

Figura 7.7: Escenario de daños para un sismo fuerte en Bogotá (Cardona y Yamín 1997).

Para la determinación del índice de riesgo físico, en el caso de Bogotá se definieron los siguientes descriptores, que fueron normalizados de acuerdo con el área de cada alcaldía local:

1. *Área destruida por sismo*, X_{IR1} : Definida como el área probable de destrucción, en m^2 , de las zonas construidas, estimada según la metodología del ATC-13 modificada por la Universidad de los Andes y verificada según se indicó anteriormente, en el marco de un escenario sísmico hipotético para la ciudad.
2. *Número de fallecidos*, X_{IR2} ; *Número de heridos*, X_{IR3} : Definidos como el número probable de muertos y heridos, utilizando estimadores similares a los propuestos por Whitman y Cornell (1976), ajustados de acuerdo con el ATC-13 y HAZUS, en el marco de un escenario sísmico hipotético para la ciudad.
3. *Roturas de la red de abastecimiento de agua*, X_{IR4} ; *Roturas de la red de gas* X_{IR5} ; *Longitud caída de redes eléctricas* X_{IR6} : Definidos como el número probable de roturas que se presentarían en las redes de abastecimiento de agua y gas y la longitud caída de la red eléctrica, estimados según las metodologías del ATC-13 y HAZUS, en el marco de un escenario sísmico hipotético.
4. *Número de centrales telefónicas afectadas*, X_{IR7} ; *Número de subestaciones eléctricas afectadas*, X_{IR8} : Definidos como el número de las centrales telefónicas y subestaciones eléctricas con una alta vulnerabilidad sísmica, de acuerdo con el

procedimiento de evaluación simplificada desarrollado con base en el ATC-21 y otros parámetros adicionales.

Otra variable que podría ser utilizada como descriptor es el número de puentes que se podrían averiar en cada una de las unidades de análisis de presentarse los escenarios sísmicos hipotéticos planteados.

El Apéndice C presenta los valores del índice de riesgo físico sin escalar y la conversión a unidades commensurables. También presenta gráficos que ilustran los valores relativos del índice de riesgo físico y de sus descriptores para todas las alcaldías de la ciudad.

La figura 7.8 ilustra los resultados del índice de riesgo físico obtenidos para las 19 alcaldías menores de la ciudad.

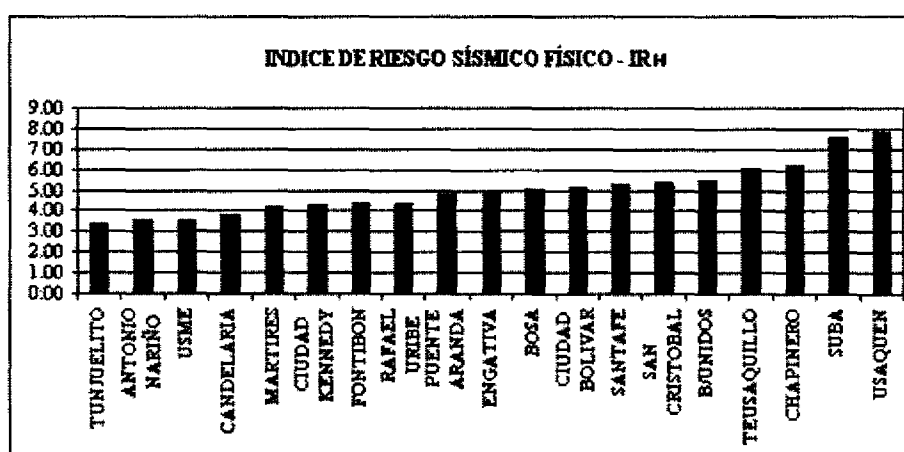


Figura 7.8: Índice de riesgo físico basado en los escenarios de pérdidas.

7.1.2. Evaluación del índice de riesgo sísmico del contexto

El índice de riesgo del contexto para un centro urbano como Bogotá se definió como el resultado del producto escalado del factor de amenaza sísmica y del factor de vulnerabilidad del contexto para cada alcaldía local. Esta forma de cálculo se debe al hecho de que, para que exista el riesgo, la amenaza y la vulnerabilidad son mutuamente condicionantes y concomitantes, lo que equivale a la “convolución” de los descriptores que lo componen. A continuación se definen estos descriptores y se relacionan sus indicadores componentes:

1. Amenaza sísmica del contexto, HS_k : Definida como una agregación de valores que expresan el nivel de peligro sísmico que se presenta en el área que cubre la alcaldía menor, caracterizada por particularidades relativas a la acción sísmica. Para su determinación, en este caso, se definieron los siguientes indicadores:
 - 1.1 Aceleración espectral, XH_1 : Definida como la media ponderada del valor espectral de la aceleración sísmica para los periodos de vibración (T) comprendidos entre 0.2 s y 0.5 s, en las zonas de microzonificación sísmica

- 1.2 *Área de suelos blandos*, X_{H2} : Definida como el porcentaje del área de la alcaldía menor que es susceptible a la amplificación sísmica por las características dinámicas del suelo. $T > 0.5$ s.
- 1.3 *Área con potencial de licuefacción*, X_{H3} : Definida como el porcentaje de área de la alcaldía menor que presenta suelos arenosos no consolidados y saturados con alto potencial de licuefacción en caso de sismos moderados o fuertes.
- 1.4 *Área con susceptibilidad al deslizamiento*, X_{H4} : Definida como el porcentaje del área de la alcaldía menor que presenta zonas con potencial inestabilidad de laderas en caso de sismos moderados o fuertes.

De existir la posibilidad de la acción de un tsunami o maremoto, también se podría incluir el área de inundación e impacto de las olas sobre la ciudad. Igualmente, cuando exista la posibilidad de incendios generalizados por que existan áreas de la ciudad que tengan construcciones particularmente propensas a la conflagración, ésta podría ser también una variable a considerar.

En el Apéndice C se encuentran los valores de amenaza sísmica sin escalar y la conversión a unidades conmensurables. También presenta gráficos que ilustran los valores relativos del descriptor de amenaza sísmica del contexto y de sus indicadores para todas las alcaldías de la ciudad.

La figura 7.9 ilustra el descriptor de amenaza sísmica del contexto para las 19 alcaldías menores de la ciudad.

