



MODELO BASADO EN LÓGICA DIFUSA PARA LA CONSTRUCCIÓN DE UN INDICADOR DE VULNERABILIDAD DEL SISTEMA TECNOLÓGICO FRENTE AL PELIGRO SÍSMICO

Autores: Lucía Argüelles Cortés¹, Daylenis Dorta Enríquez², Juan Carlos Cortés Parra³

^{1, 2, 3}Facultad de Matemática, Física y Computación, Universidad Central de Las Villas.

Resumen

En el presente trabajo se explica la importancia de considerar el sistema diagnóstico – pronóstico como instrumento para lograr una perspectiva eficiente del análisis sísmico y se indica su aplicación en la obtención de diversos tipos de índices de vulnerabilidad. Se muestra el grado de incertidumbre de las variables involucradas y se describe la posibilidad de utilizar técnicas de control difuso para determinar relaciones entre variables. Por último, se obtiene como resultado el índice de vulnerabilidad del sistema tecnológico al aplicar el estudio a una zona geográfica, a partir de la concepción de las funciones de pertenencia establecidas para las variables consideradas. La implementación práctica se realiza en Matlab.

Palabras clave

Sistema diagnóstico – pronóstico, índices de vulnerabilidad, índice de vulnerabilidad del sistema tecnológico, grado de incertidumbre, funciones de pertenencia, técnicas de control difuso.

Introducción

Una de las preocupaciones crecientes de la Defensa Civil del país está relacionada con el incremento de las manifestaciones de la actividad sísmica, de aquí la importancia de valorar apropiadamente las condiciones de vulnerabilidad. 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. Se realiza a partir de criterios técnicos, naturales y sociales.

Una forma de enfrentar este problema está dada por la determinación de un índice de vulnerabilidad frente a la amenaza sísmica con respecto a alguna perspectiva. La dificultad del método matemático requerido para la solución está en los tipos de variables que hace falta manejar, ya que estas variables están permeadas por la imprecisión de los datos o sucede que los conceptos considerados no están definidos con la exactitud de la lógica formal (3) por ejemplo las variables equipamiento colectivo, red vial y restauración. Esto lleva a la dificultad de modelar matemáticamente problemas asociados con dichas variables, obstaculizando el proceso de simulación.

Los modelos se construyen con el fin de contribuir a la solución de un problema concreto mediante predicciones y análisis de tendencias de evolución que permitan hacer previsiones (2). 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.



Los sistemas urbanos poseen diversas componentes que constituyen los distintos factores que influyen en la evaluación de su vulnerabilidad frente a fenómenos sísmicos, por lo que es necesario establecer y conceptualizar el sistema urbano como un sistema dinámico complejo que requiere de la valoración de variables cuantitativas, pero también de variables cualitativas con una información que puede ser juzgada como subjetiva, por ejemplo vulnerabilidad alta, media o baja (7). Esto conduce a dificultades de tratamiento por los métodos matemáticos convencionales. La propuesta es entonces trabajar con Sistemas de Lógica Difusa (SLD), a partir de los cuales se pueda establecer indicadores que permitan evaluar la vulnerabilidad de una manera integral.

La lógica difusa constituye una herramienta para la simulación de sistemas dinámicos complejos particularmente por "su poder y habilidad para derivar conclusiones y generar respuestas basadas en información vaga, ambigua, incompleta e imprecisa" (6). Un sistema difuso tiene una capacidad de razonamiento muy similar a la humana y puede ser representado en forma natural. Una forma de aplicar la lógica difusa es a través de la utilización de las reglas lógicas que operan sobre los conjuntos difusos. Las reglas definen las relaciones entre los conjuntos difusos de entrada y salida y reflejan cómo una persona normalmente pensaría sobre el proceso, esencialmente en forma lingüística.

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 opiniones de expertos e información numérica proveniente del trabajo de campo y ensayos de laboratorio (8).

