



## REVISTA UD Y LA GEOMÁTICA

<http://revistas.udistrital.edu.co/ojs/index.php/UDGeo/index>

DOI:<http://dx.doi.org/10.14483/udistrital.jour.udgeo.2013.7.a03>

INVESTIGACIÓN

### Diseño de una herramienta SIG para la estimación del riesgo por explosión en Bogotá

Design of GIS tool for estimating the risk by explosion in Bogotá

*Julián Alfonso Tristancho<sup>a</sup>, Héctor Javier Fuentes<sup>b</sup>, Luis Fernando Vargas Tamayo<sup>c</sup>,*

Para Citar este artículo: Tristancho J. A. & Fuentes H. J. (2013). Diseño de una herramienta SIG para la estimación del riesgo por explosión en Bogotá. UD y la Geomática, (7), pp 23 – 30.

**Fecha de recepción:** 08 de octubre de 2013 / **Fecha de aceptación:** 01 de noviembre 2013

#### RESUMEN

En el presente artículo se expone un modelo de estimación de daños en estructuras habitacionales e industriales por explosiones y el diseño de un Sistema de Información Geográfico autónomo, con la capacidad de estimar el porcentaje de daño asociado a una explosión de origen industrial o terrorista en la ciudad de Bogotá. En la parte final se hace una validación del modelo al comparar las pérdidas económicas originadas en actos terroristas del pasado reciente.

**Palabras clave:** SIG, explosión, vulnerabilidad, análisis del riesgo, terrorismo, daño estructural.

#### ABSTRACT

In this paper a model for estimating damages set forth in residential and industrial structures explosions and designing an autonomous Geographic Information System, with the ability to estimate the percentage of damage association to an explosion of industrial origin or terrorist for Bogotá. At the end of a validation of the model implemented when compared economic losses from terrorist acts of the recent past is made.

**Keywords:** GIS, Explosion, Vulnerability, Risk assessment, Terrorism, Structural damage.

<sup>a</sup>Universidad Distrital Francisco José de Caldas

<sup>b</sup>Universidad Distrital Francisco José de Caldas

<sup>c</sup>Universidad Distrital Francisco José de Caldas

## 1. Introducción

Es muy común que en las ciudades que carecen de una adecuada planeación o un crecimiento demográfico muy rápido tiendan a darse procesos de densificación que implican la ubicación de viviendas, industrias y comercios en zonas compartidas o muy cercanas entre sí. Además se tienen elementos móviles de transporte de compuestos altamente combustibles o a alta presión (como gasolina, petroquímicos, oxígeno medicinal, etc.), los cuales pueden ocasionar accidentes de gran magnitud. En países con conflictos internos como Colombia existe la posibilidad de atentados terroristas en los que usan explosivos, con consecuencias graves sobre la población civil y la infraestructura pública y privada.

Se puede definir que una amenaza es cualquier factor que está fuera control para los habitantes en determinada zona, originada por un fenómeno físico latente, y que al ocurrir puede producir un desastre. La amenaza puede tener origen natural, antrópica o socio-natural. La amenaza por explosión es de origen tecnológico (accidentes industriales) o referidas a la guerra y la violencia social (atentados terroristas). La vulnerabilidad son las características y las circunstancias de una comunidad, sistema o bien que los hacen susceptibles a los efectos dañinos de una amenaza. La vulnerabilidad se puede definir como:

$$Vulnerabilidad = \frac{Exposición \cdot susceptibilidad}{Resiliencia} \quad (1)$$

De la ecuación (1) se tiene que la exposición son los elementos que según su ubicación pueden ser afectados por la amenaza; la susceptibilidad es la fragilidad del sujeto para enfrentar la amenaza; y la resiliencia es la capacidad de la exposición para resistir, absorber, adaptarse y recuperarse de los efectos de la amenaza.

El riesgo es el resultado de la interacción de las amenazas con la vulnerabilidad (ver ecuación (2)). Se tiene entonces que la amenaza es una probabilidad de ocurrencia periódica, mientras la vulnerabilidad está asociada al nivel de daño (tanto económico como humano) que un elemento puede tener después de la ocurrencia de la amenaza.

$$Riesgo = Amenaza \cdot Vulnerabilidad \quad (2)$$

La gestión de riesgos está orientada a disminuir la incertidumbre relativa a una amenaza por medio del incremento del conocimiento de los fenómenos asociados a esa amenaza y la mitigación de la vulnerabilidad de los posibles elementos expuestos. Como se vio en la ecuación Error: Reference source not found, para poder disminuir la vulnerabilidad se debería disminuir la exposición, disminuir la susceptibilidad o aumentar la resiliencia.