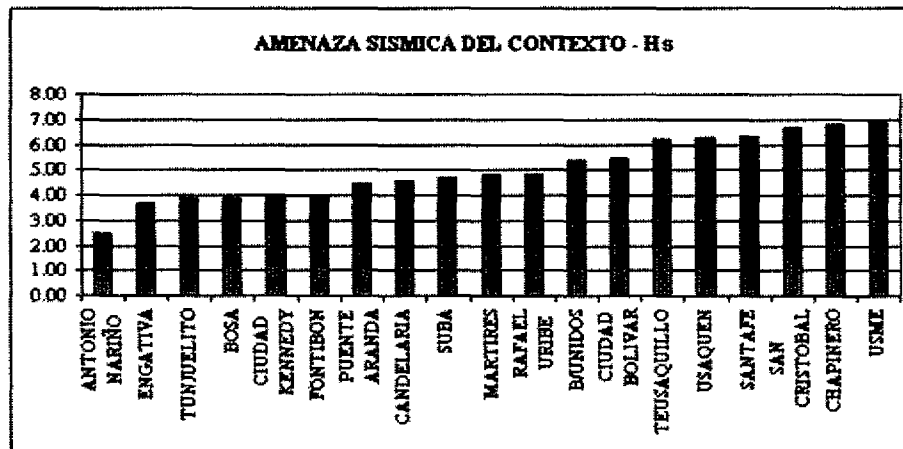


Figura 7.9: Descriptor de la amenaza sísmica del contexto.

2. *Vulnerabilidad sísmica del contexto*, V_{sk} : Definida como suma de los valores que expresan aspectos de exposición poblacional, económica y estratégica, ausencia de desarrollo económico y social, debilidades para absorber el impacto, deficiencias en la gestión institucional y falta de capacidad para la respuesta en caso de emergencia. Para su determinación, se definieron tres indicadores:
- 2.1 *Exposición*, EV_k : Definida como el volumen normalizado de población, edificios y bienes económicos y estratégicos expuestos a la acción sísmica en el área que cubre

la alcaldía menor. Para su determinación, en este caso, se definieron los siguientes componentes:

- 2.1.1 *Población*, X_{E1} : Definida como el número medio de habitantes expuestos, en miles, en el área que cubre la jurisdicción de la alcaldía menor.
- 2.1.2 *Densidad poblacional*, X_{E2} : Definida como el número habitantes dividido por el área construida, lo que refleja el grado de concentración y congestión de personas en el área de la alcaldía menor.
- 2.1.3 *Área construida*, X_{E3} : Definida como el área normalizada de edificación y desarrollo urbano, en el área que cubre la alcaldía menor.
- 2.1.4 *Área industrial*, X_{E4} : Definida como el área normalizada de zonas de industria, fábricas o empresas en el área de la alcaldía menor; refleja la dependencia económica.
- 2.1.5 *Área institucional*, X_{E5} : Definida como el área normalizada de zonas de uso institucional o gubernamental en la jurisdicción de la alcaldía menor; refleja valores estratégicos y dependencia política.

La exposición se refiere, en general, al volumen y concentración de elementos por unidad de área. Un número mayor de elementos significa una mayor exposición y, por lo tanto, una mayor vulnerabilidad. Otros componentes también podrían ser incluidos, como el área de edificios históricos de valor patrimonial o monumentos. Este tipo de variables no necesariamente representa valores económicos sino valores estratégicos y culturales.

2.2 *Fragilidad social*, FV_k : Definida como el inverso del déficit de desarrollo, económico y social, caracterizado por las condiciones de marginalidad, bajo nivel de salubridad, delincuencia y necesidades básicas insatisfechas de la población ubicada en el área que cubre la alcaldía menor. Para su determinación, en este caso, se definieron los siguientes componentes:

- 2.2.1 *Área de barrios marginales*, X_{F1} : Definida como el área normalizada de asentamientos humanos ilegales con deficiencia de servicios públicos y de baja estratificación socioeconómica en el área que cubre la jurisdicción de la alcaldía menor.
- 2.2.2 *Mortalidad*, X_{F2} : Definida como la tasa o número de personas que mueren anualmente por causa natural por cada mil habitantes en la jurisdicción de la alcaldía menor.
- 2.2.3 *Delincuencia*, X_{F3} : Definida como la tasa o número de delitos anuales por cada mil habitantes en el área de la alcaldía menor; describe el deterioro social en la zona.
- 2.2.4 *Disparidad social*, X_{F4} : Definida como el nivel de necesidades básicas insatisfechas y de desarrollo humano relativo de la alcaldía menor.

Los componentes del indicador de fragilidad social se seleccionaron de acuerdo con la información disponible para las diferentes alcaldías menores. Se ha intentado reflejar de la manera más adecuada posible las condiciones de deterioro social. En términos relativos, un área que experimenta un alto deterioro social es más vulnerable y por lo tanto está en mayor riesgo.

2.3 *Falta de resiliencia*, RV_k : Definida como el inverso de la capacidad económica, social e institucional (resiliencia), que representa la debilidad para absorber el impacto de una crisis, la falta de capacidad para responder en caso de emergencia y

las deficiencias en la gestión institucional en la alcaldía menor. Para su determinación se definieron los siguientes componentes:

- 2.3.1 *Camas hospitalarias*, XR_1 : Definido como el número normalizado de camas del conjunto de hospitales e instituciones de salud en el área que cubre la alcaldía menor.
- 2.3.2 *Recurso humano en salud*, XR_2 : Definido como el número normalizado de médicos y enfermeras que trabajan en las instituciones de salud localizadas en la jurisdicción de la alcaldía menor.
- 2.3.3 *Espacio público*, XR_3 : Definido como el área normalizada de espacio disponible para el albergue o alojamiento temporal y la atención masiva de emergencias en el área que cubre la alcaldía menor.
- 2.3.4 *Personal de rescate*, XR_4 : Definido como el número normalizado de socorristas de Cruz Roja, Defensa Civil y Bomberos disponible en la zona de influencia de la alcaldía menor.
- 2.3.5 *Nivel de desarrollo*, XR_5 : Definido como la calificación del nivel de calidad de vida, organización y planificación urbano en el área de la alcaldía menor, valorado por la Secretaría de Planeación de la ciudad.
- 2.3.6 *Operatividad en emergencias*, XR_6 : Definida como la calificación de la preparación y la capacidad de respuesta institucional del comité operativo de emergencias de la alcaldía menor, valorado por la Dirección de Prevención y Atención de Emergencias de la ciudad.

En el Apéndice C se encuentran los valores de los componentes de exposición, fragilidad y falta de resiliencia sin escalar y la conversión a unidades conmensurables. También presenta gráficos que ilustran los valores relativos de estos indicadores y de los descriptores de vulnerabilidad del contexto para todas las alcaldías de la ciudad.

La figura 7.10 muestra los valores de los indicadores de exposición, fragilidad social y falta de resiliencia, que componen el descriptor de vulnerabilidad del contexto. La figura 7.11 ilustra los valores sumados del mismo descriptor.

