



República Bolivariana de Venezuela
Ministerio Público
Dirección General de Apoyo a la Investigación Penal

**INVESTIGACIÓN DE ACCIDENTES
EXPLOSIVOS POR LA LIBERACIÓN DE
SUSTANCIAS PELIGROSAS: USO
POTENCIAL
DEL MODELO ALOHA**

Omar Márquez Suárez
Experto Ambiental de la
Coordinación Técnico Científica
Ambiental adscrita a la Dirección Técnico
Científica y de Investigaciones del
Ministerio Público.

**INVESTIGACIÓN DE ACCIDENTES EXPLOSIVOS
POR LA LIBERACIÓN DE SUSTANCIAS
PELIGROSAS: USO POTENCIAL
DEL MODELO ALOHA**

Omar Márquez Suárez
Experto Ambiental de la Coordinación
Técnico Científica Ambiental adscrita a la
Dirección Técnico Científica y de
Investigaciones del Ministerio Público.

RESUMEN

La liberación accidental o intencional de sustancias peligrosas a la atmósfera origina serias consecuencias, tales como: presencia de gases tóxicos, incendios y explosiones, amenazando directamente a las personas, la propiedad y el ambiente con dichos gases, sobrepresión (explosión) y radiación térmica (calor). Debido a esto, los respondedores de emergencias e investigadores de siniestros, utilizan simultáneamente los modelos de dispersión de atmósferas peligrosas y sistemas de información geográfica (SIG), para simular y predecir la distribución espacial de las áreas de amenazas y estimar las consecuencias de accidentes. Con el objetivo de evaluar las posibles consecuencias provocadas por la liberación accidental o fuga de gas metano, transportado a través de un gasoducto, se simularon escenarios hipotéticos de liberación con el modelo de Localización de Áreas de Atmósferas Peligrosas (ALOHA siglas en inglés). Obteniendo entre otras, tres zonas de amenazas: sobrepresión por deflagración, sobrepresión por detonación y radiación térmica, estas fueron desplegadas en el sistema de información geográfica QGIS para realizar el análisis geoespacial. Los resultados obtenidos sugieren que en la investigación criminal de accidentes explosivos por la liberación de materiales peligrosos a la atmósfera, las herramientas tecnológicas: el modelo ALOHA, imágenes satelitales y el SIG QGIS, se pueden utilizar de forma complementaria en la evaluación de consecuencias.

Descriptor: Accidente explosivo, liberación de materiales peligrosos, evaluación de consecuencias, ALOHA y QGIS.

INTRODUCCIÓN

La ocurrencia de accidentes químicos por el inadecuado manejo de materiales peligrosos ha sido una de las mayores preocupaciones a nivel mundial, puesto que en los últimos años la incidencia de siniestros con tales sustancias se ha incrementado (He et al., 2011). Los accidentes químicos relacionados con sustancias peligrosas son definidos como la liberación incontrolada de significantes cantidades de materiales tóxicos, explosivos o inflamables, durante procesos productivos tales como: operación, almacenamiento, transporte, uso y disposición final, donde las personas, la propiedad y el ambiente circundante son seriamente afectados (Code of Federal Regulations (CFR), 2012). El objetivo fundamental de la investigación de un accidente químico es determinar los hechos, condiciones, circunstancias y causas o probables causas que originan la ocurrencia de accidentes (US Environmental Protection Agency (USEPA), 2011).

La Organización Internacional del Trabajo (OIT) estimó que a nivel mundial anualmente mueren 2,34 millones de personas por accidentes y enfermedades relacionadas con el ambiente de trabajo (International Labour Organization (ILO), 2013). En este contexto Mihailidou et al. (2012) observan que las cifras de siniestralidad señalan que Venezuela figura en la lista de los quince países con alto número de grandes accidentes, según la clasificación de accidentes del Programa de Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA), de acuerdo al análisis de datos registrados a nivel mundial desde el año 1917 hasta 2011.

El transporte de gas natural y de petróleo a través de gasoductos, y otras sustancias peligrosas utilizadas con propósitos comerciales e industriales ha estado involucrado en grandes accidentes químicos, es así como típicos accidentes con efectos catastróficos han sido documentados por diferentes medios de comunicación, literatura científica y de carácter legal (Sklavounos & Rigas, 2006; Huang & Li, 2012; Mihailidou et al., 2012). Específicamente, es importante mencionar que entre las principales consecuencias de un accidente provocado por la ruptura de un gasoducto, se pueden generar la aparición de gases tóxicos, fuego y explosión; amenazando directamente las proximidades del sitio donde ocurre, a las personas, la propiedad y el ambiente con gases tóxicos, sobrepresión y radiación térmica, y el efecto dominó asociado al fuego y explosiones (Gómez-Mares et al., 2008).

A continuación, se mencionan algunos accidentes emblemáticos ocurridos en el mundo y en Venezuela: el 24 de marzo de 1994 en New Jersey, Estados Unidos de América, un trabajo de excavación en un gasoducto subterráneo, generó una explosión dejando como resultado una (1) fatalidad y cincuenta (50) lesionados (Edison, 1994). El 28 de septiembre de 1993 en la Autopista Regional del Centro, Las Tejerías, estado Aragua, Venezuela, se produjo la ruptura de un gasoducto que ocasionó la fuga de gas originando una explosión, debido a la instalación de fibra óptica, dejando como resultado cincuenta (50) fatalidades y cuarenta (40) lesionados (Tribunal Supremo de Justicia (TSJ), 2006). Uno de los accidentes más severos, ocurrió el 04 de junio de 1989 en Bashkiria, Rusia, un gasoducto que transportaba una mezcla de gases de petróleo (metano, etano, propano, butano y pentano), generó una fuga que permaneció por varios días y provocó una explosión que al paso de dos (2) trenes causó cuatrocientos sesenta y dos (462) fatalidades y setecientos seis (706) lesionados (Becker et al., 1990). Durante el 09 de septiembre de 2010 en San Bruno, California, Estados Unidos de América, un gasoducto que transportaba gas natural explotó en un área residencial, provocando ocho (8) fatalidades y cincuenta y ocho (58) lesionados (Davidson et al., 2012). El 24 de agosto

de 2012 en la Refinería de Amuay, estado Falcón, Venezuela, se produjo un escape masivo de olefinas, incendiándose posteriormente el gas, generando una onda expansiva que causó cuarenta y siete (47) fatalidades y ciento treinta y siete (137) lesionados, y demás daños materiales y ambientales (Ministerio del Poder Popular de Petróleo y Minería, 2013).