Desarrollo

1. El sistema diagnóstico – pronóstico como instrumento para lograr la dirección eficiente del análisis sísmico

El diagnóstico es un componente importante basado en la recopilación de información, por lo que constituye una premisa para tomar decisiones y sobre esta base, elaborar los sistemas de acciones a seguir para lograr los objetivos previstos. En la actualidad, las funciones del diagnóstico se han ido ampliando desde el ámbito posterior a un fenómeno sísmico hasta el ámbito preventivo de sus consecuencias

El pronóstico es un proceso que está indisolublemente vinculado al diagnóstico, pero requiere un uso racional de este último en aras de optimizar las acciones que requiere la dirección del proceso preventivo.

Los orígenes de la palabra **diagnóstico** están en el término griego **diagnosis**, de **diag**, a través, y **gnosis**, conocimiento. En realidad es utilizado en diferentes esferas del conocimiento científico como momento que ofrece información sobre el estado de las cosas.

La importancia que tiene todo diagnóstico dentro del proceso de análisis sísmico es esencial, ya que permite conocer las particularidades de un fenómeno en un momento (o período) determinado, las causas de su ocurrencia, sus potencialidades, valorar su alcance y tener una imagen integral del mismo y del entorno con el que interactúa (9).



Para articular de forma sistémica el diagnóstico con el pronóstico deben considerarse los siguientes aspectos:

- Tener claridad de los referentes teóricos que sustentan la concepción del diagnóstico a aplicar (enfoques, principios, conceptos, entre otros).
- Ser consecuente no solo con el sistema de variables y métodos seleccionados para el diagnóstico, sino también con su aplicación e interpretación, la cual debe estar en correspondencia con la concepción teórica asumida.
- Precisar y jerarquizar cuidadosamente el (los) objeto(s) o variable (s) a diagnosticar, sus dimensiones e indicadores. En este sentido es necesario determinar cuál es el objeto (proceso, cualidad, etc.) principal y cuáles son los secundarios o subordinados, lo que posibilitará posteriormente establecer las correspondientes interrelaciones que puedan generarse, o de hecho existan entre ellos.

Por otro lado. **Prognosis** es también una palabra de origen griego que significa **conocer de antemano**. Es una variedad de la previsión científica, una investigación especial de las perspectivas de cualquier fenómeno.

El proceso a través del cual se obtienen pronósticos como resultado, se denomina pronosticación. A primera vista pareciera que ésta tiene un carácter eminentemente teórico, pero el conocimiento del futuro es una forma de reflejo de la realidad que tiene sus bases en la práctica.

Según A. Márquez (1984), el pronóstico es un componente proyectivo del sistema. Las habilidades de pronosticar son aquellas que garantizan la adquisición de información anticipada acerca de los fenómenos que se analizan, que toma como fuente el conocimiento de la esencia de estos fenómenos y la dinámica de sus transformaciones.

Manifestaciones concretas de pronóstico se evidencian en (4):

- El planteamiento de modelos para describir la realidad.
- El establecimiento de relaciones causa-efecto.

Con relación al análisis sísmico, en (2) se 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". Según este autor, se puede hablar en términos generales de dos metodologías para evaluar amenazas, basadas en análisis cualitativos y análisis cuantitativos respectivamente

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. 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 espacio.

Análisis cuantitativos: en los que las variables involucradas se cuantifican mediante estimaciones físicas o modelaciones matemáticas. Se convierten en fenómenos predecibles por la posibilidad de establecer modelos de simulación, basados en estudios sobre su funcionamiento.

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.

2. Modelo de sistema urbano

Para modelar un sistema urbano, pueden considerarse las componentes natural, tecnológica y social, lo cual dará lugar a la creación de tres subsistemas correspondientes (1). Las consideraciones o factores para cada uno de ellos serán la exposición, la fragilidad y la capacidad de respuesta de cada uno de los subsistemas.

Un resumen de las características de dichos factores se expone a continuación.

- Exposición: se utiliza para hacer referencia a la cantidad de los elementos expuestos en cada uno de los subsistemas y a su proximidad al área de influencia de la amenaza o peligro natural.
- Fragilidad: se utiliza para referirse a la debilidad, susceptibilidad y/o tendencia de fallar de cada subsistema, al ser impactado por la amenaza.
- Capacidad de Respuesta: se utiliza para relacionar la existencia y la operatividad de los procesos de preparación, prevención, respuesta y recuperación que tiene cada uno de los subsistemas establecidos frente a la eventualidad de un fenómeno natural.

