

**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 del impacto ambiental y humano de posibles accidentes provocados por incendio y/o explosión en la División Territorial de Comercialización de Combustibles de Matanzas.

Autor: Karla Inés Roldan Casanova

Tutor: Ing. Julio Ariel Dueñas Santana

Consultante: Ing. Jesús Luis Orozco, Dr.C.

Matanzas, Cuba. 2019

DECLARACIÓN DE AUTORIDAD.

Yo, Karla Inés Roldán Casanova, declaro que soy el único autor de este Trabajo de Diploma y lo pongo a disposición de la División Territorial de Comercialización de Combustibles de Matanzas y de la Universidad de Matanzas, para hacer uso del mismo con el objetivo y finalidad que se estime conveniente, siempre que se respeten mis derechos sobre el mismo.

Karla Inés Roldán Casanova

*El pesimista se queja del viento,
el optimista espera que cambie,
el realista ajusta las velas.*

WILLIAM ARTHUR WARD

DEDICATORIA.

A mi madre por su apoyo incondicional.

AGRADECIMIENTOS.

A mi mamá por ser mi guía, por sus días y noches sin descanso, por tanto esfuerzo, por estar siempre para mí en cada momento.

A mi abuela por su apoyo y comprensión.

A mi niña por darme las fuerzas para seguir adelante.

A mi papá José por estar siempre presente.

A mi hermana, mi tía, mi esposo, toda mi familia que de una forma u otra colaboraron para que esto se hiciera posible.

A mi tutor por tanto esfuerzo y dedicación.

A los compañeros de la comercializadora que me ayudaron a realizar este trabajo.

A Dios.

Resumen

Este trabajo de investigación se desarrolla en la Terminal 320 de La División Territorial de Combustibles de Matanzas. Se evalúa el impacto ambiental y humano de accidentes provocados por incendios y/o explosiones. Primero, se describe el proceso de almacenamiento y se definen los escenarios a estudiar. Se determinan las características de los escenarios con el uso del *software* ALOHA. Luego, se evalúa el impacto sobre, el medio ambiente y las personas. Se cuantifican las cantidades de gases contaminantes como el monóxido de carbono y el dióxido de carbono, así como las cantidades de humo. Se analizan los efectos de la radiación y de la sobrepresión sobre las personas. El escenario BLEVE más bola de fuego presenta el mayor radio de afectación. La calidad ambiental se reduce en un 90% por la emisión de grandes contaminantes como el monóxido de carbono y por la producción de humo. Los efectos de las radiaciones afectan a mayor cantidad de personas que los de la sobrepresión, para un mismo radio.

Abstract

This research work is developed in Terminal 320 of the Territorial Division of Fuel Trading of Matanzas. The environmental and human impact of accidents caused by fires and / or explosions is evaluated. First, the storage process is described and the scenarios to be studied are defined. The characteristics of the scenarios are determined with the use of ALOHA software. Then, the impact on the environment and people is evaluated. Quantities of polluting gases such as carbon monoxide and carbon dioxide, as well as smoke amounts, are quantified. The effects of radiation and overpressure on people are analyzed. The BLEVE plus fireball scenario has the largest affect radius. Environmental quality is reduced by 90% due to the emission of large pollutants such as carbon monoxide and the production of smoke. The effects of radiation affect more people than those of overpressure, for the same radius.

Índice

Introducción	1
Capítulo 1: Análisis Bibliográfico	3
1.1- Tipos de escenarios que se manifiestan relacionados a incendios y/o explosiones. Características.....	3
1.2.- Herramientas que cuantifican el impacto ambiental de accidentes de incendios y/o explosiones.....	10
1.3 - Herramientas que cuantifican el impacto humano de accidentes de incendio y explosión.....	16
1.4- Conclusiones parciales.....	22
Capítulo 2: Materiales y métodos	23
2.1- Descripción del proceso en la Terminal 320.....	24
2.2-Estimación del alcance de los escenarios.....	25
2.2.1-Determinación de las características de los diferentes escenarios.....	25
2.2.2-Características y particularidades del software ALOHA.....	25
2.3-Metodología para la evaluación del impacto ambiental.....	29
2.3.1-Cálculo de la cantidad de humo generada en el incendio.....	29
2.3.2-Cálculo de la cantidad de contaminantes generados.....	30
2.3.3-Estimación del deterioro de la calidad ambiental por concepto de incendio y explosión.....	31
2.4-Metodología para la evaluación del impacto humano.....	32
Capítulo 3: Análisis de resultados	33
3.1- Análisis de los resultados del software ALOHA.....	34
3.1.1- Determinación del alcance del escenario charco de fuego en la Terminal 320.....	34
3.1.2-Determinación del alcance del escenario explosión de nube de vapor en la Terminal 320.....	38
3.1.3-Determinación del alcance del escenario BLEVE en la Terminal-320.....	42
3.2- Resultados y análisis de la evaluación del impacto ambiental.....	46
3.3-Resultados y análisis de la evaluación del impacto humano.....	49
3.3.1-Cuantificación de los daños por radiación.....	50
3.3.2-Cuantificación de los daños por sobrepresión.....	57
3.4- Conclusiones parciales.....	59
Conclusiones	60
Recomendaciones	61
Bibliografía	62
Anexos	68

Introducción

En estos últimos años el mundo ha experimentado una rápida evolución tecnológica, debido a esto ha surgido la necesidad de crear instalaciones industriales con el objetivo de satisfacer la demanda. Esta evolución ha dado lugar a la creación de industrias petroquímicas a nivel mundial. Estas industrias representan un alto riesgo de incendio y explosión por el elevado nivel de inflamabilidad y volatilidad de las sustancias que se manejan.

Gyenes *et al.*, (2017) afirma que estos riesgos se han puesto de actualidad en las últimas décadas, a causa de accidentes de graves consecuencias con efectos negativos para el medio ambiente y las personas. Es de vital importancia el análisis de riesgos para identificar posibles escenarios la probabilidad de ocurrencia y los daños que estos puedan causar y prevenirlos.

Los accidentes en las industrias de procesos químicos no solo pueden causar pérdidas de vida y propiedad sino también un daño irreparable e incalculable al medio ambiente. (Abbasi *et al.*, 2018; Hosseinnia *et al.*, 2018; Villa *et al.*, 2016).

Muchos autores plantean que los accidentes químicos son las peores formas de contaminación ambiental que existen, ya que, en un breve período de tiempo ocurre un deterioro considerable de la calidad ambiental debido a los gases que se generan (Dueñas, 2018 Abbasi *et al.*, 2018).

En Cuba existen empresas de perforación de petróleo, comercializadoras de combustibles y refinerías encargadas del procesamiento del petróleo crudo con distintos fines.

La División Territorial de Comercialización de Combustibles de Matanzas (DTCCM) es la encargada de recepcionar el crudo tratado de las Empresas de Perforación y Extracción de Petróleo de Occidente y Centro, y de su reducción de viscosidad a través de la adición de solventes para su comercialización posterior. Además, recibe otros combustibles de las refinerías como la nafta, el fuel oil, la gasolina y el combustible de aviación. La DTCCM posee cinco áreas fundamentales: la planta de Gas Licuado del Petróleo, la Terminal 320, los muelles (PT1, PC2, PC3, Bayona y

FP), la Base en Tierra (Supertanquero) y la Base de Crudos. En la Base de Crudos es donde se elaboran las mezclas de Petróleo Crudo Nativo Mejorado (PCNm) de 650, 1100 y 1400 cSt a partir de la adición de nafta solvente; siendo esta área de interés a estudiar por las grandes capacidades de almacenamiento en los tanques y por los incidentes de incendio, derrames y fallos eléctricos ocurridos en la misma. Además, se desconoce el alcance que pueda tener un incendio o una explosión y los daños que estos puedan ocasionar al medio ambiente y a las personas.

Por esta razón se plantea el siguiente **problema** de investigación: ¿Cómo determinar los daños al medio ambiente y los perjuicios a las personas que se producen como consecuencia de accidentes relacionados a incendio y explosión en la Terminal 320 de La División Territorial Comercialización de Combustibles de Matanzas?

Para la resolución de este problema se expone la siguiente **hipótesis**: Si se realiza una evaluación, mediante herramientas que permitan cuantificar el impacto ambiental y humano de posibles accidentes por incendio y explosión se podrán determinar los daños provocados por los mismos al medio ambiente y a los recursos humanos.

El **objetivo general** de este trabajo es: Evaluar el impacto ambiental y humano de posibles accidentes causados por incendio y explosión en la Terminal 320 de La División Territorial Comercialización de Combustibles de Matanzas.

Los **objetivos específicos** son:

- Estimar el alcance de los posibles escenarios relacionados a incendios y explosiones.
- Determinar las herramientas más eficaces que cuantifiquen el impacto ambiental y humano producto de accidentes relacionados a incendio y explosión.
- Pronosticar el deterioro de la calidad ambiental por concepto de estos accidentes.

Capítulo 1: Análisis Bibliográfico

En este capítulo se exponen las ideas fundamentales establecidas en la literatura especializada con respecto al análisis cuantitativo de riesgo desde una perspectiva ambiental y humana. Primero, se explican los tipos de accidentes de incendio y explosión que pueden ocurrir en el manejo de hidrocarburos. Luego se analizan las diferentes técnicas que cuantifican el impacto ambiental producto de estos accidentes. Finalmente, se explican las herramientas que estiman el daño a los seres humanos.

1.1- Tipos de accidentes que pueden ocurrir en la industria petrolera relacionados a incendios y/o explosiones. Características

En este epígrafe se analiza lo planteado por diferentes bibliografías acerca de los escenarios que pueden manifestarse debido a incendios y/o explosiones; así como sus características fundamentales.

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 (Casal *et al.*, 2002 y Villa *et al.*, 2016).

Vipin *et al.*, (2018). Los accidentes pueden ocurrir en diferentes niveles y áreas en industria de procesos químicos, durante el transporte, almacenamiento y / o fabricación de sustancias.

Los accidentes de gran magnitud que pueden ocurrir en una industria química están casi siempre asociados al escape de un producto tóxico o inflamable, generalmente un fluido; sin embargo, algunos accidentes pueden suceder en el interior del equipo sin que se produzca un escape. (Casal *et al.*, 2002).

Los accidentes en las plantas petroquímicas y refinerías son bastantes destructivos, debido a la gran reactividad de los productos químicos que están presentes en las mismas. (Chang *et al.*, 2006, Lobato *et al.*, 2009, Ebrahemzadih *et al.*, 2015, Zhoua *et al.*, 2016).

Azari *et al.*, (2017) y Vipin *et al.*, (2018) afirman que. El incendio es uno de los accidentes industriales más comunes, es la reacción química de una sustancia combustible y oxígeno, con gran desprendimiento de calor.

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, ya que la radiación térmica puede afectar a otras partes de la planta y generar nuevos accidentes (explosiones o escapes). Por otra parte, el humo puede, además, complicar notablemente la actuación de los equipos de intervención y someterlos a un peligro adicional (falta de visibilidad o intoxicación). (Casal *et al.*, 2002, Aboud, 2008, Wells, 2003).

Cuando se produce un escape de un líquido inflamable se pueden generar diferentes tipos de incendio, unos de estos pueden ser los charcos de fuego al aire libre. Los charcos de fuego al aire libre se originan cuando se produce un escape o vertido de un líquido combustible sobre el suelo y en el exterior. En caso de que se produzca la ignición del líquido derramado, el tipo de fuego resultante dependerá en gran medida de si el escape es contínuo o instantáneo. Si el escape es instantáneo, el líquido se irá esparciendo hasta que encuentre una barrera o hasta que se haya consumido todo el combustible en el incendio. En caso de un escape continuo, el charco irá creciendo hasta que la velocidad de combustión iguale el caudal de vertido. De este modo se llega a un diámetro de equilibrio, que se mantiene mientras no se detiene la fuga. Por otra parte, si el líquido queda retenido dentro de algún recipiente o área protegida, como puede ser una cubeta, el incendio no dependerá tanto de si el escape es instantáneo o continuo. (Casal *et al.*, 2002).

Los principales factores perjudiciales del charco de fuego son la radiación térmica, los productos calientes de la combustión y los productos tóxicos que desprende la llama ardiente. (Machado y Román, 2017)

Vipin *et al.*, (2018). De todos los posibles accidentes los incendios de charco de fuego son, la mayoría de las veces, los desencadenantes de incendios más grandes, explosiones y / o liberaciones tóxicas.

En caso de un derrame de una sustancia inflamable existen diversos escenarios, si cerca del derrame hay una fuente de ignición lo más probable es que ocurra un charco de fuego, si no ocurre la ignición inmediata este líquido se evapora y como consecuencia se forma una nube de vapor. (Casal *et al.*, 2002, Serrano *et al.*, 2014, Azari *et al.*, 2017, Gyenes *et al.*, 2017, Vipin *et al.*, 2018).

Existe una tipología muy variada de incendios que pueden directamente afectar a los depósitos de almacenaje, pero uno de los más peligrosos, tanto por la magnitud de sus consecuencias, como por su difícil predicción, es el llamado boilover o slopover, aunque en ocasiones se le llama foamover o puking, conocido también por incendio de borbollón. (Casal *et al.*, 2002).

Según Casal *et al.*, (2002) y Nwabueze, (2016) el borbollón puede producirse generalmente en depósitos que contienen mezclas de diversos hidrocarburos. Si en uno de estos depósitos se produce un incendio, que puede durar horas, la capa superficial de hidrocarburo se va calentando debido a la radiación del incendio. Esta capa entra en ebullición, experimentando un proceso de destilación: los componentes más volátiles pasan en mayor medida a la fase vapor, alimentando la llama. De esta forma, al irse enriqueciendo en los componentes más pesados, esta capa superficial va aumentando, a su vez, la temperatura. A medida que transcurre el tiempo, la capa rica en productos menos volátiles, más pesados, aumenta de espesor, progresando en profundidad. La velocidad a la que aumenta su espesor es mayor que la velocidad a la que retrocede la superficie del líquido contenido en el depósito. De esta forma una onda de calor se propaga hacia la parte inferior del depósito. Si en el mismo hay agua, en forma de una capa acuosa o de emulsión, esta ola de calor llegará a la capa acuosa y se encuentra a una temperatura superior a la de ebullición del agua.

Esto provoca una cierta vaporización inicial del agua y la turbulencia propia de este fenómeno provocará la mezcla de ambas capas, con una fuerte vaporización de agua. Entonces, ocurre la generación, prácticamente instantánea de una gran cantidad de vapor, con un volumen específico muy superior al del líquido, provocando una violenta erupción, con la formación de una bola de fuego y la

proyección del combustible hacia el exterior, que puede ser hasta distancias considerables. (Nwabueze, 2016).

Según Casal *et al.*, (2002), Wells, (2003), Whemeier y Mitropetros, (2016) y Nwabueze, (2016) para que se produzca el boilover es necesario en general que se cumplan tres condiciones:

- Presencia de agua en el recipiente.
- Generación de una ola de calor, es decir, existencia de una amplia gama de volatilidades en los componentes presentes en el depósito.
- Que la viscosidad del hidrocarburo sea suficientemente elevada para dificultar el paso del vapor.

Los efectos derivados de un boilover pueden resumirse en dos según Casal *et al.*, (2002) en efecto de bola de fuego y efecto de proyección y esparcimiento del hidrocarburo en llamas. Debido a la rapidez con la que el hidrocarburo es impulsado hacia el exterior por el efecto pistón del boilover, se produce una descompresión hasta la presión ambiente que vaporiza parte del combustible, el cual a su vez formará una bola de fuego. El problema fundamental si se quiere cuantificar los efectos de dicha bola es la determinación de la cantidad de hidrocarburo que se vaporiza pasando a formar parte de la bola de fuego.

Tanto como si se forma la bola de fuego o no, existe un efecto que con toda seguridad provocará el boilover que es la proyección y esparcimiento de parte o todo el líquido contenido en el recipiente. Esto es debido a la elevada energía cinética suministrada al líquido por el efecto pistón. Las distancias alcanzadas por el líquido proyectado pueden alcanzar otros recipientes agravando las consecuencias iniciales del accidente. (Casal *et al.*, 2002).

En caso de incendio con posibilidad de boilover, una forma de seguir la progresión de la ola de calor consiste en instalar sobre la pared exterior del depósito tiras de pintura intumescente, de manera que la variación de su aspecto indique el aumento de la temperatura en función de la altura. Otra forma, en caso de emergencia, es lanzar agua sobre la pared con una manguera, de forma suave, observando si ebulle

o no. A pesar de estas técnicas, la posible aparición de boilover en un momento determinado sigue presentando un elemento de incertidumbre si no se conoce a qué altura se encuentra la capa de agua o de emulsión. (Casal *et al.*, 2002).

Se puede definir una explosión como una liberación repentina de energía, que genera una onda de presión que se desplaza alejándose de la fuente mientras va disipando energía. Esta liberación tiene que ser, no obstante, bastante rápida y concentrada para que la onda que se genera sea audible. No es necesario, pues, 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, Wells, 2003, HSE, 2018).

Existen las explosiones generadas en espacios cerrados como son: la ignición de mezclas gaseosas inflamables y la ignición de polvo combustible en suspensión; y las generadas en espacios abiertos como la ignición de nubes de vapor no confinado. Además, la explosión de recipientes de gas comprimido, de gas licuado o líquido sobrecalentado (en inglés BLEVE boiling liquid expanding vapor explosion) y reacciones fuera de control (en inglés runaway reactions). (Casal *et al.*, 2002).

Para interés de este trabajo, solo se estudian las explosiones generadas en espacios abiertos, que es precisamente, la ignición de nubes de vapor no confinado y, además, el fenómeno del BLEVE.

Casal *et al.*, (2002) afirma, 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. Esto puede ocurrir, tanto en la planta, como en el transporte o rotura de un gaseoducto.

Una vez que se forma la nube esta puede:

- Dispersarse en el aire antes de que se produzca la ignición, sin causar daños.
- Prender inmediatamente e iniciar así un incendio de charco (en general, en este caso no habrá explosión y los daños ocasionados serán menores).

-Dispersarse en un área extensa y producirse la ignición al cabo de un cierto tiempo, de manera que se formará una gran llamarada.

-Lo mismo que el caso anterior, pero de modo que el frente de la llama se acelera tanto que genera una onda de sobrepresión.

