucción. A partir de la

discusión de estos tres aspectos, se pueden generar opciones reales para la reducción de la vulnerabilidad de las ciudades hacia el futuro y el mejoramiento de los sistemas de respuesta (Lavell, 2000 b).

La revisión a los conceptos, enfoques y componentes de la vulnerabilidad, reafirma la necesidad de avanzar en un esquema holístico, que integre los diferentes enfoques desde las diferentes ciencias y planteados especialmente por Cardona y Lavell en sus múltiples trabajos durante la última década, igualmente en la necesidad de metodologías para la evaluación de la vulnerabilidad que resalten el trabajo interdisciplinario.

5.1.3. Evaluación de la vulnerabilidad. 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 una concepción holística de la vulnerabilidad, la evaluación de ésta involucra el establecimiento de medidas para elementos sociales y técnicos de la capacidad de un sistema para enfrentar la preparación, prevención, resistencia, atención y recuperación ante la ocurrencia de un fenómeno.

Planteada así, la evaluación de la vulnerabilidad se realiza a partir de criterios técnicos y sociales. En primer lugar, el criterio técnico en cuanto a su factibilidad de cuantificación en términos de elementos físicos y

funcionales. 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). Evidentemente estos criterios para la evaluación de la vulnerabilidad obedecen a la integración de los enfoques que las ciencias naturales, aplicadas y sociales establecen para el estudio de la vulnerabilidad.

La evaluación de la vulnerabilidad desde el punto de vista físico y técnico, ha recibido aportes conceptuales y tecnológicos muy importantes desde los avances de la ingeniería en diferentes campos (Cardona, 2001). Grandes desarrollos en el campo de las propiedades de sismoresistencia en edificaciones e infraestructura en líneas vitales, estudios técnicos del suelo, obras de bioingeniería para estabilización de terrenos, han contribuido a determinar las condiciones de susceptibilidad o debilidad a presentar daños físicos que puede tener una sociedad determinada.

Es importante señalar que la evaluación de la vulnerabilidad desde un criterio físico, no se limita exclusivamente al estudio de las propiedades técnicas de resistencia que tiene la infraestructura, sino que es necesario la inclusión de un análisis de exposición de dicha infraestructura, para indicar si el elemento se encuentra en el área de influencia del fenómeno. Siguiendo los planteamientos de Wilches Chaux (1989), sobre la vulnerabilidad global, 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.

Para la OEA (2000), específicamente para el IACNDR y el VAI⁸, la evaluación de la vulnerabilidad debe responder a una estructura y a una función específicas.

- La estructura para una metodología de evaluación de vulnerabilidad debe incluir entre otros factores: población (grupos generales o específicos), amenazas naturales (multiamenazas, una o más amenazas específicas), el sector involucrado (multisectorial, o uno o más sectores específicos), medidas de impacto (expresada en términos monetarios, tanto estructurales como operacionales), el foco geográfico (construcciones específicas o tipo de construcciones, infraestructura de redes, ciudad, estado o provincia).
- La función de una metodología en la evaluación de la vulnerabilidad 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; información pertinente para el acceso al aseguramiento y a la clasificación, formación de fondos comunes de aseguramiento; información pertinente para proyectos de inversión en cualquiera de sus fases; información pertinente para la asistencia en la reconstrucción postdesastre, a nivel de proyecto en cualquiera de las fases.

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

⁸ 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).

específica en un proceso de construcción histórica, a partir de las cuáles se pueden establecer objetivos, metas y estrategias concretas para el desarrollo de dicha comunidad.

5.1.4. Metodologías para evaluar la vulnerabilidad. El Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD) ha realizado en los últimos años, encuentros de expertos con el objetivo de 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 vulnerabilidad⁹. Los principales avances metodológicos presentados se relacionan a continuación:

Krishna S. Vatsa (2000) ha planteado que a partir de la relación de diferentes estudios sobre el cambio climático, la seguridad alimentaria y los desastres naturales, se han empezado a desarrollar gran cantidad de trabajos sobre la importancia de la causalidad social en el estudio de la vulnerabilidad, señalando a ésta como una consecuencia de los procesos sociales, económicos y políticos, en una concepción que no la refiere únicamente como una amenaza.

Guha – Sapir y Michellier (2000), del Centro para la Investigación en Epidemiología de los Desastres de la Universidad de Louvain en Bélgica, plantean una sencilla manera de clasificar la vulnerabilidad para un país, evaluando la cantidad de población del país que ha sido directamente afectada por desastres en un período dado. Adicionalmente presentan una posibilidad para la valoración compuesta de la vulnerabilidad, determinando la cantidad de la población afectada por desastres de acuerdo con la intensidad del fenómeno.

⁹ 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.

Giroto (2000), de la Universidad de Costa Rica, plantea la necesidad para Centro América de integrar los avances en Sistemas de Información Geográfica (SIG) y cartografía de riesgos que ofrecen buena información de medidas espaciales y geográficas con el establecimiento prioritario de criterios sociales. La propuesta se enfoca al establecimiento de un sistema integrado para el manejo de información, con una base conceptual en el diseño de aplicaciones y modelos espaciales, multicriterios y multiusuarios. Los modelos espaciales y temporales sobre vulnerabilidad pueden ser reforzados a partir de la relación o la combinación de métodos inductivos y deductivos. Entendiendo que los métodos inductivos se basan en criterios técnicos para analizar factores geodinámicos para mapear las principales amenazas y que los métodos deductivos se basan en estudios históricos de fenómenos e impactos de desastres en comunidades.

Maskrey (1998), citado por Giroto (2000), sugiere varios elementos fundamentales en cualquier estrategia para el diseño e implementación de un SIG para ser aplicado en escenarios de riesgo:

- Una clara estructura conceptual, lógica y real.
- El adecuado conocimiento de los usuarios y la estructura de la información demandada.
- El inventario sistemático de datos e información existente.
- El diseño de un modelo espacio – temporal para el análisis de datos que contemple una adecuada estrategia de manejo de error e incertidumbre. En el modelo se debe incluir información sobre el origen de los datos (fuentes, medidas, sistemas de clasificación usados en su recolección y procesamiento), así aplicaciones de métodos de simulación para crear aplicaciones capaces de ponderar variables con diferentes pesos en la ecuación de riesgo.

Davidson y Lambert (2000), han trabajado en la construcción del Indicador de Riesgo en Desastres por Huracanes (HDRI, Hurricane Disaster Risk Index), un índice compuesto desarrollado para comparar las pérdidas económicas y de vidas causadas en desastres debidos a huracanes en estados costeros de los Estados Unidos. Igualmente, compara las diferentes y relativas contribuciones de otros factores como la frecuencia de los huracanes y la calidad de los planes de emergencia. El HDRI tiene dos partes HDRI económico y el HDRI social, cada uno de ellos es un índice compuesto que combina indicadores escalares (población, periodo medio de retorno del huracan). El índice relaciona las siguientes variables: la amenaza, exposición, vulnerabilidad y la capacidad de respuesta y recuperación con factores respectivos de ponderación. La inclusión de la variable capacidad de respuesta y recuperación se presenta como un posible factor de reducción dentro de la ecuación, las otras variables están relacionadas matemáticamente de manera que si no hay amenaza, o no hay exposición, o no hay vulnerabilidad, entonces no hay riesgo (si $H=0$ ó $E=0$ ó $V=0$, entonces $HDRI = 0$). Un aspecto importante en la presentación del HDRI, es la integración de variables de orden físico y social, ya que se integran en el índice compuesto, elementos como la frecuencia e intensidad de los fenómenos naturales, la exposición de la población, los recursos económicos y la infraestructura, las condiciones de debilidad de la población y las características políticas e institucionales para enfrentar y reponerse a la situación desastrosa.

Cardona y Hurtado (2000), han desarrollado un índice compuesto para la evaluación del riesgo sísmico, en el que se consideran un índice sísmico duro y un índice sísmico blando. Para el primero se relacionan descriptores como el área destruida, número de muertos y heridos, daños en líneas vitales y para el segundo se consideran como descriptores, la

amenaza sísmica del contexto y la vulnerabilidad sísmica del contexto en términos de exposición, fragilidad social y la falta de resiliencia. La importancia de este modelo es la visión holística con la que se construyen los indicadores, relacionando variables de tipo cuantitativo y cualitativo. Un aspecto fundamental de esta propuesta es que la modelación del índice parte del establecimiento de un sistema de lógica difusa, considerado por los autores como el único lenguaje matemático con el que es posible la interacción de las ciencias naturales, sus derivados tecnológicos y las ciencias sociales. Esto se justifica en que, a partir de los conjuntos difusos, es posible representar los contenidos cuantitativos de la información suministrada por las ciencias naturales y las ingenierías en términos cualitativos y viceversa, de la descripción cualitativa de la información resulta posible extraer igualmente algunos índices numéricos representativos que permiten la interpretación de variables y la manipulación técnica de resultados.

Smolka, Allmans y Ehrlicher (2000), han trabajado en el diseño de modelos de riesgo, para calcular por anticipado las pérdidas asociadas a la probabilidad de ocurrencia de fenómenos naturales como los terremotos, estos modelos han sido desarrollados sobre la base de los datos relacionados con la amenaza, los valores de exposición, la distribución espacial y la vulnerabilidad. Para los autores, el riesgo se forma a partir de tres elementos: la amenaza, la vulnerabilidad y el valor de los objetos expuestos. Desde esta perspectiva, la vulnerabilidad está referida al objeto expuesto y su valor, el contexto externo al objeto y la capacidad de respuesta a la emergencia y la recuperación son considerados como elementos adicionales.

Crowards (2000) del Banco de Desarrollo del Caribe, plantea como medidas alternativas para la evaluación de la susceptibilidad a desastres naturales el número de desastres por eventos naturales, personas

afectadas por desastres naturales, muertes debidas a desastres naturales, costos de los daños e impactos macroeconómicos.

Wisner (2000), considera que en la configuración de una propuesta para estimar el riesgo es necesario tener en cuenta, no sólo las características de las amenazas y la vulnerabilidad, sinó las medidas de mitigación consideradas, retomando dentro de éstas diferentes interpretaciones para la vulnerabilidad¹⁰, de acuerdo con lo planteado anteriormente: Vulnerabilidad material / económica, social, ecológica, educacional, actitudinal y motivacional, política, cultural y física.

Palm (2000) del Secretariado para La Estrategia Internacional para la Reducción de Desastres (ISDR - International Strategy for Disaster Reduction) de las Naciones Unidas, en el informe de la Comisión para el Desarrollo Sostenible de UN, presenta la información concerniente a los indicadores planteados en la preparación y respuesta a desastres naturales como capacidad institucional de los países.

Se plantea en la construcción de indicadores la necesidad de establecer:

- 1) El nombre, una breve definición y unidad de medida.
- 2) Políticas relevantes, propósito, acuerdos y convenciones internacionales, estándares internacionales registrados y recomendados, conexiones con otros indicadores.
- 3) Descripción metodológica, conceptos y definiciones involucradas, métodos de medida, limitaciones del indicador, estado de la metodología, definiciones alternativas del indicador.
- 4) Establecimiento de los datos, datos requeridos para conformar el indicador, fuentes y disponibilidad de datos nacionales e internacionales, referencias de los datos.
- 5) Instituciones y agencias involucradas en el desarrollo de los

¹⁰ Planteamientos tomados de Yassemin Aysan en *"Keynote Paper: Vulnerability Assesment"* . En P.A. Merriman y C.W. Browitt, eds., Natural Disasters: Protecting Vulnerable Communities. P.p. 1-14. London. 1993.

indicadores, liderazgo y otras organizaciones contribuyentes. 6) Referencias, lecturas y sitios en internet.

Una propuesta para la medida de la vulnerabilidad en pequeñas islas de países desarrollados es presentada por Briguglio (1999), y se refiere a la determinación de un índice de vulnerabilidad compuesto por características económicas y ambientales. En primer lugar, considerando el índice de vulnerabilidad económica en términos de las características de producción, balance importación – exportación y en segundo lugar el índice de vulnerabilidad ambiental en términos de las características ecosistémicas y de exposición a fenómenos naturales. La propuesta en la construcción de modelos para calcular el índice de vulnerabilidad se soporta en tres métodos: normalización, elaboración de mapas y métodos de regresión. La normalización como un método para estandarizar las diferentes unidades de medida de los componentes del índice y que permite establecer promedios, conocidos como índices compuestos. Elaborar mapas a escala es un método apropiado para datos cualitativos, que involucra el trazado de líneas según la escala de las categorías establecidas y que van desde la menor hasta la mayor incidencia, el principal inconveniente en este método es la subjetividad que puede tenerse en el trazado de las diferentes líneas. El método de la regresión propuesto por Atkins et al (1998) y Wells (1997)¹¹ esencialmente busca que a las variables que explican la vulnerabilidad se les realice el proceso de la regresión, tomando los coeficientes de las variables para establecer su correlación en la ecuación estimada.

Un aspecto importante en la presentación de Briguglio (1999), es el esquema presentado para el análisis de la vulnerabilidad ambiental, referida a la consideración del nivel de riesgo en el ambiente por exposición, a la resiliencia intrínseca del ambiente al riesgo y la resiliencia

¹¹ Ambos citados por Briguglio (1999).

como resultado de fuerzas externas que actúan sobre el ambiente describiendo lo que se denomina como integridad ecológica o nivel de degradación ambiental. Estos aspectos resaltan la necesidad de profundizar en el estudio de la vulnerabilidad desde una perspectiva sistémica y compleja.

Con el fin de analizar la vulnerabilidad de manera global, Chardon (2002) ha presentado una herramienta que busca fundamentalmente: 1) Realizar un estudio espacial cualitativo y cuantitativo de los factores de vulnerabilidad que pertenecen a campos de acción diferentes, 2) Integrarlos y demostrar sus interrelaciones y 3) Los resultados obtenidos deben demostrar de manera detallada la situación de riesgo. En la selección de los campos de pertenencia de los factores de vulnerabilidad, con fines operativos y metodológicos se trabajó con factores naturales y factores socioeconómicos. Los factores naturales seleccionados fueron: experiencias pasadas (deslizamientos y/o sismos), procesos erosivos, la pendiente, la intensidad del sismo de 1979¹², los rellenos, las zonas inundables y los trabajos de corrección geotécnica. Los factores socioeconómicos seleccionados fueron: los barrios subnormales y zonas por reubicar, el nivel socioeconómico, la densidad neta, la organización comunitaria, materiales y puesto de socorro, el nivel de accesibilidad, las zonas educativas y la ubicación de las estaciones de gasolina y gas. A cada uno de los factores se le asignó un valor o un puntaje de acuerdo con el conocimiento que se tenía de la zona y se construyeron los cuadros respectivos para ingresar los datos ligados a los factores naturales y a los factores socioeconómicos. El análisis de componentes principales (ACP), puso en evidencia las principales variables indicadoras de la vulnerabilidad para cada uno de los factores. En los factores

¹² Se debe puntualizar que en el estudio de Chardon (2002), "Enfoque geográfico de la vulnerabilidad en zonas urbanas expuestas a amenazas naturales" se trabajó como ejemplo de la zona andina a la ciudad de Manizales, que ha tenido dos registros importantes de sismos en 1979 y 1999.

naturales: las experiencias pasadas, la pendiente, los procesos erosivos y los rellenos y en el campo socioeconómico: el grado de subnormalidad, el nivel socioeconómico, la densidad neta, la organización comunitaria, la organización funcional y el nivel de accesibilidad.

5.1.5. Estudios y gestión de riesgos. La integración de una visión social en el estudio de los desastres, busca que no se encubran las verdaderas causas que los originan, con enfoques inmediatistas de emergencia, sino extraer su verdadera esencia que se encuentra en los procesos de construcción de condiciones de riesgo, la verdad concreta y no aparente de los desastres (Mansilla, 2000). El establecimiento de dichas condiciones, hace necesario tener suficiente claridad en el sentido y aplicación de cada uno de los términos relacionados.

En este sentido, las conceptualizaciones de amenaza, vulnerabilidad y riesgo desarrolladas por investigadores en el orden mundial¹³, como se vió, se han aproximado al establecimiento de límites conceptuales, metodológicos y operativos en su uso. Cardona (2001), plantea elementos diferenciadores entre los tres términos así: la amenaza es un factor de riesgo externo de un sistema o de un sujeto expuesto, referido a la probabilidad de ocurrencia de un suceso con una intensidad y en un espacio específico y durante un periodo de tiempo determinado, mientras que la vulnerabilidad es considerada como un factor de riesgo interno del sistema o del sujeto, referido a la factibilidad que éste sea afectado por el fenómeno que caracteriza la amenaza. El riesgo corresponde al potencial de pérdidas que pueden ocurrirle al sujeto o sistema expuesto y se expresa en forma matemática como la probabilidad de exceder un nivel

¹³ Una amplia documentación, adicional a la presentada previamente en el documento, puede encontrarse en los archivos de la Red Latinoamericana de Estudios Sociales en Prevención de Desastres – LA RED. Especialmente en los artículos y libros de Allan Lavell y Omar Darío Cardona.

de consecuencias económicas, sociales o ambientales en un cierto sitio y durante un cierto periodo de tiempo.

Otro aspecto esencial para la diferenciación entre amenaza y vulnerabilidad en los estudios sobre el riesgo, es la convolución que se da entre ambos (Cardona, 2001)¹⁴: “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.

Esta convolución entre amenaza y vulnerabilidad, ha conducido a establecer expresiones que representen las relaciones entre las variables, a partir de las cuales se han propuesto algunas formulaciones que soportan el estudio del riesgo.

Velásquez y Rosales (1.999)¹⁵, en su propuesta de ecuación general de los desastres, establecen que las pérdidas ocurridas están en función directamente proporcional a la conjugación de las condiciones de

¹⁴ Planteamientos realizados para la International Work –Conference on Vulnerability in Disaster Theory and Practice en Wageningen, Holanda en el 2001, presentadas en el artículo denominado : “*La necesidad de repensar de manera holística los conceptos de vulnerabilidad y riesgo*”

vulnerabilidad y de los factores detonantes (amenazas) y tienen una relación inversamente proporcional con las medidas de mitigación que se hayan realizado. La ecuación desarrollada es la siguiente:

$$\text{Pérdidas ocurridas} = (\text{Condiciones de vulnerabilidad})(\text{Factores detonantes}) / (\text{Medidas de mitigación realizadas})$$

Otra expresión que permite relacionar las características de la amenaza y de la vulnerabilidad en la configuración del riesgo es la presentada por Cardona (1985):

$$Rie = f(Ai, Ve)$$

Donde Ai es la amenaza conocida, en términos de la probabilidad de que se presente un evento con una intensidad mayor o igual a i durante un tiempo de exposición t , y Ve como la vulnerabilidad o predisposición intrínseca de un elemento expuesto e de ser afectado ante un evento con intensidad i . En esta formulación, es evidente la relación entre amenaza y riesgo y su relación directamente proporcional con el establecimiento del riesgo.

Peduzzi (2000), conceptualiza el riesgo como la medida de las pérdidas esperadas debidas a un evento peligroso de una magnitud particular y que ocurre en un área dada y en un período de tiempo específico¹⁵ y presenta una formulación general para la estimación del riesgo de acuerdo con la siguiente ecuación:

¹⁵ Ecuación General de los desastres presentada por Andrés Velásquez y Cristina Rosales en la documentación presentada del proyecto DesInventar de la Red Latinoamericana de Estudios Sociales en Prevención de Desastres.

¹⁶ Utiliza en esta conceptualización referencias de Tobin y Burrell (1997), *Natural Hazards: explanation and integration*, Guilford press, London.

$$\text{Riesgo} = \text{Frecuencia} * \text{Población} * \text{Vulnerabilidad}$$

Se relaciona la frecuencia, como el número esperado o el promedio de eventos por período de tiempo; población como el número de población expuesta y vulnerabilidad como el porcentaje de pérdidas de población esperada debido al contexto social, político y económico.

Así mismo, el citado autor plantea el riesgo total para sistemas determinados cuyas características geológicas y climatológicas son complejas, como la suma de las medidas de riesgo a cada una de las diferentes amenazas presentes: deslizamientos, sismos, volcanes, etc.:

$$\text{Riesgo Total} = \text{Riesgo por Vulcanismo} + \text{Riesgo por Deslizamiento} + \dots + \text{Riesgo por } N$$

La evaluación del riesgo puede aproximarse a la siguientes fórmula:

$$\text{Riesgo} = \sum (PobEXP * A1 * VA1 + PobEXP * A2 * VA2 + \dots + PobEXP * An * VAn)$$

Donde *PobEXP* es la población expuesta a la amenaza, *A1...An* es el tipo de amenaza y *VA1...VAn* es la vulnerabilidad al tipo de amenaza. Estas formulaciones enfatizan en la necesidad de buscar estrategias para la reducción de la vulnerabilidad o hacerla tender a cero, de manera que el riesgo pueda proporcionalmente disminuir.

El trabajo presentado por Ben Wisner (2000), del Programa de Estudios Ambientales del Oberlin College (USA), hace una formulación para la comprensión del riesgo compuesta de amenazas físicas (H), vulnerabilidad (V) y acciones de mitigación (M):

$$R = (H * V) - M$$

El papel de las medidas de mitigación (M) en la formulación anterior es el de agente reductor del riesgo.

A partir de las relaciones de variables en el riesgo, la consideración de una teoría holística del riesgo, requiere de una revisión a los conceptos y metodologías que se han establecido para sistemas de manejo de desastres y de las actividades en ellos involucradas.

Inicialmente, según los planteamientos de Freeman y Martin (2001), un sistema amplio de manejo de desastres debe contar con los siguientes elementos: identificación de riesgos, reducción de riesgos, transferencia de riesgo, preparación, respuesta a emergencias, rehabilitación y reconstrucción. Una breve descripción de cada uno de estos elementos según los autores es la siguiente:

- La identificación del riesgo integra la evaluación de amenazas, los estudios de vulnerabilidad y el análisis de riesgo.¹⁷
- La mitigación se refiere a políticas y actividades que disminuyen la vulnerabilidad.
- La transferencia de riesgos se entiende como un compromiso que adquieren los gobiernos, para que una porción del riesgo sea transferida a un tercero, generalmente una compañía de seguros.
- La preparación hace referencia a la elaboración de respuestas a emergencias y la capacidad de manejo, previas a un desastre que faciliten una respuesta más efectiva en caso de que se de. Dentro de las acciones contempladas en la preparación se tienen programas de

¹⁷ Plantean Freeman y Martin (2001) que la evaluación de amenazas identifica la posible ubicación y severidad de los fenómenos naturales y la probabilidad de que ocurran en un periodo y lugar específicos. Los estudios de vulnerabilidad calculan las consecuencias físicas, sociales y económicas de los fenómenos de cierta severidad. Finalmente el análisis de riesgo combina la información de la evaluación de la amenaza y los estudios de vulnerabilidad para producir un cálculo de las pérdidas que se puedan presentar como resultado de un evento peligroso.

capacitación para personal de respuesta, ejercicios y repasos de planes de emergencia, información a la ciudadanía mediante programas educativos, detección de riesgos y sistemas de advertencia, identificación de rutas de evacuación, mantenimiento de materiales de emergencia y sistemas de comunicación.

- Respuesta a emergencias entendida como las acciones que se realizan antes – durante y después de un desastre. Se contemplan acciones como evacuación de poblaciones amenazadas, atención a damnificados, atención médica de emergencia, atención de riesgos secundarios como incendios, operaciones de búsqueda y rescate, clausura de puentes y vías, y provisión de agua.
- Reconstrucción y rehabilitación en términos de programas y planes de ayuda a largo plazo con el objetivo de facilitar a las comunidades afectadas restituir en lo posible las condiciones previas al desastre.

Gran parte de estas actividades se encuentran también en el denominado ciclo de los desastres¹⁸, planteado como una secuencia cíclica de etapas relacionadas entre sí, que se establecen antes, durante y después de la ocurrencia del fenómeno natural o antrópico y se denominan: prevención, mitigación, preparación, alerta, respuesta, rehabilitación, reconstrucción.

Estas etapas se estructuran a partir de diferentes actividades y estrategias que se orientan hacia la reducción de los riesgos existentes sobre la población, bienes, servicios o el ambiente. Al planeamiento y ejecución de estas actividades y medidas se les conoce como Gestión de Riesgos (Cardona y Hurtado, 2001).

A parte de las actividades o fases en la gestión de riesgos planteada, existen cuestiones concretas en el desarrollo de este tema que tienen

¹⁸ Etapas planteadas inicialmente por la Universidad de Wisconsin según los planteamientos de Cardona y Hurtado (2001).

que ver con: aumentar la conciencia pública sobre las amenazas naturales y antrópicas, promover el compromiso de las autoridades públicas, estimular las alianzas multidisciplinarias y multisectoriales y mejorar los conocimientos científicos de las causas de los desastres naturales y los efectos conexos de los desastres tecnológicos y ambientales sobre las sociedades (Naciones Unidas, 2001). Es necesario, por tanto, avanzar en sistemas de gestión que evalúen la vulnerabilidad, realicen predicciones de los efectos y formulen medidas adecuadas de intervención.

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).

5.1.6. Enfoques en el estudio de los desastres. Los desastres no son los fenómenos naturales o antrópicos que se presentan, son los efectos que se producen en la sociedad (Lavell, 1998), la configuración de un desastre requiere de una sociedad que, en su estado de desarrollo, presente deficiencias o susceptibilidades para que ante la ocurrencia de un fenómeno, como sismo o deslizamiento, ponga en peligro su estabilidad. Los estudios comparativos de desastres (Crowards, 1.999)¹⁹ plantean elementos de análisis como el número de personas afectadas, las muertes ocasionadas, el costo de los daños y los impactos macroeconómicos, indicando que las características físicas del fenómeno en cuanto a su intensidad, magnitud o duración deben estar expresadas

¹⁹ Documento presentado por Tom Crowards del Caribbean Development Bank, señalando los estudios comparativos de susceptibilidad a desastres naturales en Caribe.

en términos del impacto y de las pérdidas ocasionadas a los diferentes recursos de la sociedad.

El análisis que se ha desarrollado en la concepción de los desastres, por parte de académicos, instituciones gubernamentales y organizaciones de índole nacional e internacional, puede resumirse en los enfoques dados por las ciencias naturales, las ciencias aplicadas y las ciencias sociales, que aunque han permitido avances significativos para el estudio de los desastres, requieren que se avance en la construcción de una teoría holística del riesgo, que trascienda las visiones parciales y fragmentadas dadas en cada uno de los enfoques (Cardona, 2001).

Según Cardona (2001), las ciencias naturales han conducido a una lectura reduccionista de los desastres que se conciben como sinónimo de la amenaza, señalando el riesgo como la probabilidad de que ocurra un fenómeno natural. Las ciencias aplicadas han enfocado su interés hacia los efectos del suceso sobre el sistema o los elementos expuestos, sin considerar el suceso mismo, señalando el uso del concepto de vulnerabilidad, emergente en el enfoque dado por estas ciencias, para explicar el daño físico y otros efectos indirectos sobre el sistema. Las ciencias sociales han abordado la necesidad de considerar la vulnerabilidad como el resultado de procesos sociales, económicos y políticos, ignorando en algunos casos la amenaza y los fenómenos detonantes, hecho que dificulta la estimación del riesgo con técnicas consistentes por la argumentación subjetiva que de éste se ha dado²⁰.

Las concepciones según las cuales la solución al problema del riesgo y de los desastres están orientadas desde las ciencias básicas y naturales,

²⁰ Omar Darío Cardona en su Tesis Doctoral para la Universidad de Catalunya presenta un análisis detallado de cada uno de los enfoques, realizando una crítica con argumentos contundentes frente a la parcialidad y reduccionismo de cada uno de ellos.

o desde una perspectiva tecnológica – ingenieril, han llevado a calificar los desastres como inmanejables e imprevistos (Lavell, 2000 a), y determinaron la visión fisicalista – tecnocrática²¹ predominante en la década de los 70 e inicio de los años 80, que señaló que el camino a seguir era la predicción de eventos extremos que permitieran tomar las medidas pertinentes para proteger a la sociedad contra su impacto. Bajo esta visión, difundida en la década de los 80, se fortaleció, en perspectiva de la predicción, la investigación en centros sismológicos, vulcanológicos y de estudios climatológicos, dejando la integración de las ciencias sociales, exclusivamente referida a la capacitación de los grupos de ayuda humanitaria y a la elaboración de planes de emergencia, alerta y evacuación.