En el presente trabajo interesa obtener el índice de vulnerabilidad correspondiente a la componente tecnológica. Con la propuesta del Sistema de Lógica Difusa en la evaluación de la vulnerabilidad, se busca pasar de un esquema tradicional en el que se determina si el sistema ES o NO ES vulnerable, a un esquema más amplio en el que se pueda 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 por la valoración de expertos, considerando que la información a la que se puede acceder para la evaluación de algunos de los descriptores en muchas ocasiones es “imprecisa” (5).

Índice de Vulnerabilidad del Sistema Tecnológico (IVST).

En términos generales, el Índice de Vulnerabilidad del Sistema Tecnológico se obtiene a partir de la determinación y relación de los Índices de Exposición del Sistema Tecnológico



(IEST), de Fragilidad del Sistema Tecnológico (IFST) y de Capacidad de Respuesta del Sistema Tecnológico (ICRST); a su vez cada uno de estos IEST, IFST e ICRST se establecen a partir de descriptores valorados por expertos.

Con la finalidad de precisar la selección de los descriptores, se realiza seguidamente una descripción del alcance de los índices.

Índice de Exposición del Sistema Tecnológico (IEST).

Indica la exposición de la infraestructura física en términos del número de edificaciones, cobertura y extensión de vías, redes eléctricas y gas, redes de acueducto y alcantarillado, a los equipamientos colectivos involucrados y a la ubicación de obras civiles presentes es decir, su proximidad con el área de influencia de la amenaza.

Índice de Fragilidad del Sistema Tecnológico (IFST).

Se refiere a la tendencia de fallar del subsistema, al ser impactado por la amenaza o el peligro natural.

Índice de Capacidad de Respuesta del Subsistema Tecnológico (ICRST).

Este aspecto está referido a las posibilidades tecnológicas y técnicas que tienen las estructuras físicas de ser recuperadas y puestas en funcionamiento, en dependencia de la operatividad de los procesos de preparación, prevención, atención y recuperación del subsistema frente a la eventualidad del fenómeno natural.

3. Modelo matemático para la determinación de índices

Un SLD está conformado por cuatro componentes estructurales: módulo difusor, base de reglas, motor de inferencia y módulo congresor.

Módulo difusor.

El módulo difusor halla, a partir de las variables de entrada, el grado de pertenencia a cada uno de los términos lingüísticos. Con estas variables de entrada 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 de valores abruptos a valores difusos por medio de la definición de conjuntos difusos y sus funciones de pertenencia.

Base de reglas.

Está conformada por el conjunto de proposiciones lógicas que se generan a partir de la experiencia o de la relación y análisis de datos numéricos. Las proposiciones que pueden darse en el sistema pueden ser simples o compuestas.

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. Cada regla se procesa según la implicación predeterminada en el diseño del SLD, dando un conjunto difuso resultante, esto es, generando un conjunto difuso de salida.



Módulo Concesor.

Recibe los conjuntos difusos de salida producidos por el motor de inferencia, los procesa y mediante un algoritmo produce un valor concreto de salida final del SLD. Existen varios concesores, uno de los más utilizados es el centro de gravedad.

4. SLD para evaluar la vulnerabilidad del subsistema tecnológico.

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 1. Los descriptores son:

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

(D2) Xest2 - Área edificada y obras civiles.

Tabla 1. Funciones de pertenencia para las entradas y salida en la estimación de EST

Rango	Expresión lingüística
0 – 26	Muy Baja (MB)
17 – 43	Baja (B)
37 – 63	Moderada (M)
57 – 83	Alta (A)
74 – 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 1.

Base de Reglas. (ESTB). Las posibles relaciones entre los dos descriptores en función de las posibilidades de valoración son las mostradas en la Tabla 2. Las relaciones se pueden presentar a partir de las combinaciones de la siguiente proposición:

Si D1 es...entonces D2 es...

