



Fugas de gas cloro: Estudio de los escenarios usando el software ALOHA

Chlorine gas leaks: Scenario studies using ALOHA software

Vazamentos de gás cloro: estudos de cenário usando o software ALOHA

Natalia Barahona-Alvear ^I
natalia.barahona@epoch.edu.ec
<https://orcid.org/0000-0002-6568-0188>

Hernán Tixi-Toapanta ^{II}
htixi@epoch.edu.ec
<https://orcid.org/0000-0002-7468-5319>

Henry Garmendia ^{III}
labpetroleo2018@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0002-3832-7418>

Correspondencia: natalia.barahona@epoch.edu.ec

Ciencias técnicas y aplicadas
Artículo de investigación

***Recibido:** 14 de abril de 2021 ***Aceptado:** 15 de mayo de 2021 * **Publicado:** 09 de junio de 2021

- I. Magister en Gerencia de Instituciones de Salud, Magister Scientiae en Ingeniería Química, Doctora en Química, Escuela Superior Politécnica Chimborazo, Sede Orellana, Riobamba, Ecuador.
- II. Magister Scientiae en Ingeniería Química, Doctor en Química, Escuela Superior Politécnica Chimborazo, Sede Orellana, Riobamba, Ecuador.
- III. Ingeniero Químico, Investigador Ciencias Básicas, Naturales y Aplicadas, Facultad de Ingeniería, Laboratorio de Petróleo y Catálisis, Universidad de Los Andes, Mérida, Venezuela.

Resumen

Los accidentes relacionados con el gas cloro pueden exponer a trabajadores y comunidad al contacto directo con el gas tóxico, provocando desde una leve irritación en los ojos hasta una intoxicación más grave que puede llevar la muerte. Este trabajo tiene el objetivo de estudiar el comportamiento del gas cloro durante una fuga accidental, utilizando el software ALOHA para el modelado de la dispersión atmosférica de la nube de vapor tóxico. Los resultados proporcionan información que puede ayudar en la identificación de los riesgos y en la respuesta de emergencia, estimando las posibles consecuencias durante la fuga.

Palabras clave: Cloro; Escape; Simulación.

Abstract

Accidents related to chlorine gas can expose workers and the community to direct contact with the toxic gas, causing from mild eye irritation to more severe poisoning that can lead to death. This work aims to study the behavior of chlorine gas during an accidental release, using ALOHA software for modeling the atmospheric dispersion of the toxic vapor cloud. The results provide information that can help in risk identification and emergency response, estimating the possible consequences during the leak.

Keywords: Chlorine; Leaks; Simulation.

Resumo

Acidentes com o gás cloro podem expor os trabalhadores e a comunidade ao contato direto com o gás tóxico, causando leve irritação nos olhos a intoxicações mais graves que podem levar à morte. Este trabalho tem como objetivo estudar o comportamento do gás cloro durante um vazamento accidental, utilizando o software ALOHA para modelagem da dispersão atmosférica da nuvem de vapor tóxico. Os resultados fornecem informações que podem auxiliar na identificação de riscos e no atendimento a emergências, estimando as possíveis consequências durante o vazamento.

Palavras-chave: Cloro; Escapar; Simulação.

Introducción

La desinfección del agua tratada con cloro gaseoso sigue siendo una técnica común para garantizar la producción de agua potable segura. El funcionamiento del sistema de cloración es altamente

eficiente que proporciona un 100% de desinfección y de muy bajo costo operativo. Un sistema típico de cloración se basa en un sistema eyector que extrae producto de cloro de un cilindro se pone en contacto con el agua a tratar. Sin embargo, las preocupaciones de seguridad continúan con el uso de cloro gaseoso, y las normativas, estatales y locales requieren que los operadores de las plantas preparen planes de seguridad, emergencia y respuesta que se actualicen periódicamente.

Otro uso que se le da al cloro gaseoso es en las industrias de producción de PVC (Policloruro de vinilo), los riesgos químicos pueden estar asociados al uso de gas cloro, ya que este compuesto está presente en el 57% del monómero cloruro de vinilo y presenta alta toxicidad pudiendo ocasionar varios daños irreversibles al ser humano y al ambiente afectado.

El cloro gaseoso proviene o se sintetizan por el proceso de Cloro-Soda. Venezuela cuenta con una planta de esta en el complejo petroquímico El Tablazo. Por este motivo, el procesamiento cada vez mayor y más complejo de productos químicos peligrosos en las industrias de procesos químicos es un peligro potencial para el público y el medio ambiente. Los accidentes en la industria de procesos pueden ocurrir debido a fallas en el equipo de proceso, errores operacionales y errores humanos o debido a interrupciones externas como desastres naturales. Aunque se han realizado esfuerzos considerables para prevenir accidentes industriales, todavía se repiten accidentes en las industrias de procesos químicos (Khan y col.1998; Horng y col. 2005 y Georgiadou y col. 2007). Por lo tanto, además de las medidas preventivas, también se requieren medidas específicas de gestión de emergencias para reducir las consecuencias de los accidentes asociados con riesgos industriales.