El gas natural es una mezcla de hidrocarburos cuyo principal componente es el metano (CH_4), este es clasificado como una sustancia peligrosa, porque debido a sus características fisicoquímicas es capaz de causar daños a la salud humana, la propiedad y al ambiente (CFR, 2012; Ley sobre sustancias, materiales y desechos peligrosos, 2001). Es un gas incoloro e inodoro, se enciende fácilmente, sus vapores son más livianos que el aire, por lo que es inflamable y explosivo (CAMEO Chemicals, 2015). Por su gran utilidad en procesos domésticos, comerciales e industriales el gas natural ha estado asociado a varios accidentes explosivos.

Una explosión es definida como la liberación violenta de energía en forma de luz, calor, sonido y consecuente generación de una onda de choque, esta última consiste en aire altamente comprimido viajando radialmente a velocidad supersónica a partir de su punto de origen. Los tiempos de duración de las explosiones se encuentran en el orden de fracciones de segundos (Ngo et al., 2007). Cuando la onda de choque se expande, la presión decrece exponencialmente con la distancia y el tiempo, llegando a ser negativa y creando una presión dinámica que puede arrastrar y proyectar los fragmentos de las superficies de las edificaciones. Además, cuando la onda de choque se encuentra con superficies de estructuras que obstruyen su expansión, esta es reflejada y amplificada en magnitud dependiendo del ángulo de incidencia (Federal Emergency Management Agency (FEMA), 2011).

En las infraestructuras una explosión puede provocar de manera directa colapsos estructurales en las paredes, columnas, pisos y ventanas. En las personas puede causar

pérdidas de vidas (fatalidades) y significativos daños físicos (lesiones), la exposición a altas presiones causa daños en el tímpano y colapso de los pulmones. Los misiles provenientes de la fragmentación de las edificaciones y vidrios pueden causar lesiones por laceración y diversos traumatismos (FEMA, 2011). Se ha demostrado que en eventos explosivos los fragmentos de vidrios son los principales responsables de las lesiones causadas a las personas (Ngo et al., 2007).

La explosión de un gas es un proceso de combustión donde una nube premezclada de combustible gaseoso – aire, causa un rápido incremento de presión (Bjerketvedt et al., 1997). Cuando la liberación accidental de gas metano ocurre y la concentración no alcanza los límites de inflamabilidad (5-15%) o no existe una fuente de ignición, el gas puede ser dispersado y desaparecer (Huang & Li, 2012). De lo contrario, cuando alcanza dichos límites la ignición puede acontecer de manera inmediata generando fuego y en el peor de los casos ocurre la ignición retardada. En esta última la combustión de la nube de vapor inflamable, origina una onda de presión que dependerá de la velocidad de propagación de la llama y las condiciones de confinamiento durante su expansión. Cuando la llama se propaga a velocidades subsónicas ocurre la deflagración y la detonación cuando lo hace a velocidades supersónicas, en este caso la onda de choque y la de combustión son acopladas, alcanzando mayores presiones con respecto a la deflagración (Bjerketvedt et al., 1997).

En situaciones de liberación accidental o intencional por ataques terroristas con sustancias peligrosas a la atmósfera, quienes intervienen en estas emergencias así como los investigadores necesitan conocer de manera inmediata la información temprana de las sustancias gaseosas liberadas con la finalidad de proteger a las personas, la propiedad y al ambiente (Southwell, 2005). En estos casos el uso de modelos de dispersión de atmósferas peligrosas, permite realizar la simulación y predicción espacial de las zonas de riesgo a partir de los datos del accidente, variables meteorológicas y otros parámetros de peligro. Los modelos están diseñados para analizar diferentes escenarios de liberaciones tóxicas

accidentales “peores escenarios”, para la preparación de los planes de respuesta de emergencia y medidas, así como la evaluación y gestión de riesgos (Stenzer & Baumann-Stanzer, 2010).

Entre una serie de modelos ampliamente utilizados, se encuentra el modelo de Localización de Áreas de Atmósferas Peligrosas (ALOHA siglas en inglés) (ALOHA, 2013), este permite simular la liberación o fuga accidental de gases y estimar las áreas potencialmente peligrosas (National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), U.S. Environmental Protection Agency (USEPA), Pipelines and Hazardous Materials Safety Administration (PHMSA), 2006; Jones et al., 2013). Los modelos por una parte estiman la concentración física de materia y energía distribuida espacialmente a partir del origen de liberación, tales como: radiación térmica, sobrepresión y la concentración de material tóxico en la atmósfera. Y por otra, permiten evaluar el impacto que la concentración de la materia y energía tiene sobre las personas, la propiedad y el ambiente. Por lo que, los modelos son una herramienta clave utilizada en la evaluación de consecuencias, realizando la simulación de incendios, explosiones y dispersión de sustancias tóxicas y nubes inflamables (Zhu et al., 2013).

Según el Grupo Universitario de Investigación Analítica de Riesgos (GUIAR, 2014), el análisis de riesgo trata de estimar el nivel de peligro potencial de un suceso no deseado (accidente), en términos de cuantificar la magnitud de los daños o consecuencias y la probabilidad de ocurrencia. Inicialmente, en este análisis se identifican los sucesos que pueden dar origen a una condición de peligro real, luego se evalúan las causas que lo pueden provocar y finalmente se analizan las consecuencias y probabilidades de ocurrencia de accidentes. En el contexto de la liberación accidental de sustancias peligrosas, se entiende por análisis de consecuencias a la evaluación cuantitativa de la distribución espacial y temporal de las variables físicas representativas de los fenómenos de dispersión de las sustancias peligrosas simuladas por los modelos y sus posibles efectos sobre las

personas, el ambiente y los materiales, con el fin de estimar la naturaleza y la magnitud potencial de los daños.

Simultáneamente, en el análisis de consecuencias en el proceso de evaluación de riesgo por la liberación accidental o intencional de sustancias peligrosas, es de suma importancia el componente espacial, ya que es necesario conocer la localización geoespacial de las zonas de amenazas asociadas a la dispersión de gases tóxicos, fuego y explosiones (Kulawiak et al., 2009; Renjith&Madhu, 2010; FEMA, 2011). Es por ello, que los sistemas de información geográfica (SIG) y sensores remotos desempeñan un papel fundamental en la visualización y análisis geoespacial en situaciones de desastres y emergencias (Cutter, 2003; Jakala, 2007). A través del empleo de los SIG, múltiples capas de información pueden ser analizadas geoespacialmente y desplegadas en la composición de mapas, obteniendo de esta manera una representación visual de los efectos del fuego, explosiones y dispersión de los gases tóxicos (Vijayaraghavan et al., 2012).

