

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



TRABAJO DE DIPLOMA

*Trabajo de diploma presentado en opción al título de
Ingeniero Químico.*

TÍTULO: Elaboración de un procedimiento preliminar para la cuantificación de la percepción de riesgos de accidentes tóxicos de incendio y explosión en un área de almacenamiento y procesamiento de hidrocarburos.

Autor: Diaumary Hernández Pereira.

Tutor: M.Sc. Ing. Julio Ariel Dueñas Santana.

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

Matanzas, Cuba. (2021)

DECLARACIÓN DE AUTORIDAD

Yo, Diaumary Hernández Pereira, declaro que soy la única autora de este Trabajo de Diploma y lo pongo a la disposición de la Empresa de Perforación y Extracción de Petróleo del Centro 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 como autor.



Diaumary Hernández Pereira

*‘ ‘No desistas de un sueño. Solo trata de ver las
señales que lleven a él’ ‘.*

Paulo Coelho

DEDICATORIA

A mi madre

A mi padre

A mi hermano

A mis abuelos

A mi novio

A mi tío Julio.

AGRADECIMIENTOS

A mi madre **Dianelys**, por su amor y apoyo incondicional. Por impulsarme a ser una mejor persona cada día. Por siempre brindarme consejos cuando más los necesitaba, por ser la fuerza que me impulsa a seguir adelante.

A mi padre **Amaury** por apoyarme en todos los momentos de la vida.

A mi hermano **Raimél** por ser mi ejemplo de valentía para enfrentar los obstáculos de la vida.

A mi padrastro **Raimundo (Mundito)** por guiarme desde pequeña, por educarme como una persona de bien. Por ser ejemplo de perseverancia ante cualquier tropiezo en la vida y por siempre confiar en mí.

A mis abuelos **María Victoria y Pedro**, que ya no están con nosotros en esta dimensión, pero, que, desde el cielo, me cuidan y contribuyeron a mi formación como persona de bien.

A mis abuelos **Orquídea y Nicolás** por su cariño y dedicación.

A mi novio **Yurien** por su paciencia, su comprensión, su amor sin límites, por darme ánimos y confiar en mí.

A mi **tutor Julio** por permitirme formar parte de sus estudios, por ser un ejemplo de perseverancia, de lucha y dedicación. Por guiarme durante todo el desarrollo de tesis y mostrar ante todo su gran carisma, sencillez, honradez y afecto, por ser un maravilloso tutor, porque sin él esto no hubiese sido posible.

A mis amigas **Dayana, Maylín y Annely** por ser un gran apoyo para mí y estaré siempre agradecidas de haberlas conocido.

A mis compañeras de la beca por hacer que la universidad se convirtiera en mi segunda casa, por permitirme compartir estos cinco años con personas tan maravillosas.

A mis compañeros de tesis: **Melissa García, Dariel, Marynés, Claudia, Orelvis y Yanelys** que siempre me ayudaron cuando lo necesitaba en especial a **Dariel y a Melissa.**

A la **Universidad de Matanzas** por abrirme sus puertas y permitirme realizar mis sueños.

A **Dios.**

Gracias a todos.

Resumen

Este trabajo de investigación se desarrolla en la Empresa de Perforación y Extracción de Petróleo del Centro con el objetivo de evaluar la percepción de riesgos de accidentes tóxicos, de incendio y explosión en la Planta de Procesamiento de Crudos. Con esta finalidad se conforma una metodología que consta de siete etapas fundamentales. Primeramente, se seleccionan los indicadores relacionados a la percepción de riesgos, además se conforma una metodología para cuantificar esa percepción y se ponderan los indicadores usando criterio de expertos y lógica difusa. Posteriormente se determina toda la información necesaria para evaluar dicha percepción y para ello se simulan los posibles escenarios en el *software* ALOHA. Seguidamente se emplea el *software* Matlab para cuantificar la probabilidad de escalado a partir del valor Probit. Posteriormente, se desarrollan redes Bayesianas con el objetivo de determinar la probabilidad conjunta del efecto dominó a diferentes niveles. Finalmente, se valora la percepción de riesgos en el área seleccionada. La aplicación de los cuestionarios permitió determinar el nivel de percepción de riesgos que presentan algunos trabajadores sobre los accidentes tóxicos, de incendio y explosión. De todos los escenarios el BLEVE más bola de fuego y la nube tóxica provocan daños severos ya que su alcance logra sobrepasar toda el área de EPEP-Centro y zonas cercanas. A través de las redes Bayesianas se determinó que el tanque 15 es el más propenso a detonar la cadena de eventos y que la probabilidad conjunta toma un valor elevado de 9,81%. Los trabajadores seleccionados tienen una percepción media-alta sobre los accidentes tóxicos, de incendio y explosión.

Abstract

This research is carried out in the Crude Processing Plant of the EPEP-Center with the aim of evaluating the perception of risks of toxic accidents, fire and explosion in the Crude Processing Plant. For this purpose, a methodology consisting of seven fundamental stages is developed. Firstly, the indicators related to the risk perception are selected, in addition, a methodology is formed to quantify this perception and the indicators are weighted using expert criteria and Fuzzy logic. Subsequently, all the information necessary to evaluate risk perception is determined and for this, the possible scenarios are simulated in the ALOHA *software*. Next, the Matlab *software* is used to quantify the scaling probability from the Probit value. Subsequently, Bayesian networks are developed in order to determine the joint probability of the domino effect at different levels. Finally, the risk perception in the selected area is assessed. The application of the questionnaires made it possible to determine the level of risk perception that some workers present regarding toxic, fire and explosion accidents. Of all the scenarios, the BLEVE plus fireball and the toxic cloud cause severe damage since their range manages to exceed the entire EPEP-Center area and nearby areas. Through Bayesian networks, it was determined that tank 15 is the most likely to detonate the chain of events and that the joint probability takes a high value of 9.81%. The selected workers have a medium-high perception of toxic, fire and explosion accidents.

Introducción	1
Capítulo 1: Análisis Bibliográfico	4
1.1 Caracterización de los accidentes tóxicos de incendio y explosión que puedan ocurrir en el almacenamiento y procesamiento de hidrocarburos.....	4
1.2 Elementos a tener en cuenta para definir la percepción de riesgos	11
1.3 Metodología o índices que determinen percepción de riesgos	17
1.4 Conclusiones parciales	24
Capítulo 2: Materiales y métodos	25
2.1 Etapa 1: Selección de indicadores relacionados a la percepción de los riesgos debido a los accidentes que pueden ocurrir y a su efecto continuado ..	27
2.2 Etapa 2: Conformación de una metodología para cuantificar la percepción de riesgos industriales	28
2.3 Etapa 3: Ponderación de los indicadores de percepción de riesgo usando criterio de expertos y lógica <i>Fuzzy</i>	32
2.3.1 Cuantificación del criterio de expertos	32
2.3.2 Cuantificación de la probabilidad difusa.....	32
2.3.3 Determinación de la Defusificación	34
2.3.4 Determinación de la Probabilidad difusa.....	35
2.4 Etapa 4: Aplicación de la metodología en un área de almacenamiento y procesamiento de hidrocarburos	35
2.5 Etapa 5: Determinación de la información necesaria para evaluar la percepción del riesgo.....	35
2.5.1 Selección de la unidad de proceso.....	36
2.5.2. Simulación de todos los escenarios de incendio, explosión y tóxicos con el <i>software</i> ALOHA	37
2.5.3 Determinación de la frecuencia inicial de los accidentes	41
2.5.3.1 Determinación de la probabilidad de ignición	42

2.5.4	Determinación de la probabilidad de escalado por radiación y sobrepresión	44
2.5.5	Evaluación del riesgo individual debido al carácter continuado de accidentes tóxicos, de incendios y explosión	45
2.6	Etapa 6: Desarrollo de las redes Bayesianas para cuantificar la probabilidad conjunto del efecto dominó de accidentes	47
2.6.1	Metodología para la elaboración de las redes Bayesianas de probabilidades	47
2.6.2	Características del <i>software</i> Hugin	48
2.6.3	Cuantificación de probabilidades a partir de las redes Bayesianas	49
2.7	Etapa 7: Valoración de la percepción de riesgos en el área analizada	49
Capítulo 3: Análisis de los resultados		51
3.1	Análisis de los resultados referidos a los indicadores para percepción de riesgos (Etapas 1- 4)	51
3.2	Resultados de la determinación de la información necesaria para evaluar la percepción del riesgo (Etapa 5)	54
3.2.1	Análisis de los resultados del <i>software</i> ALOHA	54
3.2.1.1	Análisis de la estimación del alcance del escenario charco de fuego	57
3.2.1.2	Análisis de la estimación del alcance del escenario BLEVE más bola de fuego	59
3.2.1.3	Análisis de la estimación del alcance del escenario explosión de una nube de vapor	61
3.2.1.4	Análisis de la estimación del alcance del escenario nube tóxica	62
3.2.2	Determinación de la frecuencia inicial de los accidentes	64
3.2.3	Cuantificación de la probabilidad de escalado de los accidentes	66

3.3 Resultados referidos al riesgo individual debido al carácter continuado de accidentes tóxicos, de incendio y explosión (Etapa 5).....	70
3.4 Resultados y análisis de las redes Bayesianas desarrolladas (Etapa 6)	73
3.4.1 Resultados y análisis de la probabilidad conjunta del efecto dominó... ..	81
3.5 Valoración de la percepción de riesgos en el área de Procesamiento de Crudos	82
3.6 Conclusiones parciales	85
Conclusiones	87
Recomendaciones	88
Bibliografía	89
Anexos	107

Introducción

La industria química, su gran crecimiento y consecuentemente, el incremento de inventarios de productos químicos en las instalaciones y en diversos medios de transporte, han provocado un aumento de la probabilidad de que ocurran grandes accidentes con un notable impacto sobre personas, medio ambiente y equipos (Casal *et al.*, 2002).

Junto a los avances tecnológicos, se ha incrementado también el número de personas que trabajan en las plantas de proceso y viven en los alrededores que pueden estar expuestas a accidentes. Esto ha provocado una toma de conciencia sobre la seguridad industrial, y con ella, han aparecido a nivel administrativo y teórico medidas para identificar el peligro y así acotar el riesgo de accidentes industriales (Sengupta, 2007).

Es de vital importancia para una evaluación y gestión correcta del riesgo industrial la identificación de los distintos accidentes que pueden producirse en una determinada instalación y la caracterización de sus causas, o sea, los sucesos o cadenas de sucesos que provocan el incidente no deseado. Una vez obtenidas estas características se podrá realizar la valoración de riesgo, y las estrategias de prevención de posibles accidentes posteriores (Gyenes *et al.*, 2017; Poljanšek *et al.*, 2017).

La industria petrolera está expuesta a la influencia de grandes accidentes, fundamentalmente los provocados por incendio y explosión debido a las características propias de las sustancias con las que se trabajan. Existe un gran interés en reducir la probabilidad de escalado de estos debido a las consecuencias catastróficas que han resultado, por lo que se emplean diversas técnicas de análisis de riesgo que permiten pronosticar la probabilidad de ocurrencia de los accidentes y su posibilidad de concluir en un efecto dominó a partir del desarrollo de un evento primario. Como alternativa fundamental se puede aplicar las redes Bayesianas, aprovechando su estructura gráfica flexible que permite mostrar el orden secuencial de los escenarios y las relaciones probabilísticas entre un gran

número de variables y hacer inferencia probabilística con esas variables (Leoni *et al.*, 2018; Shi *et al.*, 2018; Simon *et al.*, 2019; Wang *et al.*, 2018; Zarei *et al.*, 2018).

Las redes Bayesianas son representaciones gráficas de cantidades y decisiones inciertas que revelan explícitamente las dependencias probabilísticas entre las variables y los flujos de información relacionados. La ventaja más relevante de las redes Bayesianas es que proporcionan una herramienta útil para tratar las incertidumbres y la información de diferentes fuentes (Cui *et al.*, 2020; Kabir y Papadopoulos, 2019; Khakzad *et al.*, 2018; Villa y Cozzani, 2016). Presenta una facilidad con respecto a otros modelos y es que permiten plantear escenarios futuros sin tener que introducir información en todas las variables, independientemente de que sean discretas o continuas (Roperó *et al.*, 2014).

Uno de los aspectos fundamentales que puede intensificar la magnitud de las consecuencias de los accidentes industriales es la percepción del riesgo. Al enfrentar riesgos las personas pueden tener diferentes perspectivas debido a varios factores como la cultura, la religión, la educación, la voluntad del individuo, la experiencia personal y la información sobre incidentes químicos (Marshall, 2020; Zhang *et al.*, 2017).

La percepción del riesgo es un proceso mental basado en una evaluación del riesgo, que enfatiza la influencia de la experiencia del juicio intuitivo individual y el sentimiento subjetivo sobre la cognición humana para analizar, controlar y gestionar el riesgo. La percepción del riesgo significa que el individuo siente y comprende una variedad de riesgos objetivos que existen en el mundo exterior. El factor clave de la percepción es la capacidad de las personas para afrontar el riesgo en función de sus propios antecedentes (Zhang *et al.*, 2017).

En Cuba la industria petrolera se caracteriza por la existencia de refinerías, empresas de perforación de petróleo y empresas comercializadoras de combustibles que se encargan del procesamiento del petróleo crudo con distintos fines. A pesar de que se opera de la forma más segura posible, las sustancias involucradas en el proceso, representan un riesgo de incendio y explosión debido al elevado nivel de inflamabilidad y volatilidad.

En Cárdenas, se encuentra la Empresa de Perforación y Extracción de Petróleo del Centro cuyo objetivo es la aplicación de un tratamiento adecuado a los crudos provenientes de los pozos en producción, de forma tal que se alcancen los índices de calidad requeridos para posteriormente enviarlos por bombeo hacia la Empresa Comercializadora de Combustibles de Matanzas. La misma cuenta con cuatro estaciones: Planta de Procesamiento del Crudo (Batería Central); Estación Cabecera del Oleoducto (ECO); Planta de Tratamiento de Residuales y la Planta de Generación de Vapor (Sala de calderas). Esta empresa carece de un procedimiento que permita cuantificar la percepción de riesgos de accidentes tóxicos, de incendio y de explosión en la industria.

Por tal motivo se plantea el siguiente **problema** de investigación: ¿Cómo cuantificar la percepción de riesgos de accidentes tóxicos de incendio y explosión en el almacenamiento y procesamiento de hidrocarburos?

Para la resolución de este problema se expone la siguiente **hipótesis**: Si se elabora un procedimiento que permita cuantificar la percepción de riesgos en la industria del petróleo se podrá evaluar la misma en la Planta de Procesamiento de Crudos.

Por lo que el **objetivo general** de este trabajo es: Evaluar la percepción de riesgos de accidentes tóxicos de incendio y explosión en la Planta de Procesamiento de Crudos.

Los **objetivos específicos** se enumeran a continuación:

1. Pronosticar el alcance de accidentes tóxicos, de incendio y explosión en el área de Procesamiento de Crudos.
2. Determinar un procedimiento que cuantifique la percepción de riesgos de accidentes tóxicos en la industria del petróleo.
3. Cuantificar la percepción de riesgos de accidentes tóxicos de incendio y explosión.

Capítulo 1: Análisis Bibliográfico

En este capítulo se abordan diversas temáticas relacionadas con la percepción de riesgos en la industria petrolera, para ello mediante el criterio de varios autores, se establece una definición precisa del tema. Se caracterizan los accidentes tóxicos de incendio y explosión que puedan ocurrir en el almacenamiento y procesamiento de hidrocarburos, consultando bibliografías especializadas. Además, se describen y analizan las diferentes metodologías o índices que determinan percepción de riesgos con el objetivo de definir la mejor técnica para aplicar en este trabajo de diploma.

1.1 Caracterización de los accidentes tóxicos de incendio y explosión que puedan ocurrir en el almacenamiento y procesamiento de hidrocarburos

Los principales peligros que preocupan a la industria química son los incendios, las explosiones y las emisiones tóxicas, de ahí la importancia de su estudio y evaluación de su impacto, por lo que en este epígrafe se analiza lo planteado por diferentes bibliografías acerca de los accidentes tóxicos de incendio y explosión que puedan ocurrir en el almacenamiento y procesamiento de hidrocarburos, ya que es fundamental predecir y controlar dichos accidentes antes de que ocurran.

Según Casal (2002), Bellasio y Bianconi (2005), Moreno *et al.* (2019), Marhavilas (2020), Hou *et al.* (2020), Kongsvik *et al.* (2015), Sarshar *et al.* (2015), Okoh *et al.* (2018) un accidente es un suceso fortuito e incontrolado, capaz de producir daños. En general, en la industria química este suceso coincide con situaciones de emisión, escape, vertido, incendio y explosión, donde están implicadas sustancias peligrosas. Si la situación generada se puede calificar como de riesgo grave, catástrofe o calamidad pública - inmediata o diferida- para las personas, el medio ambiente y los bienes, se la denomina “accidente mayor”.

En la industria química, los accidentes suelen ser el resultado de unas condiciones de proceso inadecuadas para las diversas características físicas y químicas de los materiales y de las sustancias. Estas condiciones, excepto en el caso de fallos de diseño, suelen ser desviaciones de las condiciones normales de funcionamiento y

se presentan como problemas no siempre evidentes desde la experiencia operativa (Casal, 2002).

Casal *et al.* (2002), Vílchez y Pérez (2001), Sellami *et al.* (2018), Yang *et al.* (2020) plantean que los accidentes de gran magnitud que puedan ocurrir en una industria química están casi siempre asociados al escape de un producto tóxico o inflamable, generalmente un fluido. El escape de un fluido hacia la atmósfera puede producirse por diversas razones: por rotura de una conducción, por explosión de un recipiente a presión o por rebosamiento de un depósito. Según la forma de salida y las características del fluido puede dar lugar a un incendio, una nube tóxica o inflamable, entre otros.

Si el escape es de líquido, se formará un charco siempre en función de la disposición del terreno y habrá evaporación; si el producto es combustible, puede tener lugar directamente un incendio del líquido vertido, o bien puede transformarse en una nube que se inflamará al encontrar un punto de ignición, con la explosión consiguiente. Si el producto es tóxico, la nube que se formará puede simplemente expandirse en la atmósfera o bien desplazarse a ras de suelo, según las condiciones atmosféricas. Si el escape es una mezcla de líquido y vapor es prácticamente seguro que se formará una nube (excepto si el viento lo impide) con las mismas consecuencias finales que para el caso anterior. En un escape de gas o de vapor, la situación dependerá de la velocidad de salida; si ésta es inferior a unos 20 m/s (valor un tanto arbitrario, pero generalmente aceptado), puede formarse también una nube, o, si se trata de un gas combustible, puede arder como una antorcha, en cambio si la velocidad es superior a aproximadamente 20 m/s, la turbulencia originada impide la formación de la nube y el producto queda diseminado en la atmósfera, o bien, si es combustible, puede inflamarse y formar una antorcha capaz de destruir otras instalaciones cercanas (Casal *et al.*, 2002; Sellami *et al.*, 2018; Vílchez y Pérez, 2001).

Unos de los posibles escenarios que se pueden manifestar a partir de los efectos de un derrame de nafta es la nube de vapor inflamable. Los accidentes relacionados a mezclas de combustibles con el aire, en las nubes de vapor,

representan un 76,09% del total de accidentes ocurridos, por lo que los escenarios de nube de vapor inflamable y explosiva son de importancia para el análisis de riesgos (Lees, 2014).

El incendio, entre los diversos accidentes que pueden ocurrir en una industria, es el que tiene un radio de acción menor. No obstante, sus efectos pueden ser terribles, puesto que la radiación térmica puede afectar a otras partes de la planta y generar nuevos accidentes (Casal *et al.*, 2002; Aboud, 2008).

Un incendio es un proceso físico-químico en el cual se produce una reacción de oxidación rápida, acompañada de desprendimiento de calor, luz, humo y productos de la combustión, desarrollado sin control y que ocasiona pérdidas materiales" (Correa, 2004; Gyenes *et al.*, 2017).

Los accidentes de incendios más frecuentes que tienden a ocurrir en la industria petrolera son el *pool fire* (charco de fuego), el *jet fire* (dardo de fuego), *flash fire* (llamarada), y el BLEVE/bola de fuego (Casal *et al.*, 2002; Gyenes *et al.*, 2017; He y Weng, 2020; Rengel, 2020).

Según Miao *et al.* (2014), Casal *et al.* (2002), Landucci *et al.* (2013), Abbasi *et al.* (2018), Abbasi y Khan (1998), Wu *et al.* (2020), Tian *et al.* (2020) el incendio de charco (*pool fire*) se define como un incendio que involucra una cantidad de combustible líquido derramada en la superficie de la tierra o el agua. Es una combustión estacionaria con llama de difusión del líquido de un charco de dimensiones conocidas, que se produce en un recinto descubierto. Entre los diferentes tipos de incendios este es uno de los más importantes debido a su frecuencia y el posible daño que causa sobre personas e instalaciones.

El dardo de fuego (*jet fire*) representa un peligro importante para las industrias de petróleo y gas que manejan grandes cantidades de productos inflamables a alta presión. Este fenómeno tiene lugar cuando se produce el vertido accidental de vapores o gases inflamables a presión, en áreas de proceso o depósitos de almacenaje. Se caracteriza por una llama estacionaria y alargada provocada por la ignición de un chorro turbulento de gases o vapores combustibles. La duración del

chorro de fuego puede ser larga (minutos u horas) o corta (segundos) dependiendo de la fuente del chorro. Principalmente ocurren como resultado de una pequeña fisura u orificio que origina un chorro a presión en algún equipo de una planta de proceso o en un tanque de almacenamiento (Gómez, 2009; Gopalaswami *et al.*, 2016; Landucci *et al.*, 2013).

Según Casal *et al.* (2002), Gómez (2009), Lisbona *et al.* (2012), Atkinson (2017) la llamarada (*flash fire*) es una llama progresiva de difusión, de baja velocidad. Se caracteriza por no producir ondas de presión significativas y suele estar asociada a la dispersión de vapores inflamables a ras de suelo. Cuando estos encuentran un punto de ignición, el frente de la llama generado se propaga hasta el punto de emisión, barriendo y quemando toda la zona ocupada por los vapores en condiciones de inflamabilidad.

Si la ignición no ocurre inmediatamente después del inicio del escape, hay la posibilidad de que se forme una nube de vapor inflamable de tamaño considerable; el crecimiento y evolución de la nube aumenta la posibilidad de que la misma encuentre un punto de ignición a cierta distancia del origen de la fuga; esta ignición retardada provocará la llamarada y, eventualmente, una explosión con efectos mecánicos (Kumar *et al.*, 2019; Lisbona *et al.*, 2012).