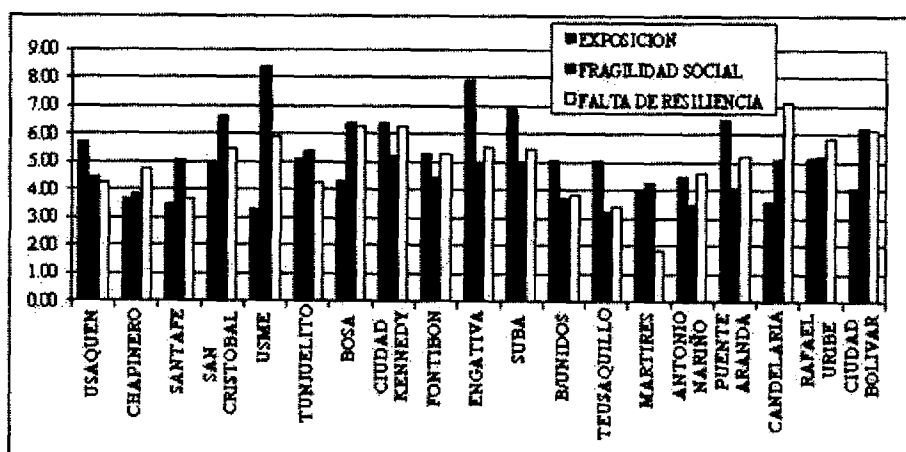


Figura 7.10: Indicadores de exposición, fragilidad social y falta de resiliencia.

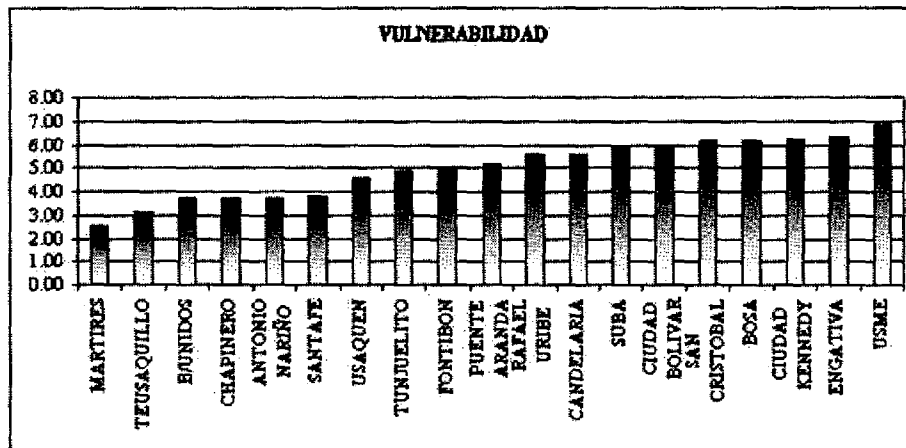


Figura 7.11: Descriptores de vulnerabilidad del contexto para las alcaldías menores.

7.1.3. Análisis y categorización del riesgo sísmico urbano

Una vez conocidos los valores de los índices de riesgo sísmico físico (*hard*) y el índice de riesgo sísmico del contexto (*soft*) se puede obtener una visión relativa del riesgo en general, o riesgo total, de cada una de las alcaldías de la ciudad. La figura 7.12 muestra los valores de los descriptores de amenaza y vulnerabilidad del contexto, la figura 7.13 ilustra los valores de los índices de riesgo sísmico físico y del contexto y la figura 7.14 muestra los valores del índice de riesgo sísmico total ordenados de menor a mayor. Este tipo de gráficas permiten categorizar y priorizar las alcaldías que presentan los mayores valores comparativos. Hay casos en los cuales el riesgo del contexto lo determina más la alta vulnerabilidad que la amenaza, como en las localidades de Engativa y Suba. Hay casos en donde ambas situaciones son muy preocupantes, como en San Cristóbal y Usme, lo que las ubica al final con un alto riesgo sísmico total. Usaquen, una localidad de estrato socio-económico medio-alto, localizada en suelos blandos y con edificios de mediana altura, ofrece el mayor riesgo sísmico total. Teusaquillo y Chapinero, de estrato medio, y San Cristóbal, Usme y Ciudad Bolívar, de estratos bajos, comparten los mayores niveles de riesgo sísmico total de la ciudad.

En el caso de Bogotá esta evaluación ha permitido tener una lectura de los factores que inciden en el nivel de riesgo no sólo desde el punto de vista del daño físico potencial sino desde una perspectiva económica, social e institucional. La posibilidad de desagregar los factores del riesgo en sus componentes ha facilitado la identificación de las influencias que determinan el porqué un valor relativo es mayor o menor en cada caso. De esta manera se ha podido iniciar un plan de gestión de riesgo que indica y orienta las medidas preventivas que deben realizarse en cada localidad, de acuerdo con la capacidad real de intervención y los recursos disponibles. El Plan de Ordenamiento Territorial de Bogotá, aprobado durante el año 2000, tuvo en consideración los resultados de este trabajo y la Dirección de Prevención y Atención de Emergencias de la Alcaldía Mayor de Bogotá utiliza desde 1999 la información obtenida para hacer seguimiento de la efectividad y eficiencia de las acciones de reducción de riesgo.

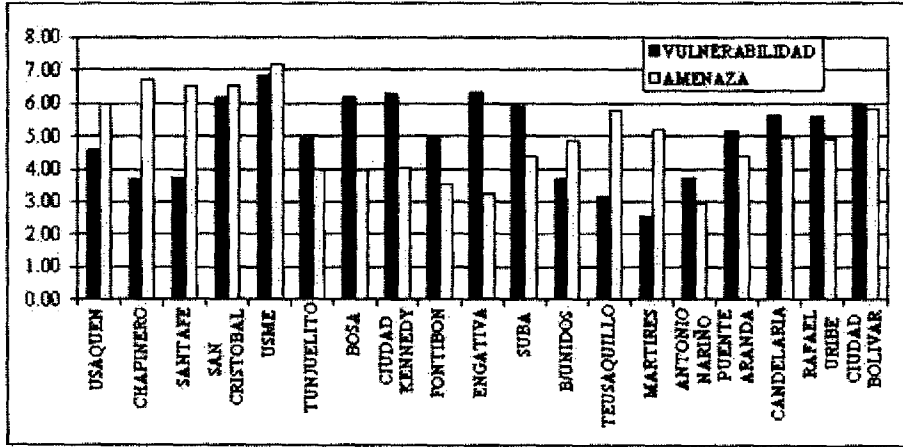


Figura 7.12: Descriptores de amenaza y vulnerabilidad del contexto.