Durante la década de los 80, la participación de las ciencias sociales, a excepción de unos cuantos trabajos, fue muy incipiente; sin embargo, éstos se convirtieron en el punto de partida para una imponente alternativa analítica sobre los desastres en América Latina (Lavell, 2000 a). Trabajos como los de Romero y Maskrey (1983), Caputo *et al.*, (1985), Wilches (1989), citados por Lavell (2000 a), relacionan elementos de la sociedad en la configuración de los desastres y su participación como condicionantes de la vulnerabilidad y el riesgo.

En la década de los 90, se da un cambio profundo en la concepción de los desastres. Trascendiendo las visiones fisicalistas y tecnocráticas, se empieza a considerar de manera decidida una visión que permitía, no sólo darle un sentido social al significado e impacto de un desastre, sino que establecía que sus causas eran también de construcción social (Lavell,

Es importante señalar que la denominación en ciencias naturales, aplicadas y sociales presentada en el documento obedece a lo planteado por el autor citado.

²¹ Planteamiento de Allan Lavell (2000), para señalar el fisicalismo introducido por Kenneth Hewitt y un grupo de trabajo de la Universidad de Bradford en Inglaterra a mediados de la década de los 70, y que indicaba que la solución a los problemas del riesgo y de los

2000 a). En este período la amenaza deja de ser un concepto físico, para pasar a ser una categoría social y el riesgo ya no se refiere a un problema financiero o de estructuras físicas, sino a un concepto complejo, que es el producto de una relación dialéctica entre el mundo físico y el mundo social. Así mismo, la vulnerabilidad deja de ser considerada de manera ingenieril exclusivamente, en términos de debilidad de las estructuras físicas, y entra a ser planteada como un conjunto de condiciones y condicionantes sociales que predispone a la sociedad a sufrir pérdidas y daños.

Para la década de los 90, los desastres se estudian como procesos de construcción de vulnerabilidad a partir de los cambios sociales y económicos. Se convierte la vulnerabilidad en el eje central e integrador del debate y análisis del riesgo y los desastres, dando un amplio sentido a la dimensión social y física de éstos.

Bajo estos planteamientos, en el estudio de los desastres se relacionan tres elementos fundamentales: el fenómeno impactante, la sociedad impactada y los impactos referidos como tal a las pérdidas ocasionadas tanto sociales como económicas (amenaza, vulnerabilidad y riesgo). En un desastre, por tanto, se sugiere una relación de sujetos activos, sujetos pasivos e implicaciones que se dan en las sociedades humanas que trastocan el funcionamiento de un sistema en su totalidad (Cardona, 2001). Aclarando que la sociedad humana como sujeto pasivo, no sugiere un papel inmóvil o como simple espectador de la actividad terrestre, sino más bien evidenciando que los efectos de la dinámica terrestre, se acentúan por fuerzas y dinámicas sociales y ambientales, como la rápida urbanización, los asentamientos humanos no planificados, la infraestructura ingenieril deficiente e inadecuada, la pobreza y las

desastres era la tecnología y la ingeniería o utilizar como única el solución el pesimismo y la ayuda humanitaria.

inadecuadas prácticas ambientales como la deforestación y degradación del suelo (BID, 1.999)²², procesos contruidos socialmente en la evolución de los asentamientos humanos.

Desde una concepción holística, sugerida por la dialéctica de las ciencias sociales, naturales y la ingeniería, una definición formal de desastre planteada por Cardona (2001) está referida a: “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”²³. 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, contruidos en la sociedad, con los procesos que en ella se dan.

Particularmente el enfoque integral en el estudio de los desastres, considera la necesidad de una sinergia entre las ciencias naturales, aplicadas y sociales, y especialmente se busca que desde esta mirada, los elementos que desencadenan la ocurrencia de desastres, se coordinen desde una gestión de riesgos con enfoque sistémico y holístico.

5.1.7. Desastres y desarrollo. La ocurrencia de desastres en el mundo ocasionados por fenómenos naturales, tuvo en la última década del siglo

²² Cita referida en el documento de James Smyle (2,000) Disaster Mitigation and Vulnerability Reduction: Perspectives On The Prospects For Vetiver Grass Technology (VGT). , al plantear puntos de vista de diferentes expertos por el desastre ocasionado por el Huracan Mitch, en Centroamérica.

²³ La definición presentada por el autor relaciona el termino 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.

XX un preocupante crecimiento, según Koffi Annan²⁴ (1999) Secretario General de las Naciones Unidas, en la década de los años 90 se presentaron tres veces más desastres importantes en el mundo que en la década de los años 60. Este hecho es significativo, especialmente para países como los latinoamericanos en los que entre 1960 y 1990 cerca de 180.000 personas perdieron la vida, 100 millones de personas fueron afectadas y se presentaron daños en las propiedades valuadas en cerca de 54 billones de dólares, como consecuencia de fenómenos catastróficos generados por sismos, deslizamientos, huracanes, avalanchas y erupciones volcánicas (OEA/DRDA 1990)²⁵. El incremento que se ha venido dando, década tras década, ha generado efectos directos e indirectos sobre el desarrollo social y económico de los países, no sólo por la incidencia directa sobre las actividades humanas, sino por los efectos indirectos y colaterales que se dan en las regiones cercanas a las zonas de desastres.

La Red de Estudios Sociales en Prevención de Desastres en América Latina – LA RED, desarrolló un inventario de desastres en 9 países²⁶ de América Latina para el período comprendido entre 1988 y 1997, registrando eventos que en todas las escalas espaciales y temporales pudieron haber tenido efectos adversos sobre comunidades humanas en dichos países. En síntesis, se tienen registros de 17.587 eventos considerados como desastres, en los que se reportan 15.909 muertes, 673.639 heridos, 2.987.744 damnificados, 23.313.454 afectados, 137.230

²⁴ A la vez los costos de los daños causados han alcanzado los 500 mil millones de dólares. Declaración retomada en el Documento CONPES 3146. 2001. Pg3.

²⁵ La cifra global según el reporte del proyecto de amenazas naturales del Departamento de Desarrollo Regional y del Ambiente (OEA) se desglosa en costos anuales en promedio: 6000 vidas perdidas, efectos adversos sobre 3 millones de personas y alrededor de 1.8 billones de dólares en daños físicos, lo que representa que para la década de los 60 cerca de 10 millones de personas fueron afectadas de alguna manera, para la década de los 70 fue seis veces más grande y para los 80, tres veces mayor.

²⁶ Proyecto Desinventar para inventariar la ocurrencia de desastres entre 1988 y 1997, mediante la recopilación de información en Argentina, Perú, Ecuador, Colombia, Panamá, Costa Rica, El Salvador, Guatemala y México.

viviendas destruidas, 321.843 viviendas afectadas, proyección de 60.000 millones de dólares en pérdidas económicas.

La causa de las extensas pérdidas en vidas y los grandes daños, generalmente se vincula con el crecimiento de la población y de los bienes que son vulnerables ante los fenómenos, todo ésto debido a múltiples factores como la concentración más exhaustiva de la población en centros urbanos, la pobreza que obliga a la gente a vivir en lugares inestables y en viviendas inadecuadas, la planificación inadecuada de la utilización del suelo, el diseño deficiente de construcciones de infraestructura, la falta de arreglos institucionales para la reducción de riesgos, así como un ambiente cada vez más degradado (Naciones Unidas, 2001).

En esta medida, los desastres han sido considerados como “problemas no resueltos del desarrollo”²⁷, como puede establecerse a partir de las consideraciones de los impactos de sucesos no planeados previamente sobre el desarrollo social, por la necesaria reorientación de políticas en educación, salud y bienestar posterior al evento; sobre el desarrollo económico por las implicaciones en cada uno de los sectores de la economía en bienes y servicios, y las repercusiones en los indicadores macroeconómicos de los países y las regiones. Desastres como el presentado por el sismo del 25 de enero de 1999 en Armenia (Colombia), generó efectos macroeconómicos representados en: impactos sobre el crecimiento económico, implicaciones en las finanzas públicas, la inflación y el empleo, que alteraron el desarrollo de actividades de acuerdo con las proyecciones económicas que se tenían (Montenegro, 1.999); cerca de 1.700 millones de dólares que pudieron haber sido destinados en otras actividades se vieron comprometidos en procesos de reconstrucción.

²⁷ Planteamiento hecho por la Cruz Roja sueca en 1984.

Desde los planteamientos presentados, puede considerarse que los estudios para la evaluación de la vulnerabilidad, no sólo tienen implícito la formulación de medidas de mitigación de las condiciones de debilidad, sino que en la relación con la amenaza y por tanto con la configuración del riesgo, deben ser considerados como factores fundamentales en las políticas de desarrollo de los países y de sus unidades territoriales. Es obvia la relación de la ocurrencia de desastres con las implicaciones a corto, mediano y largo plazo con el desarrollo en términos sociales y económicos, así mismo es evidente que la evaluación de la vulnerabilidad es un factor esencial en para el fortalecimiento de sistemas nacionales en la atención y prevención de desastres.

5.2. DINÁMICA DE SISTEMAS Y MODELACIÓN

Para una adecuada fundamentación de un modelo de sistema urbano, se presenta a continuación una revisión conceptual sobre los sistemas y sobre los espacios urbanos, con el fin de poder obtener una aproximación conceptual a los sistemas urbanos, en perspectiva de estudiar y establecer criterios fundamentales para evaluar la vulnerabilidad (desde una visión integral y holística) frente a fenómenos naturales. Esencialmente esta revisión se plantea desde la dinámica de sistemas y su modelación.

5.2.1. La teoría general de sistemas. Los criterios claves para establecer lo que Bertalanffy (1950) propuso como Teoría General de Sistemas (TGS), se dieron a partir de los estudios de los sistemas vivos como organismos en términos de conectividad, relaciones y contexto (Capra, 1999). Estableciendo elementos de correspondencia no sólo para organismos, sino para cosas inanimadas, procesos mentales y sociales, estos planteamientos de una TGS como un campo lógico - matemático, que tiene como objeto la formulación y derivación de los principios que se conservan en los sistemas según lo propuesto por Bertalanffy (1950),

siguen una conformidad estructural u homología lógica de leyes en diferentes campos de aplicación. La TGS es planteada como un medio importante para controlar y potenciar la transferencia de principios entre campos de la ciencia (Bertalanffy, 1968).

Esta visión, que pretendió establecer las bases conceptuales para la unificación de diferentes disciplinas científicas, tiene raíces muy profundas en los planteamientos de la cibernética²⁸, hechos por un grupo de matemáticos, neurocientíficos e ingenieros entre los que se cuentan Wiener, Von Newman, Shanon y McCulloch, que han dado un marco conceptual sólido, junto con los planteamientos de la TGS, para la comprensión de los procesos e interacciones entre organismos vivos y permitió avanzar en los criterios de comunicación y de dinámica para los sistemas sociales (Capra, 1999).

5.2.1.1. Los sistemas. Un sistema “es un conjunto de objetos, junto con las relaciones entre ellos y entre sus atributos (Hall y Fagen, 1956)”²⁹. Para los autores, los objetos son las partes o componentes del sistema, los atributos son las propiedades de los objetos y las relaciones son los vínculos que enlazan objetos y atributos en el proceso del sistema³⁰.

La materialización de las ideas de Bertalanffy se representa en la amplia utilización del concepto de sistema en casi todos los campos de la ciencia, para la solución de los más dispares problemas (Klir, 1980).

²⁸ Entendida como la ciencia del control y la comunicación en el animal y en la máquina, describiendo patrones de comunicación en redes y bucles cerrados, permitieron a los cibernéticos avanzar en la conceptualización de retroalimentación, autorregulación y autoorganización, elementos cruciales para una descripción científica completa de la vida.

²⁹ Hall y Fagen Definición de Sistemas. General Systems: Yearbook of the Society of the Advancement of General System Theory, vol. 1, pp. 18 –28. Referenciada por G. F. Chadwick en el libro “Una Visión Sistémica del Planeamiento”. Capítulo 3, pg41.

³⁰ una definición mas elaborada por Stanford Optner (1965), citada por G. F. Chadwick para la ampliar el concepto presentado por Hall y Fagen, quienes plantean que las relaciones son “aquello” que enlaza el sistema.

Desde una revisión a las diferentes ramas de la ciencia que utilizan el concepto de sistema, Klir plantea cinco rasgos fundamentales para un concepto más consistente a todas sus posibles aplicaciones:

- Conjunto de cantidades externas consideradas en el tiempo, junto con el nivel de resolución espacio- tiempo.
- Registro de las variaciones en el tiempo y de la actividad dada.
- Un comportamiento permanente. Referido a las propiedades que producen el comportamiento, denominadas como organización del sistema
- Estructura del Universo
- Estructura de estados- transiciones referido al conjunto de todos los estados del sistema tanto el actual como a los que se refieren a actividades particulares del sistema.

A partir de cualquiera de estos rasgos puede definirse un sistema, o en la intersección de varios de ellos, sin embargo una definición única de sistema, se establece a partir de la intersección de cada uno de los rasgos presentados.

La clasificación de los sistemas puede realizarse a partir de la naturaleza de los objetos que la componen, en físicos y abstractos. La denominación de sistema físico se refiere a que sus cantidades son medibles, mientras que en los abstractos no (Klir, 1980).

Desde el punto de vista de la interacción entre los sistemas y su ambiente, éstos se pueden clasificar en abiertos y cerrados, estableciendo elementos diferenciadores de acuerdo con el intercambio de materia y energía entre los sistemas con su entorno. Los sistemas abiertos en términos de Bertalanffy (1950), son: "...aquellos que intercambian materia y energía con el medio circundante y que exhiben

importación y exportación, constitución y degradación de sus componentes materiales”. Los sistemas de comportamiento, los sistemas biológicos y los sistemas sociales son sistemas abiertos, que son influidos en su funcionamiento por el entorno.

El estudio de los sistemas pretende aprender, diseñar, cambiar, conservar y, si es posible controlar su comportamiento. Si se entiende éste como una parte del mundo real, de elementos organizados que pueden ser experimentados, contruidos en un prototipo a escala o desarrollado en un modelo de relaciones lógicas (Ríos, Ríos y Martin, 2000).

Con la metodología sistémica, se busca entender los problemas que surgen de las interacciones al interior del sistema y no de las disfunciones de sus partes consideradas de manera aislada. Por ello, esta metodología se fundamenta desde la identificación de cada una de las partes que conforman un sistema, para hacer su análisis (análisis de la estructura) y pasar a la comprensión de su comportamiento, éste desde el conocimiento de las formas en que se integran cada una de sus partes (síntesis). La preponderancia a la síntesis es uno de los elementos que diferencia la metodología sistémica de otras metodologías, otorgando de manera equilibrada tanta importancia a la comprensión analítica de las partes, como la comprensión sintética de cómo interactúan y la forma en que ejercen cambios las unas sobre las otras, esto es, entender cómo están relacionados su estructura y su comportamiento. (Aracil, 2000)

5.2.1.2. Estructura elemental de un sistema. Los conceptos básicos utilizados en la TGS, siguiendo los planteamientos de Latorre (1996) son:

- Entorno: referido a los sistemas o fenómenos exteriores al sistema que lo afectan. El entorno y sus cambios condicionan al sistema y lo

determinan significativamente, a la vez el sistema afecta a subsistemas del entorno.

- Frontera: delimita el sistema y establece lo que pertenece y lo que no pertenece a él.
- Subsistemas, componentes, elementos y relaciones: los términos subsistemas y componentes se utilizan como sinónimos. Un elemento es una entidad física, conceptual, natural o artificial, real o abstracta y que se puede identificar y que se relaciona con otras. La agrupación de elementos conforman subsistemas para cumplir algunas funciones específicas. La noción de organización que se desprende de la agrupación de elementos, implica algún tipo de estabilidad en el tiempo susceptible de ser conocida en el sistema.

La estructura del sistema se configura a partir de la disposición relacional de los componentes representados por el orden. Las relaciones pueden ser materiales, energéticas o informáticas y éstas ligan las entradas y salidas del sistema con el entorno. Para Latorre la estructura de un sistema se compone básicamente de:

- Objetivos: son los fines últimos de los sistemas.
- Grado de definición, delimitación e integración de un sistema: está dado por el grado de definición de elementos y componentes, del entorno y por el grado de especificación de las relaciones entre elementos y componentes con el entorno. A partir del grado de definición, se pueden establecer los reales constituyentes de un sistema, su funcionalidad, la naturaleza de las funciones y los efectos de las relaciones con el entorno. La delimitación del sistema permite tener claridad sobre la pertenencia al sistema o al entorno de cada uno de los elementos y sobre la frontera del sistema. El grado de integración permite establecer y tener conocimiento de las variaciones

que se producen en el sistema por la variación de uno de sus componentes.

- Centralización y concentración: la centralización se refiere a la autonomía y al poder que puede tener uno de los componentes con respecto a los otros y la concentración se refiere a la utilización del espacio del sistema para el cumplimiento de los objetivos y a sí se realiza en un mismo espacio o si se realiza en los distintos espacios del sistema.
- Resiliencia: es la capacidad del sistema para resistir cambios producidos por el entorno.
- El principio de totalidad: el estudio de la realidad se realiza en la totalidad y no en las partes. Las características están dadas por el sistema y no por los componentes.
- Sinergia: el conocimiento y funcionamiento de un sistema se entiende por la interacción de las partes y no por el estudio de ellas de manera aislada.
- El principio de retroalimentación: plantea que la causalidad no es lineal, y la refiere como compleja y establece una causalidad circular en la que cada comportamiento tiene diferentes causas. La retroalimentación puede ser positiva que tiende a acentuar y a acrecentar un fenómeno y negativa que tiende a amortiguar el fenómeno.
- Principio de homeóstasis: referido a los mecanismos reguladores que regresan el sistema al estado inicial posterior a una perturbación de origen interna o externa. Característica propia de sistemas abiertos como los biológicos, ecológicos y sociales.
- Principio de equifinalidad: el estado actual de un sistema depende más de la interacción de los elementos que de su estado inicial. Cumple sus objetivos llegando a estados temporalmente autónomos, independiente de las condiciones iniciales.

El establecimiento de un sistema requiere de la consideración, en esencia, de la naturaleza y funcionalidad de los elementos y los componentes, de los objetivos y de los cambios que se presentan como variaciones dadas por las influencias de unos elementos con otros y de éstos con el entorno.

5.2.2. Dinámica de sistemas. Los estados de un sistema en términos del cambio generado por actividades endógenas o exógenas, llevan a plantear sistemas determinísticos y estocásticos según si las probabilidades de cambio permanecen fijas en el tiempo o si las probabilidades cambian con el paso del tiempo (Ríos *et al*, 2000). Estas características de los sistemas, permiten considerar la evolución y el cambio de las variables en el tiempo, generando nuevas relaciones que emergen entre ellas, en cuyas relaciones los procesos estocásticos y las ecuaciones diferenciales han permitido configurar el estudio de los sistemas dinámicos complejos o la dinámica de sistemas.

La dinámica de sistemas parte del desarrollo conceptual de los sistemas vistos como objetos dotados de complejidad, formados por partes coordinadas, de modo que el conjunto posea una cierta unidad que es precisamente el sistema. Un sistema puede entenderse como una unidad cuyos elementos interaccionan juntos, ya que continuamente se afectan unos a otros (causalidad), de modo que operan hacia una meta común, con una identidad que lo diferencia de lo que lo rodea, siendo capaz de mantener esa identidad en el tiempo y ante entornos cambiantes. La dinámica hace referencia al carácter cambiante de variables, producido por las interacciones que se dan entre ellas (Aracil, 2000).

Las interacciones de las variables en un sistema pueden representar diferentes formas de comportamiento en el tiempo y son una de las propiedades fundamentales de los sistemas dinámicos que, en términos

de su comportamiento complejo, obedecen a la capacidad de llevar a cabo transiciones (Nicolis y Prigogine, 1994), que representan el cambio en el tiempo de las variables interactuantes. En este sentido, los momentos de observación del sistema son hechos fundamentales, ya que representan la evolución del sistema, sus transiciones en la historia.

Estas transiciones o cambios pueden presentarse de manera continua o discontinua en función de su presentación en el tiempo y la evolución de los sistemas, igualmente puede referirse a la modificación de las leyes de transformación de los subsistemas, de la frontera del sistema, del modo de organización de los subsistemas y de los canales de comunicación entre el subsistema y el entorno (Latorre, 1996).

Como consecuencia de la consideración de los sistemas en su dinámica y complejidad de funcionamiento, se ha establecido la dinámica de sistemas como una metodología ideada para resolver problemas concretos. Inicialmente se denominó “dinámica industrial” (años 50's) desarrollada en 1956 en el Massachusetts Institute of Technology (MIT), luego en la década de los 60's tiene su implantación no sólo en ámbitos industriales, sino que incursiona en los medios profesionales bajo la aplicación precisa y exacta de los pasos y formas sugeridas en diversos trabajos por Jay W. Forrester³¹.

A mediados de los 60's, Forrester desarrolla su aplicación en los sistemas urbanos, utilizados en diferentes espacios como herramienta para la planificación urbana y regional. A finales de esta misma década, se da una de las aplicaciones más relevantes de esta metodología con el informe al club de Roma, que basado en la dinámica de sistemas, mostró

³¹ *Industrial Dynamics (1961), Principles of Systems (1968), Urban Dynamics (1969), Systems Analysis as a Tool for Urban Planning (1969), World Dynamics (1973)*. Trabajos relacionados en Comportamiento Contraintuitivo de los Sistemas Sociales, documento traducido por el grupo de dinámica de sistemas de la Universidad de Monterrey (2000)

la previsible evolución de magnitudes agregadas a nivel mundial en lo que se refiere a población, contaminación y recursos (Meadows *et al.*, 1972).

Para Rodríguez *et al.*, (2000), la dinámica de sistemas más que una metodología es una disciplina que combina teoría, métodos y filosofía para la solución de problemas, que utiliza el análisis y la síntesis desde una perspectiva de realimentación y de causalidad mutua o recursiva que permita el entendimiento de los sistemas complejos. De esta forma, provee la base estructural para comprender un fenómeno social, económico, político, ingenieril, etc. permitiendo visualizar los cambios que se producen con la variación en el tiempo.

5.2.3. Modelación de sistemas dinámicos complejos. Un modelo es la representación de un sistema, que puede hacerse según lenguajes de varias clases (Chadwick, 1973). Siguiendo al autor, un modelo constituye una forma de sistema conceptual, que reproduce los procesos del sistema en el mundo real. Se busca que la correspondencia entre sistema conceptual y sistema real, permita aspirar a entender los fenómenos de proceso y cambio, anticipándose a éstos para finalmente evaluarlos. Los modelos como representación de un sistema, pueden ser icónicos cuando tratan de parecerse de manera visual o pictórica a lo que representan a escala o en perspectiva; pueden ser analógicos cuando utilizan un conjunto de propiedades para representar algún otro conjunto y los modelos simbólicos que utilizan el lenguaje matemático, fórmulas y ecuaciones en la designación de las propiedades de los sistemas.

Los modelos se construyen con el fin de contribuir a la solución de un problema concreto, ésto desde tres formas específicas: hacer predicciones, analizar tendencias de evolución para determinadas magnitudes que permita hacer previsiones más que predicciones, y

emplearlos como instrumentos para analizar los distintos modos de comportamiento que puede tener un sistema (Aracil, 2000).

En la construcción de modelos existen factores fundamentales como el nivel de agregación del fenómeno que se toma como base, en términos a establecer si la concentración es sobre el comportamiento sistémico amplio o sobre el comportamiento de los componentes del sistema, (Chadwick, 1973), esto es, la comprensión del comportamiento del sistema como determinante de los componentes, o de éstos como determinantes del sistema. Aspecto interesante, por tratarse de la manera como las diferentes disciplinas construyen los modelos del mundo real para su estudio³².

La modelación de un sistema se hace con fines específicos según el modelador, estos objetivos pueden sintetizarse de la siguiente manera, siguiendo los planteamientos sobre análisis sistémico, simulación y diseño presentados por Sarabia (1995) y esquematizados en la Figura 1:

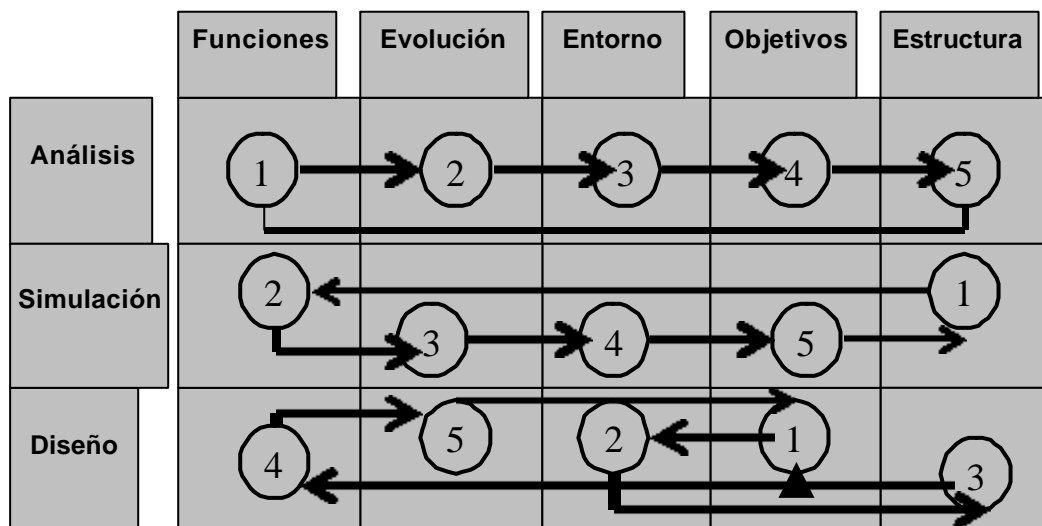
- Analizar, desde una perspectiva sistémica se refiere al estudio de las funciones desarrolladas (1) y la evolución seguida por el objeto (2), observadas en un entorno (3), de manera que, interpretándolas a la luz de unos fines del objeto (4), conocidos o supuestos, sea posible inferir una estructura (5) compatible con lo observado. El análisis sistémico descompone el sistema originalmente percibido en sucesivos y cada vez más simples subsistemas, hasta un nivel en que puedan ser perfectamente identificados en su actividad, estructura, función, evolución y finalidad. Se inicia el proceso de síntesis de los

³² Plantea Chadwick, que el interés de los geógrafos, ecólogos y demógrafos se centra en el macroanálisis (comportamiento de las masas en vez de los individuos), mientras que el interés, por ejemplo de economistas, está en el microanálisis (el comportamiento del grupo más amplio se supone como agregación del de los individuos)

subsistemas básicos, que son integrados a otros subsistemas mas complejos hasta llegar a reconstruir el sistema original.

- En la simulación, se parte de una estructura (1), obtenida previamente por análisis o diseño, se hace funcionar (2) esta estructura y se observa su evolución (3) en un entorno dado (4) para comparar el resultado de este proceso con unos fines u objetivos (5) prefijados. Si el resultado de las comparaciones de acuerdo con algún criterio (económico, de ejecución, de calidad) no es satisfactorio se procede a rediseñar o a reanalizar la estructura y el proceso comienza de nuevo.
- En el diseño de un modelo, el punto de partida es la identificación de los proyectos y objetivos (1) del objeto que han de alcanzarse, en un entorno o condiciones prefijados (2), para ello se propone o diseña una estructura (3), que se hace funcionar (4) y evolucionar (5) para comparar el resultado final de la evolución sufrida con los objetivos propuestos. La medida de esta comparación se conoce como fiabilidad del diseño, en caso de no ser satisfactoria se modifica la estructura y se procede nuevamente con los pasos (4) y (5).

Figura 1. Procesos de Análisis, Simulación y Diseño de Sistemas.



(Tomado de Sarabia, 1995, p 115)

La dinámica de sistemas, como herramienta se concretó en la utilización de ecuaciones y sistemas de ecuaciones diferenciales, que representaban con gran eficacia problemas en sistemas estudiados por la física y otras ciencias como la economía, pero han empezado a mostrar insuficiencia ante dos circunstancias que afectan el estudio de los sistemas: la incertidumbre y la imprecisión (Sarabia, 1995).