Casal *et al.* (2002) y Blengini *et al.* (2017) establecen que los incendios en depósitos de almacenaje de hidrocarburos son relativamente frecuentes. Teniendo en cuenta que las cantidades almacenadas suelen ser elevadas, las consecuencias de este tipo de incendios pueden llegar a ser imprevisibles.

Existe una tipología muy variada de incendios que pueden 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*. El *boilover* o borbollón puede producirse principalmente en depósitos conteniendo mezclas de diversos hidrocarburos. Si en uno de estos depósitos se produce un incendio (que puede durar muchas 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 preferentemente

a vapor, alimentando la llama. De esta forma, al irse enriqueciendo en los componentes más pesados (de mayor temperatura de ebullición) esta capa superficial va aumentando de temperatura por incendio “de borbollón” (Abbasi *et al.*, 2018; Ahmadi *et al.*, 2019; Casal *et al.*, 2002; Kong *et al.*, 2017; Nwabueze, 2016; Wan *et al.*, 2016).

Según Casal *et al.* (2002), Wells (2003), Ferrero (2006), Antonioni *et al.* (2013), Ping *et al.* (2017) 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 y que la viscosidad del hidrocarburo sea suficientemente elevada para dificultar el paso del vapor.

Casal *et al.* (2002), Poljanšek *et al.* (2017), Liu y Zhou (2012), Lees (2014), Mitropetros y Wehmeier (2016), Dobashi (2017), Ma y Zhang (2019) definen a 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 bastante rápida y concentrada para que la onda que se genera sea audible. Las explosiones pueden ser de dos tipos: deflagraciones y detonaciones, en función de la velocidad de combustible durante la explosión.

Según Casal *et al.* (2002), Wiley (2016) existen dos tipologías de explosiones accidentales: las explosiones de vapores confinados que este tipo de explosiones ocurren cuando habiéndose producido un escape de un gas o de un vapor inflamable en un área confinada, el gas está dentro de los límites de inflamabilidad y encuentra un punto de ignición, se encuentran también las explosiones de nubes de vapor no confinadas que 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 en una planta de proceso, durante un transporte o por la rotura de un gaseoducto.

En cualquier caso, 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.

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. En la mayoría de los casos reales la sustancia involucrada es combustible; esto provoca que la explosión sea seguida por la formación de una bola de fuego, de efectos muy graves (Casal *et al.*, 2002; Sellami *et al.*, 2018).

Según Casal *et al.* (2002), Bestratén y Turmo (2019), Muhammad (2020), Li y Hao (2020), Hemmatian *et al.* (2019), Planas *et al.* (2015) si un recipiente que contiene un líquido a presión es calentado, 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 sometidas y cederán. Esto sucederá principalmente en la parte superior del recipiente, donde la pared al no estar bañada por el líquido no estará refrigerada, de este modo 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 aún mayor de esta superficie, debido al calor de vaporización.

En la industria química un gran número de accidentes se producen por la pérdida de contención en depósitos y tuberías que almacenan y transportan productos en forma gaseosa o líquida. En la mayoría de los casos estas sustancias son peligrosas para la salud y el medio ambiente. Cuando las sustancias son susceptibles de formar nubes de gas, conocer su evolución es importante (Zhou *et al.*, 2018).

Un escape de un producto tóxico o inflamable en forma gaseosa, o bien en forma líquida en condiciones de ser vaporizado, produce una nube de gas. Esta nube, según sea la velocidad de salida del producto, se comporta como un chorro gaseoso o dispersión atmosférica (Casal, 2002).

Según Casal (2002) el término dispersión es utilizado en la modelización de accidentes para describir la evolución de una nube de gas tóxica o inflamable en la atmósfera. La dispersión de una nube de gas sigue una difusión, o transporte de su masa, producida por el movimiento molecular del aire mientras se va diluyendo a medida que va disminuyendo su concentración, a causa de la entrada de nuevas moléculas de aire dentro de la nube. La dispersión incluye el desplazamiento de la masa en la dirección del viento y su expansión en sentido transversal al viento, tanto vertical como horizontal. En el caso de gases pesados, la dispersión se produce incluso en dirección contraria al viento.

La liberación de sustancias tóxicas tiene quizás el mayor potencial de matar a un gran número de personas. Las grandes emisiones tóxicas son muy raras pero el número de muertos puede ser muy elevado (Lees, 2014).

Entre los diferentes accidentes graves que pueden ocurrir en las industrias que almacenan, utilizan o procesan sustancias químicas, las emisiones y la formación de nubes están considerados como los de mayor peligrosidad respecto a sus consecuencias y complejidad en cuanto a su modelización. La peligrosidad viene determinada por el nivel de complejidad de las sustancias involucradas y por la persistencia y alcance de las nubes. Mientras que la modelización de estos accidentes constituye un aspecto básico de la prevención y protección, dado que el nivel y extensión de las consecuencias permite establecer la proporcionalidad de las medidas necesarias para evitarlas o mitigarlas (Gai *et al.*, 2018).

A criterio de la autora de este trabajo de los accidentes tóxicos de incendio y explosión que puedan ocurrir en la industria petrolera, se deben analizar los escenarios de charco de fuego, BLEVE, nubes de vapor explosivas y dispersión de nubes tóxicas, ya que según la bibliografía especializada son los más peligrosos y propensos a ocurrir en la industria del petróleo.

1.2 Elementos a tener en cuenta para definir la percepción de riesgos

En este epígrafe se analizan las diferentes definiciones de percepción de riesgos ofrecidas por varias literaturas, pues es de gran importancia que las personas sean capaces de percibir el riesgo al que están expuestas, para hacer frente a situaciones complejas.

Según Casal *et al.* (2002), Gómez y Rodríguez (2011), Rajeev *et al.* (2019), Sanchez *et al.* (2018) puede definirse el riesgo como “situación que puede conducir a una consecuencia negativa no deseada en un acontecimiento”, o bien “probabilidad de que suceda un determinado peligro potencial” (entendiendo por peligro una situación física que puede provocar daños a la vida, a los equipos o al medio), o aún, “consecuencias no deseadas de una actividad dada, en relación con la probabilidad de que ocurra”.

Para otros autores como Marshall (2020), Futran *et al.* (2014), Ahn y Chang (2016), Marhavidas (2019), Finney (2020), Fahmi y Wang (2010), Kwan *et al.* (2017) el riesgo es definido en la ecuación 1.1 como el producto de la frecuencia prevista para un determinado suceso por la magnitud de las consecuencias probables.

$$\text{Riesgo} = \text{Frecuencia} \cdot \text{Magnitud de consecuencias} \quad (1.1)$$

La reducción de accidentes laborales requiere el reconocimiento tanto de los peligros como de los riesgos laborales. Reconocer los riesgos y cómo reaccionar ante ellos es fundamental para mejorar los sistemas de seguridad. El estudio de la percepción del riesgo es un tema crucial, ya que puede desempeñar un papel importante en la implementación de acciones de protección ante una situación dada (Martínez, 2020; Thepaksorn, 2018).

Según Lees (2014) las percepciones de riesgo son amplificadas o atenuadas por procesos sociales, esto ocurre porque el conocimiento del riesgo que posee el individuo es en gran parte de segunda mano. Las percepciones subjetivas del riesgo pueden tener una enorme importancia política, posiblemente hasta el punto de distorsionar las prioridades en los programas para hacer frente a los riesgos

reales que enfrenta la sociedad. Es probable que la percepción del riesgo de un individuo se vea afectada por su personalidad, pero también por su pertenencia a un grupo de acuerdo a la cultura, género o edad.

Se han propuesto diversas definiciones de percepción de riesgo. En la tabla 1.1 se muestran algunas de estas definiciones ofrecidas por varios autores.

Tabla 1.1: Definiciones de percepción del riesgo reportadas en la literatura especializada

Autor(es) y año	Definición
Cordobez (2018)	Se puede definir la percepción de riesgos como la habilidad de detectar, identificar y reaccionar ante una situación de potencial daño. Es un proceso espontáneo e inmediato que permite realizar estimaciones o juicios acerca de situaciones en función de la información que la persona selecciona y procesa.
Zhang <i>et al.</i> (2017)	La percepción del riesgo significa que el individuo siente y comprende una variedad de riesgos objetivos que existen en el mundo exterior. Se enfatiza la influencia de la experiencia desde el juicio intuitivo individual y el sentimiento subjetivo sobre la cognición para analizar, controlar y gestionar los riesgos.
Gómez (2016)	La percepción puede ser considerada fundamentalmente como un conjunto de procesos de codificación a través de los cuales se genera en el

	observador una representación mental del medio que le rodea. Es tomar conciencia e interpretar el entorno, incluyendo los riesgos derivados del mismo.
Lees (2014)	El trabajo sobre la percepción del riesgo muestra que las personas tienden a no pensar en términos de un concepto abstracto de riesgo, sino a evaluar las características de un peligro y a percibir el riesgo de forma multidimensional.
Zhang <i>et al.</i> (2017), Oah <i>et al.</i> (2018), Ji <i>et al.</i> (2018)	La percepción del riesgo es un proceso mental basado en una evaluación del riesgo, que enfatiza la influencia de la experiencia del juicio intuitivo individual y el sentimiento subjetivo sobre la cognición humana para analizar, controlar y gestionar el riesgo
López <i>et al.</i> (2018)	La percepción del riesgo no es simplemente una cuestión de evaluar objetivamente el riesgo sino que también tiene una dimensión afectiva.
Tancogne y Laclémence (2016)	La percepción del riesgo es el vector entre el peligro y la conciencia del peligro. Este proceso va acompañado de diferentes consecuencias psicológicas, miedo, ansiedad o pánico según se viva el ambiente.

Al analizar la tabla anterior se observa que todas estas definiciones tienen un punto en común y es que el sujeto (hombre) es el que tiene la habilidad de detectar y comprender los riesgos que los rodean para poder ser capaz de enfrentar los mismos.

La percepción del riesgo juega un papel importante en la comunicación de riesgos y la prevención de incidentes químicos cuando se relaciona con diferentes grupos de personas. El factor clave de la percepción del riesgo es la capacidad de las personas para afrontar el riesgo en función de sus propios antecedentes culturales (Xia et al., 2017; Zhang et al., 2017).

La percepción de la seguridad y en particular su procesamiento es una evaluación probabilística, es determinar la probabilidad de que un suceso amenazante se materialice, pasando de latente a manifiesto, y además se valoren las consecuencias para la salud del trabajador. El primer paso para percibir un riesgo es reconocer la situación determinada como amenazante (Gómez, 2016).

Según Marshall (2020) la percepción del riesgo involucra las creencias, actitudes, juicios y sentimientos de las personas, los valores sociales y culturales y las disposiciones adoptadas hacia un peligro en particular.

La percepción del riesgo ha evolucionado desde una etapa en la que era negada por los expertos y considerada un producto de la incultura de la población, hasta convertirse en un problema complejo y estudiado por un gran número de psicólogos, sociólogos y expertos en temas de seguridad (Carbonel y Torres, 2010).

Herrero et al. (2020) plantea que la misma se procesa de dos formas distintas: el riesgo como análisis y el riesgo como efecto o sentimiento. Las diferencias encontradas entre la percepción de riesgo subjetiva (autoinformada) y objetiva (excitación fisiológica) apoyan la idea de que la excitación fisiológica podría reflejar procesos automáticos de evaluación de riesgos. La percepción del riesgo podría verse influida por algunas variables psicológicas, como las emociones.

Según la Comisión Europea (Poljanšek *et al.*, 2017) los enfoques más cualitativos del riesgo agregan valor a través del proceso de desarrollo de un marco para capturar la percepción subjetiva del riesgo y servir como punto de partida para una discusión sobre los supuestos y el reconocimiento del riesgo involucrando a una amplia variedad de expertos y partes interesadas en el proceso. También proporcionan un medio para comprobar la realidad de modelos más teóricos. Los análisis probabilísticos y estocásticos brindan la posibilidad de realizar análisis de costo / beneficio o riesgo / rendimiento, creando una base objetiva para la toma de decisiones.

Una comprensión más profunda de los enfoques cuantitativos y cualitativos de la gestión de riesgos puede ayudar a innovar formas de pensar sobre la percepción pública subjetiva del riesgo, y los marcos de evaluación de riesgos pueden desarrollar una comprensión más objetiva del mismo. La percepción y la evaluación del riesgo dependen, desde luego, de la persona que lo afronte y su posición en la estructura social, es decir, en los campos de experiencia posibles, así como del contexto concreto donde pueda ocurrir (Poljanšek *et al.*, 2017).

La percepción del riesgo es subjetiva, pero los profesionales tienen información valiosa en los campos de datos, metodologías y modelos que solidifican aún más los marcos a través de los cuales los peligros pueden entenderse y compararse de manera objetiva (Poljanšek *et al.*, 2017).

Considera un investigador que "el primer paso para percibir un riesgo como tal, es reconocer la situación determinada como amenazante. No es posible percibir si no estamos informados (Pell *et al.*, 2017).

Las percepciones de los riesgos son factores importantes que influyen tanto a la evaluación como al manejo. Los riesgos se perciben en forma diferente, dependiendo de quiénes son los afectados, qué tan probable es que los daños se produzcan, las características de los daños, tal cómo qué tan catastróficos son, qué tan acostumbrada está la población a ese tipo de daño, qué tan grande es la fracción de la población afectada, cómo se afecta a los individuos en forma personal y si éstos han aceptado en forma voluntaria enfrentar los riesgos. Las

percepciones de los riesgos están influenciadas por los beneficios que se obtienen de enfrentar tales riesgos (Lazzerini y Pistolessi, 2013; Madun, 2020; Zhang *et al.*, 2017).

La comprensión de la relación entre la percepción del riesgo y la reducción del riesgo de desastres ha mejorado significativamente con el tiempo en lo que se refiere a la mejora del cumplimiento en el entorno laboral (Zhang *et al.*, 2017).

Al enfrentar riesgos de incidentes químicos, diferentes personas pueden tener diferentes perspectivas de riesgo debido a diversos factores que influyen, incluidos el medio ambiente, la cultura, la religión, la educación, la voluntad del individuo, la experiencia personal y la información sobre incidentes químicos. Además, las perspectivas de riesgo harán que los tomadores de decisiones tomen diferentes acciones mientras enfrentan riesgos, incluso causarán barreras en la comunicación de riesgos (Zhang *et al.*, 2017).

Según Zhang *et al.* (2017) cuando ocurre un incidente inesperado, el responsable de la toma de decisiones de la empresa sería el primer grupo en recibir información en tiempo real. Por lo general, la información inicial es una combinación del valor de pérdida por riesgo de la propiedad de la empresa y las víctimas humanas. La comunicación eficaz de riesgos es la mejor manera para que el tomador de decisiones empresarial restablezca la credibilidad y obtenga el apoyo de otras partes interesadas. Después de esa respuesta al riesgo (estrategia) podría establecerse y entrar en vigencia para controlar el incidente, mientras que se reduce el grado de percepción del riesgo para el tomador de decisiones de la empresa. La respuesta al riesgo está íntimamente ligada a los escenarios de riesgo, el nivel de probabilidad, los estilos de estrategia, la utilidad del apetito por el riesgo y el nivel de motivación de logro. Además, los tomadores de decisiones empresariales están sujetos a la educación en seguridad y la experiencia diaria de tales accidentes para dominar el conocimiento y la experiencia, de modo que se pueda formar la experiencia del riesgo.

La reducción de accidentes laborales requiere el reconocimiento tanto de los peligros como de los riesgos laborales. Reconocer los riesgos y cómo reaccionar

ante ellos es fundamental para mejorar los sistemas de seguridad. Sin embargo, a pesar de la importancia de esta noción, la percepción del trabajador sobre los riesgos laborales ha sido objeto de relativamente poca investigación (Martínez *et al.*, 2020).

Una percepción incorrecta del riesgo en cualquier momento podría llevar a un uso ineficiente de recursos limitados o una aceptación inconsciente de riesgos que excedan la verdadera tolerancia de la empresa o la comunidad (Wiley, 2016).

Finalmente, a criterio de la autora de este trabajo se puede definir la percepción de riesgo como la capacidad que tiene el individuo de identificar un peligro determinado. Percibir es adelantarse al suceso, a lo que puede llegar a suceder, determinando lo que puede ser un peligro a nuestra seguridad y salud.

1.3 Metodología o índices que determinen percepción de riesgos

La inadecuada percepción de riesgo puede comprometer el desarrollo tecnológico y convertirse en un importante desencadenante de accidentes industriales y laborales. Es por ello trascendental contar con métodos que permitan su estudio, por lo que en este epígrafe se analizan diferentes metodologías o índices que puedan determinar percepción de riesgos en la industria.

El método de evaluación de la percepción de riesgo laboral (EPRO), se caracteriza por aprovechar lo más positivo de las tendencias de evaluación estudiadas e introduce algunos aportes para potenciar la herramienta. Una de sus más importantes características es que permite identificar, a nivel de variable de percepción de riesgo, dónde deben centrarse los esfuerzos esenciales en el incremento de la cultura de la seguridad del grupo humano analizado (Carbonel y Torres, 2010).

El desarrollo metodológico que permitirá evaluar los riesgos sociales y consolidar una medición de bienestar sustentable debe hacerse en tres etapas: identificación, análisis y evaluación. La identificación como su nombre lo indica, es la etapa donde se identifican, a partir de un enfoque de riesgo y de las diversas dimensiones consideradas para el análisis, las variables vinculadas con

amenazas, vulnerabilidades, fortalezas y consecuencias; para ello se recurre a las diversas fuentes de información, tales como organismos oficiales, no gubernamentales, entre otros, ya sea que incluyan métodos cualitativos o cuantitativos, además de considerar la conexión sistémica entre ellas. En la etapa de análisis se deben combinar y analizar las variables identificadas para comprender su naturaleza, probabilidades e implicaciones, con el fin de asignar un valor relativo a cada uno de los riesgos (es decir, identificar la gravedad de cada riesgo). La etapa de evaluación está destinada a la evaluación y a la propuesta de aplicación de estrategias en políticas públicas de gestión de los riesgos, de acuerdo con los resultados del análisis (Perdomo, 2015).

La formulación de un sistema de indicadores para que sea de fácil utilización, debe estar basada en un número menor de indicadores o índices factibles que reflejen aspectos relevantes y orientadores del tipo de acción que se debe llevar a cabo por los tomadores de decisiones. Se desarrolló una metodología que permiten realizar un análisis de la situación de riesgo y de la gestión de riesgos en cada país. Esa metodología está basada en el análisis de tres índices: el Índice de Vulnerabilidad Prevalente (IVP), el Índice de desastres locales (IDL) y el Índice de déficit por desastre (IDD). La vulnerabilidad es un aspecto clave para entender el riesgo desde la perspectiva de los desastres, y debe ser dimensionada de acuerdo con la escala espacial y social considerada, para ello se analiza el Índice de Vulnerabilidad Prevalente (IVP) que se fundamenta en que en la medida en que la ejecución de acciones efectivas de prevención, mitigación, preparación y transferencia de riesgos se cumplen el riesgo disminuye y, por el contrario, cuando estas acciones no existen o no son suficientemente efectivas el riesgo aumenta. Por otro lado, se encuentra el Índice de desastres locales (IDL), el cual tiene como objetivo percibir cuan propenso es un país a la ocurrencia de desastres menores y el impacto acumulativo que causa este tipo de eventos al desarrollo local, este índice intenta representar la variabilidad y dispersión espacial del riesgo al interior del país o unidad de estudio como resultado de eventos menores y recurrentes. Para la construcción de este índice es necesario contar con un registro de eventos (fenómenos) y sus efectos (muertos, heridos, pérdidas) por municipio. Un

indicador relacionado con la pérdida económica que un país determinado podría sufrir cuando se enfrenta a la ocurrencia de un evento catastrófico es el Índice de déficit por desastre (IDD); este implica un pronóstico basado en evidencias históricas y científicas y la evaluación del valor de los elementos probablemente afectados, para ello es necesario definir un referente arbitrario en términos de severidad o de período de recurrencia de los eventos que caracterizan la amenaza o peligro. Estos índices permitirán a los tomadores de decisiones del nivel nacional tener una dimensión del problema presupuestal que tendría el país y la necesidad de considerar este tipo de cifras en la planificación presupuestal y financiera (Carreño *et al.*, 2005).

Según Wang *et al.* (2017) la dinámica de sistema es una combinación de estructura, función y enfoque histórico, que expresa las características de retroalimentación de la causalidad recíproca de los elementos constituyentes dentro del sistema y explica la naturaleza del comportamiento del sistema. Para estudiar la percepción del riesgo de los legos de los incidentes industriales químicos, se toma como línea principal "percepción del riesgo - perspectiva del riesgo - respuesta al riesgo - comunicación del riesgo - percepción del riesgo" y se forman tres ciclos de retroalimentación de causalidad basados en la teoría de la dinámica de sistemas. Las relaciones lógicas matemáticas entre variables se analizan para lograr diferentes funciones basadas en un análisis teórico (funciones lineales de primer orden, exponenciales, de potencia, aleatorias, integrales y otras), luego se construyen modelos de simulación y los principios en evolución y la sensibilidad de las variables de estado finalmente se analizan.

El Cuestionario nórdico NOSACQ-50-Spanish es un instrumento validado para evaluar la percepción acerca de la seguridad y salud en el lugar de trabajo. Es una herramienta para diagnosticar el clima de seguridad y evaluar la efectividad de las intervenciones preventivas. El cuestionario refleja la percepción de los trabajadores sobre el valor real de la seguridad en la organización. Está basado en teorías de clima organizacional y de seguridad, psicología, investigación empírica y en los resultados obtenidos de estudios internacionales (Gómez, 2016).

Las teorías y modelos de accidentes han facilitado considerablemente la percepción de los accidentes y su calidad de ocurrencia. Es difícil e incluso imposible predecir los accidentes basándonos en lo que sabemos sobre sus causas para ello es necesario desarrollar un modelo de causalidad de accidentes más completo para lograr una percepción precisa y completa de los accidentes en diferentes áreas (Zaranezhad *et al.*, 2019).

Según Zaranezhad *et al.* (2019), Korol (2014), De Lullis *et al.* (2018) uno de esos modelos de causalidad es la lógica difusa, la cual ha utilizado ampliamente variables verbales en problemas prácticos. Estos sistemas emplean expresiones verbales mediante conjuntos difusos para mostrar las relaciones entre las entradas y salidas observables de un sistema. En un sistema difuso las variables de entrada se leen y manipulan (calculan) continuamente y además están presentes en la fuzificación, que su objetivo es transformar "valores reales" de las variables en "valores difusos" (valores lingüísticos) para luego ser manipulados por el controlador, y la defuzificación que transforma los "valores difusos" de nuevo en "valores reales".