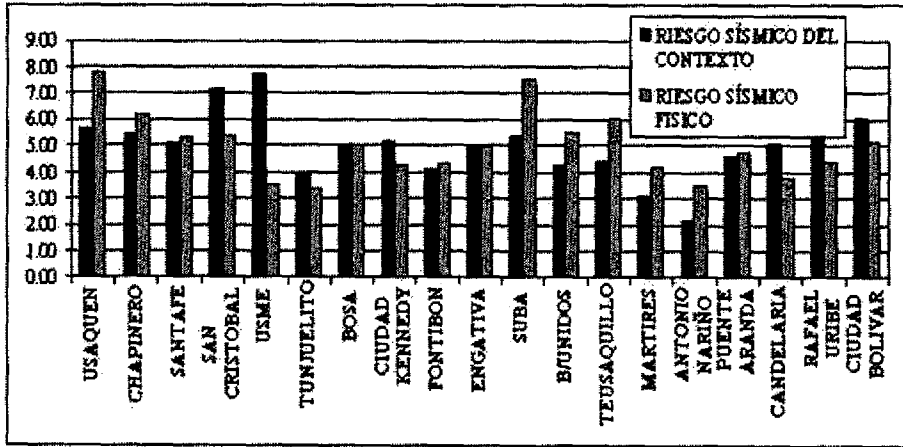


Figura 7.13: Índices de riesgo sísmico físico y riesgo sísmico del contexto.

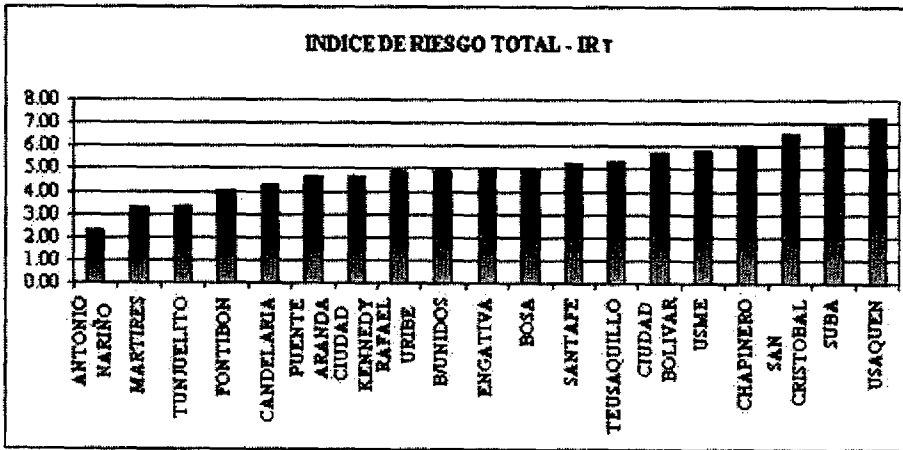


Figura 7.14: Categorización de las alcaldías menores por el índice de riesgo sísmico total.

El conjunto de gráficas de la figura 7.15 muestra la desagregación de los indicadores del riesgo sísmico físico, del descriptor de amenaza sísmica y de los indicadores de exposición, fragilidad social y falta de resiliencia de una de la alcaldía menor de Usaquen. Este tipo de gráficos, entre otros, permite identificar qué indicadores tienen la mayor incidencia comparativa y por lo tanto a cuáles de ellos se deben dirigir las medidas de mitigación y prevención. En el Apéndice C se incluyen todas las desagregaciones de los factores utilizados.

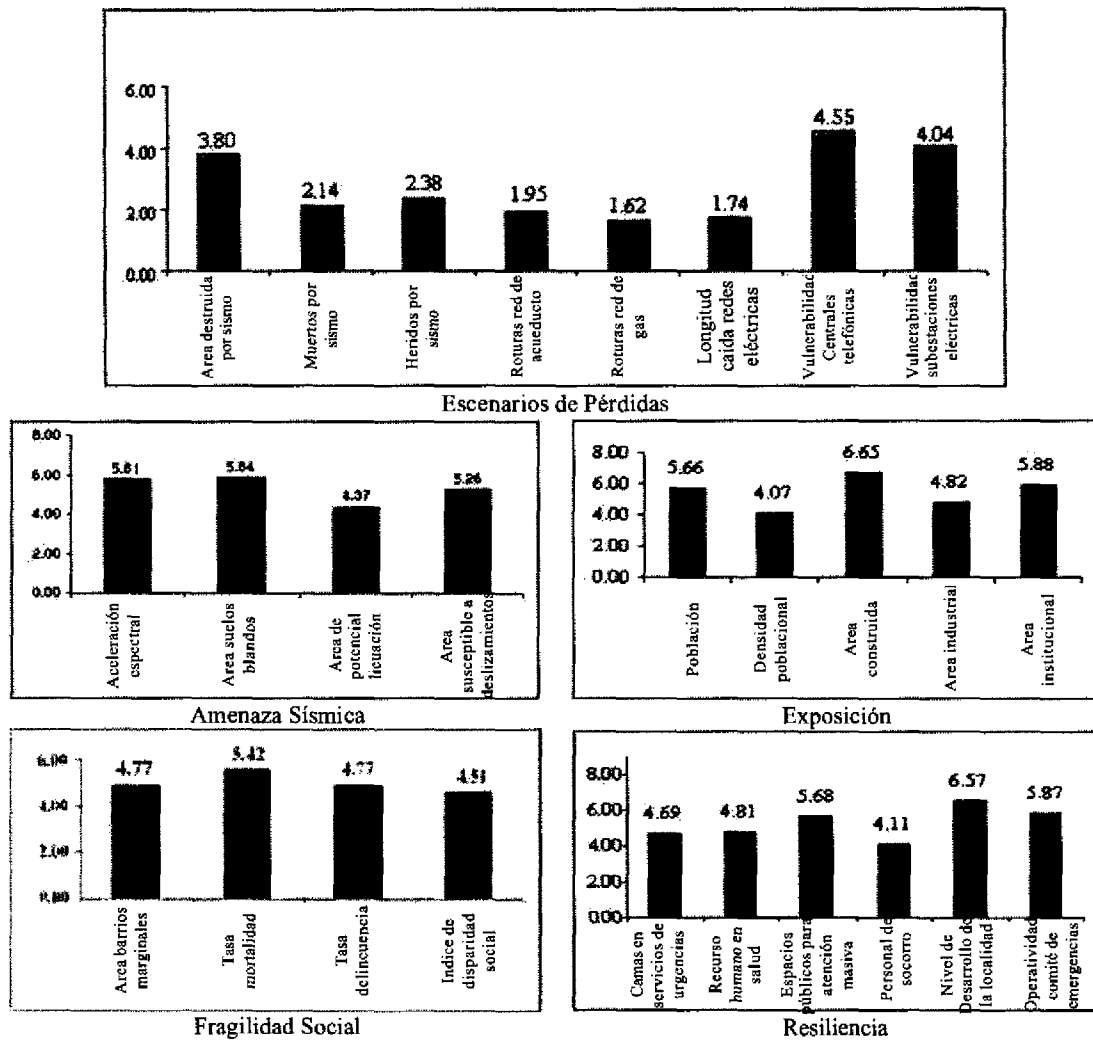


Figura 7.15: Desagregación de indicadores para una alcaldía menor.