Según Casal *et al.*, (2002) y Paris, (2019). Las explosiones de tipo BLEVE son uno de los peores accidentes que pueden ocurrir en la industria química o en el transporte de mercancías peligrosas. Esto es un accidente que involucra simultáneamente efectos térmicos y mecánicos.

Si se calienta un recipiente que contiene líquido a presión, por la radiación procedente de un incendio, la presión en su interior irá en aumento. En un momento dado, las paredes no podrán resistir la elevada tensión a la que están sometidos y cederán. Esto sucederá, principalmente, en la parte superior del accidente, donde la pared, al no estar bañada por el líquido, no estará refrigerada, de esta forma, aumentará su temperatura y disminuirá su resistencia mecánica. En cambio, la parte del recipiente situada por debajo del nivel del líquido que contiene transmitirá el calor recibido al líquido, 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 aun mayor de esta superficie, debido al calor de vaporización. (Casal *et al.*, 2002).

La despresurización súbita del líquido hará que este se encuentre a una temperatura superior a la que le correspondería en la curva de saturación P-T para la nueva presión. El líquido que se encuentra en estas condiciones de inestabilidad se define como líquido sobrecalentado. Si su temperatura en el momento de la despresurización es superior a una temperatura denominada límite de sobrecalentamiento, característica de cada producto, se producirá una vaporización instantánea y brutal de parte del mismo, que será vertido al exterior en forma de mezcla bifásica líquido/vapor. El incremento extraordinario de volumen que experimenta un líquido al vaporizarse, que es de unas 1700 veces en el caso del agua y de unas 250 veces en el caso del propano, más la expansión del vapor preexistente, provocarán una onda de presión, así como la rotura del recipiente en

varios pedazos que serán lanzados a una distancia considerable. (Casal *et al.*, 2002).

Si la sustancia contenida inicialmente en el recipiente no es combustible, la onda de sobrepresión y la proyección de fragmentos serán los únicos efectos de la explosión. En cambio, si la sustancia contenida en el recipiente es combustible, la masa de líquido y vapor vertida en el momento de la explosión se incendiará, y dará lugar a una hoguera de forma aproximadamente hemisférica que se extenderá inicialmente a ras del suelo. El efecto de la radiación térmica en estos primeros segundos es muy importante. Esta masa de combustible, solo puede arder en superficie, porque su interior, muy rico en combustible y prácticamente sin aire, se encuentra fuera de los límites de inflamabilidad. (Casal *et al.*, 2002).

Según Casal *et al.*, (2002), la masa en ignición va aumentando su volumen de forma turbulenta, adquiriendo una forma más o menos esférica, y va ascendiendo, dejando una estela de diámetro variable semejante en la forma a la de la típica seta de una explosión nuclear. Las dimensiones de las bolas de fuego formadas de este modo, pueden ser extraordinariamente grandes, con un desprendimiento de radiación térmica fortísimo. La acción de la combinación BLEVE-bola de fuego puede sintetizarse en los efectos siguientes:

- Radiación térmica.
- Onda de sobrepresión.
- Fragmentos despedidos por la explosión.
- Lluvia eventual de combustible en los alrededores.

La característica fundamental de una BLEVE es la expansión explosiva de toda la masa de líquido evaporada súbitamente, aumentando su volumen más de 200 veces. La gran energía desarrollada en esa explosión repentina proyecta fragmentos rotos de distintos tamaños del recipiente a considerables distancias. Precisamente ésta es una prueba de confirmación de una BLEVE. Los fragmentos proyectados pueden arrastrar tras de sí a cierta masa de líquido en forma de

gotículas de finísima lluvia, con posibilidad de inflamación a considerables distancias. (Casal *et al.*, 2002).

Se plantea que los incendios y explosiones son de los accidentes más frecuentes en la industria, de ahí la importancia de su estudio y evaluación de su impacto. A criterio del autor de este trabajo, en base a lo analizado en la bibliografía especializada, los escenarios relacionados a incendios y/o explosiones que se deben analizar son: charco de fuego, nube de vapor inflamable, nube de vapor explosiva, BLEVE y el borbollón. (Casal *et al.*, 2002).

1.2- Herramientas que cuantifican el impacto ambiental de accidentes de incendios y/o explosiones

Los accidentes de incendio y explosiones ocasionan grandes daños al medio ambiente debido a la cantidad de compuestos contaminantes que liberan este tipo de accidentes. En este epígrafe se mencionan algunas herramientas capaces de cuantificar dichos daños.

Un índice de valoración de riesgo consiste en caracterizar el nivel de riesgo, desarrollar una valoración, cuantificar y evaluar el riesgo medioambiental. (Darbra *et al.*, 2010).

El índice Indiana Relative Chemical Hazard Score (IRCHS) cuantifica la sostenibilidad por un índice ambiental, índice de seguridad y el incremento de la ganancia para el proceso por el valor añadido. De acuerdo al IRCHS, el método de la Universidad de Tennessee (UTN) evalúa cada químico de forma separada y asigna un valor de peligro basado sobre los peligros químicos con respecto al ambiente, con énfasis sobre el sistema acuífero. (Aboud, 2008).

El índice de peligro atmosférico (AHI) propuesto por Gunasekera y Edwards, (2003) se usa para evaluar el impacto potencial de partículas transportadas por el aire relacionadas a productos químicos. Se asume una falla catastrófica de la planta y se estima el impacto sobre el ambiente atmosférico. El método se diseña para evaluar posibles alternativas de roturas en un proceso donde se escape un compuesto químico. El peligro primario en la industria química reside en el material,

ya que este está presente, hasta solo en el almacenamiento y, desde luego, en el procesamiento u otra actividad.

La NFPA, (1994) desarrolló un sistema que indica la inflamabilidad, reactividad y peligros para la salud de químicos peligrosos. El sistema se basa en dar un número de 0 a 4 a un químico, indicando su efecto. Índices detallados se consideran usualmente en muchos efectos ambientales o estudios, en detalles, de ciertos efectos sobre la vida en la planta. (Aboud, 2008).

El índice de evaluación del riesgo ambiental propuesto por Chen *et al.*, (2013) consiste en tres etapas: caracterizar el nivel de riesgo, desarrollar un algoritmo de evaluación para cuantificar el riesgo ambiental, y evaluar el riesgo ambiental con los datos recogidos. Se desarrolla un índice para la evaluación del riesgo ambiental para la industria petroquímica basado en los siguientes cinco indicadores mayores:

- Materiales peligrosos.
- Condición de equipamiento incluyendo bombas, tuberías y tanques de almacenamiento.
- Proceso productivo.
- Seguridad ambiental y salud.
- Vulnerabilidad de receptores.

Cada indicador mayor es subdividido, como se muestra en la Tabla 1.1

Tabla 1.1: Sistema del índice de la evaluación del riesgo ambiental para la industria petroquímica

Indicadores mayores	Indicadores menores	Explicación del indicador
Materiales peligrosos	Cantidad	La cantidad de materiales peligrosos en el almacenamiento y producción (kg).

	Propiedad	Las propiedades químicas y físicas de materiales peligrosos.
Proceso productivo	Tipo de reacción	Reacciones químicas. Reacciones física.
	Temperatura	La temperatura del reactor (°C)
	Presión	La presión del reactor
Condición del equipamiento	Riesgo inherente al equipamiento	La cantidad de accidentes inherentes del equipamiento
	Depreciación	Años de uso del equipamiento
	Cantidad de fallas	Cantidad de fallas del equipamiento sobre una base anual
Seguridad ambiental y salud	Sistemas de monitoreo	Dispositivos y sistemas de control monitoreando emisiones contaminantes y procesos productivos
	Sistema de gestión	ISO 14000 y ISO 18000
	Sistema de emergencia	Acción de emergencia y planes de responsabilidad
	Habilidad de los trabajadores	Años de experiencia y nivel de entrenamiento de los trabajadores
Vulnerabilidad del receptor	Densidad de población	Densidad de la población cerca de la planta
	Proximidad de objetivos ecológicos y otras entidades comerciales	Número de objetivos ecológicos, número de otras plantas petroquímicas o similares

	Situación local de responsabilidad de emergencia	Caminos aceptables y distancia a facilidades médicas
--	--	--

Los riesgos ambientales dentro de las plantas petroquímicas se asocian con las fuentes de los riesgos y los receptores de los riesgos, los cuales pueden incluir la población local y objetivos ecológicamente sensibles como las fuentes de agua.

Cuando la vulnerabilidad de los receptores del riesgo se incrementa, la contaminación ambiental y las pérdidas económicas provocadas por los accidentes también crece. Por eso, el índice de riesgo ambiental es una función de los factores de influencia del riesgo ambiental y se puede calcular con la ecuación 1.1

$$R = f(S, P, E, M, L) = \sqrt[5]{S \cdot P \cdot E \cdot M \cdot V} \quad (1.1)$$

Donde R es el índice de riesgo ambiental, el cual representa el riesgo ambiental más elevado cuando el valor de R va en ascenso; los materiales peligrosos, el proceso de producción, las condiciones el equipamiento, la seguridad ambiental y salud y la vulnerabilidad del receptor del riesgo se designan como S, P, E, M y V, respectivamente.

El riesgo ambiental de materiales peligrosos (S), es una función de la cantidad y propiedades de los materiales. Los términos C y X1 se usan para expresar las características y los índices de cantidad (cantidad actual/cantidad crítica) de materiales peligrosos, respectivamente. La cantidad crítica de materiales se obtiene de las bases de datos químicas.

S se calcula por la ecuación 1.2

$$S = \frac{\sum_{i=1}^{n_1} (C \cdot X_{1i})}{n_1} \cdot 100 \quad (1.2)$$

En esta ecuación, n_1 representa los tipos de materiales peligrosos. El valor de C depende sobre si los materiales peligrosos o explosivos, inflamables o tóxicos. (Delvosalle et al., 2006). Valores de C y de X_1 se obtiene de la literatura.

Este índice propuesto por Chen et al., (2013) tiene como principal desventaja la falta de disponibilidad en la literatura especializada de alguno de los factores en los que se sustenta. Además, es más utilizado en la petroquímica que en el manejo de hidrocarburos.

El Índice de Severidad de Biodiversidad (BSI) para escenarios de contaminación accidental es la respuesta a la siguiente interrogante: “Si el escenario S ocurriera en las condiciones corrientes con respecto a la funcionalidad de la planta industrial estudiada y sus alrededores, cuán importante sería para la sociedad, sus esperadas consecuencias sobre el ambiente circundante”. (Denat, 2017).

El accidente en la ciudad de Seveso en Italia, durante el cual una nube tóxica significativa se escapó en 1976, los estados europeos adoptaron una política común sobre la prevención de riesgos industriales mayores. Desde el 24 de junio de 1982, la directiva Seveso requiere a los estados y compañías para identificar los riesgos asociados con actividades industriales peligrosas listadas y toman los pasos necesarios para ejecutarlo. Actualmente, en Francia, basado en la cantidad de productos peligrosos presentes en los establecimientos, públicos y privados, facilitan que puedan ser clasificados en diferentes categorías de Facilidades Clasificadas para la protección del ambiente (ICPE).

Una vez que se conocen los efectos de un accidente, se hace necesario determinar sus consecuencias, a través de una estimación de lo que sucederá cuando estos efectos actúen sobre las personas y el medio. Esta estimación puede realizarse mediante una serie de datos tabulados y gráficos, o mediante los denominados modelos de vulnerabilidad. El resultado de estos modelos es una aproximación, cuya validez depende del buen criterio y experiencia del analista.

Conesa, (2000) define la Evaluación del Impacto Ambiental (EIA) como un proceso de análisis encaminado a identificar, predecir, interpretar, valorar, prevenir o corregir y comunicar, el efecto de un Proyecto sobre el Medio Ambiente.

El objetivo del modelo es llegar a establecer, en primer lugar, y a través de los factores ambientales considerados, los indicadores capaces de medirlos, la unidad de medida y la magnitud de los mismos, transformando estos valores en magnitudes representativas, no de su alteración, sino de su impacto neto sobre el Medio Ambiente. (Conesa, 2000).

Blengini et al., (2017) proponen un Índice de Sustitución en función de cambiar sustancias dañinas al medio ambiente por otras menos dañinas, en función de su costo. Este se basa en la toxicología de las sustancias a sustituir.

Los efectos sobre el medio vienen medidos en unidades heterogéneas, y, por tanto, sin posibilidad de comparación entre las de los distintos factores, ni de adición o sustracción de manera directa (magnitudes inconmensurables). Al estar medidas las magnitudes en unidades heterogéneas, no se pueden cuantificar resultados globales, tales como el impacto total sobre un componente ambiental, sobre un subsistema, o el impacto total que, sobre el medio ambiente, ejerce la actividad en su conjunto. (Conesa, 2000).

Por esta razón, surge la necesidad de homogenizar las diferentes unidades de medida y, en último caso, expresarlas todas ellas en unidades abstractas de valor ambiental. Por lo que el valor en magnitud del indicador del impacto sobre un factor determinado, en unidades inconmensurables, se transforma en el índice de calidad que dicha magnitud representa, en cuanto a estado ambiental del indicador. (Conesa, 2000).

El proceso consiste en referir todas las magnitudes de los efectos a una unidad de medida común a la que denominamos unidad de impacto ambiental. Esta transformación es compleja y requiere un desarrollo, en la investigación de efectos, muy importante, y acabaría en la definición de una función distinta para cada

indicador de impactos que permitiera obtener el índice de calidad ambiental de un factor en función de la magnitud del impacto recibido. (Conesa, 2000).

Uno de los gases más tóxicos que afectan a la atmósfera es el monóxido de carbono, el cual, durante un incendio, aumenta considerablemente su concentración en la atmósfera. Existe una función de transformación para la concentración del mismo en calidad ambiental. (Conesa, 2000)

El humo reduce considerablemente la visibilidad, en función de la densidad óptica del combustible. (Hadjisophocleous y Benichou, 2016)

En cuanto a la evaluación del impacto ambiental, el autor de este trabajo, considera que la metodología ofrecida por Conesa, (2000) es la que permite, a través de funciones, emitir un criterio de calidad ambiental en función de la magnitud de un impacto determinado. Este impacto se define como la concentración de monóxido de carbono que se produce durante un incendio. Además, se evaluará el impacto ambiental, en cuanto a la producción de humo de un incendio, y las emisiones de dióxido de carbono, dióxido de nitrógeno e hidrocarburos.

1.3 - Herramientas que cuantifican el impacto humano de accidentes de incendio y explosión

Los accidentes por incendio, dañan a los recursos humanos debido al valor elevado de calor por radiación, mientras que las explosiones, lo hacen, a través del efecto de la onda expansiva u onda de choque. En este epígrafe se relacionan las herramientas que permiten cuantificar el impacto en los recursos humanos de este tipo de accidentes.

Aboud, (2008) propone un índice simple K, partiendo de la definición básica de riesgo, el cual se considera el producto de la probabilidad del incidente con la magnitud de sus efectos peligrosos. Este índice se puede aplicar a plantas químicas, empleando las propiedades de los químicos asociados a la producción. Es un índice que cuantifica riesgo a la vida humana.

El peligro primario en la industria química reside en el material, ya que este es un peligro hasta solo en el almacenamiento y desde luego, en el procesamiento u otra actividad.

El índice se determina por la ecuación

$$K = Freq \times Haz \times Inv \times Size \quad (1.3)$$

Donde Freq es la frecuencia de los accidentes, específicamente el número de accidentes por procesos por año. Haz es el efecto peligroso de un químico, el número de personas afectadas por tonelada de químico liberado. Inv es el inventario de los químicos liberados en toneladas por accidentes. Size es el tamaño de la planta, el número de los procesos mayores en la planta.

Este índice da una unidad global de K como número de personas afectadas por año, y representa el número máximo potencial de personas afectadas, en el caso de que un accidente cause el escape de todo el inventario de la planta de un químico determinado. Las personas afectadas incluyen fatalidades, personas afectadas y hospitalizadas. Se asume que la planta presenta un proceso mayor, en el cual un químico mayor se trata y un accidente en una parte de la planta puede causar, en un caso extremo, el escape del inventario de la planta.

Los detalles para el cálculo de este índice se proponen por Benichou, (2016). Los peligros del químico (Haz) se calcula a partir de bases de datos de accidentes, mirando el número de todos los accidentes asociados con el químico y dividiendo el número de personas afectadas por la cantidad escapada.

El inventario (Inv) se toma como la producción máxima inventariada en una planta petroquímica, usualmente en un mes de producción. La producción económica mínima se usa para evaluar el inventario, si el actual flujo de producción no está determinado o planeado.

El tamaño de la planta (Size), en términos de procesos mayores, puede variar de una planta a otra, pero se toma como 3 este número generalmente.

De los valores usados para los parámetros el índice depende la evaluación más realista del índice de riesgo. El índice se puede usar, además, en los siguientes casos:

1. El índice puede ser aplicado a una planta química incluyendo químicos mayores o menores. El índice en este caso se calcula como la sumatoria de los índices de los químicos individualmente.
2. Se usa el inventario de un mes de producción para calcular un máximo teórico para el riesgo. Consecuentemente, se emplea un valor alto para el inventario.
3. El número usado para el tamaño es un número representativo, una media. Puede ser empleado el actual número de procesos mayores.
4. El índice puede aplicarse para químicos en una planta, la cual no sea de almacenamiento. En este caso, un estimado para su inventario en el proceso se usa.
5. El índice se puede usar para estimar el riesgo desde un proceso simple en una planta, en este caso el tamaño debe ser tomado como 1 y el inventario como el inventario de químicos dentro del proceso.

El índice incluye la experiencia de previos accidentes en base de datos, las cuales se consideran fuente de valores de la información.

El Índice de Severidad de Biodiversidad (BSI) descrito en el epígrafe anterior, también evalúa impacto humano, en cuanto a toxicidad. (Denat, 2017).

Según Casal *et al.*, (2002), Wells, (2003) y Sanmiquel *et al.*, (2018) para realizar una estimación de las consecuencias se requiere una función que relacione la magnitud del impacto, con el grado de daño causado por el mismo; se debe establecer una relación entre la dosis y la respuesta.

Para realizar una estimación de las consecuencias se requiere una función que relacione la magnitud del impacto, con el grado de daño causado por el mismo; se debe establecer una relación entre la dosis y la respuesta. El método más utilizado

es el del análisis Probit, que relaciona la variable Probit (de probability unit) con la probabilidad.