Las medidas preventivas son el enfoque más significativo para avanzar la seguridad en las actividades industriales, al mismo tiempo, las medidas de gestión de emergencias también son importantes. La gestión de emergencias se refiere al despliegue de la ciencia, la tecnología, la planificación y la gestión para tratar los eventos extremos, el daño a la propiedad y la vida comunitaria (Ainuddin y col. 2012). Por lo tanto, las autoridades de emergencia involucradas deben prepararse y estar preparadas en todo momento para enfrentar cualquier situación de emergencia. Para alcanzar este estado de preparación, se debe proporcionar capacitación sistemática al personal involucrado en el plan de respuesta de emergencia (ERP). El desarrollo de un ERP bien definido y adecuado requiere una revisión sistemática de los peligros asociados con las instalaciones de la planta y sus consecuencias. Los peores escenarios se usan generalmente en

la evaluación de la consecuencia para analizar el peligro más grave que podría ocurrir en una planta de proceso (Cheng 2008).

Los estudios de análisis de riesgos, de consecuencia y de vulnerabilidad de la dispersión de vapores tóxicos de gas cloro en forma de nubes son de gran importancia, pues permite el modelado del accidente identificando áreas de riesgo y el comportamiento de la dispersión (Pandya y col. 2012). En general, el tamaño de la zona de disipación depende de la cantidad de material liberado, de la densidad, la volatilidad y las condiciones atmosféricas. De esta manera además de la influencia de la cantidad liberada y tasa de liberación, se deben considerar las condiciones y parámetros atmosféricos relevantes para la disipación de las nubes de vapor tóxico (Kramer 2010).

Durante los últimos años, los investigadores han estado evaluando el poder que tiene la simulación de modelos de consecuencias por herramientas computacionales para la estimación en tiempo real de una emergencia. Hay varios programas de modelado de consecuencias disponibles, como ALOHA, SLAB, PHAST, SAFETI, DEGADIS, BREEZE HAZARD e HYSIS (Hendershot 2006), que están teniendo una aceptación creciente en la preparación de ERP. Se han reportado varios estudios de que un ERP efectivo es necesario para la industria de procesos con el fin de reducir las consecuencias de los accidentes asociados con las actividades industriales (Massa y col., 2014). Aunque muchos autores han informado que los simulacros son inevitables para ERP para probar la efectividad, solo unos pocos autores han explicado las secuencias de acción tomadas durante la simulación de simulacro, que es muy esencial para comprender las diversas medidas de seguridad para incorporarlas en futuras investigaciones. Los procedimientos de planificación bien entendidos y ampliamente deducidos y aceptados son los factores clave en el ERP para proteger la vida humana, la propiedad y el medio ambiente. Se ha notado que el plan de emergencia en el sitio se está haciendo con elementos discretos y existe la necesidad de desarrollar un ERP estructurado uniforme en el lugar para la planta de estudio caso Fuga de Cloro.

Algunas herramientas computacionales pueden ayudar en el estudio del comportamiento de la dispersión atmosférica de vapor. El modelado de fugas puede ser estudiado de forma más detallada con la ayuda de software ALOHA (Area Location of Hazardous atmospheres), desarrollado por la NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration). ALOHA puede auxiliar en la planificación y entrenamiento en situaciones de emergencia, con capacidad para evaluar los peligros de liberación de sustancias tóxicas e inflamables, donde se estima la distancia a que una

determinada concentración de interés puede alcanzar en función del escenario accidental y también estima la radiación térmica en los casos de incendio y explosiones (Cardoso y col. 2012).

Este artículo ilustra el desarrollo de una simulación de fuga de cloro gaseoso usando la herramienta computacional ALOHA.

Metodología

En el estudio del comportamiento de la dispersión atmosférica del vapor formado durante la fuga de cloro, se tomaron en consideración las condiciones atmosféricas como la velocidad del viento y la humedad del aire, además de la temperatura e intensidad de la radiación térmica. Se adoptó la clasificación según Pasquill (1961), donde los escenarios 1,2 y 5 representan a la clase A y los escenarios 3, 4 y 6 a la clase D. Las clases A y D fueron elegidas por representar las condiciones climáticas de la región El Vallecito donde se Ubica la Planta Potabilizadora Dr. Enrique Bourgoïn, Mérida- Venezuela, región elegida debido a la presencia del tratamiento de agua potable que necesita de gas cloro como materia prima.

La dispersión de una nube de vapor contaminante en el aire depende fuertemente de cómo las condiciones atmosféricas interactúan con el vapor formado, pues la orientación de la dispersión será trazada por la misma orientación del viento en el momento de la fuga. En la Tabla 1 se relacionan los principales datos de entrada en el software ALOHA.

