



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

---

**FACULTAD DE QUÍMICA**

**DISEÑO Y DESARROLLO DE ESCENARIOS PARA  
ANÁLISIS DE RIESGO A PARTIR DE CASOS REALES  
COMO HERRAMIENTA DIDÁCTICA PARA LA  
ENSEÑANZA DE LA INGENIERÍA QUÍMICA.**

**T E S I S**

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE**

**INGENIERA QUÍMICA**

**P R E S E N T A:**

**KARINA ITZEL RAMOS VÁZQUEZ**

**ASESORA:**

**DRA. IRMA CRUZ GAVILÁN GARCÍA**



**CIUDAD UNIVERSITARIA, CD.MX.**

**2022**



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

**JURADO ASIGNADO:**

**PRESIDENTE: GAVILÁN GARCÍA IRMA CRUZ**

**VOCAL: GUTIÉRREZ LARA MARÍA RAFAELA**

**SECRETARIO: ROJAS RODRIGUEZ ALMA DELIA**

**1er. SUPLENTE: CRUZ GÓMEZ MODESTO JAVIER**

**2° SUPLENTE: DURÁN MORENO ALFONSO**

**SITIO DONDE SE DESARROLLÓ EL TEMA:**

**UNIDAD DE GESTIÓN AMBIENTAL, FACULTAD DE QUÍMICA, UNAM.**

**CIRCUITO EXTERIOR S/N, COYOACÁN, CD. UNIVERSITARIA, 04510,  
CIUDAD DE MÉXICO.**

**ASESORA DEL TEMA:**

**DRA. IRMA CRUZ GAVILÁN GARCÍA**

\_\_\_\_\_

**SUSTENTANTE:**

**KARINA ITZEL RAMOS VÁZQUEZ**

\_\_\_\_\_

## **AGRADECIMIENTOS**

Al proyecto PAPIME PE107221 de la DGAPA de la UNAM.

A la Dra. Irma Cruz Gavilán García, asesora de este trabajo, por su incansable apoyo, motivación y por compartir sus conocimientos conmigo. Gracias por acercarme al análisis de riesgo, por sus consejos y la confianza que me brindó. Por ser mi guía ante todos los obstáculos durante este periodo tan complejo.

A mis sinodales Mtra. María Rafaela Gutiérrez Lara, Mtra. Alma Delia Rojas Rodríguez y Dra. Irma Gavilán por sus aportes a este trabajo.

A la Facultad de Química.

Y a todos aquellos que, directa o indirectamente, contribuyeron a la realización satisfactoria de este trabajo.

# ÍNDICE

INTRODUCCIÓN .....	I
OBJETIVOS .....	III
1.1 Objetivo general .....	III
1.2 Objetivos particulares .....	III
1.3 Alcance .....	III
CAPÍTULO 1. ANTECEDENTES .....	1
1.1 El concepto de riesgo y peligro .....	1
1.2 El análisis como parte de la gestión del riesgo .....	2
1.3 Conceptos complementarios .....	3
1.4 Sustancias y materiales peligrosos .....	4
1.5 Almacenamiento y transporte de sustancias químicas peligrosas .....	6
1.6 Sustancias químicas peligrosas en México .....	6
CAPÍTULO 2. MARCO REGULATORIO SOBRE RIESGO .....	9
2.1 Regulaciones de carácter obligatorio .....	9
2.1.1 Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos .....	9
2.1.2 Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente .....	9
2.1.3 Ley Federal del Trabajo .....	11
2.1.4 Norma Oficial Mexicana NOM-028-STPS-2012 .....	12
2.2 Estándares voluntarios .....	15
2.2.1 Gestión del riesgo (ISO 31000) .....	15
2.2.2 Sistema de gestión de seguridad y salud ocupacional (OHSAS 18001) .....	18
2.2.3 Sistema de gestión de seguridad y salud ocupacional (ISO 45001) ..	19

CAPÍTULO 3. CASOS DE ESTUDIO EN EL PROCESO ENSEÑANZA- APRENDIZAJE.....	21
3.1 Los casos de estudio como herramienta para la enseñanza práctica .....	21
3.2 Los retos de la enseñanza del análisis de riesgo en el aula .....	23
3.3 Evidencias del impacto de los estudios de caso en la enseñanza .....	25
3.3.1 Pensamiento Crítico .....	25
3.3.2 Aprendizaje.....	26
3.3.3 Participación .....	27
3.4 Elementos básicos que integran el estudio de casos.....	29
CAPÍTULO 4. MODELOS DE SIMULACIÓN PARA ANÁLISIS DE RIESGO.....	33
4.1 ALOHA .....	33
4.2 SCRI - Modelos.....	35
4.3 PHAST .....	36
4.4 KORA.....	38
CAPÍTULO 5. METODOLOGÍA.....	39
5.1 Selección del evento real .....	39
5.2 Selección del material .....	39
5.3 Definición de condiciones y parámetros.....	39
5.4 Selección de modelo de simulación .....	40
CAPÍTULO 6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	41
6.1 Inflamable.....	41
6.1.1 Gasolina (Octano).....	41
6.2 Explosivo.....	48
6.2.1 Nitrato de Amonio .....	48
6.3 Corrosivo.....	62

6.3.1 Cloro .....	62
CONCLUSIONES.....	80
RECOMENDACIONES .....	81
REFERENCIAS.....	82
ANEXO A. GASOLINA .....	90
ANEXO B. NITRATO DE AMONIO .....	94
ANEXO C. CLORO .....	98

## ÍNDICE DE CONTENIDO

- Esquemas.

*Esquema 1. Protocolo para profesores.* ..... 30

*Esquema 2. Protocolo para alumnos.* ..... 31

- Figuras.

*Figura 1. Estados de la república mexicana donde se almacenan la mayor cantidad de sustancias peligrosas en grandes cantidades.* ..... 7

- Gráficos.

*Gráfico 1. Percepción del impacto de estudios de caso en el pensamiento crítico de los estudiantes.* ..... 26

*Gráfico 2. Percepción del impacto de estudios de caso en el aprendizaje de los estudiantes.* ..... 27

*Gráfico 3. Percepción del impacto de estudios de caso en la participación de los estudiantes.* ..... 28

*Gráfico 4. Zona tóxica para Gasolina A.* ..... 45

*Gráfico 5. Zona inflamable para Gasolina A.* ..... 45

*Gráfico 6. Fuerza de explosión para Gasolina A.* ..... 45

*Gráfico 7. Zona de radiación térmica para caso Gasolina B.* ..... 47

*Gráfico 8. Daño máximo catastrófico (D. M. C.) para el caso Nitrato de Amonio A.* ..... 55

*Gráfico 9. Daño máximo probable (D. M. P.) para el caso Nitrato de Amonio A ...* 55

*Gráfico 10. Sobrepresiones vs. Distancia de los casos de Nitrato de Amonio. ....* 57

*Gráfico 11. Zona tóxica para caso Cloro A.* ..... 64

*Gráfico 12. Zona tóxica para caso Cloro B.* ..... 64

*Gráfico 13. Zona tóxica para caso Cloro C.* ..... 65

*Gráfico 14. Distancia vs Concentración de caso Cloro A con  $z= 0$  m.* ..... 69

*Gráfico 15. Distancia vs Concentración de caso Cloro A con  $z= 10$  m.* ..... 69

*Gráfico 16. Distancia vs Concentración de caso Cloro A con  $z= 30$  m.* ..... 70

*Gráfico 17. Distancia vs Concentración de caso Cloro A con  $z= 70$  m.* ..... 70



Gráfico 18. Distancia vs Concentración de caso Cloro A con $z= 100$ m.....	71
Gráfico 19. Distancia vs Concentración de caso Cloro B con $z= 70$ m.....	72
Gráfico 20. Distancia vs Concentración de caso Cloro C con $z=70$ m. ....	72
Gráfico 21. Isoconcentraciones para caso Cloro A con $z=10$ m.....	74
Gráfico 22. Isoconcentraciones para caso Cloro B con $z=10$ m.....	75
Gráfico 23. Isoconcentraciones para caso Cloro C con $z=10$ m.....	75

- **Imágenes.**

Imagen 1. Proyección de zona tóxica de caso Gasolina A.....	46
Imagen 2. Proyección de zona inflamable de caso Gasolina A.....	46
Imagen 3. Proyección de zona de radiación térmica para caso Gasolina B.....	47
Imagen 4. Resultados de la ejecución del programa del caso Nitrato de Amonio A.....	54
Imagen 5. Mapa de referencia: ubicación del almacén 12 en el Puerto de Beirut con circunferencias cada 100 m de radio (Google Earth). ....	59
Imagen 6. Mapa de referencia: ubicación del almacén 12 en el Puerto de Beirut con circunferencias cada 400 m de radio (Google Earth). ....	60
Imagen 7. Mapa de referencia: ubicación del almacén 12 en el Puerto de Beirut con circunferencias cada 1 km de radio (Google Earth). ....	61
Imagen 8. Proyección de la nube tóxica de caso Cloro A. ....	66
Imagen 9. Proyección de nube tóxica de caso Cloro B. ....	67
Imagen 10. Proyección de nube tóxica de caso Cloro C.....	67
Imagen 11. Isoconcentraciones para caso Cloro A con $z=10$ m. ....	76
Imagen 12. Isoconcentraciones para caso Cloro B con $z=10$ m. ....	77
Imagen 13. Isoconcentraciones para caso Cloro C con $z=10$ m. ....	77
Imagen 14. Gasolina. ....	90
Imagen 15. Sitio de la explosión un día después del accidente. ....	91
Imagen 16. Antes y después de la explosión en el Puerto de Beirut.....	96
Imagen 17. Complejo Industrial Portuario de Altamira. ....	98
Imagen 18. Contenedor de Tanque de Cloro.....	99

- Tablas.

<i>Tabla 1. Porcentajes de almacenamiento en el estado donde se encuentra la mayor cantidad de sustancia.....</i>	<i>8</i>
<i>Tabla 2. Contenido mínimo para análisis de riesgos de acuerdo con la NOM-028-STPS-2012.....</i>	<i>13</i>
<i>Tabla 3. Compatibilidad de los métodos de enseñanza con el formato de clase..</i>	<i>23</i>
<i>Tabla 4. Tipo de fuente de fuga para el caso Gasolina. ....</i>	<i>44</i>
<i>Tabla 5. Equivalencias de TNT en la literatura.....</i>	<i>50</i>
<i>Tabla 6. Equivalencias de TNT para cada caso de Nitrato de Amonio. ....</i>	<i>53</i>
<i>Tabla 7. Resultados de las simulaciones para el Nitrato de Amonio.....</i>	<i>56</i>
<i>Tabla 8. Estimación de los daños provocados por sobrepresión en explosiones..</i>	<i>57</i>
<i>Tabla 9. Condiciones meteorológicas para caso Cloro. ....</i>	<i>63</i>
<i>Tabla 10. Comparación de los programas de simulación.....</i>	<i>78</i>
<i>Tabla 11. Variable propuesta: tipo de fuente.....</i>	<i>93</i>
<i>Tabla 12. Variable propuesta: carga equivalente en TNT. ....</i>	<i>97</i>
<i>Tabla 13. Variable propuesta: condiciones meteorológicas. ....</i>	<i>104</i>

# INTRODUCCIÓN

La enseñanza tradicional de ciencias, particularmente en la química, tiene como retos la integración de los conocimientos y el desarrollo de habilidades de análisis, síntesis, aplicación de conocimientos a situaciones reales, entre otros. El manejo de sustancias químicas es una actividad que tiene diversos riesgos asociados y realizarlo de manera adecuada es esencial en el ejercicio de la ingeniería química. Los riesgos varían según la sustancia involucrada, el proceso en el que se manipula, las instalaciones, condiciones de operación y el sitio donde se lleva a cabo, tan solo por mencionar algunos. Así que el análisis de estos riesgos resulta muy importante para gestionarlos, disminuirlos o eliminarlos, por lo tanto, es una actividad que el ingeniero químico enfrentará de manera cotidiana en la industria.

Todos los esfuerzos de las universidades en la formación de los futuros ingenieros se dirigen a formar profesionales que, además de adquirir los conocimientos teóricos, sean capaces de desarrollar habilidades como la toma de decisiones, capacidad de análisis y deducción, poniendo en práctica todo lo aprendido en situaciones reales, entre otras. Para llevar a cabo dicho proceso de formación, existen múltiples estrategias didácticas con las que se trabaja para asegurar que el objetivo se alcance. Es por ello que surge la necesidad de buscar nuevos métodos que permitan enriquecer el proceso de enseñanza/aprendizaje.

En este trabajo se introduce el método de casos de estudio como herramienta de aprendizaje. En él, se desarrolla una historia (ya sea real o creada) que se puede adaptar según convenga para cubrir los objetivos curriculares y, a través de esta historia, se desarrollan habilidades que van más allá de la memorización de conceptos. Asimismo, la propuesta considera un protocolo general para construir un caso de estudio personalizado y se presentan tres casos enfocados en el tema de análisis de riesgo.

Los principales apartados que integran este trabajo son los siguientes; primeramente, se presenta una revisión bibliográfica sobre trabajos relacionados con nuestro tema de estudio, posteriormente se aborda de manera resumida el marco regulatorio en materia de riesgo en nuestro país, en tercer lugar, se plasma

el método de casos de estudio como herramienta didáctica llevada al aula y se presenta un apartado completo sobre los modelos de simulación disponibles para el análisis de riesgo. En la metodología se presenta el desarrollo del protocolo para la construcción de los casos de estudio y el diseño de distintos escenarios. Por último, en los resultados se presentan los escenarios propuestos y las simulaciones de los softwares utilizados para cada caso, así como su análisis y discusión de acuerdo con los objetivos curriculares que se pretenden alcanzar en los cursos de temas ambientales. Las referencias y anexos se encuentran al final del trabajo.

# OBJETIVOS

## 1.1 Objetivo general

Desarrollar casos prácticos de análisis de riesgo mediante la simulación de escenarios que involucren el manejo de materiales peligrosos utilizando softwares especializados.

## 1.2 Objetivos particulares

- Realizar la revisión bibliográfica para seleccionar el software apropiado para los alcances del trabajo.
- Realizar una revisión bibliográfica sobre el marco normativo vigente en materia de evaluación de riesgo.
- Revisar de los incidentes reportados en los que se involucran sustancias químicas peligrosas.
- Diseñar y desarrollar escenarios, a partir de casos reales, que consideren diferentes condiciones e involucren materiales CRETI, tanto en el sector industrial como el de servicios, aeropuertos, estaciones ferroviarias, puertos, etc.

## 1.3 Alcance

El presente trabajo pretende aplicar el método de casos de estudio para servir a los propósitos de la formación de los futuros ingenieros químicos, puntualmente en el tema de análisis de riesgo. Se propone un protocolo para implementar la metodología en el aula y el desarrollo de los recursos didácticos necesarios para asegurar la comprensión del recurso, identificando las ventajas y limitaciones que presentan los dos simuladores seleccionados, uno de uso libre y otro con costo.

Siendo una propuesta enfocada en análisis de riesgo, no se profundiza totalmente en elementos pedagógicos ni metodologías de enseñanza ya que no forman parte del área de estudio de la autora. De igual manera, el alcance no se extiende a profundizar en los conceptos, propiedades y mecanismos que explican el comportamiento de las sustancias químicas dentro de la clasificación CRETI.

# CAPÍTULO 1. ANTECEDENTES

## 1.1 El concepto de riesgo y peligro

Los términos *peligro* y *riesgo* se encuentran inmersos en el lenguaje común. Los encontramos la televisión, revistas, periódicos, redes sociales, entre otros y en múltiples ámbitos como el financiero, político, ambiental, social y económico; debido a ello, fácilmente se puede confundir su definición hasta llegar a usarse como sinónimos. Sin embargo, resulta relevante para este trabajo hacer distinción entre ellos.

La noción de riesgo está sumamente ligada a la actividad humana. La humanidad siempre ha estado expuesta a ellos y, al mismo tiempo, siempre ha generado riesgos a su entorno. Los esfuerzos para gestionar los riesgos se presentaron como una consecuencia natural. Inevitablemente, conforme las actividades han evolucionado a través del tiempo, el riesgo y la actitud ante él se han modificado (Flaus, 2013).

Flaus (2013), define riesgo de manera breve, como un escenario con la posibilidad de crear daño. La Agencia Estadounidense de Protección Ambiental (EPA, por sus siglas en inglés), menciona que el riesgo es la probabilidad de que se presenten efectos dañinos a la salud humana o a los sistemas ecológicos como resultado de la exposición a factores estresantes (EPA, s.f.). A su vez, define como factor estresante, a cualquier entidad física, química o biológica que puede inducir una respuesta adversa, ya sea en recursos naturales en específico o ecosistemas enteros. Por otro lado, el Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED), define riesgo como una medida de la pérdida económica o del daño a las personas en términos tanto de la probabilidad del incidente como de la magnitud de la pérdida o daño (CENAPRED, 2014).

Del análisis de estas definiciones, se pueden rescatar las siguientes ideas que consideramos pertinentes cuando se habla de riesgo:

- 1) El riesgo está relacionado con el factor de la probabilidad de que se provoque un daño.

- 2) Se requiere de la exposición a algún factor estresante para que exista el riesgo.
- 3) Los principales objetos expuestos al daño son los humanos, los sistemas ecológicos y los bienes.
- 4) La magnitud del daño es variable.
- 5) La mayoría de estos daños implican consecuencias económicas.

El factor estresante que menciona la EPA es precisamente el peligro intrínseco al que se está expuesto. Flaus (2013), menciona que el peligro es aquello que puede producir un daño en el futuro de manera incierta. Por otro lado, CENAPRED (2014), señala que es una condición física, química o biológica que tiene el potencial de causar daño a las personas, propiedades o al ambiente. Por lo tanto, la noción de riesgo está ligada con la de peligro, pero son dos conceptos diferentes.

Los riesgos se pueden clasificar por la naturaleza de sus consecuencias, entre ellas a la salud humana, a la situación social, a la economía, al ambiente y a los mecanismos de producción, por mencionar algunas (Flaus, 2013). Es por ello que el término riesgo se aplica en diversos ámbitos y contextos. Sin embargo, en este trabajo se busca evaluar riesgos cuyas consecuencias principales tiene efectos sobre la salud humana, el ambiente y los bienes materiales.

## **1.2 El análisis como parte de la gestión del riesgo**

En el ámbito industrial, los riesgos se han dominado debido a motivos éticos, regulatorios y económicos. Esto es precisamente el propósito de la gestión del riesgo, que de acuerdo con la ISO 31000 (ISO, 2018) y la guía ISO 73 (ISO, 2009), se define como un proceso que incluye las siguientes etapas:

- 1) Identificación de riesgos: este proceso involucra encontrar, reconocer y describir riesgos. Cada uno es descrito con la identificación de fuentes de peligro, eventos que pueden liberar el potencial de peligro y sus consecuencias.
- 2) Análisis de riesgo: esta etapa nos permite comprender el riesgo y evaluar su nivel.
- 3) Evaluación del riesgo: en este aspecto determinamos si un riesgo es aceptable o no, de acuerdo con los criterios previamente establecidos.

- 4) Tratamiento final del riesgo: consiste en modificar un riesgo para hacerlo aceptable. Se puede buscar reducirlo (en términos de posibilidad de que ocurra o su severidad), transferirlo (aseguradoras) o eliminar la actividad.

El proceso completo también incluye fases de comunicación, monitoreo y revisión de las acciones implementadas, y bajo el enfoque de mejora continua, se realiza de manera iterativa. Ordinariamente, se utiliza el término de análisis de riesgo como parte del proceso de gestión del riesgo y el término evaluación del riesgo como el proceso que involucra de las etapas 1 a 3 de la gestión de riesgo (Flaus, 2013).

Específicamente, en la etapa de análisis de riesgo se requiere identificar si la presencia de un peligro implica un riesgo. Generalmente, se inicia por definir una situación específica en la que el peligro es muy probable que produzca un daño. Esta situación es anormal, definida subjetivamente o con relación a ciertas especificaciones, donde el peligro potencial puede presentarse si cierto evento ocurre. Ésta se conoce como una situación peligrosa (Flaus, 2013). Otra opción, es partir de una situación peligrosa que ya ha sucedido e identificar la causa que dio origen al tal evento.

### **1.3 Conceptos complementarios**

Un evento es algo que puede ocurrir en cierto lugar durante un periodo de tiempo determinado. Otra definición que aparece en la ISO 31000 es la ocurrencia o cambio en un conjunto particular de circunstancias. Entre los tipos de eventos que pueden representar una secuencia de accidente, se incluyen los eventos peligrosos o eventos centrales indeseables (CUE por sus siglas en inglés, *Central Undesirable Events*), eventos iniciales y eventos finales.

Un evento inicial es aquel que lleva a una situación donde un evento peligroso puede ocurrir. Un evento peligroso o CUE es aquel que describe un fenómeno capaz de dañar un objetivo. Este es el primer evento en una secuencia de eventos que, si se deja fuera de control, se traducirá en daños. Un evento final es aquel que representa la ocurrencia de daño a un objetivo (Flaus, 2013).



Por otro lado, un accidente puede definirse como un evento súbito e indeseable que resulta en daño significativo a personas, bienes o el ambiente (Flaus, 2013). Según el CENAPRED (2014), es un evento indeseado e inesperado, que se produce por una secuencia específica de eventos que ocurren rápidamente causando daños a la propiedad, a las personas y/o al ambiente. Un incidente es definido como un evento indeseable que resulta en daños menores a personas, bienes o el ambiente. La distinción entre accidente e incidente es parcialmente subjetiva, sin embargo, resulta claro en la mayoría de los campos en los que se aplica (Flaus, 2013).

Entonces, un escenario de accidente es una secuencia de eventos, que comienza con uno o más eventos iniciales, cuya ocurrencia o conjunción de ocurrencia es necesaria para producir el evento peligroso, y el cual termina con el evento final (Flaus, 2013).

#### **1.4 Sustancias y materiales peligrosos**

Las sustancias químicas peligrosas son aquellas sustancias que, por sus propiedades físicas y químicas, al ser manejadas, transportadas, almacenadas o procesadas presentan la posibilidad de riesgos a la salud, de inflamabilidad, de reactividad o peligros especiales, y pueden afectar la salud de las personas expuestas o causar daños materiales a las instalaciones (CENAPRED, 2014).

Los materiales peligrosos, de acuerdo con el artículo tercero de la Ley General Del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente (LEEGPA), se definen como elementos, sustancias, compuestos, residuos o mezclas de ellos que, independientemente de su estado físico represente un riesgo para el ambiente, la salud, o los recursos naturales, por sus características corrosivas, reactivas, explosivas, tóxicas, inflamables o biológico-infecciosas (LGEEPA, 1988).

Se considera pertinente hacer la distinción entre ambos conceptos. Sin embargo, para el alcance de este trabajo se utilizará el término “sustancia química peligrosa”. A continuación, se mencionan las características que, de acuerdo con el CENAPRED (2014), presentan las sustancias químicas peligrosas (clasificación CRETI):

- Corrosividad: las sustancias químicas corrosivas pueden quemar, irritar o destruir los tejidos vivos y material inorgánico. Cuando se inhala o ingiere una sustancia corrosiva, se ven afectados los tejidos del pulmón y estómago.
  - Gases corrosivos: causan daño en el cuerpo debido al contacto con la piel y por inhalación.
  - Líquidos corrosivos: se utilizan frecuentemente en el laboratorio y son, en gran medida, causa de lesiones corporales externas.
  - Sólidos corrosivos: producen lesiones retardadas. Debido a que los sólidos se disuelven fácilmente en la humedad de la piel y del aparato respiratorio, los efectos de los sólidos corrosivos dependen en gran medida de la duración del contacto.
- Reactividad: es la capacidad de las sustancias para por sí mismas detonar, tener una descomposición explosiva o producir un rápido y violento cambio químico.
- Explosividad: capacidad de las sustancias químicas que provocan una liberación instantánea de presión, gas y calor, ocasionado por un choque repentino, presión o alta temperatura.
- Toxicidad: se define como la capacidad de una sustancia para producir daños en los tejidos vivos, lesiones, enfermedad grave o en casos extremos la muerte, cuando se ingiere, inhala o se absorbe a través de la piel.
- Inflamabilidad. es la medida de la facilidad que presenta un gas, líquido o sólido para encenderse y de la rapidez con que, una vez encendido, se diseminan sus llamas. Cuanto más rápida sea la ignición, más inflamable será el material. Los líquidos inflamables no lo son por sí mismos, sino que lo son debido a que su vapor es combustible. Hay dos propiedades físicas de los materiales que indican su inflamabilidad: El punto de inflamación y la volatilidad.

Entonces, podemos observar que, debido a las características de peligrosidad de las sustancias químicas, su manejo seguro y almacenamiento adecuado resultan de suma importancia.

### **1.5 Almacenamiento y transporte de sustancias químicas peligrosas**

El almacenamiento consiste en el conjunto de recintos y recipientes usados para contener productos químicos, incluyendo los recipientes propiamente dichos, diques de contención, calles o pasillos intermedios de circulación y separación, tuberías de conexión, zonas e instalaciones de carga, descarga y trasiego anexas, y otras instalaciones necesarias para el resguardo, siempre que sean exclusivas del mismo. Las sustancias químicas en estado líquido y gaseoso se almacenan de acuerdo con su ubicación en tanque aéreos o superficiales y subterráneos, y de acuerdo con la presión, en tanque atmosféricos, a baja presión y a presión. Su tamaño, diseño, materiales forma e instrumentación dependen del producto y la cantidad a almacenar. Por su parte, las sustancias en estado sólido se almacenan en silos, sacos, tambores, bolsas y cajas (CENAPRED, 2014).

El transporte de materiales peligrosos es inherente a cualquier sociedad con un desarrollo tecnológico. Los procesos industriales dependen de un flujo continuo de sustancias y materiales y cuando éste se realiza, existe un peligro potencial para la población y el ambiente. En México, el transporte sucede principalmente por vía carretera y ferroviaria. En esta operación se utilizan diferentes configuraciones y tipos de vehículos, autotanques y carrotanques; adicionalmente, diversas sustancias peligrosas son transportadas a través de tuberías, por ejemplo, hidrocarburos (CENAPRED, 2014).

### **1.6 Sustancias químicas peligrosas en México**

El CENAPRED (2014) reporta que, de acuerdo con las características de peligrosidad de las sustancias químicas, su distribución en la República Mexicana y las cantidades de almacenamiento, las sustancias que representan mayor peligro en México son (en orden descendiente):

- |                    |                                      |
|--------------------|--------------------------------------|
| 1. Gas L. P.       | 8. Acetona                           |
| 2. Amoniaco        | 9. Alcohol metílico                  |
| 3. Ácido sulfúrico | 10. Alcohol propílico e isopropílico |
| 4. Cloro           | 11. Propano                          |
| 5. Hexano          | 12. Acetato de etilo                 |

- 6. Gasolina
- 7. Nitrógeno

- 13. Óxido de etileno
- 14. Ácido fluorhídrico

Asimismo, los estados del país que se han identificado con el mayor número de sustancias peligrosas almacenadas se pueden observar en la Figura 1 y sus respectivos porcentajes en la Tabla 1 (CENAPRED, 2014).



**Figura 1.** Estados de la república mexicana donde se almacenan la mayor cantidad de sustancias peligrosas en grandes cantidades. Se muestran en orden descendiente (De elaboración propia con datos de CENAPRED, 2014).

**Tabla 1.** Porcentajes de almacenamiento en el estado donde se encuentra la mayor cantidad de sustancia (Extracto de CENAPRED, 2014).

Sustancia	Estado con mayor cantidad almacenada	Proporción de la sustancia almacenada [Porcentaje]
Gas LP	Veracruz	61%
Amoniaco	Oaxaca	41%
Ácido sulfúrico	Tlaxcala	46%
Cloro	Veracruz	51%
Hexano	Puebla	42%
Gasolina	Otros	24%
Nitrógeno	Coahuila	54%
Acetona	Veracruz	64%
Metanol	Veracruz	31%
Propanol	Veracruz	62%
Propano	Veracruz	73%
Acetato de etilo	Veracruz	79%
Óxido de etileno	Tlaxcala	49%
Ácido fluorhídrico	Tamaulipas	63%

## **CAPÍTULO 2. MARCO REGULATORIO SOBRE RIESGO**

Este capítulo se divide en regulaciones obligatorias según el gobierno mexicano y estándares internacionales que no son de carácter obligatorio. Sin embargo, son implementados comúnmente.

### **2.1 Regulaciones de carácter obligatorio**

#### 2.1.1 Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos

La Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos es la ley máxima en México. En ella se encuentran plasmados los principios y objetivos del país. Se publicó por primera vez el 5 de febrero de 1917 en el Diario Oficial de la Federación y ha sido reformada en múltiples ocasiones desde entonces, siendo la última versión disponible aquella publicada el 28 de mayo del 2021.

En el artículo 4° se establece que “*toda persona tiene derecho a la protección de la salud*”. Asimismo, se menciona que “*toda persona tiene derecho a un medio ambiente sano para su desarrollo y bienestar*”. En este artículo se atribuye al Estado la obligación de garantizar el respeto a este derecho y coloca la responsabilidad en quien provoque daño y deterioro ambiental, en términos de lo dispuesto por la ley.