Comúnmente, los estudios sobre la mitigación del riesgo se enfocan en amenazas naturales para la población. Son menos los estudios que analizan las implicaciones de las amenazas que se originan al convivir con actividades industriales en zonas urbanas o de atentados terroristas, caso común en algunas ciudades latinoamericanas.

En cuanto a Bogotá, aunque a partir de los planes de ordenamiento territorial (POT) se busca evitar este tipo de aglomeraciones, son bien sabidas las dificultades a las que se enfrentan los gobernantes para tratar de ordenar el territorio o reubicar las actividades ya establecidas en ciertas zonas. La mayor parte de la industria se ubica en las zonas de Fontibón, Puente Aranda y Autopista Sur (Muñoz, 2010), zonas que a su vez se caracterizan por una alta densidad de vivienda y de comercio circundante.

Por otra parte, en cuanto a la actividad terrorista, la gran mayoría de ataques están dirigidos a ubicaciones cercanas a infraestructura, centros policíacos o militares y entidades públicas. En Bogotá, las entidades públicas de mayor tamaño e importancia se encuentran ubicadas en las zonas centro y centro occidente (Centro Administrativo Nacional, CAN), aunque en toda la ciudad también están distribuidas entidades de mediano (por ejemplo, estaciones de policía) y pequeño tamaño (por ejemplo, comandos de atención inmediata [CAI], de la Policía Nacional), todas susceptibles de atentados terroristas.

En este sentido, el estudio del riesgo al que se exponen los habitantes de estas zonas implica una consideración a la luz de la elaboración de planes de emergencia y al mismo tiempo de la planificación de costos de aseguramiento de vivienda e industrias. Al respecto, el Fondo de Prevención y Atención de Emergencias (Fopae) establece, por ejemplo, que en Bogotá se registran en los últimos años una alta presencia de incendios, derrames, fugas y explosiones asociados a incidentes con materiales peligrosos (Muñoz, 2010).

Los sistemas de información geográfica (SIG) son herramientas poderosas para la estimación de la vulnerabilidad, pues al tener información georreferenciada, con datos asociados a la estructura (vulnerabilidad), es posible realizar una estimación del riesgo ante un evento o amenaza determinada.

Por lo tanto la integración de un sistema SIG, con una herramienta de estimación de daño por explosiones puede llegar a ser una importante herramienta, para mitigación del riesgo. En este artículo se describe la naturaleza de los procesos explosivos, el modelamiento de su comportamiento y la estimación de los daños originados en las estructuras civiles e industriales. En la parte final se describe el diseño de una herramienta SIG para Bogotá, la cual, con información geográfica de predios y un modelo matemático de daño, puede generar mapas de afectación económica ante eventos explosivos.

## 2. Metodología

### 2.1. Principios físicos de las explosiones

Una explosión se define como el fenómeno donde una onda de presión de choque es generada en el aire por una rápida liberación de energía. Esta energía puede haber sido almacenada originalmente en un sistema de diversas formas: nuclear, química, eléctrica, presión o mecánica (Bangash & Bangash, 2006).

Existen dos tipos de explosión: deflagración o detonación. En la deflagración, la propagación de la explosión dentro del material no quemado es por transferencia de masa y calor, por lo tanto la velocidad de transferencia de la energía es lenta (menores a la velocidad del sonido); mientras en la detonación el método de propagación es por calentamiento compresivo de choque, con lo cual la velocidad de propagación es siempre mayor a la velocidad del sonido. De igual manera, el frente de onda en una explosión tipo detonación es esférica desde su origen, mientras que la deflagración presenta un movimiento no regular (esfera achatada o rampa creciente) debido a los mecanismos de propagación de la energía. Un fenómeno explosivo puede ser originado por las siguientes reacciones térmicas, físicas o químicas: (CCPS, 1996):

- Nube de vapor (vapor cloud explosion, VCE): resultado de la ignición de un vapor inflamable, gas, aerosol o una mezcla, en la cual la llama se acelera a velocidades altas y produce la sobrepresión. Tipo deflagrante.
- Explosión en fase condensada: Líquidos o sólidos, que tienen un alto calor de descomposición, como combustibles o explosivos industriales. Tipo deflagrante.
- Estallido de recipientes a presión. Tipo detonante.
- Vaporización instantánea de líquidos (Boiling Liquid Expanding Vapour explosion [BLEVE]). Líquidos a alta temperatura que cambian rápidamente de presión. Tipo detonante.
- Por su naturaleza explosiva. Pueden ser deflagrante o detonante de acuerdo a origen.

