

Universidad de Matanzas
Sede "Camilo Cienfuegos"
Facultad de Ciencias Técnicas
Departamento de Química



TRABAJO DE DIPLOMA

Tesis presentada en opción al título de ingeniero químico

**TÍTULO: EVALUACIÓN DE RIESGOS POR INCENDIOS,
EXPLOSIONES Y NUBES TÓXICAS EN EL TANQUE 24 DE
LA UEB DIVISIÓN TERRITORIAL DE COMERCIALIZACIÓN
DE COMBUSTIBLES MATANZAS**

Autor: Beatriz Alonso Herrera

Tutor: Ing. Yanay Carmenate Martínez

Matanzas, 2021

DECLARACIÓN DE AUTORIDAD

Yo, Beatriz Alonso Herrera, declaro que soy la única autora de este Trabajo de Diploma y lo pongo a disposición de la UEB División Territorial De Comercialización De Combustibles Matanzas (DTCCM) y de la Universidad de Matanzas Sede "Camilo Cienfuegos", para hacer uso del mismo con el objetivo y finalidad que se estime conveniente.



Beatriz Alonso Herrera

“La ciencia puede divertirnos y fascinarnos pero es la ingeniería la que cambia el mundo.”

Isaac Asimov

Dedicatoria

A mis padres, lo más grande en este mundo.

Agradecimientos

Quiero agradecer a todas las personas que me ayudaron de una forma u otra a transitar este largo camino, en especial, a mi familia por todo su apoyo, a todos los profesores que contribuyeron a mi formación como profesional y a mi tutora por toda la ayuda brindada, a todos, muchas gracias.

RESUMEN

Este trabajo de investigación se realiza en la UEB División Territorial de Comercialización de Combustibles Matanzas (DTCCM), ubicada en la zona industrial de dicha provincia. En él se determinan, a través del *software* ALOHA (*Areal Locations of Hazardous Atmospheres*), las áreas afectadas en la Empresa y en el entorno de la misma, ante la ocurrencia de accidentes en el tanque 24 de almacenamiento de diesel, obteniéndose que las mayores áreas de riesgo son las generadas por la formación de un BLEVE. Se determinan, mediante las ecuaciones Probit, las afectaciones humanas en la zona de estudio, y se determinó que el escenario de riesgo que mayor impacto tendría sobre los trabajadores de la planta y la población, es el BLEVE. Se establece que las afectaciones económicas por concepto de reposición de equipos pueden ascender hasta los \$ 54 984 345.

SUMMARY

This research work is carried out in the UEB Territorial Division of Marketing of Fuels Matanzas, located in the area industry in that province. In it are determined, through the ALOHA software (Areal Locations of Hazardous Atmospheres), the affected areas in the Company and in its environment, in the event of accidents in the diesel storage tank 24, obtaining that the largest areas of risk, are those generated by the formation of a BLEVE. Are determined using the Probit equations, the human affectations in the zone of study, and it was determined that the risk scenario that would have the greatest impact about the plant workers and the population, is the BLEVE. Is established that the economic damages due to the replacement of equipment they can go up to \$54 984 345.

Tabla de contenido

INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO I: Análisis Bibliográfico.	3
1.1 Tipos de accidentes que pueden ocurrir en la industria química.....	3
1.2 <i>Softwares</i> utilizados en la evaluación de áreas de atmósferas peligrosas.	8
1.3 Métodos para la determinación del efecto de la radiación y la sobrepresión sobre las personas.....	10
1.4 Características y propiedades del diesel.....	10
1.5 Variables climatológicas.....	11
1.6 Conclusiones parciales.	13
CAPÍTULO 2: Materiales y métodos	14
2.1 Caracterización de la UEB División Territorial de Comercialización de Combustibles Matanzas.....	14
2.2 Caracterización toxicológica del diesel.....	15
2.3 Características y particularidades del <i>software</i> ALOHA.....	17
2.4 Metodología para la determinación del efecto de la radiación y la sobrepresión sobre las personas y las edificaciones.	21
2.4.1 Vulnerabilidad a radiaciones térmicas.	21
2.4.2 Vulnerabilidad a explosiones.	22
2.5 Análisis del Impacto Económico.....	23
CAPÍTULO 3: Análisis de los resultados	25
3.1 Establecimiento de las condiciones de trabajo con el <i>software</i>	25
3.2 Resultados de la aplicación del <i>software</i> ALOHA.	26
3.2.1 Análisis de áreas de atmósferas peligrosas originadas por la nube tóxica.....	26
3.2.2 Análisis de áreas de atmósferas peligrosas originadas por la explosión de una nube de vapor.....	27
3.2.3 Análisis de áreas de atmósferas peligrosas originadas por el <i>pool fire</i>	28
3.2.4 Análisis de áreas de atmósferas peligrosas originadas por el BLEVE..	29

3.3	Análisis de resultados alcanzados por Probit.....	31
3.3.1	Análisis de vulnerabilidad a radiaciones térmicas.....	31
3.3.2	Análisis de vulnerabilidad a explosiones.....	33
3.4	Análisis del Impacto Económico.....	33
3.5	Conclusiones parciales.	34
	CONCLUSIONES	35
	RECOMENDACIONES	36
	BIBLIOGRAFÍA	37
	ANEXOS	42

INTRODUCCIÓN

La industria desempeña un papel básico en el desarrollo de la sociedad. La mayor parte de los productos o materiales que utilizamos en nuestra vida cotidiana proceden de la tecnología industrial química, pero su desarrollo conlleva a la aparición de múltiples situaciones de riesgo que, en ocasiones, se materializan en accidentes de graves consecuencias y en otros que, aunque son de menor magnitud, ocasionan una gran cantidad de víctimas, pérdidas materiales y daños severos al medio ambiente.

Son innumerables los hechos que recoge la historia como consecuencia de incendios, explosiones y nubes tóxicas, provocados por el desconocimiento y la incorrecta manipulación de sustancias peligrosas. Es por ello que en los últimos años se le ha otorgado un espacio importante al estudio de los riesgos industriales, con el fin de disminuir su posibilidad de ocurrencia y de luchar contra la magnitud de sus consecuencias.

La industria del petróleo es un sector que presenta alto riesgo, pues se manejan considerables volúmenes de combustibles que son altamente volátiles, es por ello que los avances están encaminados a crear sistemas cada vez más seguros, donde Cuba no se encuentra ajena a esta situación.

La UEB División Territorial de Comercialización de Combustibles Matanzas es uno de los lugares destinados a la recepción, comercialización y almacenamiento de combustibles. Dicha instalación tiene como política un ambiente de trabajo seguro y condiciones de bienestar físico-mentales para todos los trabajadores, creando las condiciones, capacidades y cultura para desarrollar la actividad laboral de forma eficiente. No por ello está exenta de los riesgos que en este tipo de industria pueden dar lugar a determinados accidentes.

Han sido desarrolladas varias investigaciones, encaminadas a estudiar los escenarios de accidentes químicos que pueden producirse en dicha Empresa, mediante la utilización del *software* ALOHA. Los resultados obtenidos en esta

investigación podrían ser más exactos y precisos, al utilizar una versión más actualizada de este *software*. Esto permitirá modificar el plan de prevención de accidentes.

Por lo antes expuesto, se plantea el siguiente **problema científico**:

No se cuenta con una evaluación actualizada de las áreas de atmósferas peligrosas originadas por accidentes químicos en el Tanque 24 de la UEB División Territorial de Comercialización de Combustibles Matanzas.

Como posible solución al problema se plantea la **hipótesis** siguiente:

Si se utiliza la versión 5.4.7 del *software* ALOHA se podrán obtener resultados más precisos sobre la ocurrencia de accidentes químicos en el Tanque 24 de la UEB División Territorial de Comercialización de Combustibles Matanzas.

Para dar cumplimiento a esta hipótesis se propone el **objetivo general** siguiente:

Evaluar los riesgos por incendios, explosiones y nubes tóxicas en el Tanque 24 de la UEB División Territorial de Comercialización de Combustibles Matanzas.

Objetivos específicos:

- Caracterizar toxicológicamente el diesel.
- Determinar el área de afectación para cada escenario de riesgo bajo las condiciones climatológicas seleccionadas.
- Cuantificar las afectaciones de los escenarios más riesgosos en el área de estudio.

CAPÍTULO I: Análisis Bibliográfico.

En este capítulo se estudian diversas temáticas sobre el análisis de riesgo industrial a partir del criterio de varios autores, con el propósito de obtener las metodologías a aplicar en el presente trabajo de diploma. Para ello, se caracterizan los escenarios de incendios, explosiones y nubes tóxicas que pueden ocurrir en la industria del petróleo. Además, se estudian los principales *software* que son utilizados para estimar áreas de atmósferas peligrosas y los métodos para la determinación del efecto de la radiación y la sobrepresión sobre las personas y las edificaciones.

1.1 Tipos de accidentes que pueden ocurrir en la industria química.

Un accidente es un suceso fortuito e incontrolado, capaz de producir daños. En general, en la industria química, este suceso coincide con situaciones de emisión, escape, vertido, incendio y explosión, donde están implicadas sustancias peligrosas. Si la situación generada se puede calificar como de riesgo grave, catástrofe o calamidad pública para las personas, el medio ambiente y los bienes, se le denomina “accidente mayor” (Casal *et al.*, 2002).

En este epígrafe se hace una presentación general de cuáles son los accidentes de este tipo que pueden suceder en instalaciones industriales, ya sean nubes tóxicas, incendios o explosiones, así como sus características principales.

La nube tóxica se forma a partir de la dispersión de gases con características toxicológicas. En este sentido, de los diferentes accidentes desarrollados que pueden considerarse como consecuencia de la emisión de una sustancia, las mayores distancias de consecuencias suelen venir asociados a las nubes tóxicas, donde el concepto de interés es la dosis inhalada (Fernández, 2008).

El término dispersión es utilizado en la modelización de accidentes para describir la evolución de una nube de gas tóxica o inflamable en la atmósfera. La dispersión de una nube de gas sigue una difusión, o transporte de su masa, producida por el

movimiento molecular del aire mientras se va diluyendo a medida que va disminuyendo su concentración, a causa de la entrada de nuevas moléculas de aire dentro de la nube. La dispersión incluye el desplazamiento de la masa en la dirección del viento, y su expansión en sentido transversal al viento, tanto vertical como horizontal (Casal *et al.*, 2002).

Entre los diversos accidentes que pueden ocurrir en una industria, el incendio es el que, en términos generales, tiene un radio de acción menor. No obstante, sus efectos pueden ser temibles, pues la radiación térmica puede afectar a otras partes de la planta y generar nuevos accidentes (explosiones o escapes) (Casal *et al.*, 2002).

Ramírez (2019), Rechi (2019) y Zhang (2018) definen el incendio como una manifestación del fuego que se desarrolla sin control en el tiempo y en un lugar imprevisto, provocando daños y pérdidas. El fuego es un fenómeno de reacciones químicas de oxidación-reducción con un elevado potencial exotérmico.

Los accidentes de incendios más comunes que tienden a ocurrir en las industrias son el *pool fire* (charco de fuego), el BLEVE/bola de fuego, el *jet fire* (chorro de gas o dardo de fuego), y el *flash fire* (incendio de una nube de gas o llamarada).

El incendio de charco o piscina de fuego, como también se le conoce, es una llama de difusión turbulenta que se produce sobre un charco horizontal de combustible que se vaporiza debido a la aportación calorífica del propio incendio. El suceso que desencadena este tipo de incendio es el vertido de un líquido inflamable que se extenderá sobre el suelo alcanzando un espesor reducido o, si existe una zona de contención, formando un charco de mayor profundidad. Se trata de un caso en el que el incendio se produce en una condición abierta, es decir, no presurizada. El *pool fire* ocurre una vez que se produce una rotura en una línea que transfiere un fluido líquido y este a su vez se derrama. Cuando ocurre la evaporación instantánea del producto derramado, se puede originar una nube inflamable, la cual entra en ignición y posteriormente ocurre el incendio del

producto que permanece esparcido sobre la superficie (Ferrero, 2006; Liu *et al.*, 2019; Piedra y Valdivieso, 2013).