Tabla 2. Base de reglas y valoraciones de descriptores en la 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.

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 3. Los descriptores son.

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

(D2) Xfst2 - Tipología y resistencia de edificaciones, estado de obrasciviles.

Tabla 3. Funciones de pertenencia para las entradas en la estimación de FST

Rango	Expresión lingüística
0 – 26	Muy Malo (MM)
17 – 43	Malo (M)
37 – 63	Regular (R)
57 – 83	Bueno (B)
74 – 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 4.

Tabla 4. Funciones de pertenencia para la salida en la estimación de FST

Rango	Expresión lingüística
0.0 – 0.26	Muy Bajo (MB)
0.17 – 0.43	Bajo (B)
0.37 – 0.63	Moderado (M)
0.57 – 0.83	Alto (A)
0.74 – 0.1	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 5. Las relaciones se establecen a partir de la combinación de las siguientes proposiciones:

Sí D1 es... Entonces D2 es...:

Tabla 5. Base de reglas y valoraciones de descriptores en estimación de FST.

D1						D 2
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 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.

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 6. 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 6. 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 función de pertenencia mostrados en la Tabla 6.



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 7. Las relaciones se establecen a partir de las combinaciones de la siguiente proposición:

Sí D1 es... entonces D2 es...:

Tabla 7. Base de reglas y valoraciones de descriptores en estimación de CRST.

D1						D 2
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	

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 8.

X1vst - EST Exposición del Subsistema Tecnológico

X2vst - FST Fragilidad del Subsistema Tecnológico

X3vst - CRST Capacidad de Respuesta del Subsistema Tecnológico

Tabla 8. 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 8.



Base de Reglas. VSTB. Las posibles relaciones entre las variables de entrada, en función de las posibilidades de valoración se muestran en las tablas 9, 10, 11, 12 y 13. 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 9. 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 10. 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 11. 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 12. CRST fija baja y EST, FST variables.

EST						F
MB	B	M	A	MA		
M	A	A	MA	MA	MA	
M	M	A	MA	MA	A	



B	M	M	A	A	M	S T
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...

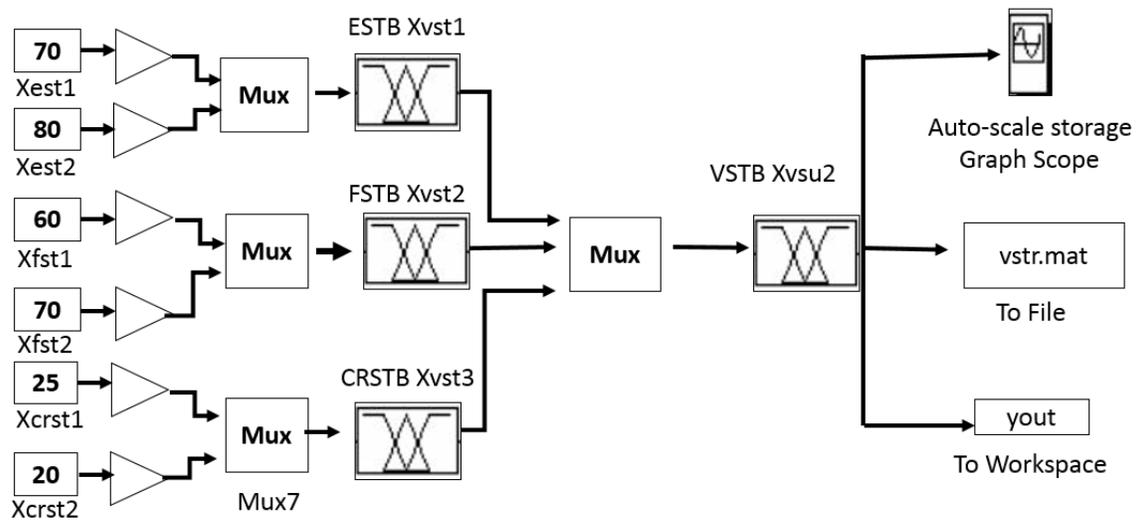
Tabla 13. CRST fija Muy Baja y EST, FST variables.