Adicionalmente, en el contexto ambiental venezolano cualquier situación que conlleve la liberación accidental de sustancias peligrosas que pueda provocar eventos explosivos, está asociada al manejo de sustancias, materiales y desechos peligrosos. Y desde el punto de vista jurídico la Ley Penal del Ambiente (2012) y Ley sobre sustancias, materiales y desechos peligrosos (2001). Indican una serie de normas técnicas permiten a los Fiscales del Ministerio Público dirigir la investigación, tipificar los delitos ambientales y de cualquier otra naturaleza, a fin de ejercer la acción penal.

En este trabajo, fueron utilizados conjuntamente como herramientas complementarias de investigación en la pesquisa de un accidente explosivo, el modelo ALOHA, imágenes satelitales y el sistema de información geográfica (SIG) software libre QGIS, generado por la liberación o fuga de gas metano transportado a través de un gasoducto que atraviesa un ambiente urbano, simulando escenarios hipotéticos de liberación con la finalidad de evaluar las posibles consecuencias del accidente.

Materiales y métodos

El modelo de Localización de Áreas de Atmósferas Peligrosas (ALOHA siglas en inglés) versión 5.4.4, fue seleccionado para la ejecución de la simulación, este modelo es un software de computación diseñado para responder a situaciones de emergencias químicas. Está conformado por un conjunto de ecuaciones matemáticas que describen los fenómenos de transporte (advección y difusión) o dispersión gaussiana de plumas de aire contaminantes, continuas y bouyantes (NOAA, USEPA, PHMSA, 2006; Jones et al., 2013). Este modelo de dispersión fue desarrollado conjuntamente por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (USEPA siglas en ingles), la Oficina de Prevención y Preparación de Emergencias Químicas (CEPPO siglas en ingles) y la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica (NOAA siglas en ingles). ALOHA es capaz de generar modelos de zonas peligrosas, tales como: toxicidad, inflamabilidad, radiación térmica (calor) y sobrepresión (explosión), relacionados con la liberación o fuga accidental de sustancias que provocan la dispersión de gases tóxicos, fuego y explosiones.

Además, estima el movimiento y la dispersión de atmósferas de gases peligrosos así como la concentración del gas en la atmósfera, los valores de sobrepresión de una nube de vapor explosiva o el área de inflamabilidad de una nube de vapor inflamable. Este software resuelve problemas de manera rápida y presenta sus resultados de forma gráfica, de tal manera que puede ser utilizado para dar respuestas a situaciones de emergencias, planificación e investigación de accidentes. Su uso es ampliamente recomendado para la evaluación de consecuencias en el proceso de evaluación de riesgo en situaciones de ataques terroristas (McLean et al., 2011).

En este sentido, ALOHA es capaz de simular la dispersión de más de mil (1000) sustancias químicas peligrosas, generando

una gran variedad de escenarios tales como: zonas de amenazas sitio específico, intensidad y tasa de fuga de sustancias peligrosas a partir de una fuente. Asimismo, modela varios escenarios de liberación o fuga de sustancias peligrosas, como nubes de gases tóxicos, explosión de vapores de líquidos que se expanden al hervir (BLEVE siglas en inglés), fuegos tipo jet y charco, deflagración y explosión de nubes de vapor peligrosas.

Por otra parte, ALOHA puede desplegar gráficamente zonas de amenazas, demostrando una o más áreas de peligros por toxicidad, inflamabilidad, radiación térmica y daños por sobrepresión, que pudieran exceder un nivel umbral capaz de causar daños a la salud humana, a la propiedad y al ambiente. Estas zonas de amenaza son desplegadas en tres colores: el rojo representa el área del peor peligro mientras que el anaranjado y amarillo peligros decrecientes. Los diagramas de estas zonas de amenazas son presentados por el modelo en formato Keyhole Markup Language (KML), estos pueden ser importados y desplegados en sistemas de información geográfica (Liu et al., 2012; Sengupta et al., 2013).

El área de estudio seleccionada para esta simulación, corresponde a un área urbana hipotética, de la cual no es señalada su georeferenciación, por razones de seguridad del sitio. En ella convergen diferentes tipos de uso de la tierra: zona residencial, recreacional y de seguridad, por donde pasa un gasoducto; a esta zona residencial le fue asignada una densidad poblacional de 500 habitantes/km² (INE, 2012), este último es uno de los parámetros más importante en el análisis geoespacial, porque permite evaluar las posibles consecuencias sobre personas y propiedades expuestas a las condiciones ambientales y efectos pronosticados por el modelo ALOHA.

Los diferentes escenarios hipotéticos de simulación fueron diseñados y corridos con el software ALOHA, de acuerdo a situaciones de posibles eventos que pueden suceder o han ocurrido en accidentes por el transporte de gas natural a través de un gasoducto y considerando la condición de peor situación (Tribunal Supremo de Justicia TSJ, 2006; Zhu et

al., 2013).

Las condiciones de liberación accidental fueron divididas en dos (2), los escenarios de liberación o fuga de la fuente y los parámetros de dispersión ambiental, los mismos fueron seleccionados de acuerdo a las condiciones meteorológicas de cualquier área de estudio accidental y del funcionamiento de un gasoducto; los datos fueron tabulados en las tablas I y II.

Tabla I. Definición de los escenarios de simulación

Escenario general	Accidente químico ocurrido en un área urbana por la ruptura de un gasoducto de alta presión, generando la fuga total de gas metano, transportado a través de una tubería de 51 cm de diámetro y con una presión interna de 670 psi., a una temperatura ambiental de 28 °C, la fuga ocurre a una distancia de 1000 m, de una válvula de bloqueo.
Escenario I	La fuga causa una nube de vapor tóxica. Este escenario estima la extensión espacial de la zona de amenaza tóxica, expresada en concentración del gas metano en ppm.
Escenario II	La fuga genera una nube de vapor inflamable. Este escenario estima la extensión espacial de la zona de amenaza por inflamabilidad, que para el gas metano se encuentra entre 10 y 60% LEL.
Escenario III	La nube de vapor inflamable origina una deflagración. Este escenario estima la extensión espacial de la zona de amenaza por sobrepresión (psi) por la deflagración del gas.
Escenario IV	La nube de vapor inflamable provoca una explosión (Detonación). Este escenario estima la extensión espacial de la zona de amenaza por sobrepresión (psi) por la detonación del gas.
Escenario V	La fuga origina un fuego tipo jet. Este escenario estima la extensión espacial de la zona de amenaza por radiación térmica (kW/m ²) generada por el fuego.

Tabla II. Parámetros de dispersión ambiental.