En el caso de la incertidumbre, la representación de sistemas cerrados parte del hecho de la certeza en la configuración de funciones con variables de entrada para llegar a las variables de salida, pero las aplicaciones de estas funciones en sistemas abiertos, en los que la ciencia avanza en su comprensión y estudio, son insuficientes. Esta situación se ha solucionado mediante los avances en el cálculo de probabilidades y la estadística, la cibernética (teoría de la regulación automática), la robótica, las teorías de la información, la topología de redes, la algoritmia, las matemáticas discretas y la investigación de operaciones. Así mismo la utilización de software especializado, ha permitido y fortalecido la representación de sistemas con alto grado de complejidad, mediante el uso de técnicas de modelización con la utilidad que ha representado el avance en los lenguajes de programación brindado por la informática.

El caso de la imprecisión se da cuando los datos proporcionados o los conceptos considerados no están definidos con la exactitud de la lógica formal (Sarabia, 1995) y llevan a imposibilidades para representar o formalizar ecuaciones o sistemas de funciones matemáticas para el sistema, obstaculizando el proceso de simulación. Esencialmente, en este caso la información se obtiene a partir de las percepciones y las comunicaciones, situaciones que es posible encontrar en el estudio de algunos sistemas complejos como los sistemas sociales, en los que la

información en muchos casos es ambigua y se presta a diferentes interpretaciones.

En síntesis los modelos permiten: facilitar la comprensión de una situación compleja, identificar los elementos más sensibles de un sistema, analizar múltiples alternativas y proponer con claridad las acciones a tomar.

5.2.4. Técnicas de modelación de sistemas dinámicos complejos.

Para la modelación de sistemas dinámicos complejos se cuenta con herramientas informáticas; las más empleadas son: Professional Dynamo, Stella y I-thikk; PowerSim; VenSim y Mosaikk-SimTek, Matlab – Simulink. Amplia información sobre sus características y usos, está referenciada en los web sites de sus productores.

De manera específica, el Simulink³³ es una potente herramienta de simulación gráfica para hacer modelos de sistemas dinámicos y desarrollar estrategias de control. Con soporte para sistemas lineales, no lineales, de tiempo continuo, de tiempo discreto, de ejecución condicional e híbridos, Simulink permite crear modelos y simulaciones de prácticamente cualquier tipo de sistema dinámico del mundo real.

Por otro lado, los procesos matemáticos que soportan la modelación de sistemas dinámicos complejos deben enfrentar los aspectos de incertidumbre que dichos sistemas tienen, como lo plantea Sarabia (1995). Hecho que ha conducido al desarrollo de nuevas herramientas de razonamiento aproximado, que dan mejor respuesta a las características de complejidad de los sistemas dinámicos como la lógica difusa, la inteligencia artificial, las redes neuronales y los sistemas expertos.

³³ www.mathworks.es

De manera especial debe ser analizada la lógica difusa como herramienta para la simulación de sistemas dinámicos complejo particularmente por “su poder y habilidad para derivar conclusiones y generar respuestas basada en información vaga, ambigua, incompleta e imprecisa³⁴. Un sistema difuso tiene una capacidad de razonamiento muy similar a la humana y puede ser representado en forma natural y simple.

Una publicación presentada en 1965 por Lotfi Zadeh, profesor de la Universidad de California en Berkley, formalmente definió la teoría de conjuntos difusos a partir de la cual derivó la lógica difusa. La teoría extendió la clasificación de la lógica del falso o verdadero, con una lógica que permite un grado parcial de verdad. Tradicionalmente las premisas lógicas tienen sólo dos extremos: o son completamente ciertas o son totalmente falsas. En el mundo de la lógica difusa, las premisas lógicas cambian en un rango a grado de verdad de 0 a 100 por ciento, esto permite que la premisa sea parcialmente cierta y también parcialmente falsa. La lógica difusa permite tomar en cuenta las incertidumbres de los datos y operar con ellos mediante los conjuntos y los números difusos (Bignoli, 1997).

5.2.5. Teoría de los conjuntos difusos y sistemas de lógica difusa

5.2.5.1. Elementos de lógica difusa. En la lógica difusa, los conjuntos expresan la posibilidad de que uno de sus elementos pertenezcan al mismo con diferentes grados de pertenencia, con valores dados entre 0 y 1, a diferencia de los conjuntos en las matemáticas tradicionales en las que el elemento pertenece o no pertenece.

En la teoría de los conjuntos difusos, se considera que un elemento es parcialmente miembro de un determinado conjunto. Si se tiene una

³⁴ http://inversionista.infosel.com.mx/neural/s_fuzzy.htm.

situación determinada como un conjunto universo, y se considera, igualmente diferentes elementos de análisis dentro del universo, que son conjuntos difusos dentro del universo. El análisis y el estudio de los elementos de la lógica difusa se ilustran mediante el siguiente ejemplo tomado de http://inversionista.infosel.com.mx/neural/s_fuzzy.htm:

El ejemplo está referido al diseño de un controlador de temperatura para una habitación. Para controlar la temperatura en una habitación puede utilizarse un ventilador movido por un motor eléctrico. El primer paso sería establecer cuatro conjuntos para definir los rangos en los que podría caer la temperatura: frío, fresco, tibio y caliente. En segundo lugar puede especificarse la salida deseada (corriente eléctrica por el motor) según cada uno de los rangos en los que se ha establecido la temperatura (Ver Tabla 1):

Tabla 1. Ejemplo de Conjuntos para rangos en el establecimiento de un SLD

Temperatura	Velocidad	Corriente del Motor
Frío	Apagado	0
Fresco	Baja	15
Tibio	Mediana	50
Caliente	Rápido	100

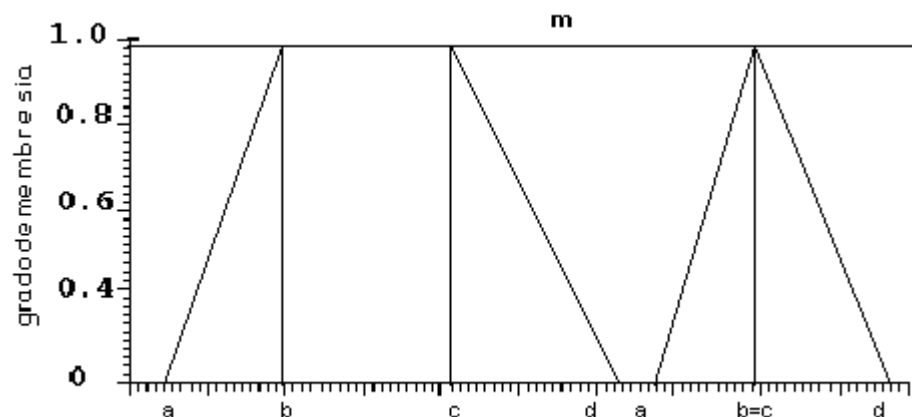
De una consulta a expertos puede esperarse que se establezca que, de 0 a 10 grados es frío, de 8 a 20 grados es fresco, de 17 a 25 grados tibio y de 22 a 38 grados es caliente. En todos estos conjuntos existe un traslape, esto es, para 19 grados, la temperatura pertenece a fresco como a tibio, aunque al último en mayor grado. El traslape expresa la percepción diferente de la gente, al definir zonas de traslape y/o más conjuntos que definan zonas intermedias resultará en transiciones más suaves para la salida controlada, por el contrario, si se tienen fronteras sin traslape resultará en salidas con saltos en la corriente y por ende en la velocidad del abanico.

En la lógica convencional, los conjuntos definidos como frío, fresco, tibio y caliente, se les asigna límites para cada uno probablemente: frío de 0 a 15 grados, tibio de 15 a 25 grados y caliente de 25 a 40 grados, dentro de una escala entre 0 y 40°C.

En un conjunto convencional, un valor de temperatura que se entre al sistema, sólo puede plantearse si pertenece o no a un conjunto en particular. En contraste, un conjunto difuso, permite que el elemento tenga un grado de pertenencia a un conjunto o a otro en un rango comprendido entre 1.0 (Más alto) y 0.0; estas funciones de pertenencia no expresan su inclusión o exclusión, sino el grado con el que dicho valor pertenece al conjunto.

Gráficamente, las funciones de pertenencia se representan por un trapezoide (ver Figura 2), que se construye definiendo cuatro puntos dentro del conjunto difuso, utilizando los números difusos.

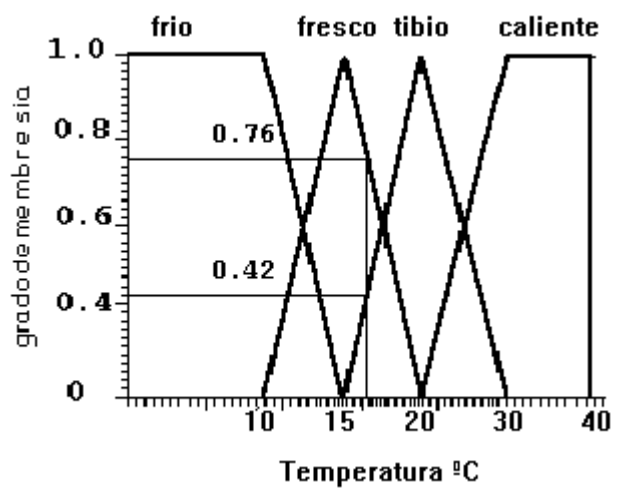
Figura 2. Funciones de pertenencia en los conjuntos difusos



En la Figura anterior, los puntos *a* y *d* definen los puntos que limitan el inicio y término de la función de pertenencia. Los puntos *b* y *c* definen el rango de valores para los que se tiene el más alto grado de pertenencia (1.0).

Las funciones de pertenencia pueden traslaparse y la cantidad de traslape representa la interrelación entre las funciones de pertenencia. Para el ejemplo de las temperaturas, puede ilustrarse la utilización de las funciones de pertenencia como se presenta en la Figura 3:

Figura 3. Funciones de pertenencia para un controlador de temperatura



En la Figura se ha definido la función frío para el rango entre 0 y 15 grados ($a=0$, $d=15$); Los valores comprendidos entre 0 y 10 tendrán la máxima pertenencia de 1.0 ($b=0$, $c=10$). La pertenencia para fresco es un poco diferente. Aquí se desearía que fresco tuviera su máxima fuerza para 18.5, por tanto se selecciona un triángulo con los puntos $b = c$.

El grado de pertenencia de una temperatura de entrada, se determina mediante donde cae su valor dentro de la(s) función (es). En el ejemplo, una entrada de 16 grados caerá dentro de fresco y tibio, esto es, existe una zona de traslape para las funciones de pertenencia. Esto significa que un determinado valor de entrada puede tener cierto grado de pertenencia en mas de una función de pertenencia. En el ejemplo, los 16 grados tendrán un grado de pertenencia de 0.76 en la función fresco y de 0.42 en la función tibio. Esto es, la temperatura de entrada de 16 grados se considera a la vez tanto fresca como tibia.

Por tanto, los conjuntos difusos y sus funciones de pertenencia permiten que adopten varios valores, no únicamente blanco y negro, sino un rango continuo de grises. Todo lo que se logra con los conjuntos difusos es categorizar el mundo en la forma cómo la hace la mente humana. La utilidad de la lógica difusa son las reglas lógicas que operan sobre los conjuntos difusos.

Las reglas definen las relaciones entre los conjuntos difusos de entrada y salida. Las reglas reflejan cómo una persona normalmente pensaría sobre el proceso o la aplicación, esencialmente en forma lingüística. Cada regla está en la forma de una sentencia Si...Entonces. La porción correspondiente al Si, o antecedente, especifica la condición que deberá cumplirse. La porción Entonces, o consecuencia, especifica la consecuencia del antecedente.

Para el ejemplo que se viene planteando, una regla simple podría escribirse como: Si *temperatura es caliente*, Entonces *velocidad de ventilador es alta*.

Igualmente, es posible formar reglas lógicas más complejas al utilizar el operador lógico “Y”. Una sentencia Si...Entonces, junto con el operador “Y”, pueden considerar la gran mayoría de las relaciones requeridas en sistemas y procesos de control.

En el ejemplo de la temperatura, si además se considera la humedad relativa del medio ambiente definida en los conjuntos difusos seco, normal y húmedo puede plantearse una regla de la siguiente manera: Si *temperatura es caliente y humedad es humedo*, Entonces *velocidad de ventilador es media*. Estas reglas lógicas complejas, en las que se relacionan varios componentes en un sistema, representan lo denominado como Sistema de Lógica Difusa.

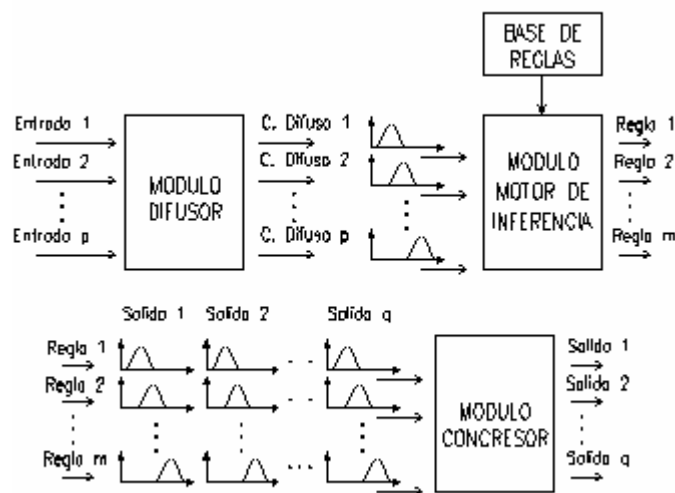
5.2.5.2. Los Sistemas de Lógica Difusa (SLD). Un Sistema de Lógica Difusa (SLD), se define como un algoritmo que tiene información de entrada que ingresa en un motor de inferencia, para el que se han establecido unas bases de reglas y que generan resultados numéricos concretos (Portilla, 2002). Los datos 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.

Los SLD se han convertido en una poderosa herramienta para la modelación de sistemas en los que se requiere analizar y procesar, de manera integrada, información lingüística proveniente de opinión de expertos e información numérica proveniente del trabajo de campo y ensayos de laboratorio. Los SLD constituyen una herramienta para modelar los procedimientos de razonamiento del ser humano.

Razonamiento que por ser de carácter cualitativo, involucra siempre un nivel de incertidumbre, que se refleja en los resultados del proceso de evaluación de los diferentes fenómenos donde se apliquen los sistemas dinámicos basados en la lógica difusa (Portilla, 2002).

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. (Figura 4.).

Figura 4. Estructura de un sistema de lógica difusa

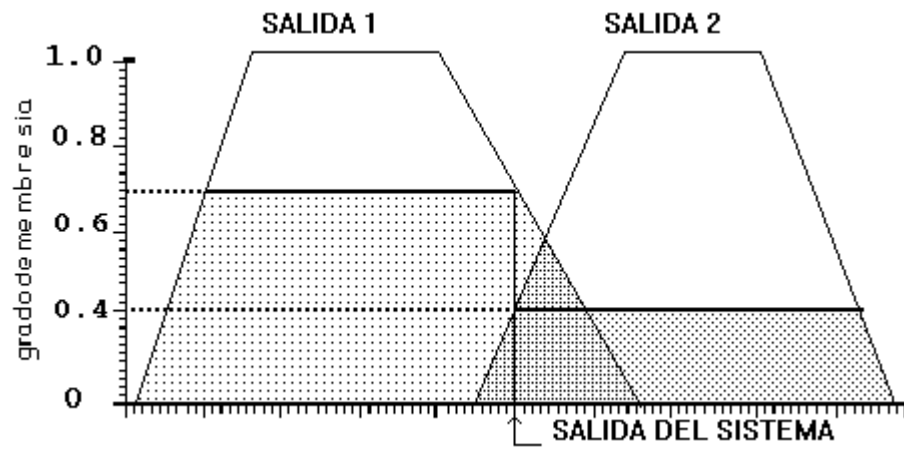


- **Módulo difusor.** El módulo difusor halla a partir de la entrada (x^*), el grado de pertenencia a cada uno de los términos lingüísticos. Con las entradas se genera un conjunto difuso por cada uno de los términos lingüísticos involucrados. Este componente conocido como fusificador es el mecanismo de conversión de una entrada a valores

difusos por medio de la definición de conjuntos difusos y sus funciones de pertenencia.

- **Base de reglas.** Son el conjunto de proposiciones lógicas que se generan a partir de la experiencia o de la relación y análisis de datos numéricos. Cada una de las reglas, presenta la forma: Si X_1 y X_2 y...y X_n , Entonces Y . No se pueden establecer valores de Y , que tengan las mismas combinaciones de X . La Base de reglas son las sentencias simples o compuestas que puedan darse en el sistema.
- **Motor de inferencia:** En el motor de inferencia se toma la base de reglas y se define cuáles de ellas se consideran de acuerdo a las posibles combinaciones de las entradas X . Cada una de ellas se procesa según la implicación predeterminada en el diseño del SLD, dando un conjunto difuso resultante y, por último, lo opera con el respectivo término lingüístico del universo de discurso de la variable de salida, generando un corte o conjunto difuso de salida. Actualmente, las implicaciones más usadas en problemas de Ingeniería, son las del mínimo y el producto, por cuanto éstas además de facilitar el cálculo, preservan la relación causa – efecto.
- **Módulo Concesor.** Recibe los conjuntos difusos de salida o cortes producidos por el motor de inferencia, los procesa y mediante un algoritmo produce un valor concreto de salida (y^*), que es la salida final del SLD. El concesor más utilizado, para obtener el valor concreto de salida a partir del conjunto difuso final, es el centro de gravedad (\bar{y}), una vez hallado el centro de gravedad, se proyecta sobre el eje del universo de discurso y donde lo corte estará el valor de y^* .

Figura 5. Defuzificación en conjuntos difusos.



En mayor detalle, el método del centro de gravedad consiste en varios pasos. Inicialmente, se calcula el centroide (centro de gravedad), para cada función de pertenencia; entonces, las funciones de pertenencia se limitan en su altura (ver Figura 5) dependiendo de la fortaleza de la regla aplicada, y se evalúan las áreas trapezoidales de las funciones de pertenencia. Finalmente, se obtiene la salida defusificada mediante el cálculo de un promedio ponderado de los puntos correspondientes a los centros de gravedad y las áreas calculadas, siendo estas últimas los factores de peso o ponderación.

Todas las propiedades y características de la lógica difusa presentadas, permiten plantear, que los SLD son una excelente herramienta para el procesamiento de sistema complejos, en los que las variables de tipo cuantitativo y cualitativo que los definen, presentan variaciones en el tiempo.

5.3. EL SISTEMA URBANO COMO SISTEMA DINÁMICO COMPLEJO

Se ha planteado que las características fundamentales de un sistema se encuentran integralmente en sus componentes, sus propiedades y sus relaciones. A partir de estos elementos se debe avanzar en una conceptualización enfocada hacia la consideración de un sistema urbano.

En el desarrollo del presente trabajo, se incorpora el término sistema urbano para delimitar metodológicamente las aplicaciones de modelos y de sistemas dinámicos complejos a unidades político – administrativas, en las que la contigüidad de elementos sociales y económicos tienen límites administrativos establecidos (Richardson 1.986). Refiriendo a los elementos funcionales del componente urbano considerado en la Ley 388/97³⁵. No es el objetivo presentar o profundizar una conceptualización sobre lo que es el urbanismo, el espacio urbano: discusiones que revisten de gran interés desde la antropología y la sociología, pero que serán analizadas acá desde su interés práctico y metodológico.

La relación del sistema urbano, como sistema dinámico complejo, conduce a incorporar elementos conceptuales de la antropología urbana, especialmente por los planteamientos que refieren los espacios urbanos no como la ciudad, no como el espacio físico, sino como las relaciones y tramas que se dan en el uso de la ciudad o en el uso de lo físico (Delgado, 1997).

Al plantear la pregunta: lo urbano y ciudad son una misma cosa? Delgado (1997), presenta el siguiente planteamiento: “En una ciudad en efecto, vemos estructuras, articulaciones, instituciones, familias, iglesias, monumentos, centros, estaciones, palacios, mercados. En cambio,

³⁵ Ley de Ordenamiento Territorial en Colombia. Ley 388 de 1997.

ninguna de esas cosas corresponde propiamente a lo urbano, como lo demuestra el hecho de que todo ello, si hace o no hace, haya estado antes, de hecho siempre, en todos los sitios. Al mismo tiempo y en sentido contrario, la ciudad siempre está en la ciudad, mientras que lo urbano trasciende sus fronteras físicas...De lo urbano cabría decir...que consiste en reconocerse como una labor, un trabajo de lo social sobre sí, como la sociedad urbana manos a la obra... lo urbano estaría más cerca de la forma que no de la substancia”(Delgado, 1997).

Establecer los límites entre la ciudad y lo que puede considerarse urbano, pasa necesariamente por reconocer en la ciudad no sólo lo físico – natural y edificado, sinó las expresiones que encierra y representa, por las imágenes que se forman de ella, una mentalidad urbana caracterizada y definida en virtud de los ciudadanos, los vecinos y los visitantes (Silva, 1992)³⁶.

Siguiendo a Castells (1.997), la urbanización se refiere a la articulación espacial, continua o discontinua, de población y actividades, mientras que la ciudad implica un sistema específico de relaciones sociales, de cultura y de instituciones políticas de autogobierno. La ciudad como el espacio en el que se dan relaciones sociales y el sistema urbano como la articulación de la población y sus actividades con el espacio.

El medio urbano es el conjunto de relaciones entre sociedad y medio físico, hecho artificial o construido, que tienen lugar en un espacio territorial acotado, al que se denomina ciudad (Herzer y Gurevich, 1996). El medio urbano implica múltiples usos del suelo yuxtapuestos entre sí,

³⁶ Citado por Rodríguez y Amanda (1994), para plantear que la distribución del espacio urbano responde a valores sociales, políticos y económicos que lo dinamizan, y establecen funciones financieras, educativas, residenciales, comerciales, recreativas. Funciones que se representan, según Lynch (1,984) elementos concretos denominados nodos, sendas bordes, barrios e hitos.

múltiples procesos de producción y reproducción del medio y variedad de significados y símbolos culturales.

El significado práctico que se da al sistema urbano, es justamente el de red, el de trama, el de sociedad que evoluciona y que cambia permanentemente transformándose y transformando el espacio. El sentido de sistema en cuanto a cantidades, a estructuras que cambian y se configuran en el tiempo.

Otro punto de reflexión entre las ciudades y los sistemas urbanos, tiene que ver con la dimensión territorial que estos tienen. Si se mira a la ciudad como centro de actividad, de población y de empleo, y a la vez como el motor para el desarrollo económico y cultural y el territorio para la cohesión social y económica, que no se da sino en los procesos de cohesión territorial que presente en los sistemas urbanos cuya evolución y relaciones se convierten en factor significativo del equilibrio espacial (Ortega, 2001)

“El sentido de organización antrópica del espacio natural, constituye el inicio de toda arquitectura urbana. Los cimientos de las primeras ciudades, antes de piedra, se construyeron sobre la base imaginaria de los mitos primitivos, los cuales suelen constituir el equivalente del imaginario colectivo o mecanismo simbólico de concepción del mundo en todas las sociedades”³⁷. Una búsqueda de explicación por las construcciones urbanas, relaciona al ser humano con su entorno natural a través de su necesidad simbólica cultural (García, 1999), con su capacidad de percibir, significar y de organizar el espacio (Munizaga, 2000).

La relación ser humano – naturaleza, al margen de las discusiones sobre sí es él mismo naturaleza, o se puede estudiar por fuera de ella, tiene un elemento de discusión fundamental en el desarrollo del concepto de ciudad y de campo, urbano - rural. Las relaciones de ocupación y utilización del espacio, lo que puede ser llamado sociedad urbana o sociedad rural³⁸.

Para Glick (1992), las ciudades se presentan en configuraciones o sistemas, que presentan relaciones entre sí. Las ciudades tienen múltiples funciones – residencia, comercio, manufactura, gobierno, administración, educación, cultura, religión, finanza, servicios, mantenimiento, recreo y trabajo social. Y si bien ninguna de ellas es necesariamente urbana, el conjunto denso y complejo sólo se da en el medio urbano.

Justamente, sobre estos elementos diferenciadores se presenta una revisión general, que permitan relacionar los componentes del sistema urbano.

5.3.1. Componentes del sistema urbano. Una concepción de espacio urbano como el territorio que ocupa la ciudad o el poblamiento, no puede tener una visión fisicalista del territorio, sino que lo concibe como un campo relacional que incluye la manera en que la estructura de las relaciones sociales lo transforma (IDEA – UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA, 1994). Se presenta una definición de la estructura urbana como el conjunto de elementos que soportan las actividades de la ciudad.

³⁷ Planteamiento de Luis Fernando García Londoño, al relacionar los planteamientos de André Leroi – Gourhan, según los cuales la ciudad no es más que el elemento expresivo del nuevo dispositivo funcional tomado por la colectividad humana.

³⁸ Una interesante documentación referida a lo urbano, lo rural y lo agrario: Modelo rizomático de investigación ambiental, requiere la relación de los trabajos realizados por el IDEA Instituto de Estudios Ambientales de la Universidad Nacional de Colombia. Especialmente Trabajos realizados por Ana Patricia Noguera.

En esencia, una aproximación a establecer los elementos que soportan las actividades de la ciudad como componentes del sistema urbano, debe considerar que en la interacción, éstos modifican sus estados internos. La relación de modelos de investigación ambiental (Noguera, 1999),³⁹ presenta aproximaciones conceptuales para determinar los elementos que se relacionan, desde una perspectiva ambiental, en un sistema urbano. Un primer modelo sugiere la relación entre sociedad y naturaleza, como posibilidad de interpretar lo ambiental. Un segundo modelo, integra de manera más decidida en la discusión el concepto de sistema, planteando la existencia de tres sistemas dinámicos en cuya compleja relación se encuentra la problemática ambiental, se presenta la relación entre el ecosistema, tecnosistema y sociosistema. En un tercer modelo se muestra por un lado el sociosistema totalmente inmerso en el ecosistema, planteando que las características de funcionamiento de los sistemas culturales se rigen de forma determinista por el funcionamiento de los ecosistemas y por otro lado plantea que los ecosistemas se pueden estudiar y ser dominados por los sistemas culturales. En un cuarto modelo, se plantea que el hombre le impone al ecosistema su propio orden y por tanto sugiere que el ecosistema está inscrito en el orden cultural⁴⁰.

Sistemas dinámicos como los que se plantean en los modelos de investigación ambiental: sociedad – naturaleza, ecosistema – tecnosistema – sociosistema, ecosistema – cultura o cultura – ecosistema, son un punto de partida fundamental para considerar en esencia el funcionamiento de un sistema urbano.

³⁹ Estos modelos han sido el resultado de los avances de los proyectos Perfil Ambiental Urbano de Colombia. Estudio de caso Manizales y Perfil Ambiental Agrario de Caldas, realizados por el Instituto de Estudios Ambientales de la Universidad Nacional de Colombia.

Las relaciones sugeridas entre ecosistema y cultura, que pueden darse a través del desarrollo de la tecnología como mecanismo de dominación, involucran necesariamente la relación entre los hombres y la red simbólica con la que se teje y se transmite la cultura (Angel, 1996). Si se sostiene el sistema urbano como un conjunto de elementos para las actividades en la ciudad, es necesario explorar el papel de elementos naturales, tecnológicos y sociales en la posibilidad de su establecimiento como estructuras de un sistema o como subsistemas del sistema urbano, explorando la complejidad de su propia estructura así como la de sus relaciones.

Para González (1996), un territorio específico implica espacialidad, dinámica temporal y sistema biofísico, la sociedad humana relacionada con el territorio implica también una población organizada culturalmente, y según los planteamientos del autor la cultura es el resultado de la interacción de sistemas: biofísico, tecnológico, organizacional, de conocimiento y simbólico. Desde este planteamiento puede perfilarse como componentes del sistema urbano factores biofísicos, factores tecnológicos y factores poblacionales en términos de sus relaciones y organizaciones.

Desde 1986 Colciencias⁴¹ en el documento “Programa Nacional de Desarrollo Científico – Tecnológico en Asentamientos Humanos” propone un sistema de asentamiento humano dividido en 4 subsistemas: el físico espacial, el socio cultural, el económico – financiero y el político – administrativo. En el sistema propuesto los subsistemas incluyen:

⁴⁰ Una ampliación de detalles en los componentes de cada uno de los modelos de interpretación ambiental, puede encontrarse en *El Reto de la Vida. Ecosistema y Cultura*. De Augusto Angel Maya.