En conclusión, la técnica de índices relativos aquí propuesta permite categorizar la amenaza, la vulnerabilidad y el riesgo sísmico de las diferentes áreas de una ciudad, una región o un país. En particular, para efectos de ilustración, se aplicó esta técnica para estimar el riesgo sísmico de las alcaldías menores de Bogotá, Colombia, desde una perspectiva holística. Esta técnica permite actualizar fácilmente el valor de las variables, lo que favorece la realización de análisis de sensibilidad y calibración. De la misma manera, puede llevarse a cabo el seguimiento del escenario de riesgo y de la

efectividad y eficiencia de las medidas de prevención y mitigación. Una vez graficados los resultados para cada una de las localidades, es sencillo identificar los aspectos más relevantes del riesgo sísmico relativo, sin la necesidad de realizar mayores esfuerzos de análisis e interpretación de resultados. La principal ventaja de la técnica aquí planteada es la posibilidad de desagregar los índices en descriptores y éstos a su vez en indicadores, para identificar, de esta manera, la razón por la cual una localidad presenta un mayor índice de riesgo que otra. Esta virtud del método permite verificar los resultados y priorizar las acciones de prevención y planificación que se deben implantar para la intervención y modificación de las condiciones que más influyen en el riesgo sísmico de la ciudad.

7.2. Modelización mediante un sistema neuronal difuso

La lógica difusa –también llamada lógica borrosa– constituye uno de los desarrollos recientes de la matemática que mayor impacto ha tenido en ciencias, ingeniería y varias aplicaciones tecnológicas (Kosko 1995). Para los fines de este trabajo, la lógica difusa reviste gran interés pues, ajuicio del autor, constituye quizás el único lenguaje matemático en el que resulta posible una interacción de las ciencias naturales y sus derivados tecnológicos, de una parte, y las ciencias sociales, de otra. Esto se debe a que, a través de los conjuntos difusos, resulta posible representar los contenidos puramente cuantitativos de la información típicamente suministrada por las ciencias naturales y las ingenierías en términos cualitativos, tales como *alto*, *intenso*, *confiable*, etc., que son los adecuados para la transmisión de información en ciencias sociales. Viceversa, de la descripción cualitativa de la información resulta posible extraer igualmente algunos índices numéricos representativos que permiten la interpretación de variables, la manipulación técnica de resultados, etc. Por este motivo se ha incorporado fácilmente como tema de investigación activa en el campo de la inteligencia artificial (Jang *et al.* 1997).

El elemento central de la lógica difusa son las llamadas funciones de pertenencia, con las cuales se trata de modelar matemáticamente los calificativos de una cantidad cualquiera x , tales como, por ejemplo, *alto*, *medio* o *bajo*. El significado de estas funciones es tal que ellas alcanzan su valor máximo cuando la variable es claramente alta, media o baja, según el caso, mientras que en las regiones restantes se da cierta ambigüedad. Por eso, se observa que, en ellas, se da un solapamiento de las funciones correspondientes a los tres calificativos, lo que indica que para los valores de la variable en esas zonas ocurre una vaguedad en la atribución del calificativo. Esto es básicamente lo que diferencia a la lógica difusa, que pretende acercarse al lenguaje cotidiano, de la llamada lógica binaria o Aristotélica, que es el fundamento de la matemática convencional. Es de anotar, sin embargo, que la asignación y forma de las funciones de pertenencia es un tanto arbitraria, lo que de todas maneras se enfila en la aproximación que se trata de hacer por esta vía al pensamiento objetivo. Con el fin de reducir al mínimo esta arbitrariedad, en la aplicación práctica de la lógica difusa se recurre a expertos en cada tema para la asignación de las funciones con la mayor objetividad posible. Por esta razón la lógica difusa es una herramienta indispensable en la creación de los llamados *sistemas expertos*.

La relación de las interpretaciones cuantitativa y cualitativa de la información se ilustra en la figura 7.16, en la que los puntos corresponden a los datos observados de la

relación entre dos variables x e y , mientras que las funciones de pertenencia ilustran una posible interpretación numérica de la identificación lingüística de estos valores. Con base en estas relaciones de tipo lingüístico se pueden construir silogismos del tipo

$$\text{Si } x \text{ es } A, y \text{ es } B. \quad x \text{ es } A'. \quad \text{luego } y \text{ es } B'.$$

donde A, A', B y B' son calificativos, de los cuales se conocen las funciones de pertenencia de los tres primeros, siendo el objetivo del problema calcular la del cuarto. Existen varias técnicas y algoritmos para calcular matemáticamente las funciones de pertenencia de los consecuentes B' de silogismos como éste y de otros más complejos que se dan frecuentemente en la práctica. Una vez calculadas las funciones de pertenencia de los consecuentes se puede extraer de ellas un valor numérico indicativo así como un calificativo lingüístico aproximado del consecuente. El primer paso se realiza por medio de la llamada *desfusificación*, que consiste en calcular el centro de la función de pertenencia, de cuya definición se han propuesto varias alternativas en la literatura internacional. Lo segundo se obtiene por la comparación de la función de pertenencia resultante con algunas funciones de pertenencia estándar suficientemente establecidas.

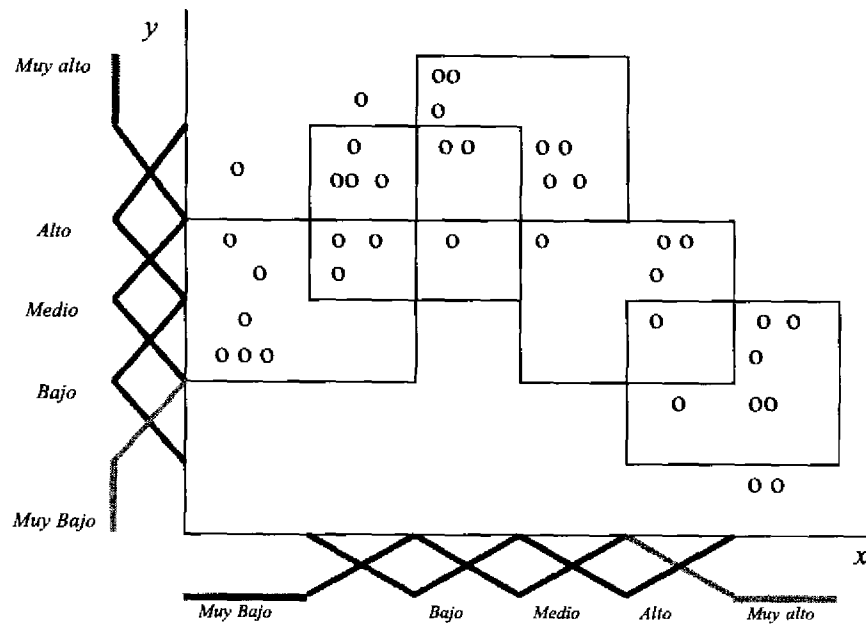


Figura 7.16: Interpretación difusa de datos numéricos.