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	

5. Implementacion computacional

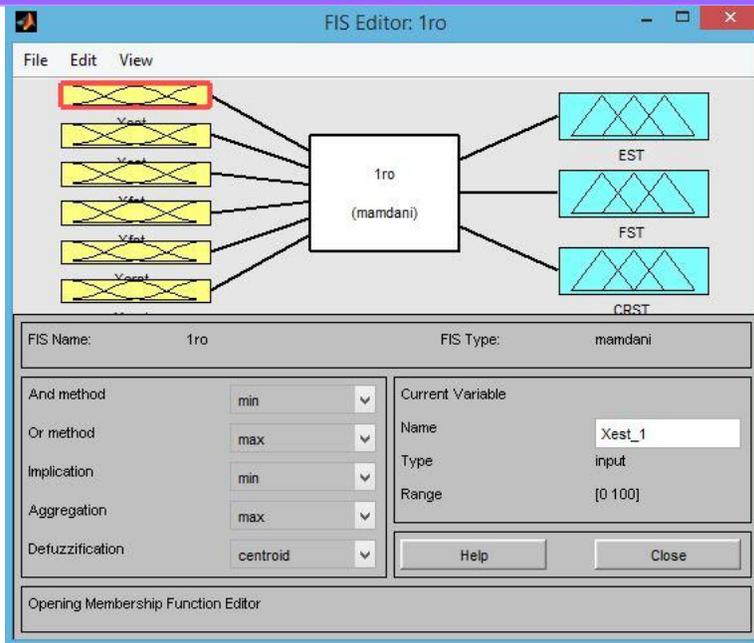
La siguiente figura muestra de manera esquemática el proceso de determinación del Índice de Vulnerabilidad del Subsistema Tecnológico

Figura1. Operador difuso para estimar Vulnerabilidad del Subsistema Tecnológico



El software permite implementar las funciones de pertenencia como se muestra en la siguiente figura:

Figura 1. Variables de entrada y de salida en la primera etapa



Se implementa la base de reglas como se refleja a continuación

Figura 2. Funciones de pertenencia

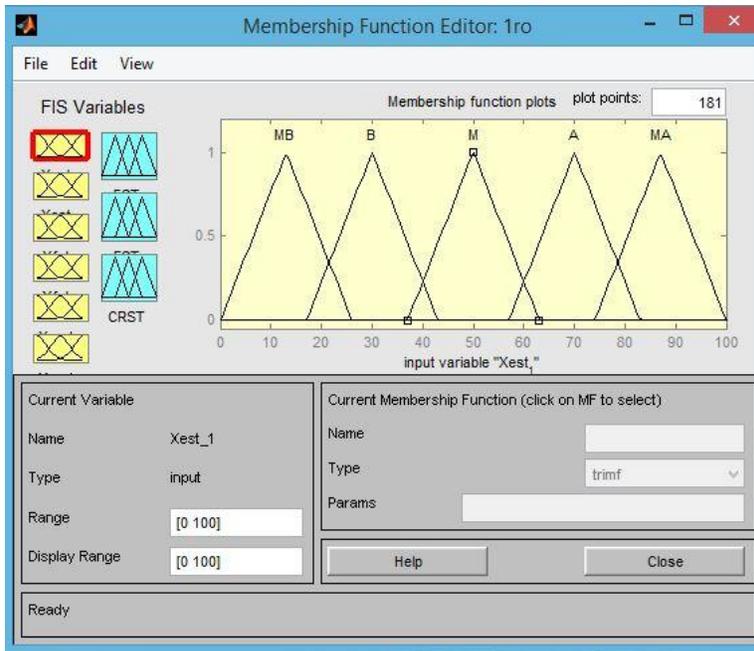
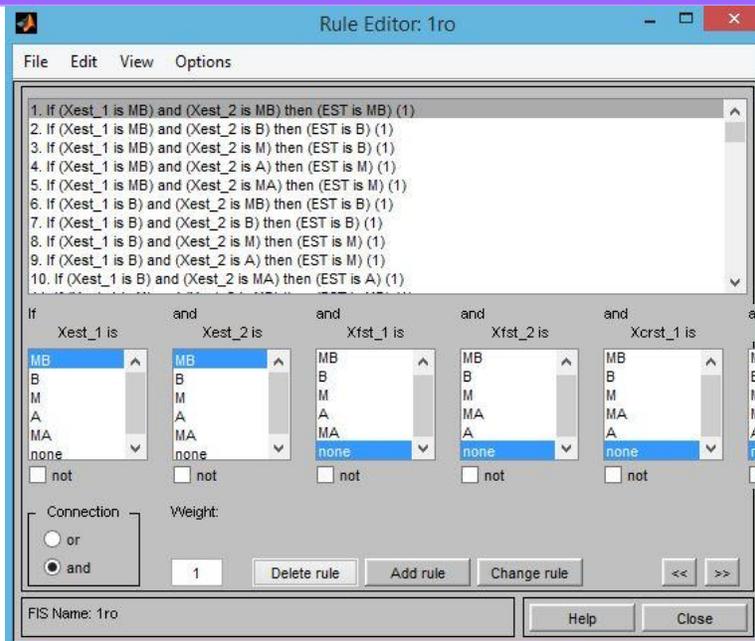
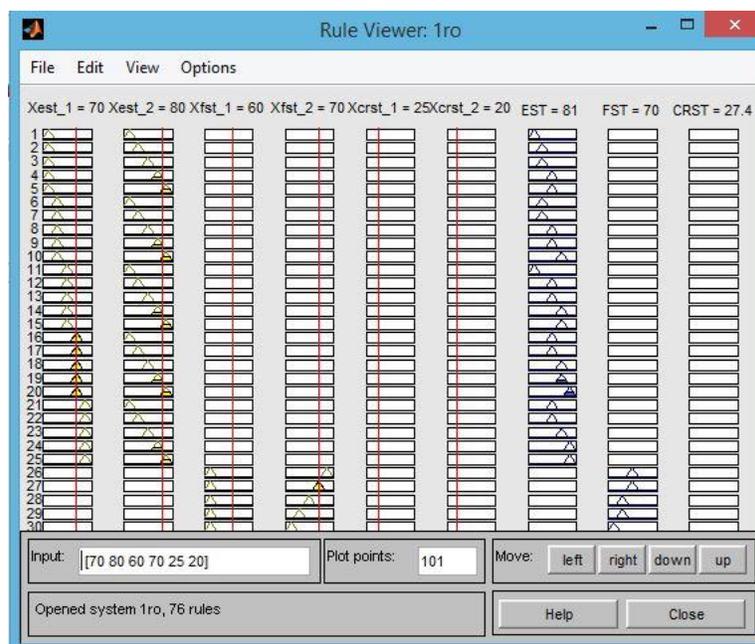


Figura 3 Base de reglas



Se resuelve el problema de determinación del índice de vulnerabilidad tecnológica a partir de sus entradas como se refleja seguidamente

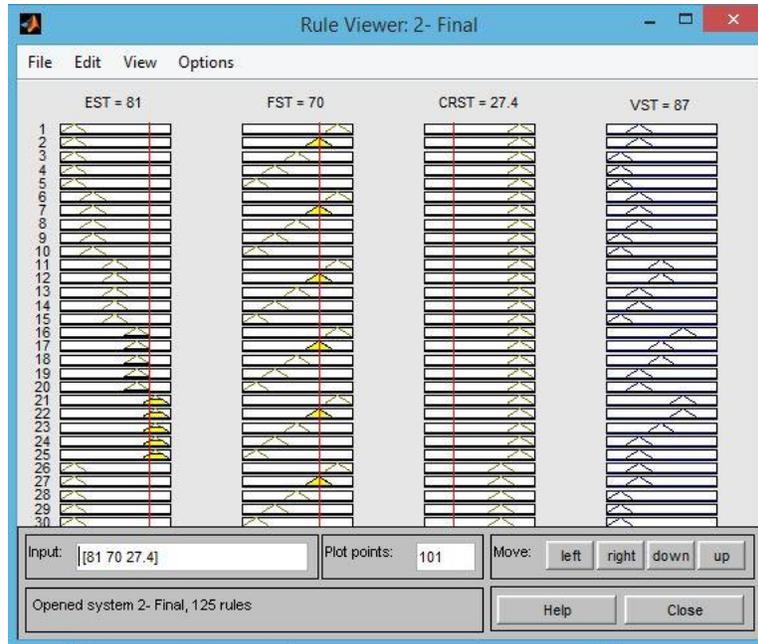
Figura 4 Visualizador de reglas.