Velocidad del viento	6 m/s
Dirección del viento	SE
Altura de medición	10 m
Temperatura del aire	28 °C
Humedad relativa	50%
Rugosidad del suelo	Urbano - bosque
Nubosidad	5%
Estabilidad atmosférica	D
Altura de inversión	No

Finalmente, los resultados gráficos obtenidos para cada escenario de simulación de las zonas de amenazas, generadas por el modelo ALOHA en formato Keyhole Markup Language (KML) (Liu et al., 2012), fueron desplegadas espacialmente con el sistema de información geográfica

libre y de código abierto QGIS 2.16 (QGIS, 2015) y exportados a formato Instituto de Investigaciones de Sistemas Ambientales (ESRI siglas en inglés) Shapefile (ESRI, 1998), para realizar el análisis espacial correspondiente.

Resultados y discusión

Los resultados gráficos de las zonas de amenazas fueron obtenidos directamente para cada escenario de simulación por el modelo ALOHA, los mismos son expuestos a continuación: vapor tóxico (Figura 1), área inflamable (Figura 3), sobrepresión por deflagración (Figura 5), sobrepresión por detonación (Figura 7) y radiación térmica (Figura 9). Para cada zona de amenaza se presentan las distancias alcanzadas en el eje X y Y, a partir del punto de origen de la liberación o fuga y en dirección predominante del viento alineada con el eje X, los niveles umbrales de concentración del gas metano, de energía por sobrepresión y radiación térmica, respectivamente, capaces de causar daños a la salud humana y a la propiedad, así como los límites de incertidumbre para la dirección predominante del viento.

A su vez, las zonas de amenazas obtenidas para cada escenario de simulación por el modelo ALOHA, en formato Keyhole Markup Language (KML) fueron desplegadas espacialmente con el sistema de información geográfica (SIG) software libre QGIS, los cuales son presentados a continuación: vapor tóxico (Figura 2), área inflamable (Figura 4), sobrepresión por deflagración (Figura 6), sobrepresión por detonación (Figura 8) y radiación térmica (Figura 10). De esta manera, el SIG facilita que en las zonas de amenazas generadas por el modelo ALOHA, sea establecida su relación espacial con las características físico-naturales del sitio donde se simuló la liberación accidental del gas metano.

Entre otras, una de las principales características físico-naturales a ser consideradas en la evaluación de consecuencias en el proceso de evaluación de riesgo es la densidad poblacional, porque el uso de este parámetro permite establecer la relación entre las posibles consecuencias de un evento y cuantificar el daño potencial a la salud humana en términos del número de fatalidades y lesionados, así como daños a la propiedad en el área residencial.

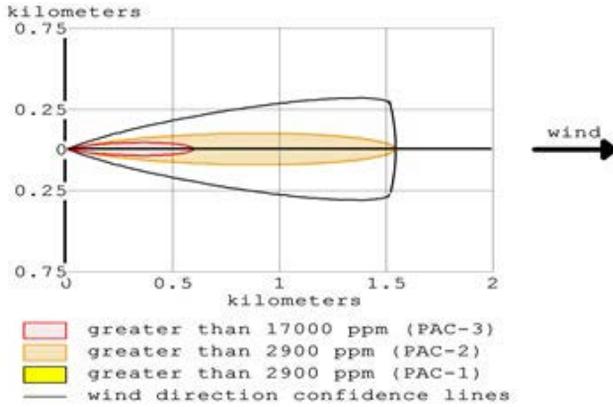


Figura 1. Zona de amenaza de vapor tóxico del modelo ALOHA, desplegada espacialmente a través del sistema de información geográfica QGIS 2.16

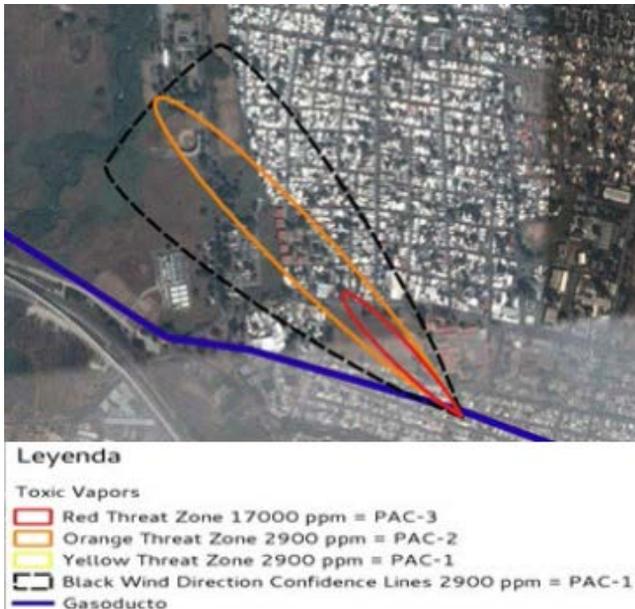


Figura 2. Zona de amenaza de vapor tóxico (ALOHA) desplegada espacialmente a través del sistema de información geográfica QGIS 2.6.

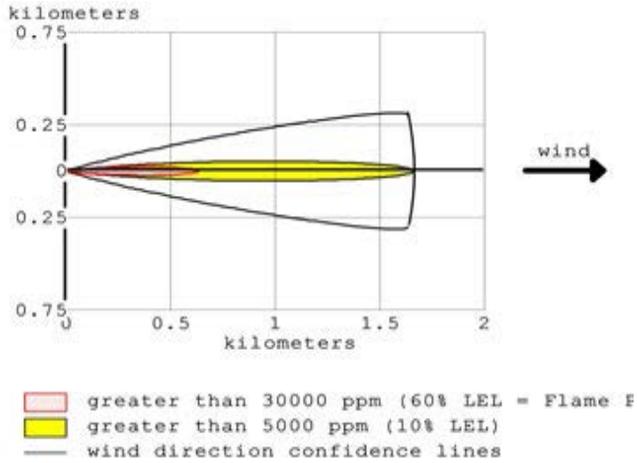


Figura 3. Zona de amenaza del área inflamable generada por el modelo ALOHA.