⁴¹ Citado por Curtis R. Glick (1992) en *Desarrollo Urbano*.

- Subsistema físico – espacial: espacio físico, tecnologías y materiales de construcción, infraestructura física.
- Subsistema socio – cultural: las estructuras sociales, los sistemas de valores, las apreciaciones estéticas que gobiernan el diseño.
- Subsistema económico – financiero: sistemas de intercambio de bienes, sistemas económicos urbanos, teorías de desarrollo económico, instituciones y programas financieros, valorización.
- Subsistema político – administrativo: relaciones de poder y procedimientos en el asentamiento, estructuras políticas, políticas de desarrollo urbano, legislación y prácticas de planificación.

Por otra parte, el Ministerio de Desarrollo Económico en Colombia (1995) en el documento “Ciudades y Ciudadanía”, plantea en primer lugar, que “la ciudad es una unidad socioespacial básica de soporte de la producción cultural, de la innovación social y de la actividad económica del mundo contemporáneo...es un organismo complejo”, plantea el término unidad haciendo referencia a la integralidad que le dan los atributos y las dimensiones y a la interdependencia entre ellos; se plantea como elementos constitutivos: los mercados, las redes que hacen posible la operación de flujos (agua potable, energía, desechos líquidos, personas, bienes y servicios, información), estructura social y cultura y tiene un gobierno. La cultura urbana genera las reglas de comportamiento colectivo que garantizan la convivencia y el uso masivo de los espacios y de los bienes.

Los componentes fundamentales en términos de atributos y dimensiones se refieren respectivamente a “componentes fundamentales del espacio urbano construido que hacen posible la producción de ciudad”, como la vivienda, los servicios públicos, el transporte, el equipamiento, el suelo y el espacio público; y a “espacios teóricos homogéneos al interior de disciplinas en el contexto de los cuales la medición, entendida en el

sentido de la comparabilidad, es posible” para los espacios urbanos se consideran las dimensiones política, social, económica, cultural y ambiental. Las dimensiones hacen explícitas las relaciones entre los hombres y concretan los flujos en los atributos.

Munizaga (2000), plantea una anatomía sistémica de la ciudad, constituida y configurada desde una estructura morfológica, funcional y semiológica.

“La configuración morfológica recalca el hecho de que la ciudad es una realidad concreta, formal, física y técnica colocada en un contexto natural como contexto. La morfología establece el orden material de la forma urbana”. De esta manera para Munizaga se establecen variables morfológicas como: geomorfología (topografía/hidrografía), arborización y áreas verdes, edificaciones (calidad), tramas y retícula (espacio vial y trama de avenidas, parques, plantas de energía, infraestructura de servicios públicos y comunicaciones).

“La configuración funcional expresa los procesos y actividades que se localizan en el medio urbano y definen el modo de operar de una ciudad como sistema”, la configuración funcional referida a la infraestructura social urbana, se analiza desde variables en cuatro subsistemas: de movimiento (vialidad, flujos e intensidad de uso de las vías, transporte público, flujos peatonales), de localización (uso de suelo, vivienda, servicios y comercio, equipamiento, seguridad, educación, hospitales, industria, recreación y áreas verdes), sociodemográfico (población, densidad de población, estratificación socioeconómica, organización social, organización territorial – administrativa) y el subsistema de infraestructura (alcantarillado, aguas lluvias, agua potable, electricidad, gas y combustibles, telefonos, televisión y comunicaciones).

La configuración semiológica es una condición abstracta y concreta que subyace en la ciudad, alterando las propiedades de los objetos con significados y referencias más complejas, la configuración semiológica se puede definir por tres niveles relacionales que expresan procesos de identidad, percepción y significación de la forma y el espacio.

A partir de los planteamientos anteriores, se busca dar una fundamentación a elementos del sistema urbano, que se consideran esenciales y, buscando hacer síntesis, se organizan en tres subsistemas: natural, tecnológico y social.

5.3.1.1. El subsistema natural. Entendiendo el subsistema natural como un componente del sistema urbano, se plantean en él los elementos del ecosistema primitivo profundamente alterados e intervenidos por la actividad humana (Angel, 1998), para relacionar factores que como el suelo, el agua y el aire interactúan con las actividades humanas en la ciudad, incluso factores bióticos en los que se conservan algunas cadenas tróficas. Estos elementos se relacionan como en un ecosistema, en el que se establece una estructura biótica y una abiótica, para hacer referencia a una compleja red de relaciones entre factores biológicos y físicos, cada uno con una dinámica compleja de procesos que permiten su organización y funcionamiento.

Un ecosistema es un sistema abierto que experimenta salida y entrada permanente de energía y materia (Odum, 1998), en el que cada componente evidencia flujos internos y externos de energía en los que se soporta una dinámica autorreguladora y establecen un modelo de leyes ecosistémicas. Para Angel (1.996), existen seis elementos conceptuales básicos en el ecosistema: el flujo energético, los niveles tróficos, los ciclos biogeoquímicos, los nichos ecológicos, el equilibrio ecológico y la resiliencia; estos elementos se refieren a estructuras y funcionalidades, y

pueden relacionarse en los sistemas urbanos, en la medida en que su intervención y adaptación para las actividades humanas, responde a espacios tecnológicos organizados por el hombre con leyes de transmisión energéticas muy diferentes a las establecidas para organizar un sistema vivo.

Cada uno de estos elementos son aspectos fundamentales de un ecosistema y están en permanente transformación, que se da por factores propios de su dinámica o de la intervención y la actividad humana, este hecho genera diferentes grados y tipos de intervención en los ecosistemas que permiten una clasificación en ecosistemas naturales, manejados, cultivados, suburbanos, urbanos, altamente intervenidos no urbanos (González, 1.996); dicha gradación ecosistémica puede referirse a la mínima o máxima intervención y transformación de los procesos geomorfológicos, hidrológicos, atmosféricos y biológicos.

El sistema natural como componente del sistema urbano hace referencia a la estructura biofísica representada por el suelo, el agua, el aire y los seres vivos⁴², y considerando la gradación planteada por González, el sistema natural puede ser considerado como el elemento base que soporta y es transformado por las actividades humanas y sus construcciones tecnológicas. Y que, como plantea Odum condiciona la calidad de la misma vida urbana.

5.3.1.2. El subsistema social. Un análisis de la sociedad desde la complejidad realizado por Cuervo (1996) y siguiendo los planteamientos de Lefebvre (1981), propone que este subsistema contiene..."las relaciones sociales de reproducción, a saber de las relaciones biosicológicas entre los sexos, las edades, la organización específica de

la familia, y las relaciones de producción, a saber la división espacial del trabajo y su organización, por tanto las funciones jerarquizadas”.

El “Dispositivo Social” que configura la trama de la ciudad y de un sistema urbano, en términos de Montoya (1996), presenta cuatro niveles de profundidad estratificados⁴³ entre los que puede diferenciarse: un nivel superficial referido a los valores, las costumbres de la sociedad. Un nivel institucional representado por las instituciones tradicionales. Un nivel cultural referido a la capa de imágenes y símbolos de la sociedad y finalmente un nivel de construcción de planes para el futuro. Esta metáfora geológica utilizada por Montoya, soporta los elementos que interactúan y que permiten intentar comprender el inmenso y complejo dispositivo social.

A partir de estos planteamientos preliminares de Lefebvre y Montoya, puede sugerirse, inicialmente, que el sistema social está referido a la interrelación de la población, las instituciones tradicionales frente al gobierno, la política, la educación, la salud, el bienestar y con un especial énfasis, la cultura.

En el sistema social, el más mínimo cambio en el tiempo de uno de los componentes planteados genera variaciones para todo el sistema, la movilidad de la población y el consecuente aumento y concentración en un área determinada genera el saturamiento de la vivienda, disminuye la calidad de la vivienda, provoca congestionamientos, aumenta la contaminación, motiva el crimen y reduce cada componente de la calidad de vida (Forrester, 1971).

⁴² En términos más específicos relacionados a considerar el planeta tierra como un ecosistema puede involucrarse también los términos litosfera, hidrosfera, atmósfera y biosfera.

⁴³ Señala el autor que estos niveles o estratos son la reelaboración de lo propuesto por Paul Ricoeur sobre la estratificación de los dispositivos valuativos que una cultura acaba construyendo

Otro aspecto pertinente para el presente estudio, es la consideración de Gutierrez (2000), según la cual la realidad social puede matematizarse a semejanza de cómo se ha hecho con la realidad física. Un sistema social es abierto e intercambia materia, energía e información con su entorno. En ellos nada está quieto, hay una multitud de elementos individuales que influyen de manera no lineal en el comportamiento general del sistema. Para Gutierrez, las posibilidades de matematizar las ciencias humanas radican en identificar a los sistemas sociales como *sistemas complejos*, y fundamentalmente porque estos pueden situarse en regímenes críticos caracterizado por la presencia de fluctuaciones espaciales y temporales en todas las escalas posibles.

En la descripción de un sistema social son adecuados los sistemas dinámicos, la sociedad como sistema y su estructura interna presenta un fuerte acoplamiento con su entorno con el que intercambia masa, energía e información (Nicolis y Prigogine, 1994). Pensar en una sociedad urbana en una ciudad en la que se importan permanentemente materias primas y productos agrarios y de la que se exportan productos acabados mientras que los medios de comunicación mantienen constantemente informados a los distintos grupos sociales acerca de la situación actual y las tendencias inmediatas.

5.3.1.3. El sistema tecnológico. Puede plantearse que los nuevos equilibrios del ecosistema expresados en la intervención y la gradación, son procesos que se dan mediante la utilización de la técnica y el conocimiento como aquello que Angel (1996) ha denominado “Paradigma Tecnológico”. Definido como el conjunto de conocimientos y técnicas que permiten un determinado dominio del medio natural y de producción de bienes y servicios, se refiere a la cultura de una unidad territorial específica y está relacionada con la creatividad científica y la capacidad de manejo instrumental.

Es importante señalar que el dominio de la naturaleza y la producción de bienes, no son el objeto último de la tecnología, más si se considera que “el a priori tecnológico, es un a priori político, en la medida en que la transformación de la naturaleza implica la del hombre, y que las creaciones del hombre salen de y vuelven a entrar en un conjunto social...la maquinaria del universo tecnológico puede revolucionar o retrasar una sociedad” (Marcuse, 1985), la tecnología se convierte en un componente fundamental en la comprensión del sistema urbano, por su profunda connotación en el proceso evolutivo de las sociedades.

Para Noguera (1999), “la especie humana se diferencia de las demás especies, en que a través de los procesos de población de la tierra, ella construye una plataforma tecnológica que le permite adaptarse a cualquier geografía”. El sistema tecnológico, como construcción artificial de la actividad humana, tiene como razón de ser la transformación de las leyes de los ecosistemas para construir nuevos equilibrios (Angel, 1996).

La relación del componente tecnológico en el sistema urbano, puede establecerse a partir de la determinación de una plataforma para la transformación – adaptación del soporte natural, planteando esta plataforma como las construcciones artificiales en la ciudad para las actividades humanas. Intervenciones que determinan sistemas de asentamiento y sistemas de industrialización (González, 1996).

El sistema tecnológico bien como proceso de transformación de la naturaleza, como producto para la transformación de la sociedad o como proceso para la producción de bienes y servicios, se convierte en un componente interactuante del sistema urbano, que determina las condiciones que garantizaran calidad de vida en el sistema, y que a la vez su fallamiento o debilidad puede causar consecuencias catastróficas. La calidad de construcción, el tipo de estructura, su estado y el tipo de uso,

son algunos de los elementos que pueden ser afectados por agentes externos o internos en un sistema urbano.

Los elementos presentados en la conceptualización del sistema urbano, unidos a los aspectos planteados de la vulnerabilidad y su concepción holística, permiten avanzar en una propuesta de un modelo de indicadores para evaluar la vulnerabilidad en un sistema urbano frente a fenómenos naturales, desde la concepción del marco teórico anteriormente establecido y frente al siguiente enfoque conceptual en la elaboración de la metodología propuesta.

5.4. ENFOQUE CONCEPTUAL PARA LA EVALUACIÓN DE LA VULNERABILIDAD URBANA.

Para los objetivos del presente trabajo es necesario definir el enfoque conceptual sobre el que se sustenta la formulación de la propuesta para evaluar la vulnerabilidad urbana a partir de un modelo de indicadores basado en lógica difusa y que tiene como referencia el marco teórico presentado en los subcapítulos anteriores.

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, señala su consideración como un sistema dinámico complejo, que fundamentalmente representa un esquema de evolución y desarrollo en escalas espacial y temporal a partir de las relaciones de sus componentes. En otras palabras no se puede comprender la dinámica del subsistema social, al margen de la comprensión de la dinámica de los subsistemas naturales y tecnológicos y de sus interacciones internas y con el entorno.

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 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

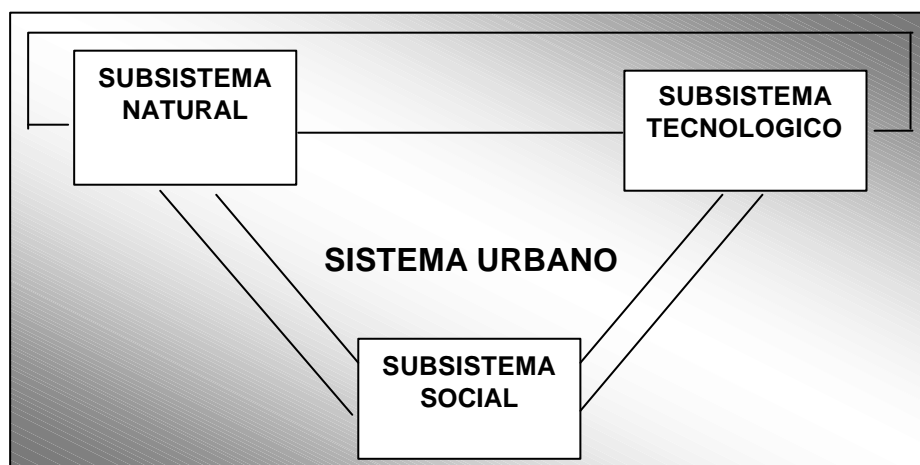
sistémicos, dinámicos y complejos, que metodológicamente se pueden procesar con herramientas matemáticas como la lógica difusa.

6. PROPUESTA DE MODELO PARA LA OBTENCIÓN DE INDICADORES DE VULNERABILIDAD URBANA FRENTE A FENÓMENOS NATURALES

6.1. MODELO DE SISTEMA URBANO

Con el objetivo de relacionar criterios de la vulnerabilidad de los sistemas urbanos frente a fenómenos naturales, se propone 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. (Figura 6).

Figura 6. Estructura del sistema urbano



Las estructuras en un sistema urbano, involucran las relaciones emergentes de los componentes, que forman las redes de organización y de los flujos que se dan entre ellos y que establecen reglas para su autoorganización. Determinando la posibilidad de la creación de nuevas estructuras y nuevos modelos de comportamiento, el flujo permanente de

materia y energía alejado del equilibrio y a la interconectividad no-lineal de los componentes. La característica fundamental que de aquí se desprende, es el permanente cambio y la evolución tendiente a la complejidad del sistema urbano.

La configuración de las relaciones entre los componentes, le da las características al sistema, estableciendo lo que se denomina como patrón del sistema urbano, que está dado por las relaciones funcionales entre componentes como las edificaciones, el suelo y la población, mientras que la estructura está dada por formas específicas en términos de la infraestructura, el suelo y la población, que tendrán diferentes manifestaciones del mismo patrón en función del contexto, lo que sugiere que la estructura urbana diferirá según el tipo de suelo, el tipo de materiales, el tipo de clima, las diferencias culturales, el número de pobladores, etc.

En consecuencia con lo discutido en el capítulo anterior, se propone un modelo de sistema urbano, integrado por tres subsistemas: natural, tecnológico y social. En cada uno de ellos se relaciona la estructura, con sus factores y variables y finalmente se presenta el sistema propuesto como tal.

6.1.1. El subsistema natural

6.1.1.1. Estructuras del subsistema natural. En el subsistema natural interactúan las siguientes estructuras:

- Estructura geológica (Características del suelo y del subsuelo).
- Estructura hidrológica y climatológica (Red hídrica y clima).
- Estructura biológica (Flora y fauna del ecosistema, corredores biológicos).

La interacción de estas estructuras configuran geomorfológica y topográficamente el suelo y establecen las condiciones naturales para el desarrollo de un sistema urbano determinado. 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 son el soporte natural de los diferentes procesos que tienen lugar en un sistema urbano.

En la configuración de los componentes del subsistema natural, y en su dinámica propia, es fundamental la comprensión de los procesos cíclicos que interactúan para la regulación y formación de cada uno de ellos; así el suelo está en función de los procesos hídricos, atmosféricos y biológicos. Los ciclos biogeoquímicos son los agentes que dinamizan el funcionamiento externo del subsistema natural y se integran como elementos definitivos para la comprensión del enfoque sistémico entre el suelo, el agua, el aire y la biodiversidad.

El estudio de la dinámica entre las estructuras del subsistema propuesto, es una herramienta esencial y primordial en perspectiva de la evaluación de ésta, en primer lugar como un fenómeno natural y en segundo lugar como amenaza, dada su necesaria relación con comunidades humanas o su infraestructura asociada.

El enfoque sistémico del medio natural se ha venido planteando desde la necesaria relación en los procesos de formación y regulación de cada uno de los componentes. En la formación y regulación del suelo, la dinámica hidrológica, biológica y climatológica es evidente. Asimismo, los ciclos que soporta la dinámica hidrológica están en función de las características edafológicas, climáticas y los procesos biológicos, como elementos esenciales para su funcionamiento.

6.1.1.2. Factores y variables en el subsistema natural. Los factores y variables propuestos para el subsistema natural se expresan en la Tabla 2.

Tabla 2. Factores y variables del subsistema natural

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 Topografía – morfometría
Agua	Ríos, quebradas, lagos, embalses, mares. Red hídrica Escorrentía y caudales Flujos sobre el terreno y almacenamiento subterráneo Infiltración
Aire	Clima y meteorología (Dinámica atmosférica) Precipitación Humedad
Biodiversidad	Flora Fauna Procesos biológicos

6.1.2. El Subsistema tecnológico

6.1.2.1. Estructuras en el subsistema tecnológico. Las estructuras propuestas para el subsistema tecnológico son las siguientes:

- Infraestructura en edificaciones (Tipología).
- Obras civiles y equipamientos.
- Estructura de líneas vitales: energía, transporte, agua y comunicaciones.

Las estructuras en el subsistema tecnológico 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.

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 brindarse calidad de vida; tecnología representada por obras civiles, edificaciones, infraestructura para el saneamiento básico, la conducción de energía eléctrica y de comunicaciones, así mismo en la realización de actividades extractivas, productivas y de intercambio de bienes y servicios.

La infraestructura tecnológica en un sistema urbano está estrechamente relacionada y en ocasiones interconectada. Su diseño, montaje y operación evidencia la interrelación de cada uno de los componentes. Generalmente, las edificaciones y las redes viales están en función de las infraestructuras asociadas en servicios públicos, vías y redes de telecomunicaciones, así como de las características del subsistema natural y de la población para la cual es construida.

De hecho, 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.

6.1.2.2. Factores y variables de subsistema tecnológico. Los factores y variables propuestos para el subsistema tecnológico se muestran en la Tabla 3:

Tabla 3. Factores y variables del subsistema tecnológico

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)
Líneas Vitales	Acueducto Red de agua potable y saneamiento básico Red de Alcantarillado Energía Red Eléctrica Red de Gas Domiciliario Transporte Red Vial Aeropuertos Puertos Fluviales y Marítimos Comunicaciones Red Telefónica Red Fibra Optica Red Radio y TV
Obras Civiles	Restauración Estabilización Adecuación

6.1.3. El subsistema social

6.1.3.1. Estructuras del subsistema social. Las estructuras propuestas para el subsistema social son las siguientes:

- Estructura Poblacional.
- Estructura Económica.
- Estructura Educativa.
- Estructura en Salud.
- Estructura de Gobierno.
- Estructura Ideológica y Cultural.

Estas estructuras del subsistema social soportan el desarrollo de la institucionalidad del ser humano representada por:

- Estructura de gobierno: representada por el esquema político local, regional y nacional, factor fundamental en la toma de decisiones sobre el desarrollo de las sociedades humanas.

- Estructura poblacional: representada por la pirámide poblacional, género y número, estratificación social, nivel de ingresos, empleo, escolaridad.
- Estructura económica: representada por las características de los sectores productivos, industriales y de comercio de bienes y servicios.
- Estructura ideológica y cultural: representada por la autoconcepciones de la sociedad referida en religión, ideología y relaciones culturales.
- Estructura educativa: representada por la cobertura y calidad y los niveles educativos de la población.
- Estructura en salud: representada por la cobertura y calidad del sistema de seguridad social, en términos de prestación de servicios de salud, riesgos profesionales y pensiones.
- Estructura del bienestar social: representada por la dinámica institucional alrededor de la seguridad urbana, el esparcimiento y la diversión.

Estas estructuras interactúan y determinan las características del subsistema como tal. En los términos planteados por Gutierrez (2000), la dinámica de cada una de estas estructuras no define de por sí el sistema, sino 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.

6.1.3.2. Factores y variables del subsistema social. Los factores y variables propuestos para el subsistema social se muestran en la Tabla 4.

Tabla 4. Factores y variables del subsistema social

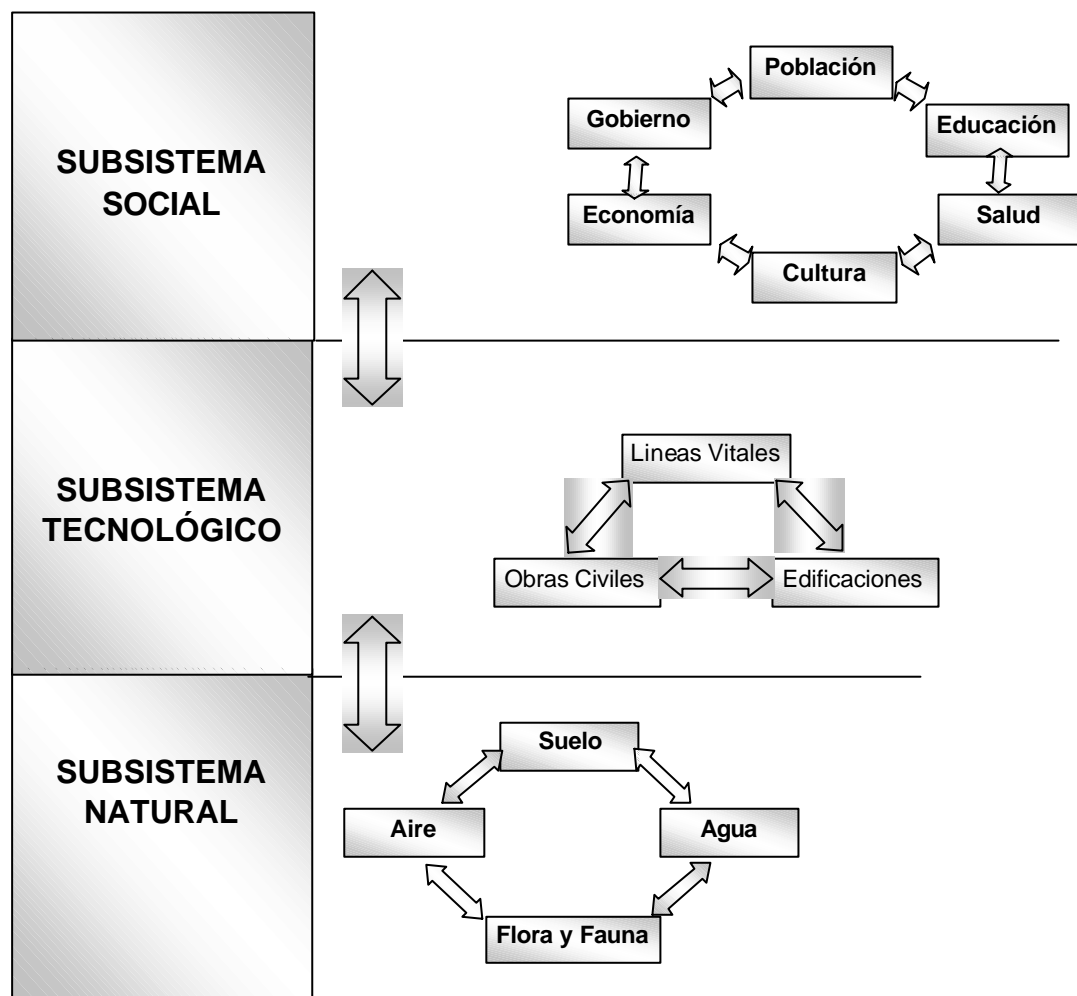
FACTORES	VARIABLES
Población	Número Genero y edad Organización Estratificación Ingresos económicos / Seguridad pública y recreación
Salud	Cobertura Calidad Sistema de seguridad social
Educación	Escolaridad Calidad Cobertura
Gobierno e Instituciones	Gobernabilidad – eficiencia del sistema de gobierno.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

6.1.4. El Modelo de sistema urbano. En la Figura 7, se presenta el modelo de sistema urbano propuesto, se integran los subsistemas natural, social y tecnológico.

Una de las características fundamentales de los sistemas es que tienen un objetivo específico y que en función de éste, los estados que alcanzan en su desarrollo están dependen de las interacciones de los elementos y de los procesos generados a partir de los flujos de entrada y de salida que se dan en el sistema. Para Carmona (2002), la ciudad es 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.

Figura 7. Relaciones en el sistema urbano



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. Asimismo, los subsistemas propuestos en su composición tienen una

entidad física y conceptual que los identifica, como se planteó en los subtítulos anteriores 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.

6.2. MODELO PARA LA EVALUACIÓN DE LA VULNERABILIDAD EN SISTEMAS URBANOS

6.2.1. Elementos del modelo. El primer elemento en la construcción de un modelo para la evaluación de la vulnerabilidad en sistemas urbanos, 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, en sistemas urbanos es necesario considerar los elementos que permiten comprender su vulnerabilidad ante eventos naturales o antrópicos: la estructura, forma y función de la ciudad, así como las características de los diferentes grupos humanos que ocupan los espacios y sus propios estilos o modalidades de vida. En este sentido, Lavell (2000 – b), sugiere seis contextos de los sistemas urbanos, necesarios para comprender la vulnerabilidad:

- **Concentración y densidad.** En primer lugar es necesario considerar que uno de los aspectos fundamentales de los sistemas urbanos es la concentración y densidad de la economía y de la población, lo que

significa que en ellos se concentra todo lo relacionado con la industria manufacturera, el comercio, la educación, la política y la cultura.

- Complejidad e interconectividad. En los sistemas urbanos subsisten sistemas interconectados e interdependientes en cuanto a roles, funciones, producción, consumo, comercio, vivienda, todos entrelazados por complejos sistemas de transporte, distribución de agua, alcantarillado y electrificación.
- La informalidad de la ciudad. La concentración de la población en los sistemas urbanos y el aumento de la pobreza, la localización y construcción sin control. El asentamiento en zonas de inundación, de pendientes inseguras, encima de fallas geológicas, etc.
- Degradación ambiental urbana y vulnerabilidad estructural. El nivel de degradación de los recursos naturales y las características en la construcción de las estructuras habitacionales e infraestructurales, así como a los sistemas de mantenimiento y conservación de los mismos.
- Debilidad política e institucional. Existencia de políticas, normas e instrumentos de control legal, así como de organizaciones e instituciones estatales y privadas. En esencia este contexto de los sistemas urbanos obedece a la estructura de gobierno.
- 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 exposición, la fragilidad social y la falta de resiliencia. Estos aspectos se profundizan y desarrollan, debido a que se consideran como el punto de partida para la comprensión y evaluación de la vulnerabilidad con un enfoque sistémico, y lo más importante, porque son considerados como elementos para la descripción de posibles indicadores en cada subsistema.