El inciso XV del apartado A en el artículo 123°, contenido en el Título Sexto “Del Trabajo y de la Previsión Social”, estipula que el patrón tiene la obligación de observar los preceptos legales en asuntos de higiene y seguridad en las instalaciones de su establecimiento; debe adoptar medidas adecuadas para la prevención de accidentes en el uso de máquinas, instrumentos y materiales de trabajo. También señala la obligación del patrón para organizar su espacio de trabajo de tal forma que garantice la salud y la vida de los trabajadores.

#### 2.1.2 Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente

La Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente (LGEEPA) fue publicada por primera vez en el Diario Oficial de la Federación el 28 de enero de (1988); la última reforma fue publicada el 18 de enero del 2021. Es una ley que presenta disposiciones sobre protección ambiental, preservación y restauración del

equilibrio ecológico en el territorio nacional. Es el eje de la legislación ambiental en México.

Tiene como objetivo propiciar el desarrollo sustentable y establecer las bases para:

- Garantizar el derecho a un medio ambiente sano para el desarrollo, salud y bienestar.
- Definir los principios de política ambiental y los instrumentos para su aplicación.
- La preservación y protección de la biodiversidad, así como el establecimiento de administración de las áreas naturales protegidas.
- El aprovechamiento sustentable, prevención y restauración de recursos naturales de manera que sean compatibles con la obtención de beneficios económico y las actividades de la sociedad.
- Prevención y control de la contaminación de aire, agua y suelo.
- Garantizar la participación responsable de las personas en la preservación y restauración del equilibrio ecológico y la protección al ambiente.
- El establecimiento de mecanismos de coordinación, inducción y concertación entre autoridades y los sectores social y privado en materia ambiental.
- El establecimiento de medidas de control y de seguridad para garantizar el cumplimiento y la aplicación de esta ley, así como la imposición de sanciones administrativas y penales que correspondan.

En el Capítulo II “Distribución de Competencias y Coordinación” del Título I “Disposiciones Generales” se enuncian las facultades que corresponden a la Federación (Art. 5°), los Estados (Art. 7°), los Municipios (Art. 8°) y al Gobierno de la Ciudad de México (Art. 9°). Se estipula en el artículo 6° que *“Las atribuciones que esta Ley otorga a la Federación, serán ejercidas por el Poder Ejecutivo Federal a través de la Secretaría y, en su caso, podrán colaborar con ésta las Secretarías de Defensa Nacional y de Marina cuando por la naturaleza y gravedad del problema así lo determine, salvo las que directamente corresponden al Presidente de la República por disposición expresa de la Ley”*. Entiéndase “la Secretaría” como la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT).

Por su parte, la vigilancia ocurre a través de la Procuraduría Federal de Protección al Ambiente (PROFEPA), la cual es un órgano administrativo desconcentrado de la SEMARNAT con autonomía técnica y operativa. Su misión es procurar la justicia ambiental mediante la aplicación y cumplimiento efectivo, eficiente, expedito y transparente de la legislación ambiental vigente a través de la atención a la denuncia popular y mediante acciones de inspección, verificación, vigilancia y uso de instrumentos voluntarios (PROFEPA, s.f.).

### 2.1.3 Ley Federal del Trabajo

La Ley Federal del Trabajo fue publicada por primera vez en el Diario Oficial de la Federación el 1° de abril de (1970); la última reforma fue publicada el 23 de abril del 2021. Es la ley principal de derecho laboral en la que se establecen las características de las relaciones laborales (patrón-trabajador) en la república mexicana.

El título noveno está dedicado a los riesgos de trabajo. Dado el enfoque de este escrito, resaltan los siguientes artículos:

- Artículo 473: define los riesgos de trabajo como los accidentes y enfermedades a que están expuestos los trabajadores en ejercicio o con motivo del trabajo.
- Artículo 474: define un accidente de trabajo como toda lesión orgánica o perturbación funcional, inmediata o posterior, la muerte o la desaparición deriva de un acto delincuencia, producida repentinamente en ejercicio o con motivo del trabajo, cualesquiera que sean el lugar y el tiempo que se preste.
- Artículo 475 Bis: estipula que el patrón es responsable de la seguridad e higiene y de la prevención de los riesgos en el trabajo, mientras que es obligación de los trabajadores observar las medidas preventivas establecidas.

El artículo 523 de la Ley Federal del trabajo establece que la aplicación de las normas de trabajo compete, en sus respectivas jurisdicciones, a la Secretaría del Trabajo y Previsión Social (STPS), a las Secretarías de Hacienda y Crédito Público



(SHCP), de Educación Pública (SEP) y al Centro Federal de Conciliación y Registro Laboral, entre otros.

El artículo 527 menciona que la aplicación de las normas de trabajo corresponde a las autoridades federales cuando se trate de ramas industriales y de servicios químicos (incluyendo la química farmacéutica y medicamentos) y petroquímicos, entre otras ramas. Como complemento, en el artículo 527-A se establece que en la aplicación de las normas referentes a la capacitación y adiestramiento de los trabajadores y las relativas a seguridad e higiene en el trabajo, las autoridades de la Federación serán auxiliadas por las locales.

#### 2.1.4 Norma Oficial Mexicana NOM-028-STPS-2012

La NOM-028-STPS-2012 de “Sistema para la Administración del Trabajo-Seguridad en los Procesos y Equipos Críticos que Manejen Sustancias Químicas Peligrosas” fue publicada en el año (2012) y tiene como objetivo establecer los elementos de un sistema de administración para organizar la seguridad en los procesos y equipos críticos que manejen sustancias químicas peligrosas, con el fin de prevenir accidentes mayores y proteger de daños a las personas, a los centros de trabajo y a su entorno.

Esta Norma Oficial Mexicana rige en todo el territorio mexicano y aplica a los centros de trabajo que realicen procesos específicos (extracción, producción, refinamiento, almacenamiento, distribución) que involucren gas natural, petróleo o petroquímicos y/o manejen sustancias químicas peligrosas en procesos y equipos críticos, en volúmenes iguales o mayores a los designados por la norma.

En la NOM-028-STPS-2012 se dedica un apartado para describir el contenido mínimo de un análisis de riesgos de los procesos y equipos críticos que manejen sustancias químicas (Tabla 2). Se estipula que el análisis se deberá actualizar cada cinco años, antes de ejecutar modificaciones al proceso y/o equipos, cuando se proyecte un nuevo proceso y como resultado de la investigación de un accidente mayor.

**Tabla 2.** Contenido mínimo para análisis de riesgos de acuerdo con la NOM-028-STPS-2012.

Requerimientos	Descripción
Objetivos, alcance y tiempo requerido.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Depende de cada caso</li> </ul>
Recopilación de información.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Sobre el proceso y/o equipo crítico: Descripción general, condiciones de operación, diagramas y planos (del proceso y/o equipo crítico, tuberías e instrumentación, eléctricos), listas de alarmas e interruptores y el plano de la planta con la localización de los procesos y equipos críticos que manejen sustancias químicas peligrosas.</li> <li>• Sobre las sustancias químicas peligrosas: hojas de datos de seguridad, instrucciones o procedimientos de operación, el sistema de identificación y comunicación de peligros y riesgos para las sustancias químicas peligrosas.</li> <li>• Sobre la historia del proceso: Reportes de accidentes ocurridos en el centro de trabajo o en procesos similares y análisis de riesgos previos (si existen).</li> </ul>
La identificación y evaluación de los riesgos asociados con el proceso y/o equipo crítico.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Propiedades físicas y químicas de las sustancias químicas peligrosas.</li> <li>• Historia operativa del proceso (frecuencia de emisiones, edad del proceso, entre otros).</li> <li>• Las posibles consecuencias derivadas de accidentes mayores con las sustancias químicas peligrosas utilizadas.</li> </ul>

	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Número de personas que pueden resultar afectadas en las instalaciones del centro de trabajo o sus inmediaciones.</li> </ul>
Las técnicas seleccionadas para el análisis de riesgos	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Identificación de riesgos potenciales.</li> <li>• análisis de causas y de consecuencias.</li> <li>• Recomendaciones para reducir o eliminar un riesgo.</li> <li>• identificación de los puntos de interés para estudios posteriores y de la frecuencia de ocurrencia.</li> <li>• determinación de la protección requerida.</li> </ul>
Recomendaciones preventivas y/o correctivas para la administración de riesgos identificados.	No aplica

Otro apartado se dedica a la administración de riesgos, donde se menciona que debe contener una relación de los riesgos identificados, evaluados y jerarquizados mediante el estudio de análisis de riesgos, los criterios de aceptación de riesgos basados en la probabilidad de ocurrencia y consecuencias que ocasionen y un programa para el cumplimiento de las recomendaciones seleccionadas que resulten del estudio de análisis de riesgos del proceso. Asimismo, establece que el sistema de administración de riesgos debe cumplir lo siguiente:

- Contar con un responsable de la administración de riesgos.
- Definir el enfoque, con criterios para eliminar o reducir riesgos.
- Listar los riesgos y proponer alternativas de control
- Generar recomendaciones de las medidas de control para la atención de riesgos.
- Presentar conclusiones de la evaluación costo beneficio de las medidas de control.

- Elegir las medidas de control conforme a su viabilidad.
- Disponer de recursos para la implementación de medidas de control a efectuar.
- Contener las fechas de programación e instauración del sistema de administración de riesgos.
- Establecer la realización de las evaluaciones de seguridad necesarias antes de la implementación de las medidas de control
- Determinar la vigilancia del cumplimiento del programa para el manejo del riesgo, con las medidas de control seleccionadas.
- Prever la reevaluación de los riesgos, luego de aplicar las medidas de control.

Adicionalmente, ofrece una guía de referencia con diversas técnicas de evaluación de riesgos en las diferentes etapas del análisis de riesgos del proceso, que pueden ser aplicadas en el centro de trabajo. Las técnicas mencionadas son Lista de revisión, Revisión de Seguridad, clasificación para la Jerarquización (por ejemplo, Índice Dow y Mond), Análisis de peligros, ¿Qué pasa si?, Análisis de peligros y operabilidad, Método de fallas y efectos, Árbol de fallas, Árbol de eventos, Análisis de causa consecuencia y Error humano.

La vigilancia del cumplimiento de la norma corresponde a la Secretaría del Trabajo y Previsión Social. Sin embargo, se estipula que el patrón tendrá la opción de contratar una unidad de verificación acreditada y aprobada para verificar el cumplimiento. La norma proporciona el procedimiento para la evaluación de la conformidad en un apartado específico.

## **2.2 Estándares voluntarios**

### **2.2.1 Gestión del riesgo (ISO 31000)**

La Organización Internacional de Normalización (ISO por sus siglas en inglés) es una federación mundial de organismos nacionales de normalización (organismos miembros de ISO) que se dedica a la publicación de normas de aplicación voluntaria, orientadas a la gestión de una empresa en distintos ámbitos. Entre las normas más conocidas, se encuentra la ISO 31000 enfocada en gestión del riesgo.

El documento proporciona directrices para gestionar el riesgo al que se enfrentan las organizaciones. La aplicación de estas directrices puede adaptarse a cualquier organización y a su contexto, es decir, proporciona un enfoque común para gestionar cualquier tipo de riesgo y no es específico de una industria o sector. También, puede utilizarse a lo largo de la vida de la organización y puede aplicarse en la toma de decisiones en todos los niveles (ISO, 2018).

La ISO 31000 (2018) propone que la gestión del riesgo eficaz requiere de los siguientes principios:

- Integración: la gestión del riesgo es parte integral de todas las actividades de la organización.
- Estructurada y exhaustiva: un enfoque estructurado y exhaustivo hacia la gestión del riesgo contribuye a resultados coherentes y comparables.
- Adaptada: el marco de referencia y el proceso de la gestión del riesgo se adaptan y son proporcionales a los contextos externo e interno de la organización relacionados con sus objetivos.
- Inclusiva: la participación apropiada y oportuna de las partes interesadas permite que se consideren su conocimiento, puntos de vista y percepciones. Esto resulta en una mayor toma de conciencia y una gestión de riesgo informada.
- Dinámica: los riesgos pueden aparecer, cambiar o desaparecer con los cambios de los contextos externo e interno de la organización. La gestión del riesgo anticipa, detecta, reconoce y responde a esos cambios y eventos de una manera apropiada y oportuna.
- Mejor información disponible: las entradas a la gestión del riesgo se basan en información histórica y actualizada, así como en expectativas. La gestión del riesgo tiene en cuenta explícitamente cualquier limitación e incertidumbre asociada con tal información y expectativas. La información debería ser oportuna, clara y disponible para las partes interesadas pertinentes.

- Factores humanos y culturales: el comportamiento y la cultura influyen considerablemente en todos los aspectos de la gestión del riesgo en todos los niveles y etapas.
- Mejora continua: la gestión del riesgo mejora continuamente mediante aprendizaje y experiencia.

La versión más reciente de esta norma fue publicada en el 2018, sustituyendo a la versión del 2009. Los principales cambios en relación a la edición anterior son: a) La revisión de los principios de la gestión del riesgo, b) Se destaca el liderazgo de la alta dirección y la integración de la gestión del riesgo, comenzando con la gobernanza de la organización, c) Aumenta el énfasis en la naturaleza iterativa del proceso, d) Se simplifica el contenido con un mayor enfoque en mantener un modelo de sistemas abiertos para adaptarse a múltiples necesidades y contextos (ISO, 2018).

Como se mencionó previamente, la norma ISO 31000 no es una regulación obligatoria desde el punto de vista legal, es decir, se puede aplicar de manera voluntaria para establecer coordinación entre diversos sectores ya que provee un marco de referencia y vocabulario común (Flaus, 2013). Sin embargo, la aplicación de normas ISO (de manera general) ofrece una serie de beneficios para las organizaciones.

Entre dichos beneficios se encuentran: a) Reconocimiento internacional, lo que permite operar y competir en mercados externos (Melo, 2020), b) Mejora de imagen ante los competidores en el mercado, es decir, los consumidores pueden confiar que los productos son seguros, confiables y de buena calidad; demuestra que la empresa cumple con requerimientos que cumplen la legislación internacional, c) Mejorar el desempeño de la organización ya que contienen directrices para optimizar la operación (Melo, 2020). Incluso, dado que las normas ISO son detalladas y exigentes, diversas autoridades y gobiernos las utilizan como base para desarrollar mejores regulaciones obligatorias en sus países.

### 2.2.2 Sistema de gestión de seguridad y salud ocupacional (OHSAS 18001)

La OHSAS 18001 (*Occupational Health and Safety Assessment Series*) fue publicada por primera vez en 1999 por la *British Standard Institution* (BSI) con la colaboración de diversas instituciones. En este estándar se especifican elementos mínimos para conformar un sistema eficaz de gestión de la seguridad y salud en el trabajo, incluyendo aspectos de la gestión de riesgo. Fue desarrollado para ser compatible con las normas sobre sistemas de gestión ISO 9001 sobre calidad e ISO 14001 sobre gestión ambiental y así, facilitar la integración de sistemas de gestión de calidad, ambiental junto con el de seguridad y salud en el trabajo (AENOR, 2007).

La segunda edición de este estándar se publicó en 2007 y reemplaza a la primera edición. A continuación, se mencionan algunas diferencias:

- Se enfatizó la importancia de la salud.
- Se actualizó para alinearse con la norma ISO 14001:2004 y se mejoró la compatibilidad con la norma ISO 9001:2000.
- Se modificaron definiciones como aquella del término “peligro”, se incluyó el término “accidente” en el término “incidente” y se sustituyó el término “riesgo tolerable” por “riesgo aceptable”.

La serie de normas OHSAS 18000 incluyen (Gómez, 2018):

- OHSAS 18001, donde se mencionan los requisitos para los sistemas de gestión de la seguridad y salud en el trabajo.
- OHSAS 18002, donde se mencionan las directrices para la implementación de OHSAS 18001.
- OHSAS 18003, donde se mencionan los criterios para los auditores.

El estándar se basa en la metodología Planificar-Hacer-Verificar-Actuar (PHVA), que consiste en:

- Planificar: en esta etapa se establecen los objetivos y procesos requeridos para conseguir resultados alineados con la política de seguridad y salud en el trabajo de la organización en cuestión.

- Hacer: en esta etapa se implementan los procesos.
- Verificar: en esta etapa, se lleva a cabo el seguimiento y medición de los procesos de acuerdo con lo establecido en la política de seguridad y salud en el trabajo, los objetivos, metas, requisitos legales y otros. También, se informa sobre los resultados.
- Actuar: en esta etapa se implementan acciones para la mejora continua del desempeño del sistema (Gómez, 2018).

La OSHAS 18001 se puede aplicar a cualquier organización que busque implementar, mantener y mejorar continuamente un sistema de gestión de seguridad y salud en el trabajo, que minimice los riesgos de su personal y/o asegurarse de la conformidad del sistema con su política previamente establecida.

A pesar de su compatibilidad, OHSAS no incluye requisitos específicos para otros sistemas de gestión, tales como aquellos dirigidos a la calidad, gestión ambiental, de seguridad o financiera. Su alcance no comprende el establecimiento de criterios de desempeño ni proporciona especificaciones detalladas para el diseño de un sistema de gestión de seguridad y salud en el trabajo (AENOR, 2007).

### 2.2.3 Sistema de gestión de seguridad y salud ocupacional (ISO 45001)

En 2018, la Organización Internacional de Normalización publicó el estándar ISO 45001 para reemplazar al OHSAS 18001, con el objetivo de proporcionar un marco de trabajo claro para la mejora de la seguridad y salud en el trabajo dentro de las organizaciones.

A continuación, se mencionan algunas diferencias encontradas en ISO 45001 respecto a OHSAS 18001 (Molé, 2018):

- En términos de estructura, cambia la forma en la que está organizado el estándar. Está basado en la Guía ISO 83 y sigue una estructura similar a otros sistemas de gestión, como la ISO 9001 e ISO 14001.
- En términos conceptuales, el cambio entre ambos estándares es el más significativo. La OSHAS 18001 se enfocaba en controlar los peligros, mientras que la ISO 45001 sigue un modelo dinámico de prevención que



considera que los riesgos se pueden presentar en todos los aspectos, desde la forma en la que el trabajo está organizado hasta situaciones que están fuera del control de la organización. Se enfoca en las áreas de oportunidad para mejorar, incluso en la ausencia de lesiones o enfermedades en el trabajo.

- En términos de los trabajadores, el nuevo estándar requiere que las organizaciones participen junto con los trabajadores, incluso aquellos que no están en puestos de liderazgo, y hagan consultas sobre diversos aspectos de la seguridad y salud ocupacional.
- ISO 45001 requiere que la seguridad y salud ocupacional sea una parte integral de la organización.

Para las organizaciones certificadas con OSHAS 18001, se consideran 3 años como plazo para hacer la migración al nuevo estándar y los esfuerzos para lograrlo involucran auditorías internas y externas para asegurar el funcionamiento del sistema de gestión (Molé, 2018).

## **CAPÍTULO 3. CASOS DE ESTUDIO EN EL PROCESO ENSEÑANZA-APRENDIZAJE**

### **3.1 Los casos de estudio como herramienta para la enseñanza práctica**

Se tienen registros que datan desde 1949 sobre el uso de los casos de estudio como herramienta para la enseñanza de la ciencia. El profesor James B. Conant de la Universidad de Harvard organizó un curso completo con este método (Freeman, 2006a). En contraste, en facultades de negocios o leyes existe una larga tradición de la utilización de historias, ya sean reales o inventadas, para formar a sus estudiantes. Así, Freeman (2006a), define a un caso de estudio como una historia con un mensaje educativo.

La meta de la enseñanza con el método de casos no es precisamente el enseñar sobre el contenido científico (aunque sí sucede), sino enseñar cómo funciona el proceso científico y desarrollar habilidades de aprendizaje de mayor orden, es decir, enfocarse más en la comprensión, aplicación, análisis, síntesis y evaluación (Freeman, 2006a).

Por otro lado, los casos parecen idealmente aplicables para ilustrar la relevancia de la ciencia en la sociedad (Freeman, 2006a), y para el caso particular de nuestro trabajo, se ilustra la relevancia del análisis de riesgo en el actuar del Ingeniero Químico en el entorno productivo. Por tal motivo, este método resulta adecuado para el formato de aprendizaje colaborativo/cooperativo en grupos pequeños, pero pueden ser fácilmente utilizados en clases grandes de discusión (Freeman, 2006a).

Los casos de estudio pueden desarrollarse por completo o extraerlos de alguna fuente y editarse a conveniencia, es decir, que los casos pueden personalizarse de acuerdo con los objetivos del profesor. Freeman (2006a) menciona la siguiente clasificación para casos de estudio:

- a) Decisión o dilema. Presentan problemas o decisiones que necesitan desarrollarse por un personaje central en la trama. El caso usualmente consiste en un pequeño párrafo introductorio que fija el problema a considerar y puede introducir al personaje que tiene que tomar decisiones en el momento de crisis.

Una sección de antecedentes ofrece la información histórica necesaria para entender la situación. Una sección narrativa presenta los eventos que llevan hasta la crisis que el protagonista tiene que enfrentar. Se pueden agregar apéndices con tablas, gráficas o documentos que ayuden a establecer las bases para dar solución al problema.

- b) Casos de evaluación (*Issue cases*). Son utilizados para enseñarle a los estudiantes habilidades de análisis. El material se enfoca en contestar preguntas como “¿qué está pasando aquí?”. Frecuentemente la historia no tiene un protagonista y generalmente no demanda que los estudiantes tomen una decisión.
- c) Historias de casos. Son historias que ya sucedieron y generalmente son menos emocionantes que los casos de toma de decisión o de evaluación. Pueden servir como modelos ilustrativos de ciencia en acción. La ciencia está repleta de casos de este tipo.

Sin embargo, surge la duda, ¿Qué hace un buen caso de estudio? Freeman (2006c) señala que un buen caso debe contar una historia enfocada en un problema relevante y reciente (menor a 5 años de antigüedad), que al mismo tiempo despierte el interés y estimule el conflicto. Debe ser breve para mantener la atención del lector, presentarse con una narración que permita sentir empatía con los protagonistas e, incluso, contenga citas o diálogos para enfatizar el realismo, además de tener utilidad pedagógica, en la que su aplicación pueda generalizarse a otros conflictos y, por lo tanto, conduzca al estudiante a tomar decisiones.

En ese sentido, la utilidad pedagógica está definida por los objetivos a lograr con la implementación de casos de estudio en el aula. El profesor puede utilizar múltiples métodos de enseñanza. Sin embargo, el formato de la clase no es compatible con todos los métodos. Freeman (2006b), identifica cuatro tipos de formatos donde la principal diferencia entre ellos es el rol de los estudiantes y profesor en el análisis del caso. En el trabajo individual, la responsabilidad del análisis recae en el alumno; en la clase o conferencia, la responsabilidad es del maestro; en la discusión se requiere la colaboración de ambos, sin embargo, el profesor es quién guía el

análisis; en las actividades en grupos pequeños los estudiantes son quienes tienen mayormente el control del análisis.

En la Tabla 3, se presentan algunos formatos recomendados para diferentes métodos de enseñanza.

**Tabla 3.** *Compatibilidad de los métodos de enseñanza con el formato de clase. Extraído y modificado de Freeman (2006b).*

Método de enseñanza	Trabajo individual	Clase o Conferencia	Discusión	Actividades en grupos pequeños.
Tesis	X			
Trabajo semestral/cuatrimestral	X			
Teoría		X		
Contar anécdotas		X		
Simposio			X	
Juicio			X	
Audiencia pública			X	
Debate (juego de roles)				X
Casos con artículos científicos				X
Aprendizaje basado en problemas				X
Presentación de carteles				X
Revisión de libros/artículos	X	X	X	X
Diálogo	X	X	X	X

### 3.2 Los retos de la enseñanza del análisis de riesgo en el aula

La enseñanza de cualquier tipo de carrera universitaria tiene como objetivo el formar profesionales en el área de interés que cuenten con un perfil de conocimientos,

habilidades y actitudes que los haga competitivos para poder integrarse al entorno productivo. A su vez, los empleadores esperan de los egresados que tengan un conjunto de conocimientos básicos, que puedan integrarlos y aplicarlos en la resolución de problemas y situaciones reales, además de un conjunto de habilidades sociales, actitudes e inteligencia emocional.

En el caso específico de la Ingeniería Química, estos conocimientos básicos están en las áreas de química, matemáticas, economía, diseño, entre otros (Anaya, 1998). La Facultad de Química (s.f.) de la UNAM menciona que un Ingeniero Químico tiene actitud crítica, capaz de participar en la concepción, diseño, construcción, operación y administración de plantas de proceso. En adición, posee una formación básica sólida enfocada en aspectos fundamentales de la disciplina y aplicaciones relevantes. Por lo tanto, las características de la formación del Ingeniero Químico le permiten desenvolverse en un ambiente multidisciplinario con diversos profesionales (Anaya, 1998).

Sin embargo, es de mencionarse que dentro del equilibrio de conocimientos, habilidades y actitudes que constituyen los elementos de la formación integral, en la enseñanza tradicional se le ha proporcionado un mayor énfasis a la impartición de conocimientos, prestando particular atención al desarrollo de la habilidad de memorización, tanto de algunos aspectos trascendentales y fundamentales, como mayormente de información irrelevante, trivial e innecesaria para su retención. Dado que actualmente el principal obstáculo no es la disponibilidad de información, sino cómo se recurre a ella y se aprovecha, el razonamiento, análisis y síntesis, entre otros se vuelven esenciales (Anaya, 1998).

Anaya (1998), identifica dos retos a superar en la enseñanza de la Ingeniería Química:

- 1) La amplitud de los conocimientos a impartir y
- 2) La integración de conocimientos.

El primero recae en la existencia de un criterio de selectividad para procurar que lo esencial sea enfatizado dado lo vasto del currículo. El segundo, por otro lado, nos

habla de la dificultad que tienen los estudiantes para poder utilizar todo lo aprendido en aula y resolver problemas reales que se le presenten en el ejercicio de su profesión. Es precisamente este último punto que se busca resolver y/o mejorar al introducir el estudio de casos reales como una herramienta de aprendizaje.

En resumidas cuentas, es pertinente enfatizar que la enseñanza de habilidades, más allá de los conocimientos, debe formar parte de la técnica didáctica del profesor, el cual se desea dedique tiempo suficiente para dicho propósito fundamental y no para sólo cumplir con el programa de la asignatura. La estimulación del alumno es clave para que desarrolle el pensamiento crítico, aportando nuevas ideas, soluciones, aplicaciones y se vuelva diestro en el uso de las fuentes de información (Anaya, 1998).

### **3.3 Evidencias del impacto de los estudios de caso en la enseñanza**

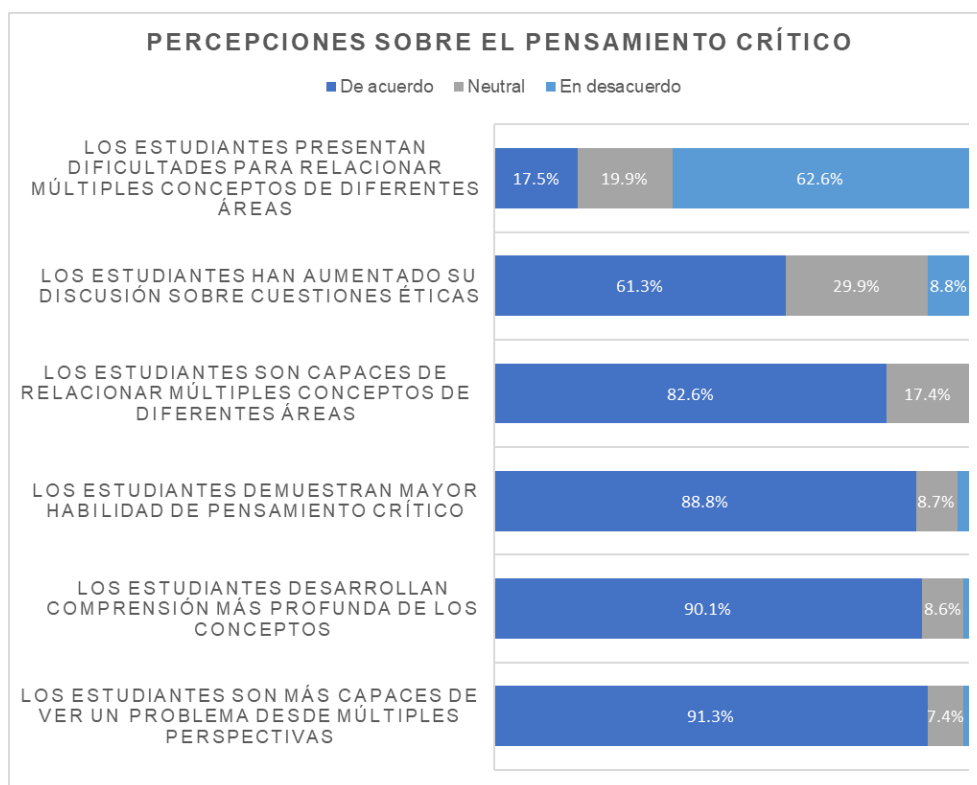
La medición de los efectos producidos por el uso de casos de estudio en el aula presenta dificultades, pues se tienen que desarrollar instrumentos que muchas veces son de carácter cualitativo. La percepción del personal educativo que integra este método a sus aulas es clave para poder identificar los beneficios y obstáculos que representa, tanto para los alumnos como profesores. En este sentido, Yadav et al. (2007) desarrollaron una encuesta para recabar información sobre el impacto de los estudios de caso en la enseñanza a nivel superior.