La Figura 1 presenta la curva clásica de evolución de los dos tipos de explosiones (deflagración y detonación), donde se puede ver un área de sobrepresión y succión (presión inferior a la atmosférica). Los modelos matemáticos para calcular los efectos de las explosiones están basados en tres parámetros fundamentales: sobrepresión máxima ( $P_{so}$ ), tiempo de sobrepresión positiva ( $t_p$ ) e intensidad de la explosión ( $i$ ), esta última corresponde al área bajo la curva de la sobrepresión vs. el tiempo, hasta el tiempo  $t_p$  (Galán, 2012).

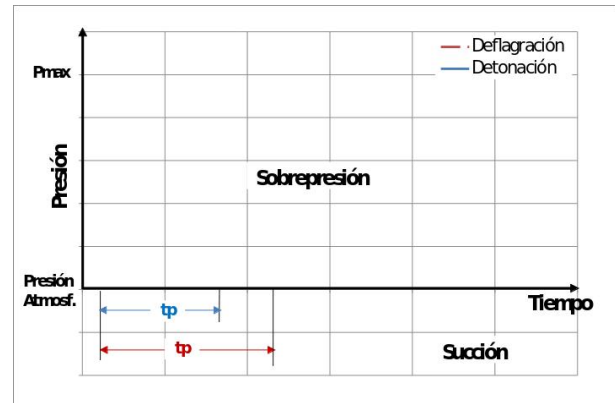


Figura 1. Evolución temporal de una explosión y parámetros de caracterización.

Fuente: adaptado de Galán (2012).

### 2.2. Caracterización de las explosiones

La mayor parte de la industria implementada en Bogotá presenta en esencia sistemas de almacenamiento de gases a presión (gas natural, acetileno, propano, oxígeno, etc.), sistemas agua/vapor a alta presión (calderas y tuberías de vapor), los cuales presentan explosiones tipo detonante, al igual que la mayoría de los elementos usados en atentados terroristas (TNT, ANFO).

El TNT (Trinitrotolueno) ha sido uno de los explosivos más estudiados por los militares, por uso como arma. La técnica de estimación de sobrepresión e intensidad por el Método del TNT equivalente es una de las más utilizadas en los procesos explosivos del tipo detonante. El principio básico de este método se fundamenta en encontrar el equivalente en masa de TNT que reproduce de manera aproximada el nivel energético de destrucción (Galán, 2012). La ecuación (3) se utiliza para determinar el equivalente de masa de TNT ( $W_{TNT}$ ), donde  $\alpha$  es el rendimiento de la explosión,  $E_{Exp}$  es la energía liberada por la explosión y la constante  $4,6 \text{ kJ/g}$  corresponde al calor de combustión del TNT.

$$W_{TNT} = \alpha \frac{E_{Exp}}{4.6 \text{ KJ/g}} \quad (3)$$

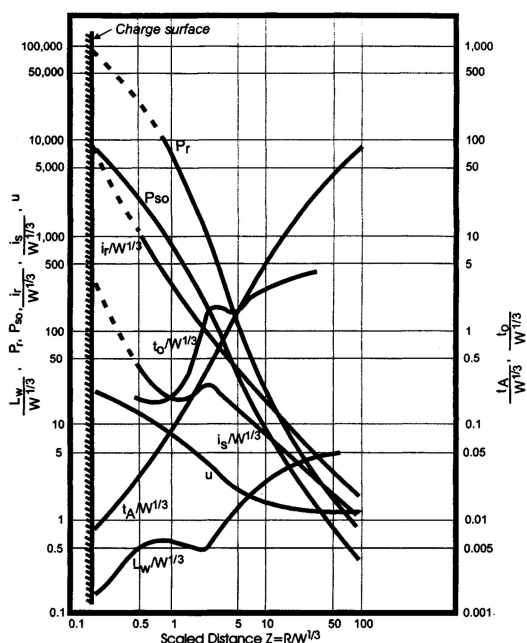
En la Tabla 1 se hace un resumen de los parámetros  $\alpha$  y cálculo de  $E_{Exp}$ , de acuerdo con el origen de la explosión.