Para el modelo que se propone, se plantean las siguientes consideraciones para la exposición, la fragilidad y la capacidad de respuesta de cada uno de los subsistemas:

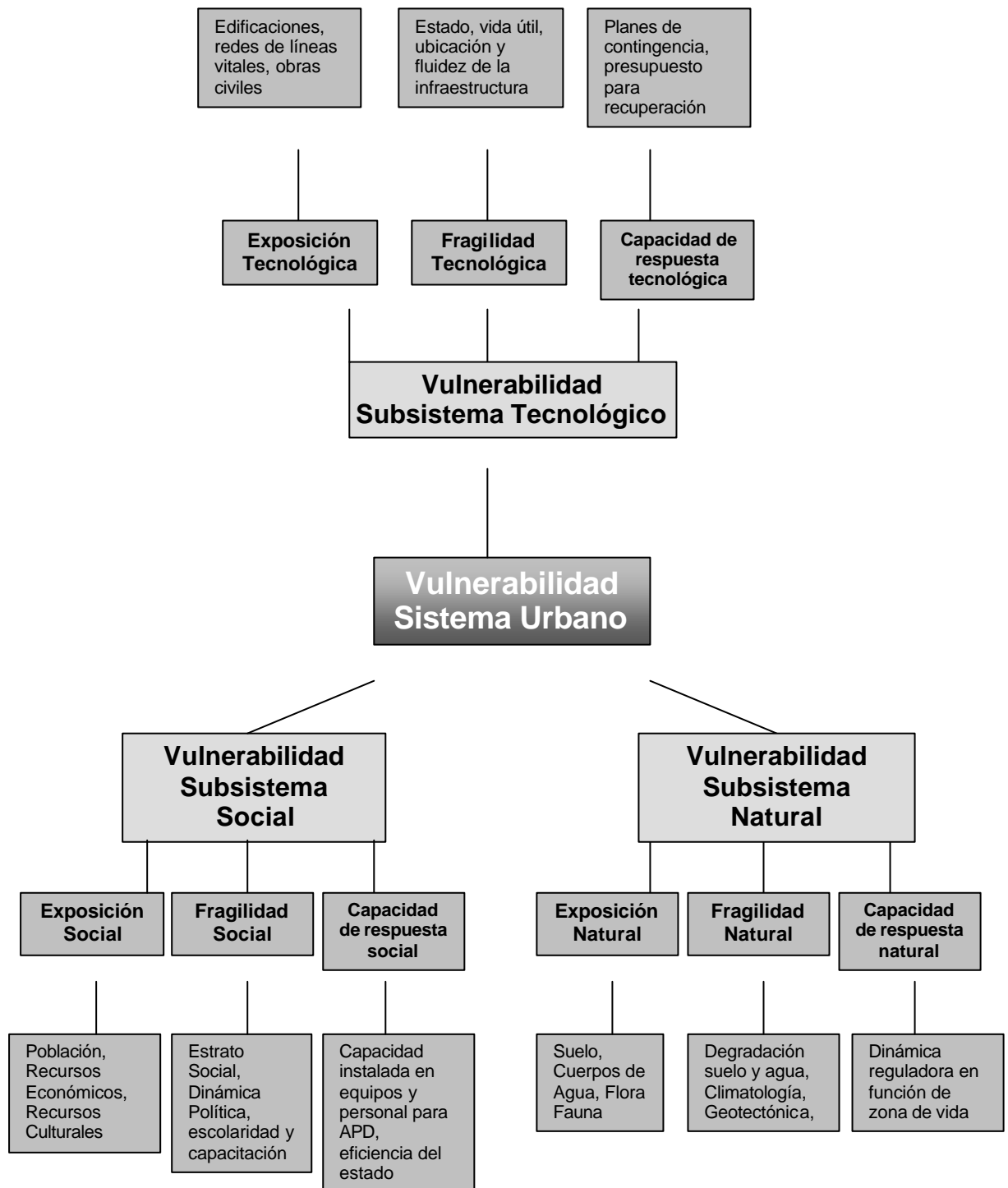
- Exposición: se utilizará para hacer referencia a la cantidad de los elementos expuestos en cada uno de los subsistemas y a su proximidad con el área de influencia de la amenaza o del peligro natural.
- Fragilidad: se utilizará para referirse a la debilidad y/o susceptibilidad y/o tendencia de fallar de cada subsistema, al ser impactado por la amenaza o el peligro natural.
- Capacidad de Respuesta: se utilizará para relacionar 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 autoregulación que como sistemas tienen establecidos frente a la eventualidad de un fenómeno natural.

El modelo se estructura a partir del sistema urbano propuesto y su objetivo es establecer la vulnerabilidad de éste y de cada uno de los subsistemas a partir de la determinación de los aspectos anteriormente planteados: exposición, fragilidad y capacidad de respuesta. Estos son descritos y esquematizados en la Figura 8.

6.2.2. Características del modelo. El modelo que se propone es de tipo dinámico y predictivo. Dinámico, por que relaciona variables cuyas tasas de cambio se especifican con respecto al tiempo y las variables se constituyen y se establecen en el tiempo. Predictivo, porque las relaciones entre las variables son causales, el cambio de una genera un cambio particular en otra y la predicción debe relacionarse al tiempo.

Como una de las propiedades fundamentales de todo sistema, la exposición, fragilidad y capacidad de respuesta están estrechamente relacionadas, de manera que cambios en una de ellas retroalimenta positiva o negativamente a las otras.

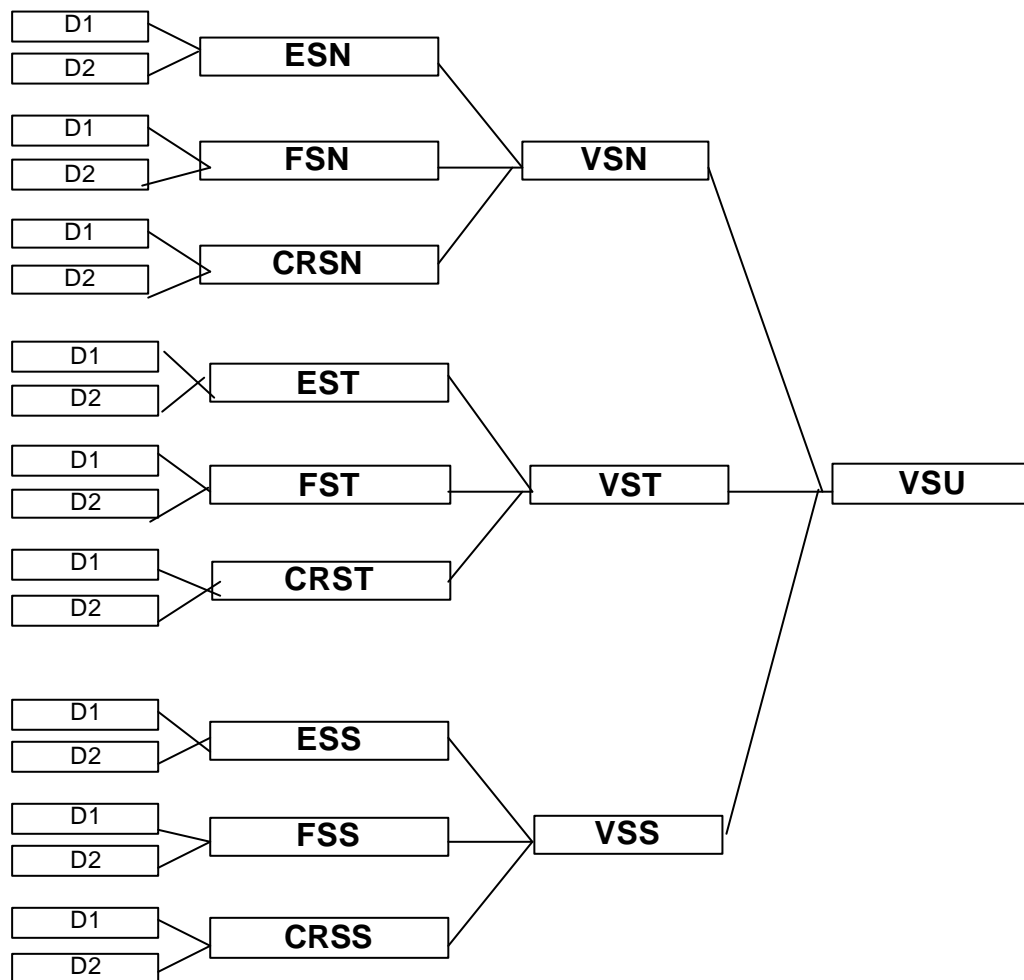
Figura 8. Modelo para evaluar la vulnerabilidad en un sistema urbano



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

El esquema general del modelo de indicadores para estimar la vulnerabilidad de un sistema urbano se presenta en la Figura 9.

Figura 9. Modelo de indicadores para la evaluación de la vulnerabilidad de un sistema urbano.



En el anterior esquema se presenta la forma en la que se establecen los diferentes indicadores para la obtención del índice de vulnerabilidad del sistema urbano. Inicialmente, puede plantearse que D1 y D2, se

consideran los descriptores que 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).

La construcción de indicadores se basa en la consideración de los aspectos fundamentales de la vulnerabilidad establecidos por Cardona y Hurtado (2001), analizados en el modelo anterior de vulnerabilidad urbana. A continuación se relaciona cada uno de los indicadores planteados, su sentido y significado y las bases para su obtención.

6.2.3.1. Índice 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. Expresa 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.

6.2.3.2. Índice de Vulnerabilidad del Subsistema Natural (VSN). El Índice VSN, se obtiene a partir de la determinación y relación de los Índices de Exposición del Subsistema Natural (ESN), de Fragilidad del Subsistema Natural (FSN) y de Capacidad de Respuesta del Subsistema Natural (CRSN); a su vez cada uno de estos ESN, FSN y CRSN tienen unos descriptores a partir de los cuales se establece la valoración de expertos.

- Índice de Exposición del Subsistema Natural (ESN). Este aspecto de la vulnerabilidad indica el volumen o área 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.
- Índice de Fragilidad del Subsistema Natural (FSN). Indica la predisposición que tiene el suelo, los cuerpos de agua o los recursos floró - faunísticos de ser afectados por la ocurrencia de fenómenos naturales o antrópicos. En esencia está referido a las características del suelo que lo hacen débil e inestable, en su relación con los cuerpos de agua, la dinámica climática y las especies vivas que soporta y que pueden estar expresados por el grado de actividad hidrogeológica (geotectónica), la dinámica climática (características climáticas) y el estado de los procesos erosivos y de degradación del subsistema natural (especialmente contaminación del agua, del suelo y del aire).
- Índice de Capacidad de Respuesta del Subsistema Natural (CRSN). Implica los procesos homeostáticos de los ecosistemas y su capacidad de recuperación (resiliencia), 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. Asimismo, el aumento o disminución de la población faunística está referida a las características del suelo, del agua y de la vegetación, y especialmente a los procesos internos y externos amenazantes que se dan en el

ecosistema en particular. La estabilidad de los sistemas biológicos se refiere igualmente a la capacidad de estos para resistir a fuertes cambios.

6.2.3.3. Índice de Vulnerabilidad del Subsistema Tecnológico (VST).

El Índice de Vulnerabilidad del Subsistema Tecnológico se obtiene a partir de la determinación y relación de los Índices de Exposición del Subsistema Tecnológico (EST), de Fragilidad del Subsistema Tecnológico (FST) y de Capacidad de Respuesta del Subsistema Tecnológico (CRST); a su vez cada uno de estos EST, FST y CRST se establecen a partir de descriptores valorados por expertos.

- Índice de Exposición del Subsistema Tecnológico (EST). Indica la exposición de la infraestructura física en términos de número 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.
- Índice de Fragilidad del Subsistema Tecnológico (FST). Este aspecto de la vulnerabilidad, indica la susceptibilidad y predisposición que tiene la infraestructura tecnológica para fallar y de 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.
- Índice de Capacidad de Respuesta del Subsistema Tecnológico (CRST). Este aspecto está referido a 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.

6.2.3.4. Índice de Vulnerabilidad del Subsistema Social (VSS).

El Índice de Vulnerabilidad del Subsistema Social se obtiene a partir de la determinación y relación del Índice de Exposición del Subsistema Social (ESS), de Fragilidad del Subsistema Social (FSS) y de Capacidad de Respuesta del Subsistema Social (CRSS); a su vez cada uno de estos ESS, FSS y CRSS se obtiene a partir de las valoraciones de los descriptores dadas por expertos.

- Índice de Exposición del Subsistema Social (ESS). Los descriptores que permiten obtener una valoración para ESS, están referidos a la población expuesta, así como a los recursos económicos en bienes y materiales y a los valores culturales expuestos.
- Índice de Fragilidad del Subsistema Social (FSS). Este aspecto de la vulnerabilidad se refiere a las condiciones de indefensión que la población pueda tener como: pobreza, hacinamiento, enfermedad física y psicológica, edades (niños y ancianos), discapacidad, condiciones nutricionales, desintegración social, falta de representación política, preparación y capacitación, y el aspecto cultural e ideológico.
- Índice de Capacidad de Respuesta del Subsistema Social (CRSS). Este aspecto de la vulnerabilidad indica la potencialidad que tiene la población humana de prevenir, preparar, enfrentar y recuperarse del impacto de un fenómeno natural o antrópico. Esencialmente, esta

capacidad se puede establecer a partir de la determinación de elementos como: 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. También está referido a la capacidad que tiene el subsistema social de recuperarse y restaurar la dinámica social y económica de la unidad territorial en el corto, mediano y largo plazo.

6.2.3.5. Modelo de indicadores. En síntesis, el modelo de indicadores propuesto para la estimación de la vulnerabilidad de un sistema urbano frente a fenómenos naturales, se presenta en la Tabla 5. En ésta se presentan los indicadores con los descriptores propuestos.

Con base en este modelo se diseñará el sistema de lógica difusa, que permitirá evaluar la vulnerabilidad del sistema urbano. Uno de los aspectos importantes en el análisis del modelo de indicadores propuesto, es la relación de descriptores en el sistema, que tienen características escalares diferentes. Este hecho significa la necesidad de considerar una herramienta matemática que permita procesos de normalización, para que estos puedan ser relacionados en el cálculo de cada uno de los indicadores.

Sin embargo, y considerando que entre los descriptores existen algunos sobre los que la información existente puede ser insuficiente, incierta, inexacta o imprecisa, se ha planteado utilizar los sistemas de lógica difusa alimentados a partir de la opinión de expertos, con el fin de que las valoraciones que se hagan de cada uno de los descriptores y que partan de la información disponible y del conocimiento de los expertos pueda ser concertada para establecer un valor específico de ingreso al sistema.

Tabla 5. Descripción de descriptores e indicadores para la evaluación de la vulnerabilidad en el sistema urbano

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

6.3. IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE LÓGICA DIFUSA PARA LA CONSTRUCCIÓN DE INDICADORES PARA LA EVALUACIÓN DE LA VULNERABILIDAD EN 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 estimar la vulnerabilidad, sustenta 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.

6.3.1. Sistemas de lógica difusa (SLD) y el toolbox de control difuso.

De acuerdo con el esquema presentado por Portilla (2002), un SLD se compone de un módulo difusor, una base de reglas, un motor de inferencia y un módulo congresor. Cada uno de estos elementos se encuentra implementado en el toolbox de control difuso desarrollado por Quintero y Villa (1998). Esta herramienta contiene los siguientes parámetros (que se presentan en la ventana del toolbox mostrada en la Figura 10):

- Operación AND: permite seleccionar el tipo de operación AND, que es una de las T-Normas, que define la manera cómo operan los conjuntos difusos implementados.
- Entradas y salidas: permite definir las entradas y salidas que tendrá el sistema, y el respectivo número de funciones de pertenencia que se les asignará, así como la manera en que se definirá cada una de éstas. Las diferentes posibilidades para las funciones de pertenencia son las funciones Gamma, Pi, Triangular y L; el rango en que se van a

trabajar las entradas y las salidas: rango real y rango normalizado.
(Ver Figura 11).

Figura 11. Ventana para la definición de entradas y salidas en el toolbox de control difuso.

Salidas

File Edit Windows Help

Numero de Salidas: 1

Rango Normalizado

Máximo: 6

Mínimo: -6

Salida a Definir: 1

Rango Real de la Salida

Maximo: 1

Minimo: 0

Numero de Funciones de Membrecia: 3

Numero de la funcion de membrecia a definir: 1

Triangular

Punto a = 1

Punto b = 2

Punto c = 2

Punto d = 3

1

0.5

0

1 2 3

Definir

Salir

Fuente Quintero y Villa (1998)

- Conjunto de reglas: Permite definir el conjunto de reglas *si - entonces* que cumplen las entradas y las salidas, de acuerdo a la valoración de expertos y que permiten determinar la(s) salida(s) del sistema. Estos conjuntos de reglas se guardan en una base de datos.

Figura 10. Ventana principal del toolbox de control difuso.



Fuente Quintero y Villa (1998).

- Métodos de defuzzificación: permite escoger el método de defuzzificación⁴⁴ más apropiado de acuerdo con la aplicación y precisión requerida en el SLD. Los métodos parametrizados son: centro de área/gravedad, centro de sumas, altura, mitad del máximo, primero del máximo y último del máximo.
- Tipo de implicación: las implicaciones son relaciones que permiten representar el significado de las reglas *si-entonces*, y que relacionan los valores de las funciones de pertenencia de las entradas con los valores de las funciones de pertenencia de las salidas. Los tipos de implicación que se tienen son Mamdani, Kleene-Dienes, Lukasiewicz, Zadeh, Estocástica, Gödel y Sharp. Se plantea que en el SLD

⁴⁴ La defuzzificación es un proceso por medio del cuál se realizan las operaciones matemáticas en los conjuntos difusos planteados con el fin de obtener el valor de salida del Sistema de Lógica Difusa.

propuesto se debe utilizar la implicación de Mamdani, que opera la intersección del mínimo entre el valor de pertenencia de las entradas y la función de pertenencia de las salidas.

- Simulación: los parámetros anteriores constituyen la base de datos del FKBS (Fuzzy Knowledge Based System)⁴⁵, utilizado en la implementación del SLD para la evaluación de la vulnerabilidad en un sistema urbano. La simulación se realiza a partir de la información guardada con extensión .mat y llevados a un bloque creado para tal fin. Esta simulación convencional en Simulink, colocando los bloques necesarios que permitirán describir el sistema y la manera de controlarlo, y utilizando el bloque denominado MATLAB-FCN, cuya ventana de parámetros se muestra en la Figura 12.

Figura 12. Parámetros del Bloque de Simulink MATLAB-FCN

[Mask]

Block name: P

Block type: [Mask]

Evaluates input with MATLAB function. Example: sin

OK

Cancel

Help

MATLAB function:

`infer(u, 'proporb.mat')`

Output width [-1 matches input]:

1

Fuente Quintero y Villa (1998)

⁴⁵ Se plantea que el SLD tiene como fundamento operativo el ser un Sistema Difuso Basado en Conocimiento.

El parámetro MATLAB function, contiene la función de MATLAB a ser invocada y sus parámetros, la entrada al bloque se denomina u . La función empleada se llama infer (Máquina de Inferencia), cuyas entradas son u , que es el vector de entradas al controlador y un nombre de archivo que contiene la base de datos correspondiente al controlador basado en lógica difusa.

- Tipos de controladores: es necesario tener en cuenta que en el diseño de los controladores difusos de tipo proporcional (P), proporcional-integral (PI), proporcional-derivativo (PD) y proporcional-integral-derivativo (PID), el número de entradas de la máquina de inferencia que se va a emplear depende del tipo de controlador es decir, por ejemplo para un controlador de tipo PID el número de entradas es 3, ya que se necesita el error, la derivada del error y la integral del error, por lo tanto es necesario multiplexar las entradas de la máquina de inferencia. Pero, si el tipo de controlador que se va a diseñar es un proporcional entonces el número de entradas a la máquina de inferencia es igual a 1 y no es necesario multiplexar⁴⁶ la entrada. Para el SLD propuesto se considera que las entradas en cada uno de los operadores establecidos requieren de ser multiplexados, con el fin de entregar las valoraciones dadas por expertos al FKBS, en el que se encuentran las bases de reglas, la máquina inferencia y el sistema de defuzzificación.

6.3.2. 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. Considerando que la información a la que se puede acceder para la valoración de algunos de los descriptores en muchas ocasiones es “inexacta” o “ambigua”.

Para las valoraciones de cada una de las variables de entrada y de salida 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

⁴⁶ La multiplexación es el proceso que permite que las variables de entrada en los controladores difusos tengan el orden adecuado de ingreso de acuerdo con lo

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.

Por ejemplo, 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.
- Estos descriptores 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 descriptores los posibles valores de IVX serán 5).

- Las posibles valoraciones se pueden establecer realizando combinaciones de la siguiente manera:
 - Si D1 es MA y D2 es (MA, A, M, B y MB) y D3 es (MA, A, M, B y MB), entonces IVX es (criterio de expertos).
 - Si D1 es A y D2 es (MA, A, M, B y MB) y D3 es (MA, A, M, B y MB), entonces IVX es (criterio de expertos).
 - Si D1 es M y D2 es (MA, A, M, B y MB) y D3 es (MA, A, M, B y MB), entonces IVX es (criterio de expertos).
 - Si D1 es B y D2 es (MA, A, M, B y MB) y D3 es (MA, A, M, B y MB), entonces IVX es (criterio de expertos).
 - Si D1 es MB y D2 es (MA, A, M, B y MB) y D3 es (MA, A, M, B y MB), entonces IVX es (criterio de expertos).

En el ejemplo presentado en la construcción de las posibles proposiciones de la valoración de IVX, se optó metodológicamente por dejar en cada proposición el descriptor D1 fijo con su valoración, mientras que los descriptors D2 y D3 varían según los diferentes rangos de valores. La representación en una matriz se tiene la siguiente estructura.

D2						D3
MB	B	M	A	MA		
CE	CE	CE	CE	CE	MA	
CE	CE	CE	CE	CE	A	
CE	CE	CE	CE	CE	M	
CE	CE	CE	CE	CE	B	
CE	CE	CE	M*	CE	MB	

- D1 es fijo en la proposición de esta matriz.
- D2 y D3, varían según sus diferentes rangos.
- CE es el criterio de los expertos para valorar IVX, según la combinación dada. CE puede ser MA, A, M, B o MB.

- En la matriz M^* significa que según el criterio de los expertos: si D1 es MA y D2 es A y D3 es MB, entonces IVX es M.
- 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).

6.3.3. Esquema para la determinación de un SLD para la evaluación de la vulnerabilidad del sistema urbano. El funcionamiento del SLD, se estructura con base en sistemas particulares para cada uno de los subsistemas natural, tecnológico y social. En cada uno de los SLD propuestos se estableció:

- Las variables de entrada y salida con sus respectivas funciones de pertenencia y expresiones lingüísticas.
- La base de reglas. Proposiciones de la forma Si...Entonces.

6.3.3.1. SLD para evaluar la vulnerabilidad del subsistema natural.

- Variables de entrada y salida.

Tabla 6. Variables de entrada y salida para evaluar vulnerabilidad del subsistema natural

Entradas	Salidas
Suelo – formaciones Superficiales	Indice de Exposición del Subsistema Natural
Red hídrica	
Inventario floro faunístico	
Grado de actividad hidrogeológicos	Indice de Fragilidad del Subsistema Natural
Dinámica climática	
Erosión – grado de contaminación	
Procesos autorreguladores del ecosistema	Indice de Capacidad de Respuesta de Subsistema Natural

Las valoraciones de expertos en la determinación de VSN, se encaminan a establecer el Índice de Exposición del Subsistema Natural. En cada una de las entradas es necesario definir los rangos de valoración. En el sistema que se propone, es necesario valorar cada una de las entradas de acuerdo con las funciones de pertenencia establecidas en cada uno de los índices. El esquema general de variables de entrada y salida se muestra en la Tabla 6.

6.3.3.1.1. Obtención de ESN

- Variables de entrada: en la obtención de ESN, se establecen tres descriptores. La valoración por expertos se realiza de acuerdo con las funciones de pertenencia y expresiones lingüísticas que se presentan en la Tabla 7. Los descriptores son:

⇒ (D1) Xesn1 - Suelo y/o formaciones superficiales expuestas.

⇒ (D2) Xesn2 - Recurso Hídrico expuesto

⇒ (D3) Xesn3 - Inventario de flora y fauna

Tabla 7. Funciones de pertenencia para las entradas y salida en la obtención de ESN

Rango	Expresión lingüística
0 – 20	Muy Baja (MB)
20 – 40	Baja (B)
40 – 60	Moderada (M)
60 – 80	Alta (A)
80 – 100	Muy Alta (MA)

- Variable de Salida (ESN):

⇒ Yesn - Índice de Exposición del Subsistema Natural. Se expresa en los rangos y expresiones lingüísticas de la Tabla 7.

- Base de Reglas (ESNB). Las diferentes formas de relación de las tres entradas en función de las valoraciones posibles se presentan en las Tablas 8, 9, 10, 11 y 12. Las bases de reglas se construyen a partir de la combinación de las siguientes proposiciones:

⇒ Si D3 es MA y D1 es... y D2 es ... entonces ESN es:

Tabla 8. Base de reglas y valoraciones de descriptores en la obtención de ESN. D3 fijo muy alta y D2, D1 variables.

D1						D2
MB	B	M	A	MA		
B	M	A	MA	MA	MA	
B	M	A	MA	MA	A	
B	M	A	A	A	M	
B	M	M	M	M	B	
B	B	B	M	M	MB	

⇒ Si D3 es A y D1 es... y D2 es ... entonces ESN es:

Tabla 9. Base de reglas y valoraciones de descriptores. D3 fijo Alta y D2, D1 variables en estimación de ESN.

D1						D2
MB	B	M	A	MA		
M	M	M	A	MA	MA	
B	M	M	A	A	A	
B	M	M	M	M	M	
B	B	M	M	M	B	
B	B	B	B	M	MB	

⇒ Si D3 es M y D1 es... y D2 es ... entonces ESN es:

Tabla 10. Base de reglas y valoraciones de descriptores. D3 fijo moderada y D2, D1 variables en estimación de ESN.

D1						D2
MB	B	M	A	MA		
M	M	M	A	A	MA	
B	M	M	A	A	A	
B	M	M	M	M	M	
B	B	B	M	M	B	
MB	B	B	B	M	MB	

⇒ Si D3 es B y D1 es... y D2 es ... entonces ESN es:

Tabla 11. Base de reglas y valoraciones de descriptores en la obtención de ESN. D3 fijo baja y D2, D1 variables.

D1						D2
MB	B	M	A	MA		
B	B	M	M	M	MA	
B	B	M	M	M	A	
B	B	M	M	M	M	
MB	B	B	B	B	B	
MB	MB	B	B	B	MB	

⇒ Si D3 es MB y D1 es... y D3 es ... entonces ESN es:

Tabla 12. Base de reglas y valoraciones de descriptores en obtención de ESN . D3 fijo Muy Baja y D2, D1 variables.

D1						D2
MB	B	M	A	MA		
B	B	M	M	M	MA	
MB	B	B	M	M	A	
MB	B	B	B	M	M	
MB	B	B	B	B	B	
MB	MB	MB	MB	B	MB	

6.3.3.1.2. Obtención de FSN. De acuerdo con las valoraciones que se establezcan para cada uno de los descriptores, puede determinarse el valor de cada uno de los índices que determinan la vulnerabilidad del Subsistema Natural.

- Variables de entrada: en la obtención de FSN, se plantean tres descriptores y su valoración se realiza de acuerdo con los rangos de las funciones de pertenencia y las expresiones lingüísticas que se presentan en la Tabla 13. Los descriptores son:

⇒ (D1) Xfsn1 - Actividad hidrogeológica

⇒ (D2) Xfsn2 - Dinámica climática

⇒ (D3) Xfsn3 - Degradación ambiental

Tabla 13. Funciones de pertenencia para entradas en la estimación de FSN

Rango	Expresión lingüística D1 Y D3	Expresión Lingüística D2
0 – 20	Muy Baja (MB)	Muy seco (MS)
20 – 40	Baja (B)	Seco (S)
40 – 60	Moderada (M)	Moderado (M)
60 – 80	Alta (A)	Húmedo (H)
80 – 100	Muy Alta (MA)	Muy Húmedo (MH)

- Variable de Salida:

⇒ Yfsn - Índice de Fragilidad del Subsistema Natural. Se expresa en las funciones de pertenencia y expresiones lingüísticas que se presentan en tabla 14.