La encuesta se realizó vía correo electrónico a 101 profesores de ciencias ubicados en 23 estados de Estados Unidos y Canadá que habían asistido previamente a una serie de seminarios y/o conferencias sobre el tema. Se evaluó la percepción de los profesores sobre el aprendizaje del alumno en A) Pensamiento Crítico, B) Aprendizaje y C) Participación. El estudio presentado es de carácter cualitativo y se aplicó a una población pequeña en países extranjeros. No obstante, ofrece un buen referente sobre la aplicación auténtica del método en el aula y lo que conlleva.

#### **3.3.1 Pensamiento Crítico**

De manera general, se reportan impactos positivos en los estudiantes (Gráfico 1). Se percibe que los conceptos revisados en clase se comprenden en mayor

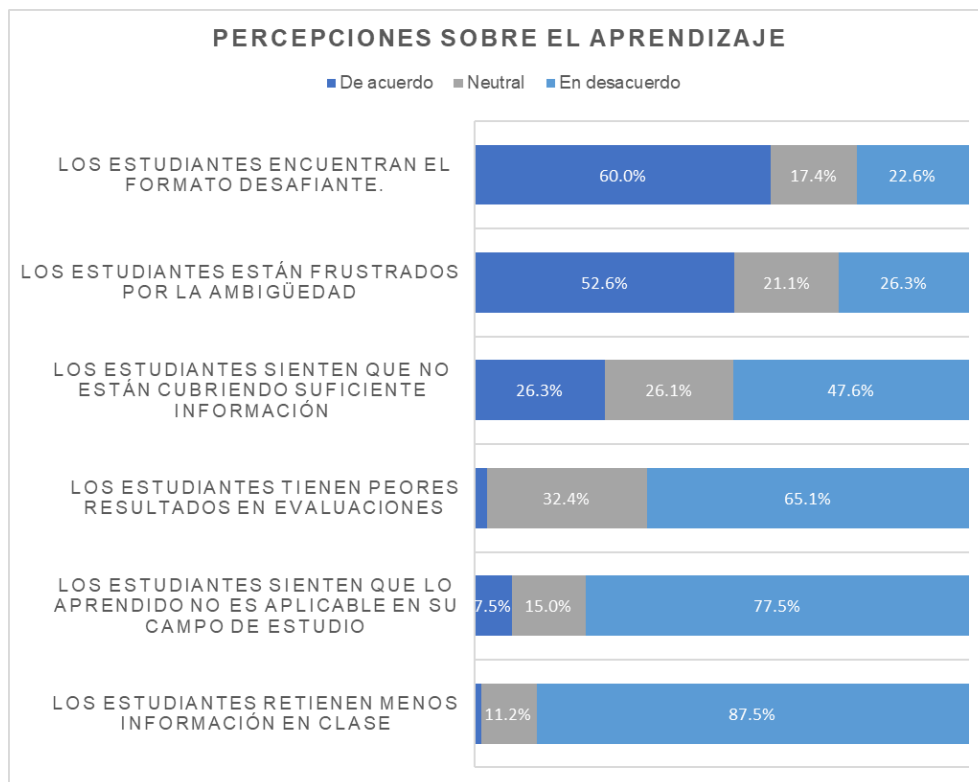
profundidad, al mismo tiempo que se relacionan entre sí con más facilidad. Los estudiantes muestran una mayor habilidad de aproximarse a una situación desde diferentes perspectivas, cuestionar decisiones y discutir aspectos éticos relacionados con problemas científicos.



**Gráfico 1.** Percepción del impacto de estudios de caso en el pensamiento crítico de los estudiantes.

### 3.3.2 Aprendizaje

En el Gráfico 2, se muestran que los estudiantes se sienten desafiados por el cambio de método e incluso hay frustración al respecto. Sin embargo, las evaluaciones no evidencian resultados negativos, se percibe que los estudiantes no retienen menos información y que esta es relevante para su campo de acción.

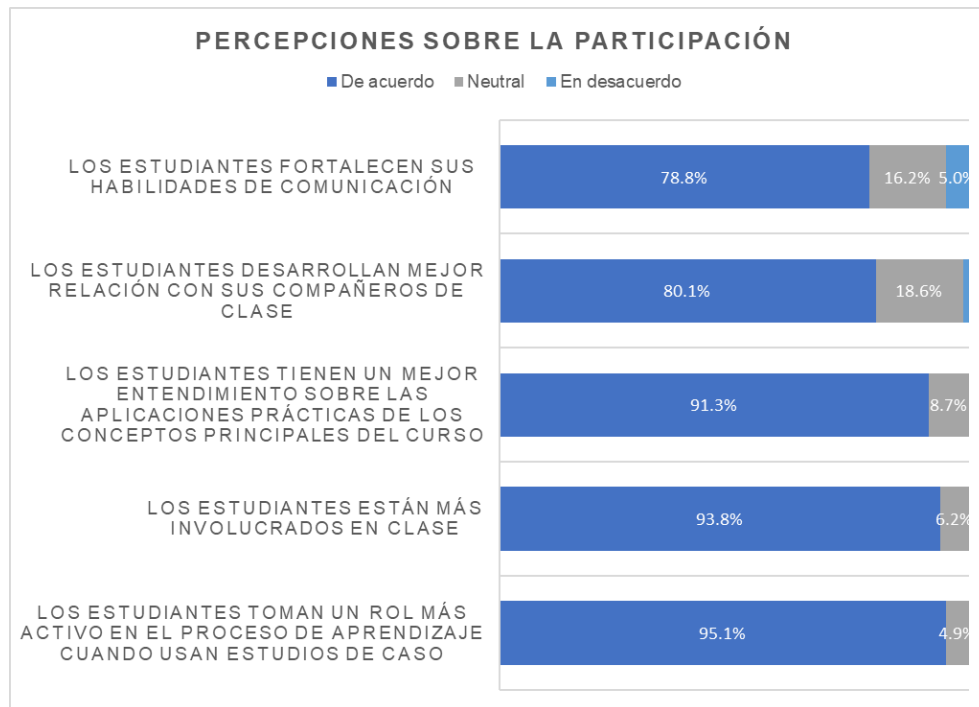


**Gráfico 2.** Percepción del impacto de estudios de caso en el aprendizaje de los estudiantes.

### 3.3.3 Participación

En cuanto a la participación (Gráfico 3), se percibe que los estudiantes tienen un rol más activo durante la clase y logran un mejor entendimiento de las aplicaciones prácticas de los conceptos. De manera general, su habilidad de comunicación en clase y entre compañeros se ve favorecida.





**Gráfico 3.** Percepción del impacto de estudios de caso en la participación de los estudiantes.

En resumen, Yadav et al. (2007) concluye que los profesores identifican que los estudiantes se involucran más en el proceso enseñanza-aprendizaje, mejoran sus habilidades de comunicación y pensamiento crítico, entienden con mayor profundidad los conceptos y cómo se relacionan entre ellos.

La falta de casos de estudio relevantes es entendible dado que su uso no es precisamente popular en la actualidad para que existan suficientes bancos o fuentes de información. En ese sentido, mientras más se implemente el método, los estudiantes se encontrarán más familiarizados y, por lo tanto, menor resistencia habrá. Los recursos para evaluar a los estudiantes que se usan comúnmente no cubren las necesidades de esta metodología y sin duda se requiere investigación pedagógica en este tema para crear o adaptar las herramientas. También, resulta importante mencionar que es imperativo que los profesores dediquen tiempo suficiente para preparar el material. La introducción satisfactoria de los estudios de caso al aula es clave para que los alumnos se involucren. El éxito de la metodología depende, entre otros factores, del compromiso del profesor para estimular al estudiante.

Por último, después de revisar los antecedentes del tema consideramos que, es relevante no perder de vista que nos enfrentamos a un cambio de metodología de enseñanza. Este proceso puede resultar complejo para estudiantes de licenciatura que llevan, para este punto de sus trayectorias educativas, aproximadamente 15 años realizando las mismas dinámicas en el aula y, por lo tanto, están sumamente acostumbrados a ellas.

### **3.4 Elementos básicos que integran el estudio de casos**

La introducción de los casos de estudio al aula es sumamente importante. En esta sección se muestran dos esquematizaciones de protocolos enfocados a profesores y alumnos (Esquema 1 y Esquema 2, respectivamente), que incluyen los elementos básicos para el estudio de casos. Para la elaboración de la propuesta de protocolo se tomó como base el trabajo de Minniti et al. (2017), con las adaptaciones que para nuestro caso consideramos pertinentes.

Para el profesor, la mayor carga de trabajo recae en la preparación del ejercicio. El primer paso es la identificación de los objetivos curriculares, es decir, contestar la pregunta “¿qué se quiere enseñar de acuerdo con lo que especifica el plan de estudios?”. A partir de ello, se selecciona un evento o problema que resulte relevante para lo que se quiere enseñar y, preferentemente, sea reciente. Sin embargo, el evento o problema debe adecuarse a los objetivos curriculares y limitaciones en el aula como el tiempo, herramientas y/o materiales disponibles. De acuerdo con el criterio del profesor(a) se crea el caso de estudio base y se definen las variables a modificar para crear una colección, fomentando así el análisis de información. El profesor deberá recolectar la información pertinente y suficiente para que el alumno comprenda el caso de estudio y, por lo tanto, plantee una resolución y/o debate. En cuanto al proceso de preparación del ejercicio, la última etapa consiste en la estructuración de la clase. Es precisamente en esta etapa donde resulta crucial que el profesor dedique suficiente tiempo para elaborar un plan de trabajo. Se sugieren las siguientes preguntas guía:

- ¿Cómo se va a introducir el estudio de casos?
- ¿Qué herramientas se les proporcionarán?

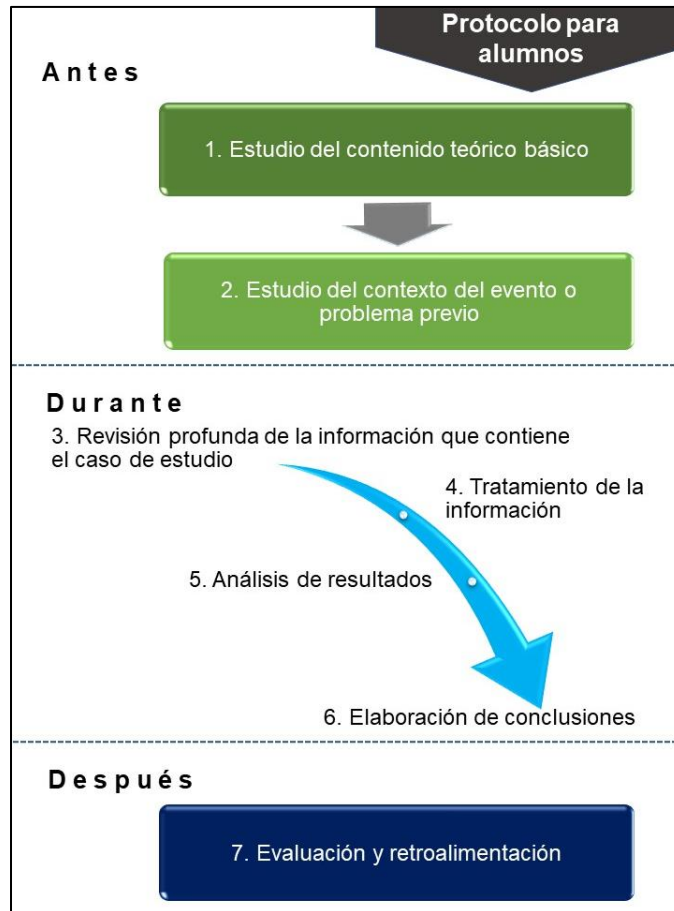
- ¿Cuál es el tiempo dedicado a cada actividad?
- ¿Cuál es la dinámica a seguir en el aula (trabajo en equipos, debate, etc.)?
- ¿Cómo se evaluará el desempeño de los alumnos?



*Esquema 1. Protocolo para profesores.*

Durante el desarrollo del ejercicio en el aula, el profesor cambia el rol de ponente para convertirse en guía para los alumnos, asegurándose que el rumbo propuesto y tiempos de clase se cumplan. Una vez que concluye el ejercicio, se procede a evaluar el desempeño de los alumnos y a tener una sesión de retroalimentación para enriquecer futuros ejercicios.

Los alumnos, por su parte, concentran la carga de trabajo durante el desarrollo del ejercicio. Las actividades previas consisten en el estudio de la teoría, conceptos y relaciones básicas bajo el marco del plan de estudios vigente de la asignatura, así como de una revisión del problema/evento con el objetivo de conocer su contexto.



**Esquema 2. Protocolo para alumnos.**

El desarrollo del ejercicio comienza con una revisión exhaustiva del estudio de caso que se les presenta para comprender cuál es el problema por resolver. En seguida se llevará a cabo el tratamiento de la información proporcionada a través de una herramienta, debate o alguna actividad propuesta. Los resultados obtenidos se analizan para dar solución al evento/problema, lo que representa un proceso donde se generan las relaciones entre conceptos teóricos, el evento/problema *per se*, sus resultados y el contexto en el que se llevó a cabo. La guía por parte del profesor en esta etapa es crucial, pues debe dirigirlos al objetivo académico. Por último, se elaboran las conclusiones.

Después el ejercicio se procede a una evaluación del desempeño, ya sea en forma de examen o reporte (por mencionar algunas opciones que entran en el esquema de enseñanza tradicional) y una sesión grupal de retroalimentación.

El protocolo para profesores (Esquema 1) mostrado en esta sección se retoma posteriormente en el desarrollo de la metodología de este trabajo, la cual se enfoca en detallar el proceso de preparación y diseño de los casos de estudio. Asimismo, se describen los criterios utilizados.

## **CAPÍTULO 4. MODELOS DE SIMULACIÓN PARA ANÁLISIS DE RIESGO**

Tanto en el manejo de sustancias químicas peligrosas como la emisión de contaminantes representan una amenaza latente en términos de riesgo, pues en caso de un accidente, las consecuencias pueden afectar severamente la salud, el ambiente o incluso provocar la muerte. Por ello, las industrias y entidades gubernamentales se preocupan particularmente en escenarios que involucren liberación de líquidos, vapores y/o gases que puedan dar lugar a un incendio, explosión o la formación de una nube tóxica. Por tal motivo, la estimación de radios de afectación y magnitud de los daños potenciales resulta primordial para visualizar anticipadamente este tipo de situaciones, lo cual se realiza a través de programas o modelos de simulación (CENAPRED, 2014).

Los programas de simulación funcionan a través de modelos que permiten reproducir y evaluar las condiciones en las que se presenta un accidente y así, predecir el comportamiento de los materiales peligrosos involucrados. El manejo de dichos recursos informáticos requiere del conocimiento y capacitación especializada para poder interpretar, analizar y aplicar los criterios pertinentes a los resultados arrojados para cada simulación. Los modelos fueron desarrollados y dirigidos para profesionistas involucrados en la atención de emergencias y estudios de riesgo (CENAPRED, 2014).

Para el desarrollo de este trabajo se utilizó un software de acceso gratuito llamado ALOHA y una segunda opción cuya licencia tiene costo, llamado SCRI-Modelos. Cabe mencionar que, en el mercado se encuentran disponibles diferentes alternativas similares como PHAST y KORA.

A continuación, se resumen las características principales de los programas.

### **4.1 ALOHA**

ALOHA (*Areal Locations of Hazardous Atmospheres*, por sus siglas en inglés) es un programa computarizado desarrollado por las entidades estadounidenses NOAA (*National Oceanic & Atmospheric Administration*, por sus siglas en inglés) y EPA,

diseñado específicamente para el uso de personal que responde a accidentes químicos, así como para el entrenamiento en la atención de emergencias. ALOHA es un modelo de dispersión aérea que puede predecir las tasas a las cuales los vapores químicos pueden escapar a la atmósfera desde tuberías colapsadas o fracturadas, fugas de tanques y charcos en evaporación. Su base de datos solo contiene sustancias puras y permite modelar soluciones de amoníaco, ácido clorhídrico, ácido fluorhídrico, ácido nítrico y ácido sulfúrico fumante. Por lo tanto, puede predecir cómo se dispersará una nube en la atmósfera después de una emisión accidental de gas peligroso (EPA y NOAA, 1998).

El programa es de ejecución rápida en equipo de cómputo básicos (PC o Mac). La versión 5.4.7 fue lanzada en septiembre del 2016 y se encuentra disponible para descargar gratuitamente en internet en <https://www.epa.gov/cameo/aloha-software>. ALOHA contiene en su base de datos propiedades físicas de alrededor de 900 sustancias químicas peligrosas comunes (EPA y NOAA, 1998).

Su diseño es amigable para el usuario con el fin de operarse en situaciones bajo presión y se busca minimizar al máximo el error del operador; mediante una serie de ventanas de diálogos, se solicita a los usuarios ingresen información sobre el escenario como condiciones meteorológicas, sustancia química, tipo de fuga, entre otros. El programa revisa la información que se le introduce y avisa cuando se comente un error. Los cálculos resultantes se resumen en una ventana que contiene solo texto. Por último, los usuarios pueden mostrar una variedad de resultados gráficos (EPA y NOAA, 2016).

Entre las funciones más importantes que ofrece el software ALOHA se encuentran:

- Genera una variedad de información de escenarios específicos incluyendo imágenes de la zona de peligro, amenazas en lugares específicos y gráficas sobre la fuerza de la fuente.
- Calcula qué tan rápido escapan los químicos de tanques, charcos, tuberías y predice como la velocidad de descarga varía con respecto al tiempo.
- Modela diversos escenarios de fuga: nubes de gases tóxicos, BLEVEs (*Boiling Liquid Expanding Vapor Explosions*), dardo de fuego (*jet fire*),

explosión de nubes de vapor (*vapor cloud explosions*) e incendios en líquidos (*pool fire*).

- Evalúa diferentes tipos de peligros (dependiendo del escenario de fuga: toxicidad, flamabilidad, radiación térmica y aumento de presión.
- Modela la dispersión atmosférica de derrames químicos en agua.

Como cualquier modelo, los resultados que arroja el ALOHA dependen de que tan precisa es la información que se le suministra. Un aspecto por considerar es que los resultados pueden ser poco fiables si se trabaja en las siguientes condiciones:

- Velocidades de viento muy bajas.
- Condiciones atmosféricas muy estables.
- Cambios de viento y efectos de conducción del terreno.
- Desigualdad de concentración, particularmente cerca de la fuente del derrame.

Asimismo, ALOHA no ofrece información sobre los efectos de:

- Incendios o reacciones químicas.
- Particulados.
- Topografía.

#### **4.2 SCRI - Modelos**

SCRI (Simulación de Contaminación y Riesgos en Industrias) es un programa comercial de simulación de contaminación y riesgos para el sector industrial, desarrollado por la compañía *Dinámica Heurística* y ampliamente utilizado en instituciones gubernamentales, industriales y educativas. El SCRI-Modelos es un conjunto de herramientas, parte de la sección de Análisis de Consecuencias que permite simular los siguientes modelos atmosféricos:

- Emisiones Continuas Puntuales (Chimeneas) y de Áreas.
- Derrames con evaporación a nivel de suelo (Continuos y finitos).
- Chorro horizontal elevado (Continuos y finitos).
- Chorro vertical elevado o chimenea (Continuos y finitos).



- Emisión instantánea de una fuente de área (Instantáneos).
- Nubes explosivas.

Con estos modelos se pueden simular escenarios de afectación bajo diferentes condiciones de fugas, derrames o emisiones continuas, en diversos escenarios meteorológicos para efectuar estudios de impacto ambiental, diseño de plantas e instalaciones industriales, y apoyar en la capacitación y entrenamiento de personal en el manejo de situaciones de emergencia (Dinámica Heurística, 2021). Su base de datos contiene sustancias puras y algunas mezclas específicas, por ejemplo, Ciclotol (RDX-TNT) o bromuro de metilo con cloropicrina.

Los modelos de tipo Gaussiano permiten obtener estimaciones de concentraciones en el aire considerando condiciones particulares de emisión y estabilidad atmosférica. Por otro lado, el modelo para daños por explosiones estima un equivalente en masa de TNT y simula la generación de ondas de expansión (CENAPRED, 2014).

Para la simulación con modelos gaussianos, debe considerarse la presencia de fuentes múltiples (tanto puntuales como de áreas), tipo de terreno (áreas rurales o urbanas, con elevaciones o planos), tiempos promedios de 1 hora hasta 1 año y alturas de mezclado. En contraste, para el modelo de nubes explosivas deben considerarse la posibilidad de simular detonaciones de explosivos líquidos o sólidos, que el cálculo de formación de nube explosiva y la equivalencia de la nube explosiva a TNT se hace de manera separada y la conversión de unidades inglesas a métricas (CENAPRED, 2014).

### **4.3 PHAST**

PHAST (*Process Hazard Analysis Software Tool*, por sus siglas en inglés) es un programa de análisis de riesgo diseñado por la compañía DNV (*Det Norske Veritas*) para todas las etapas del diseño de procesos y operación industrial. Entre las industrias que utilizan PHAST con mayor frecuencia se encuentran: petroquímica, gas y petróleo, química, autoridades gubernamentales y de regulación, servicios de consultoría y diseño, aseguradoras e instituciones académicas (DNV, 2018).

La plataforma que ofrece es amigable con el usuario pues tiene amplia capacidad de modelado para análisis de riesgo, es compatible con procesadores de texto, bases de datos y hojas de cálculo de uso común, su interfaz es similar a la que presenta el sistema operativo Windows y cuenta con soporte técnico. Su base de datos es extensa y ofrece facilidades para modelar accidentes donde se involucren mezclas.

PHAST ofrece simulaciones de:

- La descarga de mezclas y componentes puros de tuberías, fugas, rupturas catastróficas, válvulas de alivio, colapso del techo de tanques, liberación a la atmósfera por pérdida de contenedores, entre otros.
- Dispersión de fases jet, pesadas y pasivas, difusión por viento/gravedad, flotabilidad, interacción con el sustrato, plumas, formación de gotas y lluvia.
- Otro tipo de escenarios como esparcimiento y vaporización de piscinas, análisis en interiores y exteriores de los efectos tóxicos a favor de viento; radiación, incendio y explosión (dardos de fuego, fuego en piscinas, bola de fuego, entre otros).

Entre los beneficios que ofrece se encuentran:

- Provee ilustraciones claras de los resultados que se pueden obtener del escenario de riesgo. Toma en cuenta la superficie y puede presentar resultados en 3D.
- Permite una respuesta más eficaz a incidentes peligrosos debido a la comprensión de los posibles resultados.
- Continuamente se actualiza para incorporar las experiencias, avances y conocimientos adquiridos en la industria en la tecnología de modelado de consecuencias.
- Facilita la reducción de costos en términos de pérdidas y seguros.
- Garantiza que la optimización de plantas y diseño de procesos se realice de forma segura.

Sin embargo, una de las principales desventajas que presenta es el elevado costo de la licencia de uso (Lee et al., 2018). Por lo tanto, a nivel académico resulta poco accesible. El modelo de simulación está principalmente enfocado para uso comercial en grandes empresas e industrias.

#### **4.4 KORA**

KORA (*Korea Off-site Risk Assessment*, por sus siglas en inglés) es un programa de simulación desarrollado en Corea por el Ministerio de Ambiente desde el 2015. y aplicado a nivel nacional luego de la introducción del Acto de Control de Químicos en dicho país (Ahn et al., 2020). El gobierno lo distribuye de manera gratuita y su objetivo es apoyar el cumplimiento de las regulaciones legales vigentes. Debido a las constantes actualizaciones y el endurecimiento de las leyes sobre manejo de químicos, la herramienta se encuentra en mejora continua (Lee et al., 2019).

Está basado en un modelo Gaussiano y es capaz de calcular el radio de daños químicos causados por fugas de materiales tóxicos y explosiones, incluyendo fugas de soluciones acuosas. Recientemente, se añadió la función de derivar la distancia del daño a través del cálculo de la presión de vapor de la solución acuosa (Lee et al., 2018). En términos generales, arroja resultados de manera rápida y puede aplicarse para la gestión de seguridad del proceso (*Process Safety Management* o PSM, por sus siglas en inglés) y la planeación de gestión de riesgos (*Risk Management Plan* o RMP, por sus siglas en inglés) (Ahn et al., 2020).

Entre sus desventajas encontramos que, se modela con valores anuales promedio de parámetros meteorológico. Esto es clave en un país como Corea donde las condiciones fluctúan de manera estacional, así que la confiabilidad de los resultados se ve impactada (Lee et al., 2018). Por otro lado, en KORA es imposible calcular la distribución de concentraciones en tres dimensiones, modelar mezclas de sustancias y no tiene modelos para simular fugas de tuberías (Ahn et al., 2020).

## **CAPÍTULO 5. METODOLOGÍA**

La metodología desarrollada para el de diseño de los casos de estudio de nuestro trabajo, está constituido de 4 etapas, las cuales se describen de manera resumida en las siguientes secciones.

### **5.1 Selección del evento real**

Durante esta etapa se realizó una revisión de accidentes o incidentes reportados en diferentes medios como son informes oficiales, artículos de prensa, medios noticiosos, entre otros. Los criterios utilizados para seleccionar el evento real son la relevancia (contexto en el que sucedió), material peligroso involucrado (para efectos del objetivo académico), fecha de ocurrencia (¿qué tan reciente es?), zona geográfica (nacional o internacional), etc.

### **5.2 Selección del material**

Comúnmente, los accidentes involucran más de una sustancia química peligrosa a la vez, e incluso mezclas complejas, debido a la naturaleza de los procesos industriales y esto, a su vez, eleva la dificultad del análisis de riesgo. Además, de acuerdo con el modelo de simulación se pueden presentar limitaciones. Por lo tanto, durante esta etapa se hace la selección de un evento que involucre una única sustancia química peligrosa para enfocar el caso de estudio. Como uno de los criterios de selección que consideramos, es que el material sea de gran volumen de consumo a nivel industrial y que sus propiedades fisicoquímicas se adapten al objetivo del caso de estudio.

### **5.3 Definición de condiciones y parámetros**

Esta etapa consiste en la definición de los detalles que componen el evento seleccionado para así conformar un estudio de caso base. Uno de los primeros requisitos es que se tenga acceso a los datos necesarios que requiere nuestro simulador de eventos, tales como las condiciones meteorológicas (temperatura, humedad, dirección y velocidad del viento, entre otros), las características de almacenamiento de la sustancia química peligrosa, así como, la localización geográfica del acontecimiento.

#### **5.4 Selección de modelo de simulación**

La selección del modelo de simulación se llevó a cabo tomando como criterio principal la disponibilidad de los permisos de acceso, es decir, la licencia del software (si es de uso libre o requiere pago de derechos), y la capacidad de simulación de este (qué tipo de resultados ofrece). Debido a las limitaciones económicas que en muchas ocasiones se presentan en los entornos educativos, se prefiere el uso del modelo gratuito ALOHA. Con la finalidad de realizar un comparativo de los escenarios seleccionados, se consideró interesante elegir alguno de los estudios de caso para modelarse con el software con pago de derechos, tal como el SCRI-Modelos. En términos generales, los modelos de simulación elegidos tienen capacidad de simulación equiparable.

## CAPÍTULO 6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A continuación, se presentan los casos de estudio desarrollados bajo la metodología descrita en el capítulo anterior. Cada caso se enfoca una sustancia química peligrosa con propiedades inflamables, explosivas y corrosivas, respectivamente, y a través de ellos se analizan las características de los programas de simulación ALOHA y SCRI-Modelos.

En los anexos A, B y C se presenta una propuesta de formato para introducir a los estudiantes al contexto del problema, el caso de estudio y una herramienta para organizar la información proporcionada en relación con la interfaz del modelo de simulación seleccionado.

### 6.1 Inflamable

#### 6.1.1 Gasolina (Octano)

Petróleos Mexicanos, mejor conocido como PEMEX, es una de las compañías más importantes que operan en México y tiene una amplia infraestructura para la extracción, refinación y distribución de productos petroquímicos en el país. Una de las instalaciones de gran relevancia en la red de distribución es el ducto Tuxpan-Tula, el cual, comienza en Tuxpan, Veracruz, y atraviesa el estado de Puebla hasta llegar a la refinería “Miguel Hidalgo” ubicada en Tula, Hidalgo. A partir de ahí, se distribuye en varios ramales hacia otros destinos como el Valle de México y el Bajío. Tiene un diámetro aproximado de 36 pulgadas y una longitud de 287 kilómetros (Milenio Digital, 2019). El ducto Tuxpan-Tula pasa por el costado del municipio de Tlahuelilpan, ubicado aproximadamente a 100 km de la Ciudad de México, en el Estado de Hidalgo. A partir de esta instalación se desprende nuestro caso de estudio.