El escenario BLEVE/bola de fuego se refiere a la bola de fuego que se produce por el estallido súbito y total, por calentamiento externo, de un recipiente que contiene un gas inflamable licuado a presión, cuando el material de la pared pierde resistencia mecánica y no puede resistir la presión interior. El calentamiento extremo es generalmente producido por un incendio de charco o de dardo de fuego, y la probabilidad de que estalle es especialmente elevada, en los casos en los que hay un contacto directo de la llama con la superficie del recipiente (Casal *et al.*, 2002).

Varios autores definen el dardo de fuego como la ignición de una fuga continua de gases o vapores inflamables contenidos en tuberías o en recipientes sobrepresionados. Se produce a través de un orificio pequeño respecto al tamaño del contenedor, o por una tubería, generándose una salida turbulenta del combustible en forma de chorro, produciendo una llama estacionaria y alargada. La duración de este vector puede variar desde unos segundos hasta horas, en dependencia de la cantidad de combustible y de la fase en que se encuentre la sustancia inflamable (Casal *et al.*, 2002; Ibarra, 2016; Reche, 2017; Zhou *et al.*, 2018).

Otro de los incendios que pueden manifestarse en las industrias son los de nube de gas, que no son más que una llama progresiva de difusión, de baja velocidad, que no produce ondas de presión significativas. Tiene lugar cuando se produce el vertido de un gas o un vapor inflamable, de manera que se forma una nube que se va dispersando hasta que encuentra una fuente de ignición, donde el frente de la llama generada se propaga hasta el punto de emisión, barriendo y quemando toda la zona ocupada por los vapores en condiciones de inflamabilidad. Si el origen de los vapores es un vertido con evaporación, el fenómeno acaba en un incendio de charco (Casal *et al.*, 2002; Gyenes *et al.*, 2017).

Las explosiones son las que dan lugar a una fuga iniciando una cadena de accidentes que puede continuar con emisión térmica, incendio y otras explosiones. Son el incidente más destructivo que puede ocurrir en una industria de hidrocarburos (Lugo, 2015; Nolan, 2011). La característica principal que define a una explosión es la generación de una onda de presión debida a la liberación de energía extremadamente rápida, que se propaga en todas las direcciones. Esta liberación tiene que ser, no obstante, bastante rápida y concentrada para que la onda que se genera sea audible. No es necesario que se produzcan daños para poder considerar este fenómeno como explosión. La energía liberada puede haber sido almacenada inicialmente bajo una gran variedad de formas: nuclear, química, eléctrica o de presión (Casal *et al.*, 2002; He y Weng, 2019; Reche, 2017).

Dentro de los tipos de explosión que se manifiestan en la industria química se encuentran: explosión de vapor confinado (VCE), explosión de una nube de vapor inflamable no confinada (UVCE) y BLEVE (*Boiling Liquid Expanding Vapour Explosion*).

La explosión de vapor confinado ocurrirá cuando exista una fuga de gas o vapor inflamable que no se incendia inmediatamente, dando origen a la formación de una nube. Este tipo de explosiones son más numerosas en las instalaciones que utilizan combustibles gaseosos que en las que emplean sustancias explosivas. A esto se debe sumar que las nubes gaseosas se desplazan, por lo que es más sencillo y probable que encuentren un punto de ignición, fuera incluso de la propia instalación donde se han generado. Entre otros factores, la posibilidad de ocurrencia de una VCE depende de la concentración de un producto inflamable en la nube, la energía de la fuente de ignición y el nivel de confinamiento, siendo su mayor efecto la formación de ondas de sobrepresión (Atkinson *et al.*, 2017; Velásquez, 2009).

Casal *et al.*, (2002) plantea que las nubes de vapor no confinadas se generan a raíz del escape de una cantidad determinada de un vapor combustible, o bien de un líquido a partir del cual se formará el vapor. Además, añade que representan

uno de los mayores peligros dentro de la industria química, pues, a pesar de que los escapes tóxicos producen más víctimas, estas ocurren con mucha mayor frecuencia. El problema principal de este tipo de explosiones proviene del hecho que, además del alcance que puede llegar a tener la nube, la ignición de esta puede producirse en un punto alejado de la fuente origen del vertido y afectar a grandes áreas. Puesto que no todas las mezclas combustible-aire son inflamables y no todos los gases son inflamables, para que tenga lugar la explosión de la nube, debe producirse la mezcla entre el combustible y el aire dentro de los límites de inflamabilidad. Si el punto de ignición está muy cerca del origen de la fuga, el resultado será un incendio de chorro o de charco, según las características de la fuga. Por otro lado, la magnitud de la onda de sobrepresión generada depende de la velocidad de propagación de la llama; cuanto mayor sea esta, mayor será la sobrepresión alcanzada.

Una BLEVE es la explosión de un recipiente que contiene un líquido que se encuentra por encima de su punto de ebullición normal. Cuando el recipiente se rompe, parte del líquido se vaporiza súbitamente y generalmente pasa una gran cantidad de producto del estado líquido al gaseoso, cuya expansión origina la onda de presión. Si el producto involucrado es inflamable se puede producir la bola de fuego. La parte del recipiente situada por debajo del nivel del líquido le transmitirá el calor recibido, por lo que se calentará mucho menos que la parte superior. En caso de abertura de una válvula de seguridad, la ebullición del líquido implicará una refrigeración aún mayor de esta superficie, debido al calor de vaporización (Casal *et al.*, 2002; Ramírez, 2019; Reche, 2017).

Según Galán (2012) las causas principales que originan el BLEVE son:

- Líquido sobrecalentado.
- Rápida bajada de presión, que puede estar provocada por fisuras (rotura del recipiente, impactos mecánicos sobre el recipiente) o acción de discos de ruptura, directos al depósito.

- En relación con las dos anteriores, que la presión y la temperatura concretas, para cada producto, permita la nucleación espontánea (formación súbita y simultánea de burbujas en toda la masa del líquido), provocando una evaporación rapidísima.

Este accidente es considerado uno de los más graves que pueden ocurrir en la industria de procesos o durante el transporte de productos peligrosos, y no solo produce una tremenda cantidad de radiación térmica, sino también a menudo hace que partes del tanque sean arrojadas a cientos de metros (Reche, 2017).

1.2 Softwares utilizados en la evaluación de áreas de atmósferas peligrosas.

La Comisión Técnica de Prevención y Reparación de Daños Medioambientales (CTPRDM, 2019) plantea que entre los *software* que se utilizan para evaluar áreas de atmósferas peligrosas se encuentran los siguientes: ALOHA (*Areal Locations Of Hazardous Atmospheres*), PHAST (*Process Hazard Analysis Software Tools*), SCREEN y AERMOD. A continuación se mencionan algunas de sus características.

ALOHA es un programa de modelización desarrollado conjuntamente por la Agencia de Protección Ambiental (EPA) y por la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica (NOAA). Varios autores afirman que este *software* ha sido uno de los más aplicados. Es un modelo de dispersión sencillo, diseñado inicialmente para responder ante emergencias, por ello, los datos de entrada necesarios son relativamente fáciles de obtener. Estima zonas de riesgo asociadas a la emisión de compuestos peligrosos. También es posible calcular la concentración del compuesto en un punto (en el exterior y en el interior de un edificio), fijando la distancia al foco y el ángulo con respecto a la dirección del viento (CTPRDM, 2019; Martín, 2018; Moyano *et al.*, 2020).

PHAST es una herramienta desarrollada por DNV (*Det Norske Veritas*) para el análisis de peligros. Calcula la concentración del contaminante en función de la distancia, la dosis en el receptor, el nivel o dosis de radiación y la sobrepresión. Es posible así, determinar también la distancia máxima a la que se supera un

determinado límite. Los resultados se muestran tanto en forma tabular como gráfica. Esta salida gráfica puede personalizarse de una manera muy amplia para todos los casos y parámetros. Además, es posible superponer representaciones gráficas de los efectos o alcances sobre imágenes del entorno. No es un *software* gratuito, por lo que se necesita de una licencia para su utilización (Castillo *et al.*, 2001; CTPRDM, 2019).

SCREEN es un modelo de dispersión atmosférica sencillo recomendado por la EPA para el análisis inicial de emisiones de proyectos en su fase de diseño. Es un modelo muy conservador pues en su simplificación supone el peor caso para algunos parámetros que afectan a la dispersión de contaminantes. Incorpora factores meteorológicos del entorno y características de la fuente, además, incluye todas las combinaciones posibles de estabilidad y velocidad del viento, y permite seleccionar en cada caso las condiciones de impacto máximo. Muestra en forma de tabla las concentraciones máximas calculadas en función de la distancia (Castro *et al.*, 2013; CTPRDM, 2019).

AERMOD es un modelo de dispersión atmosférica refinado, también recomendado por la EPA. Es más complejo que SCREEN y ALOHA, por lo que su uso requiere una mayor experiencia. El tiempo necesario para correr el modelo dependerá de los datos de entrada y del tratamiento estadístico que se pida a los resultados. La duración de la simulación puede llevar desde varias horas hasta pocos días. Una de las limitaciones es que asume que las condiciones meteorológicas no varían en todo el área de estudio para cada hora modelizada, por tanto, el modelo no es muy preciso en áreas donde estas condiciones varían de forma significativa, como terrenos de orografía muy compleja, fondos de valle encajonados donde cambia la dirección del viento o zonas costeras afectadas por fumigación costera (CTPRDM, 2019).

La autora considera que el *software* ALOHA es el programa idóneo para evaluar las atmósferas peligrosas, pues el mismo ofrece sus resultados de forma rápida,

es un *software* gratuito y tiene un margen mínimo de error. Además está avalado por el Ministerio de Ciencia Tecnología y Medio Ambiente de Cuba (CITMA).

1.3 Métodos para la determinación del efecto de la radiación y la sobrepresión sobre las personas.

Los efectos de la radiación y de la sobrepresión sobre los seres humanos y las estructuras son diversos y dependen de sus niveles de incidencia, por lo cual resulta importante definirlos para estimar las consecuencias que pueden provocar. Para ello se han desarrollado los llamados modelos de vulnerabilidad, los cuales se basan en experiencias realizadas con animales en laboratorios o en estudios de las muertes o lesiones de accidentes ocurridos (Turmo, 1991).

Probit es un método muy destacado entre los modelos de vulnerabilidad, el cual nos da una relación entre la función de probabilidad y una determinada carga de exposición a un riesgo. Permite determinar el porcentaje de la población expuesta que se verá afectada a un determinado nivel de lesiones o por muerte, a causa de una carga de exposición determinada, dichos valores se encuentran tabulados como parte indispensable de aplicación del método (Díaz, 2006; Domínguez, 2014; Ibarra, 2016; Turmo, 1991).

La autora considera que el método Probit es el método idóneo para medir el impacto ambiental, pues estima el porcentaje de la población que se encuentra afectada por un riesgo, ya sea por intoxicación o por sobrepresión, dando valores con un mínimo de error.

1.4 Características y propiedades del diesel.

El diesel es una mezcla compleja, compuesta aproximadamente por 75% de hidrocarburos alifáticos saturados y un 25 % de hidrocarburos aromáticos. Se obtiene por destilación fraccionada del petróleo entre 250 y 350 °C a presión atmosférica. La fórmula química general del diesel común es $C_{12}H_{23}$, incluyendo

cantidades pequeñas de otros hidrocarburos cuyas fórmulas van desde $C_{10}H_{20}$ a $C_{15}H_{28}$ (Bastidas y Bolaños, 2014; Flores, 2013).

Es un líquido de color blancuzco o verdoso y de densidad sobre 850 kg/m^3 , utilizado principalmente como combustible en motores diesel y en calefacción. El diesel es más sencillo de refinar que la gasolina y suele costar menos, aunque tiene mayores cantidades de compuestos minerales y de azufre. La composición específica varía según la fuente de petróleo crudo, el grado de transformación química tal como la fragmentación, reformación y de los métodos de separación. Típicamente los alcanos son el grupo principal dentro del diesel, estos químicos son generalmente los que emiten la mayoría de calor cuando son quemados.