Por otra parte, las redes neuronales han sido utilizadas para enfrentar problemas complejos simulando el funcionamiento del sistema nervioso, intentando imitar los mecanismos de aprendizaje, adaptación y razonamiento del ser humano. Estos algoritmos han demostrado ser muy útiles para múltiples propósitos, tales como el reconocimiento de patrones, imágenes, procesamiento de señales, optimización, control automático, etc. (Leondes 1998). Una neurona real está compuesta por una célula y varias dendritas, las cuales la conectan a otras neuronas. La actividad de la neurona la

definen a) la recepción de los impulsos enviados a ella por otras neuronas, b) la transformación y almacenamiento de información y c) la emisión del impulso procesado a otras neuronas. El arreglo de una red neuronal está caracterizado por el número de capas, el número de neuronas asociadas a cada capa, los tipos de conexión y el flujo de información en el arreglo. Se pueden definir tres clases de capas: a) la *capa de entrada*, que son las neuronas que reciben la información que viene de fuentes externas, b) las *capas ocultas*, que hacen parte interna de la red y que no tienen contacto directo con el ambiente externo, y c) la *capa de salida* la cual transfiere la información de la red al exterior. La figura 7.17 ilustra un esquema general del funcionamiento de una red neuronal.

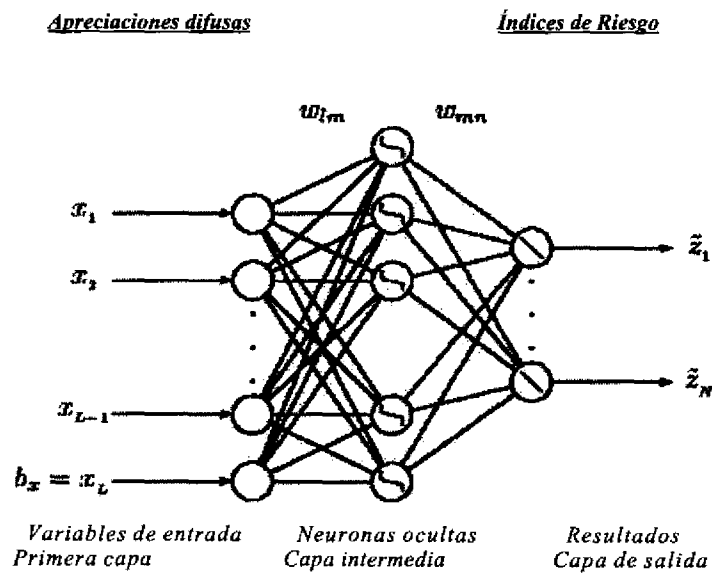


Figura 7.17: Esquema de cálculo de la red neuronal difusa

Las arquitecturas de estas redes o arreglos permiten interrelacionar variables diversas mediante “pesos” o incidencias y funciones de transferencia que pueden simular relaciones lineales o no-lineales entre las diferentes neuronas o capas de neuronas, facilitando la modelación de sistemas complejos. Mediante procesos iterativos de ajuste, ponderación y definición de umbrales una red neuronal puede aprender o adaptarse pasando de una situación de “inexperta” a otra de “entrenada”, condición que se logra mediante aprendizaje supervisado, que puede ser correctivo o por refuerzo, y autoaprendizaje o no supervisado. En el primer caso los pesos son corregidos de acuerdo con desviación o la magnitud de un error respecto a una respuesta experta esperada o actualizados con base en el refuerzo de una señal (verdadera o falsa) y el resultado. En el segundo caso, los pesos no son corregidos por expertos externos porque que las soluciones no son conocidas o definidas en el proceso de entrenamiento. Un resumen de los fundamentos de la teoría de los conjuntos difusos y de las redes neuronales se presenta en el Apéndice D.

Aquí se propone una herramienta para la evaluación del riesgo sísmico en centros urbanos desde un punto de vista multidisciplinario. En el modelo se decidió hacer uso de la lógica difusa debido a que la información que se maneja en muchos casos es incompleta y subjetiva. La técnica de valoración de las diferentes variables utiliza expresiones cualitativas y lingüísticas que son fácilmente utilizadas mediante la teoría de conjuntos difusos. Por otra parte, se utilizan también redes neuronales debido a que se desea contar con un sistema experto que pueda ser calibrado utilizando el criterio de especialistas. La red neuronal desarrollada para el modelo de evaluación del Riesgo Sísmico consta de cinco capas o niveles. En su interior se ha estructurado una subred de tres capas que evalúa la vulnerabilidad sísmica del contexto. Las neuronas de entrada están agrupadas en cuatro grupos, pero no todas se encuentran en la primera capa. En esta red las neuronas de entrada solamente afectan la neurona intermedia del grupo al cual corresponden.

Para cada variable se cuenta con conjuntos difusos básicos predefinidos para los cinco niveles de daño posibles, cuyas calificaciones lingüísticas cambian en cada caso. Las funciones de pertenencia para las cinco valoraciones lingüísticas se muestran en la figura 7.18. Estos están basados en índices de daño escogidos para cada nivel de daño, según se explica más adelante.

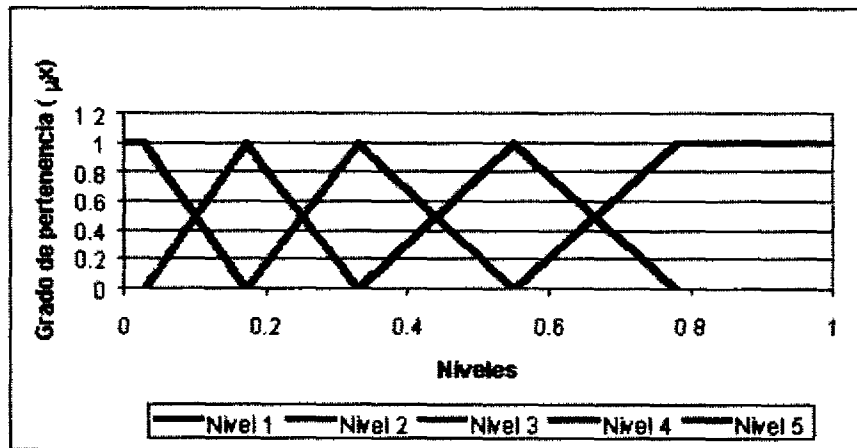


Figura 7.18: Conjuntos difusos utilizados para las diferentes calificaciones

El modelo de la red neuronal para la estimación del riesgo sísmico urbano es el que presenta la figura 7.19. Cada elemento variable contribuye con su función de pertenencia, la cual tiene un peso dentro del componente. De cada componente se calcula un índice numérico como el centroide del área de las funciones de pertenencia ponderadas por sus correspondientes factores de participación. Esto implica que el índice numérico estará determinado, o bien por los componentes cuya función de pertenencia se acerque a criterios lingüísticos como muy alto, muy intenso, etc., o bien por componentes que, aunque no tengan una función de pertenencia equivalente a dichas calificaciones, sí tengan una influencia o peso relativamente alto.