El robo de combustible, también conocido como “Huachicoleo”, desafortunadamente es una práctica común en México. La recopilación de Nájjar (2019b), menciona que se han identificado tres métodos para esta práctica:

1. Tomas clandestinas, que van desde estructuras permanentes hasta perforaciones improvisadas en los ductos.

2. A través de pipas o camiones cisterna, sucede directamente en los centros de distribución y
3. A través de barcos por vía marítima.

A este respecto, precisamente las perforaciones improvisadas representan un gran riesgo para la población y el entorno, ya que se llevan a cabo sin ningún tipo de medidas de seguridad, con técnicas y equipos inapropiados.

El caso se fundamenta en un evento real, ocurrido el 18 de Enero del 2019, causado por una fuga de combustibles debido a una toma clandestina en el ducto Tuxpan-Tula, a la altura del municipio de Tlahuelilpan, en Hidalgo. El material involucrado en el accidente fue gasolina (tipo premium según la clasificación de PEMEX) (AP News, 2019), la cual es una mezcla de hidrocarburos de aproximadamente cuatro a diez carbonos y su principal uso es como combustible en motores de combustión interna. Es un material extremadamente inflamable, puede incendiarse fácilmente a temperatura ambiente, sus vapores son más pesados que el aire, por lo que se acumula y dispersan a nivel de suelo (PEMEX, s.f.).

Para efecto de este caso, es necesario enfatizar que, una de las desventajas de ALOHA es la limitante para modelar mezclas de sustancias, como es el caso de la gasolina. Por lo que, para enmendar esta situación, se seleccionó el n-octano como sustancia representativa del comportamiento de la gasolina y, en el desarrollo de la simulación del caso, se consideran como el mismo material.

Con base en lo anterior y con la finalidad de presentar la información en forma de una historia/noticia, se describe el escenario denominado caso "Gasolina A":

*El 18 de enero del 2019, ocurrió un accidente en el municipio de Tlahuelilpan en Hidalgo. Algunas fuentes reportan que, alrededor de las 13:20 hrs se detectó una fuga en el ducto Tuxpan-Tula causada por una toma clandestina; el grupo de las fuerzas armadas encomendadas a atender el caso localizó el sitio exacto de la fuga a las 14:30 hrs. Dicho ducto inicia en Tuxpan, Veracruz y se extiende a los estados de Puebla e Hidalgo, tiene una longitud de 287 km y un diámetro aproximado de 36 pulgadas.*

*Al inicio del evento, se consideró como una fuga menor pero horas más tarde, la situación empeoró y debido a la presión con la que el material fugaba, la gasolina premium se derramaba asemejando una fuente o un géiser alcanzando los 6 metros de altura (AP News, 2019). Se calcula que la gasolina se liberó a una velocidad de 13.40 kg/s durante 60 minutos.*

*Siguiendo el protocolo, se procedió al cierre de la válvula del ducto a las 18:20 hrs del mismo día; esto no significó que la fuga se detuviera al instante pues había combustible remanente en el ducto continuaba escapando.*

*No obstante, en el transcurso de la tarde, algunos habitantes de la zona se reunieron para recolectar el combustible que se derramaba, generando una multitud alrededor de la fuga (diversas fuentes reportan que se encontraban entre 600 y 800 personas en los alrededores). Los reportes señalan que sólo se encontraban 25 elementos del ejército, por lo que fue imposible contener a la multitud.*

*En el sitio, la temperatura era de 15°C, la humedad relativa de 64%, nubosidad era media y el viento provenía del noroeste a 8.8 m/s. Alrededor de 8 minutos antes de las 19:00 hrs se generó una explosión y, en consecuencia, un incendio que se pudo controlar hasta la medianoche (Nájar, 2019a). En este accidente, fallecieron 91 personas, 52 resultaron heridas y 65 se declararon desaparecidas (BBC News, 2019). Se desconoce la causa exacta de la explosión.*

Para el desarrollo del caso de estudio, se establecieron los siguientes objetivos académicos:

1. Potenciar la habilidad para analizar la narrativa de una situación real e identificar parámetros críticos para la simulación de la fuga en los modelos disponibles.
2. Evaluar cómo afecta la fuente de fuga en los resultados obtenidos de una simulación.
3. Resaltar la importancia de los componentes culturales y sociales asociado a una práctica ilegal ligada a una situación de alto riesgo (en este caso, el robo



de combustible). Enfatizar que las situaciones de riesgo también consideran el factor humano y son dinámicas, es decir, cambian con el tiempo.

4. Ejemplificar cómo se puede utilizar el análisis de riesgo con casos documentados para realizar protocolos de prevención y atención de emergencias.

Por lo tanto, se propuso una variación al caso Gasolina A, la cual se modela con una fuente de fuga distinta (Tabla 4):

**Tabla 4.** Tipo de fuente de fuga para el caso Gasolina.

Caso	Tipo de fuente	Tipo de evento	Masa de sustancia liberada [kg]
Gasolina A	Directa	Líquido que se escapa y no está en llamas.	48,240
Gasolina B	Tanque	BLEVE ( <i>Boiling Liquid Expanding Vapour Explosion</i> )	48,240

Entre las fuentes de fuga que ofrece ALOHA se encuentra el tipo tubería. Sin embargo, sólo funciona para corrientes en estado gaseoso. La gasolina se encuentra en estado líquido dentro de la tubería por lo que se decidió utilizar dos tipos de fuentes distintas: Directa y Tanque. Este último se modeló como un tanque cilíndrico horizontal de 0.91 m de diámetro (36 pulgadas) y 122 m de longitud (400 ft) para asemejar la forma del ducto.

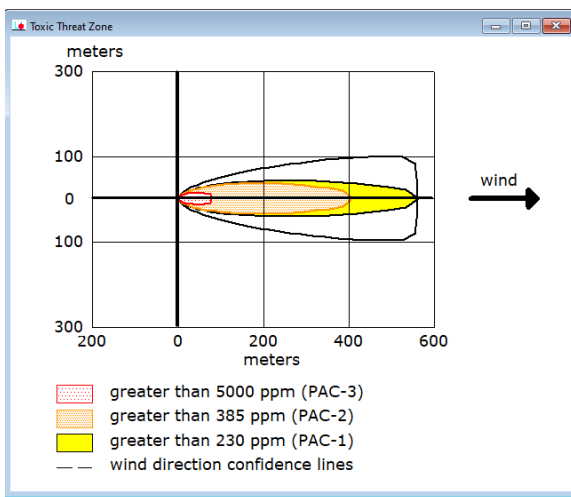
#### 6.1.1.1 Caso Gasolina A

La fuga de gasolina modelada como fuente directa ofrece dos gráficos sobre los efectos tóxicos y la zona inflamable, respectivamente. De acuerdo con el Gráfico 4, la nube tóxica en forma de pluma se desplazaría en dirección del viento hasta 565 m del origen, mientras que la zona inflamable (Gráfico 5) alcanzaría un máximo de 227 m desde el origen.

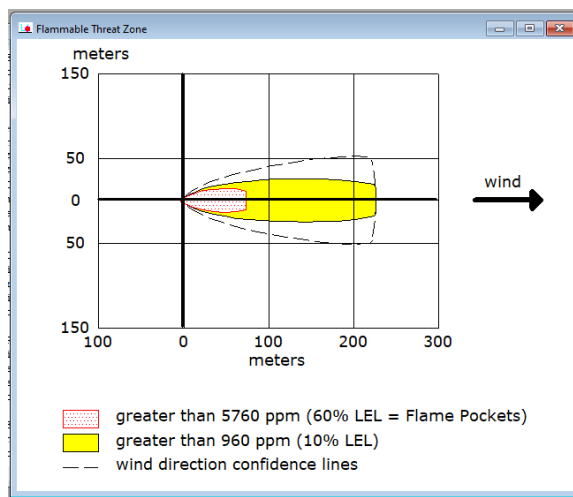
Si bien la zona tóxica es más amplia que la zona inflamable, es importante tener en cuenta que la gasolina es una mezcla altamente inflamable. Una pequeña fuente de

ignición puede provocar la iniciación de la combustión y, en ese escenario, la magnitud de la zona de radiación térmica es sumamente importante.

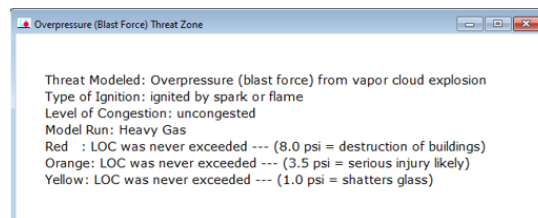
Esto último toma aún más relevancia si un grupo de personas se acerca a la zona para recolectar la gasolina que se derrama. Las condiciones cambiaban a través del tiempo (mayor concentración de vapores, cambios en la velocidad y dirección del viento, por mencionar algunos) y, al aumentar el número de personas en los alrededores, se agregaban más condiciones (por ejemplo, probables fuentes de ignición) que podrían resultar en una situación de riesgo. En otras palabras, a medida que más personas se acercaban, el peligro asociado a las propiedades de la gasolina y la acumulación de vapores se convertía en un riesgo de mayor magnitud con altas probabilidades de ocurrencia.



**Gráfico 4.** Zona tóxica para Gasolina A.



**Gráfico 5.** Zona inflamable para Gasolina A.

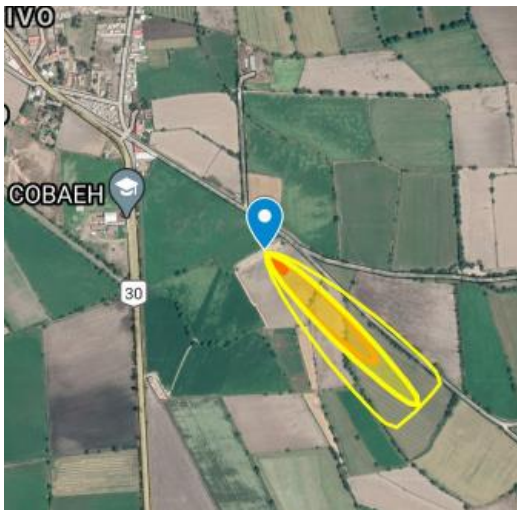


**Gráfico 6.** Fuerza de explosión para Gasolina A.

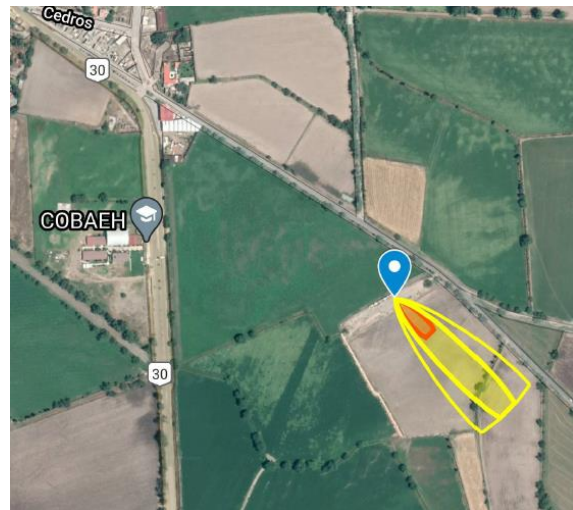
Sin embargo, debido a que el simulador toma en cuenta estas consideraciones, considera que encuentra en un área no congestionada, es decir, no se encuentran

obstáculos significativos para que aumente la turbulencia de la nube de vapor. Por lo tanto, ALOHA no arroja un gráfico (Gráfico 6) sobre la fuerza de la explosión ya que no se alcanzan los valores predeterminados LOC (*Level of Concern*).

En las Imágenes 1 y 2 se muestran las distintas zonas en el sitio de la fuga. La dirección del viento es fundamental para determinar el comportamiento de las nubes de gases en la atmósfera. En el caso Gasolina A no se proyectan hacia ninguna zona poblada, sin embargo, debe considerarse que la simulación se realizó con datos meteorológicos promedio y pueden ocurrir cambios inesperados en las corrientes de viento. El sitio donde ocurre el escenario se encuentra a las afueras del poblado de Tlahuelilpan, sin embargo, los vapores podrían llegar hasta las cercanías de una escuela o un área residencial. No obstante, es imprescindible que se impida el acceso a la población al área pues la probabilidad de ignición es sumamente alta.

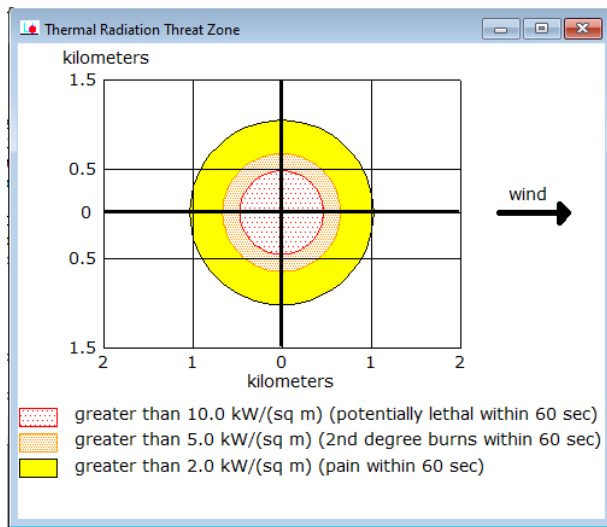


**Imagen 1.** Proyección de zona tóxica de caso Gasolina A.



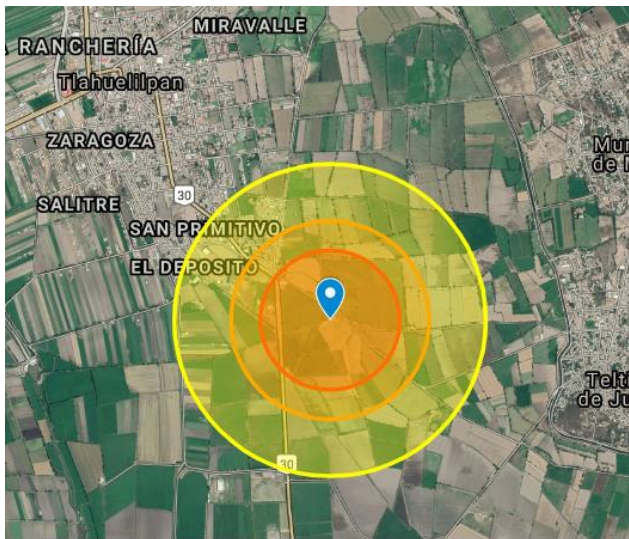
**Imagen 2.** Proyección de zona inflamable de caso Gasolina A.

### 6.1.1.2 Caso Gasolina B.



**Gráfico 7.** Zona de radiación térmica para caso Gasolina B.

incluso, en el área letal (roja) se encuentran algunas escuelas y predios residenciales.



**Imagen 3.** Proyección de zona de radiación térmica para caso Gasolina B.

Para este caso se seleccionó como fuente de fuga un tanque en el que ocurre una BLEVE. ALOHA muestra la zona de radiación térmica que provocaría la explosión de gasolina (Gráfico 7). Los efectos a la salud se perciben hasta 1 km a la redonda del origen de la explosión. En la Imagen 3 se muestra que la zona de radiación térmica es lo suficientemente amplia para afectar parte significativa de Tlahuelliapan e

En los casos Gasolina A y B se modeló el mismo evento, pero con diferentes opciones que ofrece la herramienta ALOHA. Sin embargo, no se obtuvieron los mismos resultados. El tipo de fuga es un factor determinante para la realización de una simulación adecuada y la información requerida para construir los escenarios es muy distinta.

La fuente de fuga es un factor clave; en función de esta, la cantidad de información y el nivel de detalle varían y, por lo tanto, los resultados se ven afectados. También, para cada tipo de fuente, la sustancia puede seguir distintos comportamientos que resultan en diversos eventos.

Por ejemplo, la liberación de gasolina a la atmósfera (Gasolina A) o una BLEVE (Gasolina B). Al mismo tiempo, las limitaciones que presenta ALOHA empujan al usuario de este simulador a hacer consideraciones, excepciones o modificaciones a la información real para poder obtener resultados.

Es importante señalar que, la construcción y simulación de escenarios tiene como objetivo realizar un trabajo preventivo. Este escenario se construyó con base en eventos reales, en el que el actuar de las autoridades y servicios de emergencia fueron determinantes para las consecuencias obtenidas.

Luego de revisar los resultados de las simulaciones, es pertinente señalar la importancia de concientizar a la población aledañas a instalaciones de redes de distribución, tales como ductos, sobre los peligros y riesgos asociados a los materiales si ocurre un derrame o fuga. Como se muestra en ambos casos, la distancia del origen de la fuga determina la magnitud de los daños a la salud de la población. Por lo tanto, las prioridades de las autoridades son proteger a la población y resguardar el sitio para que los servicios de emergencia puedan tener acceso y realizar operaciones de contención con facilidad. Todo esto con el objetivo que no vuelva a ocurrir un evento de tal naturaleza.

## **6.2 Explosivo**

### **6.2.1 Nitrato de Amonio**

El Puerto de Beirut, se encuentra entre los 10 puertos principales en el Mar Mediterráneo. Además de ser una de las principales entradas al país, se considera la puerta al Medio Oriente (Gestion et Exploitation du Port de Beyrouth, 2013) y se localiza en el punto medio de tres continentes (Europa, Asia y África) al norte de la ciudad del mismo nombre en el Líbano.

A mediados de la década de los setenta, este puerto era una estación importante de intercambio internacional entre los países árabes cercanos y hasta tiempos recientes ha conservado su carácter comercial. Recibe anualmente casi 6 millones de toneladas de carga, alrededor de 1 millón de TEU (unidad equivalente a 20 pies, por sus siglas en inglés; es la capacidad de carga que tiene un contenedor estándar)

y aproximadamente 3 mil barcos en sus instalaciones (Gestion et Exploitation du Port de Beyrouth, 2013).

La importancia del estudio de caso se fundamenta en el accidente ocurrido el 4 de agosto del 2020 en el Puerto de Beirut, donde ocurrieron una serie de explosiones como resultado de un incendio en la zona de almacenes. En ellos, se encontraban resguardadas alrededor de 2750 toneladas de Nitrato de Amonio desde 6 años atrás. La explosión final (y la más fuerte) causó daños graves a los alrededores (Pasman et al., 2020).

El nitrato de amonio puro ( $\text{NH}_4\text{NO}_3$ ) es una sal color blanco, inodora, higroscópica y altamente soluble en agua. Su punto de fusión está alrededor de  $170^\circ\text{C}$  y comienza a descomponerse por encima de los  $210^\circ\text{C}$ . Aunque, es una sustancia no combustible por sí misma, sus propiedades como agente oxidante pueden propiciar que otros materiales se incendien. También, es estable y no explota con la fricción e impactos asociados al manejo de materiales a nivel industrial. Sin embargo, puede detonar si se encuentra en confinamiento y expuesto a una fuente de calor o debido a impactos fuertes. En el caso de un incendio, se derrite y descompone en vapores tóxicos (principalmente óxidos de nitrógeno) que pueden ser de color amarillo o café (Health and Safety Executive, 2004).

Su producción a escala industrial inicia en los años 20's a través del proceso Haber-Bosch de síntesis de amoniaco. Se utiliza principalmente como fertilizante (debido a su alto contenido de nitrógeno) y como un ingrediente de explosivos. Debido a que han ocurrido múltiples accidentes en su almacenamiento y transporte, existe amplio conocimiento sobre manejo (Pasman et al., 2020).

El Departamento de Minas, Regulación Industrial y Seguridad del Gobierno de Australia Occidental (2021) indica que todas las instalaciones utilizadas para almacenar nitrato de amonio deben:

- Estar construidas con materiales no combustibles y tener pisos hecho de concreto u otros materiales adecuados.
- Proveer ventilación adecuada.

- Tener un diseño que, en caso de incendio, evite que la sal fundida se acumule en un espacio cerrado, ya sea en el mismo sitio o en otros contenedores como tuberías, drenaje o túneles. Lo mismo aplica para los alrededores del almacén.
- Mantenerse secas y libres de filtraciones de agua.

Un aspecto que considerar para efectos de este trabajo es que este material peligroso no puede modelarse de forma directa utilizando ALOHA y SCRI-Modelos, ya que no permiten simular la explosión del nitrato de amonio sólido, pues no se encuentra en su biblioteca de sustancias explosivas. No obstante, en SCRI-Modelos ofrece el Modelo de Equivalencia TNT, mediante el cual se puede hacer una aproximación.

Debido a que el TNT (trinitrotolueno) es un explosivo conocido, ampliamente estudiado y documentado, es común expresar los efectos que causan distintos explosivos en función de la cantidad de TNT necesaria para producir una onda expansiva que tenga las mismas propiedades que se quiere estudiar (López, 2017). Se expresa en unidades de masa de TNT; una kilotonelada (kt) equivale a 1000 toneladas de TNT.

Al realizar la búsqueda en la literatura encontramos diversas propuestas para determinar el equivalente en TNT de explosión causada por nitrato de amonio en Beirut, observando que, de acuerdo con el método aplicado por los diferentes autores, se obtienen resultados muy distintos. En la Tabla 5 se describen las fuentes consultadas.

**Tabla 5.** *Equivalencias de TNT en la literatura.*

Autor(es)	Equivalencia en TNT reportada	Consideraciones
Rigby et al. (2020).	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Mejor estimado: 0.50 kt TNT</li> </ul>	Se realizó la estimación a partir de 38 videos publicados en redes sociales que mostraban el momento de detonación y propagación de la onda

	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Límite superior razonable: 1.12 kt TNT</li> </ul>	expansiva. El mejor estimado considera únicamente la distancia y tiempo medidas según los videos y el límite superior razonable incluye un rango de error en los datos medidos.
Pasman et al. (2020).	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Estimado bajo: 0.3 kt TNT</li> <li>• Mejor estimado: 0.65 kt TNT</li> <li>• Estimado alto: 0.7 (según tiempo) y 1 kt TNT (según fuerza de explosión).</li> </ul>	Utiliza dos parámetros distintos para calcular el equivalente de TNT: el tiempo que tarda en llegar la onda expansiva y la fuerza de la explosión de acuerdo con el daño hecho a las estructuras. En ambos coinciden los resultados excepto en el estimado alto.
Stennett (2020).	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Estimado bajo: 0.407 kt TNT</li> <li>• Mejor estimado: 0.637 kt TNT</li> <li>• Estimado alto: 0.936 kt TNT</li> </ul>	Utiliza videos de la explosión disponibles al público junto con Google Maps para obtener estimaciones de la ubicación del video y el tiempo que tardó la onda expansiva en llegar a ese sitio. Luego, utiliza una calculadora de onda expansiva disponible al público para estimar el equivalente de TNT.

Con base en lo anterior y con la finalidad de presentar la información en forma de una historia/noticia, se describe el escenario denominado caso “Nitrato de Amonio A”:

*El 23 de Septiembre del 2013 zarpó de Batumi, Georgia el barco mercantil “The Rhosus” con destino a Mozambique, cargado con 2,750 toneladas de Nitrato de Amonio. En su camino, hizo paradas en Turquía y Grecia hasta que, en octubre de 2013, llegó al Puerto de Beirut. Diversas fuentes reportan distintas razones por las que las autoridades portuarias no permitieron que volviera a zarpar: hubo una*



*huelga de la tripulación, no estaba en condiciones de navegar, no se habían pagado las tarifas portuarias, entre otros (Safi y Roth, 2020).*

*Un año después, durante el verano del 2014, el barco prácticamente se encontraba abandonado en el puerto y se comenzaron a levantar varios reportes sobre el riesgo que representaba la carga. Para octubre del 2015, las 2,750 toneladas ya habían colocado en un almacén del puerto mientras el barco continuaba detenido. Durante 2016 y 2017, los oficiales de aduanas libaneses enviaron varias cartas y reportes en las que pedían que se tomara una decisión urgente en vista del peligro inminente que representaba dejar el material en el almacén. Sin embargo, fueron ignorados (Safi y Roth, 2020).*

*En diciembre del 2019, se envió un reporte de Seguridad del Estado al Poder Judicial, la Presidencia y a las direcciones de Inteligencia y Aduanas en el que se advertía del peligro asociado al almacenamiento de Nitrato de Amonio. En el reporte se incluían recomendaciones de seguridad, donde mencionaban la necesidad de sellar un orificio en el almacén 12 (lugar en donde se resguardaba la carga) (Safi y Roth, 2020).*

*El 4 de Agosto del 2020 a las 17:40 hrs, se reportó un incendio en el Puerto de Beirut cuya causa es desconocida. Algunas fuentes mencionan que comenzó en el almacén 9 y se esparció hasta el 12. Se observaron múltiples explosiones pequeñas mientras una gran columna de humo color rojo se desplazaba hacia la ciudad de Beirut (Safi y Roth, 2020). A las 18:08 hrs se presentó una explosión masiva y es considerada como una de las explosiones no nucleares más grandes de la historia (BBC News Mundo, 2021). Human Rights Watch (2021) reporta que fallecieron 218 personas, al menos 7,000 resultaron heridas y se dañaron 77,000 departamentos, por lo que 300,000 personas fueron desplazadas.*

Para el desarrollo del caso de estudio, se establecieron los siguientes objetivos académicos:

1. Desarrollar la habilidad de análisis de una situación de riesgo, mediante el uso de la información disponible y fomentar la toma de decisiones a partir del

criterio propio (por ejemplo, revisar la congruencia de los datos alimentados al modelo de simulación).

2. Ejercitar la habilidad para manejar la información proporcionada, incorporar los conocimientos previos y utilizar los recursos disponibles para modelar un escenario.
3. Ejemplificar el rol que tienen los aspectos administrativos y burocráticos en una situación de riesgo.
4. Evaluar una situación de riesgo en un complejo portuario, donde no sucede ninguna transformación química ni física, sino se encuentra en almacenamiento y además se encuentra rodeado de áreas densamente pobladas.

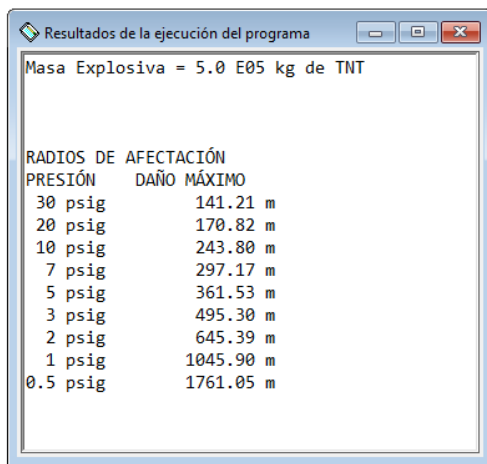
Para esta simulación se decidió tomar algunos de los valores reportados en la literatura (Tabla 5) y se desarrollaron los siguientes casos (Tabla 6):

**Tabla 6.** Equivalencias de TNT para cada caso de Nitrato de Amonio.

Caso	Carga equivalente de TNT	
	[kt]	[kg]
Nitrato de Amonio A	0.500	500,000
Nitrato de Amonio B	0.650	650,000
Nitrato de Amonio C	0.700	700,000
Nitrato de Amonio D	0.936	936,000
Nitrato de Amonio E	1.000	1,000,000
Nitrato de Amonio F	1.120	1,120,000

### 6.2.1.1 Simulación según la equivalencia en TNT

La explosión de Nitrato de Amonio simulada con el modelo de equivalencia de TNT



RADIOS DE AFECTACIÓN	
PRESIÓN	DAÑO MÁXIMO
30 psig	141.21 m
20 psig	170.82 m
10 psig	243.80 m
7 psig	297.17 m
5 psig	361.53 m
3 psig	495.30 m
2 psig	645.39 m
1 psig	1045.90 m
0.5 psig	1761.05 m

calcula la magnitud de la sobrepresión y la distancia donde se encuentra el daño máximo (Imagen 4). En dicho modelo, las condiciones meteorológicas no se consideran como una variable; la única es la carga de TNT. También, ofrece dos gráficos en los que nos muestra el daño máximo catastrófico (D. M. C.) y el daño máximo probable (D. M. P.).