Es un material combustible que puede arder por calor, chispas, electricidad estática o llamas. El vapor puede alcanzar fuentes remotas de ignición e inflamarse. La exposición repetida y prolongada a altas concentraciones de vapor causa irritación de las vías respiratorias y alteraciones del sistema nervioso central (Quirós *et al.*, 2019).

1.5 Variables climatológicas.

El desplazamiento y dispersión de los vapores y gases en la atmósfera depende, en gran medida, de las condiciones meteorológicas existentes en la zona donde ocurre el escape de las sustancias químicas, por lo tanto, es de suma importancia conocer las variables climatológicas más representativas de las mismas.

El clima de la zona objeto de estudio está influenciado tanto por aspectos físicos como geográficos. La situación geográfica, en la zona tropical, garantiza energía suficiente durante todo el año, para favorecer la ocurrencia de características climáticas tropicales. No obstante, la cercanía a la zona extra tropical y al continente norteamericano, así como la influencia de la zona de altas presiones, garantizan la llegada de condiciones subtropicales, de manera intermitente.

A continuación, se describe el comportamiento de las principales variables climatológicas analizadas.

Nubosidad: la menor nubosidad ocurre durante el mes de abril, con un promedio de 3 octa, mientras que la mayor nubosidad ocurre durante los meses de julio, agosto y septiembre, con 5 octa como valor promedio.

Temperatura del aire: la temperatura media anual es de 23,8 °C, los promedios mensuales más altos ocurren en julio (26,3 °C) y agosto (26,1 °C), mientras que los promedios mensuales más bajos ocurren en enero (20,6 °C) y febrero (20,5 °C). La temperatura no varía más del 3% durante los meses del año; esto muestra su estabilidad.

El comportamiento del régimen térmico define la zona como costera, con días cálidos de pequeña oscilación diaria y días frescos. Existen en el año dos períodos definidos, de mayo a septiembre, con un predominio de días muy cálidos, y otro de noviembre a marzo, con días frescos, aunque en ocasiones pueden llegar a ser fríos. Entre ambos aparecen espacios de tiempo donde se entremezclan estas características y que se definen como pequeños períodos de tránsito, quedando definido cuatro épocas fundamentales: un verano, un invierno y dos períodos de transición: uno del invierno al verano y otro del verano al invierno.

Humedad: los valores de humedad relativa más altos durante todo el año son encontrados cerca de la costa. El promedio anual en Matanzas es de 79%, con valores medios mensuales superiores a 75% durante casi todo el año. Abril es el mes menos húmedo, con un promedio de 73%, mientras que los meses de mayores reportes son septiembre y octubre, con valores de 84%. Al igual que para la temperatura del aire, el coeficiente de variación no excede el 2%, lo cual muestra cuán estable es la humedad relativa mensual.

Viento: la dirección del viento predominante en la zona es Este (E), con una frecuencia de ocurrencia de 15,2%, seguido de los vientos Este-Noreste (ENE), con una frecuencia de 9,2%. La suma de la frecuencia de los vientos del primer

cuadrante (N-E) y la de los siguientes rumbos cercanos al Este (E), Este-Sureste (ESE) y Sureste (SE) alcanzan un valor de 52,2%, más un 33% de frecuencia de las calmas, lo cual deja al resto de los vientos de otros rumbos un 14,8% de frecuencia de ocurrencia (Orozco *et al.*, 2019). En el Anexo 1 aparece la distribución de la velocidad y la dirección del viento en el área de estudio.

En el Anexo 2 se muestra el comportamiento de las variables climatológicas de la zona de estudio.

1.6 Conclusiones parciales.

- El diesel presenta características y propiedades significativas, por lo que se considera una sustancia meritoria de análisis de riesgos.
- El *software* ALOHA es el más usado para la evaluación de atmósferas peligrosas.
- Las ecuaciones Probit son un método sencillo para la determinación de las posibles afectaciones a las personas de la planta y sus alrededores.

CAPÍTULO 2: Materiales y métodos

En este capítulo se realiza una caracterización de la Empresa, se caracteriza toxicológicamente la sustancia objeto de estudio: diesel y se describen las metodologías de análisis y evaluación de riesgos.

2.1 Caracterización de la UEB División Territorial de Comercialización de Combustibles Matanzas.

El 18 de noviembre de 2018, se dispuso por el MEP (Ministerio de Empresas del Petróleo) la autorización para la fusión de las 13 Empresas Comercializadoras de Combustibles, integradas a la Unión Cubapetróleo, dando como resultado la creación de la Empresa Nacional Comercializadora de Combustibles (ENCC). Mediante la Resolución No. 3/2019, la ENCC crea la UEB División Territorial de Comercialización de Combustibles Matanzas (Pérez, 2019).

La DTCCM se encuentra localizada en el kilómetro 4.3, Carretera Zona Industrial, Versalles, Matanzas. La misma se encarga de comercializar combustibles, garantizando cantidad, plazo, calidad y uso racional. Sus principales mercados son las termoeléctricas, la Unión del Cemento, la generación de electricidad por Grupos Electrógenos de Diesel y Petróleo Combustible, la Cadena de Servicentros, el Níquel y la red minorista. Las vías de comercialización utilizadas por la UEB son: la terrestre a través de camiones cisternas, oleoductos y ferrocarriles y la marítima, siendo esta última la más importante, pues a través de ella se comercializan los mayores volúmenes de combustible.

La Empresa cuenta con cinco áreas operacionales para realizar la comercialización:

- Terminal 320 (T-320): en esta área se operan básicamente los productos blancos. El combustible se comercializa utilizando carros cisterna y ferrocarriles.

- Base de Crudo y Suministro (BCS): se operan en esta área generalmente los productos negros. Aquí convergen los oleoductos de las principales productoras de crudo del país, además se realizan mezclas para mejorar el Petróleo Crudo Nativo.
- Base en Tierra o Base de Supertanqueros (BST): en esta área se almacena fundamentalmente Petróleo Combustible y Diesel.
- Planta Caribe o Planta de Gas Licuado del Petróleo: se dedica a la recepción del gas y el llenado y distribución de botellones a toda la provincia, usando la vía terrestre por camiones cisternas, y la marítima.
- Área de los muelles: la Empresa cuenta con cuatro muelles que se dedican a la entrega y recepción de los diferentes combustibles.

Además, cuenta con un laboratorio para el control de calidad en las operaciones, con un alcance de 20 ensayos acreditados, un taller para realizar operaciones de mantenimiento y una planta de tratamiento de residuales.

2.2 Caracterización toxicológica del diesel.

El primer paso para una identificación correcta del peligro potencial de una instalación industrial es la identificación y caracterización de las sustancias involucradas en el proceso. Para ello, se utiliza la guía propuesta por Orozco (2017).

Identificación del producto.

- Nombre del producto.
- Fórmula química.
- Etiquetado de peligro (frases R y S), así como las que la identifican por otros efectos.

Datos físicos.

- Apariencia.
- Punto de ebullición.

- Punto de fusión.
- Solubilidad.
- Densidad.
- TLV (límite superior de inflamabilidad).
- IPVS (límite inferior de explosividad).
- Punto de congelación.
- Temperatura de autoignición.
- Coeficiente de expansión.
- Temperatura de inflamación.
- Energía mínima de ignición.
- Biodegradabilidad.
- Corrosión.
- Capacidad calorífica.

Peligros para la salud.

- Concentración permisible.
- Exposición permisible.
- Partes del cuerpo que afecta.
- Forma de entrada al organismo.
- Toxicidad.

Tabla 2.1: Modelo para la clasificación toxicológica de las sustancias involucradas en el proceso.

Sustancia	Toxicidad							
	TA	I	SB	TDR	MG	CG	C	TR

Fuente: Orozco (2017)

Leyenda:

TA: Toxicidad aguda.

I: Irritación.

SB: Sensibilización.

TDR: Toxicidad por dosis repetida.

MG: Mutagenicidad.

CG: Carcinogenicidad.

C: Corrosión.

TR: Toxicidad para la reproducción.

Condiciones de almacenamiento y manipulación.

- Nombre del producto almacenado.
- Forma del recipiente (cilíndrico, rectangular, vertical, horizontal, etc.).
- Dimensiones del recipiente (largo, ancho, diámetro).
- Material de construcción.
- Protección del recipiente (interior o exterior).
- Condiciones de almacenamiento de la sustancia.
- Características de los alrededores del recipiente.

Condiciones para su uso en el proceso.

- Uso en el proceso.
- Condiciones en las que se usa la sustancia (presión, temperatura).
- Fallos ocurridos en estos equipos al operar con estas sustancias.
- Material de construcción de los equipos donde se almacena la sustancia.
- Protección del sistema de tuberías.

En el Anexo 3 aparece la caracterización del diesel.

2.3 Características y particularidades del software ALOHA.

El programa ALOHA emplea en sus cálculos dos modelos de dispersión: un modelo Gaussiano para gases ligeros que ascienden rápidamente, y el modelo *Degadís* para gases densos que se dispersan a ras de suelo. Ambos modelos predicen la velocidad de emisión de vapores químicos que escapan a la atmósfera desde tuberías rotas, fugas de tanques, charcos de líquidos tóxicos en

evaporación o directamente desde cualquier otra fuente de emisión. Por tanto, ALOHA es capaz de estimar cómo una nube de gas peligrosa podría dispersarse en la atmósfera después de una descarga química accidental. Es de ejecución rápida en ordenadores de sobremesa y portátiles, que son fácilmente transportables y accesibles al público (Armijos, 2020; Cruz, 2013; Moyano *et al.*, 2020).

ALOHA no modela todas las condiciones de intensidad de la fuente, escenario y categorías de peligro para escenarios de combustión. El usuario debe elegir una combinación específica de una selección limitada. La Tabla 2.2 muestra las combinaciones de modelos de escenarios permitidas en el *software*.

Tabla 2.2: Categorías de riesgo modeladas en ALOHA.

Escenario/ Fuente	Fuente directa	Tanque	Charco	Tubería de gas
Nube tóxica	Vapores tóxicos	Vapores tóxicos	Vapores tóxicos	Vapores tóxicos
Flash fire	Área inflamable	Área inflamable	Área inflamable	Área inflamable
Nube explosiva	Sobrepresión	Sobrepresión	Sobrepresión	Sobrepresión
Pool fire		Radiación térmica	Radiación térmica	
BLEVE		Radiación térmica		
Jet fire		Radiación térmica		Radiación térmica

Fuente: Jones (2013)

Este *software* utiliza una interfaz gráfica para la entrada de datos y la visualización de los resultados. El área donde existe la posibilidad de exposición a vapores tóxicos, una atmósfera inflamable, sobrepresión de una explosión de nube de vapor o radiación térmica de un incendio, se representa gráficamente como zonas de riesgo. Estas zonas representan el área dentro de la cual la concentración a nivel del suelo de un gas contaminante excederá del Nivel de Preocupación (LOC: *Level of concern*) seleccionado por el usuario, después de iniciarse la descarga accidental. Se define Nivel de Preocupación como el valor umbral a partir del cual se considera que los seres vivos y bienes materiales, dentro de la zona de riesgo, se encuentran en peligro.

Para compuestos inflamables que ya han comenzado a arder, ALOHA solo muestra un posible escenario de peligro:

- Radiación térmica emitida por el incendio (*Thermal radiation*)

La radiación térmica es el riesgo primario asociado con un *Jet fire*, *Pool fire* y BLEVE. El usuario puede seleccionar los Niveles de Preocupación que almacena el *software* o puede definir un nuevo valor, si dispone de información técnica suficiente para ello.

Se utilizan tres valores de LOC, medidos en kW/m².