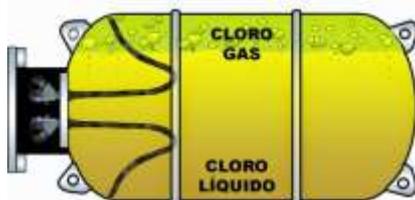
Tabla 1: Datos de entrada en el software ALOHA

Datos de Entrada	Escenario					
	1	2	3	4	5	6
Velocidad del Viento (m/s)	2,5	2,5	10	10	2,5	10
Temperatura (°C)	25	25	15	15	25	15
Humedad (%)	65	65	98	98	65	98
Condiciones Climáticas	Parcialmente nublado	Nublado	Lluvioso y frío	Lluvioso y frío	Nublado	Lluvioso
Masa del Producto Tanque (kg)	1000	1000	1000	1000	600	600
Altura del Orificio de Escape (m)	0,5	0,1	0,5	0,1	0,5	0,1

Además de las condiciones climáticas en el instante de la fuga, la dispersión de la nube de vapor también depende de las dimensiones y ubicación de la ruptura en el tanque por donde ocurre la fuga. Se consideró que el gas cloro está almacenado en un tanque de acero carbono en la fase

líquida a temperatura ambiente sobre el efecto de alta presión, alrededor de 6 atm. El tanque tiene un diámetro exterior de 1 m y una longitud de 1,22 m y está situado junto al suelo de la industria al aire libre. La fuga de gas se produce a través de un orificio de 0,05 m en el tanque. En la Figura 1 se muestra un ejemplo de estos cilindros de 1000 Kg.

Figura 1: Cilindros de cloro usado en la potabilización de agua 1000 kg.



A partir de la etapa de caracterización de la instalación de cloro, se establecieron los escenarios hipotéticos de accidentes con el agente químico estudiado. Los escenarios son similares, con variación sólo de los fenómenos asociados a la fuga y las condiciones climáticas.

1. Uso de la herramienta computacional ALOHA.

El programa ALOHA (Areal Locations of Hazardous Atmospheres) fue desarrollado por la EPA (Environmental Protection Agency) y la NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration). La tabla 2 se muestra los pasos utilizados para modelar el caso de estudio de fuga de cloro gaseoso. El análisis cuantitativo y cualitativo de las condiciones de la fuga fue realizado por los modelos de dispersión gaussiana usando el software ALOHA. El software utiliza el modelo de dispersión Gaussiano desarrollado por Palazzi (Palazzi y col. 1982). Que describe el comportamiento de liberación del estado estacionario de corta duración (Ver Tabla 3).

Este programa trabaja con los niveles de preocupación (LOC iniciales en inglés Level of Concern) que representa un área que define las condiciones peligrosas y no peligrosas. El LOC para un escenario dado puede ser alguno de los siguientes índices:

- IDLH
- AEGL
- ERPG
- TEEL

O puede estar definido especialmente por un usuario calificado para establecer algún tipo de índice o umbral de preocupación para una sustancia química dada. Para la simulación llevada a cabo se

utiliza los niveles de exposición aguda AEGL en siglas inglés. A continuación se define este término:

AEGL (Acute Guideline Levels o guía de niveles de exposición aguda)

Los AEGL representan el umbral límite de exposición para la población y son aplicables a emergencias para periodos de exposición desde 10 minutos a 8 horas. Los valores de AEGL-1, AEGL-2 y AEGL-3 serán definidos para uno de los cinco periodos de tiempo (10 y 30 min., 1 h., 4 h., y 8 h.) y se distinguirán por distintos grados de toxicidad. Se cree que los niveles de exposición recomendados son aplicables a la población incluyendo niños y otros individuos que puedan ser susceptibles. Los tres AEGLs han sido definidos como:

AEGL-1

Concentración a/o por encima de la cual se predice que la población general, incluyendo individuos susceptibles pero excluyendo los hipersusceptibles, puede experimentar una incomodidad notable. Concentraciones por debajo del AEGL 1 representan niveles de exposición que producen ligero olor, sabor u otra irritación sensorial leve.

AEGL-2

Concentración a/o por encima de la cual se predice que la población general, incluyendo individuos susceptibles pero excluyendo los hipersusceptibles, puede experimentar efectos a largo plazo serios o irreversibles o ver impedida su capacidad para escapar. Concentraciones por debajo del AEGL 2 pero por encima del AEGL 1 representan niveles de exposición que pueden causar notable malestar.

AEGL-3

Es la concentración a/o por encima de la cual se predice que la población general, incluyendo individuos susceptibles pero excluyendo los hipersusceptibles, podría experimentar efectos amenazantes para la vida o la muerte. Concentraciones por debajo de AEGL 3 pero por encima de AEGL 2 representan niveles de exposición que pueden causar efectos a largo plazo, serios o irreversibles o impedir la capacidad de escapar.