**Imagen 4.** Resultados de la ejecución del programa del caso Nitrato de Amonio A.

SCRI-Modelos estima la magnitud de una explosión bajo un escenario de DMC

considerando que (Dinámica Heurística, 2018):

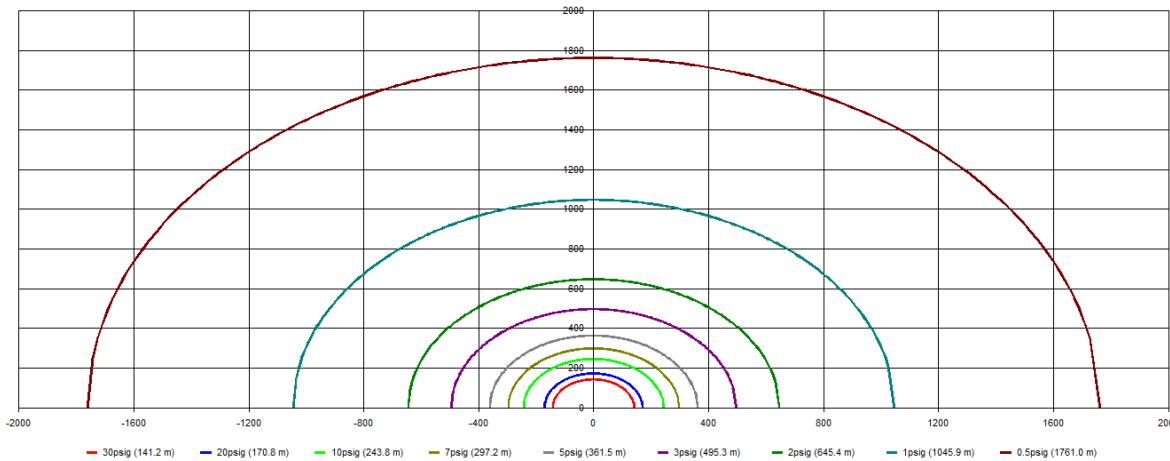
1. El tamaño de la fuga se determina por el contenido del recipiente más grande del proceso o el conjunto de recipientes conectados entre sí.
2. La destrucción o daños graves de tanques de almacenamiento mayores como formadores de nubes explosivas catastróficas.
3. Si se trata de una fuga en tuberías de gran capacidad alimentadas desde instalaciones remotas (exteriores o interiores), se asume que la tubería está seriamente dañada y la fuga dura media hora.
4. La existencia de fuentes cercanas de ignición no es una limitante para la formación de una nube.
5. Se incluirán gases y líquidos empleados como combustibles.

Por otro lado, se estima la magnitud de una explosión bajo un escenario de DMP considerando que (Dinámica Heurística, 2018):

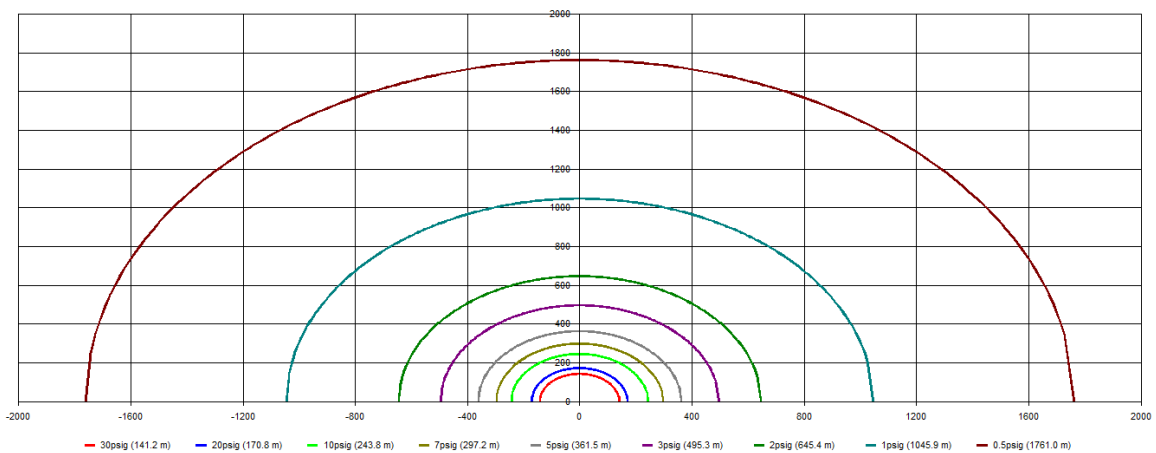
1. Al igual que en el otro escenario, el tamaño de la fuga se determina por el contenido del recipiente más grande del proceso o el conjunto de recipientes conectados entre sí.

2. Una nube dentro de un edificio formará una nube de las mismas dimensiones que una en el exterior.

Sin embargo, para este caso se muestra el mismo resultado para ambos casos (Gráfico 8 y 9). Esto sucede porque el factor de eficiencia explosiva (F. E. E.) es mayor a cero y ninguna de las condiciones mencionadas aplican en este caso. Por ello, en el contexto de este caso se consideran ambos gráficos como equivalentes.



**Gráfico 8.** Daño máximo catastrófico (D. M. C.) para el caso Nitrato de Amonio A.



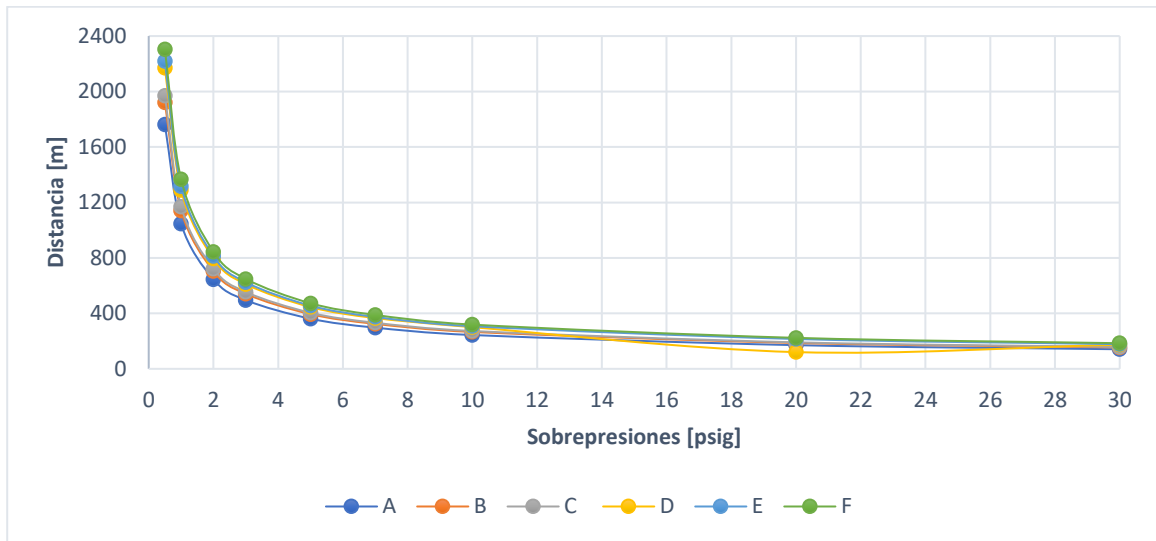
**Gráfico 9.** Daño máximo probable (D. M. P.) para el caso Nitrato de Amonio A.

En la Tabla 7 se presentan los resultados de la simulación de los seis casos planteados del Nitrato de Amonio. En ellos se observa la misma tendencia: a mayor cantidad de sal, la explosión será de mayor magnitud. Por otro lado, el perfil del decaimiento de la sobrepresión a medida que nos alejamos del sitio de la explosión es igual para todos los casos (Gráfico 10).

**Tabla 7.** Resultados de las simulaciones para el Nitrato de Amonio. Se presenta la distancia (en metros) del sitio de explosión a la que se registra cierta sobrepresión (con valores redondeados).

Caso Nitrato de Amonio	Equivalente TNT [kt]	Sobrepresiones [psig]								
		30	20	10	7	5	3	2	1	0.5
A	0.500	141	171	244	297	362	495	645	1046	1761
B	0.650	154	186	266	324	395	541	704	1141	1922
C	0.700	158	191	273	332	404	554	722	1170	1970
D	0.936	174	121	300	366	446	610	795	1289	2170
E	1.000	178	215	307	374	455	624	813	1318	2219
F	1.120	185	224	319	389	473	648	844	1368	2304

Sin embargo, se aprecia que no es proporcional, es decir, a medida que nos acercamos al sitio de la explosión, las diferencias de sobrepresión entre casos no son significativas. Pero cuando comenzamos a alejarnos, es evidente que la explosión alcanza mayores niveles de sobrepresión a mayor distancia, lo que se traduce en más afectaciones en la zona metropolitana de Beirut. Si se hace la comparación los casos A y F a 30 psig, es posible observar que la diferencia entre las distancias es de 44 m mientras que a 0.5 psig es de 543 m.



**Gráfico 10.** Sobrepresiones vs. Distancia de los casos de Nitrato de Amonio.

En la literatura se encuentran reportadas tablas donde se asigna el daño esperado según el valor de sobrepresión. Este tipo de estimados son bastante útiles para dimensionar los efectos que tienen los cambios de presión en una situación real y en dónde se reflejarían. En la Tabla 8 se citan los daños esperados según lo que se reporta en el Manual de SCRI-Modelos (2018).

**Tabla 8.** Estimación de los daños provocados por sobrepresión en explosiones.

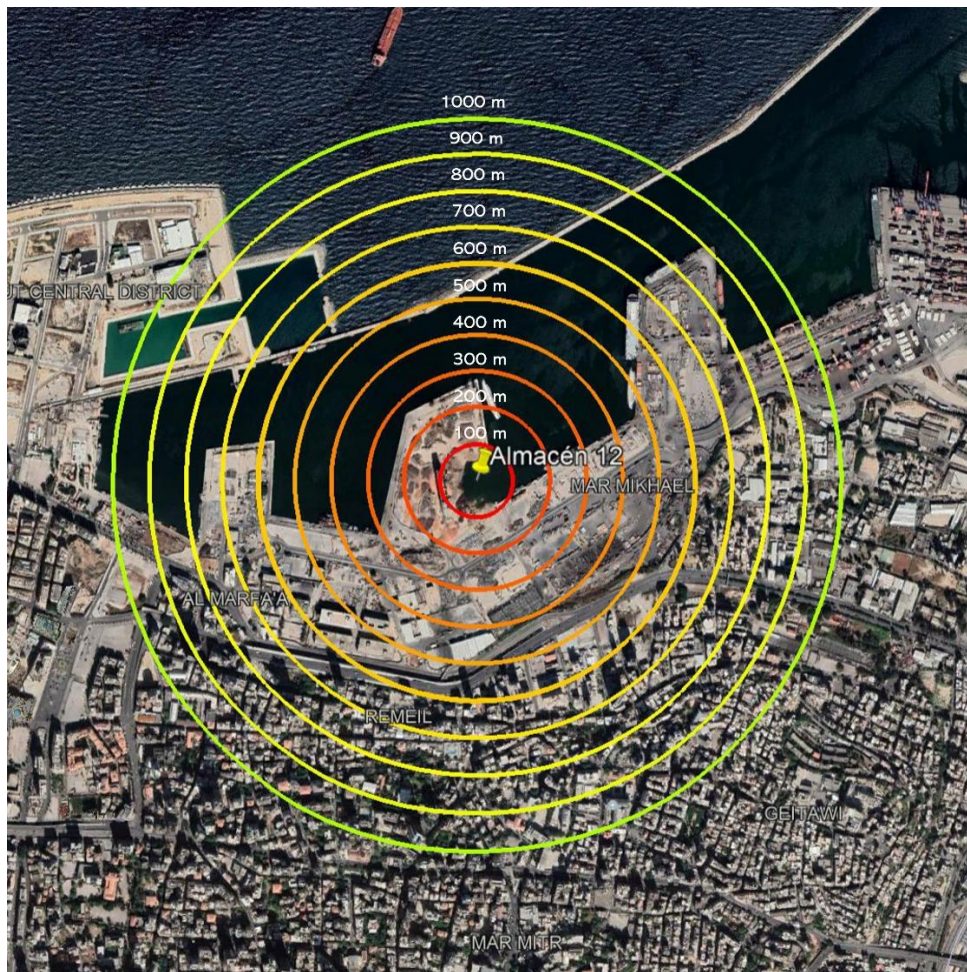
Sobrepresión [psig]	Daño esperado
0.5 – 1.0	Normalmente ventanas despedazadas, algo de daño en los marcos de estas. Daño menor a estructuras de casas (0.7)
1.0	Demolición parcial de casas, éstas se vuelven inhabitables.
1.0 – 2.0	Paneles de metal corrugado que fallan y se doblan. Implosión de paneles de madera para construcción. Distorsión en marco de metal de edificios recubiertos (1.3 psig).
1.0 – 8.0	Rango de lesiones de leves a serias debido a laceraciones de la piel por pedazos volantes de vidrio y otros misiles.

2.0 – 3.0	Colapso parcial de muros y techos de casas (2 psig). Límite inferior de daño estructural serio (2.3 psig). Destrucción de muros de concreto no reforzado o de block prequemado.
2.4 – 12.2	Rango de 1 a 90% de rotura de tímpanos entre las personas expuestas.
3.0	Edificios con estructura de acero distorsionados y arrancados de sus cimientos.
4.0	Ruptura en recubrimiento de edificios industriales ligeros.
5.0 – 7.0	Postes de madera arrancados (5 psig). Destrucción casi completa de casas. Volcadura de carros de ferrocarril con carga (7 psig).
10.0	Posible destrucción total de edificios.
14.5 – 29.0	Rango de 1% a 99% de fatalidades entre las personas expuestas debido a los efectos directos del estallido.

En este sentido, otra herramienta que brinda una perspectiva para dimensionar los daños es el contraste con un mapa del sitio. Cuando se utiliza este modelo en SCRI-Modelos, no es posible realizar una proyección directamente en el programa. Por ello, recurrió a otra herramienta para visualizar el sitio. Las Imágenes 5, 6 y 7 son mapas realizados en Google Earth donde se presentan 3 escalas distintas para usarlos como referencia en el análisis de los resultados. Dichas imágenes satelitales (en las que se basan los mapas) se tomaron después del accidente, en el año 2022.

La destrucción total de los edificios se percibe a partir de 10 psig. Según las múltiples cargas, esto se presenta en el intervalo de 244 a 319 m de distancia. En la Imagen 5 se muestra que dicho intervalo comprende todas las instalaciones del Puerto de Beirut e incluso es posible afirmar que toda el área se destruyó por completo. También coincide con la simulación que, dentro de la circunferencia de 500 m de radio, los edificios fueron arrancados de sus cimientos.

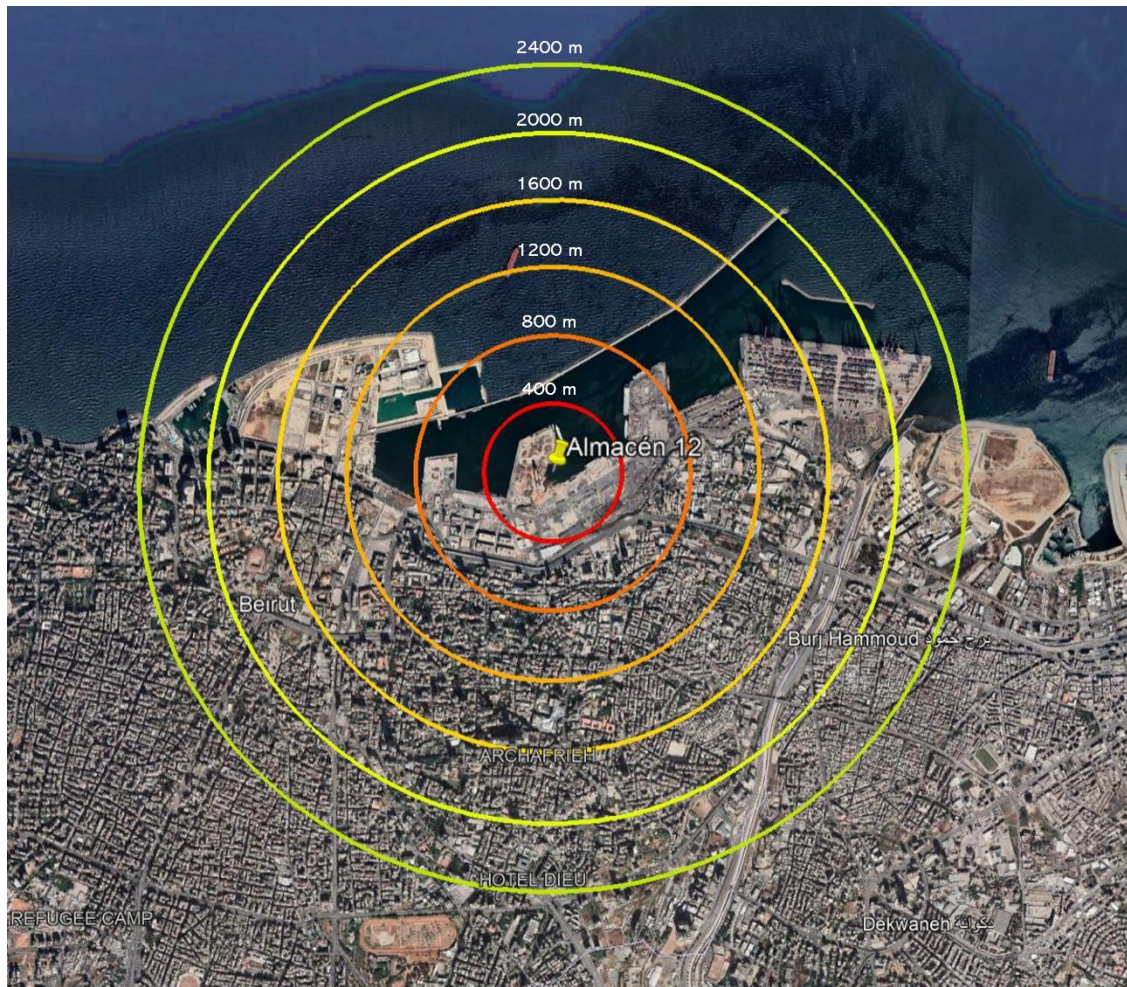




**Imagen 5.** Mapa de referencia: ubicación del almacén 12 en el Puerto de Beirut con circunferencias cada 100 m de radio (Google Earth).

Dentro de la circunferencia de 1 km de radio, se observa que se encuentra una zona residencial. De acuerdo con los resultados obtenidos, todos los casos coinciden en que al menos se presentarán laceraciones por trozos de vidrio u otros proyectiles, ruptura de tímpanos y colapsos parciales de muros y techos de casas. Esto sucede en el caso A y a partir del caso B, la distancia en la que se pueden percibir estos efectos aumenta desde 1141 hasta casi 1400 m (caso F).





*Imagen 6. Mapa de referencia: ubicación del almacén 12 en el Puerto de Beirut con circunferencias cada 400 m de radio (Google Earth).*

El caso Nitrato de Amonio A nos indica que al menos a 1761 m se presenta la ruptura de ventanas o daño menor a las estructuras de las casas. Sin embargo, los reportes indican que tales daños se presentaron más allá de 3 km de distancia, incluso podría considerarse que hubo daños en mayor o menor medida en toda la ciudad. Por lo tanto, el caso F encaja mejor según los daños que sucedieron en realidad.



*Imagen 7. Mapa de referencia: ubicación del almacén 12 en el Puerto de Beirut con circunferencias cada 1 km de radio (Google Earth).*

En el ejercicio del análisis del riesgo es muy importante desarrollar un criterio basado en las evidencias que nos permita tomar decisiones razonadas. Este caso resalta que, en muchas ocasiones, recae directamente en el criterio del profesional (por ejemplo, un ingeniero químico) que hace el análisis decidir qué valor se va a tomar para hacer una simulación. En ese sentido, se exhorta a hacer una estimación del peor escenario posible para tener un rango de confianza, dado que las situaciones de riesgo se ven afectadas por múltiples factores.

Por otro lado, la situación de riesgo que se presentó en el Puerto de Beirut es resultado de una serie de eventos y decisiones tomadas por la administración y autoridades del Líbano. Existe un peligro asociado a las características de los



materiales peligrosos y, en el caso específico del nitrato de amonio, se tiene amplio conocimiento de las medidas de seguridad a seguir durante su manejo y almacenamiento. Sin embargo, no es suficiente si no se cuenta con un sistema eficiente de gestión del riesgo, donde el factor humano juega un rol determinante.

### **6.3 Corrosivo**

#### **6.3.1 Cloro**

El caso de estudio se sitúa en el Complejo Industrial Portuario de Altamira, Tamaulipas, México. En sus instalaciones se encuentra ubicado el clúster petroquímico privado más grande del país que produce el 30% de los productos petroquímicos del país. El Complejo se extiende en más de 9,500 hectáreas, de las cuales 5,098 hectáreas son dedicadas al desarrollo industrial (Altamira: Coordinación General de Puertos y Marina Mercante, 2019). Entre las compañías que componen el clúster se encuentran Mexichem (desde 2018 conocido como grupo *Orbia*), *Polioles*, *Iberdrola*, *Crompton*, *Indelpro*, *Dynasol*, por mencionar algunas.

Dentro de la amplia gama de sustancias y compuestos que se manejan en Altamira, se seleccionó el Cloro el cual se presenta generalmente como gas color amarillo verdoso de olor penetrante e irritante. Es ampliamente utilizado en el proceso de desinfección del agua y la filtración de agua potable, en la industria textil como colorante, como blanqueador de pasta en producción de papel y en menor proporción, se utiliza en la industria alimentaria, farmacéutica y metalúrgica. Además, es esencial para la fabricación del PVC (Policloruro de Vinilo, por sus siglas en inglés) uno de los polímeros más conocidos en el público general (Grupo Barcelonesa, 2019). Desde 1983, la compañía Mexichem (*Orbia*) comenzó a producir Resinas de PVC a partir de su producción de cloro combinado con etileno en sus instalaciones ubicadas en el Complejo de Altamira.

Considerando lo anterior y con la finalidad de presentar la información en forma de una historia/noticia, se describe el escenario base nombrado caso “Cloro A”:

La compañía Orbia (hasta el 2018 conocida como Mexichem) comenzó como un productor líder de materias primas, y debido a su expansión, actualmente es líder en polímeros, materiales e infraestructura (Orbia, s.f.). Entre su gama de productos, se encuentran resinas de PVC a partir de su producción de cloro combinado con etileno. La mañana (8:30 am) del 8 de junio del 2020, los trabajadores se percatan que uno de los tanques de cloro tiene una fuga circular de 10 cm de diámetro. El tanque, con capacidad de 25,000 litros se encuentra en la zona de almacenamiento en las instalaciones de Orbia en el Complejo Industrial Portuario del Altamira, Tamaulipas. Es un día nublado en el puerto, la temperatura es de 29°C, la humedad relativa de 76% y los vientos provienen del este a una velocidad de 3.92 m/s. Los trabajadores alertan de la fuga y comienzan a realizar los protocolos correspondientes. Días después, el equipo de investigación del accidente identifica que la fuga fue resultado de una válvula defectuosa ubicada a 0.46 m del fondo del tanque, el cual se encontraba al 70% de su capacidad.

Se identificaron los siguientes objetivos académicos para el desarrollo de este caso de estudio:

1. Comprender la relevancia e influencia de las condiciones meteorológicas en el comportamiento de una sustancia peligrosa.
2. Evaluar los resultados que ofrecen dos modelos de simulación distintos (de libre uso vs. Comercial) y comparar sus fortalezas y limitantes.

Por lo tanto, se proponen dos variaciones al caso Cloro A que se llevan a cabo en diferentes horas de un día de junio en Altamira, Tamaulipas. En la Tabla 9 se enlistan los detalles de las condiciones meteorológicas de los casos de Cloro.

**Tabla 9.** Condiciones meteorológicas para caso Cloro.

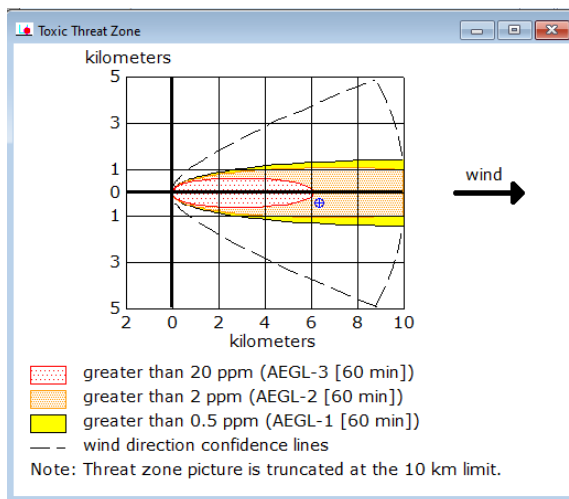
Caso	Hora del evento	Temperatura [°C]	Humedad relativa [%]	Velocidad del viento [m/s]	Dirección del viento.	Nubosidad [%]	Estabilidad atmosférica [Clase Pasquill]
Cloro A	08:30	29	76	3.92	Este	100	D
Cloro B	15:00	32	90	5.28	Este	50	D

Cloro C	02:30	27	66	3.33	Sureste	50	E
---------	-------	----	----	------	---------	----	---

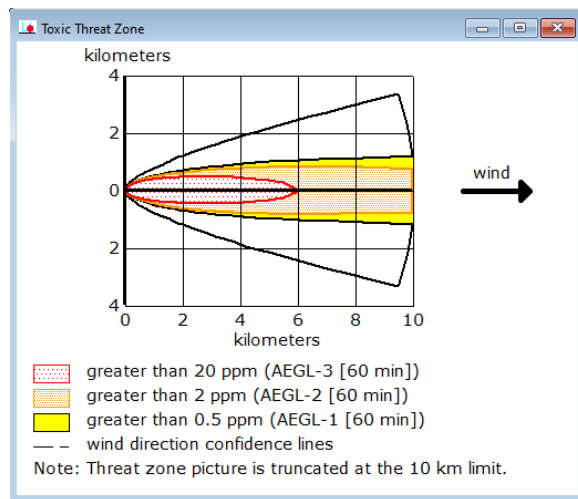
### 6.3.1.1 Simulación con ALOHA

En esta sección se muestra la simulación realizada a través de ALOHA. En él, se encuentran disponibles los algoritmos de dispersión gaussiano o de gases pesados. Para la simulación de este caso de estudio se seleccionó la configuración en la que ALOHA decide la opción adecuada de acuerdo con sus características. Una vez finalizada la simulación, se muestra que se utilizó el modelo de gases pesados.

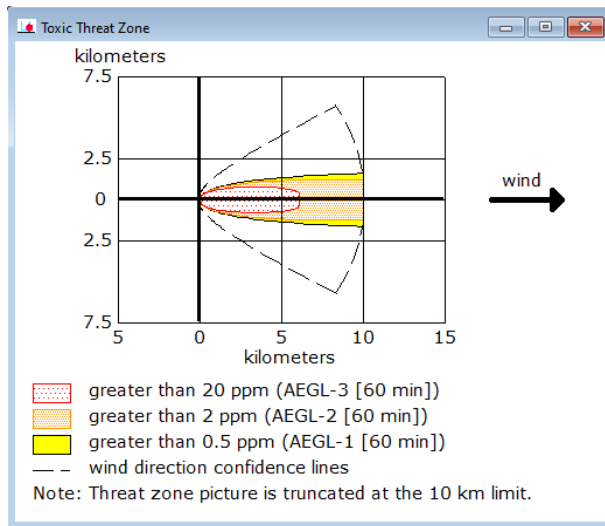
El programa ofrece gráficos que muestran las zonas tóxicas creadas por la liberación del gas (por ejemplo, Gráfico 11). Cada zona, marcada por un color y textura distinta, representa una concentración mínima cuyos valores son definidos por los niveles AEGL para un periodo de 60 minutos de exposición. Las zonas están delimitadas por una *línea de confianza de la dirección del viento*, lo que significa que dentro del área encerrada hay un 95% de probabilidad de que la acumulación de gas permanezca dada la supuesta cantidad de fluctuación en la dirección del viento (EPA y NOAA, 1998). La distancia máxima que se muestra es de 10 km.



**Gráfico 11.** Zona tóxica para caso Cloro A.



**Gráfico 12.** Zona tóxica para caso Cloro B.



**Gráfico 13.** Zona tóxica para caso Cloro C.

Las nubes tóxicas producidas en los casos Cloro A, B y C se muestran en los Gráficos 11, 12 y 13, respectivamente. Dichas nubes se ven afectadas por la velocidad y dirección del viento por lo que se crea una pluma. Para los tres casos presentados, la distancia máxima donde la concentración es mayor a 20 ppm (AEGL-3) es de 6 km. Las áreas donde se superan los niveles

AEGL-2 y AEGL-1 se extienden más allá de los 10 km.; el modelo no permite visualizar la distancia máxima.

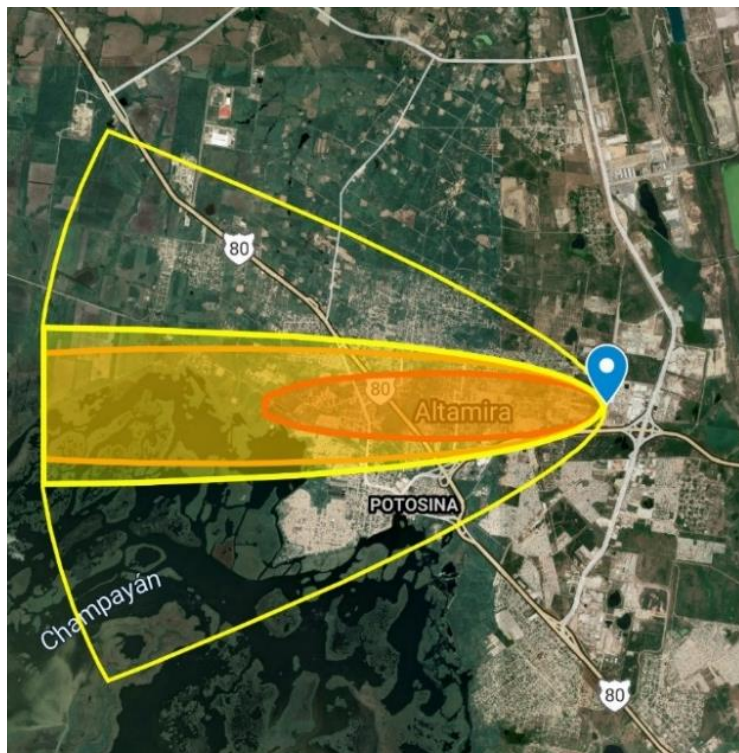
La pluma del caso Cloro A tiene un ancho máximo, sin contemplar líneas de confianza, de 3 km aproximadamente; en el caso Cloro B es de 2.3 km; en el caso Cloro C es de 3.75 km. Considerando las líneas de confianza, la tendencia se mantiene: En el caso Cloro A es de 10 km, en Cloro B es de 6 km y en Cloro C es de 11 km aprox. En general, las diferencias son sutiles pero nos muestran los efectos de las condiciones meteorológicas.