La probit Y es una medida del porcentaje de la población vulnerable sometida a un fenómeno perjudicial de una determinada intensidad (V), que recibe un daño determinado. Tiene una distribución normal, con una media de 5 y una desviación normal de 1. La relación entre la variable probit (Y) y la probabilidad P es la descrita en la ecuación 1.4

$$P = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{Y-5} \exp\left[-\frac{V^2}{2}\right] dV \quad (1.4)$$

Esta relación tiene la ventaja de transformar la función sigmoideal que corresponde a la relación dosis-respuesta en una línea recta cuando se representa la función probit a escala lineal; lo que facilita considerablemente el ajuste de las constantes.

Normalmente la probabilidad (que varía de 0 a 1) se sustituye por un porcentaje (de 0 a 100), lo cual es más práctico en el análisis de riesgo. Para su aplicación se suele utilizar la ecuación 1.5

$$Y = a + b \ln V \quad (1.5)$$

Donde a y b son constantes que se determinan experimentalmente a partir de la información procedente de accidentes o, en algunos casos, de experimentación con animales. La variable V , es una medida de la intensidad de lo que causa el daño, puede tratarse de un solo parámetro (por ejemplo, una sobrepresión) o puede estar formada por una función de diversas variables (por ejemplo, una combinación de concentración y tiempo).

La aplicación de este porcentaje sobre la población afectada por el accidente permitirá estimar el número de víctimas.

Las consecuencias de la radiación térmica sobre la piel son las quemaduras, cuya gravedad depende de la intensidad de la radiación y de la dosis recibida. Según sea su profundidad las quemaduras se clasifican en tres categorías:

- ❖ Quemaduras de primer grado: afectan la epidermis de la piel, esta enrojece, pero no se forman ampollas; provocan dolor de poca intensidad.
- ❖ Quemaduras de segundo grado: pueden ser superficiales o profundas; provocan la aparición de ampollas.
- ❖ Quemaduras de tercer grado: afectan al grueso de la piel, que es destruida.

La existencia de quemaduras en una superficie importante del cuerpo, con la consiguiente destrucción o degradación de la piel, provoca la pérdida de fluido y aumenta extraordinariamente la probabilidad de infecciones. La esperanza de vida de un quemado está estrechamente condicionada por la superficie del cuerpo afectada por quemaduras de segundo y tercer grado. En el caso de quemaduras con una extensión de aproximadamente un 30% o más de la superficie corporal, puede producirse un choque.

El denominado límite soportable para las personas se considera del orden de 5 kW/m². Como valor de referencia se toma el valor de la intensidad de la radiación solar en un día soleado, que es de aproximadamente 1 kW/m² (a nivel del mar).

Una persona siente dolor cuando la piel llega a una temperatura de 45 (°C) a 0,1 mm de profundidad; estos datos permiten obtener la ecuación 1.6

$$t_d = \left(\frac{35}{q} \right)^{1,33} \quad (1.6)$$

Dónde: t_d es el tiempo necesario para sentir dolor en s;

Q es el flujo térmico incidente, kW/m².

A 5 kW/m² el tiempo necesario para sentir dolor en la piel desnuda es de 13 segundos aproximadamente, y con 40 s pueden producirse quemaduras de segundo grado. En general se considera que no hay dolor, sea cual sea el tiempo de exposición, con flujos térmicos inferiores a 1,7 kW/m². Cuando la temperatura de la piel llega hasta 55 °C aparecen las ampollas.

Si la persona está vestida, la situación es distinta. La ropa protege de la radiación siempre que no se queme; en caso de quemarse, su combustión provocará

quemaduras graves, con una elevada probabilidad de muerte. Si la ropa no se quema, su presencia reduce la superficie del cuerpo expuesta: en general, se considera que solo se irradia el 20% de esta superficie, que comprendería la cabeza (aproximadamente el 7% de la superficie del cuerpo), las manos (5%) y los brazos (8%). No obstante, aun teniendo en cuenta la distribución por edades de la población y su distinta mortalidad, y a pesar del efecto protector del vestido, con quemaduras importantes en un 20% del cuerpo moriría aproximadamente un 14% de la población sometida a radiación.

La mortalidad, teniendo en cuenta la protección de la ropa, puede estimarse utilizando la ecuación anterior y tomado un 14% del resultado obtenido.

Los daños causados por las explosiones pueden clasificarse en dos grupos:

- ✓ Daños directos debidos a la sobrepresión.
- ✓ Daños indirectos debidos a fragmentos, al desplazamiento del cuerpo o al hundimiento de viviendas.

El cuerpo humano es muy resistente a una sobrepresión, ya que está formado en gran parte por agua, un fluido no compresible. Así, los daños directos tienen lugar esencialmente en aquellos partes del cuerpo susceptibles de ser aplastadas, o sea, en los espacios vacíos (caja pulmonar y conducto auditivo), especialmente cuando el aumento de presión es súbito y no hay tiempo suficiente para adaptarse.

Las peores situaciones son aquellas en las que el cuerpo se encuentra cerca de una superficie (resistente) plana, perpendicular a la dirección de propagación de la onda de sobrepresión, que la refleja. Las sobrepresiones más altas aparecen cuando el cuerpo humano tiene su eje longitudinal perpendicular a la dirección de propagación de la sobrepresión. Esta es la posición más probable y, por lo tanto, la que se debe tener en consideración en el cálculo de los efectos directos.

Finalmente, el impacto es menor cuando el eje longitudinal del cuerpo está en la misma dirección que la propagación de la onda de choque.

La mortalidad por hemorragia pulmonar provocada por el aplastamiento de la caja torácica puede estimarse utilizando el impulso y las curvas de supervivencia. Otro efecto directo es la rotura del tímpano.

En función de lo analizado, se escogen las ecuaciones Probit Y para cuantificar el impacto humano. Existen diversas ecuaciones Probit Y, que calculan los daños a los recursos humanos por radiación y sobrepresión, entre las que se encuentran las propuestas por Casal et al., (2002), Wells, (2003) y Lees, (2012).

Se escogen para este trabajo las ecuaciones propuestas por Lees, (2012) para calcular los daños por sobrepresión y quemaduras por radiación Wells, (2003) para porcentaje de muertes por hemorragia pulmonar debido a sobrepresión.

1.4- Conclusiones parciales

1. En los procesos de almacenamiento de combustibles los escenarios relacionados a incendios y/o explosiones que se manifiestan en los tanques y tuberías son: charco de fuego, nube de vapor inflamable, nube de vapor explosiva, BLEVE y el borbollón.
2. La metodología de Conesa, (2000) ofrece criterio de calidad ambiental en función de la concentración de contaminantes.
3. Las ecuaciones Probit de Casal *et al.*, (2002) Lees, (2012) y Wells, (2003) cuantifican el impacto humano por radiaciones y sobrepresión como consecuencia de accidentes.

Capítulo 2: Materiales y métodos

Es necesario para aplicar cualquier técnica de análisis de riesgo, el conocimiento detallado del proceso que se estudia. En este capítulo se ofrece una descripción del proceso de mezcla en la División Territorial Comercialización de Combustibles de Matanzas. Además, se muestran las metodologías de las técnicas que se aplicarán, para analizar los diferentes riesgos que se pueden poner de manifiesto en la Terminal 320 por concepto de incendios y explosiones.

En la figura 2.1 se muestra la metodología general a seguir en esta investigación, basada en una secuencia lógica de análisis.

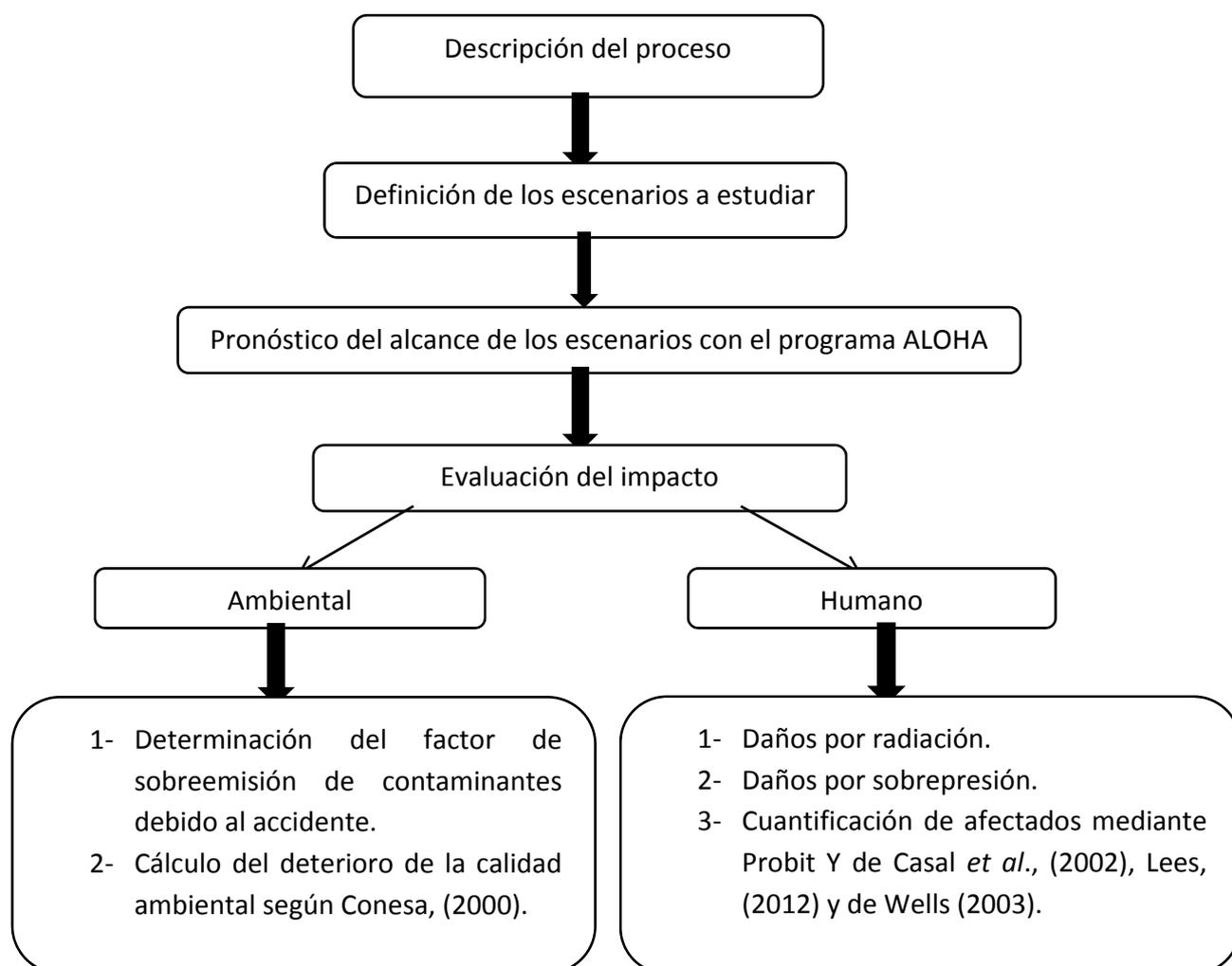


Figura 2.1: Metodología general basada en la secuencia lógica de análisis.

2.1- Descripción del proceso en la Terminal 320

La Terminal 320 (T-320) está diseñada para el almacenamiento y entrega de productos claros y oscuros, a través de alineaciones: para camiones cisternas, tanques cisternas a buques en los muelles y oleoducto para la entrega a la CTE José Martí. También se realizan las operaciones de carga de productos en transporte ferrocarril. En la T-320 se efectúan operaciones de preparación de mezclas y trasiegos entre tanques para garantizar la disponibilidad de los diferentes combustibles.

En la tabla 2.1 se muestra la caracterización de los tanques analizados en la T-320.

Tabla 2.1: Caracterización de los tanques del área.

Tanque	Sustancia almacenada	Capacidad nominal (m ³)	Diámetro del tanque (m)	Altura operacional (m)	Diámetro de la tubería (m)	
					Entrada	Salida
1	Diesel	8542	35,0	6,660	0,3048	0,2032
24	Diesel	11341	34,2	10,600	0,3048	0,3048
25	Diesel	11411	34,2	10,600	0,3048	0,2032
4	Diesel	10996	34,2	10,800	0,3048	0,2032
26	Diesel	11608	34,2	10,600	0,3048	0,3048
18	Gasolina de aviación	2316	15,5	10,500	0,2032	0,1524
74	Gasolina de aviación	1186	11,0	10,500	0,1524	0,1524
19	Gasolina de aviación	745	10,2	8,000	0,1524	0,1524
13	Turbo-combustible	11147	36,5	9,600	0,3048	0,3048
22	Turbo-combustible	10885	34,2	10,700	0,3048	0,3048

23	Turbo-combustible	11524	34,2	10,600	0,3048	0,3048
17	Nafta	4647	22,0	10,950	0,3048	0,2032
30	Fuel oil	10914	34,2	10,500	0,6096	0,4064
38	Fuel oil	10919	34,2	10,600	0,3556	0,3048

Fuente: Manual de operaciones de la DTCCM, (2018).

2.2-Estimación del alcance de los escenarios.

Para definir los escenarios que se pueden manifestar hay que tener en cuenta las propiedades de las sustancias que se pueden derramar, el análisis previo en la revisión bibliográfica y la caracterización de la planta.

2.2.1-Determinación de las características de los diferentes escenarios.

Para determinar las características de cada uno de los escenarios es necesario conocer: la cantidad de combustible que combustiona, el diámetro del charco de fuego, la duración del BLEVE y la intensidad de la radiación en un punto dado. Estas, son un paso esencial en la determinación del factor de sobreemisión de contaminantes y en la cuantificación de los daños humanos.

El Ministerio de Ciencia, Tecnología y Medio Ambiente de Cuba (CITMA), reconoce el programa ALOHA como un buen simulador de estos escenarios. Además este programa cuenta con un alto prestigio internacional y ha sido utilizado ampliamente por investigadores en todo el mundo.

Por estas razones se decide emplear el programa ALOHA para determinar las características de los escenarios.

2.2.2-Características y particularidades del *software* ALOHA

ALOHA es el acrónimo que se emplea para designar el programa de Ubicaciones Zonales de Atmósferas Peligrosas. Este se ha diseñado para emplearlo por responsables de los servicios de emergencias ante accidentes para la planificación y entrenamiento ante situaciones de emergencia.

El programa ALOHA emplea en sus cálculos dos modelos de dispersión: un modelo Gaussiano para gases ligeros que ascienden rápidamente, y el modelo de Degadis para gases densos que se dispersan a ras de suelo. Estos 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 lo que, ALOHA es capaz de estimar cómo una nube de gas peligrosa podría dispersarse en la atmósfera después de una descarga química accidental. Contiene una base de datos con información sobre las propiedades físicas de unos 1000 productos químicos peligrosos. Sus cálculos representan un balance entre exactitud y velocidad, puesto que se ha diseñado para que puedan usarlo los responsables de los servicios de emergencia.

ALOHA ha sido desarrollado conjuntamente por las agencias norteamericanas NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) y EPA (Environmental Protection Agency). (User's Manual ALOHA, 2016).

Existen seis pasos básicos e imprescindibles en la simulación con ALOHA que son:

1. Indicar la ciudad, fecha y hora del accidente.
2. Seleccionar el producto químico liberado.
3. Introducir las condiciones meteorológicas.
4. Describir la descarga del producto químico.
5. Mostrar en un gráfico las zonas de peligrosidad.
6. Determinar los niveles de riesgo en una ubicación específica.

ALOHA permite modelar escapes químicos de cuatro tipos y fuentes de emisión:

1. Emisiones directas a la atmósfera.
2. Charcos o piscinas de compuestos químicos en evaporación.
3. Tanques.
4. Tuberías de gases.

Si el producto almacenado es inflamable, pueden producirse tres tipos de accidentes en el tanque:

- a) El compuesto químico vertido se dispersa y se forma una nube tóxica y no arde.
- b) El compuesto químico está ardiendo debido a alguna chispa ocurrida durante el accidente, y se forma un charco de fuego o un chorro de fuego.
- c) BLEVE, una explosión que formará una bola de fuego, mientras el producto restante se acumula en un charco que arde.

Cuando se modela un escenario de BLEVE, ALOHA asume que la totalidad o parte del compuesto químico liberado forma una bola de fuego, y la cantidad restante se acumula en un charco que está ardiendo, este dato se debe introducir o permitir la estimación de ALOHA.

ALOHA brinda como resultado la velocidad promedio de descarga durante el accidente. Se dibujan zonas de riesgo que representan el área en cuyo interior 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.

El nivel de preocupación (LOC) se define como el valor umbral a partir del cual se considera que los seres vivos y bienes materiales dentro de dicha zona se encuentren en peligro. Ese peligro puede ser de varios tipos: toxicidad, inflamabilidad o riesgo de incendio, radiación térmica emitida por un incendio y sobrepresión de una nube de vapor que puede causar una explosión.

Si se eligen tres niveles de preocupación, ALOHA mostrará las zonas de preocupación en tres colores: rojo, naranja y amarillo. La zona roja representa el área de mayor peligro, y las zonas naranjas y amarillas las áreas de menor peligro respectivamente.

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:

1. Dispersión de una Nube tóxica (*Toxic Area of Vapor Cloud*).
2. Zonas de Inflamabilidad elevada (*Flammable Area of Vapor Cloud*).

3. Riesgo de explosión debido a la acumulación de vapores (*Blast Area of Vapor Cloud Explosion*).

En el mapa de la Zona de Riesgo, las líneas de trazos representan la incertidumbre en la dirección del viento, y las líneas continuas alrededor de la zona sombreada representan las líneas de confianza de la dirección del viento, donde la probabilidad de que la nube de gas permanezca es superior al 95%.

Se utilizan tres valores de LOC para radiación:

- ✓ Rojo: 10 kW/m² Potencialmente letal en el intervalo de 60 segundos.
- ✓ Naranja: 5 kW/m² Quemaduras de segundo grado en el intervalo de 60 segundos
- ✓ Amarillo: 2 kW/m² Dolor en 60 segundos.

Cuando se modela un escenario de explosión, ALOHA sugiere tres valores de sobrepresión por defecto basados en fuentes ampliamente aceptadas. El programa utiliza estos valores umbrales 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).

Los resultados de ALOHA pueden ser poco fiables si se dan las condiciones siguientes:

- ❖ Velocidades de viento muy bajas.
- ❖ Condiciones atmosféricas muy estables.
- ❖ Desigualdad de concentración cerca de la fuente de emisión del contaminante.
- ❖ Cambios de viento y efectos de conducción del terreno.