La lógica difusa es una poderosa herramienta matemática para modelar sistemas inciertos en la industria, la naturaleza y la humanidad; y facilitadora del razonamiento de sentido común en la toma de decisiones en ausencia de información completa y precisa. La lógica difusa se ha desenvuelto dentro de un inmenso y gran desarrollo de la ciencia con numerosas aplicaciones en el campo de control, optimización, el análisis de los datos (Boral, 2019; Doran, 2015; Kabir y Papadopoulos, 2018; Mirzakhnov, 2020; Poli y Boudet, 2017; Rahman *et al.*, 2013; Tohidj, 2014; Zhou *et al.*, 2016).

La matriz de riesgo difusa presenta la importancia de los riesgos, los riesgos insignificantes y la necesidad de reducción de estos. Debido a que la lógica difusa permite que el principio del medio excluido represente cualquier estado medio. Esta es una técnica numérica para reducir la incertidumbre resultante de las intuiciones subjetivas. El modelado difuso se basa en las relaciones entre las causas consecuencias de un fenómeno y utiliza la lógica difusa con respecto a las

descripciones lingüísticas para representar variables de entrada y salida. El método de la lógica difusa puede adaptar el razonamiento humano y así integrar experiencia especializada que es importante para la toma de decisiones (Ahn y Chang, 2016; Javidi *et al.*, 2015; Jia *et al.*, 2016; Tohidi, 2014).

El método Proceso de jerarquía analítica difusa (FAHP) es una herramienta de toma de decisiones utilizada entre la mayoría de los investigadores y las industrias. Es un modelo de puntuación de factores ponderados y tiene la capacidad de incorporar inconsistencias inherentes a un proceso de toma de decisiones. El AHP clásico considera los juicios precisos de quienes toman las decisiones, pero no puede incluir sus pensamientos vagos, por lo que puede proporcionar una base sólida para decisiones racionales en la mayoría de los casos (Boral *et al.*, 2019; Karimi *et al.*, 2018; Marhavidas, 2020; Li *et al.*, 2018).

El método Análisis Difuso de Toma de Decisiones de Múltiples Atributos (FMADMA), es un método donde cada alternativa del estado de los factores se evalúa subjetivamente con base en el juicio de los expertos con respecto a cierto conjunto definido de criterios y elementos objetivos deseables para una estrategia de construcción. Los elementos de criterio incluyen la minimización del riesgo de fallas y accidentes de las operaciones (Eldukair y Ayyub, 1992).

El método más nuevo de toma de decisiones multicriterio es el "Mejor Peor" (BWM). Este es un método difuso para determinar los pesos difusos de criterios y alternativas con respecto a diferentes criterios. En el mismo, primero se lleva a cabo una revisión completa del accidente para proporcionar detalles exactos de este y recopilar la información necesaria sobre las condiciones en las que ocurrió el accidente. Luego los hallazgos del primer paso se discuten en un panel que consta de ingenieros de seguridad y académicos activos en la ingeniería del factor humano para identificar varios errores humanos, fallas gerenciales y organizacionales que condujeron al accidente (Rostamabadi *et al.*, 2019).

En la tabla 1.2 se muestra un resumen de los diferentes métodos empleados en el análisis de la percepción de riesgos.

Tabla 1.2: Métodos empleados en el análisis de la percepción de riesgos.

Método	Referencia
Método de evaluación de la percepción de riesgo laboral (EPRO)	Carbonel y Torres (2010)
La dinámica de sistema	Wang <i>et al.</i> (2017)
El Cuestionario nórdico	Gómez (2016)
Método de la lógica difusa	Zaranezhad <i>et al.</i> (2019), Korol (2014), De luliis (2018)
El método Proceso de jerarquía analítica difusa (FAHP)	Boral <i>et al.</i> (2019), Marhavidas (2020), Li <i>et al.</i> (2018)
El método Análisis Difuso de Toma de Decisiones de Múltiples Atributos (FMADMA)	Eldukair y Ayyub (1992)
Método difuso "Mejor Peor" (BWM)	Rostamabadi <i>et al.</i> (2019)

El proceso de apreciación del riesgo comprende la identificación del riesgo, su análisis y la posterior evaluación. De esta manera obtendremos un conocimiento global de los riesgos, de sus causas, sus consecuencias, sus probabilidades y sus incertidumbres. Este proceso suele necesitar un enfoque multidisciplinar para dar la mejor información posible a quien tiene que tomar decisiones, y pueda hacerlo manejando los datos más fiables. Los métodos que se utilizan para este análisis de riesgos pueden ser cualitativos, semicuantitativos o cuantitativos. La apreciación cualitativa se suele expresar con niveles del tipo "alto", "medio" y "bajo" para definir las consecuencias, las probabilidades o el nivel de riesgo. Los métodos semicuantitativos utilizan escalas de valoración numérica lineales o logarítmicas principalmente. El análisis cuantitativo trabaja con valores numéricos realistas y obtiene el mismo tipo de resultados. El problema suele ser que, en ocasiones, junto a estos valores deben tenerse en cuenta otros factores

difícilmente cuantificables o simplemente que faltan datos (Gewrgios *et al.*, 2011; Perdomo, 2015).

Para resolver dichos conflictos, el uso de las redes Bayesianas se ha convertido en una necesidad debido a que son una de las herramientas más completas, coherentes y auto sostenidas entre las usadas para la adquisición de conocimientos, representación y aplicación a través de sistemas computarizados (Steijn *et al.*, 2020). Las redes Bayesianas son un modelo estadístico multivariante formado por dos componentes: cuantitativo y cualitativo. Donde el componente cualitativo no es más que un gráfico acíclico dirigido compuesto por una serie de nodos conectados entre sí mediante relaciones direccionadas. Cada nodo representa una variable en el modelo, y los arcos entre nodos codifican las relaciones de dependencia /independencia entre las mismas. Por otra parte, el componente cuantitativo expresa las distribuciones de probabilidad condicionada para cada variable (X_i) dado sus padres ($pa(X_i)$) en el grafo, expresadas mediante tablas de probabilidad condicionada (TPC) en el caso de variables discretas, y funciones de densidad para las continuas (Kabir y Papadopoulos, 2019; Ropero *et al.*, 2014; Yazdi y Kabir, 2018; Yazdi, 2019).

Según Khakzad *et al.* (2018) las redes Bayesianas son una técnica alternativa para el análisis de confiabilidad de sistemas con un amplio potencial de aplicación debido a su capacidad para manejar la escasez de datos, así como la incertidumbre de parámetros y dependencias condicionales y secuenciales.

Por lo que, las redes Bayesianas son muy útiles en la cuantificación del carácter continuado de accidentes en la industria petrolera, debido a que es la más adaptable y representativa y conduce a una mejor estimación de los escenarios de alta gravedad y a la cuantificación de la probabilidad del efecto dominó.

A criterio de la autora la herramienta más aceptada en el marco de la investigación es la matemática difusa porque es la herramienta eficaz para manejar información imprecisa; la misma ha ayudado a modelar muchos problemas del mundo real que son difíciles de entender por los expertos por lo que es una alternativa viable para hacer frente a los problemas en la industria. Además, la combinación de los

métodos existentes, es sin dudas, vital para lograr cuantificar la percepción de riesgos. Sin embargo, no existe una metodología que permita particularizar la cuantificación de la percepción de riesgos en un área de almacenamiento y procesamiento de hidrocarburos. Por esta razón, uno de los objetivos de esta investigación es desarrollar dicho procedimiento basado en los existentes y en el uso de la matemática difusa (lógica *Fuzzy*) para la ponderación del criterio de expertos. Para poder evaluar la percepción de riesgos, primero es necesario conocer el riesgo real que existe, para ello la integración de las técnicas de análisis de riesgos clásicas con otras de inteligencia artificial como las redes Bayesianas es la forma más confiable.

1.4 Conclusiones parciales

- 1- Dentro de los accidentes tóxicos, de incendio y explosión que puedan ocurrir en el almacenamiento y procesamiento de hidrocarburos, el charco de fuego, la nube tóxica y la explosión de una nube de vapor son los más comunes.
- 2- La percepción del riesgo implica que el individuo siente y comprende una variedad de riesgos objetivos que existen en el mundo exterior, por lo que es fundamental que el individuo sea capaz de reaccionar adecuadamente ante una situación de peligro.
- 3- Para ponderar el criterio de expertos, la técnica más acorde al objetivo de esta investigación es la matemática difusa, lo cual es esencial en la evaluación de la percepción de riesgos.
- 4- Para poder evaluar la percepción de riesgos, se hace necesario la cuantificación real existente del mismo y para ello, la integración de las técnicas de análisis de riesgos con la inteligencia artificial es vital para obtener resultados confiables.

Capítulo 2: Materiales y métodos

En el presente capítulo se describe la metodología a aplicar para cuantificar la percepción de riesgos en la Planta de Procesamiento de Crudos. Con este objetivo se seleccionan los indicadores relacionados a la percepción de los riesgos debido a los accidentes que pueden ocurrir y a su efecto continuado y se ponderan esos indicadores usando criterio de expertos y lógica *Fuzzy*. Se determina toda la información necesaria para evaluar dicha percepción y para ello se caracteriza el proceso tecnológico que se efectúa en la planta y es necesario trabajar con los *software*, ALOHA que permite simular los posibles escenarios, y con Matlab, para a partir de este, una vez obtenidos los valores Probit determinar la probabilidad de escalado. Todo esto permite establecer una secuencia lógica de siete etapas fundamentales.

La metodología propuesta consta de siete etapas las cuales se listan a continuación:

- Etapa 1: Selección de indicadores relacionados a la percepción de los riesgos debido a los accidentes que pueden ocurrir y a su efecto continuado.
- Etapa 2: Conformación de una metodología para cuantificar la percepción de riesgos industriales.
- Etapa 3: Ponderación de los indicadores de percepción de riesgo usando criterio de expertos y lógica *Fuzzy*.
- Etapa 4: Aplicación de la metodología en un área de almacenamiento y procesamiento de hidrocarburos.
- Etapa 5: Determinación de la información necesaria para evaluar la percepción del riesgo.
- Etapa 6: Desarrollo de las redes Bayesianas para cuantificar la probabilidad conjunto del efecto dominó de accidentes.
- Etapa 7: Valoración de la percepción de riesgos en el área.

En la figura 2.1 se muestra un esquema general metodológico basado en la secuencia lógica de análisis, de acuerdo al objetivo de esta investigación.

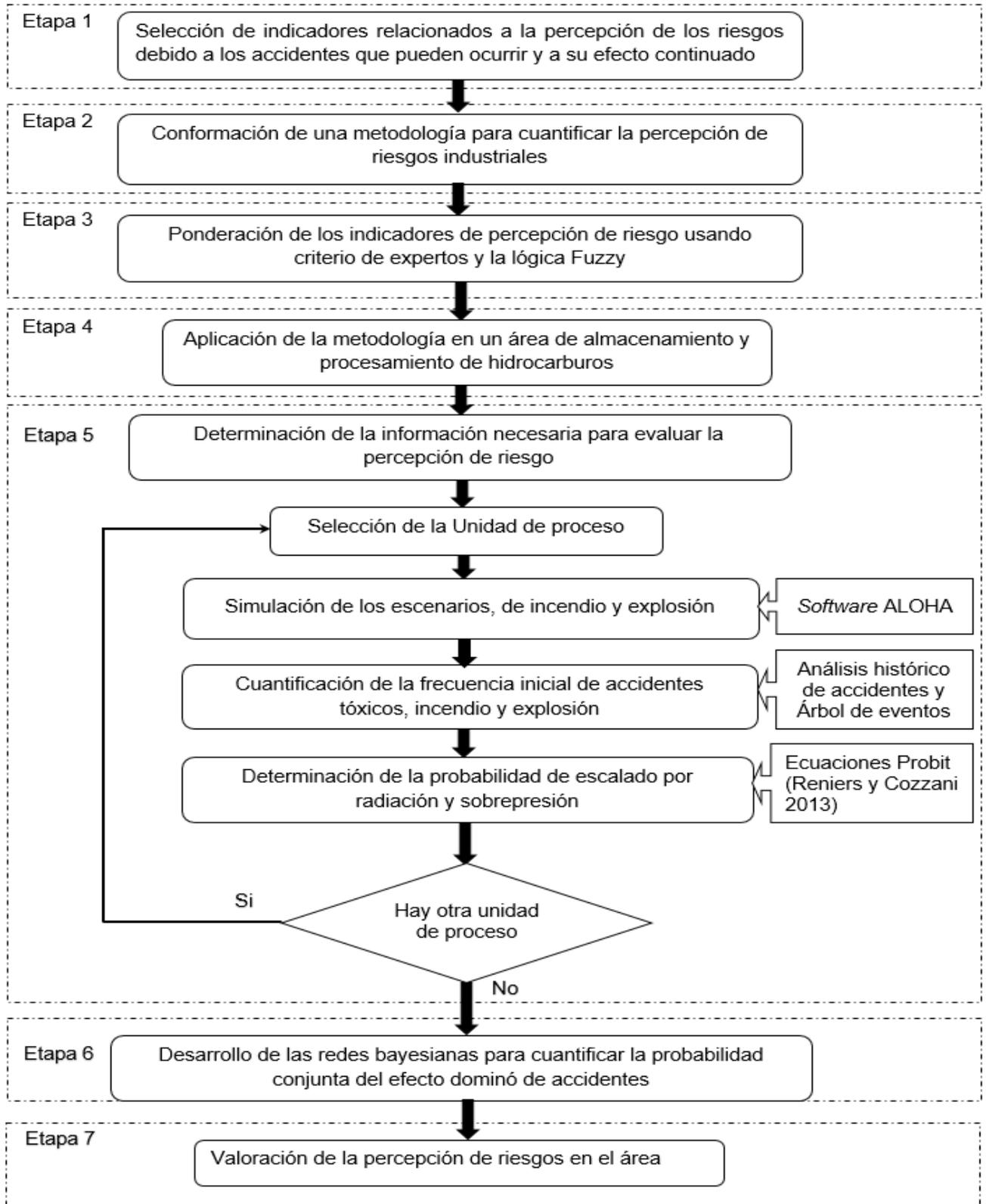


Figura 2.1: Esquema general basado en la secuencia lógica de análisis.

2.1 Etapa 1: Selección de indicadores relacionados a la percepción de los riesgos debido a los accidentes que pueden ocurrir y a su efecto continuado

Para desarrollar este primer paso de la metodología es necesario aclarar que la percepción de riesgos que se va a evaluar es la relacionada con los efectos de los accidentes tóxicos, de incendio y explosión sobre las personas, su alcance y la magnitud de las consecuencias del efecto dominó. En la tabla 2.1 se observan los tres factores que determinan percepción de riesgo y sus características.

Tabla 2.1: Indicadores relacionados a la percepción de riesgos.

Factores	Descripción
RP1 (<i>Risk Perception Factor 1</i>)- Percepción del alcance de los accidentes tóxicos, de incendio y explosión.	Este factor incluye todo lo relacionado a la simulación con el <i>software</i> ALOHA y ofrece como resultado la percepción del riesgo debido al alcance propio de estos accidentes. Cuantifica cómo los trabajadores y directivos perciben hasta dónde los accidentes podrían llegar. Además, incluye la percepción de cuáles serían los posibles escenarios que pueden ocurrir en el área de estudio.
RP2 (<i>Risk Perception Factor 2</i>)- Percepción de la afectación sobre las personas de accidentes tóxicos, de incendio y explosión.	Este factor cuantifica precisamente cómo esos accidentes pueden afectar a las personas y en qué medida debido a la radiación térmica provocada en los incendios, a la sobrepresión debido a las explosiones y a la concentración debido al desarrollo de nubes tóxicas.
RP3 (<i>Risk Perception Factor 3</i>)- Percepción del posible desarrollo del efecto dominó.	Este factor determina la percepción debido a la ocurrencia de accidentes mayores relacionados a la probabilidad real del efecto dominó. Además, evalúa el conocimiento que se tenga sobre este fenómeno en la industria petrolera.

Estos indicadores permiten percibir el alcance de los accidentes y la posible afectación que traería consigo, además mediante ellos se podrá evaluar el conocimiento que poseen los trabajadores y directivos sobre este fenómeno.

2.2 Etapa 2: Conformación de una metodología para cuantificar la percepción de riesgos industriales

La inadecuada percepción de riesgo puede convertirse en un importante desencadenante de accidentes industriales y laborales. Es por ello trascendental contar con una metodología que permitan su estudio. La metodología a seguir en esta tesis consta de 3 etapas necesarias para cuantificar la percepción de riesgos industriales.

La primera etapa refleja los indicadores relacionados a la percepción de los riesgos debido a los accidentes que pueden ocurrir. Es importante la evaluación del riesgo y la simulación de los efectos de incendio o explosión debido a que la información obtenida permite determinar las zonas que podrían ser afectadas y las consecuencias de un evento de esta magnitud, las medidas preventivas y las medidas de debemos tomar durante una emergencia, para mitigar sus efectos.

- RP1 (*Risk Perception Factor 1*)- Percepción del alcance de los accidentes tóxicos, de incendio y explosión

Este factor incluye todo lo relacionado a la simulación con el *software* ALOHA y nos ofrece como resultado la percepción del riesgo debido al alcance propio de estos accidentes. Cuantifica cómo los trabajadores y directivos perciben hasta dónde los accidentes podrían llegar. Además, incluye la percepción de cuáles serían los posibles escenarios que pueden ocurrir en el área de estudio.

Una vez simulados los escenarios objetos de estudio mediante el *software* ALOHA y determinados los radios de afectación se puede observar el alcance que los mismos pueden llegar a tener; siendo necesario percibir el riesgo al que se está expuesto al estar dentro del marco de estos posibles accidentes.

Hay cinco pasos involucrados en la evaluación de riesgos que incluyen buscar los peligros; decidir quién podría resultar perjudicado y cómo; evaluar el riesgo y

decidir si las precauciones existentes son adecuadas o deben tomarse más; registrar los hallazgos y revisar la evaluación.

- PR2 (*Risk Perception Factor 2*)- Percepción de la afectación sobre las personas de accidentes tóxicos, de incendio y explosión.

En la industria química existe un gran interés en reducir la probabilidad de desarrollarse incidentes producidos por incendios y explosiones, debido a las consecuencias catastróficas que han resultado (Poljanšek *et al.*, 2017).

Este segundo indicador cuantifica como esos accidentes pueden afectar a las personas y en qué medida debido a la radiación térmica provocada en los incendios, a la sobrepresión debido a las explosiones y a la concentración debido al desarrollo de nubes tóxicas. La aplicación de este permite determinar el número y gravedad de víctima ante un incidente probable.

Accidentes indeseables como el BLEVE o las nubes tóxicas son capaces de causar la muerte o lesionar a un determinado número de personas, tanto dentro como fuera de la industria, además de causar daños considerables en los bienes materiales y en el medio ambiente. Por lo que es necesario cuantificar esos daños para tener un conocimiento amplio del daño que pueden ocasionar estos accidentes y la necesidad de evitarlos.

La percepción sistemática está dirigida a captar los aspectos más significativos dentro de la industria para proporcionar así toda la información necesaria sobre los accidentes. La determinación de los vectores de escalado: radiación, concentración y sobrepresión es crucial dentro del análisis pues determinan el alcance que tiene el evento en un punto dado y por ende la afectación del accidente.

- RP3 (*Risk Perception Factor 3*)- Percepción del posible desarrollo del efecto dominó.

Este factor determina la percepción debido a la ocurrencia de accidentes mayores relacionados a la probabilidad real del efecto dominó. Además, evalúa el conocimiento que se tenga sobre este fenómeno en la industria petrolera.

La reducción del riesgo de efecto dominó es de gran interés para la industria química y petrolera ya que este es responsable de varios accidentes catastróficos. Es necesario analizar dónde y por qué han ocurrido este tipo de eventos, además de percibir el impacto social que provocan los mismos.

Para el pronóstico del efecto dominó la determinación de la probabilidad de escalado es un paso esencial (Argenti *et al.*, 2014). Según el conocimiento que tengan las personas sobre este fenómeno se puede lograr una mejor comprensión de la situación lo que permite actuar con eficacia ante un evento de esta magnitud. Por lo que se debe preparar adecuadamente al personal que labora en la industria petrolera.

En la segunda etapa se propone aplicar cuestionario a los trabajadores y directivos de la planta con el objetivo de valorar el nivel de conocimientos y responsabilidad que tienen y ver como desde su área de trabajo son capaces de percibir el riesgo al que están expuestos.

Las encuestas se van a centrar en la evaluación de percepción de riesgo y para el diseño de estas se tuvo en cuenta una serie de parámetros como los tipos de sustancias involucradas en el proceso, accidentes que pueden producirse, posibles daños a causar, acciones que toma la empresa para evitar eventos indeseables y medidas ante una situación de emergencia.

Estas encuestas y su análisis posterior, permiten determinar de manera selectiva, entre los parámetros a analizar, el nivel de riesgo de cada sujeto en su actividad diaria.

Finalmente, en la última etapa de la metodología se analizan los resultados obtenidos y se valoran los mismos de manera que se puedan cuantificar la percepción de riesgos industriales.