2. Peligros para la salud del cloro

El gas cloro es principalmente un irritante respiratorio. A bajas concentraciones, el gas cloro tiene un olor similar al de la lejía doméstica. A medida que las concentraciones aumentan desde el nivel de detección por el olor, también lo hacen los síntomas en el individuo expuesto. Dependiendo del nivel de exposición al cloro, los efectos pueden agravarse durante varios días después del

incidente. Las observaciones de los individuos expuestos deben considerarse parte del programa de respuesta médica.

La siguiente lista es una recopilación de los umbrales potenciales de exposición al cloro y las posibles respuestas en los seres humanos, con una considerable variación entre los sujetos:

Umbrales, límites y directrices de exposición al cloro (ppm)

0,2 - 0,4 Umbral de olor (la percepción del olor disminuye con el tiempo)
< 0.5 No se conocen efectos agudos o crónicos
0,5 ACGIH TLV-TWA (media ponderada en el tiempo de 8 horas)
1 OSHA PEL (techo) ACGIH TLV-STEL (15 minutos) AIHA ERPG-1: La concentración máxima en el aire por debajo de la cual se cree que casi todos los individuos podrían estar expuestos durante un máximo de 1 hora sin experimentar más que leves efectos adversos transitorios para la salud o percibir un olor claramente definido y desagradable.
1 - 3 Irritación leve de las mucosas, tolerada hasta 1 hora
3 ERPG-2 de la AIHA: Concentración máxima en el aire por debajo de la cual se cree que casi todas las personas podrían estar expuestas durante un máximo de 1 hora sin experimentar o desarrollar efectos o síntomas irreversibles u otros graves para la salud que puedan mermar la capacidad de una persona para adoptar medidas de protección.
5 - 15 Irritación moderada de las vías respiratorias. El gas es muy irritante, y es poco probable que una persona permanezca en una exposición de este tipo durante más de un tiempo muy breve, a menos que la persona esté atrapada o inconsciente
10 NIOSH IDLH: La concentración en el aire que supone una amenaza inmediata para la vida, que causaría efectos adversos irreversibles para la salud o que impediría la capacidad de un individuo para escapar de una atmósfera peligrosa. Los valores se basan en una exposición de 30 minutos.
20 AIHA ERPG-3: La concentración máxima en el aire por debajo de la cual se cree que casi todos los individuos podrían estar expuestos durante un máximo de 1 hora sin experimentar o desarrollar efectos en la salud que pongan en peligro la vida.
30 Dolor torácico inmediato, vómitos, disnea (falta de aire) y tos
40 - 60 Neumonitis tóxica (inflamación de los pulmones) y edema pulmonar (acumulación de líquido en los pulmones)
430 Letal más de 30 minutos
1000 Fatal en cuestión de minutos.

Para el caso a simular de una fuga de cloro en el software ALOHA los valores de AEGL son:

	10 min	30 min	60 min	4 hr	8 hr
ppm					
AEGL 1	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50
AEGL 2	2.8	2.8	2.0	1.0	0.71
AEGL 3	50	28	20	10	7.1

Tabla 2: Etapas utilizadas para modelar usando ALOHA.

Ventanas de Software ALOHA

1. Ventana para el Compuesto Químico

3. Ventana para la Geometría del Tanque

2. Ventana para las Condiciones Climáticas

4. Ventana para la Perforación en el tanque

Atmospheric Options 2

Tabla 3: Modelo de dispersión Gaussiano.

Modelo de Dispersión Gaussiano

$$C(x, y, z, t) = \begin{cases} \frac{Q}{2} \left[\operatorname{erf} \left(\frac{y}{\sigma_y \sqrt{2}} \right) - \operatorname{erf} \left(\frac{z-U}{\sigma_z \sqrt{2}} \right) \right] & (t \leq t_0) \\ \frac{Q}{2} \left[\operatorname{erf} \left(\frac{y-U(t-t_0)}{\sigma_y \sqrt{2}} \right) - \operatorname{erf} \left(\frac{z-U}{\sigma_z \sqrt{2}} \right) \right] & (t > t_0) \end{cases} \quad (1)$$

$$\chi(x, y, z, t) = \left(\frac{Q(t)}{U} \right) g_x(x, y) g_z(z, t) \quad (2)$$

$$g_x(x, y) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_x(x)} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{y}{\sigma_y(x)} \right)^2 \right] \quad (3)$$

$$g_z(z, t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_z(z)} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{z-h}{\sigma_z(z)} \right)^2 \right] + \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{z+h}{\sigma_z(z)} \right)^2 \right] \quad (4)$$

Donde: σ_x , σ_y y σ_z son parámetros de dispersión;
 t es el tiempo de duración del las fugas.
 U variable relacionada con el viento.
 El término χ representa una distribución de Gauss a partir de una fuente puntual bien conocida y en estado estacionario
 ha en la altura del lanzamiento

Resultado y discusión

Los datos de cada escenario fueron insertados en el software ALOHA, y se obtuvo el modelado gráfico de las nubes de dispersión atmosférica del gas cloro. El modelado de las nubes de gas presenta la concentración de cloro en ppm presentando líneas referenciales de concentración observando los niveles de exposición aguda y relaciona la distancia y la anchura de las nubes referentes a cada evento.