Tabla 14. Funciones de pertenencia para la salida en la estimación de FSN

Rango	Expresión lingüística
0,0 – 0,20	Muy Bajo (MB)
0,20 – 0,40	Bajo (B)
0,40 – 0,60	Moderado (M)
0,60 – 0,80	Alto (A)
0,80 – 1,00	Muy Alto (MA)

- Base de Reglas (FSNB). Se relacionan valoraciones dentro de los rangos planteados. Dejando una de las entradas fija y las demás variables para determinar el FSN. Las diferentes formas de relaciones que se dan entre los descriptores de acuerdo con las posibles valoraciones se presentan en las Tablas 15, 16, 17, 18 y 19. Se construyen a partir de las siguientes combinaciones de proposiciones:

⇒ Si D2 es MH y D1 es... y D3 es ... entonces FSN es:

Tabla 15. Base de reglas y valoraciones de descriptores en obtención de FSN .
D2 fijo muy húmedo y D1, D3 variables.

D1						D3
MB	B	M	A	MA		
M	M	A	MA	MA	MA	
M	M	A	MA	MA	A	
M	M	A	A	A	M	
B	B	M	M	M	B	
B	B	M	M	M	MB	

⇒ Si D2 es H y D1 es... y D3 es ... entonces FSN es:

Tabla 16. Base de reglas y valoraciones de descriptores en obtención de FSN.
D2 fijo húmedo y D1, D3 variables.

D1					
MB	B	M	A	MA	
M	M	M	A	MA	MA
M	M	M	A	A	A
B	M	M	M	M	M
B	B	M	M	M	B
B	B	B	M	M	MB

⇒ Si D2 es M y D1 es... y D3 es ... entonces FSN es:

Tabla 17. Base de reglas y valoraciones de descriptores en obtención de ESN.
D2 fijo moderado y D1, D3 variables.

D1					
MB	B	M	A	MA	
B	M	M	A	A	MA
B	B	M	A	A	A
B	B	M	M	M	M
B	B	B	B	M	B
MB	B	B	B	B	MB

⇒ Si D2 es S y D1 es... y D3 es ... entonces FSN es:

Tabla 18. Base de reglas y valoraciones de descriptores en obtención de FSN.
D2 fijo Seco y D1, D3 variables.

D1					
MB	B	M	A	MA	
B	B	M	A	A	MA
B	B	M	M	A	A
B	B	M	M	M	M
MB	B	B	B	B	B
MB	MB	B	B	B	MB

⇒ Si D2 es MS y D1 es... y D3 es ... entonces ESN es:

Tabla 19. Base de reglas y valoraciones de descriptores en obtención de FSN. D2 fijo muy seco y D1, D3 variables.

D1						D3
MB	B	M	A	MA		
B	B	M	M	A	MA	
MB	B	B	M	M	A	
MB	B	B	B	M	M	
MB	MB	B	B	B	B	
MB	MB	MB	MB	B	MB	

6.3.3.1.3. Obtención de CRSN

- Variables de entrada. Esencialmente este índice está dado por las características de la vegetación y la fauna y por elementos ecosistémicos fundamentales como el tipo de suelo, el tipo de clima y el equilibrio hídrico. Generalmente son factores asociados, de manera que puede establecerse que: en climas húmedos y moderados CRSN es MA y A, en climas MH es M, y en climas Secos y muy secos CRSN es B y MB.
- Variables de salida. Ycrsn. Al igual que las variables de entrada se expresan de acuerdo con las valoraciones MA, A, M, B y MB.
- Base de Reglas (CRSNB). Se establece a partir de la relación de las siguientes proposiciones:

⇒ Si clima es MH entonces CRSN es M

⇒ Si clima es H entonces CRSN es MA

⇒ Si clima es M entonces CRSN es MA

⇒ Si clima es S entonces CRSN es B

⇒ Si clima es MS entonces CRSN es B

6.3.3.1.4 Obtención del índice de vulnerabilidad del subsistema natural. Posterior a la obtención de ESN, FSN y CRSN, éstos se consideran como las variables de entrada en la obtención del Índice de Vulnerabilidad del Subsistema Natural. Las variables de entrada en la obtención de la Vulnerabilidad del Subsistema Natural, han sido simuladas por un operador difuso propio y posteriormente se implementó un operador para estimar VSN.

- Variables de entrada. Corresponden a los valores obtenidos de ESN, FSN y CRSN y se expresan según lo presentado en la Tabla 20. Las entradas son:

- ⇒ Xvsn1 – ESN - Exposición del Subsistema Natural
- ⇒ Xvsn2 – FSN - Fragilidad del Subsistema Natural
- ⇒ Xvsn3 - CRSN Capacidad de Respuesta del Subsistema Natural

Tabla 20. Funciones de pertenencia para entradas y salida en la obtención de VSN

Rango	Expresión lingüística
0 – 20	Muy Baja (MB)
20 – 40	Baja (B)
40 - 60	Moderada (M)
60 – 80	Alta (A)
80 –100	Muy Alta (MA)

- Variable de salida: Yvsn - Vulnerabilidad del Subsistema Natural. Se expresa en las funciones de pertenencia presentadas en la Tabla 20.
- Base de Reglas (VSNB). Se relacionan valoraciones dentro de los rangos y funciones de pertenencia presentados en las Tablas 21, 22, 23, 24 y 25. Se establecen a partir de combinación de las siguientes proposiciones:
 - ⇒ Si CRSN es MA y ESN es... y FSN es ... entonces VSN es:

Tabla 21. Base de reglas y valoraciones de descriptores en la obtención de VSN. CRSN fija Muy Alta y ESN, FSN variables.

ESN					
MB	B	M	A	MA	
B	B	M	A	A	MA
B	B	M	M	A	A
MB	B	B	M	M	M
MB	MB	B	B	B	B
MB	MB	MB	B	B	MB
					FSN

⇒ Si CRSN es A y ESN es... y FSN es ... entonces VSN es:

Tabla 22. Base de reglas y valoraciones de descriptores en la obtención de VSN. CRSN fija Alta y ESN, FSN variables.

ESN					
MB	B	M	A	MA	
B	M	M	A	A	MA
B	M	M	M	A	A
MB	B	M	M	M	M
MB	B	B	M	M	B
MB	MB	MB	B	B	MB
					FSN

⇒ Si CRSN es M y ESN es... y FSN es ... entonces VSN es:

Tabla 23. Base de reglas y valoraciones de descriptores en la obtención de VSN. CRSN fija moderada y ESN, FSN variables.

ESN					
MB	B	M	A	MA	
B	M	M	A	MA	MA
B	B	M	A	A	A
B	B	M	M	M	M
MB	B	B	B	B	B
MB	MB	B	B	B	MB
					FSN

⇒ Si CRSN es B y ESN es... y FSN es ... entonces VSN es:

Tabla 24. Base de reglas y valoraciones de descriptores en obtención de VSN. CRSN fija baja y ESN, FSN variables.

ESN						FSN
MB	B	M	A	MA		
M	A	A	MA	MA	MA	
M	M	A	MA	MA	A	
B	M	M	A	A	M	
B	B	M	M	A	B	
MB	B	B	B	M	MB	

⇒ Si CRSN es MB y ESN es... y FSN es ... entonces VSN es:

Tabla 25. Base de reglas y valoraciones de descriptores en obtención de VSN. CRSN fija muy baja y ESN, FSN variables.

ESN						FSN
MB	B	M	A	MA		
M	A	MA	MA	MA	MA	
B	M	A	MA	MA	A	
B	M	A	A	MA	M	
B	B	M	M	A	B	
B	B	B	B	M	MB	

6.3.3.2. SLD para evaluar la vulnerabilidad del subsistema tecnológico. El esquema general de las variables de entrada y salida del sistema de lógica difusa para estimar la vulnerabilidad del subsistema tecnológico se muestra en la Tabla 26.

Tabla 26. Variables de entrada y salida en la evaluación de la vulnerabilidad del sistema tecnológico

Entradas	Salidas
Cobertura redes eléctricas y de gas	Indice de Exposición del Subsistema Tecnológico
Cobertura en redes de acueducto y alcantarillado	
Extensión en redes viales	
Extensión en redes de comunicaciones	
Numero de edificaciones	
Obras civiles y equipamientos	
Estado y vida útil de red eléctrica y de gas	Indice de Fragilidad del Subsistema Tecnológico
Estado y vida útil de red de acueducto y alcantarillado	
Estado y vida útil de la red vial	
Estado y vida útil de la red de comunicaciones	
Estado estructural de las edificaciones	
Estado y mantenimiento de obras civiles	
Planes de contingencia para la recuperación de la infraestructura	Indice de Capacidad de Respuesta de Subsistema Tecnológico
Presupuesto para recuperación y reforzamiento de la infraestructura	

6.3.3.2.1. Obtención de EST

- Variables de entrada: en la obtención de EST, se plantean dos descriptores que se valoran de acuerdo a los rangos y funciones de pertenencia presentados en la Tabla 27. Los descriptores son:

⇒ (D1) Xest1 - Cobertura y extensión en líneas vitales.

⇒ (D2) Xest2 - Area Edificada y en obras civiles.

Tabla 27. Funciones de pertenencia para las entradas y salida en la estimación de EST

Rango	Expresión lingüística
0 – 20	Muy Baja (MB)
20 – 40	Baja (B)
40 – 60	Moderada (M)
60 – 80	Alta (A)
80 – 100	Muy Alta (MA)

- Variable de Salida:

⇒ Yest – EST - Índice de Exposición del Subsistema Tecnológico. El valor obtenido se presenta de acuerdo a los rangos y funciones de pertenencia planteados en la Tabla 27.

- Base de Reglas. (ESTB). Las posibles relaciones entre los dos descriptores en función de las posibilidades de valoración son las mostradas en la Tabla 28. Las relaciones se pueden presentar a partir de las combinaciones de la siguiente proposición:

⇒ Sí D1 es ... Entonces D2 es ...:

Tabla 28. Base de reglas y valoraciones de descriptores en estimación de EST.

D1						D2
MB	B	M	A	MA		
M	A	A	MA	MA	MA	
M	M	A	A	MA	A	
B	M	M	A	A	M	
B	B	M	M	M	B	
MB	B	B	M	M	MB	

La Base de reglas obedece al criterio dado por la cobertura de líneas vitales, el número de edificaciones y de obras civiles, respondiendo al porcentaje de área cubierto por uno u otro tipo de infraestructura. Considerando niveles de muy alta y alta exposición a porcentajes entre el 70 y el 100% del área, a niveles de moderada exposición entre 30 y 70%, y a niveles de baja y muy baja exposición a porcentajes entre 0 y el 30% del área. Este índice correspondería al contrario del índice ESN.

6.3.3.2.2. Obtención de FST

- Variables de entrada: en la obtención de FST, se presentan dos descriptores que se valoran de acuerdo con los rangos y funciones de pertenencia que se presentan en la Tabla 29. Los descriptores son.

⇒ (D1) Xfst1 - Estado y vida útil de líneas vitales

⇒ (D2) Xfst2 - Tipología y resistencia de edificaciones, estado de obras civiles.

Tabla 29. Funciones de pertenencia para las entradas en la estimación de FST

Rango	Expresión lingüística
0 – 20	Muy Malo (MM)
20 – 40	Malo (B)
40 – 60	Regular (R)
60 – 80	Bueno (B)
80 – 100	Muy Bueno (MB)

- Variable de Salida:

⇒ Yfst – FST - Índice de Fragilidad del Subsistema Tecnológico. Las funciones de pertenencia y las expresiones lingüísticas se presentan en la tabla 30.

Tabla 30. Funciones de pertenencia para la salida en la estimación de FST

Rango	Expresión lingüística
0,0 – 0,20	Muy Bajo (MB)
0,20 – 0,40	Bajo (B)
0,40 – 0,60	Moderado (M)
0,60 – 0,80	Alto (A)
0,80 – 1,00	Muy Alto (MA)

- Base de Reglas (FSTB). Las posibles relaciones entre los descriptores en función de las posibilidades de valoración son las mostradas en la

Tabla 31. Las relaciones se establecen a partir de la combinación de las siguiente proposición:

⇒ Sí D1 es ... Entonces D2 es...:

Tabla 31. Base de reglas y valoraciones de descriptores en estimación de FST.

D1						D2
MB	B	M	A	MA		
M	A	A	MA	MA	MA	
M	M	A	A	MA	A	
B	M	M	A	A	M	
B	B	M	M	M	B	
MB	B	B	M	M	MB	

La Base de reglas obedece al criterio dado por el estado, la vida útil, la ubicación, las características estructurales y la fluidez de líneas vitales, las edificaciones y las obras civiles, respondiendo a las valoraciones de estudios técnicos sobre la infraestructura o a las opiniones de expertos, considerando niveles de muy alta y alta fragilidad a valoraciones sobre debilidades estructurales entre el 70 y el 100% de la infraestructura del área, a niveles de moderada fragilidad 30 y 70%, y a niveles de baja y muy baja fragilidad a porcentajes entre 0 y el 30% del area.

6.3.3.2.3. Obtención de CRST

- Variables de entrada: en la obtención de CRST, se utilizan dos descriptores cuya valoración se realiza de acuerdo con lo presentado en la Tabla 32. Los descriptores son:

⇒ (D1) Xcrst1 - Cobertura Planes de Contingencia y Mantenimiento de la Infraestructura ante la ocurrencia de fenómenos naturales.

⇒ (D2) Xcrst2 - Porcentaje de la infraestructura asegurada frente a fenómenos naturales.

Tabla 32. Funciones de pertenencia para las entradas y salida en la estimación de CRST

Rango	Expresión lingüística D1
0 – 20	Muy Baja (MB)
20 – 40	Baja (B)
40 –60	Moderada (M)
60 – 80	Alta (A)
80 –100	Muy Alta (MA)

- Variable de Salida:

⇒ Ycrst – CRST - Índice de Capacidad de Respuesta del Subsistema Tecnológico. Expresado en los rangos y funciones de pertenencia mostrados en la Tabla 32.

- Base de reglas. CRSTB. Las posibles relaciones que se dan entre los dos descriptores en función de las posibles valoraciones, se presentan en la Tabla 33. Las relaciones se establecen a partir de las combinaciones de la siguiente proposición:

⇒ Sí D1 es ... Entonces D2 es...:

Tabla 33. Base de reglas y valoraciones de descriptores en estimación de CRST.

D1						D2
MB	B	M	A	MA		
M	A	A	MA	MA	MA	
M	M	A	A	MA	A	
B	M	M	A	A	M	
B	B	M	M	M	B	
MB	B	B	M	M	MB	

6.3.3.2.4. Obtención del Índice de Vulnerabilidad del Subsistema Tecnológico. Posterior a la obtención de EST, FST y CRST, estos se consideran como las variables de entrada en la obtención del Índice de Vulnerabilidad del Subsistema Tecnológico.

- Variables de entrada en la obtención de VST: corresponden a los valores obtenidos de EST, FST y CRST. Tienen correspondencia con los rangos y funciones de pertenencia presentados en la Tabla 34.

⇒ X1vst - EST Exposición del Subsistema Tecnológico

⇒ X2vst - FST Fragilidad del Subsistema Tecnológico

⇒ X3vst - CRST Capacidad de Respuesta del Subsistema Tecnológico

Tabla 34. Funciones de pertenencia para las entradas y salida en la estimación de VST

Rango	Expresión lingüística
0 – 20	Muy Bajo (MB)
20 – 40	Bajo (B)
40 – 60	Moderado (M)
60 – 80	Alto (A)
80 –100	Muy Alto (MA)

- Variable de Salida:

⇒ Yvst – VST - Vulnerabilidad del Subsistema Tecnológico. Expresado en los rangos y funciones de pertenencia de la tabla 34.

- Base de Reglas. VSTB. Las posibles relaciones entre las variables de entrada, en función de las posibilidades de valoración se muestran en las tablas 35, 36, 37, 38 y 39. Las relaciones se establecen a partir de la combinación de las siguientes proposiciones:

⇒ Si CRST es MA y EST es... y FST es ... entonces VST es:

Tabla 35. Base de reglas y valoraciones de descriptores en obtención de VST.
CRST fija Muy Alta y EST, FST variables

EST						F S T
MB	B	M	A	MA		
B	B	M	A	A	MA	
B	B	M	M	A	A	
MB	B	B	M	M	M	
MB	MB	B	B	B	B	
MB	MB	MB	B	B	MB	

⇒ Si CRST es A y EST es... y FST es ... entonces VST es:

Tabla 36. Base de reglas y valoraciones de descriptores en obtención de VST.
CRST fija Alta y EST, FST variables.

EST						F S T
MB	B	M	A	MA		
B	M	M	A	A	MA	
B	M	M	M	A	A	
MB	B	M	M	M	M	
MB	B	B	M	M	B	
MB	MB	MB	B	B	MB	

⇒ Si CRST es M y EST es... y FST es ... entonces VST es:

Tabla 37. Base de reglas y valoraciones de descriptores en la obtención de VST. CRST fija moderada y EST, FST variables.

EST						F S T
MB	B	M	A	MA		
B	M	M	A	MA	MA	
B	B	M	A	A	A	
B	B	M	M	M	M	
MB	B	B	B	B	B	
MB	MB	B	B	B	MB	

⇒ Si CRST es B y EST es... y FST es ... entonces VST es:

Tabla 38. Base de reglas y valoraciones de descriptores. CRST fija baja y EST, FST variables en estimación de VST.

EST						F S T
MB	B	M	A	MA		
M	A	A	MA	MA	MA	
M	M	A	MA	MA	A	
B	M	M	A	A	M	
B	B	M	M	A	B	
MB	B	B	B	M	MB	

⇒ Si CRST es MB y EST es... y FST es ... entonces VST es:

Tabla 39. Base de reglas y valoraciones de descriptores en estimación de VST. CRST fija Muy Baja y EST, FST variables.

EST						F S T
MB	B	M	A	MA		
M	A	MA	MA	MA	MA	
B	M	A	MA	MA	A	
B	M	A	A	MA	M	
B	B	M	M	A	B	
B	B	B	B	M	MB	

6.3.3.3. SLD para evaluar la vulnerabilidad del subsistema social.

Las valoraciones de expertos en la determinación de la VSS están encaminadas a establecer los índices ESS, FSS y CRSS. En cada una de las entradas se definen los rangos de valoración y las respectivas bases de reglas.

6.3.3.3.1 Obtención de ESS

- Variables de entrada: en la obtención de ESS, se consideran tres descriptores, cuya valoración se da en los rangos y funciones de pertenencia presentados en la Tabla 40. Los descriptores son:

⇒ (D1) Xess1 - Características demográficas.

⇒ (D2) Xess2 - Recursos económicos en producción, industria y comercio

⇒ (D3) Xess3 - Indicadores de valores culturales

Tabla 40. Funciones de pertenencia para las entradas y salida en la obtención de ESS.

Rango	Expresión lingüística
0 – 20	Muy Baja (MB)
20 – 40	Baja (B)
40 – 60	Moderada (M)
60 – 80	Alta (A)
80 –100	Muy Alta (MA)

- Variable de Salida:

⇒ Yess – ESS - Índice de Exposición del Subsistema Social. Tiene correspondencia con funciones de pertenencia y expresiones lingüísticas de la Tabla 40.

- Base de Reglas (ESSB). Las posibles relaciones de los descriptores propuestos, en función de las valoraciones posibles se muestran en las tablas 41 42, 43, 44 y 45. La base de reglas se establece a partir de las combinaciones de la siguientes proposiciones:

⇒ Si D3 es MA y D1 es... y D2 es ... entonces ESS es:

Tabla 41. Base de reglas y valoraciones de descriptores en estimación de ESS.
D3 fijo muy alta y D1, D2 variables.

D1					
MB	B	M	A	MA	
B	M	A	MA	MA	MA
B	M	A	MA	MA	A
B	M	A	A	A	M
B	M	M	M	M	B
B	B	B	M	M	MB

⇒ Si D3 es A y D1 es... y D2 es ... entonces ESS es:

Tabla 42. Base de reglas y valoraciones de descriptores en estimación de ESS.
D3 fijo alta y D1, D2 variables.

D1					
MB	B	M	A	MA	
M	M	M	A	MA	MA
M	M	M	A	A	A
M	M	M	M	M	M
B	M	M	M	M	B
B	B	M	M	M	MB

⇒ Si D3 es M y D1 es... y D2 es ... entonces ESS es:

Tabla 43. Base de reglas y valoraciones de descriptores en obtención de ESS.
D3 fijo Moderado y D1, D2 variables.

D1					
MB	B	M	A	MA	
M	M	A	A	A	MA
M	M	M	A	A	A
B	M	M	M	M	M
B	B	M	M	M	B
MB	B	B	M	M	MB

⇒ Si D3 es B y D1 es... y D2 es ... entonces ESS es:

Tabla 44. Base de reglas y valoraciones de descriptores en obtención de ESS.
D3 fijo Bajo y D1, D2 variables.

D1					
MB	B	M	A	MA	
M	M	M	A	A	MA
B	M	M	A	A	A
B	B	M	M	M	M
B	B	B	M	M	B
MB	B	B	B	B	MB

⇒ Si D3 es MB y D1 es... y D2 es ... entonces ESS es:

Tabla 45. Base de reglas y valoraciones de descriptores en obtención de ESS.
D3 fijo Muy bajo y D1, D2 variables.

D1					
MB	B	M	A	MA	
B	M	M	A	A	MA
B	B	M	A	A	A
MB	B	M	M	M	M
MB	B	B	B	B	B
MB	MB	MB	B	B	MB

6.3.3.3.2. Obtención de FSS

- Variables de entrada: en la obtención de FSS, se consideran tres descriptores, cuya valoración se da en los rangos y funciones de pertenencia de la Tabla 46. Los descriptores son:

⇒ Xfss1 (D1) Estrato social

⇒ Xfss2 (D2) Escolaridad y capacitación frente a desastres

⇒ Xfss3 (D3) Presencia institucional y gobernabilidad

Tabla 46. Funciones de pertenencia para las entradas y salidas en la obtención de FSS.

Rango	Expresión lingüística
0 – 20	Muy Baja (MB)
20 – 40	Baja (B)
40 – 60	Moderada (M)
60 – 80	Alta (A)
80 – 100	Muy Alta (MA)

- Variable de salida:

⇒ Yfss - Índice de Fragilidad del Subsistema Social. Se valoran según los rangos , funciones de pertenencia y expresiones lingüísticas de la Tabla 46.

- Base de Reglas. FSSB. Las posibles relaciones de los descriptores, en función de las posibilidades de valoración planteadas se muestran en las Tablas 47, 48, 49, 50 y 51. Las relaciones se establecen a partir de la combinación de las siguientes proposiciones:

⇒ Si D3es MA y D1 es... y D2es ... entonces FSS es:

Tabla 47. Base de reglas y valoraciones de descriptores en obtención de FSS. D3 fijo Muy Alto y D1, D2 variables.

D1						D2
MB	B	M	A	MA		
B	MB	MB	MB	MB	MA	
B	B	MB	MB	MB	A	
M	B	B	B	MB	M	
M	M	B	B	B	B	
M	M	M	M	B	MB	

⇒ Si D3 es A y D1 es... y D2 es ... entonces FSS es:

Tabla 48. Base de reglas y valoraciones de descriptores en obtención de FSS.
D3 fijo Alto y D1, D2 variables.

D1						D2
MB	B	M	A	MA		
B	B	MB	MB	MB	MA	
B	B	B	MB	MB	A	
M	B	B	B	MB	M	
M	M	B	B	B	B	
A	M	M	B	B	MB	

⇒ Si D3 es M y D1 es... y D2 es ... entonces FSS es:

Tabla 49. Base de reglas y valoraciones de descriptores en obtención de FSS.
D3 fijo moderado y D1, D2 variables.

D1						D2
MB	B	M	A	MA		
M	M	B	B	MB	MA	
M	M	M	B	B	A	
A	M	M	M	B	M	
A	A	M	M	M	B	
A	A	A	M	M	MB	

⇒ Si D3 es B y D1 es... y D2 es ... entonces FSS es:

Tabla 50. Base de reglas y valoraciones de descriptores en obtención de FSS.
D3 fijo bajo y D1, D2 variables.

D1						D2
MB	B	M	A	MA		
M	M	M	M	M	MA	
A	M	M	M	M	A	
MA	A	M	M	M	M	
MA	A	A	M	M	B	
MA	MA	MA	A	M	MB	

⇒ Si D3 es MB y D1 es... y D2 es ... entonces FSS es:

Tabla 51. Base de reglas y valoraciones de descriptores en obtención de FSS.

D3 fijo Muy Bajo y D1, D2 variables.

D1						D2
MB	B	M	A	MA		
A	M	M	M	M	MA	
A	A	M	M	M	A	
MA	A	A	M	M	M	
MA	MA	A	A	M	B	
MA	MA	MA	A	A	MB	

6.3.3.3.3. Obtención de CRSS

- Variables de entrada: en la obtención de CRSS, se consideran tres descriptores, cuya valoración se da en los rangos y funciones de pertenencia que se presentan en la Tabla 52. Los descriptores son:

⇒ Xcrss1 (D1) Funcionalidad institucional de CLOPAD, CREPAD y Organismos de Rescate

⇒ Xcrss2 (D2) Capacidad instalada en recursos humanos, equipos de rescate y centros de atención post-evento.

⇒ Xcrss3 (D3) Capacidad económica y de gestión política de la unidad territorial

Tabla 52. Funciones de pertenencia para las entradas y salida en la obtención de CRSS.

Rango	Expresión lingüística
0 – 20	Muy Baja (MB)
20 – 40	Baja (B)
40 – 60	Moderada (M)
60 – 80	Alta (A)
80 –100	Muy Alta (MA)

- Variable de Salida:

⇒ Ycrss - Índice de Capacidad de Respuesta del Subsistema Social. Se valora con las funciones de pertenencia y rangos de la Tabla 52.

- Base de reglas. Las posibles relaciones de los descriptores, en función de las valoraciones establecidas se presentan en las Tablas 53, 54, 55, 56 y 57. Las relaciones se dan en función de las combinaciones de las siguientes proposiciones:

⇒ Si D3 es MA y D1 es... y D2 es ... entonces CRSS es:

Tabla 53. Base de reglas y valoraciones de descriptores en obtención de CRSS. D3 fijo muy alto y D1, D2 variables.

D1						D2
MB	B	M	A	MA		
M	A	A	MA	MA	MA	
M	M	A	MA	MA	A	
B	M	M	A	A	M	
B	M	M	M	A	B	
B	B	B	M	M	MB	

⇒ Si D3 es A y D1 es... y D2 es ... entonces CRSS es:

Tabla 54. Base de reglas y valoraciones de descriptores en obtención de CRSS. D3 fijo Alto y D1, D2 variables.

D1						D2
MB	B	M	A	MA		
M	M	A	MA	MA	MA	
B	M	A	A	MA	A	
B	M	M	A	A	M	
B	B	M	M	M	B	
B	B	B	B	M	MB	

⇒ Si D3 es M y D1 es... y D2 es ... entonces CRSS es:

Tabla 55. Base de reglas y valoraciones de descriptores en la obtención de CRSS. D3 fijo moderado y D1, D2 variables.

D1					
MB	B	M	A	MA	
M	M	M	A	A	MA
B	M	M	A	A	A
B	B	M	M	M	M
MB	B	B	M	M	B
MB	MB	B	B	B	MB

⇒ Si D3 es B y D1 es... y D2 es ... entonces CRSS es:

Tabla 56. Base de reglas y valoraciones de descriptores en la obtención de CRSS. D3 fijo bajo y D1, D2 variables.

D1					
MB	B	M	A	MA	
B	M	M	M	A	MA
B	M	M	M	M	A
B	B	M	M	M	M
MB	B	B	B	B	B
MB	MB	B	B	B	MB

⇒ Si D3 es MB y D1 es... y D2 es ... entonces CRSS es:

Tabla 57. Base de reglas y valoraciones de descriptores en la obtención de CRSS. D3 fijo Muy Bajo y D1, D2 variables.