Además, ALOHA no tiene en cuenta los efectos de:

- ✓ Subproductos de incendios, explosiones y reacciones químicas.
- ✓ Partículas sólidas o radiactivas, los procesos de deposición seca y húmeda que les afectan.

- ✓ Mezclas de compuestos químicos, no los modela.
- ✓ Terreno, supone que el suelo es plano alrededor del accidente.
- ✓ Fragmentos peligrosos tras una explosión, no se modela su trayectoria.

2.3-Metodología para la evaluación del impacto ambiental

Para la evaluación del impacto ambiental que provocan los escenarios de incendio se utiliza la guía propuesta por Conesa, (2000), puesto que en esta guía se cuantifica el valor de la calidad ambiental en función de la concentración de contaminantes en la atmósfera como el monóxido de carbono. Se determina la cantidad de humo generada en el incendio y las emisiones de sustancias contaminantes como el monóxido de carbono y el dióxido de carbono.

2.3.1-Cálculo de la cantidad de humo generada en el incendio

En este epígrafe se exponen las principales ecuaciones con el fin de determinar el flujo másico de humo, que dificulta la visibilidad en el incendio.

Se calcula el flujo másico del humo (m_s), por la ecuación 2.1, donde ϵ es el factor másico de conversión a humo y m_f es el flujo másico de combustible que se quema.

$$m_s = \epsilon \cdot m_f \quad (2.1) \qquad \qquad \qquad \mathbf{2.1}$$

En la tabla 2.2 se muestra el factor másico de conversión a humo para cada sustancia dentro de este estudio.

Tabla 2.2: Factor másico de conversión a humo según Shawn, (2009) para diferentes hidrocarburos.

Sustancia	ϵ (Factor de emisión g/kg)
Diesel	0,017
Fuel oil	0,027
Nafta	0,011
Turbo combustible	0,019

Gasolina de aviación	0,007
----------------------	-------

Atendiendo a estos valores se determina la cantidad de humo generada en el accidente.

2.3.2-Cálculo de la cantidad de contaminantes generados

Además, se calculan las cantidades de otros gases contaminantes que se expulsan a la atmósfera producto de un incendio. Estos gases son el monóxido de carbono y el dióxido de carbono. Posteriormente se comparan estas emisiones con los valores medios de estos contaminantes en la atmósfera según el estudio de (Cuesta-Santos *et al.*,2017) expuesto en la Revista Cubana de Meteorología.

Según Tewarson, (2008) el factor de conversión a monóxido de carbono es 0,3 para el caso de los hidrocarburos analizados.

La tabla 2.3 muestra el factor de emisión de dióxido de carbono para cada sustancia.

Tabla 2.3: Factor de emisión de dióxido de carbono según IPCC, (2006)

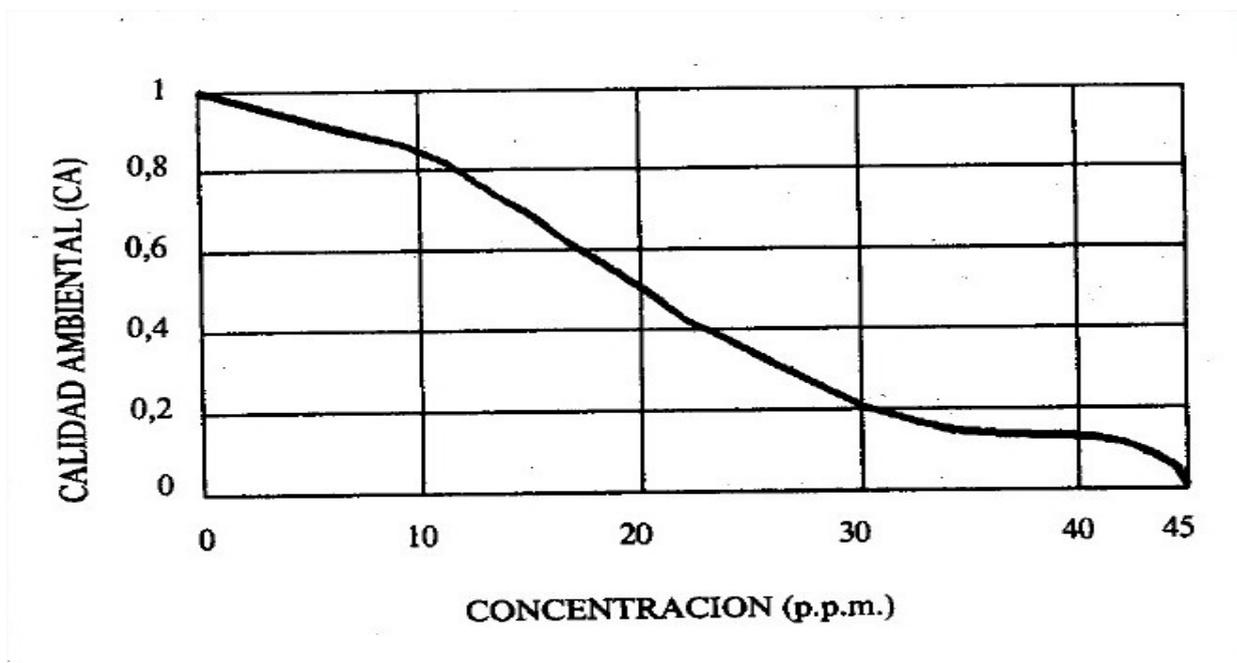
Sustancia	Factor de emisión de CO ₂ (Kg/TJ)
Turbo combustible	71 500
Diesel	74 100
Nafta	73 300
Fuel oil	71 900
Gasolina de aviación	70 000

La emisión promedio anual de monóxido de carbono en la zona industrial de la provincia de Matanzas es 63,578 según Cuesta-Santos *et al.*, (2017).

2.3.3-Estimación del deterioro de la calidad ambiental por concepto de incendio y explosión

Para la cuantificación del deterioro de la calidad ambiental se emplea la figura 2.2.

Figura 2.2: Gráfico de calidad ambiental vs concentración de monóxido de carbono según Conesa, (2000).



A través de esta figura se determina el deterioro de la calidad ambiental por concepto de un accidente químico.

2.4-Metodología para la evaluación del impacto humano.

Se emplean para determinar la vulnerabilidad de las personas a la radiación y sobrepresión, las ecuaciones Probit Y expuestas por Casal *et al.*, (2002), Eisenberg *et al.*, (1975) Wells, (2003) y Lees, (2012). Estas se muestran en la tabla 2.4

Tabla 2.4: Ecuaciones Probit Y para la cuantificación del impacto humano

Daños	Ecuación Probit Y	Términos y unidades	Fuente
Rotura de tímpanos	$Y = -12,6 + 1,524 \cdot \ln \Delta P$	P: sobrepresión en Pa	Eisenberg et al., (1975)
Efectos de la radiación sobre las personas	$Y = -10,7 + 1,99 \cdot \ln(I^{4/3} \cdot t)$	I: valor de radiación por unidad de área (kW/m ²). t: tiempo de exposición (s).	Lees, (2012)
Efectos de la sobrepresión sobre las personas	$Y = 5,3 + 1,37 \cdot \ln(P)$	P: sobrepresión en bar	Lees, (2012)
El porcentaje de muertes debido a hemorragia pulmonar	$Y = -77,1 + 6,91 \cdot \ln \Delta P$	P: sobrepresión en Pa	Wells, (2003)

Capítulo 3: Análisis de los resultados.

En este capítulo se muestran los resultados obtenidos y se analizan los mismos. Se valoran los resultados del programa ALOHA, referidos a los escenarios identificados relacionados a un derrame de cada sustancia. Se exponen los resultados relacionados con el impacto provocado debido a los daños al medio ambiente y a los recursos humanos.

En la figura 3.1 y 3.2 se muestran los escenarios que serán analizados a partir de un derrame de nafta, fuel oil, gasolina de aviación, turbocombustible y diesel.

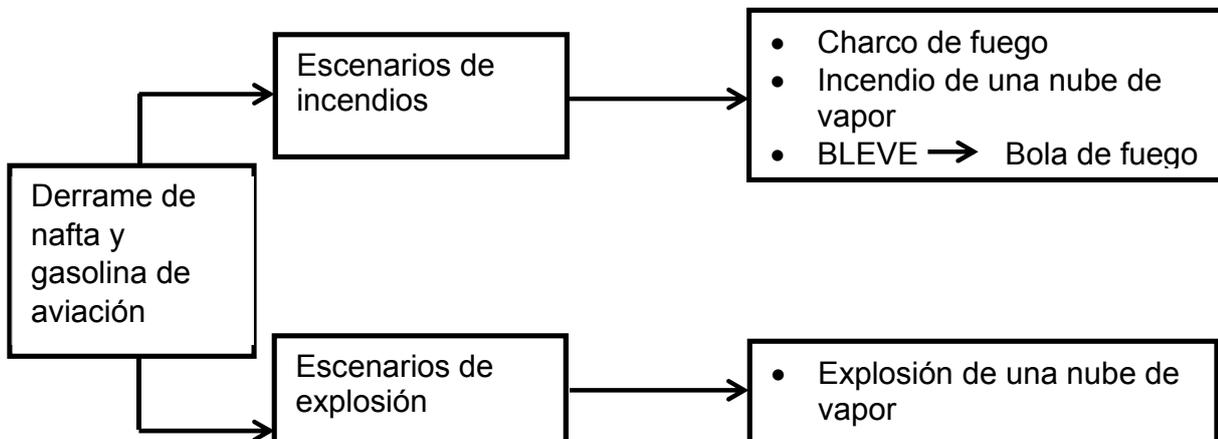


Figura 3.1: Posibles escenarios a partir de un derrame de gasolina de aviación y nafta.

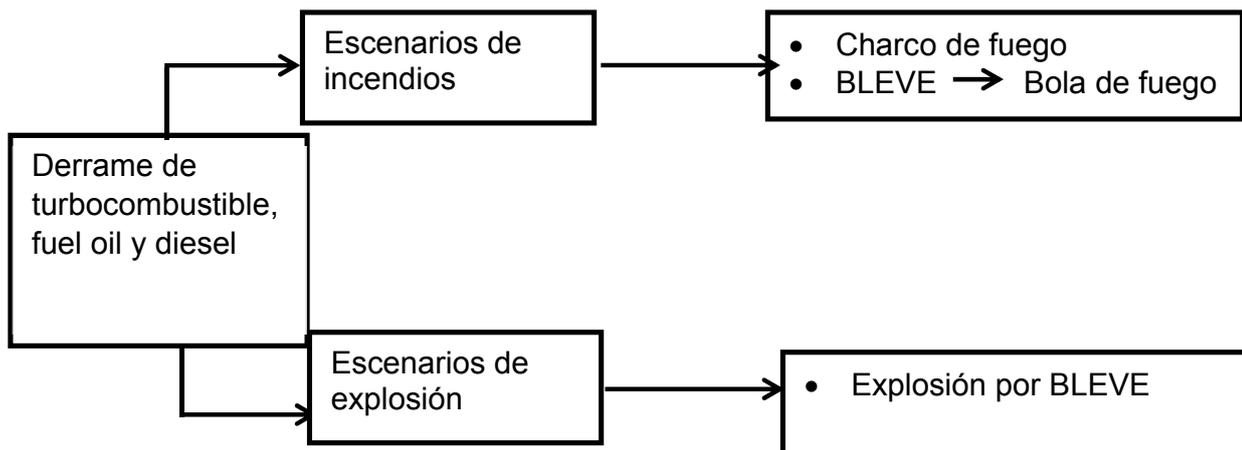


Figura 3.2: Posibles escenarios a partir de un derrame de turbocombustible, fuel oil y diesel.

Para la realización de las corridas en ALOHA se tuvo en cuenta lo siguiente:

- Se emplean los datos de las variables meteorológicas según Moya, 2016.
- Para el caso de la formación de una nube de vapor, se realizaron corridas para todas las direcciones del viento durante el momento del día, y cada una, para los dos extremos de temperatura: la media de las temperaturas mínimas y la media de las temperaturas máximas. Además, se hicieron corridas para la noche (momento de calma) en función de las dos temperaturas extremas.
- En el caso del charco de fuego, las corridas se realizan para los cuatro momentos extremos (día a temperatura máxima y mínima y noche a temperatura máxima y mínima).
- En el caso del BLEVE se realiza una sola corrida por cada tanque, puesto que este fenómeno solo depende de la cantidad del material involucrado en el mismo y de la geometría de la fuente.

3.1- Análisis de los resultados del *software* ALOHA.

Las simulaciones realizadas en el programa ALOHA, se llevan a cabo con el objetivo de obtener parámetros suficientes para la valoración correcta de un accidente de incendio y/o explosión y del impacto del mismo sobre el medio ambiente y los recursos humanos. Además, se obtiene el alcance del accidente en un radio determinado. Los resultados del *software* ALOHA se muestran en el anexo 1.

Además, los accidentes primarios, se consideran que están relacionados a un derrame de nafta, por las propiedades de esta sustancia.

3.1.1- Determinación del alcance del escenario charco de fuego en la Terminal-320

Los resultados obtenidos en las simulaciones del *software* ALOHA para el escenario charco de fuego se muestran en la tabla 3.1

Tabla 3.1: Resultados de las simulaciones para el charco de fuego.

Tanque	Volumen de derramado (m ³)	Diámetro del charco (m)	Duración del escenario (s)	Cantidad combustionada (Kg)	Calor transferido (TJ)
1	8542	28	3600	189123	8,45
24	11341	28	3600	189123	8,45
25	11411	28	3600	189123	8,45
4	10996	28	3600	189122	8,45
26	11608	28	3600	189123	8,45
18	2316	17,7	3600	82879	3,70
74	1412	13,3	3600	46620	2,08
19	745	13,3	3600	46620	2,08
13	11147	29	3600	190829	8,53
22	10885	29	3600	190829	8,53
23	11524	29	3600	190829	8,53
17	4647	25	3600	183161	8,19
30	10914	65	3600	776477	34,71
38	10919	38	3600	264218	11,81

La cantidad de combustible que interviene en el fenómeno de combustión supera las 100 t en un 80% de los casos, por lo que se trata de una afectación considerable al medio ambiente según Conesa, (2000), An *et al.*, (2013), Helier *et al.*, (2017) y Huang *et al.*, (2018).

La figura 3.3 muestra el alcance de este escenario en los tanques 17 (figura 3.3a) y 30 (figura 3.3b), que según estudios previos el 17 es uno de los más propensos a iniciar el efecto dominó, mientras que el tanque 30 es el de mayor diámetro en cuanto al charco de fuego.



Figura 3.3a: Alcance de las radiaciones por un charco de fuego en el tanque 17



Figura 3.3b: Alcance de las radiaciones por un charco de fuego en el tanque 30

El alcance que tiene el escenario charco de fuego en el tanque 17, evidencia que este escenario tiene una elevada potencialidad de escalado y de producir efecto dominó a partir de esta unidad de proceso. Esto se debe a que este tanque almacena nafta que es una sustancia altamente inflamable y explosiva. Esta misma situación sucede con el tanque 30. Esto significa, que, de ocurrir este escenario, producto del efecto continuado, existiría una afectación considerable al medio ambiente.

La figura 3.4 muestra el alcance de este escenario en los tanques 19 (figura 3.4a) y 1 (figura 3.4b). El tanque 19 almacena gasolina de aviación; mientras que el tanque 1, diesel.

En la figura 3.4b se demuestra que es poco probable el escaldado a partir del tanque 1, debido a que existen pocos equipos sometidos a intensidades de radiaciones



Figura 3.4a: Alcance de las radiaciones por un charco de fuego en el tanque 19



Figura 3.4b: Alcance de las radiaciones por un charco de fuego en el tanque 1

emitidas por el tanque origen. No existen unidades de procesos afectadas por radiaciones de 10kW/m^2 ; sin embargo, sí se afectan a distancias de 101m recibiendo radiaciones de 5kW/m^2 que provoca quemaduras de segundo grado en un intervalo de 60 segundos. También a distancias de 151m las radiaciones emitidas tienen una intensidad de 2kW/m^2 . Esto puede deberse además a que el tanque 1 almacena diesel, que es menos inflamable y volátil respecto a las otras sustancias almacenadas. Esto concuerda con los resultados obtenidos por Kerschgens *et al.*, (2016) en su investigación.

El escenario charco de fuego en los tanques analizados presenta resultados semejantes. Esto se debe a que ALOHA limita la duración del escenario a una hora. De ahí en adelante, no calcula la evolución del accidente por los cambios

significativos que pudieran ocurrir. A pesar de esto, existe una afectación al medio ambiente y las personas.

3.1.2- Determinación del alcance del escenario explosión de nube de vapor en la Terminal-320

La dirección del viento y la velocidad del mismo ejercen gran influencia en la dispersión de una nube de vapor. En la tabla 3.2 se muestran las distancias a las que se encuentran los equipos con respecto a la fuente de origen del escenario y los rumbos del viento que más acercarían la nube al equipo objetivo.

Tabla 3.2: Distancia entre equipos y fuente en el rumbo del viento.

Tanque origen	Tanque afectado	Rumbo	Distancia a la fuente (m)
17	30	SSE	101
	38	SE	115
	1	SW	90
	4	W	107
	26	ENE	62
	25	ENE	119
	24	ENE	172
	13	NNE	86
	22	NE	134
	23	NE	181
	18	NNW	120
19	NNW	149	

	74	N	131
19	30	SSE	250
	17	SSE	149
	38	SE	251
	26	SE	166
	25	SE	194
	24	SE	228
	13	SE	108
	1	S	192
	4	SSW	127
	18	SSW	29
	23	ESE	188
	74	ESE	51
	22	ESE	143

En las figura 3.5 se muestra el alcance de una nube de vapor explosiva con respecto al tanque 17.



Figura 3.5: Alcance del escenario nube de vapor explosiva en el tanque 17.

Se observa como en la figura 3.5 el radio de la nube cubre toda el área analizada. Sus efectos pueden alcanzar hasta 346m desde la fuente de explosión, a una sobrepresión en este punto de 3,5psi, que puede provocar lesiones graves en las personas; y puede llegar hasta 516m, con una sobrepresión de 1psi, que ocasiona rotura de cristales, ruidos intensos para el oído humano y pérdida temporal.