En el escenario 1 la fuga provoca una descarga inicial de 911 kg/min del agente químico formando una nube de vapor tóxico que alcanza, a partir del lugar de la fuga, 6,7 km de longitud y 0,36 km de ancho, como muestra la Figura 2. En el escenario 2 la fuga provoca una descarga inicial de 21,4 kg/s de gas cloro con la formación de una nube de vapor tóxico que alcanza, a partir del lugar de la fuga, 7,1 km de longitud y 0,42 km de longitud como se muestra en la Figura 3.

Figura 2: Modelado de la nube de dispersión para el escenario 1

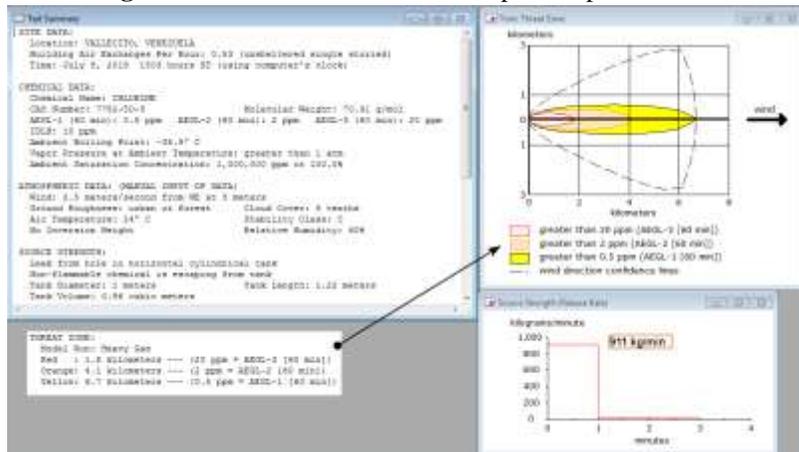
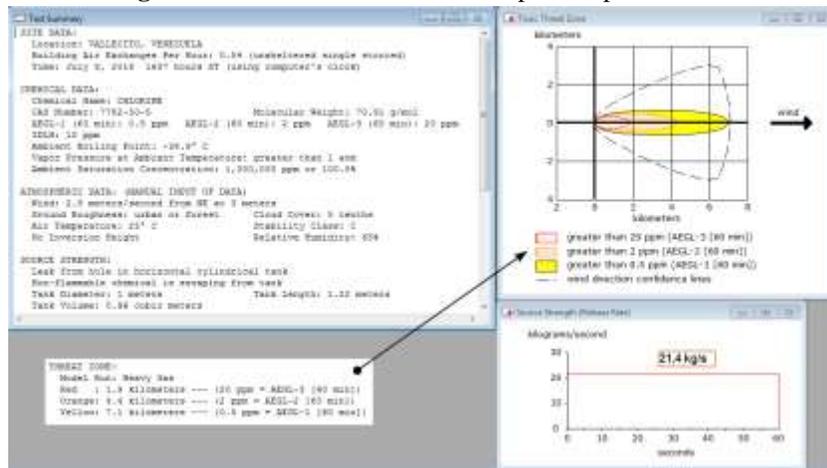


Figura 3: Modelado de la nube de dispersión para el escenario 2



En el escenario 3 la fuga ocasiona la descarga inicial de 214 kg /min del agente químico formando una nube de vapor tóxico que alcanza, a partir del lugar de la fuga, 6,3 km de longitud y 0,25 km de ancho como muestra la Figura 4. En el escenario 4 la fuga provoca la liberación inicial de 526 kg/min de gas con formación de una nube de vapor tóxico que alcanza, a partir del lugar de la fuga, 8,9 km de longitud y 0,28 km de ancho como muestra la Figura 5.