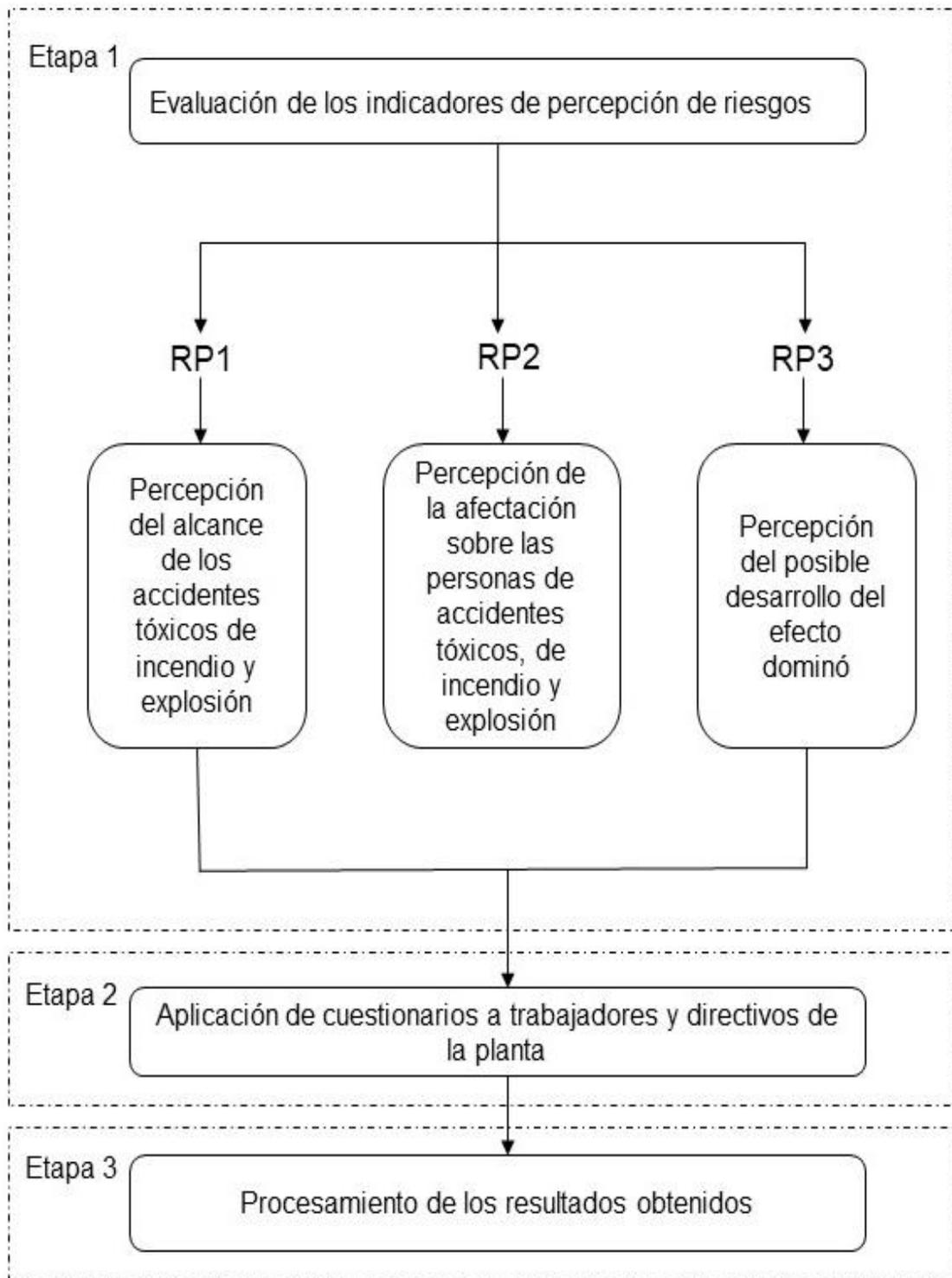


Figura 2.2: Metodología para cuantificar la percepción de riesgos.

2.3 Etapa 3: Ponderación de los indicadores de percepción de riesgo usando criterio de expertos y lógica *Fuzzy*

El criterio de expertos y la lógica difusa son técnicas imprescindibles para cuantificar la percepción de riesgos en el almacenamiento de hidrocarburos, por lo que en esta etapa se analizan estos métodos para ponderar los indicadores de percepción de riesgos.

2.3.1 Cuantificación del criterio de expertos

El criterio de expertos es esencialmente una metodología de consenso científico, a menudo utilizada para calcular las probabilidades de eventos vagos. Este método es una solución para hacer frente a la incertidumbre y la falta de datos suficientes y proporciona información útil para evaluar los riesgos. El concepto de "variable lingüística" es muy eficaz para tratar circunstancias que son vagas o aún definidas para ser caracterizadas razonablemente en expresiones cuantitativas convencionales. Una variable lingüística es una variable cuyos valores son palabras u oraciones en lenguaje natural o artificial (Zarei, 2018). Se han proporcionado ocho escalas de conversión diferentes. En esta investigación, usamos la Escala 7 que incluye 9 términos lingüísticos para estimar la probabilidad de ocurrencia de un evento y 5 términos lingüísticos para estimar la severidad de un evento. Estos datos fueron adaptados de la investigación realizada por Zarei (2018). En las tablas de los anexos 1 y 2 se muestran estos términos respectivamente.

En el anexo 3 se muestra la escala de conversión seleccionada para estimar la probabilidad de ocurrencia de un evento. La razón para seleccionar el número de escala 7 es el número adecuado de comparaciones para un juicio humano a la vez está entre 5 y 9 debido a la capacidad de memoria de los humanos. Los términos lingüísticos son en forma de números difusos trapezoidales.

2.3.2 Cuantificación de la probabilidad difusa

Los juicios de los expertos en forma de expresiones lingüísticas primero deben transformarse en números difusos y luego agregarse en un número difuso llamado

posibilidad difusa (FPs). Existen muchas técnicas para agregar las opiniones de los expertos, sin embargo, no se puede proporcionar una guía teórica sólida para el más adecuado (Zarei, 2018). Un enfoque interesante es un conjunto de opiniones lineal que se determina mediante la ecuación 2.1.

$$M_i = \sum_{j=1}^m W_j A_j, j = 1, 2, \dots, n \quad (2.1)$$

Donde:

M_i : posibilidad de falla difusa (presenta el valor difuso agregado de evento i).

W_j : puntuación de ponderación de expertos j .

A_j : valor lingüístico obtenido del experto j sobre el evento i .

m : número total de eventos.

n : número total de expertos.

El anexo 4 muestra como determinar los factores de ponderación de los expertos. Si un experto se considera "mejor" que otros, entonces se le da un mayor peso. Las ponderaciones de los expertos se obtienen estimando las puntuaciones de ponderación y los factores de ponderación de los expertos mediante las ecuaciones 2.2 y 2.3.

$$\begin{aligned} & \text{Puntuaje de peso de Expertos } i = \\ & \text{puntuaje de PP de expertos } i + \text{puntuaje de ET de Expertos } i + \\ & \text{puntuaje de EL de Expertos } i + \text{puntuaje de A de Expert } i \end{aligned} \quad (2.2)$$

$$\text{Factor de peso de expertos } i = \frac{\text{puntuaje de peso de expertos}}{\sum_{i=1}^n \text{puntuaje de peso de expertos}} \quad (2.3)$$

Donde:

PP : Posición profesional.

ET : tiempo de experiencia.

EL : Nivel de educación.

A : Edad de expertos.

2.3.3 Determinación de la Defusificación

La defusificación es el proceso de producir resultados cuantificables en lógica difusa. Las funciones difusas triangulares o trapezoidales se utilizan normalmente para representar variables lingüísticas (Zarei, 2018). El anexo 5 muestra la forma de definir una función difusa.

En el presente estudio se elige la técnica de defusificación del centro de área (centro de gravedad) la cual se determina a través de la ecuación 2.4.

$$X^* = \frac{\int \mu_i(x) x dx}{\int \mu_i(x)} \quad (2.4)$$

Donde:

X^* : salida difuminada.

$\mu_i(x)$: la función de pertenencia agregada.

x : variable de salida.

Mediante la ecuación 2.5 se puede definir la función de pertenencia $\mu_{\tilde{A}}(x)$.

$$\mu_{\tilde{A}}(x) = \left\{ \begin{array}{l} 0, x < a_1 \\ \frac{x-a_1}{a_2-a_1}, a_1 \leq x \leq a_2 \\ 1, a_2 \leq x \leq a_3 \\ \frac{a_4-x}{a_4-a_3}, a_3 \leq x \leq a_4 \\ 0, x > a_4 \end{array} \right\} \quad (2.5)$$

La defusificación del número difuso trapezoidal basado en el método de centro de área se calcula empleando la ecuación 2.6

$$X^* = \frac{\int_{a_1}^{a_2} \frac{x-a_1}{a_2-a_1} x dx + \int_{a_2}^{a_3} x dx + \int_{a_3}^{a_4} \frac{a_4-x}{a_4-a_3} x dx}{\int_{a_1}^{a_2} \frac{x-a_1}{a_2-a_1} dx + \int_{a_2}^{a_3} dx + \int_{a_3}^{a_4} \frac{a_4-x}{a_4-a_3} dx} = \frac{1}{3} \quad (2.6)$$

$$\blacksquare \frac{(a_4-a_3)^2 - a_4 a_3 - (a_1-a_2)^2 + a_1 a_2}{(a_4+a_3-a_1-a_2)}$$

2.3.4 Determinación de la probabilidad difusa

El último paso es convertir la posibilidad difusa (FPs) de eventos vagos en probabilidad difusa (FPr) (Zarei, 2018). Se utiliza para ello las ecuaciones 2.7 y 2.8.

$$FPr = \begin{cases} \frac{1}{10^K} & \text{si } FPS \neq 0 \\ 0 & \text{si } FPS = 0 \end{cases} \quad (2.7)$$

$$K = \left[\left(\frac{1-FPS}{FPS} \right) \right]^{\frac{1}{3}} \times 2.301 \quad (2.8)$$

Donde:

K: Valor constante.

FPS: Probabilidad difusa.

FPr: Probabilidad difusa para cada evento.

Al final, las probabilidades difusas obtenidas se asignan como falla de probabilidades de los eventos y barreras de seguridad en el modelo desarrollado (anexo 5).

2.4 Etapa 4: Aplicación de la metodología en un área de almacenamiento y procesamiento de hidrocarburos

En este epígrafe se explica la metodología propuesta en un área de almacenamiento y procesamiento de hidrocarburo que en este caso va a ser la Planta de Procesamiento de Crudo de la EPEP-Centro debido a que esta es un área propensa para el desarrollo de accidentes tóxicos de incendio y explosión debido a las sustancias que procesa.

2.5 Etapa 5: Determinación de la información necesaria para evaluar la percepción del riesgo

En este epígrafe se estudian los escenarios de incendio y explosión que pueden tener lugar en un área seleccionada del proceso para así poder analizar las

consecuencias de dichos accidentes y ser capaz de evaluar la percepción del riesgo ante situaciones emergentes.

2.5.1 Selección de la unidad de proceso

Para la selección de las unidades de proceso a estudiar se tiene en cuenta las sustancias almacenadas, la cercanía entre los equipos, así como sus características constructivas; la planta de Procesamiento de Crudo será objeto de estudio de esta investigación ya que es una de las más propensas a la ocurrencia de accidentes tóxicos, de incendio y explosión. Conocer el procedimiento que se efectúa en la industria es de gran importancia, por lo que es necesario la descripción de su proceso tecnológico.

La planta de procesamiento de crudo de la EPEP-Centro tiene como objetivo la aplicación de un tratamiento adecuado a los crudos provenientes de los pozos en producción, de forma tal que se alcancen los índices de calidad requeridos antes de su comercialización. El petróleo contiene una serie de impurezas que es necesario eliminar hasta alcanzar los límites establecidos, dentro de ellas el agua, donde se aplica el Tratamiento Termoquímico en etapas posteriores, con la aplicación de una sustancia desemulsionante para neutralizar la acción de las emulsiones y separar el agua del petróleo.

El crudo se recibe desde los centros colectores en producción a través del oleoducto y desde los pozos aislados en producción a través de carros cisternas hacia las Piscinas de Recepción. Este crudo llega a temperatura ambiente por lo que se calienta en dos intercambiadores de calor en espiral hasta un máximo de 85 °C para garantizar una mejor separación de gas, así como la continuidad del tratamiento termoquímico sobre la emulsión agua-petróleo. Una vez calentado se traslada a cuatro balas donde se logra la mayor separación del gas acompañante. Para ello, la mezcla entra a los separadores por un extremo donde parte del fluido es separada por la acción de la gravedad y el gas obtenido transita por un esquema de separación para luego ser trasegado hacia la planta de ENERGAS que lo utiliza, después de hacer los tratamientos pertinentes, para la generación de energía eléctrica.

El petróleo pasa por gravedad hacia el tanque 6 donde entra por la columna desgasificadora interior central y sale por un orificio inferior. Este tanque cuenta con sistema de calentamiento a través de serpentines de vapor, para calentar el crudo y además en el mismo se separa la mayor parte del gas que no es posible separar en las balas, que luego es succionado con el compresor de baja que está instalado en la planta de ENERGAS.

El crudo es bombeado del tanque 6 a los tanques de tratamiento: tanques 7, 8, 14, 15 y 16 equipos que también cuentan con serpentines de vapor para alcanzar una temperatura de 800 C, lo que permite junto al tiempo de reposo, la ruptura de la emulsión agua-petróleo y la decantación del agua liberada. Esta operación se realiza hasta alcanzar el 2% de BSW (porcentaje de agua y sedimentos en los crudos), parámetro requerido para la comercialización.

El petróleo en calidad que se encuentra en los tanques de tratamiento finalmente pasa hacia los tanques de la Estación Cabecera del Oleoducto (ECO). Este luego es bombeado con las Bombas Booster hacia el colector de succión de las Bombas Magistrales de la ECO a través de los intercambiadores de calor de tubos y coraza de titanio, donde existe la posibilidad de corregir la viscosidad del crudo para la venta con la adicción de nafta y luego las bombas magistrales impulsan el petróleo a través de oleoducto hasta la División Territorial de Comercialización de Combustibles de Matanzas para su posterior comercialización. La caracterización tecnológica de las unidades de proceso objeto de estudio se muestran en el anexo 6.

2.5.2. Simulación de todos los escenarios de incendio, explosión y tóxicos con el *software* ALOHA

En este epígrafe se describe el proceso de simulación de los escenarios de accidentes tóxicos, de incendio y explosión, además de las características y particularidades del *software* empleado para las simulaciones.

Según el Ministerio de Ciencia Tecnología y Medio Ambiente de Cuba (CITMA) el *software* ALOHA es el simulador más adecuado para mostrar el comportamiento

de los accidentes tóxicos, de incendio y explosión. Por lo que es el *software* utilizado para determinar las características de los escenarios que se analizarán en esta investigación.

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.

El *software* ALOHA emplea en sus cálculos dos modelos de dispersión: un modelo Gaussiano para gases ligeros que ascienden rápidamente, y el modelo Degadis para gases densos que se dispersan a ras de suelo. Ambos modelos predicen la velocidad de emisión de vapores químicos que escapan a la atmósfera desde tuberías rotas, fugas de tanques, charcos de líquidos tóxicos en evaporación o directamente desde cualquier otra fuente de emisión. Por tanto, ALOHA es capaz de estimar cómo una nube de gas peligrosa podría dispersarse en la atmósfera después de una descarga química accidental (Jones *et al.* 2013; Meteogalicia, 2011; Mohammad, 2017; User's Manual ALOHA, 2007).

Si el producto almacenado es inflamable pueden producirse 3 tipos de accidentes en el tanque:

- a) El compuesto químico vertido (tanto la fracción que se evapora de accidente con líquidos, como con compuestos gaseosos) 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, formando un charco de fuego (*pool fire*) en el caso de productos

líquidos o una ráfaga de fuego (*jet fire*) para productos almacenados en estado gaseoso.

c) Si el tanque contiene gas licuado puede producirse un BLEVE (*Boiling Liquid Expanding Vapor Explosion*), una explosión que formará una bola de fuego mientras el producto restante se acumula en un charco que está ardiendo (*pool fire*).

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.

Su principal desventaja es que muestra resultados poco fiables si existen velocidades de viento muy bajas, condiciones atmosféricas muy estables, desigualdad de concentración cerca de la fuente de emisión del contaminante y cambios de viento, así como efectos de conducción del terreno.

Aún con estas limitaciones, ALOHA ofrece una variedad de beneficios, pues permite modelar escapes químicos de cuatro tipos y fuentes de emisión: emisiones directas a la atmósfera, charcos o piscinas de compuestos químicos en evaporación, tanques y tuberías de gases. Además, puede desplegar gráficamente zonas de amenazas, demostrando una o más áreas de peligros por toxicidad, inflamabilidad, radiación térmica y daños por sobrepresión, que pudieran exceder un nivel umbral capaz de causar daños a la salud humana, a la propiedad y al ambiente que es lo que se conoce como nivel de preocupación (LOC). Estas zonas de amenaza son desplegadas en tres colores: el rojo representa el área de mayor peligro mientras que el naranja y amarillo peligros decrecientes (Meteogalicia, 2011).

Según Meteogalicia (2011), Jones *et al.* (2013), y User's Manual ALOHA (2007) el LOC (Level of concern o nivel de preocupación) es un nivel que marca el inicio de la radiación térmica, usualmente el nivel sobre el cual este peligro puede ocurrir.

Se utilizan tres valores de LOC para radiación:

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

Cuando se modela un escenario de explosión, ALOHA también sugiere tres valores de sobrepresión por defecto basados en fuentes ampliamente aceptadas. El programa de acuerdo a Jones *et al.* (2013) y Meteogalicia (2011) utiliza estos valores umbrales para crear las siguientes zonas de riesgo:

- Rojo: 8.0 psi (55,16 kPa): destrucción de edificios.
- Naranja: 3.5 psi (24,13 kPa): probables lesiones graves.
- Amarillo: 1.0 psi (6,89 kPa): rotura de cristales.

Si el compuesto no es inflamable únicamente ALOHA mostrará las zonas de riesgo asociadas a la dispersión de una nube tóxica, donde para descargas accidentales de compuestos tóxicos existen diferentes niveles de preocupación, entre ellos: AEGLs (Acute Exposure Guideline Levels): que representan el umbral límite de exposición para la población general. Está definido para tres niveles de daño cada uno de los cuales expresan valores de concentración de una sustancia química en el aire por encima de la cual se predice que la población, incluyendo individuos susceptibles, podrían experimentar según Meteogalicia (2011); Mohammad (2017) y User's Manual ALOHA (2007) diferentes sensaciones, específicamente:

- AEGL-1: molestias notables, irritación o ciertos efectos sintomáticos. Estos efectos son transitorios, no incapacitantes y reversibles una vez que cesa el periodo de exposición.
- AEGL-2: efectos duraderos serios o irreversibles o ver impedida su capacidad para escapar.
- AEGL-3: efectos amenazantes para la vida o incluso provocar la muerte.

2.5.3 Determinación de la frecuencia inicial de los accidentes

Con el objetivo de determinar la frecuencia inicial con la cual ocurren los accidentes tóxicos, de incendio y explosión en el área de estudio, se realiza un análisis histórico de accidentes que han ocurrido en la planta durante los últimos 10 años de explotación.

A partir del análisis histórico puede ser generado un árbol de eventos que permite conocer las secuencias más probables que puedan presentarse, así como la probabilidad de que las mismas sucedan y, finalmente, la frecuencia con la que previsiblemente han de ocurrir los diversos escenarios accidentales que puedan acontecer (Gómez, 2009).

Los árboles de eventos son una herramienta mayor en el análisis de consecuencias (BEVI, 2009; Wells, 2003). En estos desde el suceso inicial, que generalmente, es una pérdida de contención, se analizan la funcionalidad y la falla de subsistemas de seguridad, teniendo en cuenta una lógica consecuente; resultando en una estructura en forma de árbol, con las ramas de izquierda a derecha. Cuando se le asigna una probabilidad a cada rama, se puede determinar luego de iniciarse el evento inicial la probabilidad de cada escenario posible, según el manual BEVI (2009).

Para la conformación y el análisis del árbol de eventos se siguen las etapas que se enumeran a continuación:

1. Identificar el evento inicial: Usualmente este es un evento de falla que corresponde al derrame de un material peligroso.
2. Identificar el desarrollo del incidente: Se considera el control sobre la situación y la posible mitigación.
3. Construir el árbol de eventos. A cada nodo de falla, los eventos alternativos que afectan materialmente el escenario y son los siguientes:
 - El árbol de evento se construye de izquierda a derecha.
 - A cada nodo de falla, se muestran los eventos alternativos que materialmente afectan el escenario.

- El evento que se sitúa en la rama superior es el afirmativo.

4. Clasificar los escenarios del incidente: El árbol de evento se desarrolla hasta conocer el escenario objetivo del análisis. Es razonable construir el árbol hasta que se llegue a un accidente mayor.

5. Estimar la probabilidad de cada rama en el árbol: A cada rama le corresponde una probabilidad condicional que suman 1.

6. Cuantificar la probabilidad de los escenarios y revisar su exactitud: La frecuencia de cada escenario se determina multiplicando la frecuencia del evento inicial por las probabilidades condicionales de cada rama hasta llegar al escenario.

2.5.3.1 Determinación de la probabilidad de ignición

La probabilidad de ignición se refiere a la probabilidad de incendiarse algunos materiales inflamables después de su fuga. Su estimación es un paso clave en el análisis de riesgo cuantitativo (QRA) para instalaciones donde hay líquidos y gases inflamables que son almacenados o transportados. Los factores más influyentes en dicha probabilidad son:

- Caudal o cantidad derramada: Mientras mayor es la liberación, mayor será la zona cubierta por la nube inflamable y por ende mayor será la probabilidad de ignición.
- La sustancia liberada: Cuanto más volátil e inflamable es el material, más probable será la ignición.
- las condiciones meteorológicas de los alrededores y las condiciones generales de la fuga.

Para el cálculo de la probabilidad de ignición se propone la metodología de Changlong, Juncheng y Xiongjun (2012) que consta de los siguientes pasos:

1. Calcular la probabilidad de ignición debido al material derramado (*PMP*) es necesario categorizar los materiales inflamables en función al manual BEVI. El anexo # 7 muestra esta categorización.

2. Calcular la probabilidad de ignición debido al flujo (PQ) a partir de la ecuación logarítmica 2.9 y que está en función del flujo másico de la sustancia derramada.

$$\log P_{ign} = \log P_{ign.lower} + \frac{(\log Q - \log Q_{lower}) \cdot (\log P_{ign.upper} - \log P_{ign.lower})}{\log Q_{upper} - \log Q_{lower}} \quad (2.9)$$

Donde:

P_{ign} : probabilidad de ignición en función del flujo.

$P_{ign.lower}$: probabilidad de ignición correspondiente al flujo inferior (0,001).

$P_{ign.upper}$: probabilidad de ignición correspondiente al flujo superior (0,13).

Q : flujo másico real de operación (kg/s) el cual depende del bombeo.

Q_{lower} : flujo másico inferior (0,1 kg/s).

Q_{upper} : flujo másico superior (109,99 kg/s).

3. Calcular la probabilidad de ignición en función de la fuente y características de los alrededores (P_{IS}) a través de la ecuación 2.10.

$$P_{IS} = 1 - (1 - s^2) \cdot e^{-(0.015 \cdot s)t} \quad (2.10)$$

Donde:

s : probabilidad de ignición según la fuente en un minuto. Si la fuente de ignición es por un fallo eléctrico toma un valor de 0,8 y si es un incendio toma el valor de 1.

t : tiempo que dura el derrame en minutos.

4. Calcular el factor por el control de ignición (K_{IC}): se determina según el control que presenta la planta por clasificación. En el anexo # 8 se muestra las distintas categorizaciones. Se propone un factor de 0,25 para un control típicamente bueno en el área.