En la figura 3.5 se observa que para distancias desde 10m hasta 300m hay valor de perjuicios de 0,2 según Lees, (2012).

En la figura 3.6 se muestra el alcance de una nube de vapor explosiva con respecto al tanque 19.



Figura 3.6: Alcance del escenario nube de vapor explosiva en el tanque 19.

Los efectos de la nube de vapor explosiva en el tanque 19 pueden alcanzar hasta 85m desde la fuente de explosión, a una sobrepresión de 3,5psi, provocando lesiones graves en las personas; y puede alcanzar hasta 125m, con una sobrepresión de 1psi, que ocasiona rotura de cristales, ruidos intensos para el oído humano y pérdida temporal.

El escenario nube de vapor explosiva presenta mayor alcance en el tanque 17 que en el tanque 19 debido a que el tanque 17 presenta mayor capacidad que el tanque 19, incidiendo en mayores cantidades de unidades de procesos.

3.1.3- Determinación del alcance del escenario BLEVE en la Terminal-320

El escenario BLEVE más bola de fuego se puede originar como accidente secundario a partir del escenario charco de fuego. Los diferentes resultados que muestra el software ALOHA para este escenario se muestran en la tabla 3.3.

Tabla 3.3: Resultados de la simulación en el software ALOHA para BLEVE más bola de fuego.

	Tanques						
Parámetros	1	24, 25, 4, 26, 13, 22, 23, 38	18	74	19	17	30
Diámetro de la bola de fuego (m)	960	992	643	542	444	813	992
Duración (s)	42	43	31	27	23	37	43
Distancia que alcanza la radiación de 10,0 kW/m ² (zona roja) (m)	1900	2000	1300	1100	929	1600	2000
Distancia que alcanza la radiación de 5,0 kW/m ² (zona naranja) (m)	2700	2800	1900	1600	1300	2300	2800
Distancia que alcanza la radiación de 2,0	4200	4300	2900	2500	2000	3600	4300

kW/m ² (zona amarilla) (m)							
---------------------------------------	--	--	--	--	--	--	--

En la figura 3.7 se muestra el alcance de las radiaciones de las bolas de fuego para el tanque 1.



Figura 3.7: Alcance de las radiaciones de las bolas de fuego en el tanque 1.

En la figura 3.7 se muestra que, hasta distancias de 1,9km, se emiten radiaciones superiores a 10kW/m² cubriendo toda el área correspondiente a la DTCCM. Estas radiaciones son letales en un intervalo de 60 segundos. Hasta distancias de 2,7km se emiten radiaciones superiores a 5kW/m² provocando daños y quemaduras de segundo grado en un intervalo de 60 segundos en las zonas pobladas aledañas a la empresa. A una distancia de 4,2 km se emiten radiaciones con intensidades superiores a 2 kW/m², las cuales causan dolor en menos de 60 segundos. Se

observa que a esta distancia ya se afecta gran parte de la población de Versailles y de la zona de Playa.

En las figura 3.8 se muestra el alcance de las radiaciones de las bolas de fuego para el tanque 17.



Figura 3.8: Alcance de las radiaciones de las bolas de fuego en el tanque 17.

El tanque 17, al igual que el tanque 1, en el caso de la radiación superior a 10 kW/m^2 , cubre toda el área correspondiente a la empresa; mientras que la radiación superior a 2 kW/m^2 alcanza áreas de zonas pobladas aledañas, lo que daña no solo al personal de la empresa, sino también a los habitantes de la zona de Versailles. Según ALOHA, (2016) las radiaciones superiores a 10 kW/m^2 son potencialmente letales en un intervalo de 60 segundos de exposición; las superiores a 5 kW/m^2 provocan quemaduras de segundo grado y las superiores a 2 kW/m^2 , dolor dentro de 60 segundos.

En la figura 3.9 se muestra el alcance de las radiaciones de las bolas de fuego para el tanque 19.



Figura 3.9: Alcance de las radiaciones de las bolas de fuego en el tanque 19.

El tanque 19, como muestra la figura 3.9, afecta gran parte de la empresa con radiaciones superiores a 10 kW/m^2 llegando hasta 929m lo que puede causar pérdidas letales en un intervalo de 60 segundos. Puede causar quemaduras de segundo grado hasta distancias de 1,3km (radiaciones de 5 kW/m^2) y dolor en las personas hasta distancias de 2km (radiaciones de 2 kW/m^2).

Comparado con el tanque 1 y el tanque 17, las radiaciones provocadas por el tanque 19 presentan menor alcance debido a que este tanque posee menor capacidad de almacenamiento que los anteriores.

Por todo lo que se ha analizado anteriormente, se puede afirmar que el escenario BLEVE más bola de fuego, a pesar de su poca duración, es el que provoca mayores

daños ya que su alcance logra sobrepasar toda el área de la DTCCM, afectando además otras zonas como la de Versailles y Playa, y cuando esto ocurre se está en presencia de un accidente mayor según HSE, (2018).

3.2- Resultados y análisis de la evaluación del impacto ambiental

La evaluación del impacto ambiental se realiza teniendo en cuenta la cantidad de humo y de contaminantes generados, así como, la cuantificación de la reducción de la calidad ambiental producto de estos accidentes.

Los flujos de humo generados para cada posible accidente de incendio en cada tanque se muestran en la tabla 3.4

Tabla 3.4: Cantidad de humo generada en cada tanque

Sustancia	Tanque	Humo (kg/s)
Diesel	1	3,22
	24	3,22
	25	3,22
	4	3,22
	26	3,22
Gasolina de aviación	18	0,58
	74	0,33
	19	0,33
Turbocombustible	13	3,63
	22	3,63
	23	3,63
Nafta	17	2,01

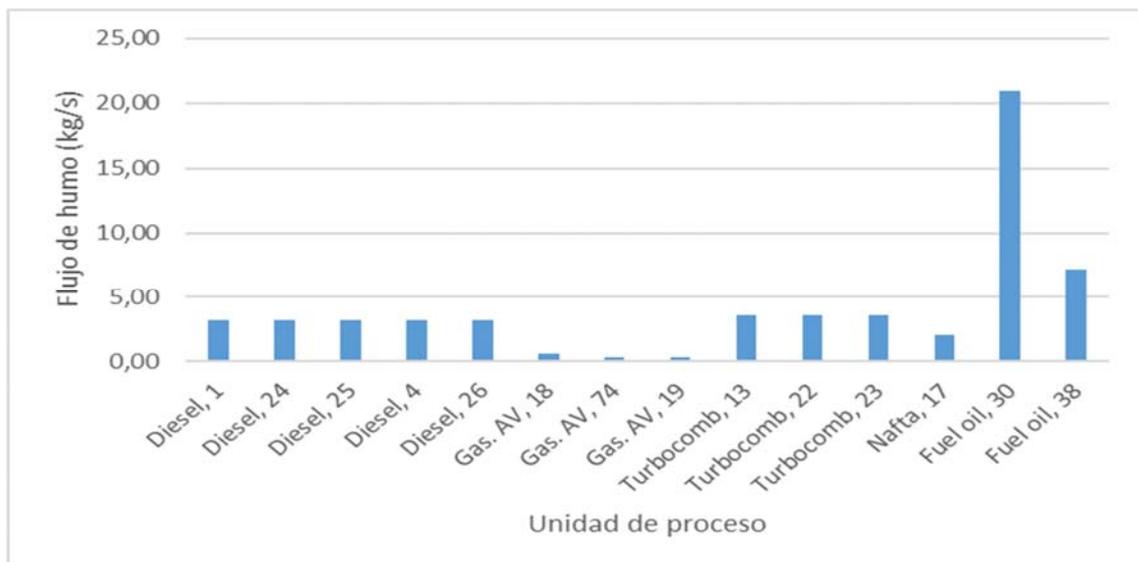
Fuel oil	30	20,96
	38	7,13

Hay que tener en cuenta que estos valores de emisión están expresados como flujo, por lo que, en cada segundo, se van a generar esta cantidad de humo. Esto traería consigo una reducción considerable en la visibilidad durante el incendio y se vería seriamente dificultada las acciones de mitigación, al ser el humo una suspensión de pequeñas partículas sólidas que provienen de una combustión incompleta y contiene grandes cantidades de monóxido de carbono.

En la figura 3.10 se muestra la comparación entre los valores de emisión de humo para cada tanque.

La mayor cantidad de humo se genera como consecuencia de un accidente en el tanque 30. Esto se debe a la gran capacidad de almacenamiento del mismo, ya que, el flujo de humo depende del flujo de combustible involucrado en el incendio.

Figura 3.10: Flujo de humo generado en cada unidad de proceso.



Los valores de emisión de monóxido de carbono y de dióxido de carbono se muestran en la tabla 3.5

Tabla 3.5: Valores de emisión de monóxido de carbono y de dióxido de carbono para cada tanque.

Sustancia	Cantidad de CO (kg)	Cantidad de CO ₂ (kg)
Diesel, 1	56.737	626.426
Diesel, 24	56.737	626.426
Diesel, 25	56.737	626.426
Diesel, 4	56.737	626.423
Diesel, 26	56.737	626.426
Gas. AV, 18	24.864	259.328
Gas. AV, 74	13.986	145.874
Gas. AV, 19	13.986	145.874
Turbocomb, 13	57.249	609.899
Turbocomb, 22	57.249	609.899
Turbocomb, 23	57.249	609.899
Nafta, 17	54.948	600.129
Fuel oil, 30	232.943	2.495.543
Fuel oil, 38	79.265	849.178

Las emisiones de estos contaminantes dependen también de la cantidad de combustible quemado, mientras mayor sea, mayor será la masa de sustancia contaminante que se produce.

Según las directivas del IPCC, para los inventarios nacionales de gases de efecto invernadero, el dióxido de carbono es el gas que contribuye en mayor extensión a la ocurrencia del mismo.

En cuanto a estos gases y al humo, según Twarson, (2008), se reduce la visibilidad considerablemente y dificulta la respiración, al disminuir la concentración de dióxígeno en la atmósfera considerablemente.

Según *Quebec Minister of Energy and Natural Resources*, (2015) la salud humana se afecta gravemente por efecto del monóxido de carbono, lo cual puede terminar en la muerte de la persona expuesta.

Los valores de estas emisiones se muestran en la figura 3.11.

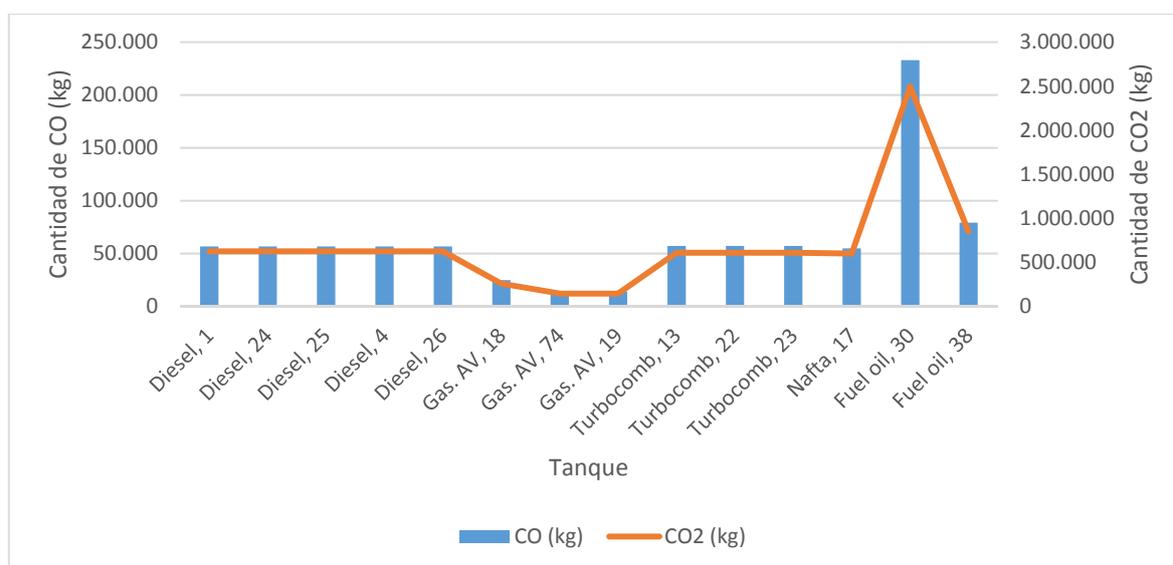


Figura 3.11: Valores de emisión de monóxido de carbono y de dióxido de carbono.

Las cantidades de dióxido de carbono son mayores respecto a las de monóxido de carbono, ya que, a pesar de que hay combustión incompleta (típico de un incendio), existe también combustión completa. Esto concuerda con los resultados expuestos en la Conferencia Internacional de Contaminación Atmosférica (Pirrone, 2018).

Según Conesa, (2000) con estos valores de emisiones de contaminantes a la atmósfera, la calidad ambiental se reduce en un 90%. Este resultado demuestra que los accidentes químicos constituyen una de las peores formas de contaminación ambiental que pueda existir y representan una afectación acelerada a la sostenibilidad.

3.3- Resultados y análisis de la evaluación del impacto humano

En este epígrafe se muestran y explican los resultados referidos a la evaluación del impacto humano. Las personas se pueden dañar debido a las radiaciones recibidas y a la sobrepresión debido a incendios y explosiones respectivamente.

3.3.1- Cuantificación de los daños por radiación

En la figura 3.12 se muestran los valores de intensidad de la radiación y probabilidad de daño en función de la distancia en el tanque 1 para el escenario charco de fuego.

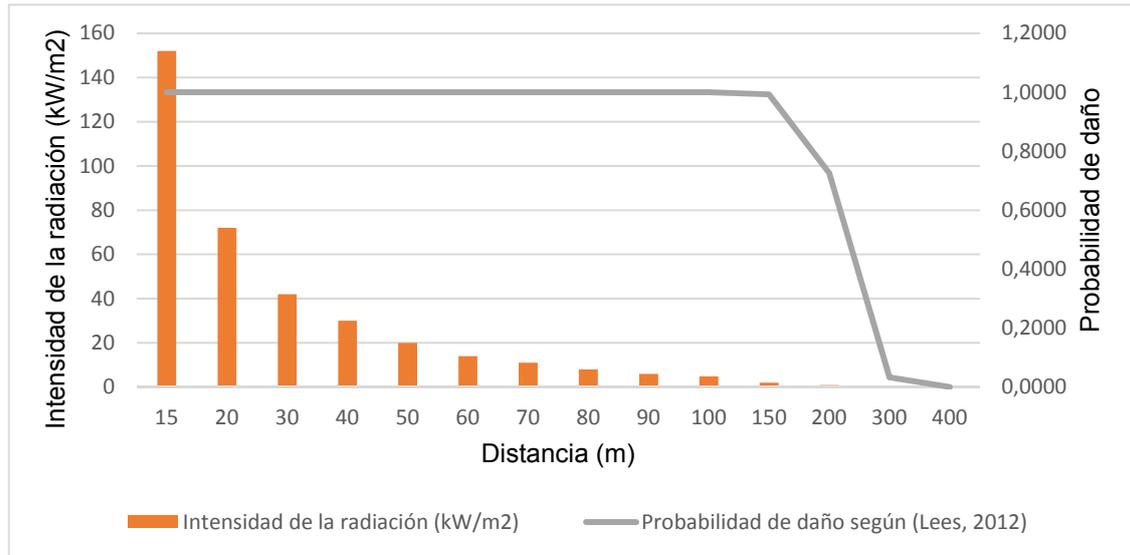


Figura 3.12: Distancia, radiación y probabilidad de daño en el tanque 1

Para el escenario charco de fuego hasta una distancia de 160 m existe una probabilidad de daño de 1, esto significa que las personas expuestas a estos niveles de radiación serían afectadas por quemaduras de segundo grado y/o muerte producto de este escenario. Existe probabilidad de daño hasta aproximadamente 300m.

En la figura 3.13 se muestran los valores de intensidad de la radiación y probabilidad de daño en función de la distancia en el tanque 18 para el escenario charco de fuego.

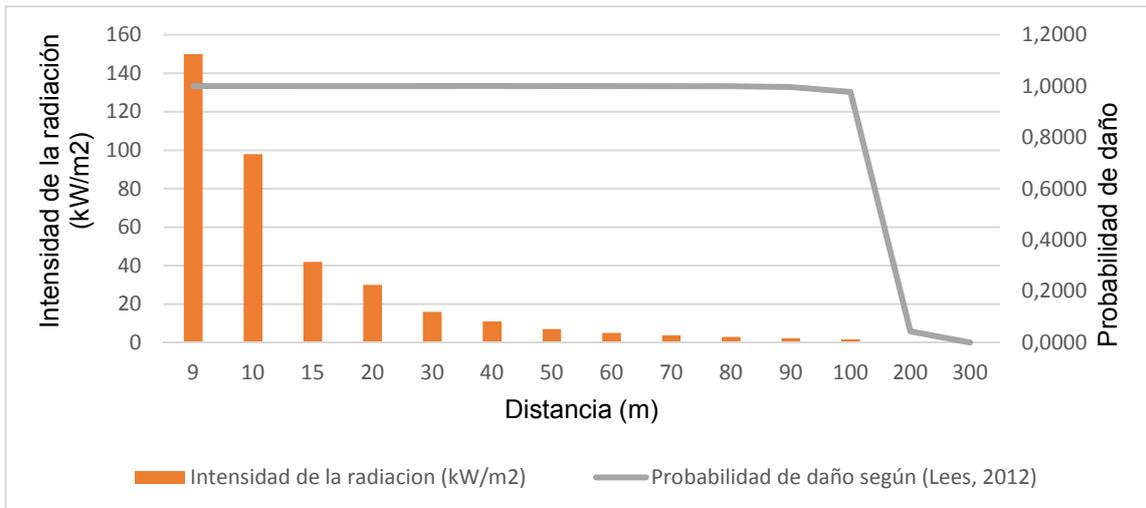


Figura 3.13: Distancia, radiación y probabilidad de daño en el tanque 18

En el tanque 18 para el escenario charco de fuego hasta una distancia de 110 m existe una probabilidad de daño de 1, esto significa que las personas expuestas a estos niveles de radiación serian afectadas por quemaduras de segundo grado y muerte producto de este escenario. Existe probabilidad de daño hasta aproximadamente 200m.

En la figura 3.14 se muestran los valores de intensidad de la radiación y probabilidad de daño en función de la distancia en el tanque 13 para el escenario charco de fuego.