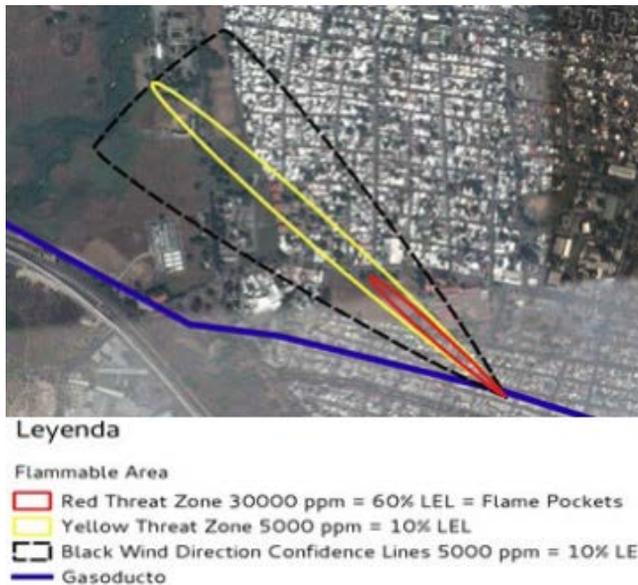


Figura 4. Zona de amenaza del área inflamable del modelo ALOHA, desplegada espacialmente a través del sistema de información geográfica QGIS 2.16

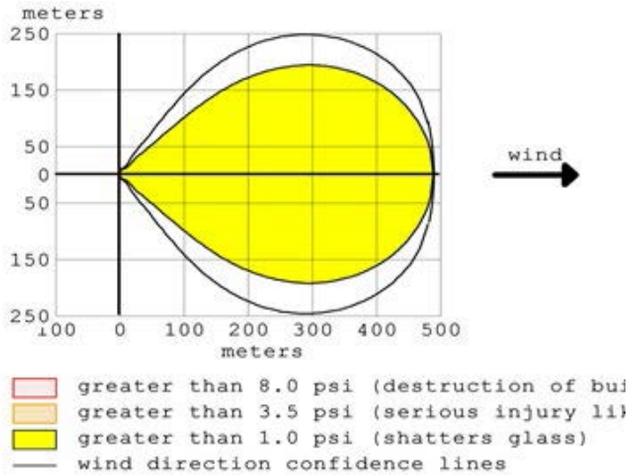
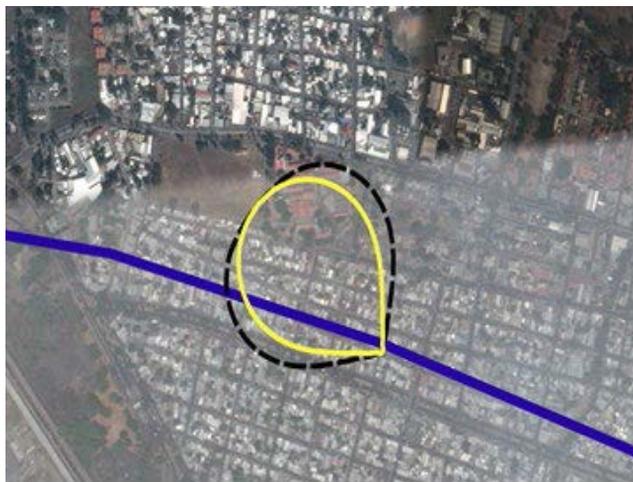


Figura 5. Zona de amenaza de sobrepresión por deflagración generada por el modelo ALOHA.



Leyenda

- Overpressure Deflagration
- Yellow Threat Zone 1.0 psi = shatters glass
 - Black Wind Direction Confidence Lines 1.0 psi = shatters glass
 - Gasoducto

Figura 6. Zona de amenaza de sobrepresión por deflagración del modelo ALOHA, desplegada espacialmente a través del sistema de información geográfica QGIS 2.16

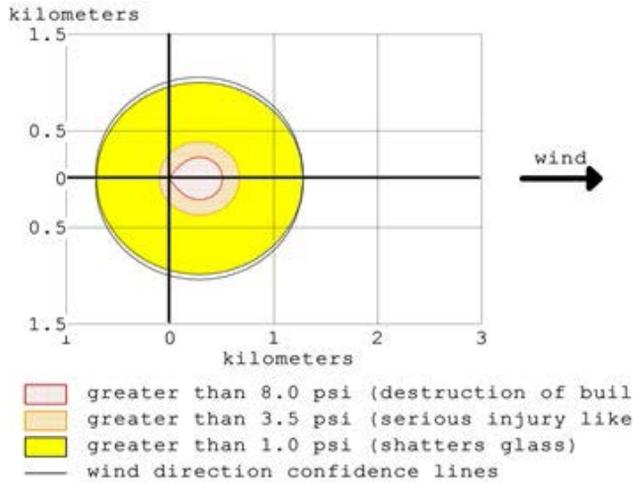


Figura 7. Zona de amenaza de sobrepresión por detonación generada por el modelo ALOHA.

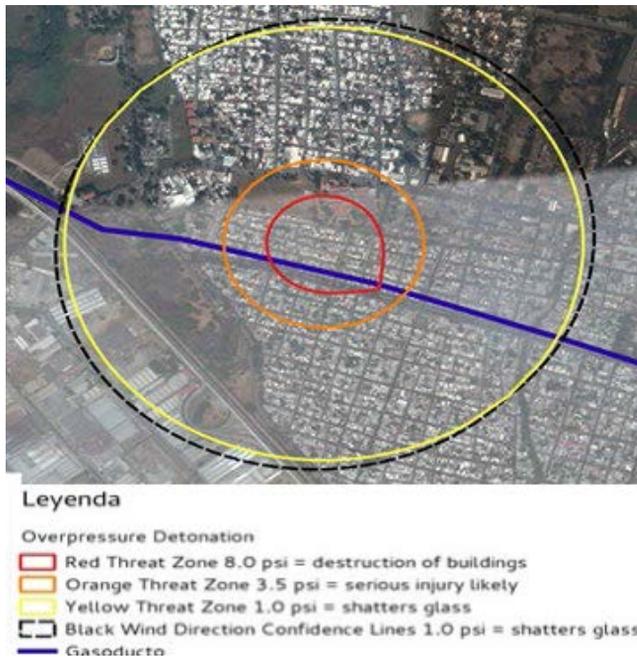


Figura 8. Zona de amenaza de sobrepresión por detonación del modelo ALOHA, desplegada espacialmente a través del sistema de información geográfica QGIS 2.16

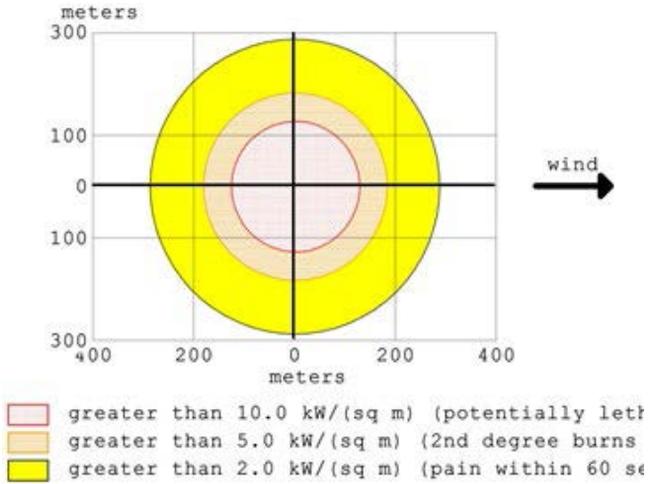


Figura 9. Zona de amenaza de radiación térmica generada por el modelo ALOHA.