5. Determinar la probabilidad de ignición P_{IP} por la ecuación 2.11 que no es más que la máxima de las probabilidades anteriores multiplicada por el factor de control.

$$P_{IP} = \text{máximo}(P_{MP}, P_Q, P_{IS}) \cdot K_{IC} \quad (2.11)$$

Después de calculada la probabilidad de ignición se calcula entonces la probabilidad de escalado de cada escenario a partir de la metodología del árbol de evento, para ser usada posteriormente en la tabla de probabilidades para las redes Bayesianas.

2.5.4 Determinación de la probabilidad de escalado por radiación y sobrepresión

Para determinar la probabilidad de escalado de accidentes es necesario en primer lugar simular los diferentes escenarios en ALOHA para obtener los valores de intensidad de la radiación y sobrepresión para cada uno de ellos. Una vez obtenidos estos resultados se podrá calcular los valores Probit a partir de las ecuaciones descritas por Reniers y Cozzani (2013) y Mukhim *et al.* (2017) y así con los resultados de las Probit obtener mediante el programa Matlab las probabilidades de escalado de cada uno de los accidentes. En las tablas 2.2 y 2.3 se muestran las ecuaciones que se utilizan para el cálculo.

Tabla 2.2: Ecuaciones para la determinación de la probabilidad de escalado por Reniers y Cozzani (2013).

Escenario primario	Tipo de equipo	Modelos de probabilidad	Número de ecuación
Charco de fuego	Atmosférico	$\ln(ttf) = -1,13 \ln(I) - 2,667 \cdot 10^{-5}V + 9,877$	2.12
		$Y = 9,25 - 1,847 \ln\left(\frac{ttf}{60}\right)$	2.13
	Presurizado	$\ln(ttf) = -1,29 \ln(I) - 10,97V^{0.026}$	2.14
		$Y = 9,25 - 1,847 \ln\left(\frac{ttf}{60}\right)$	2.15
VCE	Atmosférico	$Y = -18,96 + 2,44 \ln(Ps)$	2.16
	Presurizado	$Y = -42,44 + 4,33 \ln(Ps)$	2.17

Donde:
 ttf : tiempo de falla (s); I : intensidad de la radiación (kW/m²); V : volumen de la unidad secundaria (m³); Ps : pico de sobrepresión (Pa)

Tabla 2.3: Ecuaciones para la determinación de la probabilidad de escalado por Mukhim et al. (2017).

Escenario Primario	Tipo de equipo	Modelos de probabilidad	Número de Ecuación
VCE	Tanques atmosféricos	$Y = -15,79 + 2,02\ln(\Delta P)$	2.18
	Intercambiadores de calor	$Y = -201,20 + 18,98 \ln(\Delta P)$	2.19
	Separador Horizontal	$Y = -88,88 + 8,79\ln(\Delta P)$	2.20

ΔP : pico de sobrepresión (Pa).

2.5.5 Evaluación del riesgo individual debido al carácter continuado de accidentes tóxicos, de incendios y explosión

El riesgo individual es la probabilidad de que una persona sufra consecuencias como resultado de su exposición, en un determinado lugar, a uno o varios peligros. En este epígrafe se explica y exponen las diferentes ecuaciones a emplear para obtener la evaluación del riesgo individual debido al carácter continuado de accidentes tóxicos, de incendio y explosión, así como las definiciones que lo caracterizan.

El riesgo individual correspondiente a cada escenario dominó se calcula mediante la ecuación 2.21.

$$R_{i,de}^{(k,m)} = f_{de}^{(k,m)} \cdot V_{de}^{(k,m)} \quad (2.21)$$

Donde:

$R_{i,de}^{(k,m)}$: Riesgo individual.

$f_{de}^{(k,m)}$: Probabilidad de efecto dominó.

$V_{de}^{(k,m)}$: Vulnerabilidad debido al efecto dominó.

La vulnerabilidad se determina como la suma de la probabilidad de muerte de todos los escenarios dentro de la secuencia dominó, con un límite superior de 1, tal como se muestra en la ecuación 2.22.

$$V_d^{(k,m)} = \min\left[V_p + \sum_{i=1}^n \delta(i, J_m^k) \cdot V_{d,i}, 1\right] \quad (2.22)$$

Para determinar la vulnerabilidad de las personas a la radiación y sobrepresión, se utilizan las ecuaciones Probit Y expuestas por Lees (2012).

Según Lees (2012) los efectos de la radiación, sobrepresión (incluido la rotura de tímpanos) y la concentración de sustancias tóxicas (específicamente para el sulfuro de hidrógeno), se determinan mediante las ecuaciones 2.23, 2.24 y 2.25 respectivamente, las cuales se agrupan en la tabla 2.4.

Tabla 2.4: Ecuaciones para determinar la vulnerabilidad de las personas.

Efectos	Ecuaciones	Número de ecuación	Terminología
Radiación	$Y = -10,7 + 1,99 \cdot \ln(I^{4/3} \cdot t)$	2.23	I : Radiación (kW/m ²) t : tiempo de exposición (s)
Sobrepresión	$Y = 5,3 + 1,37 \cdot \ln(P)$	2.24	P : Sobrepresión (bar)
Concentración	$Y = k_1 + k_2 \cdot \ln(C^n) \cdot t$	2.25	C : Concentración (ppm) t : tiempo de exposición (min) $k_{1H_2S} = -31,42$ $k_{2H_2S} = 3,008$ $n_{H_2S} = 1,43$

Una de las técnicas más útiles para la cuantificación del riesgo individual de los accidentes son los mapas de isorriesgos. Estas curvas permiten estudiar el riesgo real al que están expuestas las personas a diferentes distancias desde donde ocurre el accidente en el área analizada.

2.6 Etapa 6: Desarrollo de las redes Bayesianas para cuantificar la probabilidad conjunto del efecto dominó de accidentes

Con el objetivo de evaluar la frecuencia de los escenarios dominó se proponen aplicar las redes Bayesianas, estas son muy útiles en la cuantificación del carácter continuado de accidentes, sobre todo aquellos que tienden a ocurrir en la industria petrolera, lo que se debe a su forma flexible y adaptable y a su capacidad para analizar sistemas complejos (Leoni *et al.*, 2018; Shi, Zhu, Khan y Chen, 2019; Simon, Mechri y Capizzi, 2019; Zarei, Khakzad, Cozzani y Reniers, 2018). En este epígrafe se describe la metodología a seguir para su elaboración, así como las características del *software* Hugin empleado para su desarrollo.

2.6.1 Metodología para la elaboración de las redes Bayesianas de probabilidades

Para la elaboración de la red Bayesiana de probabilidades se sigue la metodología propuesta por Reniers y Cozzani (2013). En el anexo 9 se muestra la misma.

Con el propósito de modelar el patrón de propagación probable de efecto dominó se llevan a cabo los siguientes pasos.

1. Teniendo en cuenta el esquema de la planta del proceso de interés, se asigna un nodo a cada unidad de proceso. Estas unidades son susceptibles al accidente o son capaces de intensificando.
2. Se determina la unidad primaria potencial donde es probable que comience el accidente dominó teniendo en cuenta la posición centralizada de estos y la probabilidad de ocurrencia.
3. Se identifican los escenarios primarios que dan lugar según los resultados obtenidos (por ejemplo, radiación, sobrepresión o proyección de fragmentos) y se evalúan los vectores de escalado.
4. En la primera fase (4.1) se identifican las unidades secundarias potenciales al comparar los vectores de escalado con los valores umbrales. En la siguiente fase (4.2) se seleccionan los modelos de daño probabilísticos y cuando es necesario se

calculan los valores Probit. En el paso (4.3) se calculan la probabilidad de escalado de unidades secundarias potenciales dado el evento primario, y en la fase (4.4) se eligen como unidades secundarias aquellas con mayor valor de probabilidad. Dado que los eventos secundarios son causados por el evento primario, las unidades se relacionan con un arco causal.

5. Definir los posibles escenarios de accidente y las probabilidades de ocurrencia de las unidades secundarias.

6. Para determinar las unidades terciarias potenciales, se repiten los pasos del 3 al 5 sustituyendo las unidades secundarias por la unidad primaria. En este procedimiento se deben considerar los efectos sinérgicos.

2.6.2 Características del *software* Hugin

El programa Hugin es la herramienta comercial más usada para el desarrollo y uso de redes Bayesianas (Hugin, 2019). El entorno de desarrollo de este *software* tiene tres componentes principales: el motor de decisión, una colección de interfaces de programa de aplicación y la interfaz gráfica de usuario. El motor de decisión es el encargado de realizar todo el procesamiento de datos y el mantenimiento de almacenamiento asociado con el proceso de razonamiento mientras que la Interfaz de Programas de Aplicación (API) permite a los programadores crear aplicaciones basadas en el conocimiento, utilizando el poder del motor de decisión para razonar. Por otro lado, la interfaz gráfica de usuario de Hugin es la herramienta interactiva que le permite al usuario utilizar las funciones del motor de decisión de Hugin para construir modelos que se pueden usar en variadas aplicaciones (Spirtes et al., 2000; Jensen, 2001; Lauritzen y Nilsson, 2001).

En este *software* se construyen diagramas de influencia que son redes Bayesianas extendidas con nodos de decisión y funciones de utilidad. Una red Bayesiana es realmente una representación inteligente de un dominio de variables aleatorias dependientes, por lo que se selecciona este programa como el más

adecuado para la simulación de las redes Bayesianas que se confeccionarán en el transcurso de la investigación.

2.6.3 Cuantificación de probabilidades a partir de las redes Bayesianas

Una vez confeccionadas las redes Bayesianas, se determina la probabilidad conjunta del efecto dominó para cada unidad de proceso primaria analizada. Además, se calculan las probabilidades de ocurrencia del efecto dominó para cada nivel de propagación. Con este propósito se introducen en la red nodos auxiliares L_i que expresan la probabilidad de propagación del accidente primario a las posibles iésimas unidades y el nodo $P(DL_i)$ que indica la probabilidad del efecto dominó del nivel iésimo.

En el anexo 10 se muestran las tablas de probabilidad para realizar la introducción de estos nodos. Las tablas de probabilidad de los nodos auxiliares L_i se elaboran teniendo en cuenta que para considerar el efecto dominó, se necesita que exista una unidad secundaria, sea cual sea esta; mientras que, la de los nodos DL_i se construyen a partir del criterio de ocurrencia de un accidente en una unidad primaria (X_1) y en alguna otra unidad, que es considerada entonces, como secundaria.

La probabilidad conjunta del efecto dominó (P_{DE}) hasta el último nivel de escalado (n) se determina por la ecuación 2.26.

$$P_{DE} = \sum_{i=1}^n DL_i \quad (2.26)$$

2.7 Etapa 7: Valoración de la percepción de riesgos en el área analizada

La percepción del riesgo como condición previa para la motivación de seguridad se considera comúnmente que consta de dos componentes: la probabilidad percibida de que ocurra un accidente y la gravedad percibida de las consecuencias de dicho accidente (Leder *et al.*, 2018).

Por su capacidad de generalización, el método propuesto permite el análisis de percepción de riesgo para su posterior valoración. Se hace necesario valorar el nivel de conocimientos y responsabilidad que tienen los trabajadores. En la tabla

2.5 se muestra la clasificación de la percepción de riesgos en función del valor de RP.

Tabla 2.5: Clasificación de la percepción de riesgo en función del valor de RP.

Rango	Clasificación
[0 --- 20)	Muy baja (VL)
[20 --- 30)	Baja- muy baja (L-VL)
[30 --- 40)	Baja (L)
[40 --- 50)	Baja-media (FL)
[50 --- 70)	Media (M)
[70 --- 80)	Media-alta (FH)
[80 --- 85)	Alta (H)
[85 --- 95)	Alta-muy alta (H-VH)
[95 --- 100)	Muy alta (VH)

La tabla anterior permite clasificar la percepción que tienen los trabajadores del área para poder conocer el nivel de percepción que poseen cada uno de ellos. La tesis en investigación tiene como objetivo general evaluar la percepción de riesgos de accidentes tóxicos, de incendio y explosión. Para el desarrollo de este proyecto se llevan a cabo una serie de etapas que permiten determinar toda la información necesaria para cuantificar, evaluar y finalmente valorar la percepción de riesgos en el área analizada. Se aplican cuestionarios que sirven de fuente de información para la evaluación final.

Capítulo 3: Análisis de los resultados

En el presente capítulo se muestra un análisis de los resultados obtenidos en la investigación. Primero, se muestran los diferentes resultados referidos a la aplicación de la metodología para cuantificar la percepción de riesgos industriales. Para evaluar dicha percepción primeramente se valora el alcance de cada escenario analizado mediante las corridas en el *software* ALOHA, luego a partir de un análisis histórico se calcula la frecuencia inicial de los accidentes y obtenida esta se confecciona el árbol de eventos que permite cuantificar la probabilidad de escalado, pasos que son fundamentales para la confección de las redes Bayesianas. Además, se obtiene la probabilidad conjunta de efecto dominó mediante la confección de estas redes y finalmente se valora la percepción de riesgos en el área seleccionada.

3.1 Análisis de los resultados referidos a los indicadores para percepción de riesgos (Etapas 1- 4)

La inadecuada percepción del riesgo constituye una causa clara de la incorrecta valoración del peligro y, por ende, del error humano (Carbonel y Torres, 2010). Se llevó a cabo un estudio en 3 trabajadores de la Planta de Procesamiento de Crudos. Se realizó un cuestionario con la finalidad de determinar la percepción de riesgos respecto a los accidentes, su alcance e impacto en esta área. El diseño de encuestas se basó en una concepción de preguntas cerradas y ordenadas, de manera que se consiguió una correlación con la escala de percepción de riesgo asociada. Las preguntas del cuestionario tienen como objetivo determinar si el trabajador conoce los posibles escenarios que pueden ocurrir en el área, el vector que caracteriza a cada uno, las afectaciones que se producen según el nivel de radiación y sobrepresión existente, así como el alcance desde el centro de la unidad de proceso de cada uno de estos escenarios. Además, tienen la finalidad de saber si estas personas son conscientes del riesgo individual existente ante un escenario ya sea de incendio, explosión y tóxico o el efecto conjunto de estos y finalmente determinar si son conocedores del efecto dominó y su probabilidad de

ocurrencia en el área. En el anexo 11 se muestra el cuestionario realizado para evaluar como los trabajadores perciben el riesgo al que pueden estar expuestos.

Para determinar la percepción de riesgos se emplea el criterio de expertos, utilizando los tres factores (RP1, RP2 y RP3) y posteriormente se aplica la lógica difusa.

Los juicios de expertos cada día son más reconocidos como fuente de datos para los análisis de riesgos. Para ello se busca a aquellas personas con amplios conocimientos y experiencia contrastada en el área de interés y que por lo tanto están cualificadas para responder a las cuestiones planteadas (Bolado *et al.*, 2011). En el presente estudio tres expertos expresaron sus criterios acerca de estos factores empleando los términos lingüísticos de los anexos 1 y 2. La tabla 3.1 muestra el peso de experto para tres expertos al considerar estos criterios.

Tabla 3.1 Peso del experto para tres expertos considerando los factores RP1, RP2 y RP3.

Expertos	Peso del experto
Experto 1	0,2445
Experto 2	0,4222
Experto 3	0,3333

El criterio de expertos tiene una gran ventaja ya que el número de elementos que considera el grupo de expertos es mayor que el que podría ser tenido en cuenta por una sola persona lo que incide en la teórica alta calidad de la respuesta obtenida y el alto nivel de profundización en la valoración que se ofrece (Cruz, 2020).

A cada experto se le asigna un peso según el conocimiento que poseen sobre el tema. (Bolado *et al.*, 2011). Como puede observarse en la tabla, se obtienen los pesos 0,2445; 0,4222; 0,3333 para el primer, segundo y tercer experto respectivamente coincidiendo con los valores obtenidos por Dueñas *et al.* (2021).

Las superficies de respuesta son la representación en 3D del criterio de expertos ya ponderado. La relación $RP = f(RP1, RP2, RP3)$ que existe entre RP y los niveles

de los 3 factores puede ser representada mediante esta superficie. En las figuras 3.1a, 3.1b y 3.1c se muestran las superficies.

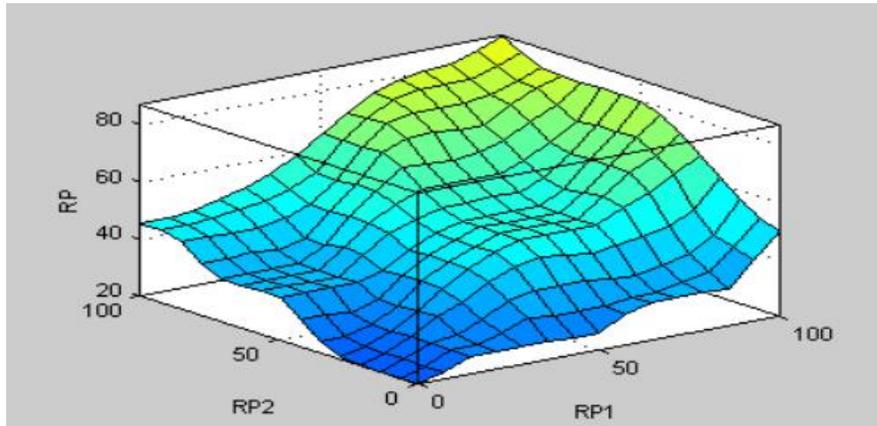


Figura 3.1a. Respuesta de superficie considerando los factores RP1 y RP2.

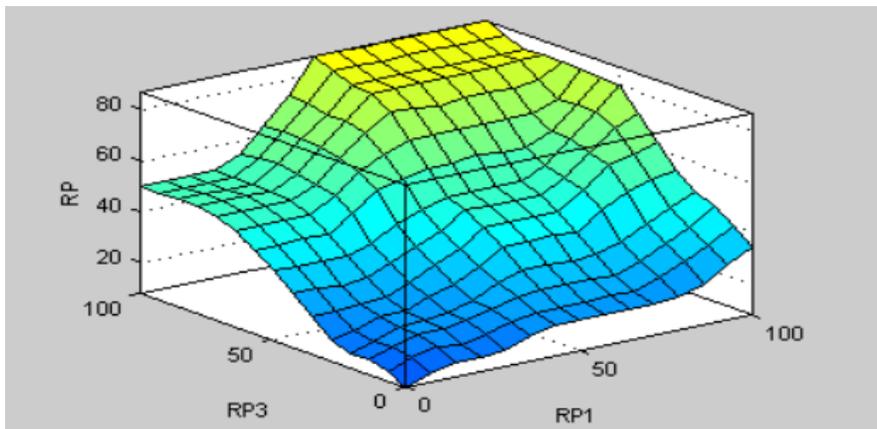


Figura 3.1b. Respuesta de superficie considerando los factores RP1 y RP3.

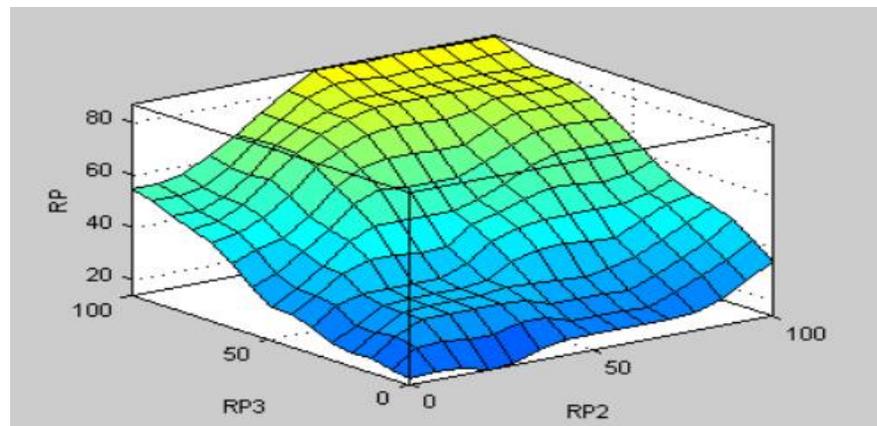


Figura 3.1c. Respuesta de superficie considerando los factores RP2 y RP3.

La percepción de la afectación sobre las personas de accidentes tóxicos, de incendio y explosión (RP1) posee un comportamiento similar a la percepción del alcance de estos accidentes (RP2) y a la percepción del posible desarrollo del efecto dominó (RP3). Según Gómez (2016) estudios realizados muestran que las personas tienen a menudo una percepción más alta sobre la afectación de estos accidentes sobre sí mismos, determinado por el temor a su seguridad y salud.

Con el análisis de estas superficies de respuesta se puede deducir que entre estos tres factores existe una estrecha relación coincidiendo con Dueñas *et al.* (2021) ya que a medida que las personas perciben el alcance que pueden tener estos accidentes perciben también la afectación que traería consigo y a la vez la percepción del posible desarrollo de efecto dominó si se determinan las condiciones para ello. La interacción existente entre estos tres factores resulta significativa para hacer frente al peligro, y las decisiones. Esto concuerda con Naghavi *et al.* (2020) que plantea que una mejor percepción de riesgo de los trabajadores disminuirá la probabilidad de incidentes.

3.2 Resultados de la determinación de la información necesaria para evaluar la percepción del riesgo (Etapa 5)

En este epígrafe se determina toda la información necesaria para evaluar la percepción de riesgos en la Planta de Procesamiento de Crudos, para ello se analiza el alcance de los escenarios de incendio y explosión obtenidos mediante el *software* ALOHA, se cuantifica la frecuencia inicial de estos accidentes a través del análisis histórico y la confección del árbol de eventos y se determina la probabilidad de escalado por radiación y sobrepresión mediante las ecuaciones Probit.

3.2.1 Análisis de los resultados del *software* ALOHA

En este epígrafe se realiza un análisis de los escenarios de incendio y explosión que pueden tener lugar en las unidades de proceso simulados en el *software* ALOHA; estas son realizadas con el propósito de obtener los diferentes valores de vectores de escaldos: intensidad de la radiación y sobrepresión, para escenarios de

incendios y explosión, respectivamente. Además, se obtiene el alcance del accidente en un radio determinado.

Para la realización de las corridas en ALOHA se tuvo en cuenta las siguientes condiciones:

- Como el petróleo es una mezcla de compuestos químicos y teniendo en cuenta que ALOHA no es capaz de simular dichas mezclas se aplica el método del carbono equivalente y conociendo los límites de inflamabilidad de la sustancia se busca un hidrocarburo que se asemeje a esta sustancia siendo el n-nonano como el más adecuado a simular.
- Se emplearon los datos del comportamiento las variables meteorológicas establecidas por Moya (2010). En el anexo 12 se muestra el comportamiento de las variables.
- En el caso de los escenarios de 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).
- Para el caso de la formación de una nube de vapor explosiva o tóxica las corridas fueron realizadas para todas las direcciones del viento y en los cuatros momentos extremos: día a temperatura máxima y mínima y calma a temperatura máxima y mínima.
- En el caso del BLEVE se realiza una sola corrida por cada tanque, debido a que este fenómeno no depende de las condiciones climatológicas sino de la cantidad de material involucrado en una unidad de proceso y de la geometría de la fuente.