En la segunda etapa se trabaja de forma análoga a la primera, lo que este caso se tiene un conjunto de tres variables de entrada y una de salida.



Figura 5. Resultado en la segunda etapa



El resultado numérico obtenido está de acuerdo con lo establecido en la base de reglas definida en la tabla 12. 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. Los valores para el índice de capacidad de respuesta bajos y muy bajos, potencian la vulnerabilidad del sistema.

Conclusiones

Se argumentó por qué el sistema diagnóstico – pronóstico constituye un instrumento efectivo para lograr la dirección eficiente del análisis sísmico cuando se utilizan recursos idóneos de la Lógica Difusa para procesar información imprecisa por la presencia de términos lingüísticos permeados de subjetividad.

Se expusieron las componentes asociadas a la modelación de un sistema urbano, que son la natural, la tecnológica y social y los factores considerados en cada uno de ellos, que son la exposición, la fragilidad y la capacidad de respuesta de cada uno de los subsistemas.

Se explicó en particular la conformación de un Índice de Vulnerabilidad del Sistema Tecnológico en el contexto de un modelo de sistema urbano y se mostró la utilidad de su concepción a la hora de obtener información en el análisis sísmico.



Se utiliza el MATLAB para desarrollar el modelo matemático que permite la determinación del mencionado índice y se muestra la concepción de la implementación computacional que conduce al resultado.

Recomendaciones

Aplicar los criterios manejados para obtener estos índices con situaciones de diversas zonas geográficas de Cuba, interpretar y comparar los resultados obtenidos.

Extender las consideraciones establecidas para la conformación de índices relacionados con otras componentes del modelo urbano.

Bibliografía

1. Arcos, Jorge; Fors, Emilia. La evaluación del riesgo sísmico en el planeamiento territorial y urbano . Grupo de Estudio de Desastres *GREDES*. Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría, 2012.
2. Cardona, Omar. Gestión integral de riesgos y desastres. Tesis desarrollada para optar al título de Doctor en Ingeniería Civil, 2003.
3. García, Eduardo. Modelo basado en Lógica Difusa para la construcción de indicadores de vulnerabilidad urbana frente a fenómenos naturales. Tesis desarrollada para optar al título de Magister en Medio Ambiente y Desarrollo, 2003.
4. Bommer, Julián. The prediction of strong motion duration for engineering design. Paper No. 84. Eleventh World Conference on Earthquake Engineering ISBN: 0080428223
5. Molas, Gilbert. On the correlation of ground motion indices to damage of structure models. Paper No. 1074. 13th World Conference on Earthquake Engineering. 2004
6. Benito, M^a Belén- Evaluación regional de la amenaza sísmica en Centro América, UPM. 2008
7. M.L. Carreño, O.D. Cardona y A.H. Barbat. Evaluación de la habitabilidad de edificios afectados por sismo utilizando la teoría de conjuntos difusos y las redes neuronales artificiales. Revista Internacional de Métodos Numéricos para Cálculo y Diseño en Ingeniería. 2011
8. Rojas, María del Carmen. Desarrollo de un software basado en redes neuronales artificiales para la vigilancia del riesgo de la vivienda urbana para la salud. III Congreso de la Asociación Latinoamericana de Población, Córdoba, Argentina, 2008.
9. Mena, Ulises. Evaluación del riesgo sísmico en zonas urbanas. Tesis Doctoral en Ingeniería Sísmica y Dinámica Estructural. Barcelona, 2002