- Rojo: 10 kW/m² (Potencialmente letal en 60 segundos)
- Naranja: 5 kW/m² (quemaduras de segundo grado en 60 segundos)
- Amarillo: 2 kW/m² (dolor en 60 segundos)

En el caso de compuestos inflamables que no han comenzado a arder, ALOHA es capaz de mostrar el área de tres posibles escenarios de peligro: dispersión de una nube tóxica, zonas de inflamabilidad elevada y explosión de una nube de vapor.

- Dispersión de una nube tóxica: Para descargas accidentales de compuestos tóxicos, ALOHA utiliza los siguientes Niveles de Preocupación:

AEGL (Niveles de Pauta de Exposición Agudos): Representan el umbral límite de exposición para la población general y son aplicables para períodos de exposición desde 10 minutos a 8 horas.

ERPG (Planificación de los Planes de Emergencia): Se desarrollaron como directrices de planificación, para anticipar los efectos adversos sobre la salud humana, causados por la exposición a una sustancia química tóxica.

TEEL (Límites de Exposición de Emergencia Temporales): Se utilizan cuando no están disponibles los ERPG para el compuesto químico liberado. Su definición es similar a la de los ERPG, pero difieren en el tiempo de duración de la exposición,

los TEEL calculan la concentración promedio durante 15 minutos, y los ERPG tras 1 hora de duración de la exposición.

IDLH (Daños inmediatos a la vida y la salud): Se define como la concentración en la atmósfera de cualquier sustancia tóxica, corrosiva o asfixiante que suponga un riesgo inmediato para la vida o pueda causar efectos adversos irreversibles o interfiera con la capacidad individual para escapar del ambiente peligroso.

- Zonas de Inflamabilidad elevada, donde puede ocurrir un *flash fire*.

Los Niveles de Preocupación que se emplean en este tipo de escenarios se denominan, Límite Inferior de Explosividad (LEL) y Límite Superior de Explosividad (UEL). Son los límites de la región inflamable de una nube de vapor y representan la concentración de combustible en aire, expresada en porcentaje.

- Explosión de una Nube de Vapor.

El Nivel de Preocupación que se emplea para trazar las zonas de riesgos de una explosión, es la sobrepresión u onda explosiva. Se trata del nivel umbral de presión de la onda explosiva, a partir del cual puede existir determinado peligro. Cuando se modela un escenario de explosión, ALOHA sugiere tres valores de sobrepresión por defecto. El programa utiliza estos valores umbral para crear las siguientes zonas de riesgo:

- Rojo: 8,0 psi (destrucción de edificios)
- Naranja: 3,5 psi (probables lesiones graves)
- Amarillo: 1,0 psi (rotura de cristales)

La organización básica del programa consta de varios pasos:

1. Indicar la ciudad, fecha y hora del accidente.
2. Seleccionar el producto químico liberado.
3. Introducir las condiciones meteorológicas en el período que queremos realizar la predicción del evento.
4. Describir cómo los compuestos químicos escapan a la atmósfera.
5. Mostrar en un gráfico las “zonas de riesgo”.

El *software* ALOHA da su respuesta en el monitor, a través de un diagrama denominado *Threat Zone*, el cual muestra el área donde las concentraciones del compuesto químico en el aire pueden ser suficientemente altas que provoquen afectaciones a la población (Yang, 2019).

En esta investigación se utiliza la versión 5.4.7 del 2016 que aporta resultados confiables.

2.4 Metodología para la determinación del efecto de la radiación y la sobrepresión sobre las personas y las edificaciones.

Se emplea en esta investigación el método Probit, que nos da una relación entre la función de probabilidad y una determinada carga de exposición a un riesgo. En este método se parte de una manifestación física de un incidente, y nos da como resultado una previsión de los daños a las personas expuestas, es decir, número de heridos y número de víctimas fatales.

El valor Probit permite determinar el porcentaje de la población expuesta que se verá afectada a un determinado nivel de lesiones o por muerte a causa de una carga de exposición determinada, ya sea por intoxicación, por radiación térmica o por sobrepresión. En la investigación la autora aborda solamente las dos últimas. El Anexo 4 muestra la equivalencia entre valores Probit y porcentaje de la población afectada.

2.4.1 Vulnerabilidad a radiaciones térmicas.

Se emplea para determinar el porcentaje de personas afectadas por los efectos de las radiaciones térmicas en función de la intensidad de irradiación recibida y del tiempo de exposición o dosis de radiación calorífica recibida. Para el caso de estudio, se establecen 60 segundos como tiempo de exposición, para actuar en concordancia con ALOHA.

En el caso de fugas de líquidos y gases inflamables y con una ignición inmediata, se podrá generar un charco de fuego, una explosión BLEVE o un dardo de fuego.

Las lesiones ocasionadas serán causadas principalmente por radiaciones térmicas.

Si el gas no se enciende inmediatamente, se dispersará en la atmósfera. Si la nube de gas formada se encuentra con un foco de ignición en sus proximidades, se supone que cualquier persona presente dentro de la nube de gas ardiendo morirá a consecuencia de quemaduras y asfixia. En la zona externa a la nube de gas, aunque la duración de la radiación térmica generalmente será breve, los daños estarán en función de la distancia y deben ser evaluados en cada caso.

La institución holandesa TNO (Organización holandesa para la investigación científica) presenta las ecuaciones Probit siguientes:

- Quemaduras mortales:

- con ropa de protección: $Pr = -37,23 + 2,56 \cdot \ln(t \cdot I^{4/3})$ (2.1)

- sin protección: $Pr = -36,38 + 2,56 \cdot \ln(t \cdot I^{4/3})$ (2.2)

- Quemaduras de segundo grado: $Pr = -43,14 + 3,0188 \cdot \ln(t \cdot I^{4/3})$ (2.3)

- Quemaduras de primer grado: $Pr = -39,83 + 3,0186 \cdot \ln(t \cdot I^{4/3})$ (2.4)

Donde:

t = Tiempo efectivo de exposición (s).

I = Intensidad de irradiación (W/m^2).

2.4.2 Vulnerabilidad a explosiones.

Los modelos de consecuencias de explosiones predicen el impacto de la sobrepresión originada por la explosión y la proyección de fragmentos volantes sobre las personas y objetos.

Al considerar las consecuencias de las explosiones sobre las personas, se debe hacer distinción entre consecuencias directas e indirectas. Entre las primeras están las lesiones de los pulmones y los tímpanos. Entre las segundas, se encuentran las lesiones ocasionadas por proyección de fragmentos y por impacto del cuerpo contra obstáculos.

Las ecuaciones Probit para estas consecuencias, según Domínguez (2014), son las siguientes:

- Porcentaje de afectados por rotura de tímpano:

$$Pr = -15,6 + 1,93 \cdot \ln(P) \quad (2.5)$$

Donde P es la sobrepresión máxima expresada en N/m^2 .

- Porcentaje de muertes por desplazamiento y colisión del cuerpo contra obstáculos:

$$Pr = -46,1 + 4,82 \cdot \ln(J) \quad (2.6)$$

Donde J es el impulso originado por la sobrepresión durante el tiempo de actuación, en $N s/m^2$.

- Porcentaje de lesionados por desplazamiento y colisión del cuerpo contra obstáculos.

$$Pr = -39,1 + 4,45 \cdot \ln(J) \quad (2.7)$$

Valores de referencia de consecuencias sobre edificios según la sobrepresión alcanzada:

- Daños importantes en edificios (casi completa destrucción): 0,35 bar.
- Daños reparables en edificios: 0,10 bar.
- Rotura de cristales en edificios: 0,05 bar.

2.5 Análisis del Impacto Económico.

Para realizar el análisis económico se debe evaluar la magnitud de las afectaciones en las distintas áreas, para poder determinar cada uno de los equipos afectados. A través del *software* CAPCOST 2006 se puede obtener el valor del costo de adquisición de cada equipo. En el caso en que el CAPCOST no permita estimar los costos, por ser capacidades superiores para las cuales está diseñado, se emplea el método del Factor de William o Economía de escala (Brizuela, 1987; Idrovo y Remer, 1990), para lograr la estimación. Para actualizar

los costos se emplea el Índice de Costo del año 2021, se asume reposición total y se calcula el costo por reposición de todos los equipos dañados.

Se ofrece en este trabajo un estimado de las pérdidas por reposición, atendiendo al criterio de Wells (2003) (Anexo 5), en relación con los daños de sobrepresión y a los señalados por López (2017), en cuanto a la afectación para determinados niveles de radiación (Anexo 6).

CAPÍTULO 3: Análisis de los resultados.

En este capítulo se realiza un análisis de las áreas de atmósferas peligrosas obtenidas mediante el *software* ALOHA, generadas por los distintos escenarios de riesgo. Se determinan las afectaciones que originan estos accidentes sobre el personal de la Empresa. Además, se estima el impacto económico del más destructivo de los escenarios originado por un posible accidente.

3.1 Establecimiento de las condiciones de trabajo con el *software*.

Para trabajar con el *software* ALOHA se establecen condiciones de trabajo, como son:

1. Se trabaja con los meses enero, abril, julio y octubre, definidos por Carmentate (2018).
2. Se evalúan las direcciones del viento más frecuentes en la zona de estudio, para las correspondientes estabilidades atmosféricas. En el primer cuadrante de la rosa de los vientos: NE, ENE y E, a la que corresponde una estabilidad de categoría D y en el tercer cuadrante: S, SSW y WSW, cuya categoría de estabilidad es F, según Díaz (2013).
3. Los escenarios BLEVE y *Pool Fire* se evalúan atendiendo únicamente al dispositivo de almacenamiento y sus condiciones de operación, según Díaz (2013).
4. Los escenarios dispersión de una nube tóxica y explosión de una nube de vapor se evalúan atendiendo a la segunda condición y para los meses establecidos.
5. El diesel se evalúa como n-octano según Loaiza *et al.*, (2015).
6. En la instalación, existen cinco tanques para almacenar diesel (TK1, TK4, TK24, TK25 y TK26). En esta investigación solo se trabaja con el tanque 24, pues es el que presenta mayor volumen operacional.

Los resultados pueden ser menos precisos cuando la condiciones de mezcla en la atmósfera son bajas, como en el caso de velocidad de viento muy baja (CTPRDM, 2019); por ello en esta investigación no se analiza el estado de calma.

3.2 Resultados de la aplicación del *software* ALOHA.

Para realizar este estudio se tuvo en cuenta las condiciones explicadas en el epígrafe anterior.

3.2.1 Análisis de áreas de atmósferas peligrosas originadas por la nube tóxica.

Para predecir el posible comportamiento de la nube tóxica generada por un derrame de diesel en el Tanque 24, se aplicó el *software* para los meses del año que presentan mayores variaciones en las condiciones climatológicas y para las direcciones del viento señaladas en la segunda condición.

Se analiza la nube tóxica para la dirección del viento ENE, pues a pesar de no ser la que mayor afectación provoca, es la que incide sobre mayor cantidad de locales dentro de la Empresa. Otros resultados pueden ser consultados en el Anexo 7.

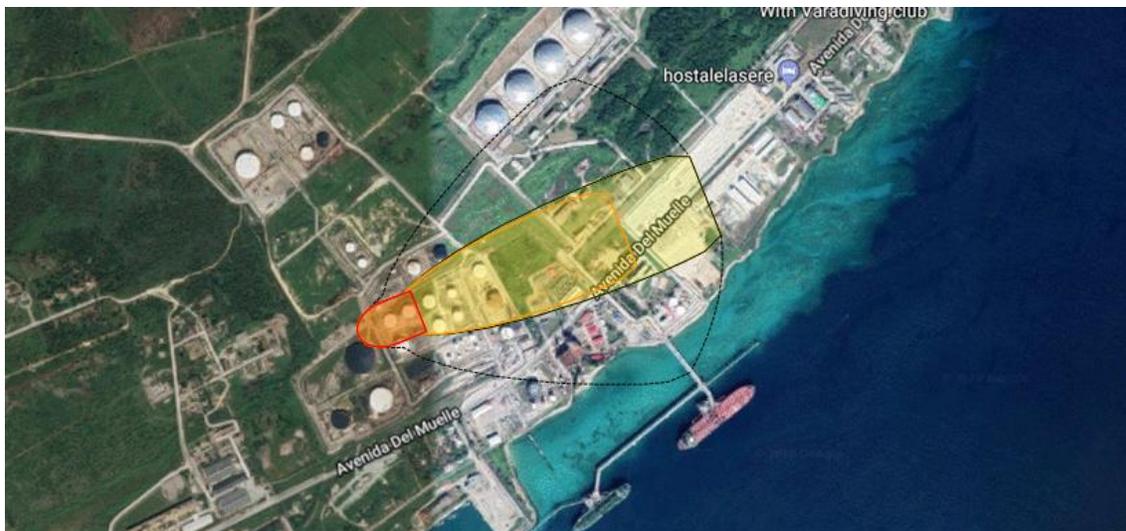


Figura 3.1: Comportamiento de la dispersión de la nube tóxica en zonas exteriores con vientos en dirección ENE en el mes de octubre.