Las figuras 3.2 y 3.3 representan los escenarios que serán analizados en el área de estudio a partir de un derrame de petróleo crudo y a partir de una fuga de sulfuro de hidrógeno respectivamente.

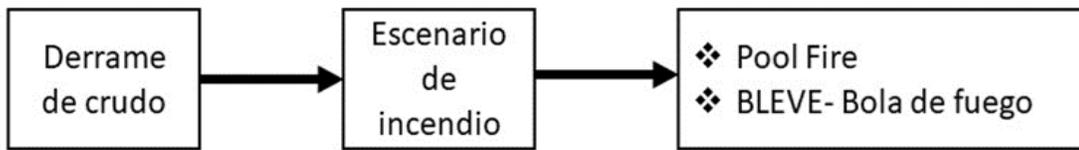


Figura 3.2: Posibles escenarios de accidentes a partir de un derrame de petróleo crudo.

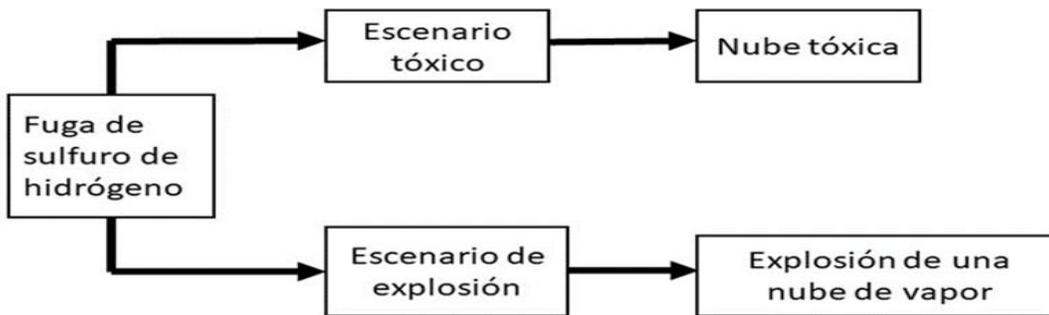


Figura 3.3: Posibles escenarios de accidentes a partir de una fuga de sulfuro de hidrógeno.

En las figuras anteriores se observan los posibles escenarios de accidentes que se pueden efectuar en dependencia de las sustancias que están presente, de las condiciones de operación y de las características tecnológicas de los equipos.

Para un mejor análisis de la Planta de Procesamiento de Crudos (PPC) se divide la misma en dos subáreas, teniendo en cuenta la cercanía entre los equipos. En la figura 3.4 se muestra esta división.

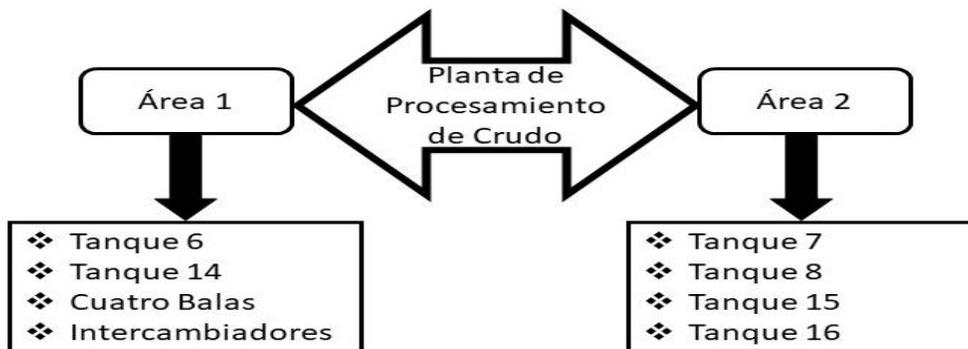


Figura 3.4: Áreas de la Planta de Procesamiento de Crudo

En el análisis de estas dos áreas en la que fue dividida la planta se identifican los equipos que constituyen unidades primarias potenciales; es decir, las unidades que presentan mayor peligro dentro de la industria en caso de ocurrir un evento en las mismas. Se seleccionaron los tanques 6 y 15 para el área 1 y 2 respectivamente, constituyendo los tanques más propensos a detonar accidentes. Además, se analiza la bala separadora 2 debido a su importancia dentro del proceso. En el anexo 13 se muestran los resultados obtenidos.

3.2.1.1 Análisis de la estimación del alcance del escenario charco de fuego

El charco de fuego se produce al ocurrir un derrame de petróleo crudo y encontrar cercana una fuente de ignición. En este epígrafe se muestran los resultados correspondientes a las corridas que simulan los escenarios charco de fuego, siendo estos los más propensos a ocurrir en una industria de petróleo debido a su frecuencia y al daño que pueden ocasionar sobre las personas e instalaciones.

En las figuras 3.5a y 3.5b se muestra el alcance que pueden tener las radiaciones del charco de fuego en el tanque 6 y el tanque 15 respectivamente, resultante de un posible accidente.

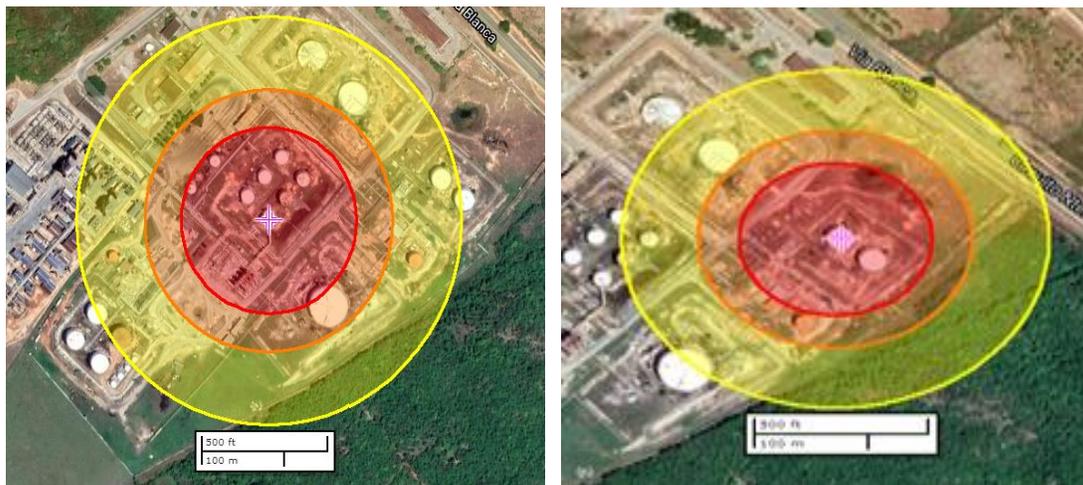


Figura 3.5a Alcance del escenario charco de fuego en el tanque 6. **Figura 3.5b Alcance del escenario charco de fuego en el tanque 15.**

En las figuras 3.5a y 3.5b se puede observar que el escenario charco de fuego podría alcanzar una gran distancia y afectar a las personas y equipos expuestos. En el caso del escenario en el tanque 6 se verían severamente afectadas las balsas

separadoras recibiendo radiaciones de 10 kW/m^2 debido a la cercanía entre ambos equipos, causando la muerte en un intervalo de 60 segundos de las personas que se encuentren expuestas a esa radiación, de igual modo se afecta el tanque 14 que recibe radiaciones de 5 kW/m^2 produciendo quemaduras de segundo grado a las personas circundantes. Además, se afecta gran parte de la empresa debido a que hasta 233 metros las radiaciones alcanzadas son mayores a 2 kW/m^2 provocando dolor en menos de un minuto. Por otro lado, en el tanque 15 la zona de amenaza roja se alcanza hasta una distancia de 90 metros representando la misma el área de mayor peligro para la muerte, la zona naranja se obtiene hasta 126 ocasionando quemaduras, mientras que la amarilla se logra hasta 193 metros causando dolor a las personas en 60 segundos.

Las figuras 3.6a y 3.6b muestran la relación entre las distancias, el vector intensidad de la radiación y la probabilidad de daño establecidos por Lees (2012).

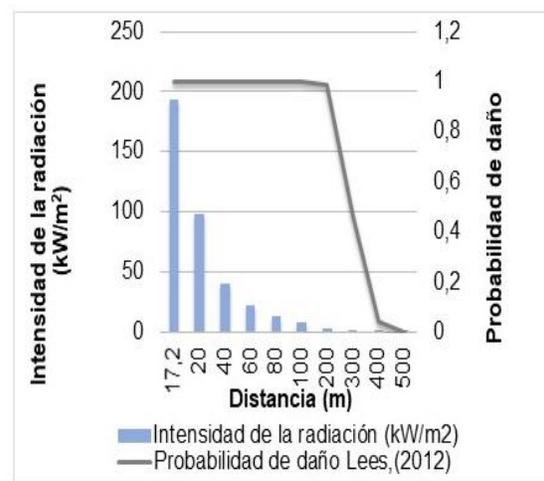
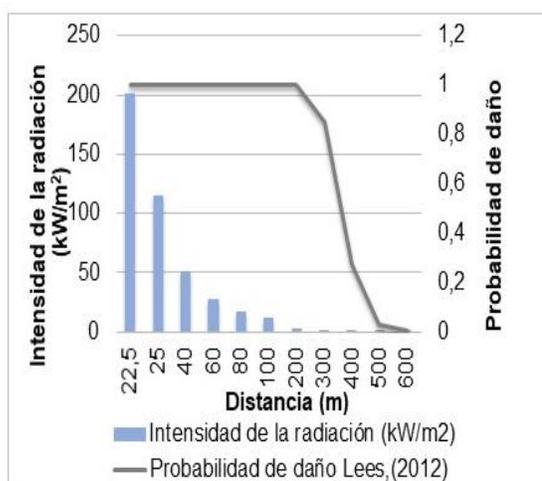


Figura 3.6a Distancia vs Intensidad de la radiación vs Probabilidad de daño en el tanque 6.

Figura 3.6b Distancia vs Intensidad de la radiación vs Probabilidad de daño en el tanque 15.

Los gráficos anteriores muestran el comportamiento que presenta la intensidad de radiación con respecto a la distancia donde se observa que los valores de intensidad van disminuyendo a medida que aumenta la distancia, lo que coincide con los resultados obtenidos por Behesht *et al.* (2018); Hosseinnia *et al.* (2018) y Khakzad, Landucci y Reniers (2017). Se observa además que existe 100% de

probabilidad de daño hasta una distancia de 200 metros en ambos tanques, lo cual significa según Lees (2012) que todas las personas que se encuentran a estos niveles de radiación serían seriamente afectadas por muerte, quemaduras y dolor en menos de 60 segundos.

El escenario de charco de fuego en ambos tanques presenta resultados similares, ya que puede afectar a varios equipos cercanos y a las personas expuestas en esa área.

3.2.1.2 Análisis de la estimación del alcance del escenario BLEVE más bola de fuego

El BLEVE se puede originar como accidente secundario a partir de un charco de fuego; como se trata con sustancias combustibles en este caso petróleo crudo el BLEVE forma como consecuencia una bola de fuego con altos niveles de radiación.

En las figuras 3.7a y 3.7b se muestra el alcance de las radiaciones de la bola de fuego para los tanques 6 y 15 respectivamente. Además se elaboran las figuras 3.8a y 3.8b que muestran la relación entre las distancias, el vector intensidad de la radiación y la probabilidad de daño establecidos por Lees (2012).

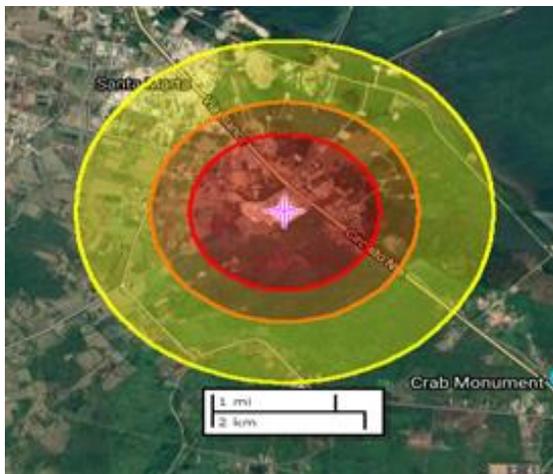


Figura 3.7a Alcance del escenario BLEVE en el tanque 6.

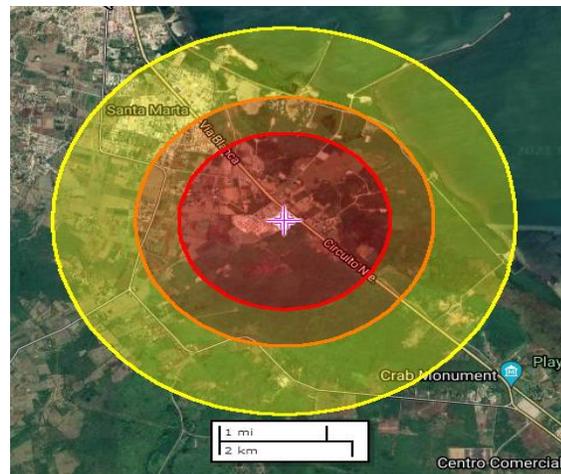


Figura 3.7b Alcance del escenario BLEVE en el tanque 15.

Los efectos de las bolas de fuego son devastadores según se observa en las figuras, el accidente es capaz de afectar a toda la empresa y a una gran parte del

municipio de Cárdenas y alrededores, provocando en caso del tanque 6 la muerte de todo ser que se encuentre dentro de la radiación superior a 10 kW/ m^2 que se alcanza para una distancia de hasta 1,2 kilómetros, además a 1,8 km provoca quemaduras de segundo grado en un intervalo de 60 segundos, mientras que hasta 2,7 km el dolor en las personas será significativo. En el caso del tanque 15 la radiación superior a 10 kW/ m^2 llega hasta una distancia de 1,6 kilómetros, mientras que la superior a 5 se alcanza hasta los 2,2 kilómetros y superior a 2 kW/ m^2 a los 3,5 kilómetros ocasionando respectivamente la muerte, quemaduras y dolor a las personas.

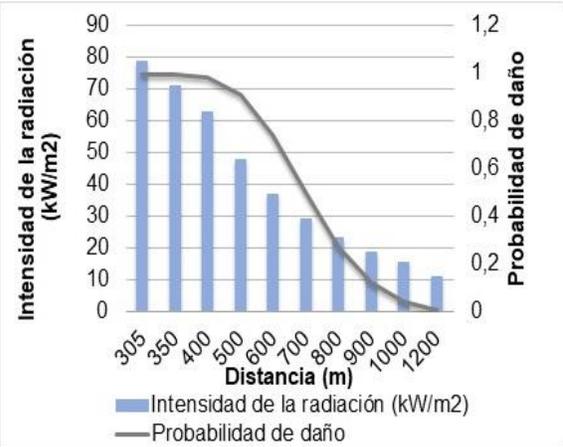


Figura 3.8a Distancia vs Intensidad de la radiación vs Probabilidad de daño en el tanque 6.

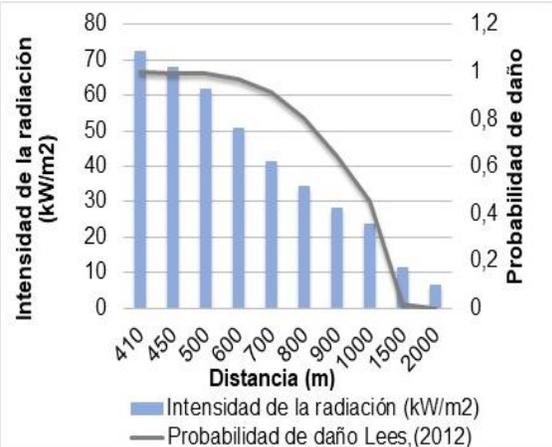


Figura 3.8b Distancia vs Intensidad de la radiación vs Probabilidad de daño en el tanque 15.

En la figura 3.8a se aprecia que la probabilidad de daño es de aproximadamente 100% hasta distancias de 400 metros desde el origen del accidente y hasta una distancia de 500 metros existe un 80% de probabilidad de daño que es una probabilidad alta según Reniers y Cozzani (2013). En el caso de la figura 3.8b se logran valores cercanos al 100% de probabilidad a los 600 metros, mientras que el 80% se obtiene hasta 800 metros de distancia.

El escenario de BLEVE más bola de fuego, a pesar de su poca duración es el que provoca daños mayores ya que su alcance logra sobrepasar toda el área de EPEP- Centro y zonas cercanas.

3.2.1.3 Análisis de la estimación del alcance del escenario explosión de una nube de vapor

Las explosiones de nubes de vapor (VCE) son un peligro importante en la industria o plantas donde se almacenan grandes cantidades de materiales inflamables (Casal *et al.*, 2002).

Se estudia el comportamiento del alcance de la nube de vapor explosiva de las simulaciones realizadas en los tanques 6 y 15 así como en la bala separadora 2 para lo que se confeccionan las figuras 3.9a, 3.9b y 3.9c y además se elaboran las figuras 3.10a, 3.10b y 3.10c que muestran la relación entre las distancias, el vector intensidad de la radiación y la probabilidad de daño establecidos por Lees (2012).

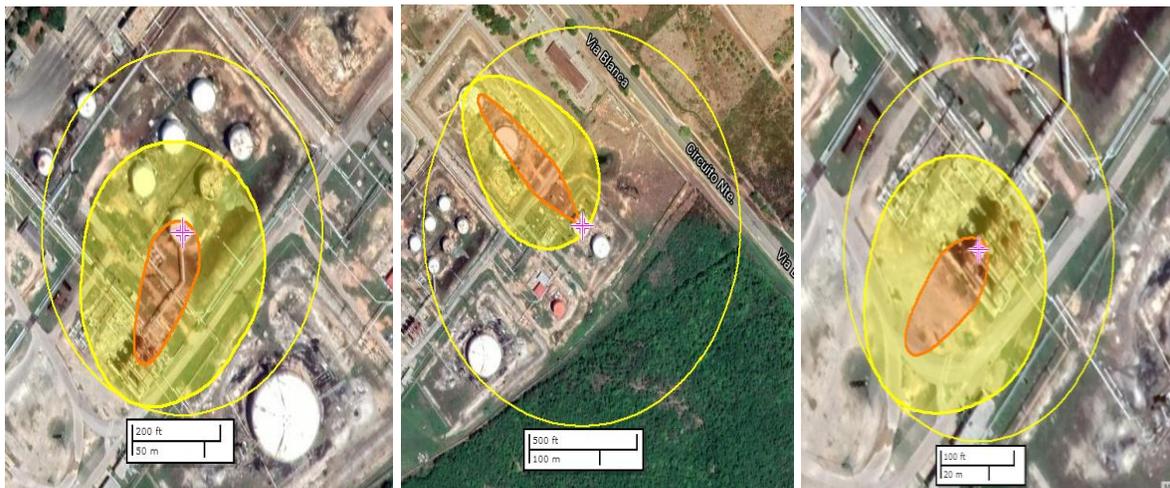


Figura 3.9a Alcance del escenario VCE en el tanque 6. **Figura 3.9b Alcance del escenario VCE en el tanque 15.** **Figura 3.9c Alcance del escenario VCE en la bala 2.**

Las figuras anteriores de forma general muestran los efectos de la nube de vapor explosiva sobre algunos equipos de la planta. En ambos tanques se alcanza una sobrepresión de 6,37 psi a distancias de 72 y 200 metros respectivamente y para el caso de la bala separadora una sobrepresión de 6,36 psi a 38 metros, siendo elevados estos valores de sobrepresión, lo que conlleva a la ruptura total de equipos como tanques de almacenamiento y otros según McGrattan *et al.* (2013).

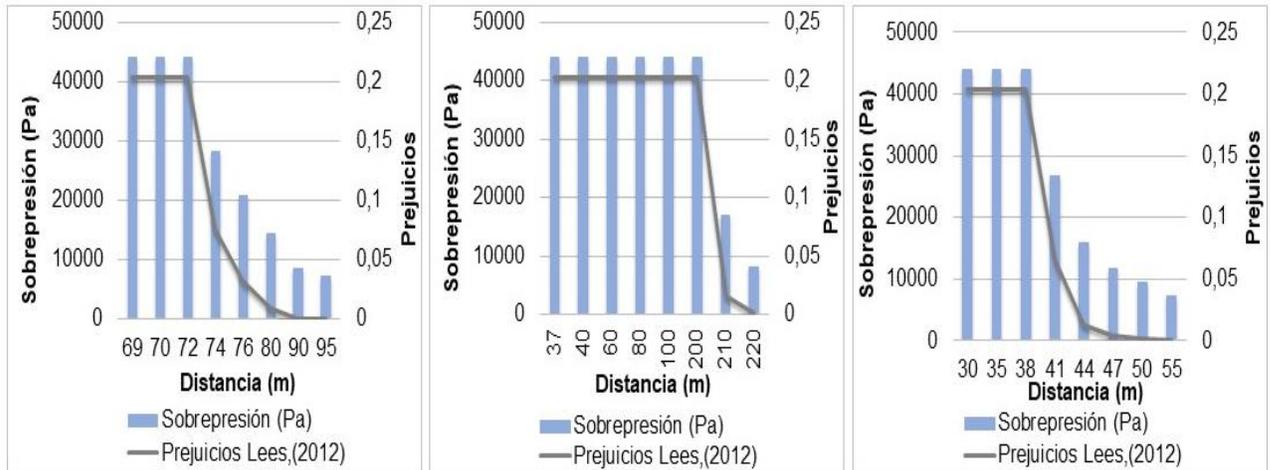


Figura 3.10a Distancia vs Sobrepresión vs Prejuicios en el tanque 6.

Figura 3.10b Distancia vs Sobrepresión vs Prejuicios en el tanque 15.

Figura 3.10c Distancia vs Sobrepresión vs Prejuicios en la bala 2.

En los gráficos anteriores se evidencia la disminución de la sobrepresión con el aumento de la distancia lo que coincide con los resultados obtenidos por Behesht *et al.* (2018) y Márquez (2016). Además, el valor máximo de prejuicios es de 0,2 en los tres casos.

El escenario nube de vapor explosiva (VCE) tiene un mayor alcance en el tanque 15 que, en el resto de las unidades analizadas, esto puede deberse a que presenta una mayor capacidad de almacenamiento. Estos resultados concuerdan con los obtenidos por Djelosevic y Tepic (2019).