Figura 4: Modelado de la nube de dispersión para el escenario 3

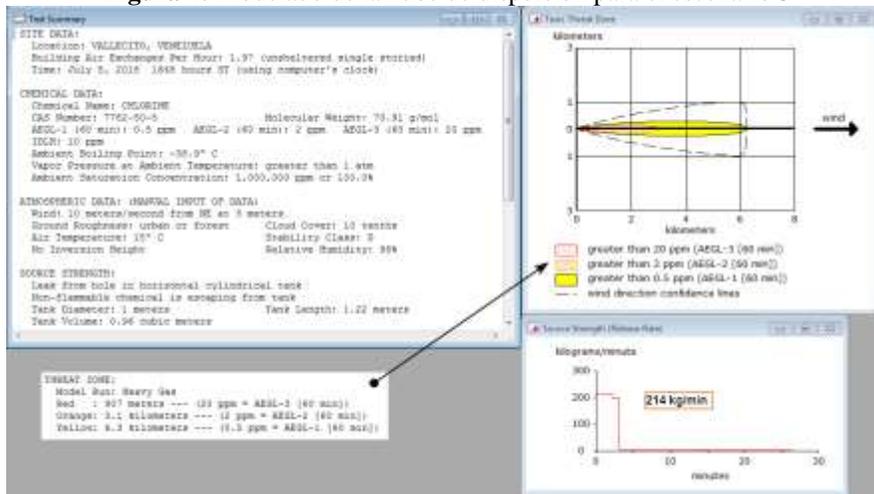
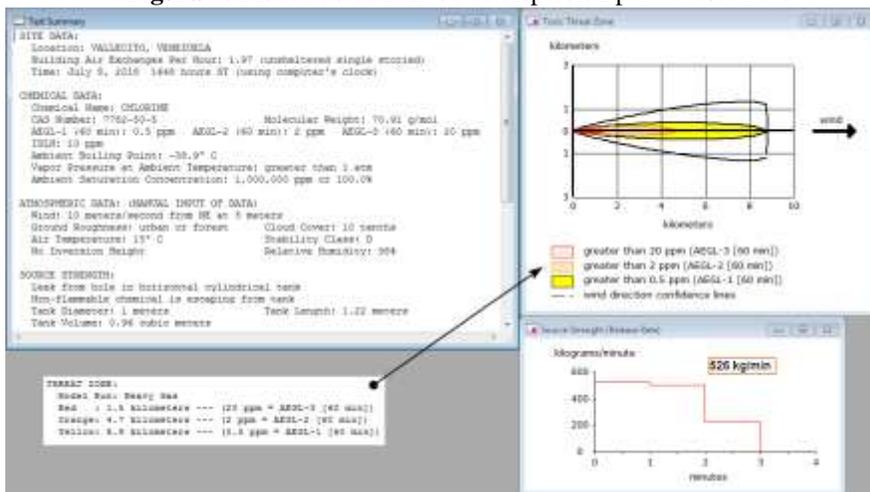


Figura 5: Modelado de la nube de dispersión para el escenario 4



En el escenario 5 la fuga provoca la dispersión inicial de 33,3 kg/min del agente químico formando una nube de vapor tóxico que alcanza, a partir del lugar de la fuga, 3,5 km de longitud y 0,20 km de ancho como muestra la Figura 6. En el escenario 6 la fuga provoca la descarga inicial de 532

kg/min de gas cloro con formación de una nube de vapor tóxico que alcanza, a partir del lugar de la fuga, 9,8 km de longitud y 0,3 km de ancho como se muestra en la Figura 7.

Figura 6: Modelado de la nube de dispersión para el escenario 5

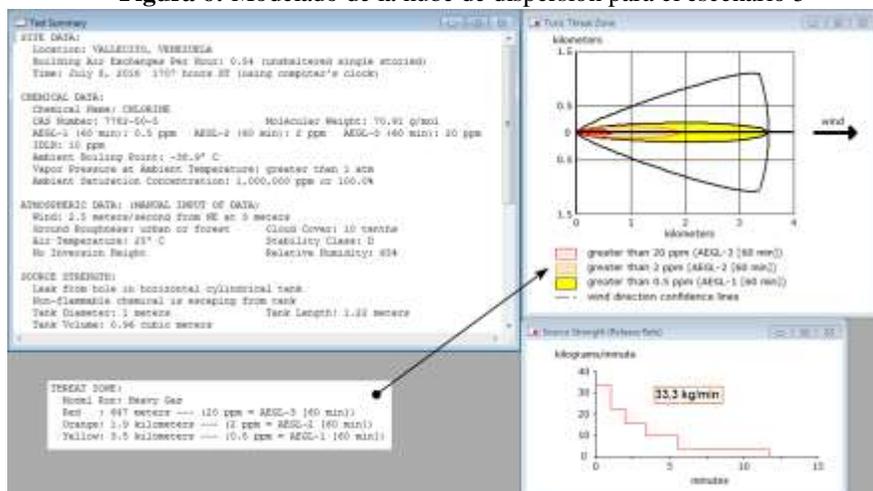
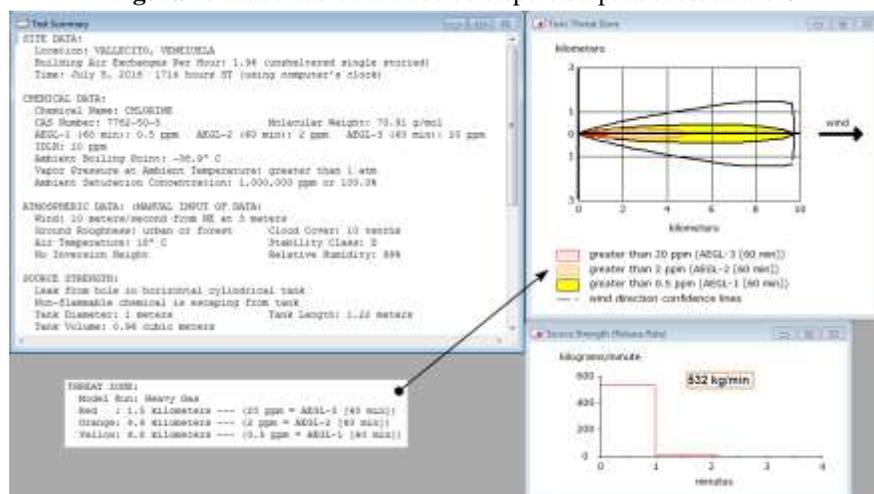