Si se comparan los casos Cloro A y B, se observa que el aumento de la velocidad del viento provoca que la pluma se vuelva más angosta y por lo tanto, se infiere que se desplaza a mayor distancia de la fuente de fuga. ALOHA también arroja el perfil del flujo a través del orificio de fuga. El aumento de temperatura y humedad provoca que el cloro se evapore con más facilidad, por lo que se escapa durante 6 minutos a velocidad máxima de 5,820 kg/min.

Si la emisión ocurre en la madrugada (caso Cloro C), donde los valores de temperatura, humedad y velocidad del viento alcanzan sus valores más bajos para el verano en Altamira, Tamaulipas, se observa que el gas se desplaza en menor medida, la pluma se vuelve más ancha y la velocidad máxima es menor, con un valor de 5, 280 kg/min; el tiempo total de emisión permanece en 6 minutos.

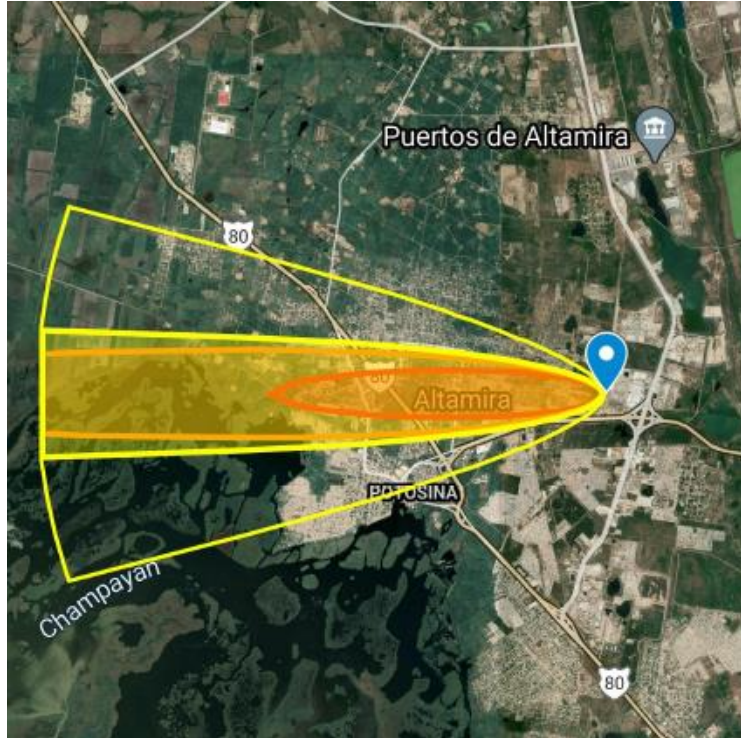
En general, se observa que la temperatura y humedad tienen una relación directamente proporcional a la velocidad máxima de emisión. Por otro lado, la velocidad tiene gran influencia en la morfología de la nube tóxica; a mayor velocidad, la pluma se vuelve menos ancha y se infiere que se desplaza a una mayor distancia.

En adición, ALOHA permite observar la pluma del gráfico de zona tóxica proyectado en un mapa real del sitio (Imágenes 8, 9 y 10). Esta característica permite al estudiante dimensionar de mejor forma lo que involucra una fuga, en este caso de cloro, en un sitio tan cercano a una zona industrial. En esta representación se muestra con mayor claridad el efecto que tiene el cambio de dirección del viento.

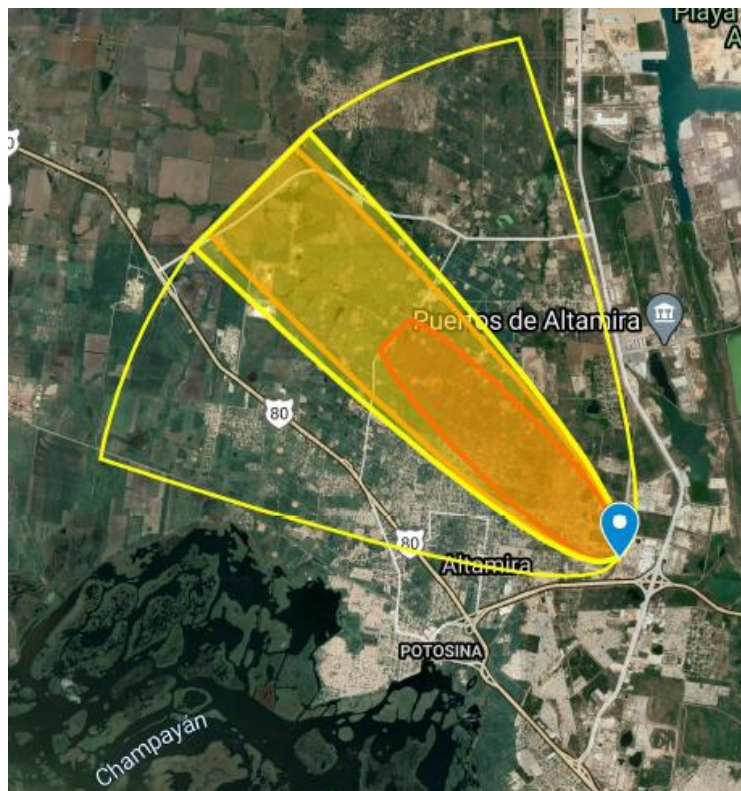


**Imagen 8.** Proyección de la nube tóxica de caso Cloro A.





**Imagen 9.** Proyección de nube tóxica de caso Cloro B.



**Imagen 10.** Proyección de nube tóxica de caso Cloro C.



Sin embargo, la pluma que arroja ALOHA no permite observar el comportamiento de la pluma más allá de 10 km de la zona de emisión y en la proyección es evidente que falta información sobre la pluma. Es importante que el profesor resalte esta limitante a los alumnos pues es parte clave del análisis de resultados. En ese sentido, resulta útil tener presente que este programa se diseñó y desarrolló como una herramienta sencilla para equipos de emergencia y de primera intervención, por lo que la prioridad son la sencillez de la interfaz y la rapidez para obtener resultados confiables. Para una simulación con más detalle es necesario utilizar otras herramientas disponibles en el mercado.

Los tres casos simulados en ALOHA muestran que la población de Altamira se encuentra en una zona altamente peligrosa pues se cubriría con una nube de Cloro. La zona más afectada es aquella con mayor densidad de población, donde se puede encontrar concentraciones superiores a 20 ppm, lo que puede resultar en heridas graves o incluso en la muerte. A partir de este análisis, el alumno es capaz de visualizar la importancia de realizar ejercicios de análisis de riesgo y la necesidad de implementar los resultados para promover la prevención y concientización en la población.

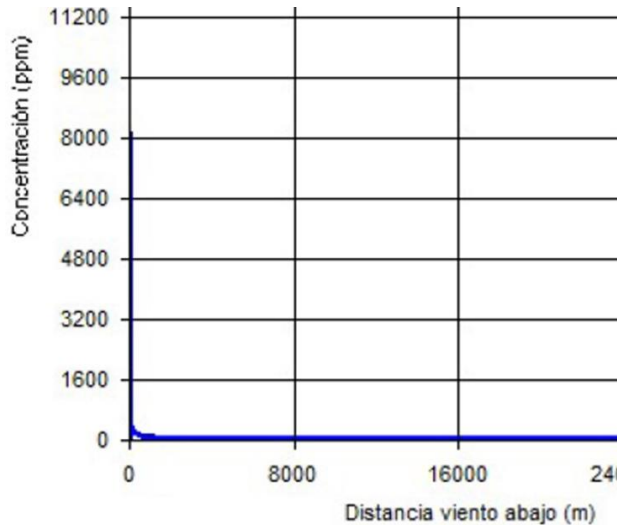
#### *6.3.1.2 Simulación con SCRI-Modelos*

En esta sección se muestra la simulación realizada a través de SCRI-Modelos. En él, se encuentran disponibles los modelos ISC3 (*Industrial Source Complex 3*), de dispersión de emisiones más densas que el aire (SLAB) y de equivalencia TNT. El caso de estudio se llevó a cabo como una emisión de chorro horizontal con el modelo SLAB.

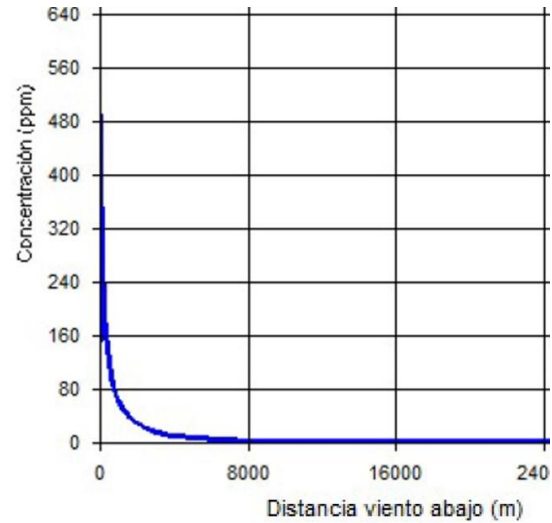
El programa permite visualizar el perfil de concentración según la distancia a la fuente de fuga (por ejemplo, Gráfico 14). Debido a que SCRI-Modelos integra el eje z en las simulaciones, es posible ver cada uno de los perfiles para cuatro alturas distintas, cuyos valores son seleccionados por el usuario. Esto agrega una nueva vertiente del análisis ya que es posible entender la nube como un objeto en tres dimensiones y revisar su comportamiento en la atmósfera (en este caso, tropósfera).

Para comprender la morfología de la pluma que se forma por la emisión de cloro, se utilizarán los resultados obtenidos en el caso Cloro A como ejemplo.

El Gráfico 14 representa que a nivel del suelo el viento no es capaz de desplazar el gas. Sin embargo, muestra la mayor concentración posible de cloro en la fuente de fuga que corresponde aproximadamente a 8000 ppm, significativamente superior al nivel AEGL-3.



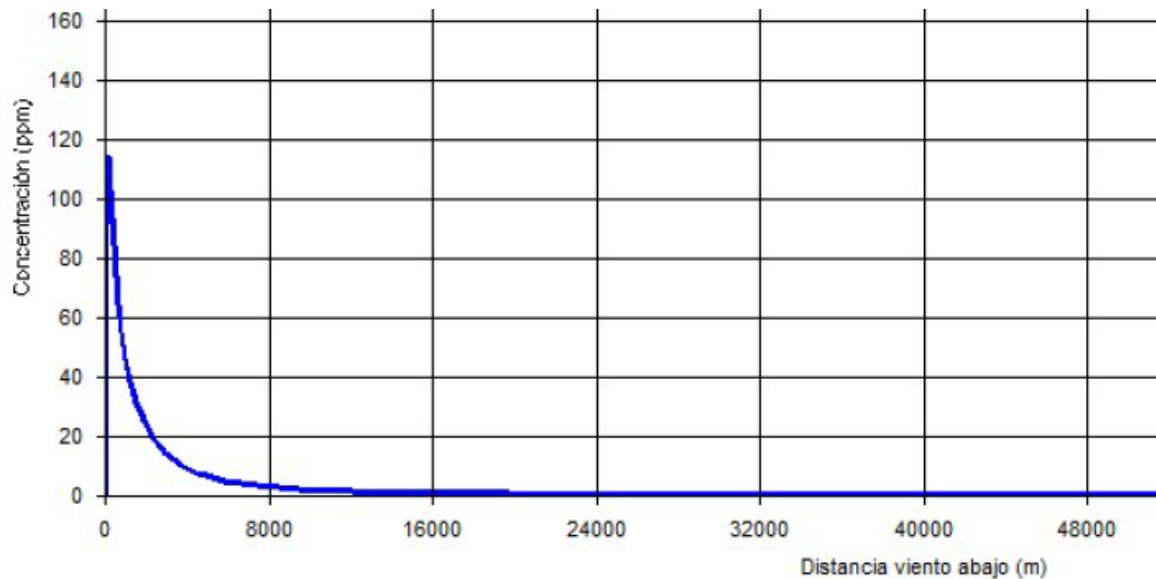
**Gráfico 14.** Distancia vs Concentración de caso Cloro A con  $z=0$  m.



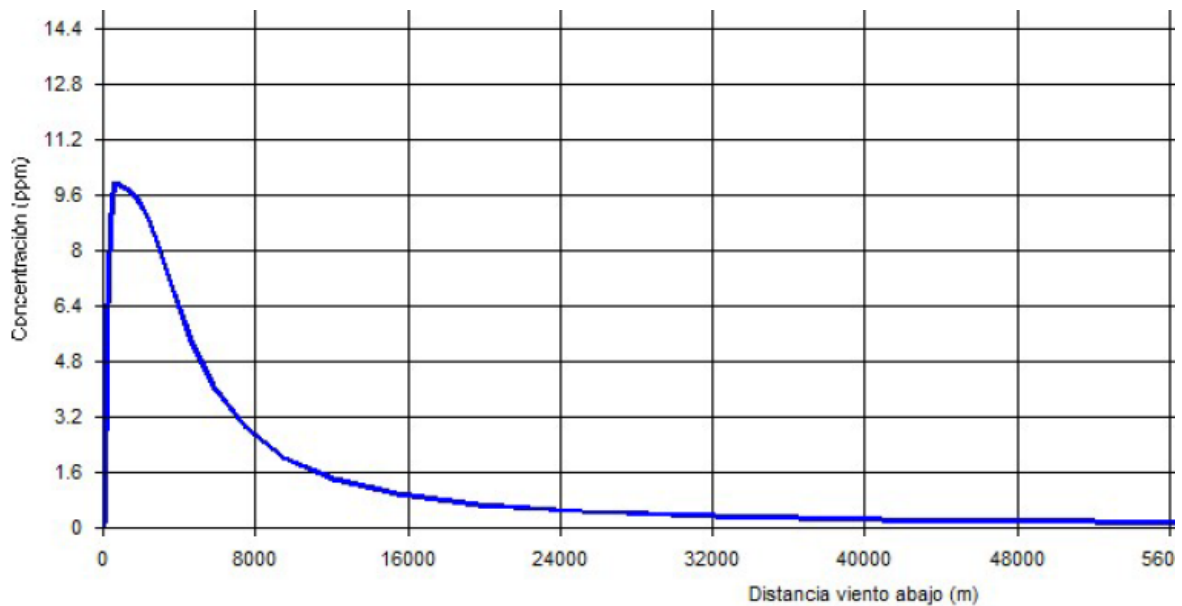
**Gráfico 15.** Distancia vs Concentración de caso Cloro A con  $z=10$  m.

A 10 metros de altura (Gráfico 15) de la fuente de fuga la concentración está alrededor de 500 ppm. A poca distancia de la fuente en la dirección del viento, ya se encuentra cloro altamente concentrado; a aproximadamente a 8 km de distancia la concentración es cercana a cero. Esto significa que el viento ya ha desplazado el gas hasta dicha distancia y se está diluyendo en el aire. Sin embargo, se mantiene suspendido en zonas bajas ya que el Cloro es más denso que el aire. Si se evalúa la diferencia de concentraciones en la fuente de fuga (distancia=0 m) se demuestra que la mayor cantidad de gas se encuentra dentro de esos primeros 10 m de altura; como referencia esa altura corresponde a un edificio de 3-4 plantas.

A 30 metros de altura (Gráfico 16), la tendencia se mantiene. La concentración máxima (115 ppm) se sigue encontrando justo por encima de la fuente de fuga y el Cloro ya se ha extendido a cerca de 12 km de distancia.



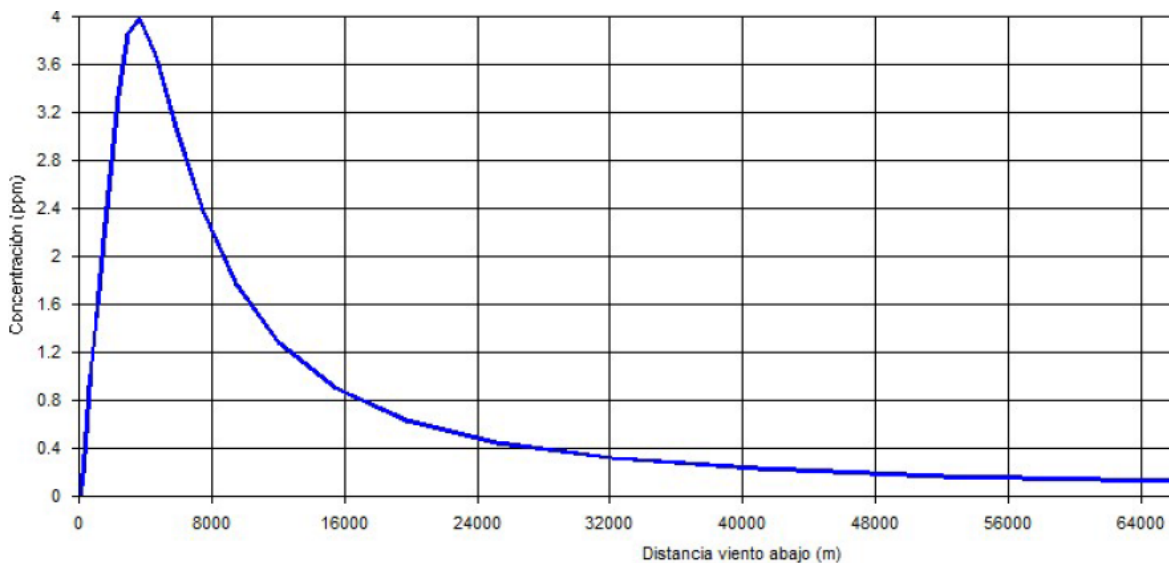
**Gráfico 16.** Distancia vs Concentración de caso Cloro A con  $z= 30$  m.



**Gráfico 17.** Distancia vs Concentración de caso Cloro A con  $z= 70$  m.

Si se evalúa el plano a 70 metros (Gráfico 17) directamente encima de la fuente, la máxima concentración es de 6.4 ppm. No obstante, al desplazarse menos de 1 km sobre el plano, la concentración máxima se encuentra de alrededor de 10 ppm. Esto indica que el viento ha desplazado al Cloro de tal forma que la mayor parte ya no se encuentra justo por encima de la fuente, aunque no es suficiente para que se diluya a concentraciones aceptables. A partir de 1 km de distancia, el

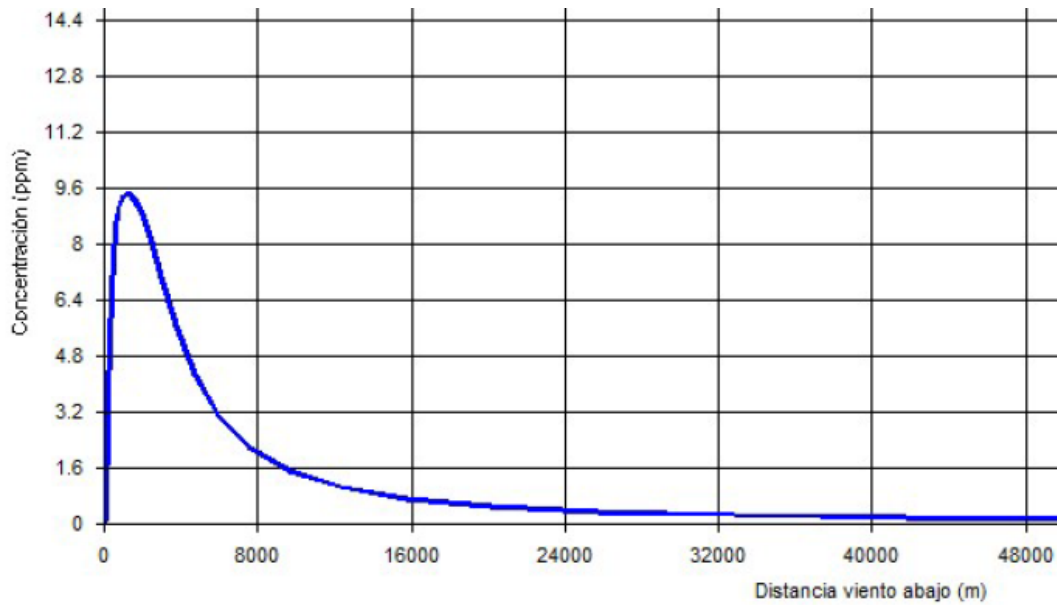
comportamiento se mantiene como en los Gráficos 15 y 16. La concentración es aproximadamente cero a una distancia de 52 km.



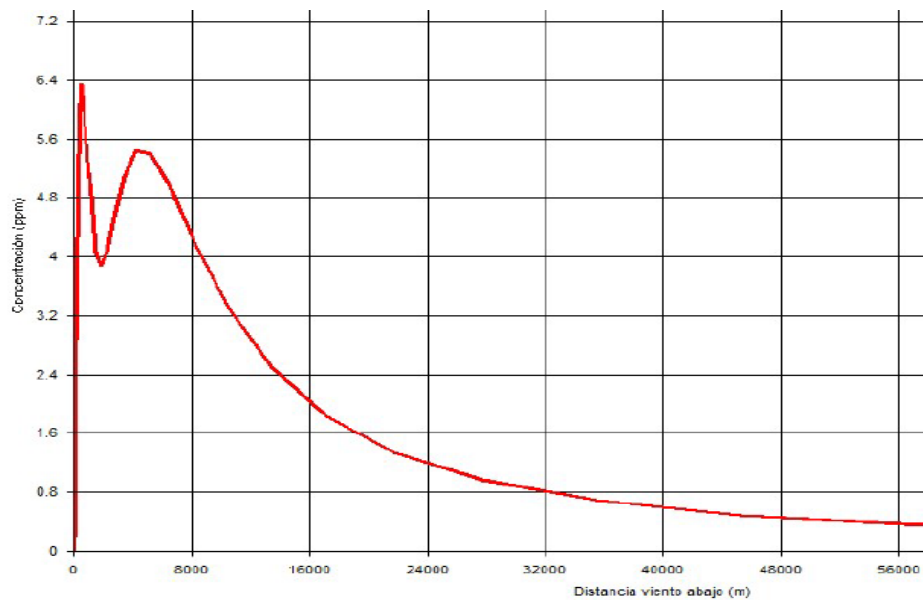
**Gráfico 18.** Distancia vs Concentración de caso Cloro A con  $z= 100$  m.

Finalmente, a 100 metros de altura (Gráfico 18) la nube se ha dispersado de tal forma que, hasta una distancia de 4 km de la fuente, se presenta la máxima concentración (4 ppm). Al desplazarse viento abajo sobre el plano, a 24 km se encuentra una concentración menor al AEGL-1 (0.5 ppm). No obstante, si se sigue la tendencia de la curva, aún se encuentra al menos 0.2 ppm hasta 80 km viento abajo. La información que brinda el simulador para distintas alturas permite esculpir la morfología de la nube y cómo se dispersa el gas en función de la distancia a la desde la fuente de la fuga.

Ahora bien, a continuación se evaluará qué sucede en los otros casos de Cloro. La relación concentración vs distancia para el caso B a 70 m de altura (Gráfico 19) revela que justo encima de la fuente la concentración es de 4.4 ppm aproximadamente y a alrededor de 1.5 km viento abajo es posible encontrar la concentración máxima de cloro equivalente a 9.6 ppm. A partir de 42 km se puede considerar que la concentración es cero.



**Gráfico 19.** Distancia vs Concentración de caso Cloro B con  $z=70$  m.



**Gráfico 20.** Distancia vs Concentración de caso Cloro C con  $z=70$  m.

A la misma altura, el caso C (Gráfico 20) muestra un comportamiento muy distinto. Encima de la fuga, la concentración es de 0.2 ppm; a menos de 1 km, se encuentra la concentración máxima en la nube equivalente a 6.4 ppm; a 2 km viento abajo, hay una concentración mínima local de 3.8 ppm; a 5 km, hay una concentración máxima local de 5.4 ppm; incluso a 56 km de distancia, la concentración aún no es cercana a cero, sino se mantiene en 0.4 ppm.

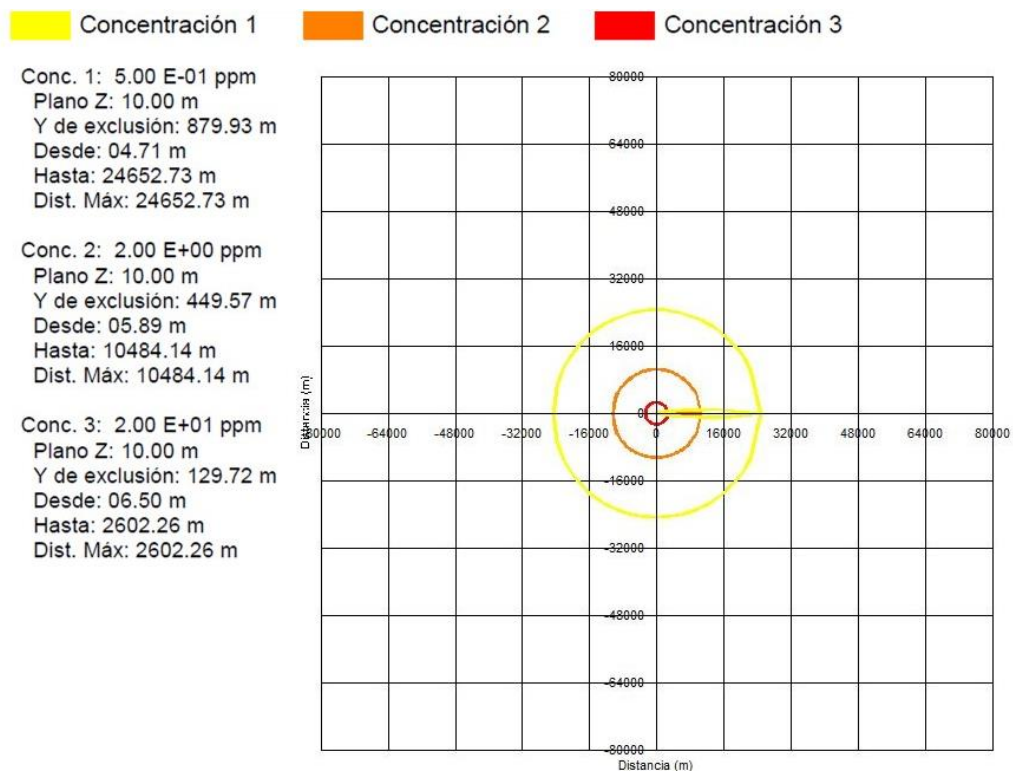
Es importante mantener presente que la diferencia entre los tres casos revisados son las condiciones meteorológicas. Hay cambios en la velocidad del viento que, aunque no de manera significativa, tienen un efecto en el comportamiento de la nube. Si se comparan los casos A y B (Gráficos 17 y 19) es posible observar que, al aumentar temperatura, humedad y velocidad del viento, el gas se dispersa más fácilmente y las concentraciones que pueden encontrarse en puntos definidos (por ejemplo, a 8 o 16 km de distancia) son menores en el caso B.

Si la comparación sucede entre los casos A y C (Gráficos 17 y 20), se nota que la concentración del gas no sigue el mismo perfil. En el caso C, además de disminuir la temperatura, humedad y velocidad del viento, hay otros fenómenos sucediendo en la atmósfera que se reflejan en el perfil de concentración. Dichos fenómenos están relacionados con la estabilidad atmosférica; los casos Cloro A y B suceden en estabilidad Pasquill D (neutra), mientras el caso Cloro C sucede en Pasquill E (ligeramente estable). Esto demuestra que en SCRI-Modelos la estabilidad es sumamente relevante para definir la dispersión del gas en el aire.

SCRI-Modelos también ofrece un gráfico de Isoconcentraciones, donde el usuario puede definir aquellas que son de su interés. En este caso, se seleccionan las concentraciones que corresponden a los niveles AEGL-3, 2 y 1 para exposición por 60 minutos. Los Gráficos 21, 22 y 23 permiten ver la pluma de cloro delimitada por zonas concéntricas en las que, dado algún cambio en la dirección del viento, se puede desplazar el gas; además se presenta información precisa de las distancias: a qué distancia de la fuente de fuga inicia el área y cuál es la distancia máxima a las que llega esa sección. Básicamente, este tipo de gráficos son otra representación de la emisión, en donde se puede visualizar en dos dimensiones, como si fuera una “rebanada” de la nube a una altura particular.