La figura 3.1 muestra las tres zonas delimitadas por diferentes colores, las cuales indican la concentración del tóxico; la línea negra muestra la zona de posible afectación y que varía si lo hacen las variables climatológicas.

La zona amarilla, con una concentración de 230 ppm, afectará al área de las oficinas, donde radican la mayor cantidad de trabajadores. Los individuos que estén expuestos a esta concentración, solo experimentarán efectos adversos ligeros y transitorios, o percibirán un olor claramente definido. Se verán afectados por una concentración de 385 ppm, correspondiente a la zona naranja, los trabajadores del laboratorio, el taller de mantenimiento, el grupo electrógeno y los pobladores del contingente Henry Reeve. Estas personas en el momento del accidente experimentarán efectos serios o irreversibles para su salud, además, de presentar síntomas que les impidan llevar a cabo acciones para protegerse. La zona roja, con una concentración de 5 000 ppm, no afecta a ningún área donde resida personal, aunque se debe tener en cuenta la posibilidad de la presencia de operadores en esta zona.

3.2.2 Análisis de áreas de atmósferas peligrosas originadas por la explosión de una nube de vapor.

Este escenario se caracteriza por el surgimiento de una sobrepresión que se origina cuando la nube de gas explota. A continuación se muestran las áreas de peligro que se originan bajo las condiciones climatológicas correspondientes al mes de octubre, en la dirección del viento que mayor frecuencia presenta en la zona de estudio (E).

Como se observa en la Figura 3.2, en este escenario no se alcanza el efecto provocado por sobrepresiones mayores que 55,2 kPa, correspondiente al LOC-3, que provoca la destrucción de edificios. Solo se presentan como riesgos los de menor afectación, que corresponden a los niveles inferiores LOC-1 y LOC-2 que provocan la rotura de cristales y serias lesiones probables, respectivamente.

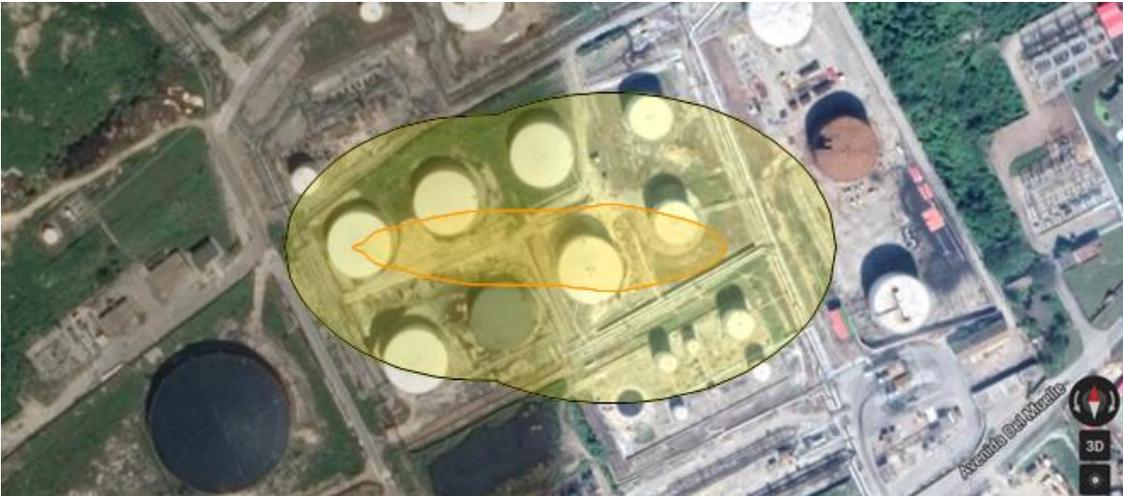


Figura 3.2: Comportamiento de la explosión de la nube de vapor en zonas exteriores.

En este caso no se afecta ningún local de la Empresa, aunque hay q tener en cuenta que los operadores radican en los alrededores de los tanques, los cuales se ven afectados en caso de que se encuentren en la zona afectada en el momento del accidente.

3.2.3 Análisis de áreas de atmósferas peligrosas originadas por el *pool fire*.

El *pool fire* se origina cuando un líquido inflamable se derrama sobre una superficie formando un charco y luego se incendia. Las áreas de peligro generadas por este escenario se muestran en la tabla 3.1.

Tabla 3.1: Dimensiones del *pool fire* para el tanque 24.

Radiación (kW/m ²)	Radio de la zona (m)	Diámetro del charco (m)
10,0	64	28
5,0	91	
2,0	143	

En la figura 3.3 se observa que la zona amarilla, con valores de radiación que sobrepasan los 2 kW/m², afecta a los trabajadores de la Sala de control de la BCS, presentado dolores en 60 segundos. La zona naranja presenta radiaciones

mayores a 5 kW/m^2 , quedando dentro de la misma la Subestación Eléctrica de la BCS; los operadores de esta área presentan quemaduras de segundo grado en 60 segundos y para ser socorridos, los mitigadores deben llevar equipos de protección. Por su parte, la zona roja, a la cual corresponden radiaciones mayores a 10 kW/m^2 , no afecta a ningún local de la Empresa, por lo que no hay peligro letal para la vida humana.

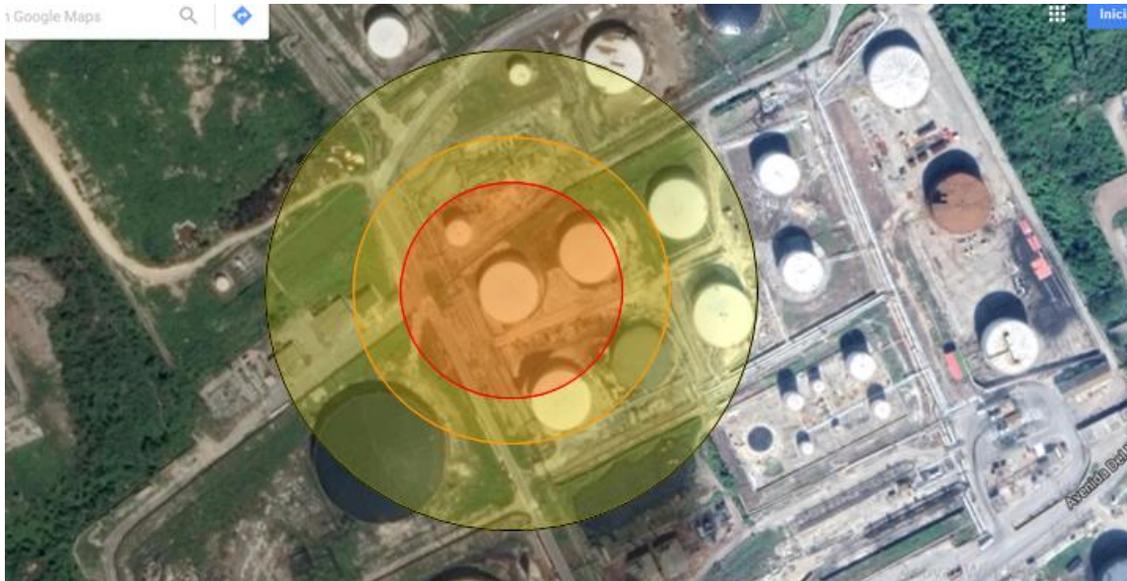


Figura 3.3: Comportamiento de la radiación originada por el *pool fire* en zonas exteriores para el diesel.

El tanque 24 de diesel no presenta muro de contención, por tanto, una vez que el líquido se derrame, puede que se esparza hacia otras áreas, alcanzando un espesor reducido; lo cual disminuye la probabilidad de que el incendio de charco caliente el tanque, hasta provocar un BLEVE.

3.2.4 Análisis de áreas de atmósferas peligrosas originadas por el BLEVE.

De todos los escenarios evaluados, el BLEVE es el que genera mayores áreas de peligro, y del cual se esperan las mayores afectaciones humanas, ambientales y económicas. Los resultados obtenidos para la sustancia de estudio se muestran en la tabla 3.2.

Tabla 3.2: Dimensiones del BLEVE para el tanque 24.

Radiación (kW/m ²)	Radio de la zona (km)	Diámetro de la bola de fuego (m)
10,0	1,9	992
5,0	2,7	
2,0	4,2	

El tanque 24 presenta un volumen de líquido máximo de 9 683 m³, lo que equivale a una masa de líquido de 6 800 000 kg aproximadamente. El *software* ALOHA solo modela situaciones en las que la masa del líquido sea inferior o igual a los 5 000 000 kg. Por tanto, una vez que se produce un incendio alrededor del tanque, solo ocurre un BLEVE, cuando el volumen de líquido llegue a los 7 112 m³, que es cuando alcanza los 5 000 000 kg, o en otros términos, cuando se encuentre al 66% de su capacidad total.

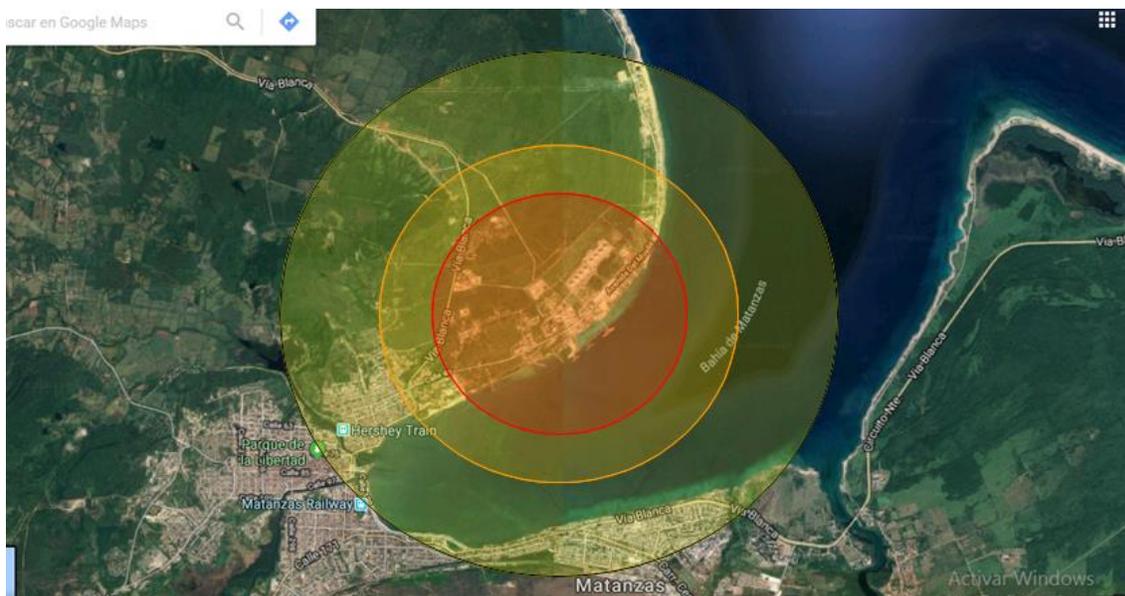


Figura 3.4: Comportamiento de la radiación originada por el BLEVE.