Una vez se tiene la masa equivalente de TNT de la explosión, es posible calcular el valor máximo de sobrepresión ( $P_{so}$ ) e impulso de sobrepresión ( $I_s$ ), entre otras. Para ello es usada la Figura 2, la cual resume los resultados obtenidos de manera empírica de numerosos ensayos de laboratorio. La gran mayoría de los resultados de esta gráfica están escalados con respecto a la raíz tercera de la masa de TNT equivalente.

**Tabla 1.** Equivalencias energéticas entre orígenes explosivo, sustancias explosivas y TNT (Krauthammer, 2008; Galán, 2012)

sustancia/ origen	$\alpha$	Energía liberada
TNT	1	$E_{Exp} = m_{TNT} \cdot 4,6 \text{ kJ/g}$
ANFO	1	$E_{Exp} = m_{ANFO} \cdot 1,59 \text{ kJ/g}$
BLEVE	< 0.1	$u = h - P \cdot v$ $E_{Exp} = m \cdot (u_2 - u_1)$
Recipientes a presión	> 0.3 < 0.5	$E_{Exp} = \frac{(P_1 - P_0) \cdot V_g}{\gamma_1 - 1}$

$m$  = masa,  $u$  = energía interna específica,  $h$  = entalpía específica,  $P$  = presión absoluta,  $v$  = volumen específico,  $V_g$  = volumen del gas en el recipiente y  $\gamma_1$  = relación de calores específicos en el sistema.



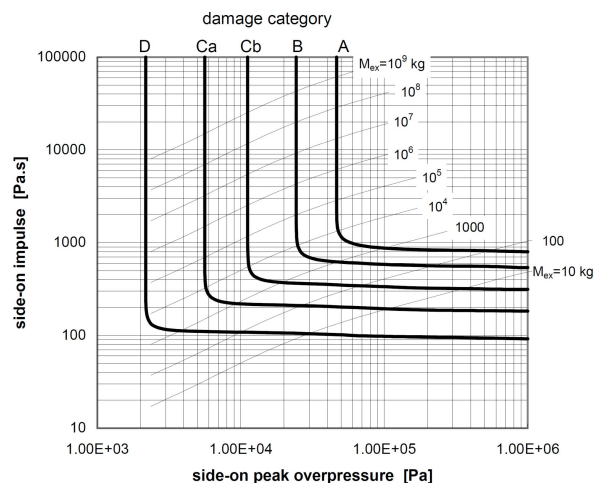
**Figura 2.**  $W$  = masa equivalente de TNT,  $R$  = distancia desde el origen de la explosión,  $P_{so}$  = sobrepresión positiva,  $P_r$  = sobrepresión reflejada,  $I_s$  = impulso incidente,  $I_r$  = Impulso reflejado,  $t_p$  = tiempo sobrepresión positiva,  $t_A$  = tiempo de arribo onda de choque,  $u$  = velocidad frente de onda y  $L_w$  = longitud de onda fase positiva de la onda. Todas las unidades en sistema inglés (msec, psi, ft, lb).

Fuente: CCPS (1996).

### 2.3. Nivel de daño sobre edificaciones por impulso y sobrepresión

Jarret (1968) realizó una serie de ensayos sobre estructuras habitacionales con diferentes cantidades de TNT, a partir de la cual obtuvo la Figura 3. Este diagrama hace parte de la norma de protección contra explosiones del Reino Unido,

y es usada para determinar el nivel de daño en estructuras tipos casa de 1 o 2 pisos con mampostería en ladrillo.



**Figura 3.** Categoría de daño en función del impulso incidente y sobrepresión pico, según Jarret (1968) (Diagrama P-I).

Fuente: Van Geel (2005).

En la Figura 3 se tienen claramente identificadas seis zonas relacionadas con el nivel pico de sobrepresión e impulso. Cada una de estas zonas tiene las características mostradas en la Tabla 2.