D1					
MB	B	M	A	MA	
B	B	M	M	M	MA
B	B	B	M	M	A
MB	B	B	B	M	M
MB	B	B	B	B	B
MB	MB	MB	B	B	MB

6.3.3.3.4. Obtención del índice de vulnerabilidad del subsistema social. Posterior a la obtención de ESS, FSS y CRSS, estos se

consideran como las variables de entrada en la obtención del Índice de Vulnerabilidad del Subsistema Social.

- Variables de entrada: en la obtención de la VSS, se consideran los valores obtenidos para ESS, FSS y CRSS. Guardando correspondencia con los rangos y funciones de pertenencia presentados en la Tabla 58.

⇒ Xvss1 - ESS - Exposición del Subsistema Social

⇒ Xvss2 – FSS - Fragilidad del Subsistema Social

⇒ Xvss3 - CRSS - Capacidad de Respuesta del Subsistema Social

Tabla 58. Funciones de pertenencia para las entradas y salidas en la obtención de VSS

Rango	Expresión lingüística
0 – 20	Muy Baja (MB)
20 – 40	Baja (B)
40 – 60	Moderada (M)
60 – 80	Alta (A)
80 –100	Muy Alta (MA)

- Variable de salida:

⇒ Yvss - Vulnerabilidad del Subsistema Social. Se valora con las funciones de pertenencia y expresiones lingüísticas de la Tabla 58.

- Base de reglas (VSSB). Las relaciones que se pueden dar entre las variables de entrada en el SLD para el estimar VSS se presentan en las Tablas 59, 60, 61, 62 y 63. Las relaciones se establecen a partir de las combinaciones de las siguientes proposiciones:

⇒ Si CRSS es MA y ESS es... y FSS es ... entonces VSS es:

Tabla 59. Base de reglas y valoraciones de descriptores en la obtención de VSS. CRSS fijo Muy Alto y ESS, FSS variables.

ESS					
MB	B	M	A	MA	
B	B	M	A	A	MA
B	B	M	M	A	A
MB	B	B	M	M	M
MB	MB	B	B	B	B
MB	MB	MB	B	B	MB
					F S S

⇒ Si CRSS es A y ESS es... y FSS es ... entonces VSS es:

Tabla 60. Base de reglas y valoraciones de descriptores en la obtención de VSS. CRSS fijo Alto y ESS, FSS variables.

ESS					
MB	B	M	A	MA	
B	M	M	A	A	MA
B	M	M	M	A	A
MB	B	M	M	M	M
MB	B	B	M	M	B
MB	MB	MB	B	B	MB
					F S S

⇒ Si CRSS es M y ESS es... y FSS es ... entonces VSS es:

Tabla 61. Base de reglas y valoraciones de descriptores en la obtención de VSS. CRSS fijo Moderado y ESS, FSS variables.

ESS					
MB	B	M	A	MA	
B	M	M	A	MA	MA
B	B	M	A	A	A
B	B	M	M	A	M
MB	B	B	B	B	B
MB	MB	B	B	B	MB
					F S S

⇒ Si CRSS es B y ESS es... y FSS es ... entonces VSS es:

Tabla 62. Base de reglas y valoraciones de descriptores en la obtención de VSS. CRSS fijo Bajo y ESS, FSS variables.

ESS						FSS
MB	B	M	A	MA		
M	A	A	MA	MA	MA	
M	M	A	MA	MA	A	
B	M	M	A	A	M	
B	B	M	M	A	B	
MB	B	B	B	M	MB	

⇒ Si CRSS es MB y ESS es... y FSS es ... entonces VSS es:

Tabla 63. Base de reglas y valoraciones de descriptores en la obtención de VSS. CRSS fijo Muy Bajo y ESS, FSS variables.

ESS						FSS
MB	B	M	A	MA		
M	A	MA	MA	MA	MA	
B	M	A	MA	MA	A	
B	M	A	A	MA	M	
B	B	M	M	A	B	
B	B	B	B	M	MB	

6.3.3.4. Obtención del índice de vulnerabilidad del sistema urbano.

Para el establecimiento del índice de vulnerabilidad del sistema urbano VSU, se consideran los datos obtenidos en la simulación de VSN, VST y VSS. Estos datos son considerados las variables entrada Xvsu1, Xvsu2 y Xvsu3, y guardan correspondencia con los rangos y funciones de pertenencia dados en la Tabla 64.

- Variables de Entrada

⇒ Xvsu1 – VSN – Vulnerabilidad del Subistema Natural

⇒ Xvsu2 - VST – Vulnerabilidad del Subsistema Tecnológico

⇒ Xvsu3 – VSS – Vulnerabilidad del Subsistema Social

Tabla 64. Funciones de pertenencia para las entradas y la salida en la obtención de VSU

Rango	Expresión lingüística
0,0 – 0,20	Muy Bajo (MB)
0,20 – 0,40	Bajo (B)
0,40 – 0,60	Moderado (M)
0,60 – 0,80	Alto (A)
0,80 – 1,00	Muy Alto (MA)

- Variable de salida: Yvsu – Índice e Vulnerabilidad del Sistema Urbano. Expresado en rangos y funciones de pertenencia de la tabla 64.
- Base de reglas (VSUT). Las relaciones que se dan entre los valores de vulnerabilidad de cada subsistema, y en función de las valoraciones posibles que estos puedan tener, se presentan en las Tablas 65, 66, 67, 68 y 69. Las relaciones se establecen a partir de la combinación de las siguientes proposiciones:

⇒ Si VSN es MA y VST es... y VSS es... entonces VSU es:

Tabla 65. Base de reglas y valoraciones de descriptores en la obtención de VSU. VSN fijo muy alto y VST, VSS variables.

VST						VSS
MB	B	M	A	MA		
M	A	MA	MA	MA	MA	
M	M	A	MA	MA	A	
M	M	A	A	MA	M	
M	M	M	M	A	B	
B	M	M	M	M	MB	

⇒ Si VSN es A y VST es... y VSS es... entonces VSU es:

Tabla 66. Base de reglas y valoraciones de descriptores en la obtención de VSU. VSN fijo alto y VST, VSS variables.

VST					
MB	B	M	A	MA	
M	A	A	MA	MA	MA
M	M	A	A	MA	A
M	M	M	A	A	M
B	M	M	M	A	B
B	B	M	M	M	MB

⇒ Si VSN es M y VST es... y VSS es... entonces VSU es:

Tabla 67. Base de reglas y valoraciones de descriptores en la obtención de VSU. VSN fijo moderado y VST, VSS variables.

VST					
MB	B	M	A	MA	
M	M	A	A	MA	MA
M	M	M	A	A	A
B	M	M	M	A	M
B	B	M	M	M	B
B	B	B	M	M	MB

⇒ Si VSN es B y VST es... y VSS es... entonces VSU es:

Tabla 68. Base de reglas y valoraciones de descriptores en la obtención de VSU. VSN fijo Bajo y VST, VSS variables.

VST					
MB	B	M	A	MA	
M	M	A	A	A	MA
M	M	M	A	A	A
B	M	M	M	M	M
B	B	B	M	M	B
MB	B	B	M	M	MB

⇒ Si VSN es MB y VST es... y VSS es... entonces VSU es:

Tabla 69. Base de reglas y valoraciones de descriptores en la obtención de VSU. VSN fijo Muy Bajo y VST, VSS variables.

VST						V S S
MB	B	M	A	MA		
M	M	M	A	A	MA	
B	M	M	A	A	A	
B	B	M	M	M	M	
MB	B	B	B	M	B	
MB	MB	B	M	M	MB	

6.3.3.5. **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 13, 14, 15 y 16.

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.

En total se diseñaron 4 operadores difusos con las siguientes especificaciones:

- Veintidos variables de entrada.
- Trece bloques con bases de reglas con un total de 1205 proposiciones de la forma Si...Entonces, en las que se interrelacionan todas las posibles implicaciones que determinan la vulnerabilidad de cada uno de los subsistemas y del sistema urbano.

Figura 13. Operador difuso para estimar vulnerabilidad del subsistema natural

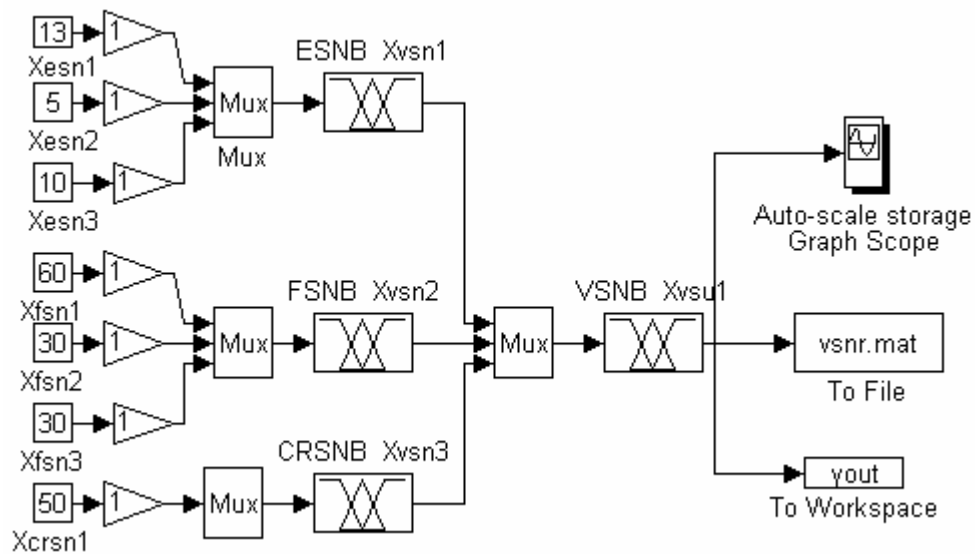


Figura 14. Operador difuso para estimar Vulnerabilidad del Subsistema Tecnológico

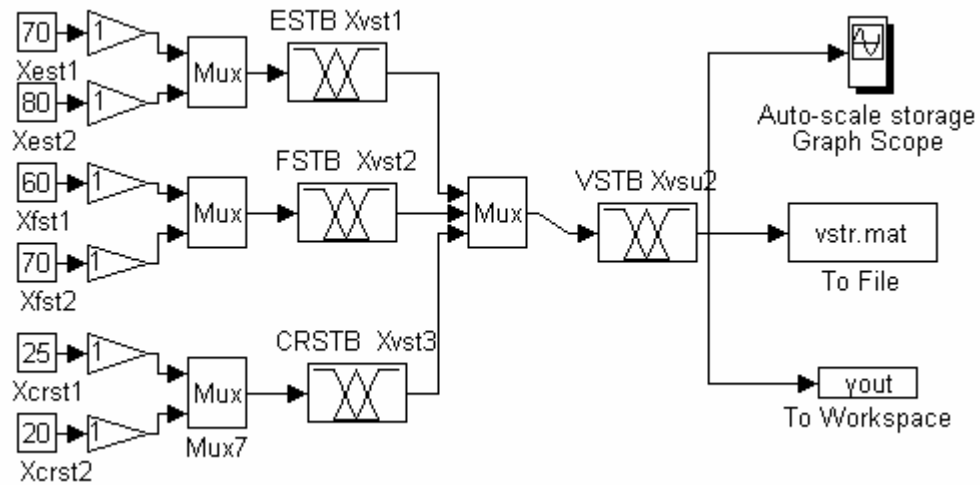


Figura 15. Operador Difuso para estimar la vulnerabilidad del Subsistema Social

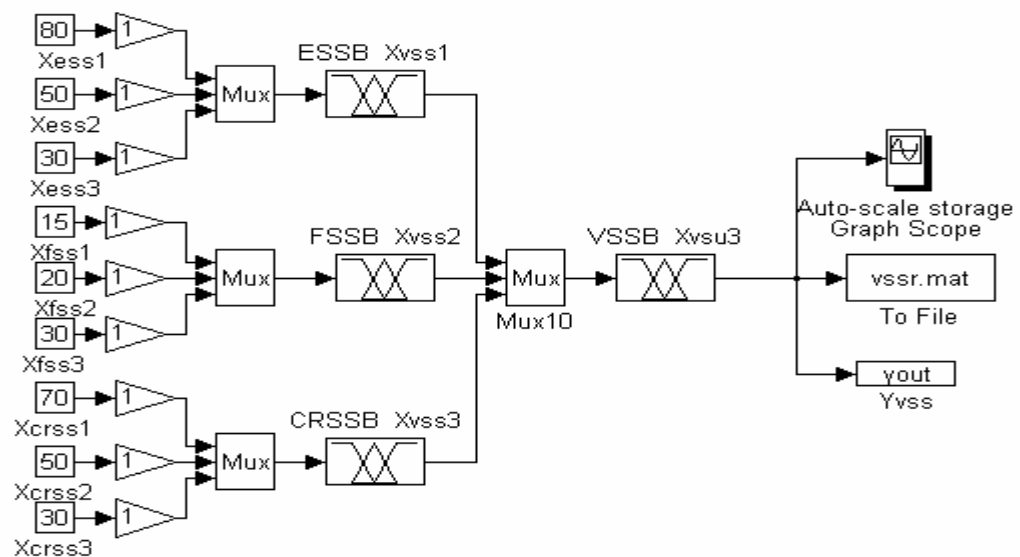
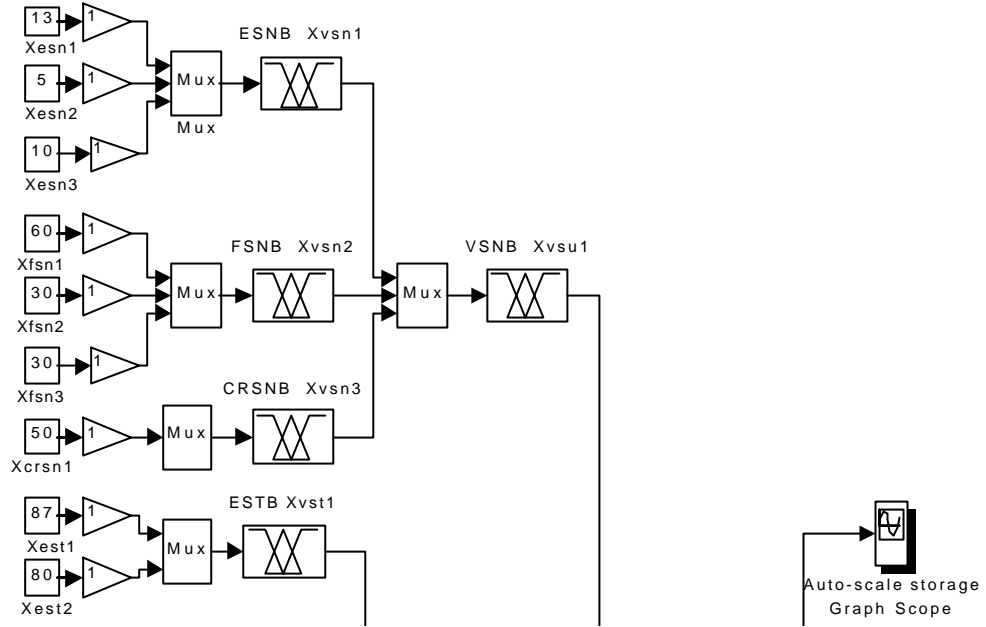


Figura 16. Operador Difuso para estimar la vulnerabilidad del sistema urbano



7. APLICACIÓN DEL MODELO

A partir del modelo de sistema urbano implementado y el Sistema de Lógica Difusa 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.

7.1. 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 se caracterizándose por una topografía muy pendiente. Se localiza según las coordenadas geográficas 5° 04' 15.3" Latitud Norte y 75° 30' 52.1 Longitud Oeste de Greenwich, cuyas planas son: 52.391.13 metros norte y 173.727.04 metros Este. Altura del plano de proyección 2150 metros sobre el nivel medio del mar en Buenaventura. La localización dentro del territorio nacional con respecto a la distribución de la población y la actividad económica es altamente ventajosa. Se encuentra en el interior del llamado "Triángulo de Oro" conformando el espacio comprendido entre las ciudades de Bogotá, Medellín y Cali, los tres principales centros de consumo de Colombia (POT, 2001)

El área urbana de Manizales tiene 5.416 Ha. (Fuente IGAC, 2001). Según el artículo 27 del acuerdo 465 de 2000, la conformación urbana del municipio de Manizales quedó constituida por once comunas. De ellas 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.

Asímismo, 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”.

A continuación se presentan algunos aspectos generales de cada una de las comunas y se describe el procedimiento y los resultados de la simulación realizada empleando el modelo implementado.

7.2. EVALUACIÓN DE LA VULNERABILIDAD COMUNA 2. Municipio de Manizales.

7.2.1. Aspectos generales de la Comuna Dos. La comuna dos está conformada por 8 barrios: Asís, Avanzada, San Ignacio, Galán, Estrada, Las Delicias, San José y Colón. Los estratos sociales predominantes son el 1 y 2, presenta una densidad poblacional de las más altas 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 – Mamposteria). 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, Asis, 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 Chinchina (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.

La información de cada uno de los subsistemas de la comuna dos, natural, social y tecnológico, de acuerdo con el modelo de sistema urbano planteado en este trabajo, se obtiene de los documentos que soportan el Plan de Ordenamiento Territorial y la Agenda para la Gestión Ambiental del Municipio de Manizales (2002) y ha sido valorada de acuerdo con los rangos y expresiones lingüísticas de los operadores difusos diseñados para el establecimiento de los indicadores para la evaluación de la vulnerabilidad. Proceso que a continuación se describe.

7.2.2. Valoración de entradas en el SLD. En la valoración de las entradas se tienen en cuenta los descriptores para obtener VSN, FSN y CRSN con datos reales de la comuna dos de Manizales.

7.2.2.1. Obtención de VSN. En la Tabla 70 se relacionan los descriptores y su respectivas valoraciones. Así como el resultado de la simulación obtenida en el operador difuso diseñado para VSN.

Tabla 70. 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 construída, bajo porcentaje de suelo para procesos de expansión urbana.	0.15	0.13 - MB - 13
	Red hídrica: principal característica es la Q. Olivares como límite al norte de la Comuna. Escasos cuerpos de agua.	0.10	
	Area 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 areas con potencialidad para la inducción de deslizamientos. Altas pendientes. Intensidades altas en los últimos registros sísmicos (1979 y 1999).	0.80	0.693- A -69,3
	La dinámica climática es variable con periodos de lluvia fuertes.	0.50	
	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	
CRSN	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

Los resultados obtenidos para ESN, FSN y CRSN se ingresan como valores de entrada en la Simulación de VSN, como se muestra en la Tabla 71.

Tabla 71. Valores de entrada y de salida para la simulación de VSN

Valores de Entrada		Valor de Salida en la Simulación VSN
X1 esn	13	0.6278- A - 63
X2 fsn	69	
X3 crsn	33	

7.2.2.2. Obtención de VST. En la tabla 72 se presentan las valoraciones hechas a los descriptores para estimar el índice de vulnerabilidad del subsistema tecnológico.

Tabla 72. 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	0.8623 – MA - 86
	Viviendas en laderas y en zonas de rellenos. El área edificada es alta y expuesta	0.80	
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	0.7735 – A - 77
	Edificaciones con tipología en bahareque y mixta con deficiente estado estructural. Edificaciones muy antiguas.	0.70	
CRST	Inoperatividad de planes de mejoramiento y de contingencia para el reforzamiento estructural de edificaciones.	0.20	0.172 – MB - 17
	Bajo porcentaje de edificaciones asegurada. Los procesos de reubicación de viviendas para reubicación no se concretan.	0.20	

Los valores obtenidos en cada uno de estos índices se consideran como valores de Entrada en la simulación de VST. (Tabla 73).

Tabla 73. Valores de entrada y de salida para la simulación de VST

Valores de Entrada		Valor de Salida en la Simulación VST
X1 EST	86	0.8687– MA – 87
X2 FST	77	
X3 CRST	17	

El resultado numérico obtenido está de acuerdo con lo establecido en la base de reglas definida en la tabla 38. Cuando la exposición es muy alta, la fragilidad es alta y la capacidad de respuesta es muy baja, la vulnerabilidad del sistema tecnológico es muy alta. En los valores para el índice de capacidad de respuesta bajos y muy bajos, potencian la vulnerabilidad del sistema.

7.2.2.3. Obtención de VSS. Se presentan en la Tabla 74 los resultados de la valoración realizada a los descriptores para establecer ESS, FSS y CRSS.

Tabla 74. Valoración de descriptores vulnerabilidad del subsistema social. Caso comuna 2. Manizales.

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	0.5386– M – 54
	Recursos económicos en comercio, pocas industrias.	0.50	
	Moderado valor arquitectónico e histórico para la ciudad. Representatividad cultural.	0.20	
FSS	Estratos sociales predominantes 1 y 2.	0.15	0.8693 – MA - 87
	Bajo nivel de escolaridad y de capacitación frente a desastres.	0.20	
	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	
CRSS	Para la ciudad de Manizales existe un satisfactorio funcionamiento y operatividad de CLOPAD y de los organismos de rescate.	0.50	0.3715 - M - 37
	La capacidad instalada en recursos humanos y técnicos para la APD es medianamente satisfactoria.	0.50	
	Actualmente la capacidad económica del Municipio es limitada. Igualmente la capacidad económica para recuperación de la comuna es muy baja.	0.20	

Los resultados obtenidos se consideran valores de entrada en la Simulación de VSS. (Tabla 75).

Tabla 75. Valores de entrada y de salida para la simulación de VSS

Valores de Entrada		Valor de Salida en la Simulación VSS
X1 ESS	54	0.6835 – A - 68
X2 FSS	87	
X3 CRSS	37	

7.2.3. Simulación y resultados. Obtención del índice de vulnerabilidad del sistema urbano. Los valores obtenidos para la vulnerabilidad de cada uno de los subsistemas se ingresan en el operador difuso para la simulación de la vulnerabilidad del sistema urbano. (Tabla 76).

Tabla 76. Valores de entrada y de salida para la simulación de VSU

Valores de Entrada		Valor de Salida en la Simulación VSU
X1 VSN	63 – A	0.69 - A - 69
X2 VST	87 – MA	
X3 VSS	68 – A	

7.2.4. Análisis de los Resultados. En la Tabla 77 se presentan los resultados obtenidos en la simulación del Índice de Vulnerabilidad del Sistema Urbano. Las valoraciones realizadas a los diferentes descriptores y el proceso de simulación estableció un valor para el índice de **0.69**, lo que representa una vulnerabilidad **ALTA**.

Los resultados del índice de vulnerabilidad para cada una de los subsistemas, 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

presentada en la Tabla 67, según la cuál: Sí VSN es A, VST es MA y VSS es A, Entonces VSU es ALTA.

Como se puede apreciar en la Tabla 77, 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 entretejer 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 77. Resultados en el cálculo de la vulnerabilidad de la comuna 2.

Descriptores		Entradas Subsistema		Vulnerabilidad Subsistema		Vulnerabilidad Sistema
D1 Muy Bajo	0.15	ESN Muy Bajo	0.13	VSN Alta	0.63	VSU Alta 0.69
D2 Muy Bajo	0.10					
D3 Muy Bajo	0.15					
D1 Alto	0.80	FSN Alto	0.69			
D2 Medio	0.50					
D3 Alto	0.70					
D1 Bajo	0.30	CRSN Bajo	0.33	VST Muy Alta	0.87	
D1 Alto	0.70	EST Muy Alto	0.86			
D2 Muy Alto	0.80					
D1 Alto	0.60	FST Alto	0.77			
D2 Alto	0.70					
D1 Bajo	0.20	CRST Muy Bajo	0.17			
D2 Bajo	0.20	ESS Medio	0.54			
D1 Muy Alto	0.80					
D2 Medio	0.50					
D3 Bajo	0.20	FSS Muy Alto	0.87			
D1 Muy Bajo	0.15					
D2 Bajo	0.20					
D3 Muy Bajo	0.15	CRSS Bajo	0.37			
D1 Medio	0.50					
D2 Medio	0.50					
D3 Bajo	0.20					

7.3. EVALUACIÓN DE LA VULNERABILIDAD COMUNA 6. Municipio de Manizales.

7.3.1. Aspectos generales Comuna 6 (Barrios Baja y Alta Suiza, Milán, Colseguros, Residencias Manizales, Laureles). La comuna seis ubicada al nororiente de la ciudad de Manizales, se caracteriza por un predominante uso del suelo para vivienda y un área industrial en el sector de la Alta Suiza. Los estratos sociales predominantes son el 3 y 4 con densidades poblacionales medias (150 – 300 Hab/ha). Los barrios incluidos tienen una población cercana a los 9500 habitantes.

Las edificaciones presentan una tipología constructiva caracterizada principalmente por la mampostería y en menor proporción por una mezcla en bahareque y mampostería. La cobertura de servicios públicos es excelente llegando a porcentajes del 100%, exceptuando el servicio de teléfono. En la zona se encuentra la planta de potabilización de aguas Niza, que surte gran parte del municipio y además se encuentra el circuito primario de energía eléctrica de la Alta Suiza.

7.3.2. Valoración de entradas en el SLD. En este caso se utilizaron Los mismos operadores difusos esquematizados en el caso anterior. En la valoración de los descriptores para determinar los índices ESN, FSN, CRSN, EST, FST, CRST, ESS, FSS, CRSS se consideraron como principales amenazas naturales los sismos y los deslizamientos. Con base en el conocimiento tanto científico como en el registro histórico de los fenómenos naturales y sus impactos, se establecen las valoraciones que se convierten en los valores de entrada para el cálculo del Índice de Vulnerabilidad en la Comuna.

7.3.2.1. Obtención de VSN. La valoración de los descriptores que determinan este indicador se muestra en las tablas 78 y 79.

Tabla 78. Valoración de descriptores vulnerabilidad del subsistema natural comuna 6.

FACTOR	DESCRIPTORES – Características de las Entradas	Valoración Entradas	Resultado Simulación Salidas
ESN	Moderado porcentaje de area de suelos expuesta a fenómenos naturales, area de bajas pendientes y altamente urbanizadas. Area de renovación urbana de la Baja Suiza.	0.30	0.136 – MB - 14
	No existen cuerpos de agua importantes	0.05	
	Bajo porcentaje de bosques con relictos de flora y fauna hacia el sector de Colseguros	0.10	
FSN	10 % del area presenta llenos, suelo característico de cenizas volcánicas con pendientes medias – bajas. Presencia de la falla el Perro. Históricamente se presentaron altos impactos por sismo (1979) y baja dinámica en procesos de remoción en masa.	0.70	0.578– M– 58
	La dinámica climática es variable con periodos de lluvia fuertes	0.40	
	La contaminación más significativa es atmosférica. Bajos niveles de contaminación y degradación del suelo.	0.30	
CRSN	Las características climáticas húmedas de la zona de vida, dan una capacidad de recuperación entre baja y moderada.	0.40	0.477 – M – 48

Los valores de ESN, FSN y CRSN se ingresan como valores de Entrada en la Simulación de VSN.

Tabla 79. Valores de entrada y de salida para la simulación de VSN. Comuna 6.

Valores de Entrada		Valor de Salida en la Simulación VSN
X1 esn	14	0.376 –B - 38
X2 fsn	58	
X3 crsn	48	

7.3.2.2. Obtención de VST. Las valoraciones para los descriptores en la estimación de EST, FST y CRST se presentan en la Tabla 80 y Tabla 81.

Tabla 80. Valoración de descriptores en la obtención del subsistema tecnológico.
Comuna 6.

INDICE	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 adecuada. Planta niza, Circuito eléctrico Alta Suiza.	0.87	0.8639 – MA – 86
	Area 80 % urbanizada, edificaciones en vivienda, escuelas, colegios. Incremento de edificaciones de más de dos pisos.	0.80	
FST	Red de acueducto y alcantarillado en procesos de renovación, red eléctrica y de comunicaciones superficial, vías en aceptable estado. Area en proceso de renovación urbana.	0.40	0.401 – M - 40
	Edificaciones con tipología en alto porcentaje de mampostería.	0.35	
CRST	Planes de mejoramiento de infraestructura operan satisfactoriamente, favorecidos por el estrato socioeconómico.	0.50	0.50 – M - 50
	Moderado porcentaje de edificaciones asegurada	0.50	

Los valores obtenidos de EST, FST y CRST se consideran como valores de entrada en la Simulación de VST.

Tabla 81. Valores de entrada y de salida para la simulación de VST. Comuna 6.