Como se observa en la Figura 3.4, toda la Empresa está contenida en la zona roja, con un diámetro de 1,9 km, correspondiente a los mayores valores de radiación,

siendo estos mayores que 10 kW/m^2 , radiación más que suficiente para provocar la muerte. Las zonas donde ocurren quemaduras de segundo y primer grado afectan a gran parte de la población, donde se incluyen la zona de Versailles, que se encuentra al WSW de la fuente, y desde el Reparto Playa hasta el Reparto Peñas Altas, desde la dirección SSW hasta SE, con respecto a la fuente. También se afectan los pescadores que se encuentran en la bahía en el momento del accidente.

3.3 Análisis de resultados alcanzados por Probit.

A continuación, se analizan los efectos causados por radiación térmica y explosiones. Para ello se muestran los porcentajes de afectaciones provocadas a las personas por los escenarios *pool fire*, BLEVE y Explosión de una Nube de Vapor. En esta investigación solo se analizan los locales que sufren afectaciones dentro de la Empresa, y se evalúan los efectos para las direcciones del viento que se presentan con mayor frecuencia en la zona de estudio.

3.3.1 Análisis de vulnerabilidad a radiaciones térmicas.

Los escenarios que provocan efectos de radiación térmica son el *pool fire* y el BLEVE. Las tablas 3.3 y 3.4 muestran las afectaciones obtenidas por Probit para dichos accidentes.

Como se analizó en el epígrafe 3.2.3, el charco de fuego formado por un derrame de diesel, afecta en la BCS a la Subestación eléctrica y a la Sala de control.

Tabla 3.3: Porcentaje de afectaciones obtenido por Probit para el escenario *pool fire*.

Local afectado	Radiación (kW/m ²)	Afectaciones							
		Quemaduras mortales (con ropas de protección)		Quemaduras mortales (sin protección)		Quemaduras de segundo grado		Quemaduras de primer grado	
		Valor Pr	% afect.	Valor Pr	% afect.	Valor Pr	% afect.	Valor Pr	% afect.
Subestación eléctrica de la BCS	6,46	3,20	4	4,05	17	4,53	32	7,84	99,8
Sala de control de la BCS	2,7	0,22	0	1,07	0	1,02	0	4,33	25

La tabla 3.3 muestra que la Subestación eléctrica se ve afectada por una radiación de $6,46 \text{ kW/m}^2$, la cual provoca que todos los trabajadores que se encuentren en el local en el momento del accidente, sufran quemaduras de primer grado, y de ellos, el 32% se ven afectados por quemaduras de segundo grado. En cuanto a las quemaduras mortales, el 17% de los trabajadores pueden sufrirlas, y si llevaran ropas de protección (lo cual es poco probable pues los accidentes son inesperados), solo el 4%. En el caso de la Sala de control, la radiación emitida por el charco de fuego no es suficiente para causar pérdidas humanas, solo el 25% de los trabajadores de este local presentan quemaduras de primer grado.

La radiación emitida por el escenario BLEVE afecta a todas las áreas de la Empresa y a zonas aledañas. Los locales que no se muestran en la tabla 3.4, se encuentran dentro de la bola de fuego, lo cual indica que todo el personal presente en la Subestación eléctrica y la Sala de Control de BCS, la Caldera y las oficinas de la T-320, sufren una radiación letal.

Tabla 3.4: Porcentaje de afectaciones obtenido por Probit para el escenario BLEVE.

Local afectado	Radiación (kW/m ²)	Afectaciones							
		Quemaduras mortales (con ropas de protección)		Quemaduras mortales (sin protección)		Quemaduras de segundo grado		Quemaduras de primer grado	
		Valor Pr	% afect.	Valor Pr	% afect.	Valor Pr	% afect.	Valor Pr	% afect.
Edificio de oficinas	60,3	10,82	100	11,67	100	13,52	100	16,83	100
Sala de control de muelles	54,3	10,46	100	11,31	100	13,10	100	16,41	100
Contingente MICONS	69,8	11,32	100	12,17	100	14,11	100	17,42	100
Laboratorio	70,8	11,37	100	12,22	100	14,17	100	17,48	100
Sala de control de la BS	28,1	8,22	100	9,07	100	10,45	100	13,76	100
Almacenes	25,3	7,86	99,8	8,71	100	10,03	100	13,33	100
Taller de transporte	28,1	8,22	100	9,07	100	10,45	100	13,76	100
Taller de mantenimiento	71,8	11,42	100	12,27	100	14,23	100	17,53	100

Como se observa en la tabla anterior, todas las personas involucradas en estas áreas quedan expuestas a sufrir quemaduras letales, ya sea con o sin ropas de protección. Con estos resultados se aprecia una vez más la peligrosidad de este tipo de accidente.

3.3.2 Análisis de vulnerabilidad a explosiones.

Para el análisis de vulnerabilidad por efectos de explosión se toma el escenario Explosión de una nube de vapor. Como se analizó en el Epígrafe 3.2.2, este escenario no afecta directamente a ningún local de la Empresa, pero no se puede descartar su peligrosidad, pues en los alrededores de los tanques en ocasiones hay operadores que pudieran verse afectados en el momento del accidente.

3.4 Análisis del Impacto Económico.

Para el análisis económico se tiene en cuenta el impacto provocado por incendio y explosión, pues son los escenarios que originan pérdidas totales, que incluyen las que se producen por destrucción total de los equipos, por detección del proceso productivo y las pérdidas por reposición de los equipos destruidos.

En la tabla 3.5 se muestran los efectos de la sobrepresión provocada por el escenario explosión de una nube de vapor, sobre los tanques afectados por dicho escenario.

Tabla 3.5: Afectaciones que provoca el escenario explosión de una nube de vapor.

Tanque	Sobrepresión (psi)	Afectación
TK16	5,70	Destrucción completa de las estructuras cercanas
TK13	5,07	
TK25	3,01	Ruptura de los tanques de almacenamiento de combustibles
TK22	2,63	Colapso parcial de las paredes y los techos
TK26	2,14	
TK17	1,24	40% de daño en las estructuras
TK23	1,20	

Según el criterio de Wells (2003), los tanques afectados tienen un nivel que implica la reposición de los mismos. Este valor se estima mediante el *software*

CAPCOST y se actualiza mediante el índice de costo del 2021, el cual es de \$ 5 134 840.

De igual modo, se determinan los costos de reposición para los equipos afectados por el BLEVE. En este caso se ven afectadas todas las instalaciones de la División. El Anexo 8 muestra equipos que se destruyen totalmente bajo su efecto, así como los costos en que se debe incurrir para reponerlos.

El costo de reposición de los equipos dañados por este accidente ascienden a un valor de \$ 49 849 505.

Si a la pérdida económica total en la UEB, se agregan otras afectaciones intangibles por daños al entorno, y finalmente las ocurridas por pérdidas humanas, se podrá alcanzar una idea de la importancia de disponer de resultados en esta línea de investigación, que hagan más adecuados los planes de prevención y emergencias ante este tipo de accidentes.

3.5 Conclusiones parciales.

1. La nube tóxica causará daños severos al personal presente en el laboratorio, el taller de mantenimiento, el grupo electrógeno y los pobladores del contingente Henry Reeve.
2. La explosión de una nube de vapor no afecta ningún local de la Empresa.
3. El escenario Charco de fuego solo afecta a la Subestación eléctrica y la Sala de control de la BCS.
4. El BLEVE afecta a todos los locales de la Empresa.
5. De los escenarios analizados por Probit, las mayores afectaciones son las que desencadena el BLEVE.
6. Las mayores afectaciones económicas son las ocasionadas por el BLEVE.

CONCLUSIONES

1. A través de la aplicación de la versión 5.4.7 del *software* ALOHA, se pudo obtener resultados más precisos sobre la ocurrencia de accidentes químicos en el Tanque 24 de la UEB División Territorial de Comercialización de Combustibles Matanzas.
2. Se determinó el área de afectación para los escenarios nube tóxica, nube explosiva, charco de fuego y BLEVE, siendo este último el que más afectaciones produce.
3. La nube tóxica que afecta a más trabajadores dentro de la Empresa se presenta para la dirección del viento ENE.
4. La explosión de una nube de vapor no afecta ningún local de la Empresa, pero ocasiona la destrucción de los tanques que se encuentran en sus alrededores.
5. La radiación emitida por el charco de fuego no presenta peligro letal para la vida humana.
6. De todos los escenarios analizados mediante Probit, las mayores afectaciones son provocadas por el BLEVE, siendo la sala de control de la BCS la que mayor radiación recibe.
7. Las afectaciones económicas provocadas por la explosión de una nube de vapor, provocan una pérdida económica por reposición con un valor de \$ 5 134 840, y las pérdidas generadas por un BLEVE, ascienden a \$ 49 849 505.

RECOMENDACIONES

1. Informar y discutir los resultados de esta investigación con la dirección de la UEB División Territorial de Comercialización de Combustibles Matanzas para la actualización de su plan de prevención y protección ante estos tipos de accidentes.

BIBLIOGRAFÍA

- Armijos, A. P. (2020). *Simulación del contaminante por combustible de aviación Av-gas en el terminal d almacenamiento del aeropuerto de Guayaquil*. [Tesis de pregrado]. Universidad Agraria del Ecuador. <https://cia.uagraria.edu.ec/Archivos>.
- Atkinson, G., Cowpe, E., Halliday, J., y Painter, D. (2017). A review of very large vapour cloud explosions: Cloud formation and explosion severity. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 367-375.
- Bastidas, G. E., y Bolaños , J. E. (2014). *Estudio del desempeño de acondicionadores de combustible en vehículos, a través de la inducción magnética en la repolimerización del Diesel*. [Trabajo de diploma]. Universidad Internacional del Ecuador.
- Brizuela, E. (1987). *Diseño de Planta Químicas* (Vol. I). 96-122.
- Carmenate, Y. (2018). *Evaluación de atmósferas peligrosas en la Terminal-320 de la Empresa Comercializadora de Combustibles Matanzas*. [Trabajo de diploma]. Universidad de Matanzas Camilo Cienfuegos.
- Casal, J., Montiel, H., Planas, E., y Vílchez, J. A. (2002). *Análisis del riesgo en instalaciones industriales*. Barcelona: UPC.
- Castillo, J. P., Pérez, A., y Hernández, J. L. (2001). *Introducción del código PHAST para la modelización de accidentes. Un nuevo paso en el fortalecimiento de la consultoría ARIES*. <https://www.foroiberam.org/documents>
- Castro, D., Luis, J. D., y Curiel, L. D. (2013). *Evaluación de atmósferas peligrosas en la zona industrial de Matanzas ante posibles accidentes químicos*. [Monografía]. <http://monografías.umcc.cu/monos/2013/FacultaddelIngeniería>
- Comisión Técnica de Prevención y Reparación de Daños Medioambientales. (2019). *Análisis de Herramientas de evaluación de la difusión y comportamiento de agentes químicos en el marco de la normativa de Responsabilidad Medioambiental*. <https://www.miteco.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas>
- Cruz, L. A. (2013). *Análisis de riesgo por fuga de amoniaco en tanque de almacenamiento empleando modelo computacional*. [Tesis de pregrado]. Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. <http://repositorio.uaaan.mx:8080/xmlui/bitstream/handle>.