**Tabla 2.** Categorías de daño (Van Geel, 2005)

Zona	Características	Pr
A	Daño superior al 75% Daño estructural.	6,437
B	Daño entre el 50% y 75% Daño en mampostería y cubiertas.	5,785
Cb	Daño entre el 25% y 50% Daño en mampostería	5,000
Ca	Daño entre el 10% y 25% Daños en vidrios y menores en mampostería	4,308
D	Daño inferior al 10% Daños menores en vidrios	3,355

Debido a que en la ciudad no todas las construcciones son casas con las características descritas por Jarret, es necesario hacer una corrección sobre los resultados mostrados. Van Geel (2005) propone usar el criterio de Jarret para estructuras inferiores a 4 pisos, y sugiere que en estructuras superiores se debe usar una función Probit ( $P_r$ ) para estimar a qué zona de daño se debe asociar. Una función Probit es útil en el análisis estadístico para el diagnóstico de la desviación de la normalidad (Van Geel, 2005). El procedimiento propuesto por CCPS (1996) es el siguiente:

Si

$$\begin{aligned} \log(i_s) &\geq -0.149 + 0.665 \cdot \log(P_{so}) \\ &\vdots \\ Pr &= -4.375 + 1.006 \cdot \log(P_{so}) \\ Pr &= -3.683 + 1.513 \cdot \log(i_s) \end{aligned} \quad (4)$$

Van Geel (2005) también propone que en las plantas industriales pueden usarse los mismos modelos de estimación de daños. En la Tabla 2, se tienen los niveles límites de la función Probit para cada una de la zonas de daño.

2.4. Diseño herramienta SIG

Para el desarrollo de la aplicación Sistema de Información Geográfica de Estimación de Daños por Explosiones (SIG-EDE) se optó como lenguaje de programación Visual Basic .NET, compatible con plataformas Windows XP y superiores. Todo el motor de presentación de mapas se diseñó en Visual Basic, usando para ello el GDI+ y el servidor de base de datos OleDb. SIG-EDE tiene la capacidad de leer archivos tipo ESRI Shapefile (\*.shp) y presentarlos visualmente en pantalla. Además puede manejar datos en formato dBase (\*.dbf) y Microsoft Access (\*.mdb).

SIG-EDE está diseñada alrededor de una interfaz multiventana en un contenedor MDI, con dos ventanas: una principal y otra de visualización de resultados. La ventana principal consta de un área de herramientas de control de visualización (control de zoom, ubicación de evento, identificación de objetos, control de archivo, entre otras), en la

parte izquierda se tiene un control tabular donde se agrupan las herramientas de selección de capas de visualización, vista aérea, filtrado de objetos y parámetros de simulación. Finalmente, en la parte derecha se encuentra el área de visualización geográfica, como se puede ver en la Figura 4a.

SIG-EDE posee un sistema de filtrado basado en SQL, con lo cual es posible activar la visualización de los predios a calcular, según los campos numéricos de la base de datos, mejorando la visualización de resultados y optimizando el proceso de cálculo.

En la b es posible ver la estructura general de la ventana de presentación de datos y resultados de SIG-EDE. Cualquier dato asociado a los mapas georreferenciados se presentan en forma de tabla; al hacer clic sobre una de las filas de esta tabla se activa un resalte sobre el objeto geográfico asociado. En el área de presentación gráfica de estadísticas se puede seleccionar el campo de la base de datos que se desea usar para hacer el análisis. Cuando se activa la ventana de visualización de datos, la pestaña de control de simulación se hace visible.

Los parámetros básicos de configuración son ubicación por coordenadas del punto de origen de la detonación (escritos directamente en los campos de latitud-longitud o haciendo clic sobre el mapa de visualización) y tipo de principio de la explosión (agente explosivo, recipiente a presión o BLEVE). Una vez el sistema selecciona el principio de la detonación, configura los parámetros necesarios de simulación: por ejemplo, si es por material explosivo, se activa el campo masa del agente explosivo.