En el gráfico de concentración vs distancia sólo es posible aproximar una distancia en la que la concentración es menor al AEGL-3, sin embargo, en el gráfico de isoconcentraciones arroja valores exactos. Por ejemplo, en el caso Cloro A a una altura de 10 m, en el Gráfico 15 se aproxima que a 8 km se encuentra una

concentración cercana a cero, mientras que el Gráfico 21 indica que la concentración es de, al menos, 0.5 ppm a 24,652.73 m de la fuente de fuga.



**Gráfico 21.** Isoconcentraciones para caso Cloro A con  $z=10$  m.

En el caso Cloro B, en comparación con el Cloro A, se observa en general que las zonas de alta concentración se extienden a menor distancia. En otras palabras, se el gas se dispersa con mayor facilidad tal que no está tan concentrado en zonas amplias, en un radio de aproximadamente 20 km de la fuente de fuga.

En el caso Cloro C, es aún más visible a través del Gráfico 23 que la estabilidad atmosférica juega un papel muy importante en este modelo de simulación. Las tres zonas evaluadas se extienden a una distancia mucho mayor a los casos A y B. Esto puede indicar que el fenómeno que sucede en la atmósfera no permite que el cloro se eleve y se disperse, sino que hace que se quede cercano a la superficie y por lo tanto la concentración es alta. En otras palabras, el gas se dispersa mucho mejor en el eje x que en el eje z.

Concentración 1

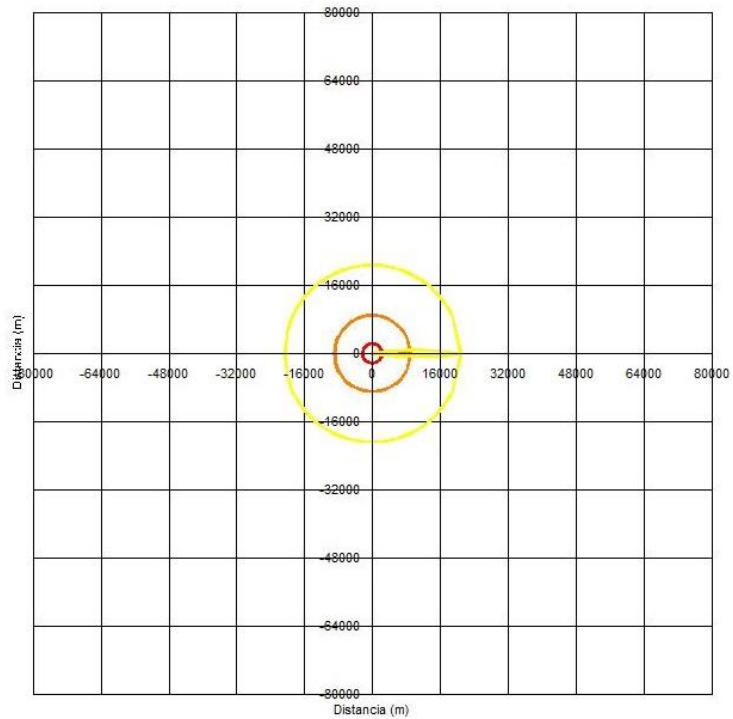
Concentración 2

Concentración 3

Conc. 1: 5.00 E-01 ppm  
Plano Z: 10.00 m  
Y de exclusión: 723.17 m  
Desde: 04.70 m  
Hasta: 20782.20 m  
Dist. Máx: 20782.20 m

Conc. 2: 2.00 E+00 ppm  
Plano Z: 10.00 m  
Y de exclusión: 359.11 m  
Desde: 05.87 m  
Hasta: 8951.63 m  
Dist. Máx: 8951.63 m

Conc. 3: 2.00 E+01 ppm  
Plano Z: 10.00 m  
Y de exclusión: 99.49 m  
Desde: 06.45 m  
Hasta: 2269.92 m  
Dist. Máx: 2269.92 m



**Gráfico 22.** Isoconcentraciones para caso Cloro B con z=10 m.

Concentración 1

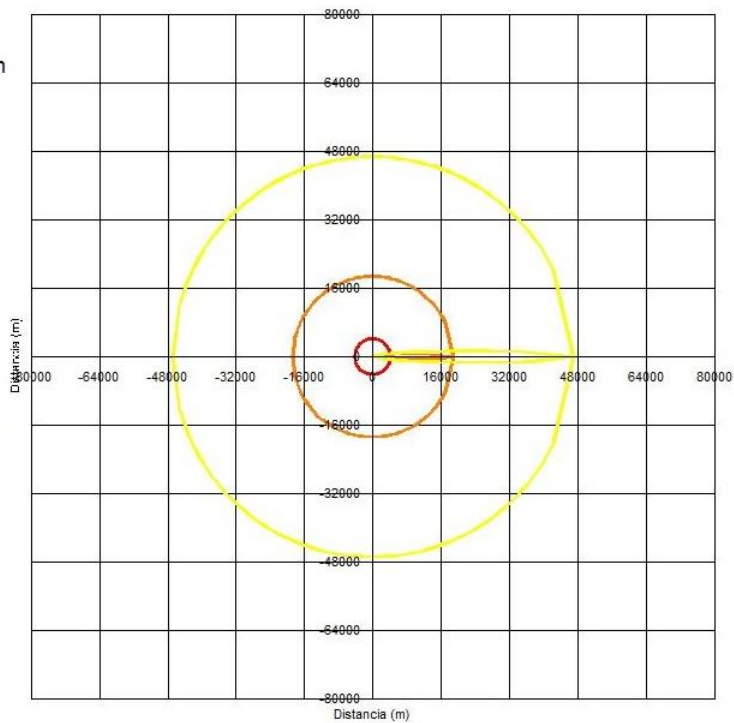
Concentración 2

Concentración 3

Conc. 1: 5.00 E-01 ppm  
Plano Z: 10.00 m  
Y de exclusión: 1329.21 m  
Desde: 06.00 m  
Hasta: 46853.62 m  
Dist. Máx: 46853.62 m

Conc. 2: 2.00 E+00 ppm  
Plano Z: 10.00 m  
Y de exclusión: 665.18 m  
Desde: 05.48 m  
Hasta: 18797.72 m  
Dist. Máx: 18797.72 m

Conc. 3: 2.00 E+01 ppm  
Plano Z: 10.00 m  
Y de exclusión: 197.24 m  
Desde: 08.59 m  
Hasta: 4168.35 m  
Dist. Máx: 4168.35 m



**Gráfico 23.** Isoconcentraciones para caso Cloro C con z=10 m.

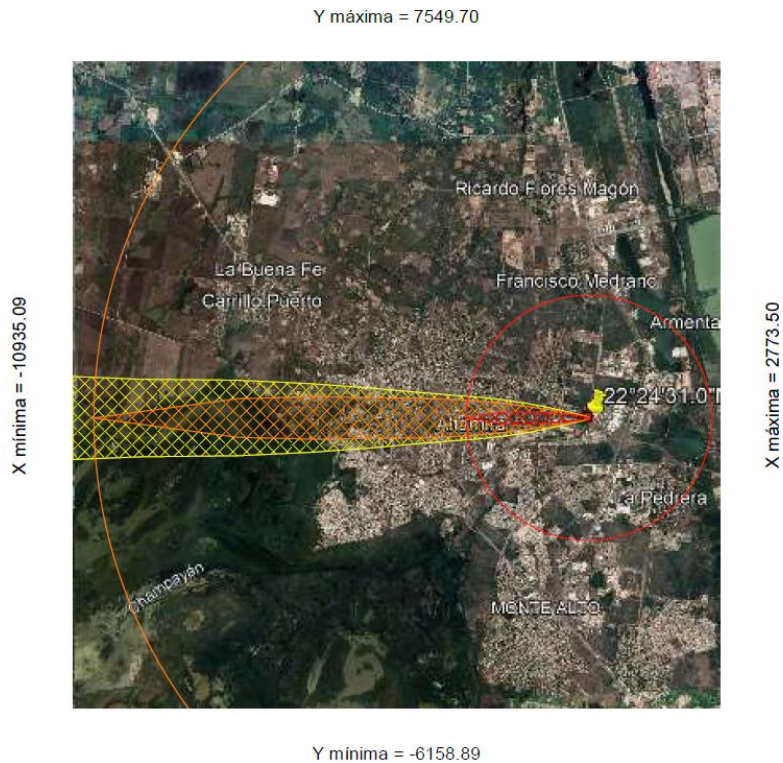


Conc. 1: 5.00 E-01 ppm  
 Plano Z: 10.00 m  
 Y de exclusión: 879.93 m  
 Desde: 04.71 m  
 Hasta: 24652.73 m  
 Dist. Máx: 24652.73 m

Conc. 2: 2.00 E+00 ppm  
 Plano Z: 10.00 m  
 Y de exclusión: 449.57 m  
 Desde: 05.89 m  
 Hasta: 10484.14 m  
 Dist. Máx: 10484.14 m

Conc. 3: 2.00 E+01 ppm  
 Plano Z: 10.00 m  
 Y de exclusión: 129.72 m  
 Desde: 06.50 m  
 Hasta: 2602.26 m  
 Dist. Máx: 2602.26 m

Long. en X:13708.59  
 Long. en Y:13708.59  
 Centro en:(2641.57,2641.57)



**Imagen 11.** Isoconcentraciones para caso Cloro A con  $z=10$  m.

Las Imágenes 11, 12 y 13 muestran cuando se proyecta la pluma en el mapa del sitio. Al igual que en ALOHA, es mucho más sencillo ver cómo afecta la dirección del viento y cuál es la verdadera magnitud de la pluma. En SCRI-Modelos es posible visualizar toda la pluma en el mapa, lo que permite que el estudiante tenga una noción realista de cómo afectaría en las zonas cercanas a la fuga. El mapa sólo permite proyectar plumas hasta 100 km de distancia, lo que no representó una limitante en este caso.

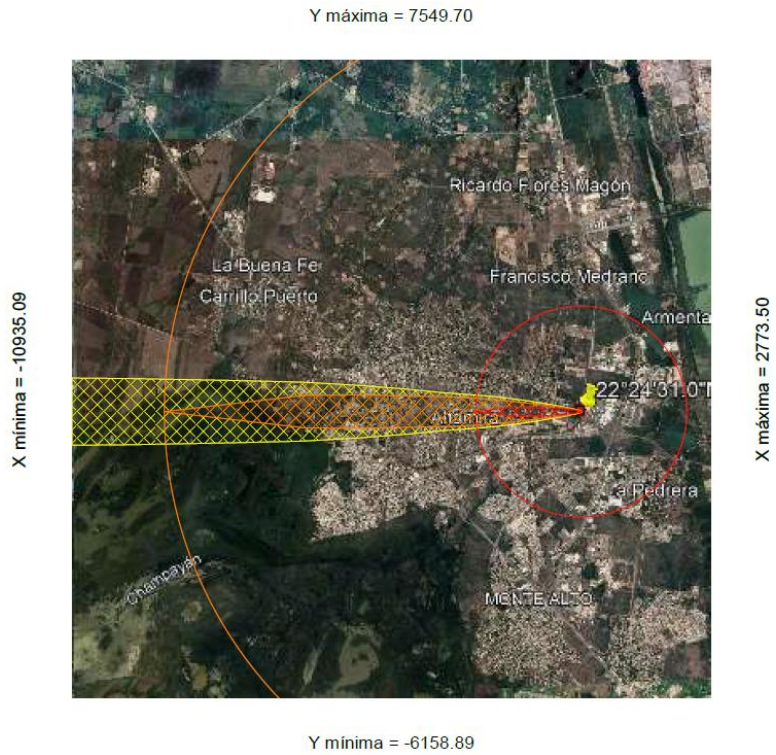
La limitante encontrada en esta sección es que la interfaz del programa no es tan flexible en el manejo de los mapas. Se requiere cargar el archivo que contenga el mapa al programa, lo cual puede disminuir su calidad, y sólo permite visualizarlo por secciones cuadradas. Estos inconvenientes no disminuyen la calidad de la simulación, sin embargo, son un obstáculo para el usuario de SCRI-Modelos.

Conc. 1: 5.00 E-01 ppm  
 Plano Z: 10.00 m  
 Y de exclusión: 723.17 m  
 Desde: 04.70 m  
 Hasta: 20782.20 m  
 Dist. Max: 20782.20 m

Conc. 2: 2.00 E+00 ppm  
 Plano Z: 10.00 m  
 Y de exclusi3n: 359.11 m  
 Desde: 05.87 m  
 Hasta: 8951.63 m  
 Dist. Max: 8951.63 m

Conc. 3: 2.00 E+01 ppm  
 Plano Z: 10.00 m  
 Y de exclusi3n: 99.49 m  
 Desde: 06.45 m  
 Hasta: 2269.92 m  
 Dist. Max: 2269.92 m

Long. en X:13708.59  
 Long. en Y:13708.59  
 Centro en:(2641.57,2641.57)



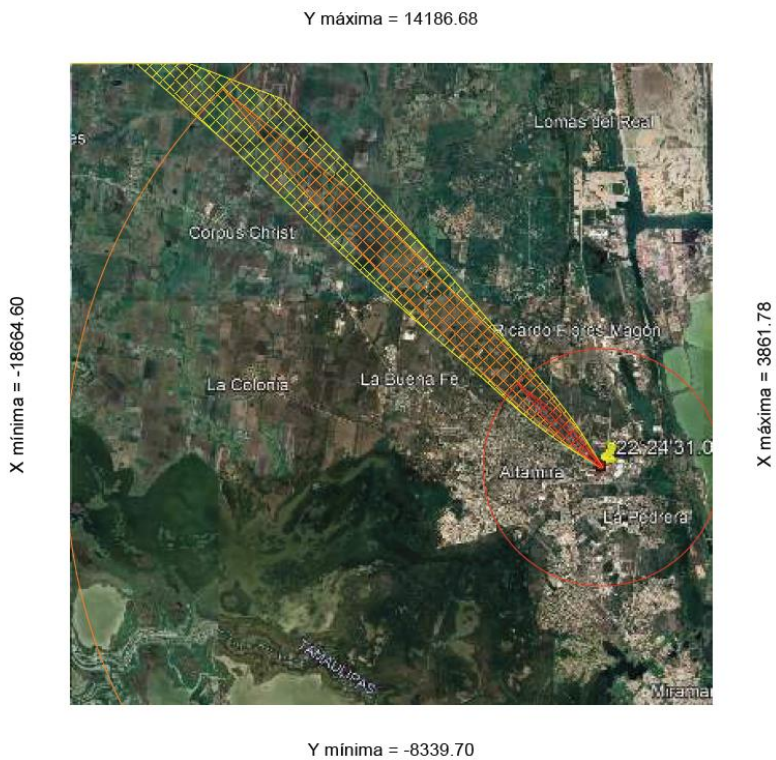
**Imagen 12. Isoconcentraciones para caso Cloro B con z=10 m.**

Conc. 1: 5.00 E-01 ppm  
 Plano Z: 10.00 m  
 Y de exclusi3n: 1329.21 m  
 Desde: 06.00 m  
 Hasta: 46853.62 m  
 Dist. Max: 46853.62 m

Conc. 2: 2.00 E+00 ppm  
 Plano Z: 10.00 m  
 Y de exclusi3n: 665.18 m  
 Desde: 05.48 m  
 Hasta: 18797.72 m  
 Dist. Max: 18797.72 m

Conc. 3: 2.00 E+01 ppm  
 Plano Z: 10.00 m  
 Y de exclusi3n: 197.24 m  
 Desde: 08.59 m  
 Hasta: 4168.35 m  
 Dist. Max: 4168.35 m

Long. en X:22526.38  
 Long. en Y:22526.38  
 Centro en:(6929.93,6929.93)



**Imagen 13. Isoconcentraciones para caso Cloro C con z=10 m.**

En general, y debido a que podemos observar la extensión máxima de la pluma, se nota que en los tres casos revisados la población de Altamira no es la única afectada, sino los terrenos que se encuentran a los alrededores de Altamira, llegando hasta casi 47 km del Complejo Industrial Portuario e incluso, si el viento cambia su dirección, afectaría zonas colindantes en el estado de Veracruz.

### 6.3.1.3 Comparación de programas de simulación.

Los dos programas de simulación estudiados presentan una serie de fortalezas y limitantes que, de acuerdo con los objetivos planteados y recursos disponibles en el aula, se deberán considerar cuando se realiza el análisis de riesgo. En la Tabla 10 se enuncian las principales diferencias encontradas durante el trabajo con los programas en el desarrollo del caso de estudio de Cloro.

**Tabla 10.** Comparación de los programas de simulación.

<b>ALOHA</b>	<b>SCRI-Modelos</b>
El programa selecciona automáticamente el modelo de gases pesados, según los datos alimentados.	La selección del modelo no es automática. Se realizó con el modelo SLAB.
El modelo solo permite visualizar las concentraciones según intervalos definidos por niveles de AEGL y hasta 10 km de distancia viento debajo de la fuente de fuga (Gráficos 11, 12 y 13). Si los valores calculados exceden los intervalos definidos, solo los menciona, pero no entrega el valor. Es posible obtener un perfil sobre los kilogramos por minuto liberados en la fuga; no ofrece perfil de concentraciones según la distancia.	Es posible visualizar el perfil de concentración respecto a la distancia (hasta 100 km) de la fuente de fuga, por ejemplo, el Gráfico 14; cada perfil se puede generar en distintos valores del eje z (Gráficos 14, 15, 16, 17 y 18 para Cloro A). Por lo tanto, permite el análisis de la pluma como un objeto de tres dimensiones.  Además, ofrece un gráfico de isoconcentraciones que no muestra el efecto del viento, sin embargo, permite considerar cualquier cambio en la

	dirección de la pluma y ofrece valores exactos de la simulación.
La sencillez de la interfaz compromete el nivel de detalle de la simulación.	Es posible detectar el efecto de la estabilidad atmosférica (D y E, según sea el caso) en la dispersión de la pluma.
Permite descargar un archivo en formato KML (entre otros) de la pluma para proyectar en Google Maps.	La proyección de la pluma sobre el mapa sucede dentro de la interfaz de SCRI-Modelos. Disminuye la calidad de imagen del mapa y es menos flexible en su manejo.

Se reitera la necesidad de mostrarle al estudiante de ingeniería química la importancia de conocer los alcances de las herramientas que utiliza para sus actividades, ya sea en el análisis de riesgo o en cualquier área en la que se desarrolle, y que los tome en cuenta como un factor que afecta sus resultados.

Los casos de estudio presentados permiten analizar el riesgo que involucra el manejo y almacenamiento de materiales peligrosos. Estos ejemplos permiten inspirarse para hacer una lluvia de ideas sobre los parámetros que se están evaluando y si es el caso, crear versiones propias con el fin de cumplir los objetivos planteados en el currículo de Ingeniería Química.

## **CONCLUSIONES**

Se lograron diseñar tres casos de estudio que se basaron en casos reales, del sector industrial y de servicios. Las sustancias seleccionadas fueron gasolina como material inflamable, nitrato de amonio como material explosivo y cloro como material corrosivo.

Se desarrollaron distintos escenarios que permiten que los estudiantes desarrollen habilidades e integren conocimientos aplicados a eventos reales del ejercicio de la Ingeniería Química.

El uso del software especializado ALOHA y SCRI- Modelos de acceso libre y vía licencia, respectivamente, permiten obtener resultados complementarios para la simulación de los escenarios propuestos. Sin embargo, presentan limitaciones como la distancia máxima de simulación, el tipo de sustancias o mezclas incluidas en su base de datos y el nivel de detalle que ofrecen, por mencionar algunas. Lo anterior, se debe tomar en consideración cuando se realiza la interpretación de los resultados.

## RECOMENDACIONES

Se identificaron las siguientes áreas de oportunidad en el desarrollo del tema:

1. Explorar distintos simuladores. Se recomienda realizar este ejercicio con diferentes simuladores (gratuitos y comerciales), por ejemplo PHAST, y comparar los resultados que ofrecen, sus ventajas y limitantes respecto a otros.
2. Diseñar estrategias de evaluación. Según el protocolo que se presenta en este trabajo, el siguiente paso es la evaluación a los alumnos sobre el ejercicio. Sin embargo, aún es un área que requiere investigación e innovación para satisfacer las necesidades del proceso enseñanza/aprendizaje.
3. Llevar los casos de estudio al aula e integrar la retroalimentación de los estudiantes.



## REFERENCIAS

- Altamira: Coordinación General de Puertos y Marina Mercante. (2019). *Puerto Altamira*. Recuperado en Octubre de 2020 de Puerto Altamira web site: [https://www.puertoaltamira.com.mx/upl/sec/Presentacion\\_General\\_APIALT\\_2019.pdf](https://www.puertoaltamira.com.mx/upl/sec/Presentacion_General_APIALT_2019.pdf)
- Ahn, M. S., Lee, H. E., Cheon, K. S., Joo, H. G., & Son, B.-S. (2020). *Feasibility Evaluation of Designated Quantities for Chemicals Requiring Preparation for Accidents in the Korean Chemical Accident Prevention System*. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17(6), 1927. doi: <http://dx.doi.org/10.3390/ijerph17061927>
- Anaya D., A. (Enero-Febrero de 1998). *Reflexiones sobre la enseñanza de la Ingeniería Química*. *Journal of the Mexican Chemical Society*, 42(1), 34-42. Recuperado en Marzo de 2021 de <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=47542105>
- AP News. (19 de Enero de 2019). *The Latest: Death toll rises to 73 in Mexico pipeline blast*. Recuperado en Enero de 2021 de AP News Web site: <https://apnews.com/article/1c106a2272dc413db4e11db6fc2361c2>
- Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR). (2007). *OHSAS 18001:2007 Sistemas de gestión de la seguridad y salud en el trabajo – Requisitos*. Madrid, España: AENOR Ediciones. Recuperado en Septiembre de 2022 de Tecnológico Nacional de México web site: [http://www.itlp.edu.mx/sig/Normas/OHSAS\\_18001.pdf](http://www.itlp.edu.mx/sig/Normas/OHSAS_18001.pdf)
- BBC News. (21 de Enero de 2019). *Explosión en Hidalgo: qué se sabe de las víctimas de la mayor tragedia por robo de combustible en la historia de México*. Recuperado en Enero de 2022 de BBC News: <https://www.bbc.com/mundo/noticias-america-latina-46936495>
- BBC News Mundo. (5 de Agosto de 2021). *Beirut: el abismo al que se asoma Líbano un año después de la trágica explosión en el puerto de su capital*. BBC News

Mundo. Recuperado en Enero de 2022 de BBC News:  
<https://www.bbc.com/mundo/noticias-internacional-58087128>

Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED). (2014). *Guía Práctica sobre Riesgos Químicos*. Ciudad de México, México: CENAPRED.

Complejo Industrial Altamira. (s.f.). *Mexichem*. Recuperado en Octubre de 2020 de Complejo Industrial Altamira web site:  
<https://complejoindustrialaltamira.wordpress.com/mexichem/>

*Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos (1917)*. México. Recuperado en agosto de 2022 de la versión del 28 de mayo del 2021.

Departamento de Seguros de Texas. (s.f.). *La seguridad con la gasolina*. Recuperado en Enero de 2021 de Texas Department of Insurance:  
<https://www.tdi.texas.gov/pubs/videoresources/spt5gasolinesafety.pdf>

Department of Mines, Industry Regulation and Safety. (2021). *Safe storage of solid ammonium nitrate - code of practice*. (I. R. Department of Mines, Ed.) Western Australia. Recuperado en Febrero de 2022 de  
[https://www.dmp.wa.gov.au/Documents/Dangerous-Goods/DGS\\_COP\\_StorageSolidAmmoniumNitrate.pdf](https://www.dmp.wa.gov.au/Documents/Dangerous-Goods/DGS_COP_StorageSolidAmmoniumNitrate.pdf)

Dinámica Heurística. (2018). *Manual de referencia. Modelos Atmosféricos para Simulación de Contaminación y Riesgos en Industrias*.

Dinámica Heurística. (2021). *SCRI Modelos*. Recuperado en Abril de 2021, de Dinámica Heurística web site:  
<http://www.dinamicaheuristica.com/software/scri%20modelos>

Det Norske Veritas (DNV). (Agosto de 2018). *PHAST flyer*. Recuperado en Agosto de 2021 de DNV web site:  
<https://www.dnv.com/software/services/phast/phast-our-service.html>

EcuRed. (s.f.). *Gasolina*. Recuperado en Enero de 2021 de EcuRed web site:  
<https://www.ecured.cu/Gasolina#:~:text=La%20gasolina%20es%20una%20mezcla,con%20solventes%20y%20otras%20m%C3%A1s.>



Environmental Protection Agency (EPA). (s.f.). *About Risk Assessment*. Recuperado en Abril de 2021, de United States Environmental Protection Agency: <https://www.epa.gov/risk/about-risk-assessment>

Environmental Protection Agency (EPA) y National Oceanic & Atmospheric Administration (NOAA). (1998). *ALOHA. Manual para usuarios. Versión 5.2.2 en español*. Estados Unidos. Recuperado en Abril de 2022 de <https://nepis.epa.gov/Exe/ZyNET.exe/1000375Z.txt?ZyActionD=ZyDocument&Client=EPA&Index=2016%20Thru%202020%7C1991%20Thru%201994%7C2011%20Thru%202015%7C1986%20Thru%201990%7C2006%20Thru%202010%7C1981%20Thru%201985%7C2000%20Thru%202005%7C1976%20Thru%201980%7C>

Environmental Protection Agency (EPA) y National Oceanic & Atmospheric Administration (NOAA). (2016). *ALOHA Fact Sheet*. Recuperado en Abril de 2021 de U.S. EPA website: <https://response.restoration.noaa.gov/sites/default/files/aloha.pdf>

Facultad de Química, (s.f.). *Licenciatura de Ingeniería Química*. Recuperado en Mayo de 2022 de Facultad de Química web site: <https://quimica.unam.mx/ensenanza/licenciaturas/ingenieria-quimica/#perfil-de-egreso>

Flaus, J.-M. (2013). *Risk Analysis. Socio-technical and Industrial Systems*. (J.-P. Bourrieres, Ed.) ISTE, Wiley.

Freeman H., C. (2006a). Case Studies in Science: A Novel Method of Science Education. En C. Freeman Herreid (Ed.), *Start with a story. The Case Study Method of Teaching College Science* (págs. 29-40). Arlington, Virginia, Estados Unidos: NSTA press.

Freeman H., C. (2006b). Sorting Potatoes for Miss Bonner. Bringing Order to Case Study Methodology Through a Classification Scheme. En C. Freeman Herreid (Ed.), *Start With a Story. The Case Study Method of Teaching College Science* (págs. 55-59). Arlington, Virginia, Estados Unidos: NSTA press.

Freeman H., C. (2006c). What Makes a Good Case? Some Basic Rules of Good Storytelling Help Teachers Generate Excitement in the Classroom. En C. Freeman Herreid (Ed.), *Start With A Story. The Case Study Method of Teaching College Science* (págs. 45-48). Arlington, Virginia, Estados Unidos: NSTA press.