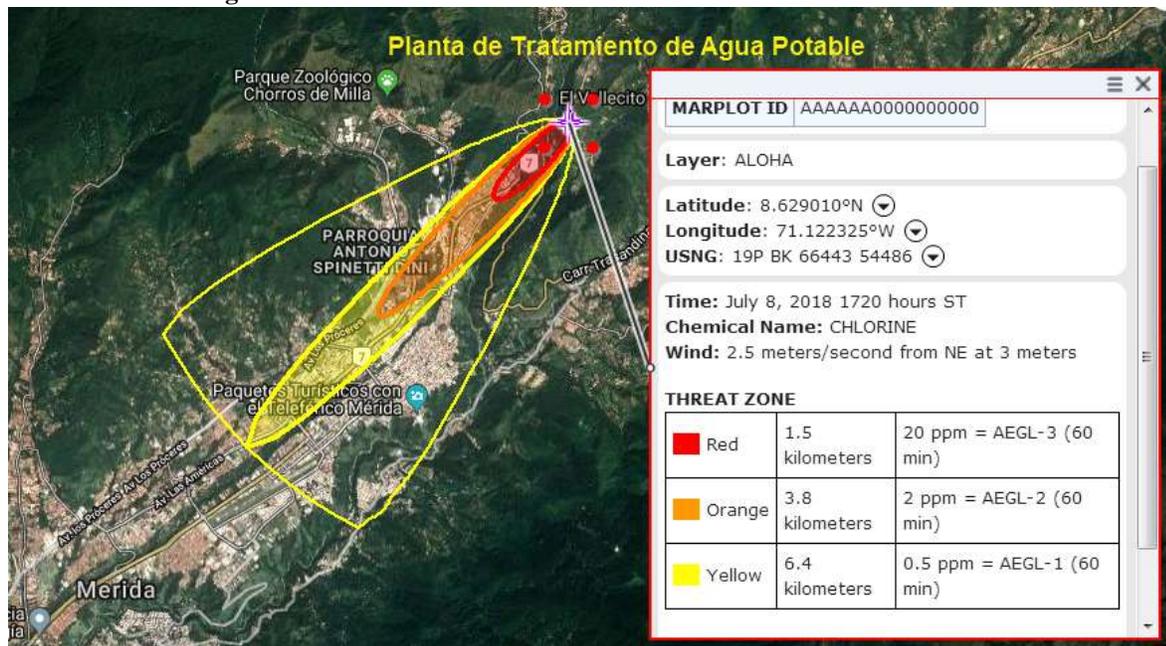
Figura 7: Modelado de la nube de dispersión para el escenario 6



La concentración máxima de cloro correspondiente a cada región está representada por las líneas trazadas en los gráficos, indicando los niveles de exposición aguda - Acute Exposure Guideline Levels (AEGL), que son indicadores de niveles tóxicos de preocupación desarrollados por la agencia americana EPA. El área representada por la línea amarilla indica que el valor de referencia para el gas cloro con tiempo de exposición de 60 minutos para EAGL-1 es de 0.5 ppm, que por encima de esta concentración se prevé que la población en general puede presentar irritación debido exposición al agente químico.

El área delimitada por la línea naranja indica que el valor de referencia para el gas cloro con un tiempo de exposición de 60 minutos para EAGL-2 es de 2 ppm, por encima de esta concentración se prevé que la población en general pueda experimentar efectos serios a largo plazo o irreversibles con el impedimento de su capacidad de escapar de la zona. Para el área representada por la línea roja indica que el valor de referencia para el gas cloro con tiempo de exposición de 60 minutos para EAGL-3 es de 20 ppm, por encima de esta concentración se prevé que la población en general, incluyendo individuos susceptibles, experimenta efectos que pueden ser mortales. En los escenarios estudiados, estas áreas comprenden hasta aproximadamente 8,9 km de longitud de distancia del punto de fuga. Siendo los escenarios 2 y 6 presentando mayores tasas de descarga inicial con aproximadamente 800 kg/min de agente químico liberados y alcanzando la región circundante de la planta potabilizada. Para observar este evento, en la Figura 8 se muestra la fuga de cloro posicionada geográficamente en la zona estudiada. Las áreas que cubre son rojo 0,445 km², naranja 1,80 km² y amarilla 4,18 km². En la imagen se observa que esta fuga de cloro afecta a la población de la parte Norte de la Ciudad de Mérida.