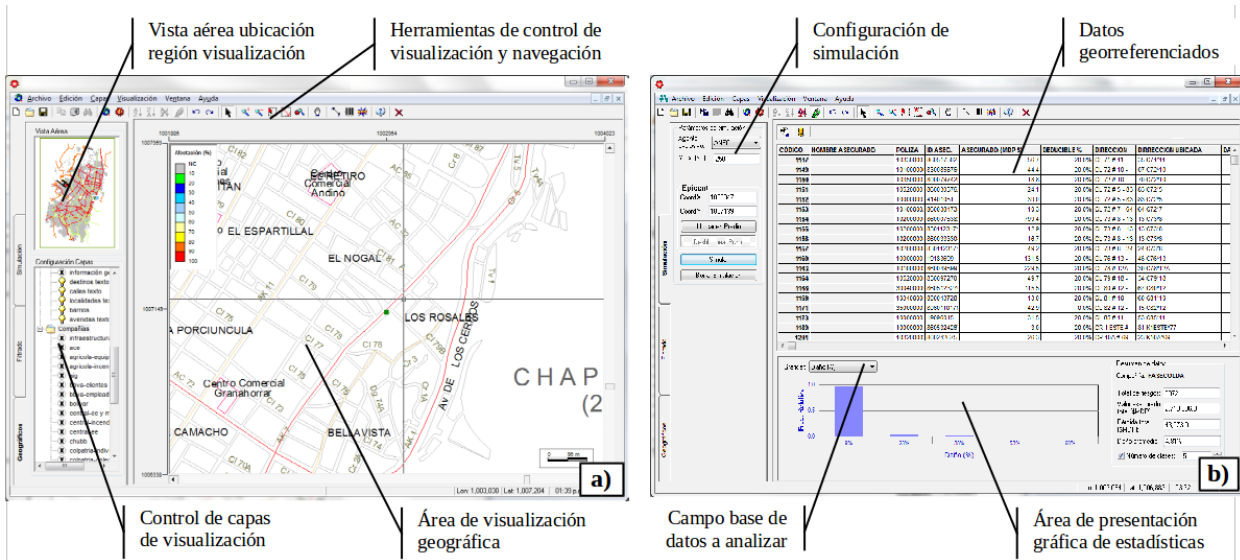


Figura 4. Estructura general de la interfaz del usuario, SIG-EDE. a) Navegación y visualización, b) Tabla de datos georreferenciados.

Fuente: elaboración propia.

## 2.5. Implementación modelo de daño

El proceso de cálculo inicia con la determinación de la masa equivalente de TNT para el proceso detonante seleccionado. Después, para cada predio dentro de la base de datos se realiza el cálculo de la distancia hasta el origen de la explosión.

SIG-EDE cuenta con la Figura 2, con lo cual es posible calcular los parámetros de sobrepresión e intensidad basados en la masa de TNT equivalente y la distancia hasta el origen de la explosión. Para el cálculo de puntos intermedios de la gráfica se hace una regresión lineal entre los valores digitalizados de la curva. Cada curva fue digitalizada con un mínimo de 20 puntos.

Cada una de las zonas de la Figura 3 están almacenadas dentro de SIG-EDE; si se tiene que el predio en análisis es de cuatro niveles o menos, se aplica esta información de daño, en otro caso se aplica el modelo propuesto por Van Geel (2005), mostrado en la ecuación 4.

Para realizar una aproximación del daño entre los límites de cada área se hace una regresión logarítmica por medio de una línea perpendicular al borde limitante. Si el impulso es menor 10 Pa·s o menor 1kPa se asume que no existe daño sobre el predio.

La última etapa es el cálculo de pérdidas estimadas al multiplicar el valor asegurado de cada predio con el daño estimado. Este riesgo económico es almacenado dentro de la

base de datos del sistema para ser visualizado en SIG-EDE.

## 3. Resultados

Para evaluar la precisión de la herramienta, se realizó la simulación de varios atentados terroristas del pasado reciente en Bogotá. Se usó la información de estos atentados dado que existe información mucho más detallada (y pública) de los daños económicos ocurridos respecto a los resultados de una detonación industrial.

El primer caso estudiado fue la explosión de origen terrorista del Club El Nogal, ocurrida el 7 de febrero de 2003, en la cual se usó un carro bomba con 250 kg de ANFO. Este atentado dejó 30 muertos, más de 150 heridos y cerca de 31.700 millones de pesos en daños materiales (Sarría, 2004). En la Figura 5 se muestra la simulación respectiva.

Para verificar los resultados obtenidos se hizo la conversión a dólares de los daños estimados (para la época de los atentados) y se comparó con los resultados obtenidos por SIG-EDE, teniendo en cuenta que la base de datos de información de predios es de 2006. Se realizó el mismo análisis para los atentados contra los edificios del Departamento Administrativo de Seguridad (DAS) y del periódico El Espectador. En la se muestran las características de la explosión, los resultados obtenidos en la simulación y los niveles de error calculados frente a las pérdidas aprox. reportadas.