La estimación del riesgo sísmico urbano se realiza valorando para cada unidad de análisis, que bien puede ser una comuna, distrito o cualquier área suburbana, las variables físicas y del contexto que caracterizan la amenaza y la vulnerabilidad.

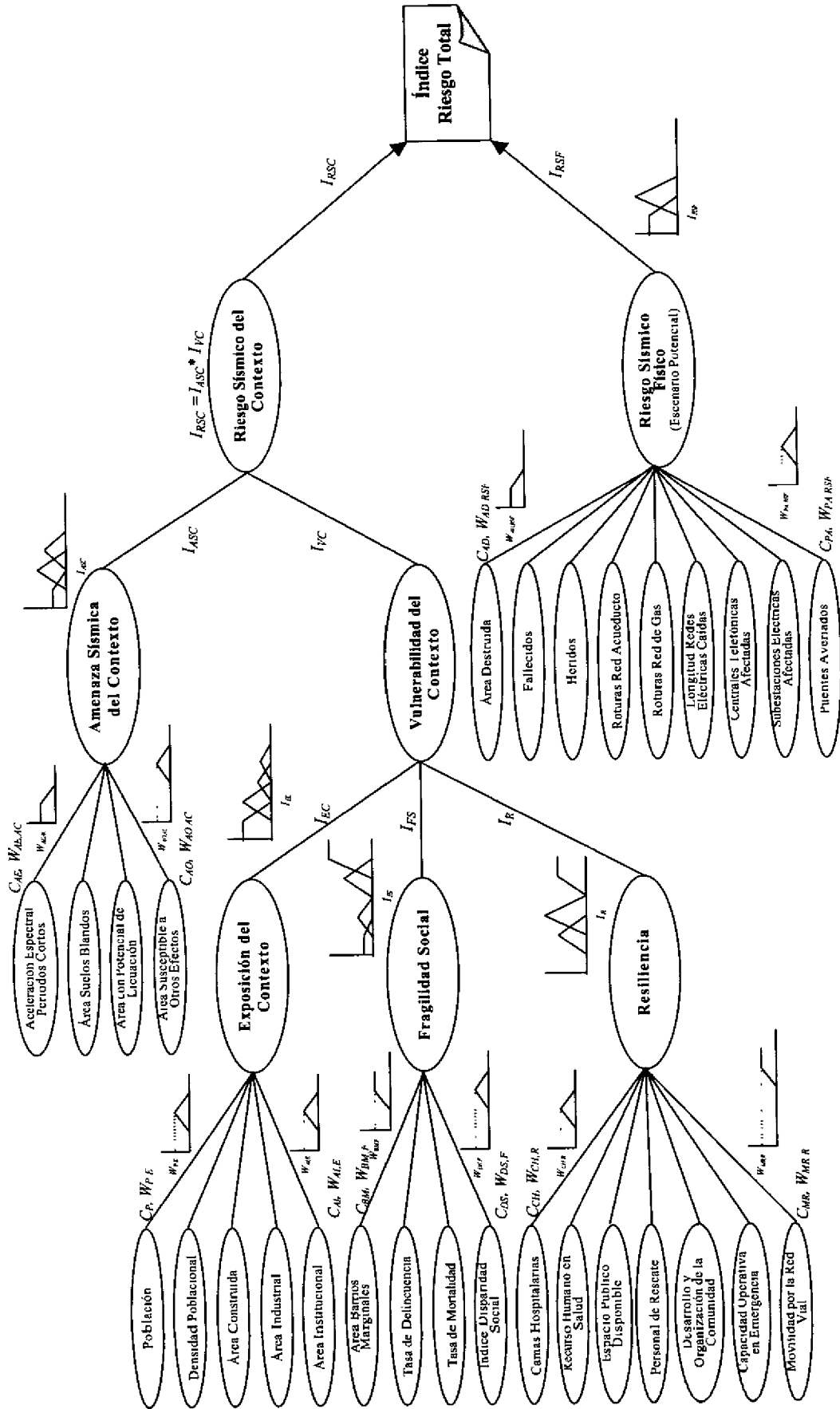


Figura 7.19 Estructura de la red neuronal

7.2.1 Nivel de entrada de la red neuronal

En esta capa hay diez y seis neuronas de entrada agrupadas en tres familias según el tipo de datos. Para cada variable de entrada se da una calificación y el peso o importancia con la cual la calificación influirá sobre la neurona intermedia correspondiente. El peso es normalizado y se calibra paulatinamente en la medida en que los pesos son introducidos por el evaluador para cada neurona intermedia. Los pesos se calibran mediante una función de aprendizaje, lo que permite que una vez la red ha sido utilizada suficientemente los pesos de las neuronas de entrada sean controlados por la red.

Los pesos o influencias relativas pueden tener un valor entre 0 y 100 y se normalizan tal como se indica en la ecuación 7.9. Con la unión de los conjuntos difusos escalados según su extensión se halla la calificación para cada grupo de variables.

$$w_{ij} = \frac{P_{ij}}{\sum_i P_{ij}}; \sum_i w_{ij} = 1 \quad [7.9]$$

Las neuronas de entrada que hacen parte de la primera capa de la red neuronal se encuentran agrupadas en variables de Exposición, Fragilidad Social y Resiliencia; es decir, los componentes de la Vulnerabilidad del Contexto. La tabla 7.3 presenta las neuronas de entrada al modelo en la primera capa.

A cada una de las variables se le asigna una calificación dentro de los cinco niveles posibles de valoración, que correspondientes a los conjuntos difusos mencionados anteriormente, y una influencia relativa sobre la neurona intermedia, que en este caso corresponde a la Vulnerabilidad del Contexto de la unidad de análisis.