Leyenda

Thermal Radiation

- Red Threat Zone 10.0 kW/(sq m) = potentially lethal within 60 sec
- Orange Threat Zone 5.0 kW/(sq m) = 2nd degree burns within 60 sec
- Yellow Threat Zone 2.0 kW/(sq m) = pain within 60 sec
- Gasoducto

Figura 10. Zona de amenaza por radiación térmica del modelo ALOHA, desplegada espacialmente a través del sistema de información geográfica QGIS 2.16

Un resumen general del análisis geoespacial realizado a través del uso del sistema de información geográfica (SIG) QGIS, a partir de las capas de información generada por la simulación de cada escenario en el modelo ALOHA en formato Keyhole-Markup Language (KML), fueron tabulados en la Tabla III. Para cada escenario fueron registrados los siguientes items: niveles umbrales de preocupación capaces de causar daños a la salud humana y a la propiedad, la concentración de los gases, presión y calor alcanzados, la extensión en la dirección del viento, la superficie abarcada por cada zona de amenaza, el número de personas expuestas en cada zona y sus potenciales daños.

Tabla III. Resultados generales de los escenarios de simulación.

	Niveles umbrales	Concentración, presión y calor	Extensión en dirección del viento (m)	Área de amenaza (ha)	Nº de personas expuestas	Potenciales daños
Escenario I. Vapor Tóxico	PAC-3	17.000 ppm	600	3,4	17	
	PAC-2	2.900 ppm	1500	17,92	90	
	PAC-1	2.900 ppm	1500	17,92		
Escenario II. Área Inflamable	60% LEL	30.000 ppm	636	1,95	10	
	10% LEL	5.000 ppm	1700	10,44	52	
Escenario III. Sobrepresión por Deflagración	LOC-1	8,0 psi	No excedido			Destrucción de edificaciones
	LOC-2	3,5 psi	No excedido			Lesiones graves a personas
	LOC-3	1,0 psi	469	13,17	66	Rompimiento de vidrios
Escenario IV. Sobrepresión por Detonación	LOC-1	8,0 psi	514	15,09	81	Destrucción de edificaciones
	LOC-2	3,5 psi	678	29,48	147	Lesiones graves a personas
	LOC-3	1,0 psi	1300	261,43	1307	Rompimiento de vidrios
Escenario V. Radiación Térmica	LOC-1	10,0 kW/m ²	132	5,03	25	Potencialmente letal en 60 s
	LOC-2	5,0 kW/m ²	187	5,43	27	Quemaduras de 2º en 60 s
	LOC-3	2,0 kW/m ²	290	15,26	76	Dolor en 60 s

PAC: Siglas en ingles de Criterio de acción protectora

LEL: Siglas en ingles de Límite de inflamabilidad

LOC: Siglas en ingles de Nivel umbral de preocupación

La zona de amenaza de Vapor Tóxico abarcó una superficie del área residencial de 3,4 ha (zona roja) con una concentración de 17.000 ppm de metano (CH₄) y otra extensión de 17,92 ha (zona anaranjada) con una concentración de 2.900 ppm (Figura 2). En el primer espacio, es decir, la zona roja diecisiete (17) personas fueron potencialmente expuestas a una concentración de 17.000 ppm de metano, bajo estas condiciones de exposición por más de una hora, las personas pueden experimentar peligrosos efectos adversos a la salud o la muerte. Mientras que en el segundo espacio de amenaza, la zona anaranjada, noventa (90) personas fueron potencialmente expuestas y por más de una hora las personas pueden experimentar graves e irreversibles efectos adversos a la salud o la pérdida de

capacidad para escapar de la zona de amenaza.

La zona de amenaza del Área Inflamable abarcó una superficie del área residencial de 1,95 ha, es decir, la zona roja con una concentración de 30.000 ppm de metano (CH₄) y otra extensión de 10,44 ha, la zona amarilla con una concentración de 5.000 ppm (Figura 4). En el primer espacio, la zona roja, diez (10) personas fueron potencialmente expuestas a una atmósfera de vapor inflamable con 30.000 ppm de concentración. Mientras que en el segundo espacio de amenaza, la zona amarilla, cincuenta y dos (52) personas fueron potencialmente expuestas a una atmósfera de vapor inflamable con 5.000 ppm de concentración. De manera general sesenta y dos (62) personas fueron expuestas a una nube de vapor donde una explosión o combustión podía haber ocurrido entre los 30.000 ppm a 5.000 ppm de Metano (CH₄), con sus respectivos límites de inflamabilidad (60%-10% LEL), y consecuentes efectos adversos a la salud y a la propiedad.

La zona de amenaza de Sobrepresión por Deflagración abarcó una superficie del área residencial de 13,17 ha, la zona amarilla con una presión de 1 psi (Figura 6). En este espacio, la zona amarilla sesenta y seis (66) personas fueron potencialmente expuestas a una presión de 1 psi.

La zona de amenaza de Sobrepresión por Detonación abarcó una superficie del área residencial de 16,09 ha, es decir, la zona roja con una presión de 8 psi, una segunda con extensión de 29,48 ha, la zona anaranjada con una presión de 3,5 psi y una tercera con un área de 261,43 ha, la zona amarilla con una presión de 1 psi (Figura 8). En el primer espacio, la zona roja ochenta y un (81) personas fueron potencialmente expuestas a una presión de 8 psi, en el segundo, la zona anaranjada ciento cuarenta y siete (147) personas a 3,5 psi y en el tercero, la zona amarilla mil trescientos siete (1.307) personas fueron expuestas a 1 psi.

De manera general, a partir de los 8 psi se esperan daños a las edificaciones y a los 3,5 psi se esperan probables efectos adversos a la salud humana, especialmente en los órganos presión-sensitivos, tales como los tímpanos y pulmones, y a

partir de 1 psi puede provocar el rompimiento de los vidrios. Es importante destacar que el rompimiento de vidrios y daños a las edificaciones pueden provocar adicionalmente efectos adversos a la salud humana, daños generados por el impacto de los fragmentos de escombros proyectados por las ondas de choque, debido a que dichas trayectorias no son pronosticados por el modelo ALOHA.

Finalmente, la zona de amenaza de Radiación Térmica abarcó una superficie del área residencial de 5,03 ha, la zona roja con una concentración de calor de 10 kW/m², una segunda con extensión de 5,43 ha, la zona anaranjada con un calor de 5 kW/ m², y una tercera con un área de 15,26 ha, la zona amarilla con un calor de 5 kW/m² (Figura 10). En el primer espacio, es decir, la zona roja veinticinco (25) personas fueron potencialmente expuestas a una concentración de calor de 10 kW/m², en el segundo, la zona anaranjada veintisiete (27) personas a un calor de 5 kW/m², y en el tercero, la zona amarilla setenta y seis (76) personas a un calor de 2 kW/m². Significando que estas condiciones de exposición al calor por más de 60 segundos, tendrían efectos térmicos letales sobre las veinticinco (25) personas expuestas, mientras que veintisiete (27) personas sufrirían quemaduras de 2° grado y setenta y seis (76) sentirían dolor.