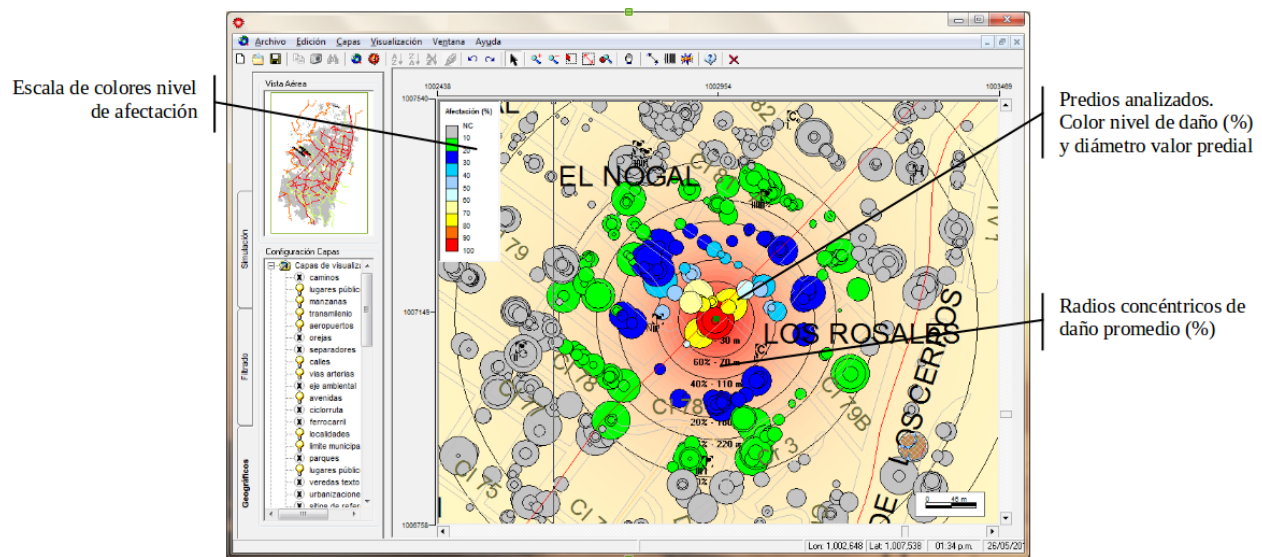


Figura 5. Estructura general de la interfaz del usuario, SIG-EDE. a) Navegación y visualización, b) Tabla de datos georreferenciados.

Fuente: elaboración propia.



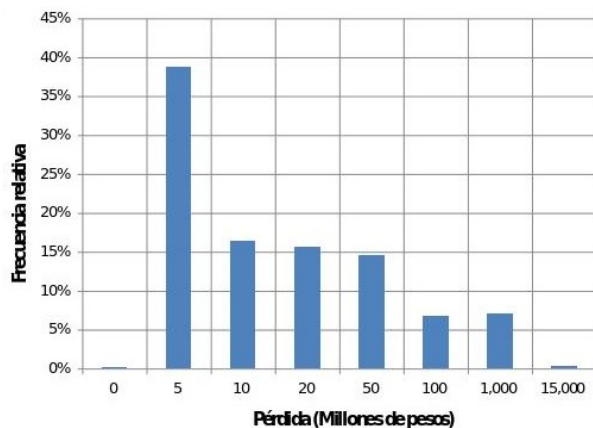
**Tabla 3.** Simulación de algunos atentados terroristas en Bogotá usados como eventos de validación

Descripción	Daños \$USD		Error
	Estimados	SIG-EDE	
Edificio DAS, 1989 500 kg, dinamita	14.500.000	10.200.000	30,0%
El Espectador, 1989, 55 kg, dinamita	3.000.000	3.100.000	3,3 %
Club El Nogal, 2003, 250 kg, ANFO	13.400.000	15.700.000	17,2 %

#### 4. Discusión de resultados

La Tabla 3 revela una desviación notable en los resultados obtenidos para los eventos de gran magnitud. Esto se puede atribuir a que con un radio de acción de la explosión muy grande, se presentan efectos de dispersión y refracción de la onda explosiva a medida que pasa a través de diferentes predios y calles.

En la Figura 6 se presenta la distribución de frecuencia de pérdidas para la simulación del atentado del Club El Nogal. Se puede observar un fuerte componente en 5 millones de pesos, lo cual corresponde a daños por cristales y daños menores en mampostería. Se tiene un solo predio con una pérdida cercana a 15.000 millones de pesos, la cual corresponde a un daño aproximado del 78% del edificio del Club El Nogal.

**Figura 6.** Análisis de frecuencia de pérdidas en infraestructura por atentado al Club El Nogal, 2003.

Fuente: elaboración propia.

#### 4.1. Limitaciones del modelo implementado

El modelo de daño aquí implementado tiene como núcleo el modelo de TNT equivalente el cual es sólo aplicable a explosiones del tipo detonante.