Gestion et Exploitation du Port de Beyrouth. (2013). *Port of Beirut*. Recuperado en Febrero de 2022 de Port of Beirut web site: <http://www.portdebeyrouth.com/index.php/en/>

Gómez R., M. F. (febrero de 2018). *Gestión de la prevención de riesgos laborales. Legislación. Elementos. De OHSAS 18001 a ISO 45001*. Universidad de Alicante. Departamento de Ingeniería Química. Recuperado en Septiembre 2022 de Repositorio Insitucional de la Universidad de Alicante (RUA) web site: <https://rua.ua.es/dspace/bitstream/10045/73751/1/Tema-Gestion-de-la-prevencion-material-2018.pdf>

Grupo Barcelonesa. (2 de Septiembre de 2019). *¿Qué sería de la industria sin el cloro (Cl)?* Recuperado en Octubre de 2020 de Grupo Barcelonesa web site: <https://www.grupbarcelonesa.com/es/blog/que-seria-de-la-industria-sin-el-cloro-cl>

Health and Safety Executive. (Noviembre de 2004). *Storing and handling ammonium nitrate*. Recuperado en Febrero de 2022 de Health and Safety Executive web site: <https://www.hse.gov.uk/pubns/indg230.pdf>

Human Rights Watch. (3 de Agosto de 2021). *"They killed us from the inside"*. Recuperado en Febrero de 2022 de Human Rights Watch web site: <https://www.hrw.org/report/2021/08/03/they-killed-us-inside/investigation-august-4-beirut-blast>

International Organization for Standardization (ISO). (2009). *ISO Guide 73. Risk Management-Vocabulary*. Recuperado en Mayo de 2021 de ISO Online Browsing Platform: <https://www.iso.org/obp/ui/es/#iso:std:iso:guide:73:ed-1:v1:en>

- International Organization for Standardization (ISO). (2018). *ISO 31000:2018. Gestión del riesgo-directrices*. Recuperado en Abril de 2021 de ISO Online Browsing Platform: <https://www.iso.org/obp/ui#iso:std:iso:31000:ed-2:v1:es>
- Lee, H. E., Sohn, J.-R., Byeon, S.-H., Yoon, S. J., & Moon, K. W. (2018). *Alternative Risk Assessment for Dangerous Chemicals in South Korea Regulation: Comparing Three Modeling Programs*. International Journal of Environmental Research and Public Health, 15(8), 1600. doi:10.3390/ijerph15081600
- Lee, H. E., Yoon, S. J., Sohn, J.-R., Huh, D.-A., Jang, S.-W., & Moon, K. W. (2019). *Suitability Assessment of Legal Regulation of Chemical Concentrations According to Vapor Pressure and Damage Radius*. International Journal of Environmental Research and Public Health, 16(3), 347. doi:<http://dx.doi.org/10.3390/ijerph16030347>
- Lenntech. (s.f.). *Cloro*. Recuperado en Octubre de 2020 de Lenntech web site: <https://www.lenntech.es/periodica/elementos/cl.htm>
- Ley Federal del Trabajo*. (1970). México. Recuperado en Abril de 2021, de [http://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf\\_mov/Ley\\_Federal\\_del\\_Trabajo.pdf](http://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf_mov/Ley_Federal_del_Trabajo.pdf)
- Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente (LGEEPA)*. (1988). México. Recuperado en Abril de 2021.
- López R., I. (Julio de 2017). *Tesis: Equivalente TNT de diversos explosivos basado en la velocidad de la onda de choque*. Recuperado en Febrero de 2022 de Universidad Politécnica de Madrid: [https://oa.upm.es/47374/1/PFC\\_Irati\\_Lopez\\_Rubio.pdf](https://oa.upm.es/47374/1/PFC_Irati_Lopez_Rubio.pdf)
- Melo, S. (25 de Julio de 2020). *What are the benefits of international standards (ISO)?* Recuperado en Mayo de 2021 de Datascope web site: <https://mydatascope.com/blog/en/what-are-benefits-of-iso/>
- Milenio Digital. (19 de Enero de 2019). *Lo que debes saber del ducto que explotó en Hidalgo*. Milenio. Recuperado en Enero de 2021 de

<https://www.milenio.com/politica/comunidad/radiografia-del-ducto-tuxpan-tula>

Minniti, L., Melo Jr., J., Oliveira, R. D., & Salles, J. A. (2017). *The use of case studies as a teaching method in Brazil*. *Procedia. Social and Behavioral Sciences*(237), 373-377.

Molé, P. N. (Septiembre de 2018). *Top 5 Differences Between OHSAS 18001 and ISO 45001*. *Industrial Maintenance & Plant Operation*, 79(5), 26-28.

Nájar, A. (22 de Enero de 2019a). *Explosión en Hidalgo: qué originó la tragedia de Tlahuelilpan y otras 3 incógnitas que quedan por responder en México*. Recuperado en Enero de 2021 de BBC News: <https://www.bbc.com/mundo/noticias-america-latina-46954992>

Nájar, A. (19 de Enero de 2019b). *Huachicol: cómo funcionan las redes de robo de gasolina en México*. Recuperado en Febrero de 2021 de BBC News: <https://www.bbc.com/mundo/noticias-america-latina-46818927>

Nortech Labs. (s.f.). *The Hazards and Dangers of Ammonium Nitrate*. Recuperado en Enero de 2021 de Nortech Labs web site: <https://nortechlabs.com/customer-service/articles-press-releases/hazards-ammonium-nitrate/>

NT Tank. (s.f.). *Contenedor de tanque*. Recuperado en Octubre del 2020 de Alibaba web site: <https://spanish.alibaba.com/product-detail/10900l-best-price-food-grade-liquid-portable-iso-tank-container-20ft-60697260519.html?spm=a2700.8699010.normalList.16.1baf5304PBxhJc>

Orbia. (s.f.). *Esto es Orbia*. Recuperado en Noviembre del 2020 de Orbia web site: <https://www.orbia.com/es/esto-es-orbia/>

Pasman, H. J., Fouchier, C., Park, S., Quddus, N., & Laboureur, D. (2 de Octubre de 2020). *Beirut ammonium nitrate explosion: Are we not learning anything?* *Process Safety Progress*(39). doi:<https://doi.org/10.1002/prs.12203>

Petróleos Mexicanos (PEMEX). (s.f.). *Hoja de datos de seguridad: Gasolina PEMEX-Premium*. Recuperado en Octubre de 2020 de PEMEX web site: <https://www.pemex.com/comercializacion/productos/HDS/refinados/HDSS-105%20Pemex%20Premium.pdf>

Procuraduría Federal de Protección al Ambiente (PROFEPA). (s.f.). *¿Qué hacemos?* Recuperado en Mayo de 2021 de PROFEPA web site: <https://www.gob.mx/profepa/que-hacemos>

Regional Centre for Mapping Resources for Development (RCMRD). (s.f.). *Port of Beirut Explosion*. Recuperado en Febrero del 2022 de RCMRD web site: <https://storymaps.arcgis.com/stories/69ff1da6899c48f6b334907a421aece9>

Rigby, S. E., Lodge, T. J., Alotaibi, S., Barr, A. D., Clarke, S. D., Langdon, G. S., & Tyas, A. (2020). *Preliminary yield estimation of the 2020 Beirut explosion using video footage from social media*. *Shock Waves*(30), 671-675. doi:<https://doi.org/10.1007/s00193-020-00970-z>

Safi, M., & Roth, A. (6 de Agosto de 2020). *Beirut blast timeline: what we know and what we don't*. *The Guardian*. Reino Unido. Recuperado el Febrero de 2021, de <https://www.theguardian.com/world/2020/aug/06/beirut-blast-timeline-what-we-know-and-what-we-dont-explosion-lebanon>

Secretaría del Trabajo y Previsión Social. (2012). *NOM-028-STPS-2012: Sistema para la administración del trabajo-Seguridad en los procesos y equipos críticos que manejen sustancias químicas peligrosas*. México. Recuperado en Abril de 2021.

Stennett, C., Gaulter, S., & Akhavan, J. (21 de Octubre de 2020). *An Estimate of the TNT-Equivalent Net Explosive Quantity (NEQ) of the Beirut Port Explosion Using Publicly-Available Tools and Data*. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, 45(11), 1675-7679. doi:<https://doi.org/10.1002/prop.202000227>

Televisa News. (3 de Febrero de 2019). *Suman 125 muertos por explosión en Tlahuelilpan, Hidalgo*. Recuperado en Febrero del 2021 de Televisa News :

<https://noticieros.televisa.com/ultimas-noticias/suman-125-muertos-explosion-ducto-tlahuelilpan-hidalgo/>

Yadav, A., Lundeberg, M., DeSchryver, M., Dirkin, K., Schiller, N., Maier, K., & Freeman H., C. (Septiembre/Octubre de 2007). *Teaching Science With Case Studies: National Survey of Faculty Perceptions of Benefits and Challenges of Using Cases*. *The Journal of College Science Teaching*(37), 34-38.

## ANEXO A. GASOLINA

Mezcla compleja de hidrocarburos derivados del petróleo, compuesta principalmente por parafinas y aromáticos.

### Descripción del sitio de estudio.

El Ducto Tuxpan-Tula forma parte de la red de distribución de PEMEX. Inicia en el estado de Veracruz y se extiende a los estados de Puebla e Hidalgo. comienza en Tuxpan, Veracruz, y atraviesa el estado de Puebla hasta llegar a la refinería “Miguel Hidalgo” ubicada en Tula, Hidalgo. A partir de ahí, se ramifica hacia otros destinos como el Valle de México y el Bajío. Tiene un diámetro aproximado de 36 pulgadas y una longitud de 287 kilómetros (Milenio Digital, 2019). El ducto Tuxpan-Tula pasa por el costado del municipio de Tlahuelilpan, ubicado aproximadamente a 100 km de la Ciudad de México, en el Estado de Hidalgo.

### Usos.



*Imagen 14. Gasolina.*

El principal uso de la gasolina a nivel mundial es como combustible en motores de combustión interna con encendido a chispa convencional o por compresión. También tiene aplicaciones en estufas, lámparas, limpieza con solventes, entre otras (EcuRed, s.f.).

### Peligros.

La gasolina también puede tener efectos adversos a la salud. El contacto con la piel puede causar que la misma se seque y se parta. La inhalación de los vapores de gasolina por tiempo prolongado puede causar mareos, náuseas o vómitos, mientras que aspirar sus vapores con la boca puede causar vómitos. La gasolina puede

entrar en los pulmones causando pulmonía química que puede ser mortal. El benceno contenido en la gasolina es agente carcinógeno conocido.

El peligro principal de la gasolina es el fuego o las explosiones. La gasolina líquida no se quema, pero los vapores de gasolina sí. Debido a que los vapores pesan más que el aire, se mantienen cerca al piso y pueden acumularse en áreas bajas. Cualquier fuente de ignición (cigarros, fósforos, un tubo de escape caliente o cualquier chispa) puede prender el vapor de la gasolina. Cuando los vapores de la gasolina se prenden, un galón de gasolina puede explotar con la misma fuerza que 14 cartuchos de dinamita (Departamento de Seguros de Texas, s.f.).

### **Descripción del escenario.**

El 18 de enero del 2019, a las 14:30 h ocurrió una fuga de gasolina resultado de la ordeña clandestina del ducto Tuxpan-Tula a la altura del municipio de Tlahuelilpan, Hidalgo. El hidrocarburo se liberó a una velocidad de 13.40 kg/s durante 60 minutos a una altura de 0 m sobre el suelo. La temperatura fue de 15°C, humedad relativa de 64%, nubosidad media y el viento medido a 10 m proveniente del noroeste a 8.8 m/s. La Imagen 15 muestra las consecuencias en el sitio luego de la explosión.



**Imagen 15.** Sitio de la explosión un día después del accidente (Televisa News, 2019).



**Formato para ALOHA.**

Información básica			
Ubicación	Fecha y Hora	Sustancia	
Tlahuelipan, Estado de Hidalgo, México. 20°7'3" N, 99°13'10" W 2060m	18 de enero del 2019 2:30 pm	Gasolina (N-octano)	Pura
			En solución (%w)

Información meteorológica y del terreno								
Viento								
Velocidad		Dirección				Altura de medición		
Magnitud	Unidades	N	S	E	W	Station for Atmospheric Measurement (SAM)	Otro	
8.8	nudos	NE	NW	SE	SW		National Weather Service	Magnitud
	mph	ó en grados				ft		
	m/s							m

Rugosidad del terreno	Nubosidad	Clase de estabilidad		Inversión	
Campo abierto	Nublado	Inestable		No hay	
Urbano/forestal	Parcialmente nublado	A	B	Sí hay	
Aguas abiertas	Despejado	Neutral		Altura	
o asignar rugosidad (Z <sub>o</sub> )	o asignar valor (0-10)	C	D	Magnitud	Unidades
	cm	Estable			ft
	in	E	F		m

Humedad
húmedo
Medio
Seco
o asignar valor (0-100%)
50

Temperatura (aire)	
Magnitud	Unidades
15	°F
	°C

Fuente de fuga			
Directa	Charco	Tanque	Tubería (solo gases)

## Directa

Tipo de derrame
Continuo
Instantáneo

Altura de la fuente	
Magnitud	Unidades
0	ft
	m

Si es instantáneo...		
Magnitud	Unidades	
	Masa	Volumen
	g	m <sup>3</sup>
	kg	litros
	lb	ft <sup>3</sup>
	tons (2,000 lbs)	gal

Si es continuo...				
Magnitud	Unidades			
13.4	Masa	Volumen	tiempo	Durante (1-60) minutos
	g	m <sup>3</sup>	s	
	kg	litros	min	
	lb	ft <sup>3</sup>	hr	60
	tons (2,000 lbs)	gal	-	

*Tabla 11. Variable propuesta: tipo de fuente.*

Caso	Tipo de fuente	Tipo de evento	Masa de sustancia liberada [kg]
Gasolina A	Directa	Líquido que se escapa y no está en llamas.	48,240
Gasolina B	Tanque	BLEVE ( <i>Boiling Liquid Expanding Vapour Explosion</i> )	48,240

## **ANEXO B. NITRATO DE AMONIO**

Sal cristalina blanca, inodora, higroscópica y altamente soluble en agua producida por la reacción de ácido nítrico y amoniaco.

### **Descripción del sitio de estudio.**

El Puerto de Beirut, se encuentra entre los 10 puertos principales en el Mar Mediterráneo. Además de ser una de las principales entradas al país, se considera la puerta al Medio Oriente y se localiza en el punto medio de tres continentes (Europa, Asia y África) al norte de la ciudad del mismo nombre en el Líbano. Desde la década de los setenta hasta tiempos recientes ha conservado su carácter comercial y recibe anualmente casi 6 millones de toneladas de carga y aproximadamente 3 mil barcos en sus instalaciones (Gestion et Exploitation du Port de Beyrouth, 2013).

### **Usos.**

Es un importante componente en múltiples mezclas de fertilizadores debido a que provee de nitrógeno a las plantas lo que favorece su crecimiento. También se utiliza como aditivo para explosivos utilizados en la industria minera, entre otros usos (Nortech Labs, s.f.).

### **Peligros.**

Bajo condiciones normales de manejo, el nitrato de amonio no es dañino. Sin embargo, la inhalación de altas concentraciones del polvo puede causar irritación en el tracto respiratorio. Entre los síntomas se encuentra tos, inflamación de garganta, falta de aliento o sofocación. Cuando se ingiere en altas concentraciones puede causar dolor de cabeza, mareos, dolor abdominal, vómito, diarrea, debilidad, irregularidades en el corazón o circulación, entre otros. Cuando se mezcla con agua se forma ácido que puede causar irritación en los ojos, nariz y piel (Nortech Labs, s.f.).

No es combustible por sí mismo. Sin embargo, es un agente oxidante fuerte que puede causar que materiales combustibles se incendien. Sólo bajo extremas

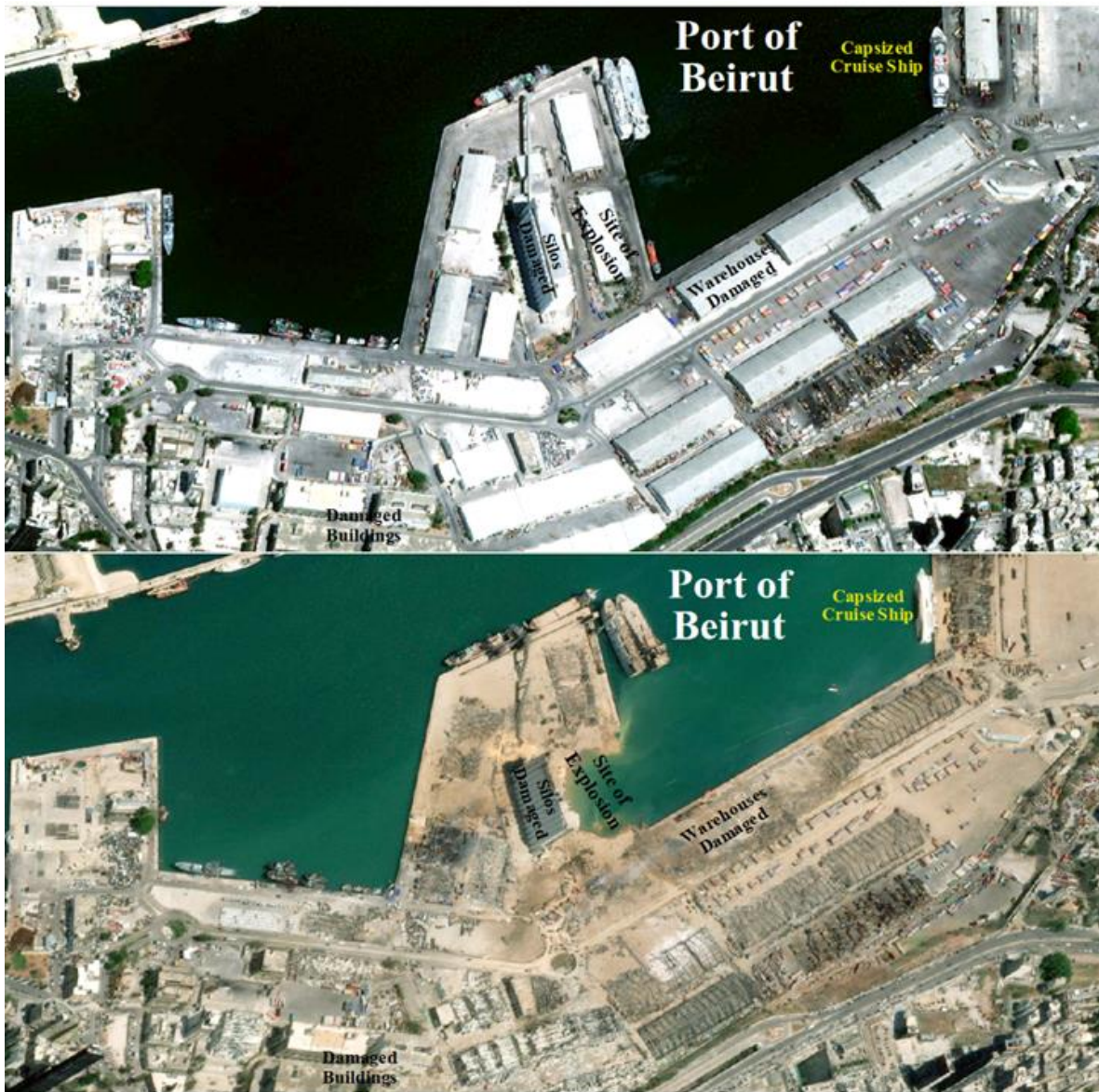
condiciones de calor y presión en un espacio confinado se provocaría una explosión de esta sustancia dejando una nube de amoníaco, dióxido de carbono y óxidos de nitrógeno (Nortech Labs, s.f.). En el caso de un incendio, se derrite y descompone en vapores tóxicos (principalmente óxidos de nitrógeno) que pueden ser de color amarillo o café (Health and Safety Executive, 2004).

### **Descripción del escenario.**

El 23 de Septiembre del 2013 zarpó de Batumi, Georgia el barco mercantil “The Rhosus” con destino a Mozambique, cargado con 2,750 toneladas de Nitrato de Amonio. En su camino, hizo paradas en Turquía y Grecia hasta que, en octubre de 2013, llegó al Puerto de Beirut. Por razones que no han sido esclarecidas, las autoridades portuarias no le permitieron zarpar de nuevo.

Para octubre del 2015, la carga ya había sido trasladada a un almacén del puerto mientras el barco continuaba detenido. Durante los siguientes años, se enviaron múltiples alertas y reportes a las autoridades del país sobre el riesgo que representaba el almacenamiento del nitrato de amonio. Sin embargo, no se llevó a cabo ninguna medida.

El 4 de Agosto del 2020 a las 17:40 hrs, se reportó un incendio en el Puerto de Beirut cuya causa es desconocida. Se observaron múltiples explosiones pequeñas hasta que a las 18:08 hrs se presentó una explosión masiva, la cual es considerada como una de las explosiones no nucleares más grandes de la historia (BBC News Mundo, 2021).



*Imagen 16. Antes y después de la explosión en el Puerto de Beirut (RCMRD, s. f.).*

### Formato para SCRI-Modelos

Simulación de Contaminación y Riesgos en Industrias.	
<b>Modelo ISC3</b>	<b>Modelo de equivalencia TNT</b>
Emisiones puntuales o de áreas	Sobrepresión provocada por nubes explosivas
<b>Modelo SLAB</b>	
Emisión de chorro vertical o de chimenea	Emisión de chorro horizontal

Emisión por evaporación de un derrame	Emisión instantánea o de corta duración
---------------------------------------	---

Características de la explosión	
Título de la modelación	
Nitrato de Amonio A	
Descripción	Fecha
(Opcional)	4 de agosto del 2020
Escenario	
Gas mantenido a 500 PSI de presión o superior	
Licuado por efecto de la presión o la temperatura	
Líquido con punto de ebullición inferior a 21.1°C	
Líquido con punto de ebullición superior a 21.1°C	
Masa de una nube explosiva	
Carga de TNT	

Cantidad de TNT	
500,000	kg

**Tabla 12.** Variable propuesta: carga equivalente en TNT.

Caso	Carga equivalente de TNT	
	[kt]	[kg]
Nitrato de Amonio A	0.500	500,000
Nitrato de Amonio B	0.650	650,000
Nitrato de Amonio C	0.700	700,000
Nitrato de Amonio D	0.936	936,000
Nitrato de Amonio E	1.000	1,000,000
Nitrato de Amonio F	1.120	1,120,000



## ANEXO C. CLORO

Gas amarillo verdoso o líquido ámbar de olor picante, irritante y sofocante.

### Descripción del sitio de estudio.

El Complejo Industrial Portuario de Altamira (Imagen 17) se encuentra ubicado en el norte de México, específicamente en el puerto de Altamira en Tamaulipas. Su localización lo ha posicionado como un importante centro de distribución tanto como para importación como exportación. Dentro del parque industrial se encuentra instalada la compañía Mexichem Resinas Vinílicas que produce y suministra resinas de uso general y un amplio repertorio de especialidades de PVC (Complejo Industrial Altamira, s.f.). El cloro es un componente clave de la producción del PVC. Sin embargo, es un componente altamente tóxico.



-  **5,098** hectáreas de Desarrollo Industrial / **2,800** hectáreas disponibles
-  **3,075** hectáreas de Recinto Portuario / **1.9** mil hectáreas disponibles
-  **1,422** hectáreas de Cordón Ecológico

**Imagen 17.** Complejo Industrial Portuario de Altamira (Altamira: Coordinación General de Puertos y Marina Mercante, 2019).

### Usos.

Además de ser un componente del PVC, el cloro se encuentra en múltiples secciones de la industria química. Se utiliza en la producción de clorofluorocarbonos, óxido de propileno, como blanqueador en la industria del papel,

cómo sustancia para desinfección en plantas de tratamiento de aguas residuales, por mencionar algunos (Lenntech, s.f.).



**Imagen 18.** Contenedor de Tanque de Cloro (NT Tank, s.f.).

## **Peligros**

A nivel de salud, la respiración de pequeñas cantidades de cloro durante cortos periodos de tiempo afecta negativamente al sistema respiratorio humano. Los efectos van desde tos, dolor pectoral hasta retención de agua en los pulmones; además irrita la piel, ojos y tracto respiratorio.

A nivel ambiental, al contacto con agua se disuelve y en el aire se propaga fácilmente. Una vez contenidos en agua o aire, el cloro reacciona con otros compuestos químicos y puede actuar como bactericida o tiene efectos corrosivos (Lenntech, s.f.).

## **Descripción del escenario.**

La compañía Orbia (hasta el 2018 conocida como Mexichem) comenzó como un productor líder de materias primas, y debido a su expansión, actualmente es líder en polímeros, materiales e infraestructura (Orbia, s.f.). Entre su gama de productos, se encuentran resinas de PVC a partir de su producción de cloro combinado con etileno. La mañana (8:30 am) del 8 de junio del 2020, los trabajadores se percatan que uno de los tanques de cloro tiene una fuga circular de 10 cm de diámetro. El tanque, con capacidad de 25,000 litros se encuentra en la zona de almacenamiento en las instalaciones de Orbia en el Complejo Industrial Portuario del Altamira, Tamaulipas. Es un día nublado en el puerto, la temperatura es de 29°C, la humedad relativa de 76% y los vientos provienen del este a una velocidad de 3.92 m/s. Los trabajadores alertan de la fuga y comienzan a realizar los protocolos correspondientes. Días después, el equipo de investigación del accidente identifica



que la fuga fue resultado de una válvula defectuosa ubicada a 0.46 m del fondo del tanque, el cual se encontraba al 70% de su capacidad.

### Formato para ALOHA

Información básica			
Ubicación		Fecha y Hora	Sustancia
Puerto Altamira, Tamaulipas, México. 22°24'31.0"N 97°53'47.2"W Nivel del mar		8 de junio del 2020 8:30 am	Cloro
			Pura
			En solución (%w)

Información meteorológica y del terreno								
Viento								
Velocidad		Dirección				Altura de medición		
Magnitud	Unidades	N	S	E	W	Station for Atmospheric Measurement (SAM)	Otro	
3.916667	nudos	NE	NW	SE	SW		National Weather Service	Magnitud
	mph	ó en grados						
	m/s							ft
								m

Rugosidad del terreno		Nubosidad		Clase de estabilidad		Inversión	
Campo abierto		Nublado		Inestable		No hay	
Urbano/forestal		Parcialmente nublado		A	B	Sí hay	
Aguas abiertas		Despejado		Neutral		Altura	
o asignar rugosidad (Zo)		o asignar valor (0-10)		C	D	Magnitud	Unidades
				Estable			
				E	F		
						ft	
						m	

Humedad
húmedo
Medio
Seco
o asignar valor (0-100%)
76

Temperatura (aire)	
Magnitud	Unidades
29	°F
	°C

Fuente de fuga			
Directa	Charco	Tanque	Tubería (solo gases)

Tanque					
Orientación	Dimensiones (seleccione solo dos)				
Horizontal	Diámetro		Longitud		Volumen
Vertical		ft	6.058	ft	25000 litros
Esférico		m		m	m <sup>3</sup>

Estado de agregación
Solo líquido
Sólo gas
Desconocido

Temperatura (tanque)	
Magnitud	Unidades
	°F
	°C
o temperatura ambiente	

Masa	
	kg
	lb
	tons (2000 lb)

Si solo hay líquido...			Si solo hay gas...	
Volumen			Presión	
	m <sup>3</sup>	o nivel (%)		mmHg
	litros			atm
	ft <sup>3</sup>			psia
	gal		70	Pa

Tipo de falla		
Derrame del tanque, la sustancia química no se quema y forma un charco que se evapora	Derrame del tanque, la sustancia química se incendia y se forma un charco en llamas	BLEVE, el tanque explota y la sustancia química forma una bola de fuego

Si hay derrame...						
Tipo de derrame	Dimensiones					
Forma de la abertura	Diámetro		Longitud		Ancho	
Circular	10	ft		ft		ft
		m		m		m
in			in		in	
cm			cm		cm	
Rectangular						

¿la fuga sucede por...?	Altura desde el fondo del tanque a la fuga		
Orificio		ft	o % del tanque (1-100)
		m	
Tubería/válvula		in	20
		cm	

Parámetros del charco						
Tipo de suelo	Temperatura del suelo		Dimensiones máximas (seleccione 1)			
Predeterminado	Magnitud	Unidades	Diámetro		Área	
Concreto	29	°F		ft		ft <sup>2</sup>
Arena seca				yardas		yardas <sup>2</sup>
Arena húmeda		°C		m		m <sup>2</sup>
Agua			o desconocido			

### Formato para SCRI-Modelos.

Simulación de Contaminación y Riesgos en Industrias.	
<b>Modelo ISC3</b>	<b>Modelo de equivalencia TNT</b>
Emisiones puntuales o de áreas	Sobrepresión provocada por nubes explosivas
<b>Modelo SLAB</b>	
Emisión de chorro vertical o de chimenea	Emisión de chorro horizontal
Emisión por evaporación de un derrame	Emisión instantánea o de corta duración

<b>Sustancia de interés</b>		
<b>Descripción del modelo</b>		
<b>Título de la modelación</b>		
Caso cloro		
<b>Descripción</b>	<b>Temperatura de interés</b>	<b>Fecha</b>
(Opcional)	25°C	8 de junio del 2020
<b>Sustancia</b>		
CLORO		

<b>Parámetros de la emisión</b>			
<b>Tipo de fuente</b>			
Emisión por evaporación de un derrame	emisión de chorro horizontal	Emisión de chorro vertical o de chimenea	Emisión instantánea o de corta duración
<b>Duración de la emisión</b>		<b>Posición de la fuente</b>	
Continua	Finita	X: 0.0 m	Y: 0.0 m
<b>Tasa de emisión de la masa (QS)</b>	<b>Altura de la fuente (HS)</b>	<b>Temperatura del material en la fuente (TS)</b>	<b>Fracción de masa líquida inicial (CMEDO)</b>
91.5 kg/s	0.51 m	302.15 K	0
	<b>Área de la fuente (AS)</b>	<b>Duración de la emisión continua (TSD)</b>	
	0.007854 m <sup>2</sup>	360 s	
<b>Alturas de concentración (ZP)</b>			
0.0 m	30.0 m	70.0 m	100.0 m

<b>Escenarios meteorológicos</b>			
<b>Estabilidad</b>	<b>Temperatura ambiente</b>	<b>Altura del anemómetro</b>	<b>Velocidad del viento</b>
Pasquill Clase D	29 °C	10 m	3.92 m/s
<b>Dirección del viento</b>	<b>Humedad relativa</b>	<b>Rugosidad del terreno</b>	
270°	76%	0.6	

**Tabla 13.** Variable propuesta: condiciones meteorológicas.

<b>Caso</b>	<b>Hora del evento</b>	<b>Temperatura [°C]</b>	<b>Humedad relativa [%]</b>	<b>Velocidad del viento [m/s]</b>	<b>Dirección del viento.</b>	<b>Nubosidad [%]</b>
Cloro A	08:30	29	76	3.92	Este	100
Cloro B	15:00	32	90	5.28	Este	50
Cloro C	02:30	27	66	3.33	Sureste	50