3.2.1.4 Análisis de la estimación del alcance del escenario nube tóxica

La nube tóxica se forma a partir de la dispersión de un producto tóxico. Este es uno de los accidentes de gran magnitud que pueden tener lugar en la industria, de ahí que se analizó este fenómeno en las unidades que contienen sulfuro de hidrógeno por el peligro que representa para la vida y el medio ambiente.

Las figuras 3.11a, 3.11b, 3.11c ilustran el gran alcance que puede tener la ocurrencia de una nube tóxica en los tanques 6 y 15 y en la bala separadora 2.



Figura 3.11a: Alcance del escenario nube tóxica en el tanque 6. **Figura 3.11b:** Alcance del escenario nube tóxica en el tanque 15. **Figura 3.11c:** Alcance del escenario nube tóxica en la bala 2.

Como se observa en las figuras anteriores este escenario puede tener un gran alcance en cualquiera de los equipos analizados cubriendo toda la empresa y poblados de la ciudad de Cárdenas. Para el caso de los tanques 6 y 15 la franja de peligro roja afecta hasta 1,4 y 1,6 kilómetros respectivamente para una concentración de 50 ppm amenazando la vida de los pobladores, la naranja a una distancia de 1,8 y 2 kilómetros en cada uno de igual forma puede provocar efectos severos en las personas afectando con una concentración de 27 ppm mientras que la franja amarilla a una distancia de 8,7 y 7,6 kilómetros aún puede provocar molestias notables. En la bala separadora 2 se alcanza el área de mayor peligro (franja roja) hasta los 753 metros, la naranja a los 953 metros y la amarilla con un alcance 3.8 kilómetros.

Las figuras 3.12a, 3.12b y 3.12c corresponden a la relación entre la concentración, la distancia y los daños sobre las personas que puede ocasionar este escenario. Estos gráficos muestran un comportamiento similar, los tres confirman que a medida que aumenta la distancia disminuye la concentración y la probabilidad de daño, coincidiendo con Behesht *et al.* (2018) y Gai *et al.* (2017). La probabilidad de daño en los tanques 6, 15 y la bala 2 es de 100 % hasta una distancia de 150, 200 y 60 metros respectivamente.

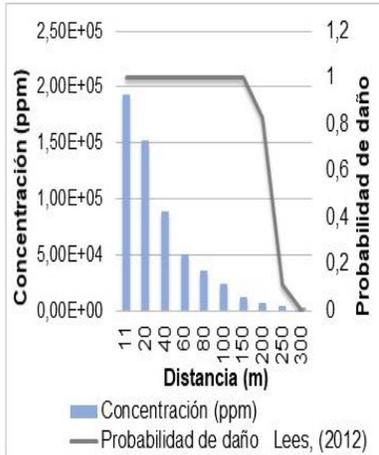


Figura 3.12a: Distancia vs Concentración vs Probabilidad de daño en el tanque 6.

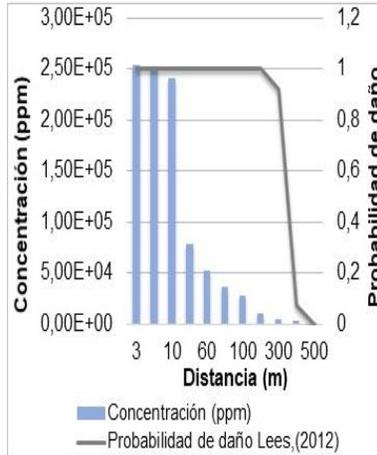


Figura 3.12b: Distancia vs Concentración vs Probabilidad de daño en el tanque 15.

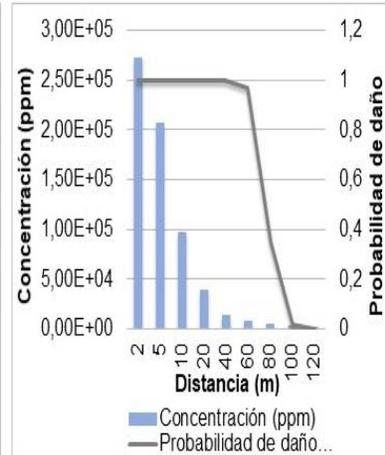


Figura 3.12c: Distancia vs Concentración vs Probabilidad de daño en la bala 2.

Después de analizar todos los escenarios objetos de la investigación se puede afirmar que los tanques seleccionados son los más peligrosos basado en los valores resultantes de radiación, sobrepresión y concentración. Si se comparan los tanques 6 y 15 y la bala 2 se puede observar que el alcance del tanque 15 es superior a los demás y esto se debe a que precisamente este tanque es el que tiene una mayor capacidad de almacenamiento.

Después de analizar los resultados obtenidos anteriormente se puede afirmar que el escenario BLEVE+ Bola de fuego a pesar de su corta duración es el que provoca mayores daños ya que el alcance de sus radiaciones logra envolver a toda la empresa y se extienden hacia las poblaciones aledañas y cuando esto ocurre se está en presencia de un accidente mayor según HSE (2018). El escenario nube tóxica de igual manera provoca daños severos afectando no solo a la empresa sino también a la ciudad de Cárdenas pues el nivel de radiación amarilla puede afectar hasta 7.6 kilómetros.

3.2.2 Determinación de la frecuencia inicial de los accidentes

La frecuencia inicial de los accidentes se determina a través del análisis histórico de accidentes que recoge los sucesos ocurridos en los últimos diez años. Para ello

se efectúa una clasificación de los accidentes en derrames para el caso del petróleo crudo y fugas para el sulfuro de hidrógeno, teniendo en cuenta la sustancia con la que opera cada unidad. En la tabla 3.2 se muestra un resumen de los resultados obtenidos de la revisión del registro.

Tabla 3.2 Resultados del análisis histórico en la EPEP-Centro.

Unidades de proceso	Sustancias almacenadas	Cantidad de derrames o fugas	Frecuencia inicial (año ⁻¹)
Tanque 6	Crudo	5	0,5
	Sulfuro de hidrógeno	2	0,2
Tanque 7	Crudo	2	0,2
Tanque 8	Crudo	3	0,3
	Sulfuro de hidrógeno	1	0,1
Tanque 14	Crudo	4	0,4
Tanque 15	Crudo	4	0,4
	Sulfuro de hidrógeno	1	0,1
Tanque 16	Crudo	1	0,1
	Sulfuro de hidrógeno	0	0
Balas 1, 3 y 4	Crudo	3	0,3
	Sulfuro de hidrógeno	0	0
Bala 2	Crudo	5	0,5
	Sulfuro de hidrógeno	1	0

En la tabla 3.2 se observa que la mayor cantidad de derrames ocurrió en el tanque 6, esto significa que en un período de diez años han ocurrido cinco derrames lo que da un valor de frecuencia de 0,5 y con respecto a las fugas en este tanque se encuentra el valor más alto, pues en dos ocasiones se ha liberado a la atmósfera esta sustancia, dando una frecuencia total de 0,7. Le siguen la bala 2 y el tanque 15 con una frecuencia total de 0,6 y 0,5 respectivamente. El menor valor de frecuencia corresponde al tanque 16 con una frecuencia de 0,1. Acorde a lo

reportado por Wells (2003), BEVI (2009), Reniers y Cozzani (2013) estos valores son considerados altos.

Con estos valores de frecuencia inicial se confecciona el árbol de eventos. El árbol adopta una forma diferente en dependencia de la sustancia y las características del equipo que se analiza. En el anexo 14 se muestran los árboles de eventos desarrollados.

La probabilidad de ignición directa se determina según Changlon *et al.* (2012), que plantea que si existe una fuente de ignición segura producto de estos eventos (incendios en las áreas verdes y fallos eléctricos) y que el control del proceso es bueno, la probabilidad de ignición directa se reduce a 0,25. Por otra parte la probabilidad de ignición retardada según BEVI (2009) se determina como todo lo que no fue probabilidad directa es decir la diferencia entre el máximo de probabilidad (1) y el valor de esta ignición, de ahí que sea igual a 0,75. Para la probabilidad de explosión se toma un valor de 0,4 según BEVI (2009) y Wells (2003) y la restante es 0,6 si se tiene en cuenta que cada rama del árbol suma 1.

A partir de los valores obtenidos en el árbol de eventos se cuantifica entonces la probabilidad del suceso inicial del charco de fuego y explosión de una nube de vapor con carácter frecuencial, pues se parte de la frecuencia inicial del derrame o fuga obtenida en el análisis histórico. Estos resultados son los que permiten la elaboración de las redes Bayesianas pues marcan el comienzo de la misma. La frecuencia inicial para posibles escenarios de incendio y explosión se muestran en los anexos 15 y 16 respectivamente.

3.2.3 Cuantificación de la probabilidad de escalado de los accidentes

La probabilidad de escalado no es más que la probabilidad de que un escenario de accidente primario provoque otros escenarios denominados accidentes secundarios. Para determinar la probabilidad de escaldado de los accidentes es necesario conocer la distancia entre cada una de las unidades de proceso dentro de la planta y los accidentes que ocurren en ella. Estos valores junto a otros datos se introducen en el *software* ALOHA, con el objetivo de determinar los vectores de

escalado: radiación y sobrepresión para cada escenario y mediante el programa Matlab se cuantifica dicha probabilidad.

Los anexos 17, 18 y 19 muestran las distancias entre las unidades de proceso, los diferentes valores de intensidad de la radiación y sobrepresión obtenidos para cada equipo, así como los resultados de probabilidad de escalado.

En la subárea 1 los mayores valores de intensidad de la radiación corresponden al tanque 6 con respecto a las cuatro balas separadoras y a los intercambiadores de calor, alcanzando 22; 20; 16 y 15 kW/m² para las balas 1, 2, 3 y 4 respectivamente y 15 kW/m² para los intercambiadores. Esto se debe principalmente a la proximidad que presentan entre ellos.

En la subárea 2 los mayores valores son emitidos por el tanque 15 con respecto al 16 y viceversa, obteniendo valores de intensidad de 45 y 50 kW/m² respectivamente, debido a que son tanques ubicados muy próximos unos del otro. Lo mismo sucede con los tanques 7 y 8 con resultados de 14 y 16 kW/m², tanques que también se encuentran muy cercanos con solo 69 metros de separación.

Como es de suponerse, los tanques que presentan mayores valores de intensidad de radiación son los que presentan, por tanto, mayores valores de probabilidad de escalado dentro de las diferentes subáreas.

Sin embargo, los mayores valores de probabilidad para el caso del área 1 no corresponden con los resultados obtenidos con los vectores de escalado para los incendios. El tanque 6 con respecto al 14 posee la máxima probabilidad lo que se debe a que este último equipo es el que presenta la mayor capacidad de almacenamiento con un volumen de 20 000 m³.

En la subárea 2 la mayoría de los tanques presentan resultados semejantes, específicamente los tanques 7 y 8 que tienen un volumen de 10 000 m³ cada uno y los tanques 15 y 16 con 5000 m³ siendo los resultados de probabilidad de estos los más elevados y en correspondencia con los valores de los vectores de escalado obtenidos.

Con respecto al vector sobrepresión los resultados en las dos áreas son semejantes, debido a que presentan distancias similares unos de otros, donde la máxima sobrepresión en ambas oscila entre 6,36 psi (43850,65 Pa) y 6,37 psi (43919,60 Pa).

En las figuras 3.13a y 3.13b se muestra el escalado, a partir de los valores de intensidad de la radiación en función de la distancia que se igualan a los umbrales establecidos por Reniers y Cozzani (2013), las subáreas 1 y 2 respectivamente.

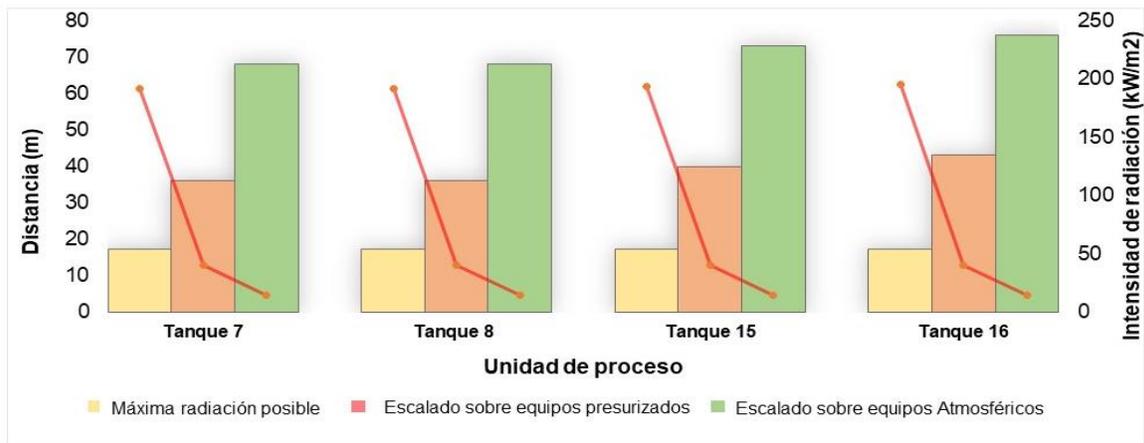


Figura 3.13a Unidad de proceso vs Distancia vs Intensidad de la radiación en la subárea 1.

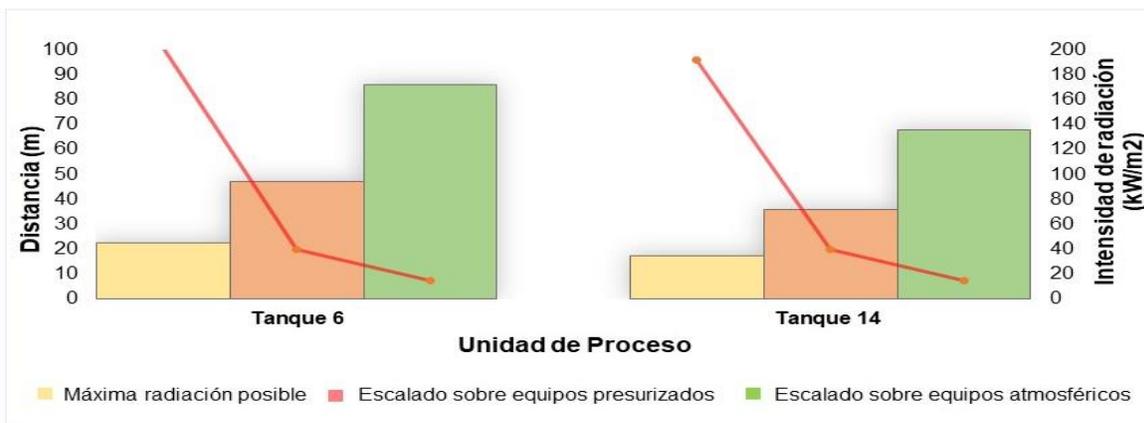


Figura 3.13b Unidad de proceso vs Distancia vs Intensidad de la radiación en la subárea 2.

En la figura 3.13a se observa que en la subárea 1 el tanque 6 presenta un mayor escalado, donde para una distancia de 22,5 metros se alcanza la máxima intensidad de radiación posible de 201 kW/m² y por otra parte se produce sobre

los equipos presurizados a distancias de 47 metros con una intensidad de 40 kW/m² y en el caso de los equipos atmosféricos el escalado se produce a distancias de 86 metros con una intensidad de 15 kW/m². En el caso de la figura 3.13b que representa la subárea 2, el máximo de intensidad se alcanza en el tanque 16 con un valor de 195 kW/m² alcanzado a una distancia de 17,2 metros. Además, el escalado de los equipos presurizados se origina a una distancia de 43 metros y en atmosféricos a los 76 metros con valores de intensidad de la radiación de 40 kW/m² y 15 kW/m² respectivamente. Estos resultados coinciden con los valores obtenidos en el cálculo de la probabilidad de escalado.

El comportamiento de la distancia contra la sobrepresión por unidad de proceso en las subáreas 1 y 2 se muestra en las figuras 3.14a y 3.14b respectivamente.

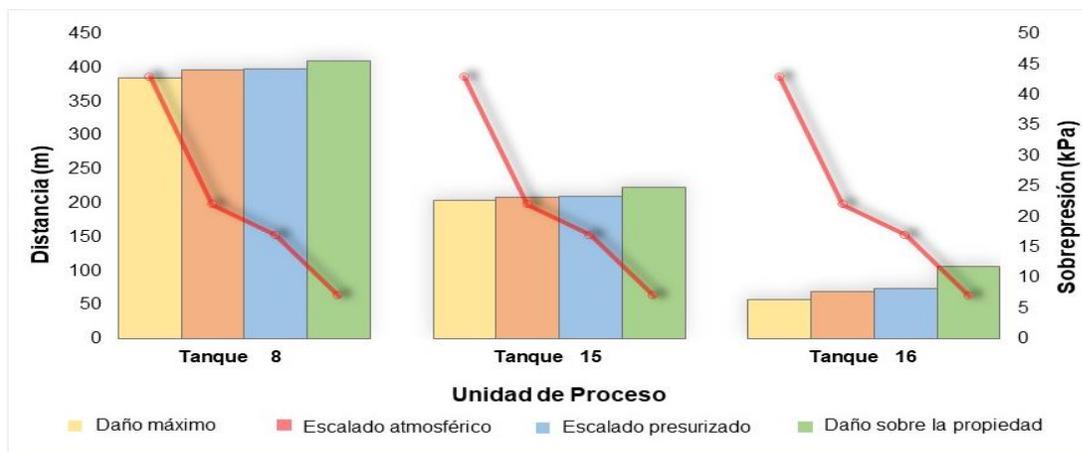


Figura 3.14a Unidad de proceso vs Distancia vs Sobrepresión en el área 1.

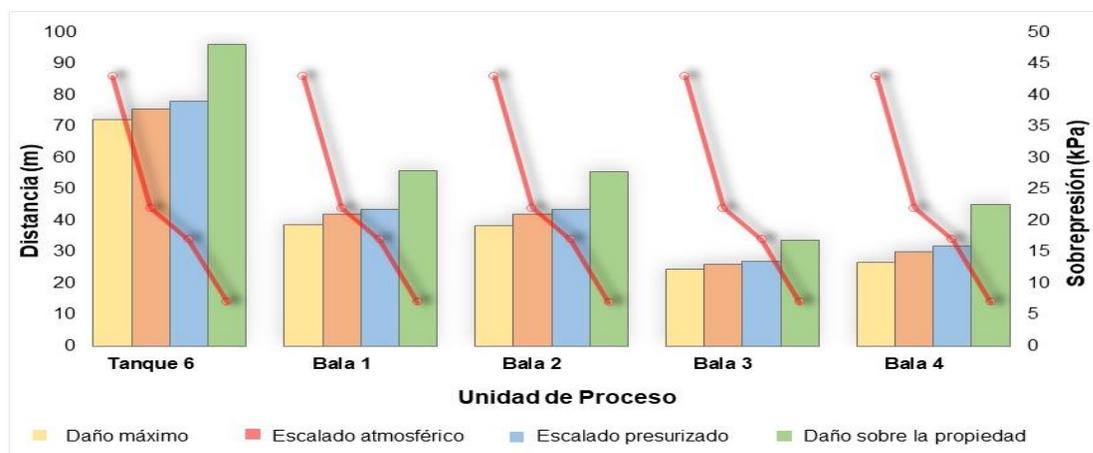


Figura 3.14b Unidad de proceso vs Distancia vs Sobrepresión en el área 2.

En la figura 3.14a se aprecia que en el tanque 6 el vector sobrepresión alcanza grandes longitudes siendo capaz de sobrepasar los umbrales establecidos. Se alcanza una posibilidad de daño máximo a los 72 metros, el escalado sobre equipos atmosféricos a los 75 metros y sobre los equipos presurizados a los 77 metros y daños sobre la propiedad a los 96 metros con valores de sobrepresión de 6,37 psi (43 kPa); 3,19 psi (22 kPa); 2,47 psi (17 kPa) y 1,02 psi (7 kPa) respectivamente, siendo dentro del área 1 el equipo más peligroso una vez que se produzca una explosión. Las balas 1 y 2 tienen un comportamiento similar entre sí, obteniendo valores de distancias de 38, 41, 43 y 45 metros para los mismos valores de sobrepresión y por su parte las balas 3 y 4 también presentan valores semejantes entre sí, representando un elevado nivel de riesgo entre ellas, debido a la pequeña distancia que las separa.

La figura 3.14b muestra que el comportamiento del vector de escalado en el tanque 8 presenta valores superiores en todos los casos siendo estos de 384; 396; 387 y 409 metros respectivamente, valores que representan la posibilidad de daño máximo, el escalado en los equipos presurizados y atmosféricos y el daño sobre la propiedad. El tanque 15 existe un comportamiento similar alcanzando grandes distancias de 203, 208, 209 y 224 metros para iguales valores de sobrepresión y en el caso del tanque 16 es el que presenta los menores valores de distancia, el máximo daño se produce a una distancia de 58 metros para un valor de 6,36 psi (43 kPa), el escalado sobre los equipos atmosféricos se efectúa a los 69 metros, y sobre los presurizados se produce a los 73 y el daño a la propiedad se realiza a 107 metros.

3.3 Resultados referidos al riesgo individual debido al carácter continuado de accidentes tóxicos, de incendio y explosión (Etapa 5)

El riesgo individual es la frecuencia esperada del daño de referencia que se produce como consecuencia de cualquier escenario de accidente considerado en el análisis, a una persona que está permanentemente presente (24 h por día por año) en un punto determinado del área considerada, sin protección y no hay posibilidad de ser refugiado o evacuado (Denat, 2017).

El riesgo individual correspondiente a cada escenario dominó se determina mediante la metodología propuesta en el epígrafe 2.5.5. Para la selección de los escenarios se tiene en cuenta los accidentes que pueden ocurrir en cada unidad de proceso a partir de la cadena de eventos descrita por la red Bayesiana 6, específicamente incendios en el tanque 15 y explosiones en el resto de los equipos que almacenan sulfuro de hidrógeno. Este análisis permite determinar el riesgo individual para cada caso por separado y además posibilita su cuantificación mediante la combinación de todos los accidentes posibles. En el anexo 20 se muestran los resultados obtenidos.

El riesgo individual, por lo general, se expresa en forma de curvas de isorriesgos (Renjith y Madhu, 2010) y se puede estimar para el individuo más expuesto, para grupos de individuos en lugares específicos o para un individuo promedio en una zona de efecto (AIChE / CCPS, 2000). Las figuras 3.15, 3.16, 3.17 y 3.18 muestra los efectos que provocan en las personas la radiación, la toxicidad y la sobrepresión, así como su combinación.