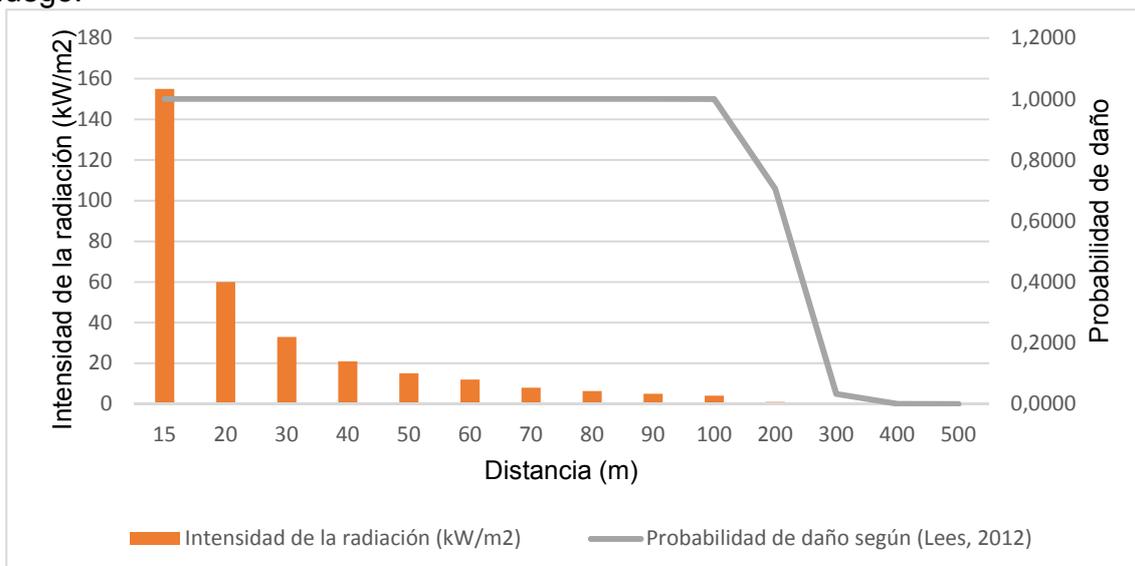


Figura 3.14 Distancia, radiación y probabilidad de daño en el tanque 13

En el tanque 13 para el escenario charco de fuego hasta una distancia de 105 m existe una probabilidad de daño de 1, esto significa que las personas expuestas a estos niveles de radiación serian afectadas por quemaduras de segundo grado y muerte producto de este escenario. Existe probabilidad de daño hasta aproximadamente 300m.

En la figura 3.15 se muestran los valores de intensidad de la radiación y probabilidad de daño en función de la distancia en el tanque 17 en el escenario charco de fuego.

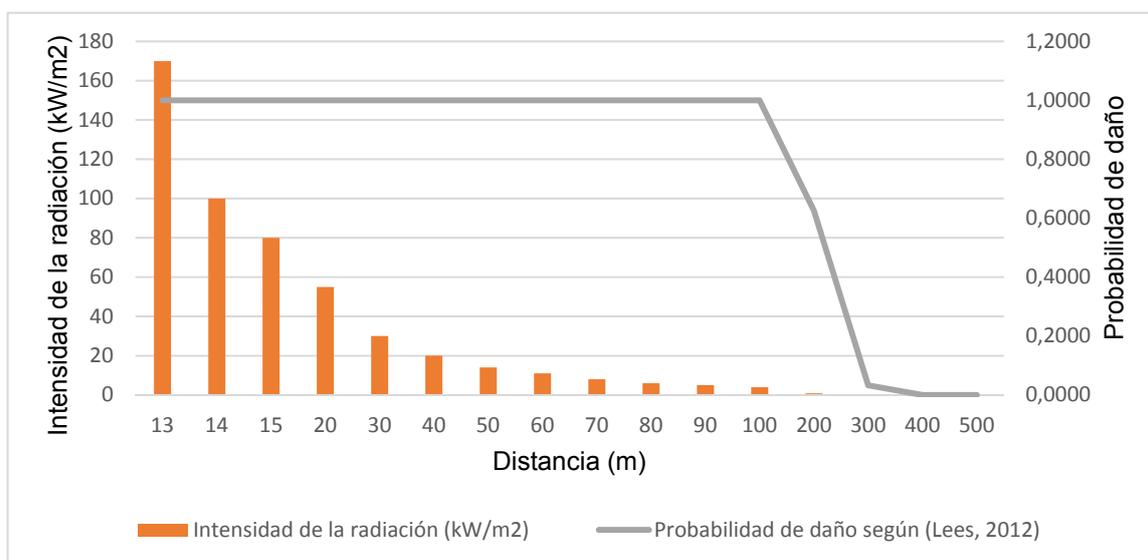


Figura 3.15: Distancia, radiación y probabilidad de daño en el tanque 17

En el tanque 17 para el escenario charco de fuego hasta una distancia de 100 m existe una probabilidad de daño de 1, esto significa que las personas expuestas a estos niveles de radiación serian afectadas por quemaduras de segundo grado y muerte producto de este escenario. Existe probabilidad de daño hasta aproximadamente 300m.

En la figura 3.16 se muestran los valores de intensidad de la radiación y probabilidad de daño en función de la distancia en el tanque 30 en el escenario charco de fuego.

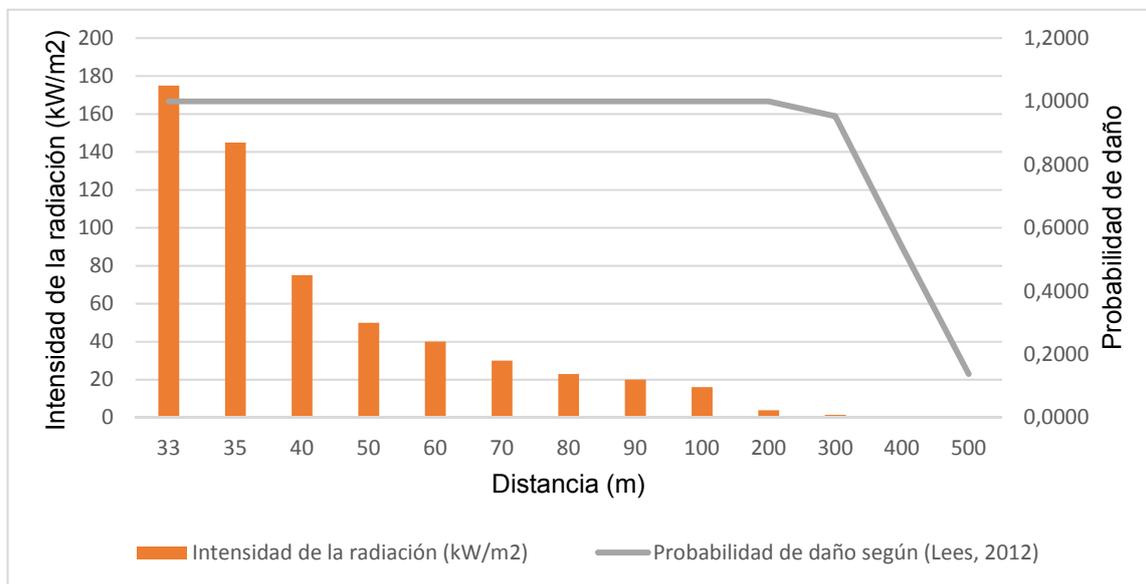


Figura 3.16: Distancia, radiación y probabilidad de daño en el tanque 30

En el tanque 30 para el escenario charco de fuego hasta una distancia de 200 m existe una probabilidad de daño de 1, esto significa que las personas expuestas a estos niveles de radiación serían afectadas por quemaduras de segundo grado y muerte producto de este escenario. Existe probabilidad de daño hasta aproximadamente 500 m.

El fenómeno BLEVE más bola de fuego se puede originar en los tanques 1, 18, 13, 17, 30, ya que estos almacenan sustancias inflamables y volátiles. Este escenario se puede originar como accidente secundario a partir de un charco de fuego.

En la figura 3.17 se muestran los valores de intensidad de la radiación y probabilidad de daño en función de la distancia en el tanque 1 para el escenario BLEVE.

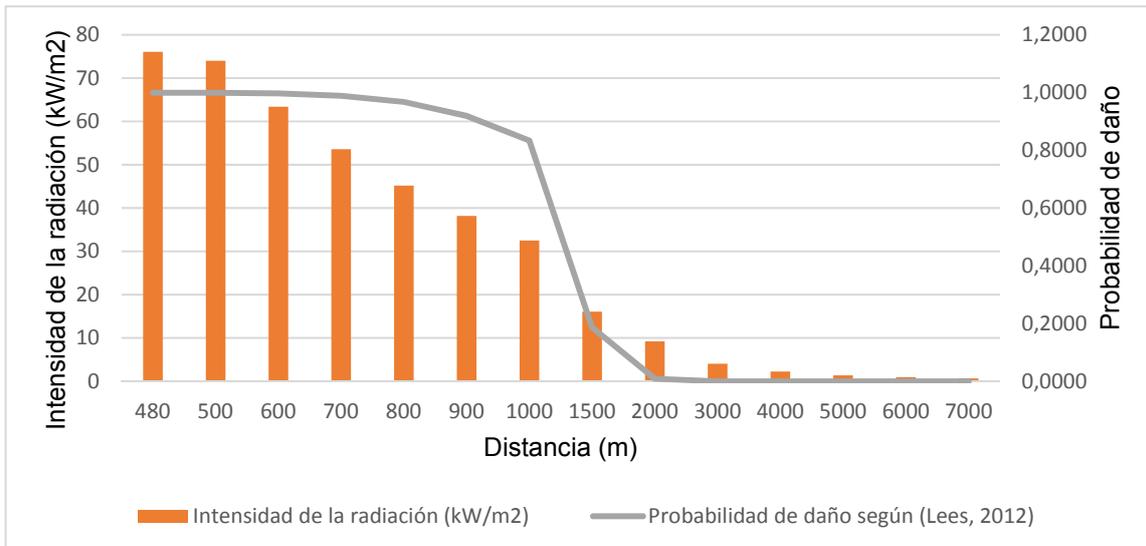


Figura 3.17: Distancia, radiación y probabilidad de daño en el tanque 1

En el tanque 1 para el escenario BLEVE hasta una distancia de 600 m existe una probabilidad de daño de 1, esto significa que las personas expuestas a estos niveles de radiación serían afectadas por quemaduras de segundo grado y muerte producto de este escenario. Existe probabilidad de daño hasta aproximadamente 2000 m.

En la figura 3.18 se muestran los valores de intensidad de la radiación y probabilidad de daño en función de la distancia en el tanque 18 para el escenario BLEVE.

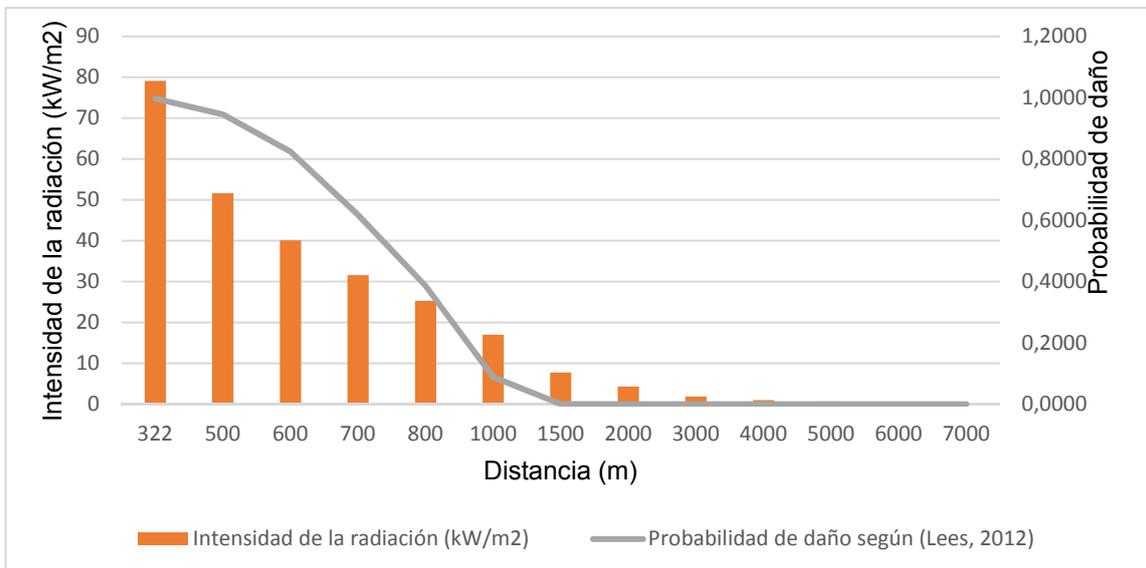


Figura 3.18: Distancia, radiación y probabilidad de daño en el tanque 18

En el tanque 18 para el escenario BLEVE hasta una distancia de 322 m existe una probabilidad de daño de 1, esto significa que las personas expuestas a estos niveles de radiación serian afectadas por quemaduras de segundo grado y muerte producto de este escenario. Existe probabilidad de daño hasta aproximadamente 1000 m.

En la figura 3.19 se muestran los valores de intensidad de la radiación y probabilidad de daño en función de la distancia en el tanque 13 para el escenario BLEVE.

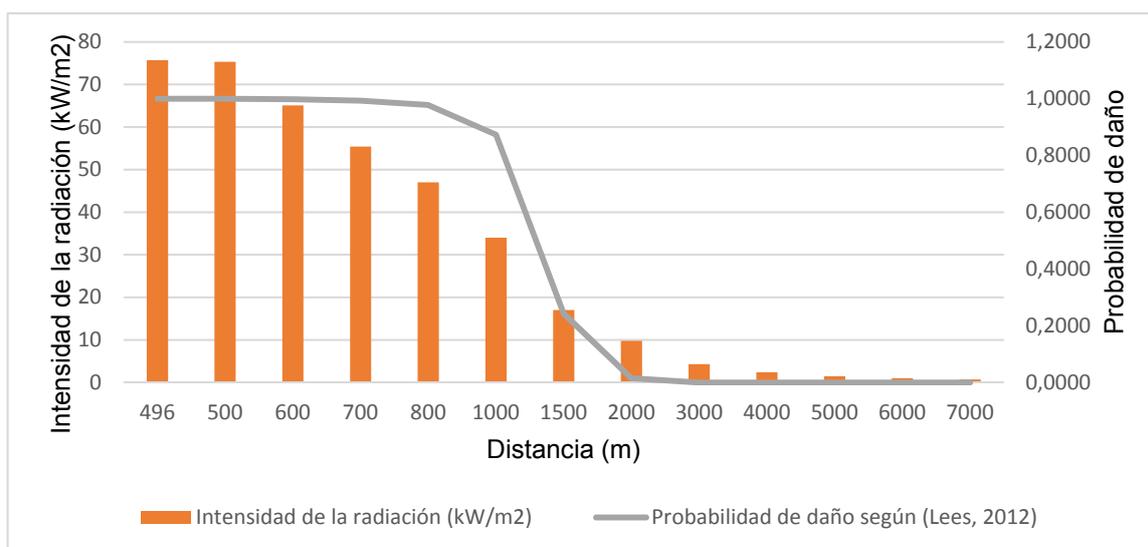


Figura 3.19: Distancia, radiación y probabilidad de daño en el tanque 13

En el tanque 13 para el escenario BLEVE hasta una distancia de 600 m existe una probabilidad de daño de 1, esto significa que las personas expuestas a estos niveles de radiación serian afectadas por quemaduras de segundo grado y muerte producto de este escenario. Existe probabilidad de daño hasta aproximadamente 2000 m.

En la figura 3.20 se muestran los valores de intensidad de la radiación y probabilidad de daño en función de la distancia en el tanque 17 para el escenario BLEVE.

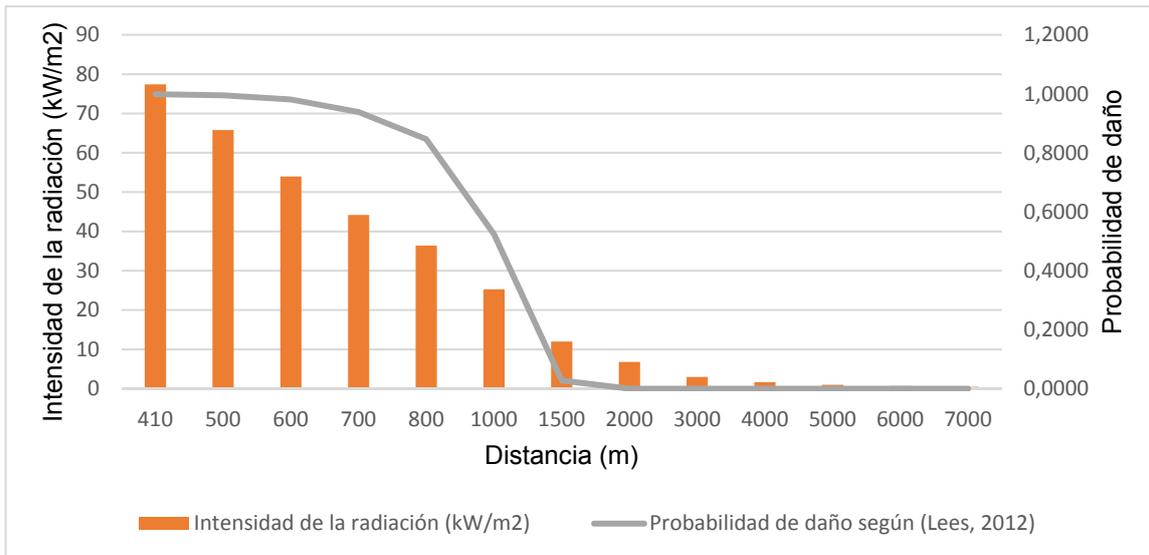


Figura 3.20: Distancia, radiación y probabilidad de daño en el tanque 17

En el tanque 17 para el escenario BLEVE hasta una distancia de 410 m existe una probabilidad de daño de 1, esto significa que las personas expuestas a estos niveles de radiación serían afectadas por quemaduras de segundo grado y muerte producto de este escenario. Existe probabilidad de daño hasta aproximadamente 1500 m.

En la figura 3.21 se muestran los valores de intensidad de la radiación y probabilidad de daño en función de la distancia en el tanque 30 para el escenario BLEVE.