Figura 8: Posicionamiento de la macha en la Planta Potabilización El Vallecito.



Conclusión

A partir de los resultados obtenidos en la simulación de los escenarios hipotéticos de fugas accidentales de cloro, se concluye que existen riesgos significativos asociados a las instalaciones

de los contenedores que contienen cloro en la unidad de Potabilización de Agua ubicada en El Vallecito. En el análisis de los escenarios se observó que dentro de las condiciones utilizadas el alcance máximo de las nubes de dispersión atmosféricas provocadas por la fuga en el tanque de gas cloro fue de aproximadamente de 9,8 km de longitud y 0,42 km de ancho a partir del punto de referencia de fuga, que se encuentra en el escenario 2. Dado que los escenarios 2 y 6 presentaron un mayor caudal de descarga a la atmósfera con una liberación de aproximadamente 800 kg/min de gas cloro para el medio ambiente.

Finalmente, se puede concluir que los resultados obtenidos son útiles para las industrias que hacen uso de cloro en sus instalaciones como las Potabilizadoras de Agua e industrias de PVC, ya que permite identificar los riesgos y estimar las consecuencias de posibles escenarios accidentales que pueden ocurrir en los recipientes de cloro.

Referencias

1. Ainuddin S, Routray JK (2012) Emergency preparedness and management from national to local levels in Pakistan. *International Journal of Emergency Management* 8(2):123–134.
2. Cardoso J, Scarpel RA (2012) Estimativa do risco individual e social para o transporte de produtos perigosos pelo modal rodoviário utilizando um modelo simplificado 6(2):100-106.
3. Cheng T (2008) The development of a 3D risk analysis method. *Journal of Hazardous Materials* 153(1-2):600–608.
4. Georgiadou PS, Papazoglou IA, Kiranoudis CT, Markatos NC (2007) Modeling emergency evacuation for major hazard industrial sites. *Reliability Engineering and System Safety* 92(10):1388–1402.
5. Hanna SR, Gary AB, Rayford PH (1982) United States. Dept. of Energy. Office of Energy Research, and United States. Dept. of Energy. Office of Health and Environmental Research. Handbook on atmospheric diffusion: prepared for the Office of Health and Environmental Research, Office of Energy Research, U.S. Department of Energy. [Oak Ridge, TN]: Technical Information Center, U.S. Dept. of Energy.
6. Hendershot DC, Sussman JA, Winkler GE, y Dill GL (2006) Implementing inherently safer design in an existing plant, *Process Safety Progress* vol. 25, no. 1, pp. 52–57.

7. Horng J, Lin Y, Shu C, Tsai E (2005) Using consequence analysis on some chlorine operation hazards and their possible effects on neighborhoods in central Taiwan. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries* 18(4-6):474–480.
8. Jung S, Ng D, Lee J, Vazquez R, y Mannan MS (2010) An approach for risk reduction (methodology) based on optimizing the facility layout and siting in toxic gas release scenarios, *Journal of Loss Prevention in the Process Industries* vol. 23, no. 1, pp. 139–148.
9. Khan F, Abbasi S (1998) Techniques and methodologies for risk analysis in chemical process industries. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries* 11(4):261–277.
10. Kramer C, Montaña M (2010) Estudo de avaliação de riscos aplicados à estação de tratamento de esgotos de São José do Rio Preto. São Paulo-SP.
11. Massa C, Scott P (2014) Abramova, E.; Gardner, C.; Laskin, D.L.; Goww, A. J.; Acute chlorine gas exposure produces transient inflammation and a progressive alteration in surfactant composition with accompanying mechanical dysfunction. *Toxicology and Applied Pharmacology* vol. 278, p. 53-64.
12. Palazzi E, Defaveri M, Fumarola G, y Ferraiolo G (1982) Diffusion from a Steady Source of Short Duration, *Atmospheric Environment* no. 16 (12):2785-2790.
13. Pandya N, Gabas N, Masrden E (2012) Sensitivity analysis of Phast's atmospheric dispersion model for three toxic materials (nitric oxide, ammonia, chlorine). *Journal of Prevention in the Process Industries* vol. 25, p. 20-32.
14. Pasquill F (1961) The Estimation of the Dispersion of Windborne Material, *Meteorology Magazine* no. 90: 33-49.
15. Rigas F y Sklavounos S (2004) Major hazards analysis for populations adjacent to chemical storage facilities, *Process Safety and Environmental Protection* vol. 82, no. 5, pp. 341–351.