Tabla 7.3: Neuronas de entrada en la subred

Grupo	Neuronas
Exposición	Población
	Densidad Poblacional
	Área Construida
	Área Industrial
	Área Institucional
Fragilidad Social	Área Barrios Marginales
	Tasa de Delincuencia
	Tasa de Mortalidad
	Índice de Disparidad Social
Resiliencia	Camas Hospitalarias
	Recurso Humano en Salud
	Espacio Público Disponible
	Personal de Rescate
	Desarrollo y Organización de la Comunidad
	Capacidad Operativa en Emergencia
	Movilidad por la Red Vial

7.2.2. Nivel intermedio de la red neuronal

A las neuronas de este nivel llegan las calificaciones de cada uno de los miembros del grupo de neuronas con su respectivo peso o grado de importancia (C , W). En este nivel se encuentran tres neuronas correspondientes a cada uno de los grupos de variables: Exposición del Contexto, Fragilidad Social y Resiliencia, como se indica en el diagrama de la figura 7.19. Es importante aclarar que para este modelo de red las neuronas de entrada no tienen influencia sobre todas las neuronas intermedias, únicamente influyen sobre la neurona intermedia correspondiente al grupo de variables a la que pertenece.

Los pesos o influencias de las neuronas de entrada sobre las de la capa intermedia son proporcionadas por el evaluador, tienen un valor en el rango $[0, 100]$ y son normalizadas utilizando la expresión 7.9, indicada previamente. Los conjuntos difusos son constituidos a partir de la unión de los conjuntos pertenecientes a cada neurona, los cuales están dados por la calificación hallada y el peso o importancia suministrados por el evaluador en cada caso, como se indica en la ecuación 7.10.

$$\mu_{C_G}(C) = \max(w_{G,N1} * \mu_{C_{N1}}(C_{N1}), \dots, w_{G,N5} * \mu_{C_{N5}}(C_{N5})) \quad [7.10]$$

Con la *desfusificación* de los conjuntos difusos utilizando el método del centrode de área (*COA*) se halla un índice correspondiente a cada neurona intermedia (grupo de variables) I_{EC} , I_{FS} , I_R , según la ecuación 7.11, donde G corresponde al grupo de Exposición, E , Fragilidad Social, FS , o Resiliencia, R .

$$I_G = \left[\max(w_{G,N1} * \mu_{C_{N1}}(C_{N1}), \dots, w_{G,N5} * \mu_{C_{N5}}(C_{N5})) \right]_{\text{centrode}} \quad [7.11]$$

En la segunda capa se encuentran las tres neuronas intermedias pertenecientes a la subred (Exposición, Fragilidad Social y Resiliencia) y cuatro neuronas de entrada pertenecientes al grupo de variables de Amenaza Sísmica del Contexto, expresada de acuerdo con las variables que señala la tabla 7.4. Estas neuronas de entrada tienen el mismo tratamiento que las pertenecientes a la subred. Cada una es calificada y le es asignado un peso o influencia relativa sobre la neurona intermedia en la siguiente capa de la red, con esto se conforma un conjunto difuso para cada variable.

Tabla 7.4: Neuronas de entrada en la segunda capa de la red neuronal

Grupo	Neurona
Amenaza Sísmica del Contexto	Aceleración espectral en períodos cortos
	Área de suelos blandos
	Área con potencial de licuación
	Área susceptible a otros efectos

En esta fase de la evaluación los índices obtenidos de la capa anterior (para cada grupo de variables), corresponden a tres coordenadas en un espacio 3-D. Estas se utilizan para determinar el nivel de Vulnerabilidad del Contexto de acuerdo con su “cercanía” a una función de referencia que se ajusta o calibra cada vez que se realiza una evaluación. La ecuación 7.12, donde N corresponde a cada uno de los cinco niveles considerados ($N1$, $N2$, $N3$, $N4$, $N5$), calcula la distancia del punto resultante de la evaluación a la “función respectiva” de cada nivel de vulnerabilidad.

$$S_{1(N)} = \sqrt{(I_{EC(N)} - I_{EC})^2 + (I_{FS(N)} - I_{FS})^2 + (I_{R(N)} - I_R)^2} \quad [7.12]$$

el nivel que se encuentre más cercano es el que corresponde a la vulnerabilidad del contexto evaluado.

Las calificaciones finales son: Vulnerabilidad Muy Baja, Baja, Moderada, Alta y Muy Alta. Una vez asignada la calificación de la vulnerabilidad se realiza un proceso de aprendizaje de la red neuronal, mediante la corrección de las coordenadas (índices) de los puntos que identifican cada nivel de vulnerabilidad del contexto. Para el efecto, se utilizan los índices resultantes de cada evaluación y una tasa de aprendizaje. La tasa de aprendizaje determina en qué cantidad la red aprende de cada evaluación que se realiza. Esta cantidad varía con la utilización de la red y es mayor en las primeras aplicaciones. Por esta razón, el entrenamiento de la red debe hacerse con la participación de expertos, particularmente, en las primeras evaluaciones.

Al igual que como se llevó a cabo el procedimiento para determinar las neuronas de la primera fase, la Amenaza Sísmica del Contexto se obtiene de utilizar los valores asignados y los pesos o influencias de las neuronas que la constituyen, utilizando la expresión 7.9. Los conjuntos difusos se construyen a partir de la unión de los conjuntos pertenecientes a cada neurona, como se indicó en la ecuación 7.10. Así, Con la *desfusificación* de los conjuntos difusos utilizando el método del centroide de área (COA) se determina el índice de I_{ASC} según la ecuación 7.11, donde G corresponde al grupo de Amenaza Sísmica ASC .

La tercera fase de la evaluación involucra nueve neuronas de entrada pertenecientes al grupo de las variables de Riesgo Sísmico Físico, las cuales se indican en la tabla 7.5.

Tabla 7.5: Neuronas de entrada en la tercera capa de la red neuronal

Grupo	Neurona
Riesgo Sísmico Físico (Escenario potencial)	Área Destruida
	Fallecidos
	Heridos
	Roturas en la Red de Acueducto
	Roturas en la Red de Gas
	Longitud Redes Eléctricas Caídas
	Centrales Telefónicas Afectadas
	Subestaciones Eléctricas Afectadas
	Puentes Averidos

A estas neuronas de entrada se les realiza el mismo procedimiento para determinar las neuronas de la primera fase. El Riesgo Sísmico Físico se obtiene de utilizar los valores asignados y los pesos o influencias de las neuronas que lo constituyen, utilizando la expresión 7.9. Los conjuntos difusos se construyen a partir de la unión de los conjuntos pertenecientes a cada neurona, como se indicó en la ecuación 7.10. Así, Con la *desfusificación* de los conjuntos difusos utilizando, de nuevo, el método del centroide de área (COA) se determina el índice de I_{RSF} según la ecuación 7.11, donde G corresponde al grupo de Riesgo Sísmico Físico RSF . La figura 7.20 ilustra un esquema con los pasos de todo el proceso de evaluación.