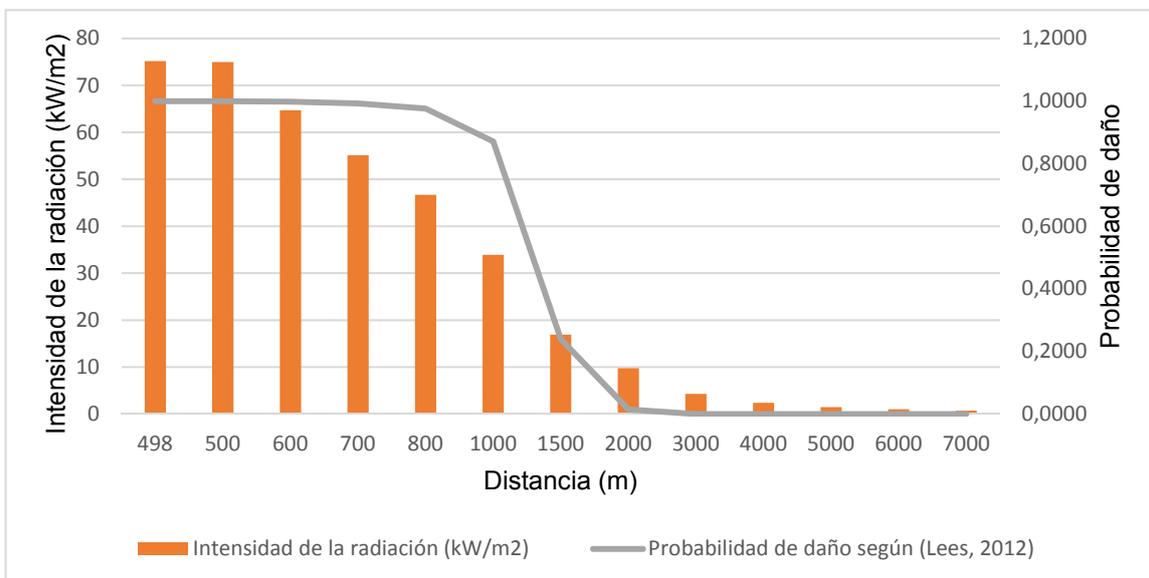


Figura 3.21 Distancia, radiación y probabilidad de daño en el tanque 30

En el tanque 30 para el escenario BLEVE hasta una distancia de 600 m existe una probabilidad de daño de 1, esto significa que las personas expuestas a estos niveles de radiación serian afectadas por quemaduras de segundo grado y muerte producto de este escenario. Existe probabilidad de daño hasta aproximadamente 2000 m.

Los tanques 1, 13 y 30 que almacenan diesel, turbocombustible y fuel oil respectivamente poseen un mayor alcance en cuanto a radiación debido a la capacidad de almacenamiento de los mismos. Además, los valores de probabilidad de daño son altos según lo planteado por Machado y Román, (2017) y Wang *et al.*, (2019).

Nuevamente, se puede afirmar que el escenario BLEVE más bola de fuego, a pesar de su poca duración, es el que provoca mayores daños ya que su alcance logra sobrepasar toda el área de la DTCCM, afectando además otras zonas como la de Versailles y Playa, y cuando esto ocurre se está en presencia de un accidente mayor según HSE, (2018).

3.3.2- Cuantificación de los daños por sobrepresión

En la figura 3.22 se muestran los valores de sobrepresión y probabilidad de daño en función de la distancia en el tanque 17 para el escenario nube de vapor explosiva.

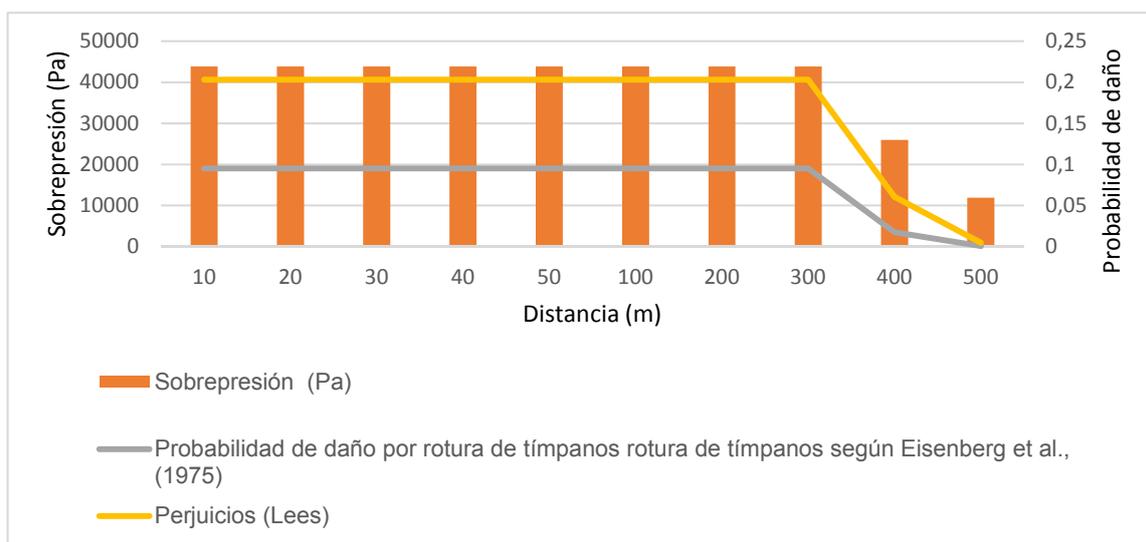


Figura 3.22: Distancia, sobrepresión y probabilidad de daño en el tanque 17

La probabilidad de perjuicios según Lees (2012) es de 0,2 mientras que la probabilidad por rotura de tímpanos es de 0,1.

En la figura 3.23 se muestran los valores de sobrepresión y probabilidad de daño en función de la distancia en el tanque 18 para el escenario nube de vapor explosiva.

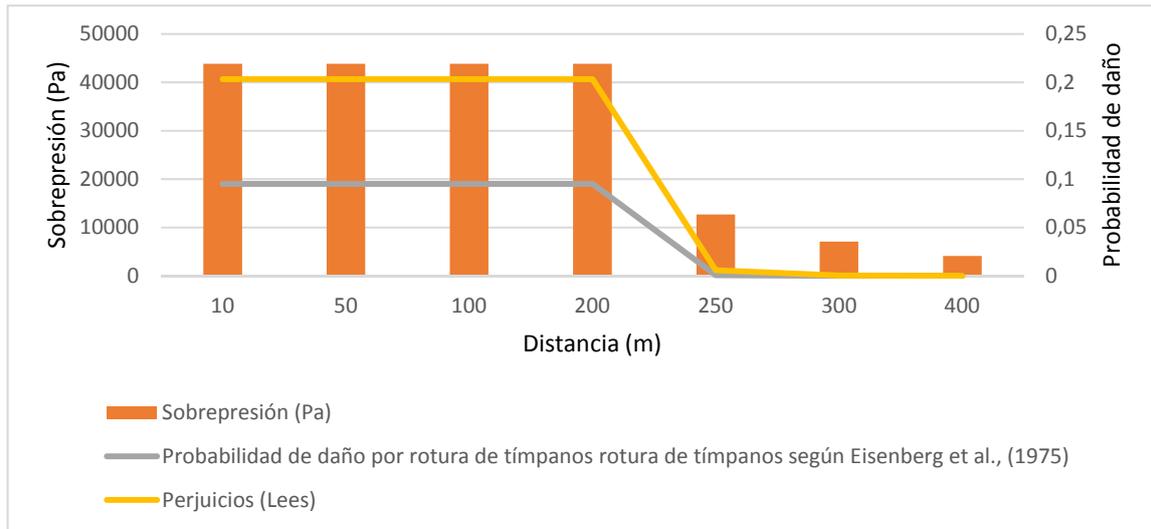


Figura 3.23: Distancia, sobrepresión y probabilidad de daño en el tanque 18

La probabilidad de perjuicios según Lees (2012) es de 0,2 mientras que la probabilidad por rotura de tímpanos es de 0,1, existe menor probabilidad de daño por sobrepresión que por radiación debido a los efectos sobre la anatomía humana. Esto concuerda con lo planteado por Djelosevic y Tepic, (2019).

3.4- Conclusiones parciales

- 1) De todos los escenarios provocados por un derrame inicial de la sustancia, el BLEVE más bola de fuego es el que presenta mayor radio de afectación.
- 2) Las cantidades de dióxido de carbono producidas en un incendio son mayores respecto a las de monóxido de carbono, aunque ambas son elevadas.
- 3) Al ocurrir un escenario de incendio, por este concepto, se reduce la calidad ambiental en un 90%, al emitirse a la atmósfera grandes cantidades de humo y sustancias contaminantes.
- 4) Los tanques 1, 13 y 30 que almacenan diesel, turbocombustible y fuel oil respectivamente poseen un mayor alcance en cuanto a radiación debido a la capacidad de almacenamiento de los mismos.
- 5) Todas las personas expuestas a un radio de 300 metros respecto al origen del accidente en el área poseen una vulnerabilidad máxima y siguen siendo vulnerables hasta un radio de 1500 metros aproximadamente.
- 6) El máximo de fatalidades (100%) para el caso de las radiaciones térmicas se alcanzan para el escenario bola de fuego a una distancia de 450 metros; mientras que, para el charco de fuego, se alcanza igual resultado, pero para una distancia de 100 metros.
- 7) Para el escenario nube de vapor explosiva, se obtiene el mayor número de fatalidades (20,3%) a una distancia de 300 metros.
- 8) La probabilidad de perjuicios es de 0,2 mientras que la probabilidad por rotura de tímpanos es de 0,1, existe menor probabilidad de daño por sobrepresión que por radiación debido a los efectos sobre la anatomía humana.

Conclusiones

- 1) La evaluación mediante índices que cuantificaron el impacto ambiental y humano de accidentes de incendio y explosión, permitió determinar los daños provocados por los mismos al medio ambiente y a los recursos humanos.
- 2) De todos los escenarios provocados por un derrame inicial de la sustancia, el BLEVE más bola de fuego es el que presenta mayor radio de afectación.
- 3) Al ocurrir un escenario de charco de fuego, por este concepto, se reduce la calidad ambiental en un 90%, se emiten a la atmósfera grandes cantidades de contaminantes y de humo.
- 4) La estimación de los daños humanos muestra que, de los escenarios estudiados, el correspondiente a bola de fuego puede provocar, por concepto de radiaciones térmicas, un 100% de fatalidades hasta una distancia de 450 metros; mientras que para el escenario charco de fuego, se alcanza igual número de fatalidades, pero hasta una distancia de 100 metros.

Recomendaciones

- 1) Evaluar los efectos de la toxicidad de las sustancias involucradas en el proceso sobre las personas.
- 2) Determinar el riesgo social de accidentes relacionados a incendios, explosiones y nubes tóxicas en la DTCCM.
- 3) Aplicar la metodología de evaluación de impacto ambiental y humano a las otras áreas de la DTCCM.

Bibliografía

1. Aboud, Alyaa. (2008). Planning of petrochemical industry under environmental risk and safety considerations. Waterloo, Ontario, Canadá. 200 p. Tesis en opción al grado de Máster de Ciencias Aplicadas en Ingeniería Química. Universidad de Waterloo.
2. ALOHA. (2016). EPA Software. Disponible en : www.epa.gov/comeo/aloha-software.
3. An, J.; Xiang, W.; Han, Z.; Xiao, K.; Wang, Z.; Wang, X.; Wu, J.; Yan, P.; Li, J.; Chen, Y.; Li, J. ; Li, Y., 2013. "Validation of the Institute of Atmospheric Physics emergency response model with the meteorological towers measurements and SF6 diffusion and pool fire experiments". Atmospheric Environment, 81, pp. 60-67, DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.atmosenv.2013.08.041>.
4. Azari, P.; Karimi, M. (2017) Quantitative risk mapping of urban gas pipeline networks using GIS. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume XLII-4/W4, 2017 Tehran's Joint ISPRS Conferences of GI Research, SMPR and EOEC 2017, 7–10 October 2017, Tehran, Iran
5. Benichou. (2016). Fire safety design guidelines for federal buildings. [en línea]. NRC Publications Archive. [citado 20 mayo 2018]. Disponible en <https://nparc.nrc-cnrc.gc.ca/eng/view/fulltext/?id=063cc389-d483-4a62-aa43-b163cf01138d>.
6. Blengini, G.A., Blagoeva, D., Dewulf, J., Torres de Matos, C., Nita, V., Vidal-Legaz, B., Latunussa, C.E.L., Kayam, Y., Talens Peirò, L., Baranzelli, C., Manfredi, S., Mancini, L., Nuss, P., Marmier, A., Alves-Dias, P., Pavel, C., Tzimas, E., Mathieux, F., Pennington, D. and Ciupagea, C. (2017). *Assessment of the Methodology for Establishing the EU List of Critical Raw Materials*, Publications Office of the European Union, Luxemburg. 978-92-79-69612-1, doi:10.2760/73303, JRC106997.

7. Casal, Joaquín; Montiel, Helena; Planas, Eulalia; Vílchez, Juan. (2002). Análisis del riesgo en instalaciones industriales. 2da ed. Barcelona: Ediciones UPC. 362 p.
8. Chang, J.; Cheng, L. (2006) A study of storage tank accidents. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. Vol. 19 p 51-59. doi:10.1016/j.jlp.2005.05.015
9. Chen, Qinqin; Jia, Qian; Yuna, Zengwei; Huang, Lei. (2013). Environmental risk source management system for the petrochemical industry. *Process Safety and Environmental Protection* [en línea]. PSEP-343. [citado 25 enero 2019]. DOI: 10.1016/j.psep.2013.01.004. Disponible en: www.elsevier.com/locate/psep.
10. Conesa, V. (2000). Guía metodológica para la evaluación del impacto ambiental. Madrid. 3ra ed. Edición Mundi-prensa. 401 p.
11. Cuesta-Santos, Osvaldo; Sosa, Carlos; Iraola, Caridad. (2017). Inventario nacional de emisiones atmosféricas de las principales fuentes fijas. *Revista Cubana de Meteorología*. Vol. 23. No. 2. P 178-190. ISSN: 0864-151X.
12. Darbra, R.M.; Palacios, A. ; Casal, J., 2010. "Domino effect in chemical accidents: Main features and accident sequences". *Journal of Hazardous Materials*, 183, pp. 565-573, DOI: 10.1016/j.jhazmat.2010.07.061.
13. Delvosalle, C., Fievez, C., Brohez, S. (1998). Domino effects phenomena: definition, overview and classification. *European Seminar on Domino Effects*. Ed. Direction Chemical Risks. Federal Ministry of Employment. Bruselas. p 5-14.
14. Denat, Tom. (2017). Creation of a Biodiversity Severity Index to evaluate the risks of accidental pollutions in the industry: a multi-criteria sorting approach. París. 270 p. Tesis en opción al grado de Doctor en Ciencias. Universidad de París.
15. Djelosevic, M. ; Tepic, G., 2019. "Identification of fragmentation mechanism and risk analysis due to explosion of cylindrical tank". *Journal of Hazardous Materials*, 362, pp. 17-35, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2018.09.013>.

16. Dueñas, Julio A. (2018). Evaluación del impacto económico, ambiental y humano de posibles accidentes provocados por incendios y explosión en la Base de Crudos de La Division Territorial de Combustibles de Matanzas 150 h. Tesis presentada para optar el título de Ingeniero Químico. Universidad de Matanzas.
17. Ebrahemzadih, Mehrzad; Maleki, Afshin; Darvishi, Ebrahim; Meimanat, Mehdi; Dehestaniathar, Saeed. (2015). The Analysis of process accidents due to risks in the petrochemical industries: the case study of radiation intensity determination proportional to distance from tank level. *Open Journal of Safety Science and Technology*. [en línea]. Vol. 5. P 21-26 [citado 10 febrero 2019]. Disponible en <http://www.scirp.org/journal/ojsst>. DOI: 10.4236/ojsst.2015.52003.
18. EISENBERG, N.A. et al. (1998) *Vulnerability model. A simulation system for assessing*
19. Garg, Amit; Kazunari, Kainou; Pulles, Tinus. (2006). Directrices del IPCC de 2006 para los inventarios nacionales de gases de efecto invernadero. [en línea]. [citado 3 abril 2018]. Disponible en <http://e-collection.ethbib.ethz.ch/show?type=incoll&nr=888>.
20. Gunasekera, M y Edwards, D. (2003). Estimating the Environmental Impact of Catastrophic Chemical Release to the Atmosphere, An Index Method for Ranking Alternative Chemical Process Routs. *Trans IChemE*. Vol. 81. P 463-474.
21. Gyenes, Zsuzsanna; Wood, Maureen; Struckl, Michael. (2017). Handbook of Scenarios for Assessing Major Chemical Accident Risks. EUR 28518 EN. DOI:10.2760/884152.
22. Hadjisophocleous y Benichou. (2016). Fire safety design guidelines for federal buildings. [en línea]. NRC Publications Archive. [citado 20 junio 2017]. Disponible en <https://nparc.nrc-cnrc.gc.ca/eng/view/fulltext/?id=063cc389-d483-4a62-aa43-b163cf01138d>.
23. Helier, P.; Eveleigh, A. ; Talibi, M., 2017. "An overview of the effects of fuel molecular structure on the combustion and emissions characteristics of

- compression ignition engines”. Proc IMechE Part D: J Automobile Engineering, pp. 1-16, DOI: 10.1177/0954407016687453.
24. Hosseinnia, Behnaz; Khakzad, Nima; Reniers, Genserik. (2018). Multi-plant emergency response for tackling major accidents in chemical industrial areas. Elsevier. [en línea] Pages 275-289. [citado 8 enero 2019]. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2017.11.003>. DOI: 10.1016/j.ssci.2017.11.003.
25. HSE. (2018). Annual Science Review. Helping Great Britain work we. Disponible en: <http://www.hse.gov.uk/horizons/>.
26. Huang, D.; Zhu, G.Q.; Pan, R.L., 2018 of Conference. “Probabilistic model of smoke filling in large spaces”. En: Engineering, P. (ed.), 2017 8th International Conference on Fire Science and Fire Protection Engineering (on the development of performance-based fire code). Elsevier, vol. 211, pp. 271-279.
27. Kerschgens, B.; Cai, L.; Pitsch, H.; Heuser, B. ; Pischinger, S., 2016. “Di-n-buthylether, n-octanol, and n-octane as fuel candidates for diesel engine combustion”. Combustion and Flame, 163, pp. 66-78, DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.combustflame.2015.09.001>.
28. Lees, F.P. (2012). Loss prevention in the process industries: Hazard identification, assessment and control, fourth edition. ED. Mannan S., Elsevier Butterworth-Heinemann.
29. Lobato, J; Rodríguez, J. Jiménez, C. (2009) Consequence analysis of an explosion by simple models: Texas refinery gasoline explosion case. Afinidad LXVI.
30. Machado, R. ; Roman, F., 2017. “Effect of tank diameter on thermal behavior of gasoline and diesel storage tanks fires”. *Journal of Hazardous Materials*, DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhazmat.2017.08.052>.
31. Manual de Operaciones. (2019). Terminal 320. División Territorial de Combustibles de Matanzas. Cuba.
32. Moya, B. (2016). Consulta personal. Especialista principal en Meteorología. CITMA. Matanzas.