CONCLUSIONES

En esta investigación del modelo ALOHA, las imágenes satelitales y el sistema de información geográfica (SIG) software libre QGIS, fueron utilizados como herramientas complementarias en las pesquisas de un accidente explosivo hipotético generado por la liberación o fuga accidental de gas metano (CH_4) por la ruptura de un gasoducto.

El uso complementario el modelo de simulación ALOHA con sus resultados en formato Keyhole Markup Language (KML), fueron utilizados como capas de información, para el análisis espacial a través del uso del sistema de información geográfica (SIG) software libre QGIS, lo que permitió generar gráficamente cinco (5) zonas de amenazas para los siguientes escenarios de simulación: vapor tóxico, área inflamable, sobrepresión por deflagración, sobrepresión por detonación y radiación térmica.

Los niveles umbrales de preocupación, capaces de causar daños a la salud humana y a la propiedad, para cada escenario de simulación fueron comparados con la densidad poblacional del sitio donde se simuló la liberación accidental del gas metano (CH_4), estimando de esta forma el número de personas expuestas en cada zona y estableciendo los potenciales daños a la salud humana: fatalidades y lesiones, así como los daños a la propiedad.

El número de fatalidades y lesionados, y daños a la propiedad estimado para cada escenario de simulación fueron los siguientes: zona de amenaza de vapor tóxico, diecisiete (17) fatalidades y noventa (90) lesionados. Para la zona de amenaza del área inflamable, sesenta y dos (62) fatalidades. En la zona de amenaza de sobrepresión por deflagración, sesenta y seis (66) lesionados. La zona de amenaza de sobrepresión por detonación ochenta y un (81) fatalidades, debido al colapso de las edificaciones y mil cuatrocientos cincuenta y cuatro (1.454) lesionados, aparte de los daños estructurales a las edificaciones. Y en la zona de amenaza de

radiación térmica, veinticinco (25) fatalidades y ciento tres (103) lesionados, por quemaduras de 2° grado y dolor.

De esta manera, al contrastar la densidad poblacional y otras características físico-naturales del sitio donde se simuló la liberación o fuga accidental del gas metano (CH₄), se establecieron las posibles consecuencias y se estimó el daño potencial a la salud humana y a la propiedad del área residencial en cada escenario de simulación, permitiendo de esta forma realizar la evaluación de consecuencias provocadas por el accidente hipotético.

Finalmente, los resultados obtenidos en este trabajo permiten sugerir que en el proceso de investigación con interés criminalístico de accidentes explosivos reales por la liberación o fuga de gases peligrosos, las siguientes herramientas tecnológicas, el software de simulación ALOHA, las imágenes satelitales y el sistema de información geográfica (SIG) software libre QGIS, pueden ser utilizadas de manera complementaria en la evaluación de consecuencias.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALOHA versión 5.4.4 (Areal Locations of Hazardous Atmospheres) (2013). U.S. Environmental Protection Agency and National Oceanic and Atmospheric Administration. Recuperado de: <http://www2.epa.gov/cameo/what-cameo-software-suite#A-LOHA> [Consultado: 2014, septiembre 01]

Becker, W., Waymack, A., McManus, M., Shaikhutdinov and Pruitt, B. (1990). Bashkiriantrain-gas pipeline disaster: the American military response. *Burns*, 16: 325-328.

Bjerketvedt, D., Bakke, J., Van Wingerden K. (1997). Gas explosion handbook. CMR Gexcon. (Lastupdate 2006). Documento en línea: <http://www.gexcon.com/article/gas-explosion-han-dbook> [Consultado: 2014, septiembre 01]

Chemical Response Datasheets and Reactivity Prediction Tool (CAMEO) Chemicals version 2.4.1 rev 3 (2014). U.S. Environmental Protection Agency and National Oceanic and Atmospheric Administration. Disponible en <http://www.cameochemicals.noaa.gov/> [Consultado: 2014,septiembre 10]

Code of Federal Regulations (CFR) (2012). 49 CFR Transportation. Chapter I. Pipeline and Hazardous Materials Safety Administration. Part 105. Hazardous Materials Program Definitions and General Procedures. 7-13 pp. Documento en línea: <http://www.gpo.gov/fdsys/pkg/CFR-2012-title49-vol2/pdf/CFR-2012-title49-vol2.pdf> [Consultado: 2014, septiembre 10]

Cutter, S. L. (2003). GI science, disasters, and emergency management. *Transactions in GIS*, 7: 439-445.

Davidson, R., Kendra, J., Li, S., Long, L., McEntire, D., Scawthorn, C. and Kelly, J. (2012). San Bruno California, september 9, 2010, Gas pipeline explosion and fire. Disaster Research Center Final Project Report. University of Delaware, Newark DE . 201 pp.

Decreto sobre las Normas sobre calidad del aire y control de la contaminación atmosférica (1995). N° 638. Gaceta Oficial de la República Bolivariana de Venezuela N° 4.899, de fecha 19 de mayo de 1995.

Edison, N. (1994). Pipeline Explosion & MCI. Documento en línea: <http://www.rxn.com/~uffda/archive/science/edison.txt> [Consultado: 2015, enero 10]

Environmental Protection Agency (USEPA). (2011). Guidance for conducting risk management program inspection under clean air act. Section 112 (r). Office of Solid Waste and Emergency Response. Office of Enforcement and Compliance Assurance. EPA 550-K-11-001. 84 pp.

Environmental Systems Research Institute, Inc. (ESRI). (1998). ESRI Shapefile Technical Description. ESRI White Paper, 34 pp. Documento en línea:

<http://www.esri.com/library/whitepapers/pdfs/shapefile.pdf>

[Consultado: 2014, agosto 13] Federal Emergency Management Agency (FEMA). (2011). Reference Manual to mitigate potential terrorist attacks against buildings. Buildings and Infrastructure Protection Series.

U.S. Department Homeland Security. Science and Technology. FEMA-426/BIPS-06. Edition 2. 514 pp. Documento en línea: <http://www.dhs.gov/xlibrary/assets/st/st-bips-06.pdf> [Consultado: 2014, septiembre 06]

Gómez-Mares, M., Zarate, L. and Casal, J. (2008). Jet fires and the domino effect. *Fire Safety Journal*, 43: 583-588.