- Díaz, F. (2006). *Análisis de consecuencias y zonas de planificación para explosiones industriales accidentales*. [Tesis Doctoral]. Universidad de Murcia.
- Díaz, A. (2013). *Análisis de riesgos en el área de almacenamiento de gas licuado del petróleo en la Empresa Comercializadora de Combustibles Matanzas (ECCM)*. [Trabajo de diploma]. Universidad de Matanzas Camilo Cienfuegos.
- Domínguez, J. R. (2014). *Análisis Cuantitativo de Riesgos en el ámbito de la Protección Civil: aplicación a una instalación de almacenamiento de productos químicos*. [Tesis de pregrado]. Universidad de Sevilla.
- Fernández, P. M. (2008). *Modelos de cálculos de efectos y análisis de consecuencias. Módulo: Gestión medioambiental y técnicas afines*. EOI.
- Ferrero, F. (2006). *Incendios de hidrocarburos: estudio de la formación y evolución del BOILOVER de capa fina*. [Tesis Doctoral]. Universidad Politécnica de Cataluña.
- Flores, Y. (2013). *Análisis de la composición química del diesel y del biodiesel, y aplicación de técnicas multivariantes para determinar su origen*. [Trabajo de diploma]. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Galán, S. (2012). *Explosión de equipos a presión. Análisis de riesgo y consecuencias*. [Proyecto final de carrera para la obtención del título de Ingeniero Técnico Naval]. Universidad Politécnica de Cataluña.
- Gyenes , Z., Wood, M. H., y Struckl, M. (2017). Handbook of Scenarios for Assessing Major Chemical Accident Risks. *JRC Technical Reports*, 1-115. <https://ec.europa.eu/jrc>
- He, Z., y Weng, W. (2019). Synergic Effects in the Assessment of Multi-Hazard Coupling disasters: Fires, Explosions, and Toxicant Leaks. *Journal of Hazardous Materials*. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2019.121813>
- Ibarra, E. V. (2016). *Metodología de análisis cuantitativo de riesgo incluyendo el efecto dominó*. [Tesis de Maestría]. Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas.
- Idrovo, J. H., y Remer, D. S. (1990). *Cost Estimating Factors for Biopharmaceutical Process Equipment*. 36-42.

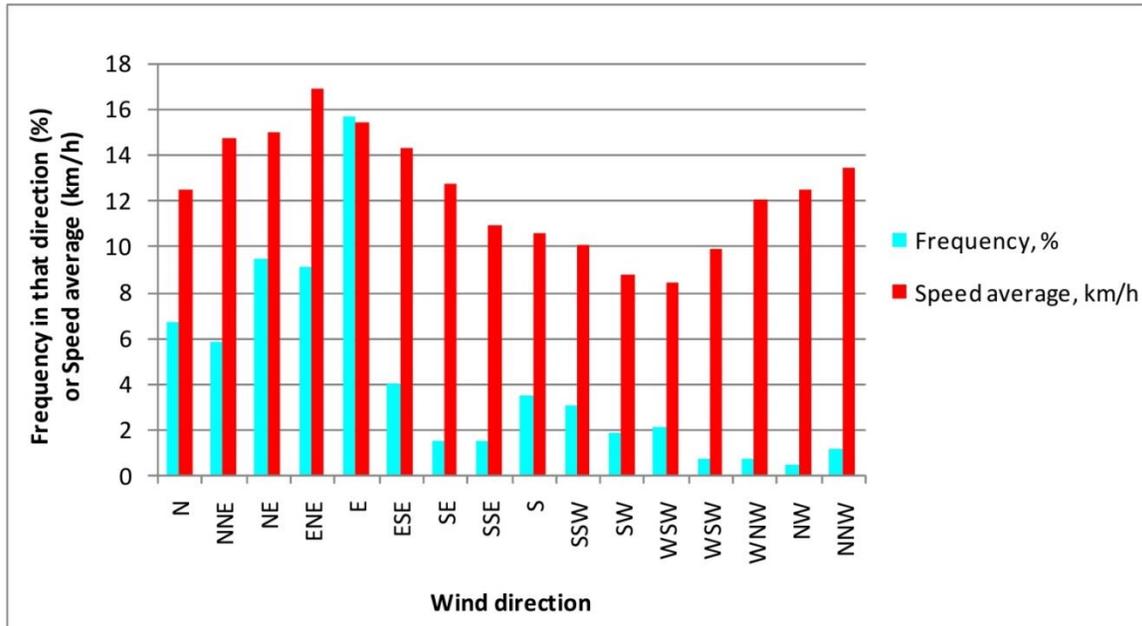
- Jones, R., Lehr, W., Simecek-Beatty, D., y Reynolds, R. M. (2013). *ALOHA (Areal Locations of Hazardous Atmospheres) 5.4.4*. Technical Documentation, U. S. Dept. of Commerce, NOAA.
- Liu, J., Li, J., y Fan, C. (2019). A bibliometric study of pool fire related publications. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 1-32. <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2019.104030>
- Loaiza, M., Rodríguez, G., Valverde, Y., Gurdíán, R. y Chaves, C.M. (2015). *Manual de productos. Refinadora Costarricense de Petróleo (RECOPE)* [https://www.recope.go.cr/ Manual productos RECOPE 2015.pdf](https://www.recope.go.cr/Manual%20productos%20RECOPE%202015.pdf)
- López, J. (2017). *Análisis cuantitativo de riesgos de tuberías de transporte de sustancias peligrosas*. [Trabajo de fin de grado en Ingeniería Química]. Universidad de Barcelona.
- Lugo, G. (2015). *Riesgo Químico. Sus implicaciones en los incendios y las explosiones*. La Habana: Editorial Universitaria.
- Martín, J. (2018). *Historical Analysis Of Dispersion Of Toxic Flights: Evaluation Of Methodologies For The Determination Of The Areas Of Alerts And Intervention*. [Tesis de maestría]. Universidad Politécnica de Cataluña.
- Moya, B. (2010). Especialita Principal Meteorología. CITMA. Matanzas.
- Moyano, J., Lema, J., Guamán, Á., García, A., y Gloria, M. (2020). *Metodologías MESERI, índice de incendio y explosión, ALOHA, para determinar zonas de seguridad en estaciones de servicios de combustibles*. <https://dx.doi.org/10.18502/keg.v5i2.6251>
- Nolan, D. P. (2011). *Handbook of Fire and Explosion Protection Engineering Principles for Oil, Gas, Chemical and Related Facilities*. 2.^a ed.
- Orozco, J. L. (2017). Guía para la caracterización de las sustancias, Departamento de Química. Facultad de Ciencias Técnicas. Universidad de Matanzas Sede Camilo Cienfuegos.
- Orozco, J. L., Van Caneghem, J., Hens, L., González, L., Lugo, R., Díaz, S. y Pedroso, I. (2019). Assessment of an ammonia incident in the industrial area of Matanzas. *Journal of Cleaner Production*, 934-941. <https://www.researchgate.net/publication/331658583>
- Pérez, A. (2019). *Evaluación de un sistema de recepción y calentamiento de crudo recibido por pailas en la División Territorial de Comercialización de Combustibles Matanzas*. [Trabajo de Diploma]. Universidad de Matanzas.

- Piedra, J. P., y Valdivieso, J. P. (2013). *Evaluación del riesgo de incendio y explosión en una línea de extrusión de polietileno expandido*. [Tesis previa a la obtención del Grado de Magister en Sistemas Integrados de Gestión de la Calidad, Ambiente y Seguridad]. Universidad Politécnica Salesiana.
- Quirós, D., Gurdián, R., Carrillo, D., Coto, R., y Ramírez, V. (2019). *Manual de productos*. Refinadora Costarricense de Petróleo (RECOPE). <https://www.recope.go.cr/wp-content/uploads/2019/06/Manual-de-Productos-2019>
- Ramírez, V. S. (2019). *Aplicación informática para el cálculo de la sobrepresión e impulso en explosiones de recipientes industriales*. [Trabajo de Diploma]. Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas.
- Reche, M. (2017). *Los Accidentes Graves en la Industria Química. Análisis de la Normativa Seveso y Nuevas Propuestas*. [Tesis Doctoral]. Universidad de Murcia.
- Rechi, S. (2019). *Diseño y cálculo de una instalación contra incendios en una nave industrial*. [Tesis presentada en opción al Grado en Ingeniería Electrónica Industrial y Automática]. Universidad politécnica de Valencia.
- Turmo, E. (1991). *NTP 291: Modelos de vulnerabilidad de las personas por accidentes mayores: método Probit*. Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo. <https://es.scribd.com/document/149727746/NTP-291>
- Velásquez, W. (2009). *Definición del nivel de riesgo del Centro de Almacenamiento y Transporte de Crudo Tejero aplicando la metodología de análisis cuantitativo de riesgos*. [Trabajo de Grado Presentado Como Requisito Parcial Para Optar Al Título de Magister Scientiarum en Ingeniería de Mantenimiento]. Universidad Gran Mariscal de Ayacucho.
- Wells, G. (2003). *Major Hazards and their management*. Gulf Publishing Company. Houston, Texas.
- Yang, R., Gai, K., Yang, F., Zhang, G., Sun, N., Feng, B., y Zhu, X. (2019). *Simulation Analysis of Propylene Storage Tank leakage Based on ALOHA Software*. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. <http://doi:10.1088/1755-1315/267/4/042038>
- Zhang, C. (2018). Analysis of Fire Safety System for Storage Enterprises of Dangerous Chemicals. *Procedia Engineering*, 986- 995.

Zhou, K., Qin, X., Wang, Z., Pan, X., y Jiang, J. (2018). Generalization of the radiative fraction correlation for hydrogen and hydrocarbon jet fires in subsonic and choked flow regimes. *Science Direct*, 9870-9876. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2018.03.201>

ANEXOS

Anexo 1: Distribución de la velocidad y la dirección del viento en el área de estudio.



Fuente: Orozco *et al.* (2019)

Anexo 2: Comportamiento de las variables climatológicas para la zona objeto de estudio.

	<i>Nubosidad (octa)</i>	<i>Temperatura máxima(°C)</i>	<i>Temperatura media(°C)</i>	<i>Temperatura mínima(°C)</i>	<i>Humedad relativa (%)</i>
ENE	4	26,2	20,6	15,7	78
FEB	4	25,9	20,5	15,6	75
MAR	4	28,2	22,5	17,1	74
ABR	3	29,7	24,2	18,6	73
MAY	4	30,9	25,4	20,7	78
JUN	5	30,5	25,7	21,8	83
JUL	5	31,4	26,3	21,9	81
AGO	5	31,3	26,1	21,8	82
SEP	5	30,8	25,5	21,7	84
OCT	4	29,5	24,6	20,8	84
NOV	5	27,3	22,7	18,7	81
DIC	4	26,5	21,2	16,6	79

Fuente: Moya (2010)

Anexo 3: Caracterización toxicológica del diesel.

Identificación del producto.

- Nombre del producto: Diesel.
- Fórmula Química: 75% de hidrocarburos saturados (principalmente parafinas) y un 25% de hidrocarburos aromáticos. El promedio de la fórmula química para el Diesel común es $C_{12}H_{26}$, variando entre $C_{10}H_{22}$ y $C_{15}H_{32}$.

- Etiquetado de peligro (frases R y S).

R3/R5/R7/R8/R10/R15/R16/R18/R21/R22/R23/R24/R25R/31/R33/R36/R37/
R50/R53/R56.

S1/S2/S3/S4/S5/S13/S15/S16/S17/S21/S23/S24/S25/S26/S28/S29/S30/S33/
S38/S39/S41/S43/S44/S46/S47/S52/S57/S61.

Datos físicos.

- Apariencia: Sustancia de color amarillo-naranja, líquido poco viscoso, además de ser un combustible con un alto grado de peligrosidad en caso de algún desastre, ya sea incendio o derrame.
- Punto de ebullición: 125,5 °C.
- Punto de fusión: No disponible.
- Solubilidad: soluble en sustancias orgánicas.
- Densidad: 0,815 – 0,865 g/cm²
- TLV (límite superior de inflamabilidad): 1,8 en aire % de volumen.
- IPVS (límite inferior de explosividad): 7,5 en aire % de volumen (850 ppm (LEL)).
- Punto de congelación: -56 °C.
- Temperatura de autoignición: 340 °C.
- Coeficiente de expansión: No disponible.
- Temperatura de inflamación: 52 °C mínimo.
- Energía mínima de ignición: Alrededor de 520 °C.
- Biodegradabilidad: No disponible.