El cálculo de daño es realizado a partir de una serie de experimentos sobre estructuras fijas. Las condiciones estructurales cambian de acuerdo con el tipo de vivienda, edificio o fábrica. Pese a que autores como Van Geel (2005) han tratado de sopesar ese importante factor, el nivel de incertidumbre es muy grande y difícil de reducir, convirtiéndose un error aleatorio, que necesitaría de gran cantidad pruebas para con métodos estadísticos se pudiera acotar y ajustar. Este nivel de incertidumbre es ocasionada entre otros factores por: el tamaño de las fachadas (para determinación de presión estática y dinámica por la explosión), ubicación con respecto a la onda de choque (mayores daños si la onda llega de manera frontal), dispersión de la onda de choque por obstáculos, onda reflejada sobre la estructura (vibración inducida en la estructura por la explosión), fenómenos de resonancia y efectos de presión succión dentro de la edificación una vez el frente de onda ingresa, alteran el comportamiento y capacidad de daño de la explosión (Sarría, 2004; Bangash & Bangash, 2006).

Pese a que SIG-EDE genera un nivel de riesgo económico ante un evento determinado, no es posible llegar a decir que se tiene un análisis de riesgo de la ciudad. El proceso de cálculo de amenaza, vulnerabilidad y riesgo se debe tratar como un fenómeno probabilístico, el cual implica una caracterización más precisa de predios y análisis de ubicación-magnitud del probable evento explosivo (Stewart et al., 2006)

#### 5. Conclusiones

El uso de herramientas SIG para la estimación del riesgo por amenazas explosivas permite disminuir la incertidumbre y realizar una mejor planeación en la gestión del riesgo en la medida en que ayuda a contar con conocimiento sobre sus posibles efectos económicos.

Las explosiones generan importantes efectos desde el punto de vista económico. Cada amenaza y cada explosión acarrea diferentes efectos los cuales dependen de variables tales como la cercanía de los predios y características de las viviendas al lugar de los hechos. En tal sentido y aunque no se puede contar con un modelo general que explique estos fenómenos sí es posible determinar el nivel de riesgo económico asociado al mismo.

Herramientas como SIG-EDE, al ser desarrolladas con una plataforma independiente (no utiliza software comercial como motor SIG), no necesitan ninguna licencia o software especializado. Esta condición garantiza que al tratarse de una herramienta diseñada para un único fin, los procesos de capacitación sean reducidos y sin costos de licenciamiento

pues se trata de una herramienta académica de uso libre.

Entre algunas de las aplicaciones directas de SIG-EDE están: delimitación adecuada de zonas industriales o de agencias de seguridad (oficina de planeación de ordenamiento territorial), protocolos y uso de recursos para atención de desastres (oficina de atención de desastres), programas de reducción del riesgo (oficinas de seguridad industrial en empresas públicas y privadas), determinación de perímetros seguros (agencias de seguridad estatal) y tasas de aseguramiento zonal diferencial según el riesgo (aseguradoras).

## Referencias

- Muñoz, F. (2010). Industria segura, Bogotá protegida, Revista Contacto, 1, pp. 9-11. Universidad de los Andes.
- Centre for Chemical Process Safety (CCPS). (1996). Guidelines for Evaluating Process Plant Buildings for External Explosions and Fires. American Institute of Chemical Engineers (AIChE), John Wiley and Sons.
- Bangash, M. Y. H., & Bangash, T. (2006). Explosion-Resistant Buildings. Berlin: Springer.
- Van Geel P. L. B. A. (2005). Methoden voor het bepalen van mogelijke schade (2nd Ed.). The Netherlands Organization of Applied Scientific Research.
- Galán S. (2012). Explosión de equipos a presión. Análisis de riesgos y consecuencias. Tesis para optar al título de Ingeniero Naval. España: Universidad Politécnica de Cataluña.
- Krauthammer, J. (2008). Modern Protective Structures. USA: Taylor & Francis Group.
- Jarrett D. E. (1968). Derivation of the British explosives safety distances. Annuals of the New York Academy of Sciences, vol. 152.
- Stewart, M., Netherton, M. & Rosowsky, D. (2006). Terrorism Risks and Blast Damage to Build Infrastructure. Natural Hazards Review, 7 (3).
- Sarria A. (2004). Investigación no destructiva y cargas extremas en estructuras. Bogotá: Ediciones Uniandes.