33. Mukhim, E.D.; Abbasi, T.; Tauseef, S.M. ; Abbasi, S.A., 2018. "An Assessment of the Appropriateness of the Prescribed "Safe Distances" for Siting Hazardous Process Units to Prevent Domino Effect".
34. Nwabueze, Dili. (2016). Liquid hydrocarbon storage tank fires- How prepared is your facility? *Chemical Engineering Transactions* [en línea]. Vol. 48, p 301-306. [citado 16 mayo 2019]. DOI: 10.3303/CET1648051. Disponible en: www.aidic.it/cet.
35. Paris, L., 2019. "An engineer-based methodology to perform Explosion Risk Analyses". *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 57, pp. 254-272, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2018.12.009>.
36. Pirrone, N., 2018. "Conference Proceedings of the CNR-Institute of atmospheric pollution research". En: Ambiente.
37. Quebec Minister of Energy and Natural Resources. (2015). Public Health Issues related to gas and oil hydrocarbon exploration and production. Environmental Health and toxicology branch. Quebec.
38. Sanmiquel, Lluís; Bascompta, Marc; Rossell; Antiocoi, Hernán; Guash, Eduard. (2018). Analysis of occupational accidents in underground and surface mining in Spain using data-mining techniques. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. [en línea]. Vol.15. No. 462. [citado 16 mayo 2018]. DOI: 10.3390/ijerph15030462. Disponible en: www.mdpi.com/journal/ijerph.
39. Serrano, J; Xiang, L; Rapik, M. (2014). Methodology to evaluate the consequence of hazardous material releases from multiple tank cars involved in train accidents. Department of Civil and Environmental Engineering University of Illinois at Urbana-Champaign. 205 N.
40. Shawn, P; Urbanski, Wei, M. (2009) Chemical Composition of Wildland Fire Emissions. *Developments in Environmental Science*, Volume 8 ISSN: 1474-8177/DOI:10.1016/S1474-8177(08)00004-1
41. Tewarson, Archibald. (2008). Smoke emissions in fires. FM Global. 1151 Boston-Providence Turnpike. Norwood. MA 02062. USA.

42. User's Manual ALOHA. (2016). U.S. Environmental Protection Agency. Office of Emergency Washington, D.C.
43. Villa, Valeria; Cozzani, Valerio. (2016) Application of Bayesian Networks to Quantitative Assessment of Safety Barriers' Performance in the Prevention of Major Accidents. *Chemical Engineering Transactions*, 53, p 151-156. DOI: 10.3303/CET1653026.
44. Vipin, K.; Pandey, S.K.; Tauseef, S.M.; Abbasi, T. ; Abbasi, S.A., 2018. "Pool Fires in Chemical Process Industries: Occurrence, Mechanism, Management". *Journal of Failure Analysis and Prevention*, 18 (3), DOI: 10.1007/s11668-018-0517-2.
45. Wehmeier, Guido; Mitropetros, Konstantinos. (2016). Fire Protection in the Chemistry Industry. *Chemical Engineering Transactions* [en línea]. Vol. 48, p 259-264. [citado 10 diciembre 2018]. DOI: 10.3303/CET1648044. Disponible en: www.aidic.it/cet.
46. Wells, Geoff. (2003). Major Hazards and their management. Gulf Publishing Company. Houston, Texas. 315 p.
47. Zhou, Yi; Zhao, Xiaogang; Zhao Jianyu; Chen, Du. (2016). Research on fire and explosion accidents of oil depots. *Chemical Engineering Transactions*. [en línea]. Vol. 51. [citado 7 diciembre 2018]. ISBN: 978-88-95608-43-3. ISSN: 2283-9216. DOI: 10.3303/CET1651028. Disponible en: www.aidic.it/cet.

Anexos

Anexo 1: Resultados de las corridas del software ALOHA.

Charco de fuego				
Sustancia	Tanque	Distancia (m)	Intensidad de la radiación (kW/m ²)	t (s)
Diesel	1	15	152	3600
		20	72	3600
		30	42	3600
		40	30	3600
		50	20	3600
		60	14	3600
		70	11	3600
		80	8	3600
		90	6	3600
		100	4,8	3600
		150	2	3600
		200	1	3600
		300	0,4	3600
		400	0,21	3600
Charco de fuego				

Sustancia	Tanque	Distancia (m)	Intensidad de la radiación (kW/m ²)	t (s)
Diesel	24	15	151	3600
		20	58	3600
		30	32	3600
		40	21	3600
		50	15	3600
		60	12	3600
		70	8	3600
		80	6,3	3600
		90	5	3600
		100	4	3600
		150	1,7	3600
		200	0,98	3600
		300	0,4	3600
		400	0,22	3600
Charco de fuego				
Sustancia	Tanque	Distancia (m)	Intensidad de la radiacion (kW/m ²)	t (s)
Diesel	25	15	150	3600
		20	58	3600

		30	32	3600
		40	21	3600
		50	15	3600
		60	12	3600
		70	8	3600
		80	6,1	3600
		90	5	3600
		100	4	3600
		150	1,7	3600
		200	0,99	3600
		300	0,4	3600
		400	0,21	3600
Charco de fuego				
Sustancia	Tanque	Distancia (m)	Intensidad de la radiacion (kW/m2)	t (s)
Diesel	4	16	151	3600
		20	61	3600
		30	37	3600
		40	25	3600
		50	17	3600
		60	13	3600

		70	9,7	3600
		80	7,7	3600
		90	6	3600
		100	4,9	3600
		150	2,1	3600
		200	1,1	3600
		300	0,5	3600
		400	0,27	3600
		500	0,16	3600
Charco de fuego				
Sustancia	Tanque	Distancia (m)	Intensidad de la radiacion (kW/m2)	t (s)
Diesel	26	15	150	3600
		20	58	3600
		30	32	3600
		40	21	3600
		50	15	3600
		60	11	3600
		70	8	3600
		80	6,1	3600
		90	5	3600

		100	4	3600
		150	1,7	3600
		200	0,98	3600
		300	0,4	3600
		400	0,21	3600
		500	0,14	3600
Charco de fuego				
Sustancia	Tanque	Distancia (m)	Intensidad de la radiacion (kW/m2)	t (s)
Gas Av.	18	9	150	3600
		10	98	3600
		15	42	3600
		20	30	3600
		30	16	3600
		40	11	3600
		50	7	3600
		60	5	3600
		70	3,8	3600
		80	2,9	3600
		90	2,2	3600
		100	1,7	3600

		200	0,42	3600
		300	0,18	3600
Explosión de una nube de vapor				
Sustancia	Tanque	Distancia (m)	P (psi)	P (bar)
Gas Av.	18	10	6,360	0,439
		50	6,360	0,439
		100	6,360	0,439
		200	6,360	0,439
		250	1,840	0,127
		300	1,030	0,071
		400	0,593	0,041
Charco de fuego				
Sustancia	Tanque	Distancia (m)	Intensidad de la radiación (kW/m ²)	t (s)
Gas Av.	74	7	140	3600
		8	65	3600
		9	55	3600
		10	45	3600
		15	28	3600

		20	19	3600
		30	11	3600
		40	6,2	3600
		50	4	3600
		60	3	3600
		70	2,1	3600
		80	1,6	3600
		90	1,3	3600
		100	1	3600
		200	0,24	3600
		300	0,1	3600
Explosión de una nube de vapor				
Sustancia	Tanque	Distancia (m)	P (psi)	P (bar)
Gas Av.	74	10	6,360	0,439
		20	6,360	0,439
		30	6,360	0,439
		40	6,360	0,439
		50	2,340	0,161
		100	0,667	0,046

		200	0,277	0,019
Charco de fuego				
Sustancia	Tanque	Distancia (m)	Intensidad de la radiación (kW/m ²)	t (s)
Gas Av.	19	7	140	3600
		8	65	3600
		9	55	3600
		10	46	3600
		15	28	3600
		20	19	3600
		30	11	3600
		40	6,3	3600
		50	4	3600
		60	3	3600
		70	2,1	3600
		80	1,6	3600
		90	1,3	3600
		100	1	3600
		200	0,25	3600
		300	0,1	3600
Explosión de una nube de vapor				

Sustancia	Tanque	Distancia (m)	P (psi)	P (bar)
Gas Av.	19	10	6,360	0,439
		20	6,360	0,439
		30	6,360	0,439
		40	6,360	0,439
		50	2,340	0,161
		100	0,667	0,046
		200	0,277	0,019
Charco de fuego				
Sustancia	Tanque	Distancia (m)	Intensidad de la radiación (kW/m2)	t (s)
Turbocomb	13	15	155	3600
		20	60	3600
		30	33	3600
		40	21	3600
		50	15	3600
		60	12	3600
		70	8	3600
		80	6,3	3600
		90	5	3600

		100	4	3600
		200	0,98	3600
		300	0,4	3600
		400	0,22	3600
		500	0,14	3600
Charco de fuego				
Sustancia	Tanque	Distancia (m)	Intensidad de la radiación (kW/m ²)	t (s)
Turbocomb	22	15	155	3600
		20	60	3600
		30	33	3600
		40	21	3600
		50	15	3600
		60	12	3600
		70	8	3600
		80	6,3	3600
		90	5	3600
		100	4	3600
		200	0,98	3600
		300	0,4	3600

		400	0,22	3600
		500	0,14	3600
Charco de fuego				
Sustancia	Tanque	Distancia (m)	Intensidad de la radiación (kW/m2)	t (s)
Turbocomb	23	15	155	3600
		20	60	3600
		30	33	3600
		40	21	3600
		50	15	3600
		60	12	3600
		70	8	3600
		80	6,3	3600
		90	5	3600
		100	4	3600
		200	0,98	3600
		300	0,4	3600
		400	0,22	3600
		500	0,14	3600

Charco de fuego				
Sustancia	Tanque	Distancia (m)	Intensidad de la radiación (kW/m ²)	t (s)
Nafta	17	13	170	3600
		14	100	3600
		15	80	3600
		20	55	3600
		30	30	3600
		40	20	3600
		50	14	3600
		60	11	3600
		70	8	3600
		80	6	3600
		90	5	3600
		100	4	3600
		200	0,9	3600
		300	0,4	3600
		400	0,22	3600
		500	0,14	3600
Explosión de una nube de vapor				

Sustancia	Tanque	Distancia (m)	P (psi)	P (bar)
Nafta	17	10	6,360	0,439
		20	6,360	0,439
		30	6,360	0,439
		40	6,360	0,439
		50	6,360	0,439
		100	6,360	0,439
		200	6,360	0,439
		300	6,360	0,439
		400	3,770	0,260
		500	1,730	0,119
Charco de fuego				
Sustancia	Tanque	Distancia (m)	Intensidad de la radiación (kW/m ²)	t (s)
Fuel oil	30	33	175	3600
		35	145	3600
		40	75	3600
		50	50	3600
		60	40	3600
		70	30	3600

		80	23	3600
		90	20	3600
		100	16	3600
		200	3,8	3600
		300	1,5	3600
		400	0,83	3600
		500	0,53	3600
Charco de fuego				
Sustancia	Tanque	Distancia (m)	Intensidad de la radiación (kW/m2)	t (s)
Fuel oil	38	20	145	3600
		35	36	3600
		40	30	3600
		50	21	3600
		60	15	3600
		70	12	3600
		80	9	3600
		90	7	3600
		100	5,5	3600
		200	1,3	3600
		300	0,55	3600

		400	0,3	3600
		500	0,18	3600
BLEVE				
Sustancia	Tanque	Distancia (m)	Intensidad de la radiación (kW/m ²)	t (s)
Diesel	1	480	76,1	42
		500	74	42
		600	63,4	42
		700	53,6	42
		800	45,2	42
		900	38,2	42
		1000	32,5	42
		1500	16,1	42
		2000	9,24	42
		3000	4,07	42
		4000	2,24	42
		5000	1,4	42
		6000	0,95	42
		7000	0,684	42
BLEVE				

Sustancia	Tanque	Distancia (m)	Intensidad de la radiación (kW/m ²)	t (s)
Diesel	24	500	75,5	43
		600	65,2	43
		700	55,5	43
		800	47,1	43
		900	40	43
		1000	34,1	43
		1500	17	43
		2000	9,82	43
		3000	4,33	43
		4000	2,38	43
		5000	1,49	43
		6000	1,01	43
		7000	0,731	43
BLEVE				
Sustancia	Tanque	Distancia (m)	Intensidad de la radiación (kW/m ²)	t (s)
Diesel	25	500	75,5	43
		600	65,2	43
		700	55,5	43

		800	47,1	43
		900	40	43
		1000	34,1	43
		1500	17	43
		2000	9,82	43
		3000	4,33	43
		4000	2,38	43
		5000	1,49	43
		6000	1,01	43
		7000	0,731	43
BLEVE				
Sustancia	Tanque	Distancia (m)	Intensidad de la radiación (kW/m ²)	t (s)
Diesel	4	500	75,5	43
		600	65,2	43
		700	55,5	43
		800	47,1	43
		900	40	43
		1000	34,1	43
		1500	17	43
		2000	9,82	43

		3000	4,33	43
		4000	2,38	43
		5000	1,49	43
		6000	1,01	43
		7000	0,731	43
BLEVE				
Sustancia	Tanque	Distancia (m)	Intensidad de la radiación (kW/m ²)	t (s)
Diesel	26	500	75,5	43
		600	65,2	43
		700	55,5	43
		800	47,1	43
		900	40	43
		1000	34,1	43
		1500	17	43
		2000	9,82	43
		3000	4,33	43
		4000	2,38	43
		5000	1,49	43
		6000	1,01	43
		7000	0,731	43

BLEVE				
Sustancia	Tanque	Distancia (m)	Intensidad de la radiación (kW/m2)	t (s)
Gas av.	18	322	79,1	31
		500	51,6	31
		600	40,1	31
		700	31,6	31
		800	25,3	31
		1000	17	31
		1500	7,73	31
		2000	4,31	31
		3000	1,86	31
		4000	1,01	31
		5000	0,63	31
		6000	0,428	31
		7000	0,308	31
BLEVE				
Sustancia	Tanque	Distancia (m)	Intensidad de la radiación (kW/m2)	t (s)
Gas av.	74	280	78,6	27

		500	41,5	27
		600	31,3	27
		700	24,1	27
		800	19	27
		1000	12,5	27
		1500	5,59	27
		2000	3,09	27
		3000	1,32	27
		4000	0,72	27
		5000	0,449	27
		6000	0,304	27
		7000	0,219	27
BLEVE				
Sustancia	Tanque	Distancia (m)	Intensidad de la radiación (kW/m ²)	t (s)
Gas av.	19	280	78,6	23
		500	41,5	23
		600	31,3	23
		700	24,1	23
		800	19	23
		1000	12,5	23

		1500	5,59	23
		2000	3,09	23
		3000	1,32	23
		4000	0,72	23
		5000	0,449	23
		6000	0,304	23
		7000	0,219	23
BLEVE				
Sustancia	Tanque	Distancia (m)	Intensidad de la radiación (kW/m ²)	t (s)
Turbo	13	496	75,7	43
		500	75,3	43
		600	65,1	43
		700	55,4	43
		800	47	43
		1000	34	43
		1500	17	43
		2000	9,8	43
		3000	4,32	43
		4000	2,38	43
		5000	1,49	43

		6000	1,01	43
		7000	0,729	43
BLEVE				
Sustancia	Tanque	Distancia (m)	Intensidad de la radiación (kW/m2)	t (s)
Turbo	22	496	75,7	43
		500	75,3	43
		600	65,1	43
		700	55,4	43
		800	47	43
		1000	34	43
		1500	17	43
		2000	9,8	43
		3000	4,32	43
		4000	2,38	43
		5000	1,49	43
		6000	1,01	43
		7000	0,729	43
BLEVE				

Sustancia	Tanque	Distancia (m)	Intensidad de la radiación (kW/m ²)	t (s)
Turbo	23	496	75,7	43
		500	75,3	43
		600	65,1	43
		700	55,4	43
		800	47	43
		1000	34	43
		1500	17	43
		2000	9,8	43
		3000	4,32	43
		4000	2,38	43
		5000	1,49	43
		6000	1,01	43
		7000	0,729	43
BLEVE				
Sustancia	Tanque	Distancia (m)	Intensidad de la radiación (kW/m ²)	t (s)
Nafta	17	410	77,4	37
		500	65,8	37
		600	54	37

		700	44,2	37
		800	36,4	37
		1000	25,3	37
		1500	12	37
		2000	6,81	37
		3000	2,96	37
		4000	1,62	37
		5000	1,01	37
		6000	0,687	37
		7000	0,495	37
BLEVE				
Sustancia	Tanque	Distancia (m)	Intensidad de la radiación (kW/m ²)	t (s)
Fuel oil	30	498	75,2	43
		500	75	43
		600	64,7	43
		700	55,1	43
		800	46,7	43
		1000	33,9	43
		1500	16,9	43
		2000	9,75	43

		3000	4,3	43
		4000	2,37	43
		5000	1,48	43
		6000	1,01	43
		7000	0,725	43
BLEVE				
Sustancia	Tanque	Distancia (m)	Intensidad de la radiación (kW/m ²)	t (s)
Fuel oil	38	498	75,2	43
		500	75	43
		600	64,7	43
		700	55,1	43
		800	46,7	43
		1000	33,9	43
		1500	16,9	43
		2000	9,75	43
		3000	4,3	43
		4000	2,37	43
		5000	1,48	43
		6000	1,01	43
		7000	0,725	43