- Corrosión: Con respecto a los derivados del petróleo, la acción corrosiva es ejercida, tanto por la humedad como por cualquier otro agente (impurezas) presente en el producto, capaces de reaccionar químicamente con los metales en contacto.
- Capacidad calorífica: 10 100 kcal/kg mínimo.

Peligros para la salud.

- Concentración permisible: 300 mg/m³.
- Exposición permisible: 150 ppm.
- Partes del cuerpo que afecta: La inhalación de alta concentración de vapor puede causar dolores de cabeza. La ingestión causa irritación del estómago e intestino con náusea y vómitos.
- Forma de entrada al organismo: Puede penetrar por la piel, nariz y boca.
- Toxicidad.

Sustancia	Toxicidad							
	TA	I	SB	TDR	MG	CG	C	TR
Diesel	x	R,O,P	x			x		

Condiciones de almacenamiento y manipulación.

- Nombre del producto almacenado: Diesel.
- Forma del recipiente: cilíndrico, ubicado en posición vertical.
- Dimensiones del recipiente:
 - Tanque 24: diámetro: 34,2 m y altura operacional: 10,6 m.
- Material de construcción: acero al carbono, con un espesor de 11-17 mm.
- Protección del recipiente (interior o exterior): la protección está basada en las normas ISO 12944-1, ISO 12944-3, ISO 12944-5 y la ISO 12944-8, de la cual se aplica un sistema de pintura impermeabilizante para la protección del mismo, además de protección catódica en el fondo del tanque.
- Condiciones de almacenamiento de la sustancia: presión atmosférica y temperatura ambiente.

- Características de los alrededores del recipiente: Libre de hierba, de materia inflamable, rodeado por cubetos hormigonados, los cuales deben tener buen drenaje.

Condiciones para su uso en el proceso.

- Uso en el proceso: Mezclas. Trasiago a buque tanque.
- Condiciones en las que se usa la sustancia (presión, temperatura): presión atmosférica y temperatura ambiente.
- Fallos ocurridos en estos equipos al operar con estas sustancias: salideros por juntas.
- Material de construcción de los equipos donde es usada: acero al carbono.
- Protección del sistema de tuberías: Pintura impermeabilizante según las normas y protección catódica.

Anexo 4: Equivalencia entre valores Probit y porcentaje de la población afectada.

Pr	%	Pr	%	Pr	%	Pr	%	Pr	%	Pr	%	Pr	%	Pr	%	Pr	%	Pr	%	Pr	%
0	0	3,72	10	4,16	20	4,48	30	4,75	40	5,00	50	5,25	60	5,52	70	5,84	80	6,28	90	7,33	99,0
2,67	1	3,77	11	4,19	21	4,50	31	4,77	41	5,03	51	5,28	61	5,55	71	5,88	81	6,34	91	7,37	99,1
2,95	2	3,82	12	4,23	22	4,53	32	4,80	42	5,05	52	5,31	62	5,58	72	5,92	82	6,41	92	7,41	99,2
3,12	3	3,87	13	4,26	23	4,56	33	4,82	43	5,08	53	5,33	63	5,61	73	5,96	83	6,48	93	7,46	99,3
3,25	4	3,92	14	4,29	24	4,59	34	4,85	44	5,10	54	5,36	64	5,64	74	5,99	84	6,55	94	7,51	99,4
3,36	5	3,96	15	4,33	25	4,61	35	4,87	45	5,13	55	5,39	65	5,67	75	6,04	85	6,64	95	7,58	99,5
3,45	6	4,01	16	4,36	26	4,64	36	4,90	46	5,15	56	5,41	66	5,71	76	6,08	86	6,75	96	7,65	99,6
3,52	7	4,05	17	4,39	27	4,67	37	4,92	47	5,18	57	5,44	67	5,74	77	6,13	87	6,88	97	7,75	99,7
3,59	8	4,08	18	4,42	28	4,69	38	4,95	48	5,20	58	5,47	68	5,77	78	6,18	88	7,05	98	7,88	99,8
3,66	9	4,12	19	4,45	29	4,72	39	4,97	49	5,23	59	5,50	69	5,81	79	6,23	89	7,33	99	8,09	99,9

Fuente: Domínguez (2014)

Anexo 5: Afectaciones de la sobrepresión sobre las estructuras.

Sobrepresión (psi)	Daño
0,005	Se escucha un sonido que denota la ocurrencia de un suceso inusual
0,02	Ruido molesto
0,03	Rotura ocasional de ventanas de vidrio bajo tensión
0,04	Ruido fuerte
0,10	Rotura de ventanas pequeñas bajo tensión
0,15	Presión típica de rotura de cristales
0,20	Umbral para la pérdida temporal de la audición
0,30	95% de probabilidad que no ocurran serios daños
0,4	Daños estructurales limitados menores como rotura de ventanas, rotura de losas y crujidos de los techos y las paredes
0,7	Daños menores a la estructura de las casas
1,0	Demolición parcial de las casas
1,2	40% de daño en las estructuras
2,0	Colapso parcial de las paredes y los techos
3	Edificios con marcos de acero torcidos y empujados fuera de sus lugares
3,3	80% de daños en las estructuras
3-4	Ruptura de los tanques de almacenamiento de combustibles
5	Rotura de postes de electricidad y teléfono
5-7	Destrucción completa de las estructuras cercanas
7	Se vuelcan carros de tren cargados
10	100% de daños

Fuente: Wells (2003)

Anexo 6: Daño según flujo térmico recibido.

Radiación térmica kW · m ⁻²	Efecto
1,4	Se considera inofensivo para las personas sin ningún tipo de protección
1,7	Mínimo necesario para causar dolor
2,1	Mínimo necesario para causar dolor después de 1 minuto.
4,0	Suficiente para causar dolor con una exposición de 20 s; quemaduras de primer grado.
4,7	Causa dolor en 15-20 s, heridas después de 30s.
11,7	El acero fino parcialmente aislado puede perder la integridad mecánica
12,5	100% letal. La madera prende tras una larga exposición. Fusión del plástico en los cables eléctricos.
25	El acero fino aislado puede perder la integridad mecánica.
37,5	Suficiente para causa daño en cualquier equipo. Colapso de estructuras.

Fuente: López (2017)

Anexo 7: Resultados de la aplicación del *software* ALOHA para la nube tóxica.

Anexo 7a: Dimensiones de la nube tóxica para el mes de enero.

Dirección del viento	Velocidad del viento (m/s)	Concentración (ppm)	Largo (m)
NE	4,17	PAC-3: 5000	-
		PAC-2: 385	253
		PAC-1: 230	384
ENE	4,69	PAC-3: 5000	-
		PAC-2: 385	-
		PAC-1: 230	-
E	4,28	PAC-3: 5000	-
		PAC-2: 385	252
		PAC-1: 230	382
S	2,94	PAC-3: 5000	-
		PAC-2: 385	483
		PAC-1: 230	678
SSW	2,78	PAC-3: 5000	-
		PAC-2: 385	493
		PAC-1: 230	689
WSW	2,33	PAC-3: 5000	-
		PAC-2: 385	526
		PAC-1: 230	721

Anexo 7b: Dimensiones de la nube tóxica para el mes de abril.

Dirección del viento	Velocidad del viento (m/s)	Concentración (ppm)	Largo (m)
NE	4,17	PAC-3: 5000	-
		PAC-2: 385	362
		PAC-1: 230	531
ENE	4,69	PAC-3: 5000	-
		PAC-2: 385	349
		PAC-1: 230	518
E	4,28	PAC-3: 5000	-
		PAC-2: 385	359
		PAC-1: 230	528
S	2,94	PAC-3: 5000	-
		PAC-2: 385	562
		PAC-1: 230	779
SSW	2,78	PAC-3: 5000	-
		PAC-2: 385	574
		PAC-1: 230	790
WSW	2,33	PAC-3: 5000	66
		PAC-2: 385	607
		PAC-1: 230	824

Anexo 7c: Dimensiones de la nube tóxica para el mes de julio.

Dirección del viento	Velocidad del viento (m/s)	Concentración (ppm)	Largo (m)
NE	4,17	PAC-3: 5000	-
		PAC-2: 385	332
		PAC-1: 230	489
ENE	4,69	PAC-3: 5000	-
		PAC-2: 385	321
		PAC-1: 230	479
E	4,28	PAC-3: 5000	-
		PAC-2: 385	330
		PAC-1: 230	487
S	2,94	PAC-3: 5000	-
		PAC-2: 385	448
		PAC-1: 230	630
SSW	2,78	PAC-3: 5000	-
		PAC-2: 385	455
		PAC-1: 230	638
WSW	2,33	PAC-3: 5000	-
		PAC-2: 385	481
		PAC-1: 230	663

Anexo 7d: Dimensiones de la nube tóxica para el mes de octubre.

Dirección del viento	Velocidad del viento (m/s)	Concentración (ppm)	Largo (m)
NE	4,17	PAC-3: 5000	-
		PAC-2: 385	308
		PAC-1: 230	457
ENE	4,69	PAC-3: 5000	54
		PAC-2: 385	299
		PAC-1: 230	447
E	4,28	PAC-3: 5000	-
		PAC-2: 385	306
		PAC-1: 230	454
S	2,94	PAC-3: 5000	-
		PAC-2: 385	575
		PAC-1: 230	794
SSW	2,78	PAC-3: 5000	-
		PAC-2: 385	586
		PAC-1: 230	805
WSW	2,33	PAC-3: 5000	81
		PAC-2: 385	621
		PAC-1: 230	841

Anexo 8: Costo de los equipos de la UEB por área.

Anexo 8a: Terminal 320.

Tanques	Capacidad (m³)	Costo (\$)
1	9 285	731 097
4	8 008	655 133
24	11 335	844 773
25	11 405	848 812
26	11 602	860 171
16	4 585	441 218
17	4 644	444 965
18	2 315	289237
19	744	163 262
20	214	104 980
21	631	152 291
74	2 354	292 034
13	11 141	833 569
22	11 439	850 773
23	11 518	855 331
8	218	105 520
6	2 356	292 177
57	2 346	291 462
15	13 626	976 285
14	13 593	974 399
Total		11 007 491

Anexo 8b: Base de Crudo y Suministro

Tanques	Capacidad (m³)	Costo (\$)
27	31 260,6	1 686 038
28	17 104,5	1 174 182
29	46 549,08	2 140 995
30	9 903,6	761 786
33	9 914,4	762 415
34	9 925,2	763 044
35	9 925,2	763 044
36	9 934,92	763 611
37	46 300,8	2 134 136
38	9 917,64	976 285
39	933,66	180 695
40	2 054,34	270 277
41	4 406,4	429 827
42	3 540,08	373 464
71	383,91	126 041
72	383,91	126 041
Total		13 431 880

Anexo 8b: Continuación.

Proceso	Equipos	Costo (\$)
Oleoductos	IE-102 A Santa Cruz	145 118
	IE-102 B Guiteras	120 122
	Filtro IF-102 A (Santa Cruz)	256 005
	Filtro IF-103 A(Guiteras)	195 630
	Bombas IP 103 AM (Santa Cruz)	347 000
	Bombas IP 103 BM (Santa Cruz)	347 000
	Bombas IP 103 A (Guiteras)	186 868
	Bombas IP 103 B (Guiteras)	186 868
Caldera	Bomba de agua	59 267
	Bomba de crudo	83 231
	Intercambiador de calor	24 428
	Generador de vapor	432 121
Mezcla	Intercambiador de calor IE-205A	136 446
	Intercambiador de calor IE-205b	136 446
	Filtro IF-201A	357 607
	Filtro IF-201B	357 607
	Bomba IP-302	55 774
Total		3 427 538

Anexo 8c: Base en Tierra

Tanques	Capacidad (m³)	Costo (\$)
69-1	10 000	767 401
69-2	10 000	767 401
70-1	10 000	767 401
70-2	10 000	767 401
49	45 889	272 6340
50	45 831	2 724 282
52	45 850	2 724 968
53	43 081	2 624 983
54	45 850	2 724 968
55	43 042	2 623 578
56	46 947	2 763 875
Total		21 982 597