Grupo Universitario de Investigación Analítica de Riesgos (GUIAR) (2014). Documentación GUIAR. Departamento de Química Analítica. Universidad de Zaragoza. Documento en línea: http://www.unizar.es/guiar/1/Accident/An_conse/An_conse.htm [Consultado: 2014, noviembre 05]

He, G., Zhang, L., Lu, Y. and Mol, A. (2011). Managing major chemical accidents in China: Towards effective risk informa-

tion .Journal of Hazardous Materials, 187: 171-181.

Huang, Z. and Li, J. (2012). Assessment of fire risk of gas pipeline leakage in cities and towns. *Procedia Engineering*, 45: 77-82. 2012 International Symposium on Safety and Technology.

Instituto Nacional de Estadística (INE). (2012). Informe geoambiental 2011. Documento en línea:http://www.ine.gov.ve/documentos/Ambiental/PrincIndicadores/pdf/Informe_Geoambiental [Consultado: 2014, noviembre 05]

International Labour Organization (ILO) (2013). Safety and health in the use of chemical at work. International Labour Office, CH-1211 Geneva . 30 pp.

Jakala, S. (2007). A GIS enabled air dispersion modeling tool for emergency management. *Paper in Resource Analysis*, 50: 20 pp.

Jones, R., Lehr, W., Simecek-Beatty, D., Reynolds, M. (2013). ALOHA (Areal Locations of Hazardous Atmospheres) 5.4.4. Technical Documentation. U.S. Dept. Of Commerce, NOAA. Technical Memorandum NOS OR&R 43. Seattle, WA. Emergency Response Division, NOAA. 96 pp.

Kulawiak, M., Lubniewski, Z., Bikonis, K. and Stepnowski A. (2009). Geographical information system for analysis of critical infrastructures and their hazards due to terrorism, man-originated catastrophes and natural disasters for the city of Gdansk. *Information Fusion and Geographic Information Systems*, 251-262 pp. *Lecture Notes in Geoinformation and Cartography*. Popovich, V., Schrenk, M. Claramunt, C., Korolenko, K. (Eds.). *Proceedings of the Fourth International Workshop*, 17-20 May 2009.

Ley penal del ambiente (2012). *Gaceta Oficial de la República Bolivariana de Venezuela* N° 39.913, de fecha 02 de mayo de 2012.

Ley sobre sustancias, materiales y desechos peligrosos (2001).

Gaceta Oficial de la República Bolivariana de Venezuela N° 5.554 Extraordinario, de fecha 13 de noviembre de 2001

Liu, D., Wei, J., Kong, Z., Xu, Z, and Tian, X. (2012). Simulation of diffusion trend of unexpected gas leak accident based on Google Earth. *Procedia Engineering*, 45: 373-377. 2012 International Symposium on Safety and Technology.

McLean, C., Lee, Y., Jain, S. and Hutchings, C. (2011). DHS / NIST Work shop on Homeland Security Modeling & Simulation. National Institute of Standards and Technology (NIST). NIST Interagency Report (NISTIR) 7826. 273 pp.

Mihailidou, E., Antoniadis, K. and Assael, M. (2012). The 319 major industrial accidents since 1917. *International Review of Chemical Engineering*, 4: 529-540.

Ministerio del Poder Popular de Petróleo y Minería. Petróleos de Venezuela Sociedad Anónima (PDVSA). (2013). Evento caso A. Refinería de Amuay. Documento en línea:<http://www.pdvsa.com/interface.sp/database/fichero/publicacion/8264/1632.PDF> [Consultado: 2014, diciembre 05]

National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), U.S. Environmental Protection Agency (USEPA), Pipelines and Hazardous Materials Safety Administration (PHMSA). (2006). Technical documentation and software quality assurance for project Eagle-ALOHA. A project to add fire and explosive capability to ALOHA. Office of Response and Restoration, National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA). Environmental Protection Agency (EPA). Pipelines and Hazardous Materials Safety Administration (PHMSA), Department of Transportation.

Ngo, T., P. Mendis, A. Gupta and J. Ramsay. (2007). Blast loading and blast effect son structures – Anover view. *Electronic Journal of Structural Engineering. Special Issue: Loading on Structures*, 7: 76-91.

Quantum GIS Development Team (2015). Quantum GIS 2.6

Geographic information system user guide. Open Source Geospatial Foundation Project. <http://qgis.osgeo.org>

Renjith, V. and Madhu, G. (2010). Individual and societal risk analysis and mapping of human vulnerability to chemical accidents in the vicinity of an industrial area. *International Journal of Applied Engineering Research*, DINDIGUL, 1: 135-148.

Sengupta, A., Bandyopadhyay, N., Paul, S, Nair, S. and Gupta, A. (2013). Geoinformatics application in chemical risk. National Institute of Disaster Management and Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit GmbH (GIZ), New Delhi, 200 pp.

Sklavounos, S and F. Rigas. (2006). Estimation of safety distances in the vicinity of fuel gas pipelines. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 19: 24-31.

Southwell, C. (2005). Analysis of the risks of a terrorist attack on LNG receiving facilities in the United States. *Published Articles & Papers*. Paper 165.

Stenzer, S. and Baumann-Stanzer, K. (2010). Dispersion modeling of accidental toxic gas releases – A model comparison study. *HARMO13, Sección 4: 455-459*. Paris, France 13th Conference on Harmonisation with in Atmospheric Dispersion Modelling for Regulator y Purposes.

Touma, J., Isakov, V. and Ching, J. (2006). Air quality modeling of hazardous pollutants: Current status and future directions. *J. Air & Waste Manag. Assoc.*, 56: 547-558.

Tribunal Supremo de Justicia (TSJ). (2006). Sala Político-Administrativa. Sentencia N° 01419. Expediente N° 1994-11.240 del 06 de junio de 2006. Documento en línea: <http://historico.tsj.gob.ve/decisiones/spa/marzo/00283-5308-2008-1994-11240>. HTML [Consultado: 2014, agosto 05]

Tseng, J., Su, T. and Kuo, C. (2012). Consequence evaluation of toxic chemical releases by ALOHA. *Procedia Engineering*,

45: 384-389. 2012 International Symposium on Safety and Technology.

Vijayaraghavan, C., Thirumalaivasan, D. and Venkatesan, R. (2012). A study on nuclear blast over pressure on buildings and other infrastructures using geospatial technology. *Journal of Computer Science*, 8: 1520-1530.

Zhu, H., Mao, Z., Wang, Q. and Sun, J. (2013). The influences of key factor on consequences following that natural gas leakage from pipeline. *Procedia Engineering*, 62: 592-601. The 9th Asia-Oceania Symposium on Fire Science and Technology.