Valores de Entrada		Valor de Salida en la Simulación VST
X1 EST	86	0.4019 – M – 40
X2 FST	40	
X3 CRST	50	

7.3.2.3. Obtención de VSS. La valoración de descriptores para la estimación de ESS, FSS y CRSS en la simulación de VSS se presentan en la Tabla 82 y 83.

Tabla 82. Valoración de descriptores vulnerabilidad del subsistema social comuna 6.

FACTOR	DESCRIPTORES – Características de las Entradas	Valoración Entradas	Resultado Simulación Salidas
ESS	Moderada - Alta densidad de población por unidad de area construida,	0.60	0.5278– M – 53
	Recursos económicos en comercio, zona industrial de la alta suiza.	0.50	
	Bajo nivel de exposición de recursos cuturales.	0.20	
FSS	Estratos sociales predominantes 3, 4 y 5	0.65	0.3364– B – 34
	Medio –Alto nivel de escolaridad y de capacitación frente a desastres.	0.55	
	Alta presencia institucional, satisfactoria intervención del gobierno en asuntos sociales y culturales	0.60	
CRSS	Para la ciudad de Manizales existe un satisfactorio funcionamiento y operatividad de CLOPAD y de los organismos de rescate.	0.70	0.6596 - A – 66
	La capacidad instalada en recursos humanos y técnicos para la APD es medianamente satisfactoria.	0.60	
	Actualmente la capacidad económica del Municipio es limitada. Igualmente la capacidad económica para recuperación de la comuna es media – alta.	0.60	

Los valores obtenidos de ESS, FSS y CRSS se consideran valores de entrada en la Simulación de VSS.

Tabla 83. Valores de entrada y de salida para la simulación de VSS. Comuna 6.

Valores de Entrada		Valor de Salida en la Simulación VSS
X1 ESS	53	0.3544 – B - 35
X2 FSS	34	
X3 CRSS	66	

7.3.3. Simulación y resultados. Obtención del índice de vulnerabilidad del sistema urbano. Los valores obtenidos para la vulnerabilidad de los subsistemas se ingresan en el operador difuso para la simulación de la vulnerabilidad del sistema urbano. (Tabla 84).

Tabla 84. Valores de entrada y de salida para la simulación de VSU. Comuna 6.

Valores de Entrada		Valor de Salida en la Simulación VSU
X1 VSN	38	0.396 – B - 40
X2 VST	40	
X3 VSS	35	

7.3.4 Análisis de los resultados. En la Tabla 85 se presentan los resultados de la vulnerabilidad de cada subsistema y el Índice de Vulnerabilidad del Sistema Urbano para la comuna 6. El valor obtenido es de **0.40** que corresponde a una vulnerabilidad **BAJA**. Mostrando una tendencia a ser catalogada como moderada.

La vulnerabilidad en los subsistemas natural, tecnológico y social son de 0.38 - Baja, 0.40 - Moderada y 0.35 - Baja, respectivamente. Estos resultados están conformes con lo planteado en la Tabla 68, en la que se estableció que si VSN es B, VST es M y VSS es B, Entonces la Vulnerabilidad es BAJA.

En la configuración del resultado existieron valores que atenuaron la vulnerabilidad y condujeron a que ésta fuera BAJA entre ellos se pueden resaltar el valor de la fragilidad del sistema social que es baja y la capacidad de respuesta del sistema social que es alta.

Entre los aspectos que tienden a potenciar la vulnerabilidad, de acuerdo con los resultados obtenidos, se tiene la exposición de los subsistemas tecnológico (0,86) y social (0,53). Lo que corresponde especialmente a la amplia urbanización en los barrios de la comuna, y que representa el aumento de la infraestructura para edificaciones, líneas vitales y obviamente el incremento de la población expuesta.

Como se puede apreciar en la Tabla 85, los aspectos más influyentes en los subsistemas y que determinaron el valor de VSU obtenido están referidos fundamentalmente a la EST (0,86), ESS (0,53) y FSN (0.58):

Tabla 85. Resultados índice de vulnerabilidad del sistema urbano. Comuna 6.

Descriptores		Entradas Subsistema		Vulnerabilidad Subsistema		Vulnerabilidad Sistema
D1 Bajo	0.30	ESN Muy Bajo	0.14	VSN Bajo	0.38	VSU Baja 0.40
D2 Muy Bajo	0.05					
D3 Muy Bajo	0.10					
D1 Alto	0.70	FSN Medio	0.58			
D2 Medio	0.40					
D3 Bajo	0.30					
D1 Medio	0.40	CRSN Medio	0.48	VST Medio	0.40	
D1 Muy Alto	0.87	EST Muy Alto	0.86			
D2 Muy Alto	0.80					
D1 Medio	0.40	FST Medio	0.40			
D2 Bajo	0.35	CRST Medio	0.50			
D1 Medio	0.50					
D2 Medio	0.50	ESS Medio	0.53	VSS Bajo	0.35	
D1 Alto	0.60					
D2 Medio	0.50					
D3 Bajo	0.20	FSS Medio	0.34			
D1 Alto	0.65					
D2 Medio	0.55					
D3 Alto	0.60	CRSS Alto	0.66			
D1 Alto	0.70					
D2 Alto	0.60					
D3 Alto	0.60					

Los datos obtenidos para la vulnerabilidad de cada uno de los subsistemas muestran que la comuna, específicamente en los barrios estudiados, tiene la principal susceptibilidad en el sistema tecnológico. Las características sociales de los barrios involucrados son un factor que contribuye en la atenuación de los resultados de vulnerabilidad. Hecho que se ve reflejado esencialmente por el estrato social predominante, el grado de escolaridad, las características económicas y la operatividad institucional en el sector. Así mismo las características del sistema natural pueden haber sido atenuadas por el tipo de construcciones y sus características de resistencia.

8. 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 y numérica. Para la primera, se hace referencia a información proveniente de opiniones y valoraciones de expertos y en el segundo caso 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 promisorio 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. El enfoque holístico de la vulnerabilidad debe permitir no sólo la relación y el manejo integrado de elementos de carácter social, económico, técnico, físico, cultural, ideológico y político, sino que debe considerar el análisis de cada uno de éstos elementos en el tiempo, esto es su construcción histórica, el estado actual y la prospectiva.
- La determinación de la vulnerabilidad de un sistema urbano, tiene como objetivo fundamental establecer las acciones prioritarias que deberán realizarse para disminuir el riesgo y a la vez para elaborar un plan de acción para la reducción frente a la eventualidad de ocurrencia de un fenómeno natural. El modelo establecido permite determinar las acciones prioritarias, en función de los valores de vulnerabilidad que

esten en el rango de altos y muy altos en cada uno de los subsistemas.

La obtención de un indicador de vulnerabilidad del sistema urbano facilita la comprensión y operativización de las acciones necesarias en la mitigación, esencialmente por que en su construcción se han tenido en cuenta todas las variables de tipo natural, social y tecnológico, y por su relación en un Sistema de Lógica Difusa, se pueden establecer aquellos componentes que inciden en que su valor sea alto.

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.

- En los estudios sobre desastres ocurridos por fenómenos naturales y consecuentemente los estudios realizados en gestión de riesgos en sistemas urbanos, es fundamental una evaluación de la vulnerabilidad en la que se analice integralmente el papel y la participación de cada uno de los componentes del sistema.

Igualmente, 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.

9. RECOMENDACIONES

- Futuros trabajos sobre el tema del presente estudio, deberán profundizar en el perfeccionamiento del software basado en lógica difusa implementado para la evaluación de la vulnerabilidad.
- Es necesario profundizar en la concreción de los descriptores y en el establecimiento de otros que permitan establecer con claridad los aspectos fundamentales de la vulnerabilidad como la exposición, la fragilidad y la capacidad de respuesta de cada uno de los subsistemas.
- Como un aporte en la implementación del modelo establecido, se recomienda un abordaje de planes de acción para disminuir la vulnerabilidad a partir de las acciones generales propuestas en la Tabla 86. Aclarando que es una propuesta realizada en términos generales para enfrentar aspectos de exposición, fragilidad y capacidad de respuesta de los subsistemas natural, tecnológico y social en cualquier sistema urbano.

Tabla 86. Planes de acción para la mitigación de vulnerabilidad en un sistema urbano.

		Acciones
N A T U R A L	ESN	⇒ Recuperación de taludes y establecimiento de Zonas de Reserva Urbana ⇒ Planes de recuperación cuerpos de agua. ⇒ Establecimiento de corredores biológicos en ambientes urbanos.
	FSN	⇒ Red de monitoreo atmosférico. ⇒ Estudios de Microzonificación Sísmica. ⇒ Estudios detallados sobre geología e hidrología en el orden local y regional. Uso de informática, SIGs y Mapeo. ⇒ Estudio de capacidad de uso del suelo basado en limitaciones y restricciones. ⇒ Planes de Ordenamiento de las cuencas hidrográficas
	CRSN	⇒ Planes de inversión en proyectos ambientales, conservación de cuencas, control de la erosión y control de la contaminación.
T E C N O L	EST	⇒ Procesos de planeación para la ubicación de infraestructura física.
	FST	⇒ Planes de Mejoramiento de vivienda urbana. ⇒ Planes de Reforzamiento estructural de edificaciones, hospitales y escuelas. ⇒ Planes de Monitoreo y Mantenimiento a la red de acueducto y alcantarillado. ⇒ Planes de Mejoramiento y actualización de la red eléctrica y de gas domiciliario. ⇒ Programa de control y verificación al cumplimiento de códigos y estándares de construcción. ⇒ Planes de mantenimiento a obras de estabilidad de taludes y laderas.
	CRST	⇒ Elaboración de planes de mejoramiento y actualización de redes en líneas vitales. ⇒ Establecimiento presupuestal para el mejoramiento de la infraestructura en servicios públicos, mejoramiento de vivienda y de equipamientos colectivos.
S O C I A L	ESS	⇒ Planes de Control a la expansión urbana en áreas con suelos inestables y/o vulnerables y/o altamente expuestos. ⇒ Aseguramiento de empresas. Industrias y de sus recursos técnicos, materias primas e inventarios.
	FSS	⇒ Planes de capacitación en APD para los actores sociales y de concientización sobre las amenazas. ⇒ Implementación de Sistemas de Alerta ⇒ Plan de mitigación de vulnerabilidad y riesgos amarrados a Planes de Ordenamiento Territorial y Planes de Desarrollo de la unidad territorial. ⇒ Planes de fortalecimiento de la investigación científica sobre desastres. Capacitación en redes de medición, recolección, almacenamiento e interpretación de datos. Uso de la informática. Fortalecimiento de los procesos de comunicación del conocimiento obtenido a todos los actores de la sociedad. ⇒ Planes de incentivos para financiación de proyectos de mejoramiento y reforzamiento de edificaciones. ⇒ Integración de la sociedad con el estado, el sector educativo y el sector productivo para capacitación adecuada sobre el tema de las amenazas naturales y sus impactos, formulación de planes de emergencia y de evacuación. ⇒ Participación de la sociedad civil en los procesos de planeación de la unidad territorial.
	CRSS	⇒ Planes de mejoramiento para la operatividad y funcionalidad de los CLOPAD y CREPAD. ⇒ Planes de inversión en capacitación de recursos humanos en APD. ⇒ Planes de Inversión en mejoramiento de la capacidad instalada en equipos y maquinaria para la APD. Fortalecimiento de Cruz Roja, defensa civil y otros organismos de rescate y socorro. ⇒ Plan de Aseguramiento de las edificaciones y del sector industrial y comercial. ⇒ Establecimiento de una red de información entre la sociedad, la alcaldía, la gobernación y la presidencia a través del Sistema Nacional de APD y con el Comité Interamericano sobre la reducción de desastres naturales. ⇒ Elaboración de planes de restauración y repotenciación de las actividades económicas en alto riesgo.

10. BIBLIOGRAFIA

Anderson M.B., 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.

Angel Maya, Augusto. (1996). El Reto de la Vida. *Ecosistema y Cultura.* Serie Construyendo el Futuro. ECOFONDO.

Angel Maya, Augusto (1998). El Retorno a la Tierra. *Introducción a un método de interpretación ambiental.* MINISTERIO DE EDUCACIÓN NACIONAL – MINISTERIO DEL MEDIO AMBIENTE. Santa Fé de Bogotá D.C.

Aracil, Javier. (2000) Dinámica de sistemas. Publicaciones de Ingeniería de Sistemas – Isdefe. 4ª edición. Madrid, 2000.

Bertalanffy, Ludwig Von. (1950) *La teoría de los sistemas abiertos en la física y la biología.* Science, vol. III. (Citado por G.F. Chadwick en *Una Visión Sistémica del Planeamiento.* Editorial Gustavo Gili S.A. Barcelona. 1973).

Bertalanffy, Ludwig Von (1968). *Teoría General de Sistemas.* Brazillier, Nueva York (Citado por F. Capra 1999).

Bignoli, Arturo J. (1997). Lógica Borrosa. Aplicaciones a Problemas Estructurales. En Revista Internacional de Métodos Numéricos para Cálculo y Diseño en Ingeniería. Vol. 13, 1, p 33 – 55.

Briguglio, Lino (1999). Measuring Vulnerability. University of Malta.

Capra, Fritjof. (1999) La trama de la vida. Editorial Anagrama. 2ª. Edición.

Cardona, O.D. (1985) *Hazard, Vulnerability and Risk Assessment*, unedited working paper, Institute of earthquake Engineering Seismology IZIS, Skopje, Yugoslavia.

Cardona, O. D. (2001 a) *“Riesgo, Desastres y Sostenibilidad. Conceptos Fundamentales”*. Curso sobre Gestión de Riesgos. Universidad Nacional de Colombia. Banco Interamericano de Desarrollo. Manizales.

Cardona, O.D. (2001 b). *Concepto, Tipología y Características de las amenazas naturales y antrópicas*: En “Curso sobre Gestión de Riesgos”. Universidad Nacional de Colombia. Banco Interamericano de Desarrollo. Manizales. 2001

Cardona, O. D.(2001c) La necesidad de repensar de manera holística los conceptos de vulnerabilidad y riesgo. International Work – Conference on Vulnerability in Disaster Theory and Practice. Wageningen – Holanda.

Cardona, O. Y Hurtado, J. E. (2000). Holistic Seismic Risk Estimation of a Metropolitan Center. Application for Bogotá, Colombia” *Proceedings 12th World Conference of Earthquake Engineering, January – February 2000*, Auckland, New Zealand.

Cardona, Omar D. Hurtado, Jorge E. (2000) *Métodos Numéricos en Ciencias Sociales*. CIMNE, Barcelona.

Cardona, O. D. Y Hurtado, J. E. (2001) Prevención – Mitigación y Planificación. *Medidas estructurales y No estructurales de Gestión de Riesgos*. En “Curso sobre Gestión de Riesgos”. Universidad Nacional de Colombia. Banco Interamericano de Desarrollo. Manizales. 2001

Cardona, Omar D. (2001) Estimación Holística del Riesgo Sísmico utilizando sistemas dinámicos complejos. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Catalunya. Barcelona. Junio de 2001.

Carmona A. Hernan (2002). *Acercamiento al Concepto Ambiental de la Zona del Caribe*. Ponencia. Primer Congreso Internacional Ambiental del Caribe. Cartagena. Colombia.

Cannon, T. (1991), “*A Hazzardneed 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.

Castells, Manuel y Borja, Jordi (1.997). Local y Global. La gestión de las ciudades en la era de la información. Santillana S.A. Taurus. Madrid.

Crowards, Tom. (1999) *Comparative Susceptibility to Natural Disasters in The Caribbean*. Central Bank of Barbados Annual Review Seminar.

Chadwick, George F. (1973). *Una Visión Sistémica del Planeamiento*. Editorial Gustavo Gili S.A. Barcelona.

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.

Churchman, C. West (1973). El enfoque de sistemas. Editorial Diana. México. Citado por Emilio Latorre Estrada en Teoría General de Sistemas. Editorial Universidad del Valle. 1996. P 43 – 47.

CONPES – 3146 (2001). *Estrategía para consolidar la ejecución del plan nacional para la prevención y atención de desastres – PNPAD- en el corto y mediano plazo.* Departamento Nacional de Planeación. República de Colombia.

CORPORACIÓN AUTÓNOMA REGIONAL DE CALDAS (2002). *Agenda para la Gestión Ambiental del Municipio de Manizales.* Manizales.

Davidson, Rachel A. and Lambert, Kelly B. (2000). *Comparing The Hurricane Disaster Risk of Coastal Counties in the US.* Natural Hazards Review. July of 2000.

Delgado R. Manuel. (1997). La ciudad no es lo urbano. Hacia una antropología de lo inestable; en sobre Hábitat y Cultura. Medellín. Universidad Nacional.

Departamento Nacional de Planeación. Documento Consejo Nacional de Política Económica y Social (CONPES) 3146. *“Estrategia para consolidar la ejecución del plan nacional para la prevención y atención de desastres – PNPAD – en el corto y mediano plazo”.* Bogotá, D.C., Diciembre 20 de 2001.

Downing, T. E. And Bakker, K. (1999). *Drought Discourse and Vulnerability*. Enviromental Change Unit. Universidad de Oxford. Oxford. UK.

Fernandez, Maria Augusta. (1996). Ciudades en Riesgo. Degradación Ambiental, Riesgos Urbanos y Desastres. LA RED.

Forrester, J (1971). El comportamiento Contraintuitivo de los Sistemas Sociales. Technology Review – MIT. Actualizado en 1995 y traducido en 2000.

Freeman, Paul K and Martin, Leslie A. (2001) Sistemas Nacionales y Mecanismos Institucionales de Manejo de Riesgo de Desastres. Fase I. Documento de Trabajo. BID –Dialogos Regionales de Politica. 2001.

Giot, Pascal 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.*

Glick, Curtis R. (1992). *Desarrollo Urbano.* Escuela Superior de Administración Pública. Centro de Publicaciones. Santa Fé de Bogotá. D.C. 294p.

González, Francisco (1.996). Ambiente y Desarrollo. *Reflexiones acerca de la relación entre los conceptos: ecosistema, cultura y desarrollo.* IDEADE – PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA. Fundación Cultural Javeriana de Artes Gráficas.

Gordon Woo, *The Mathematics of Natural Catastrophes.* Imperial College Press, London, 1999.

Guha Sapi, Debarati and Michellier Caroline (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.

Gutierrez S. José Luis (2000). *Sociedad, Política, Cultura y Sistemas Complejos.* Revista Ciencias 59. Universidad Nacional Autónoma de México. Julio – Septiembre. 9 pp.

Herzer, H y Gurevich R. (1996). *Degradación y Desastres: Parecidos y Diferentes: tres casos para pensar y algunas dudas para plantear.* Documento compilado en Ciudades en Riesgo. Maria Augusta Fernandez. Red Latinoamericana de Estudios Sociales en Prevención de Desastres – LA RED. Pp. 75 - 92.

IDEA UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA SEDE MANIZALES. (1994). Perfil Ambiental Urbano de Colombia. Estudio de Caso Manizales, 1994.

IDEA UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA SEDE MANIZALES - COLCIENCIAS. Perfil Ambiental Agrario de Caldas. Manizales, 1999.

Kirkwood, Craig W. (1998). *System Dinamics Methods. A Quick Introduction.* College of Bussines. Arizona State University. 1998.

Klir, George J. (1.980). *Teoria General de Sistemas.* Edición Española. Ediciones ICE. Madrid. 383 p.

Latorre, Emilio. (1996). *Teoría General de Sistemas. Aplicada a la solución integral de problemas.* Editorial Universidad del Valle. Programa Editorial Facultad de Ingeniería. Santiago de Cali.

Lavell, Allan (1996). *Degradación Ambiental, Riesgo y Desastre Urbano. Problemas y Conceptos hacia la Construcción de una Agenda de Investigación.* En Ciudades en Riesgo. **Fernandez, Maria Augusta. 1996.** LA RED. Pp 12 – 42.

Lavell, Allan. (1998) “Un Encuentro con la verdad: desastres en America Latina durante 1998”. Anuario Social y Politico de America Latina y el Caribe, No.2, FLACSO – Nueva Sociedad.

Lavell, Allan. (2000) *Desastres y Desarrollo: Hacia un Entendimiento de las Formas de Construcción Social de un Desastre: El Caso del Huracán Mitch en Centroamérica.* Capitulo a publicarse en libro editado por el BID.

Lavell, Allan. (2000 a) Desastres Durante una Decada. Lecciones y avances conceptuales y prácticos en América Latina (1990 – 1999).Anuario Política y social de América Latina. No.3. FLACSO – LA RED. 2000.

Lavell, Allan. (2000 b). Desastres Urbanos: Una Visión Global. Facultad Latinoamericana de Ciencias Sociales.

Lefebvre, H., (1981). *La production de l'espace.* 2eme édition, Paris, edithionn Anthropos. Citado por Cuervo, L. M. (1996). *Ciudad y Complejidad: La magnitud del reto.*

Mansilla, Elizabeth. (2000). Riesgo y Ciudad. Universidad Nacional Autonoma de Mexico. Facultad de Arquitectura. 2000.

Marcuse, H. (1985). El hombre Unidimensional. Editorial Planeta Agostini, 1ª. Edición. 286 p.

Maskrey, Andrew. (1993). *Los Desastres No Son Naturales*. La Red. Tercer Mundo Editores. Bogotá.

Maskrey, A. (1998). *Navegando entre Brumas: La Aplicación de los Sistemas de Información Geográfica al Análisis de Riesgo en América Latina*. Lima: La Red / ITDG.

Meadows, Donella y otros (1972). *The Limits to Growth*. New York. Universe Books.

Metzger, P (1996). Medio Ambiente Urbano y Riesgo. Elementos para la reflexión. Documento compilado en Ciudades en Riesgo. Maria Augusta Fernandez. Red Latinoamericana de Estudios Sociales en Prevención de Desastres – LA RED. Pp. 43 – 56.

Ministerio de Desarrollo Económico (1995). *Ciudades y Ciudadanía*. La política urbana del salto social. Santa Fé de Bogotá, D.C. 356p.

Montenegro, Armando. “Atención y Prevención de Desastres en Colombia. Lecciones del Terremoto de Armenia. 1.999.

Montoya, J., (1994), *Ciudad y Escritura: Huella y Memoria; En Ciudad y Cultura. Memoria, Identidad y Comunicación*. Medellín: VII Congreso de Antropología en Colombia, Departamento de Antropología, Facultad de Ciencias Humanas de la Universidad de Antioquia.

Ministerio del Medio Ambiente. Secretaria General del Medio Ambiente. *Guía para la Elaboración de Estudios del Medio Físico*. Contenido y Metodología. Madrid. 1995.

Munizaga, Gustavo (2000). *Macroarquitectura. Tipologías y Estrategías de Desarrollo Urbano.* 2ª. edición. Ediciones Universidad Católica de Chile. Alfaomega grupo editor. México.

Municipio de Manizales. Plan de Ordenamiento Territorial (2000). Manizales.

Naciones Unidas. (1999) *El Terremoto de Enero de 1999 en Colombia: Impacto Socio Económico del Desastre en la Zona del Eje Cafetero.* PNUD. CEPAL.

Naciones Unidas. (2001). *Aplicación de la Estrategía 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.

Nicholls, Robert J and Hoozemans, Frank M.J. (2000). *Global Vulnerability Analysis.* Encyclopedia de Coastal Science. En www.survas.mdx.ac.uk.pdf.

Odum, E. P y Sarmiento F. O. (1998). *Ecología. El puente entre ciencia y sociedad.* McGRAW – HILL INTERAMERICANA EDITORES. México.

Organization of American States. (1990) *Disaster, Planning and Development: Managing Natural Hazards to Reduce Loss.* Washington.

Organization of American States. (2000). *Developing Policy and Strategic Actions for the OAS Member States with Respect to Natural Hazard Vulnerability Assessment and Indexing.* Preliminary Report.

Ortega D, Margarita (2001). *“Las Ciudades y los Sistemas Urbanos. Una Visión Transnacional”*. En III Congreso Internacional de Ordenación del Territorio. España – 2001. www.fundicot.org.

Palm, Ellina. (2000). United Nations. International Strategy for Disaster Reduction. (CSD)Comission for Sustainable Development. ***Review of natural disaster indicator for CSD programme*** . 2000.

Pareja, Juan 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 pag.

Peduzzi, Pascal (2000). *Insight on Common/key Indicators for Global Vulnerability Mapping*. United Nations Enviroment Programme. Expert Meeting on Vulnerability and Risk Analysis and Indexing. Suiza.

Peduzzi, P. Dao, H. Herold, Christiam (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 Ramirez 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.

Rodriguez, P y Amanda, E. (1994) La Ciudad: Laboratorio Geográfico. En: Diálogo en la Amazonia: estructuración territorial, ética ambiental y desarrollo en Colombia. XIII Congreso Colombiano de Geografía. 1ª. Edición. Tercer Mundo Editores.

Rodriguez V, Patricio. Busso, Reinaldo. Oreja, José M. Oreja. García, Carlos A. (2000). Metodología Dinámica para para el Análisis de Sistemas Sociales y Económicos. En www.gestiopolis.com/recursos/documentos/fulldocs/eco/metodología_dinámica.htm .

Richardson, Harry W (1986). Economía Regional y Urbana. Alianza editorial S.A. Madrid.

Rios Insua, David. Rios Insua, Sixto. Martin, Jacinto. (2000) *Simulación. Métodos y aplicaciones.* Departamento de Inteligencia Artificial. Universidad Politécnica de Madrid. Alfaomega S.A.

Sarabia, Angel A (1.995). La Teoría General de Sistemas. ISDEFE. 1ª. Edición. Madrid.

Siegel, Frederic R. (1996). *Natural and Antropogenic Hazards in Development Planning.* Academics Press, San Diego.

Silva, Armando (1.992). *Imaginario Urbanos.* En: Rodriguez y Amanda (1.994) La ciudad laboratorio geográfico.

Smolka, A. Allman, A and Ehrlicher, S. (2000) *An Absolute Earthquake Risk for Insurance Purposes.* Proc., 12° World Conf. On Earthquake Engineering, Auckland, New Zealand. Paper No. 706.

Smyle, James (2000). *Disaster Mitigation and Vulnerability Reduction: Perspectives On The Prospects For Vetiver Grass Technology (VGT).* Paper presented at the Second International Vetiver Conference, Thailand, January 2000.

Vatsa, Krishna S. (2000). *Notes on Vulnerability.* Documento presentado en Encuentro de Expertos en Suiza. PNUD.

Vega M. Leonel. (1998) Gestión MedioAmbiental. *Un enfoque sistémico para la protección global e integral del medio ambiente.* Departamento Nacional de Planeación. Unidad de Política Ambiental. TM editores. 1ª Edición.

Velasquez, Andrés. Rosales Cristina. *Escudriñando en los desastres a todas las escalas.* Red de estudios sociales en prevención de desastres - LA RED. <http://www.lared.org.pe>

Wilches – Chaux, Gustavo (1989). La Vulnerabilidad Global. Recopilado en “Los Desastres No son Naturales” por Andrew Maskrey (1993).

Wisner, Ben. (2000). *Issues and Challenges in Vulnerability and Risk Indexing.* Expert Meeting on Vulnerability Risk and Indexing. UNPD. Geneve.

11. BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA NO REFERENCIADA EN EL TEXTO

Blaikie, P., Cannon, T., Davis, I. and Wisner, B. (1994). At Risk - Natural Hazards, People's Vulnerability, and Disasters. London, Routledge.

CORPORACIÓN ANDINA DE FOMENTO (2000). Las Lecciones del Niño. Memorias del Fenómeno del Niño 1997- 1998, Retos y propuestas para la región andina. Volúmen III: Colombia.

Cutter, Susan. *Respuestas sociales a los riesgos ambientales.* Departamento de Geografía. Universidad de Carolina del Sur.
www.lorax.geog.sc.edu/hrl/home.

Driankov, D. Hellemdoorn, H. Reinfrank, M. (1993). An Introduction to Fuzzy Control. Springer-Verlag. Berlin Heidelberg.

Luera Peña, W. E., Minim, L. A. (2001) *Aplicación de Redes Neuronales Artificiales en la Modelización del Tratamiento Térmico de Alimentos.* Cienc. Technol. Aliment. Volumen 3, Número 2, pp 81-88.

Smyle, James. (2000). *Disaster Mitigation and Vulnerability Reduction: Perspectives on the Prospects for Vetiver Grass Technology (VGT).* Second International Vetiver Conference. Thailand.