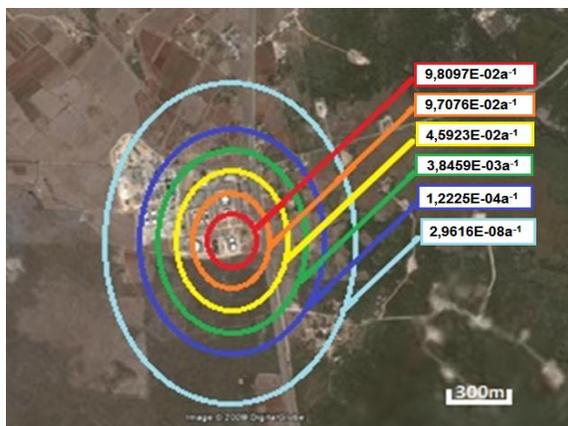


Figura 3.15 Mapa de isorriesgo por radiación

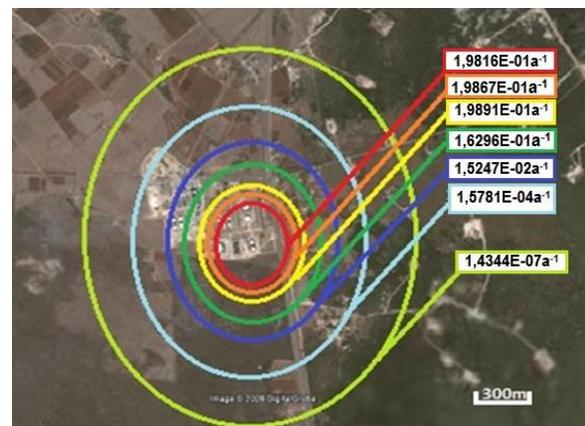


Figura 3.16 Mapa de isorriesgo por toxicidad

En la figura 3.15 se observa el elevado nivel de riesgo existente para las personas, pues los efectos de la radiación a distancias comprendidas entre 150 y 200 metros puede producir hasta 10 fatalidades en un período de 100 años aproximadamente. Por su parte en la figura 3.16 se observan resultados igual de preocupantes pues el nivel de riesgo hasta un radio de 400 metros es de $1,4344 \cdot 10^{-7} a^{-1}$, esto significa que en tan solo 10 años pueden existir dos muertes producto al carácter

continuado de escenarios tóxicos, a medida que aumenta la distancia disminuye el riesgo y por ende las posibles fatalidades. Estos valores de riesgos son considerados elevados según Reniers y Cozzani (2013) y Wells (2003), por lo que no deben descuidarse las medidas de seguridad industrial.

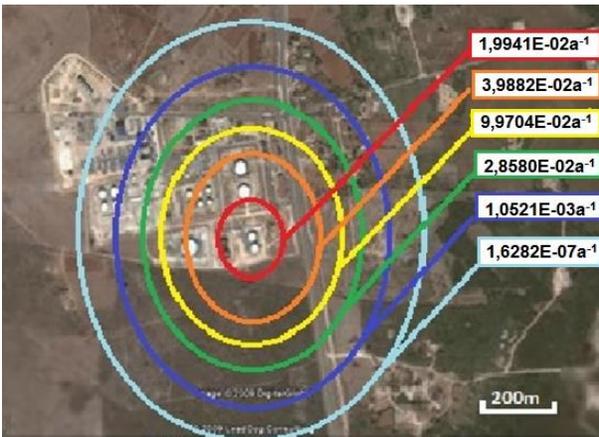


Figura 3.17 Mapa de isorriesgo por sobrepresión

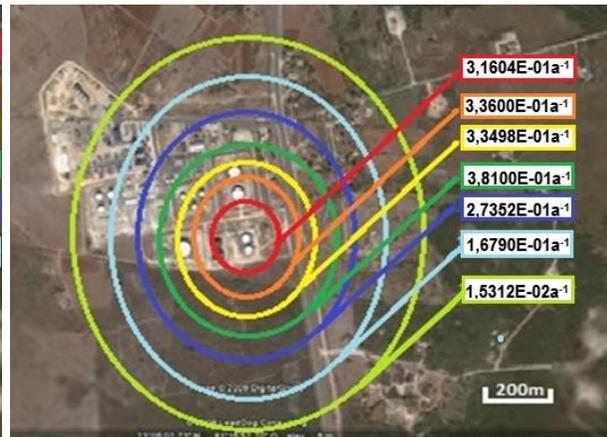


Figura 3.18: Mapa de isorriesgo combinado

En la figura 3.17 se observa que a distancias de 100, 200 y 250 metros el carácter continuado de los accidentes de explosión, puede provocar dos, cuatro y diez muertes respectivamente, a las personas expuestas en 100 años, existiendo aquí una contradicción en la relación inversamente proporcional existente entre el nivel de riesgo y la distancia considerada, lo que se debe a que a estos radios de acción aumenta el número de equipos cuyo vector de escalado es significativo en el valor de vulnerabilidad, conllevando a un aumento de este factor y por ende a un aumento del riesgo individual; sin embargo a distancias de 300, 400 y 500 metros el riesgo desciende. En la figura 3.18 se observa un comportamiento similar considerando las consecuencias combinadas de todos los accidentes, a distancias de hasta 200 metros pueden producirse tres muertes, mientras que a 250 se ocasionarán aproximadamente cuatro en un período de solo 10 años. Estos valores disminuyen con el aumento de la distancia y según Reniers y Cozzani (2013) y Wells (2003) son considerados elevados.

Los accidentes producidos a partir del tanque 15 representan un nivel de riesgo elevado para las personas dentro de la planta, esta unidad primaria es la que

mayores afectaciones producirá como iniciadora de la cadena de eventos dominó debido a que almacena crudo y sulfuro de hidrógeno que son sustancias de elevada inflamabilidad, y además esta unidad presenta una elevada frecuencia de derrame, siendo muy probable el desarrollo de accidente dominó a partir de la misma.

3.4 Resultados y análisis de las redes Bayesianas desarrolladas (Etapa 6)

Las redes Bayesianas se aplican para mostrar el orden secuencial de escenarios, con la finalidad de cuantificar el valor de la probabilidad conjunta del efecto dominó. Para ello, se emplea el *software* Hugin, siendo confeccionadas un total de diez redes con el objetivo de abarcar todas las unidades de proceso del área y todos los posibles vectores de escalado según el tipo de escenario. Los resultados de las redes Bayesianas elaboradas se muestran en los anexos 21 y 22.

Las unidades secundarias, terciarias y cuaternarias se toman teniendo en cuenta los valores umbrales de cada vector de escalado y esto, a su vez, depende de la distancia entre los tanques.

En la figura 3.19 se muestra la forma adoptada por la red Bayesiana 6.

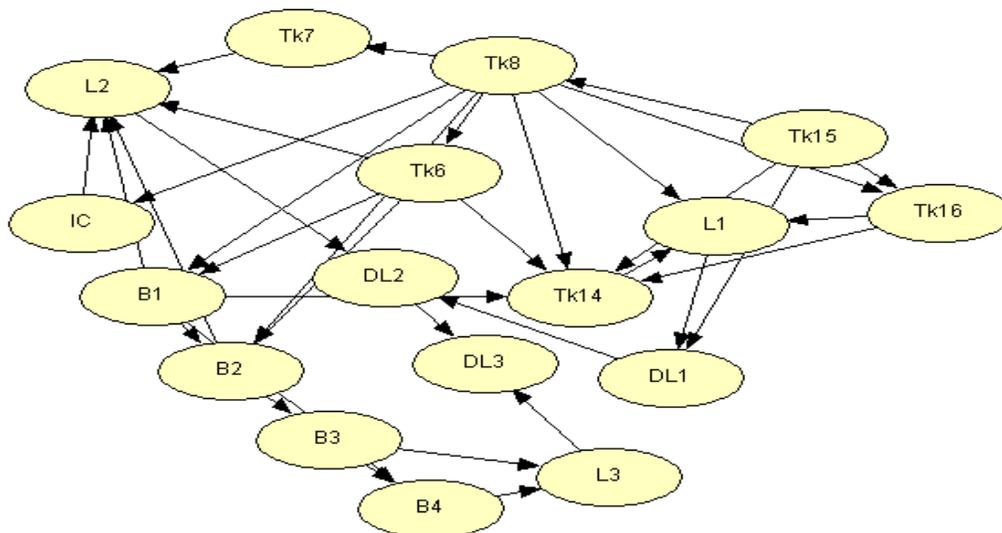


Figura 3.19 Estructura adoptada por la red Bayesiana 6.

La red Bayesiana 6 presenta los mayores valores de probabilidad de efecto dominó de todas las confeccionadas. En esta red el tanque 15 es la unidad primaria, se establecen como unidades secundarias los tanques 16, 8 y 14, como terciarias, los tanques 6 y 7, las balas 1 y 2 y los intercambiadores y como cuaternarias las balas 3 y 4.

La estructura de las redes Bayesianas elaboradas se muestra en la tabla 3.3.

Tabla 3.3: Estructura de las redes Bayesianas elaboradas.

Red	Unidad primaria	Unidades secundarias	Unidades terciarias	Unidades cuaternarias	Probabilidades de escalado consideradas
1	Tk6	Tk8 ,Tk14, IC , B1, B2, B3 y B4	Tk7 y Tk15	Tk16	Radiación (Todos) Sobrepresión (B1, B2, B3, B4)
2		Tk8, Tk14, IC, B1, B2, B3 y B4	Tk7, Tk15 y Tk16		Radiación (Tk6) Sobrepresión (Todos)
3		Tk8, Tk14, B1 y B2	Tk7, Tk15, Tk16, B3, IC	B4	Sobrepresión (Todos) Radiación (Tk7 y Tk14)
4		Tk8,Tk14, B1 y B2	Tk7,Tk15 y B3	Tk16 y B4	Sobrepresión (Tk6 y B1, B2, B3, B4) Radiación (Todos)
5	Tk15	Tk8, Tk14 y Tk16	Tk6 y Tk7	B1, B2, B3, B4 y IC	Radiación(Todos) Sobrepresión (B1, B2, B3, B4)
6		Tk8,Tk14 y Tk16	Tk6 y Tk7, IC, B1 y B2	B3 y B4	Radiación (Tk15) Sobrepresión (Todos)
7		Tk6,Tk7, Tk8,Tk14 y Tk16	IC, B1 y B2	B3 y B4	Sobrepresión (Todos) Radiación (Tk7 y Tk14)
8		Tk6,Tk7,Tk8,	IC, B1 y	B3 y B4	Sobrepresión (Tk15,

		Tk14 y Tk16	B2		B1,B2,B3 y B4) Radiación (Todos)
9	B2	Tk6,Tk14, B1,B3 y B4	Tk8	IC,Tk7,Tk15 y Tk16	Radiación (Tk7 y Tk14) Sobrepresión (Todos)
10		Tk6,Tk14, B1,B3 y B4	IC y Tk8	Tk7,Tk15 y Tk16	Sobrepresión (B2) Radiación (Todos)

Donde: Tk; IC y B son las abreviaturas de tanque, intercambiador de calor y bala respectivamente.

En las figuras 3.20 y 3.21 se muestran los resultados de probabilidad de ocurrencia de los accidentes para la red 1 a partir de la simulación en el *software* Hugin.

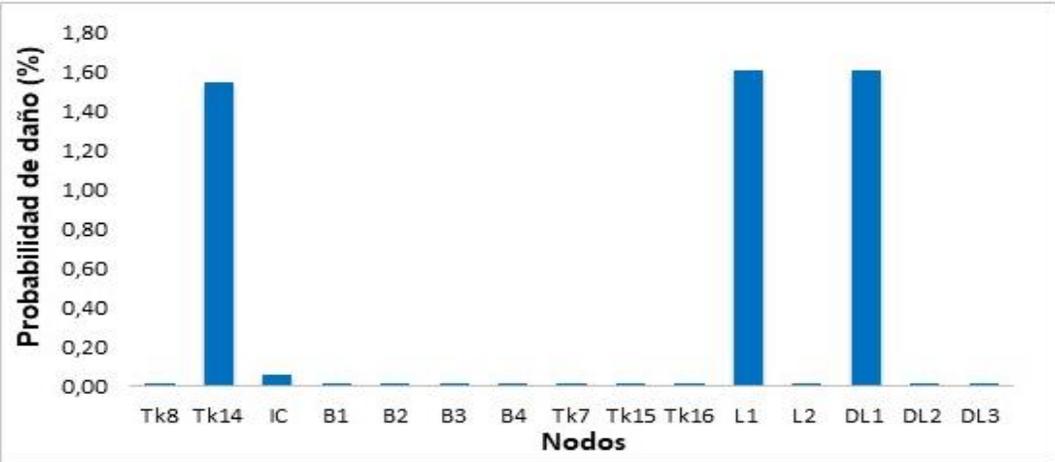


Figura 3.20 Nodos vs Probabilidad de accidente para red 1.

En la figura 3.20 se observa que para la primera red la probabilidad de accidente de las unidades secundarias no sobrepasa el 1,54% en ninguno de los casos. Este valor de probabilidad es considerado alto con respecto a lo reportado por Cai *et al.* (2018); Simon *et al.* (2019) y Yazdi (2019). La volatilidad e inflamabilidad elevadas del petróleo y el sulfuro de hidrógeno, hacen que, el escalado del accidente primario pueda producirse a través de dos vectores de escalado: radiación por charco de fuego y sobrepresión por explosión de una nube de vapor.

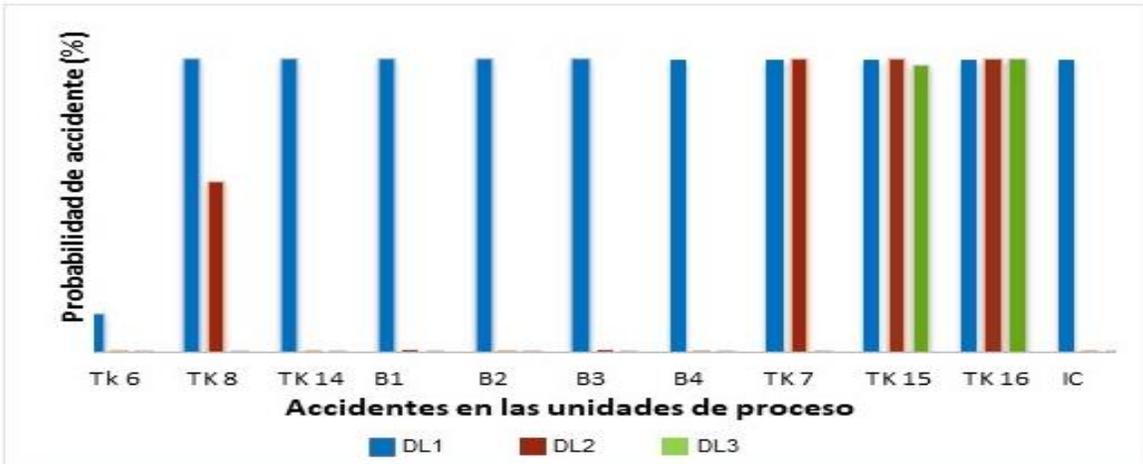


Figura 3.21 Accidentes en las unidades de proceso vs Probabilidad de accidente para red 1.

En caso de ocurrir un accidente en los tanques que corresponden a las unidades secundarias (figura 3.21), la probabilidad del efecto dominó del primer nivel aumenta considerablemente, ya que, en esta red, se parte de un accidente en la unidad primaria tanque 6. Esto confirma la idea de que el escalado a partir de un escenario en la unidad primaria tiene altas probabilidades de producirse.

En las figuras 3.22 y 3.23 muestran los resultados de probabilidad de ocurrencia de los accidentes a partir de la simulación de la red Bayesiana en el *software* Hugin y la posibilidad de ocurrir un accidente en cualquier unidad de proceso de la red para la red 3.

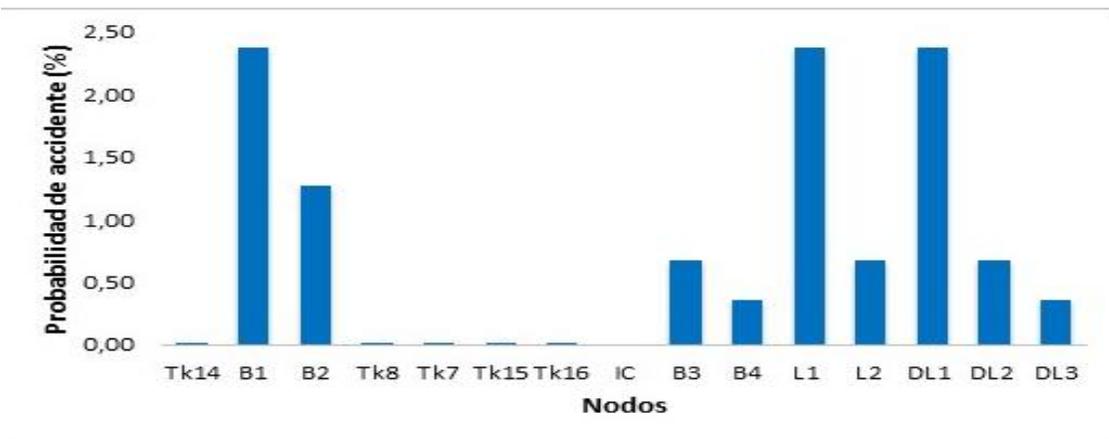


Figura 3.22 Nodos vs Probabilidad de accidente para red 3.

La probabilidad de accidente para las unidades secundarias es inferior al 2,5%, el máximo valor obtenido en las unidades secundarias es de 2,38% y 1,27 correspondiente a las balas 1 y 2 respectivamente, valores altos de acuerdo a lo reportado por la bibliografía.

La probabilidad del efecto al primer nivel es de 2,38%, al segundo nivel, 0,68% y al tercer nivel, 0,36%. Esto demuestra la posibilidad de desarrollo de la secuencia a partir de la sobrepresión en el tanque 6, siendo muy probable que el escalado producto de la misma ocurra con la formación de una nube de vapor explosiva.

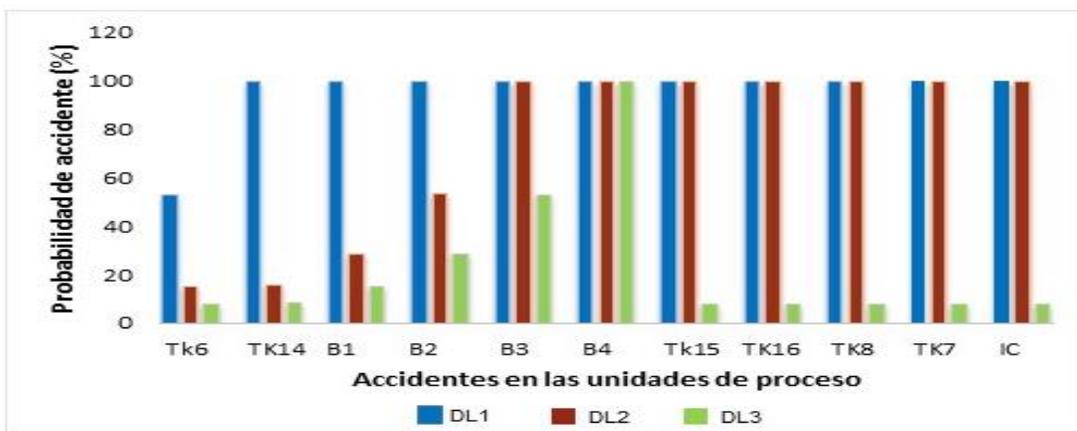


Figura 3.23 Accidentes en las unidades de proceso vs Probabilidad de accidente para red 3.

En la figura 3.23 se observa que para todos los casos es casi completamente certero que ocurra un accidente en cualquiera de las unidades de proceso, si se produce un accidente primario en el tanque 6. Si ocurre un accidente en la unidad potencial la probabilidad del carácter continuado del mismo al primer nivel es de 52,79%, valor muy elevado según Reniers y Cozzani (2013). Por lo que se puede afirmar, que esta unidad de proceso es altamente propensa para iniciar la cadena de eventos dominó por la sustancia que almacena y por la posición que tiene dentro del área.

Las figuras 3.24 y 3.25 muestran los resultados de probabilidad de ocurrencia de los accidentes a partir de la simulación de la red Bayesiana en el *software* Hugin y la posibilidad de ocurrir un accidente en cualquier unidad de proceso de la red 6 a partir del tanque 15.

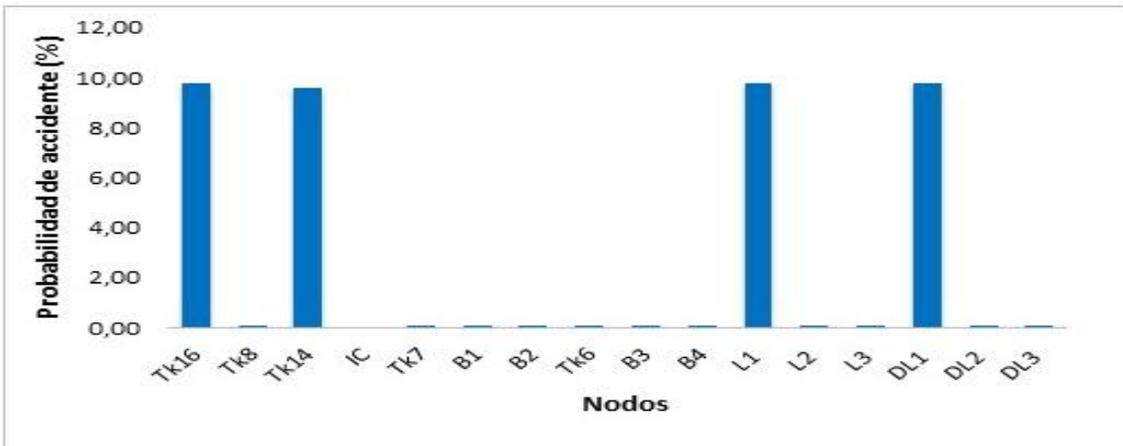


Figura 3.24 Nodos vs Probabilidad de accidente para red 6.

La probabilidad de accidente para las unidades secundarias tanques 16 y tanque 14 es superior al 9,6%, considerado alto según Cai *et al* (2018), Simon *et al.* (2019) y Yazdi (2019). Los valores elevados de inflamabilidad y volatilidad del petróleo crudo y sulfuro de hidrógeno hacen que el escalado del accidente primario pueda producirse. Por lo que es probable que ocurra el efecto dominó a partir de un accidente primario en el tanque 15.

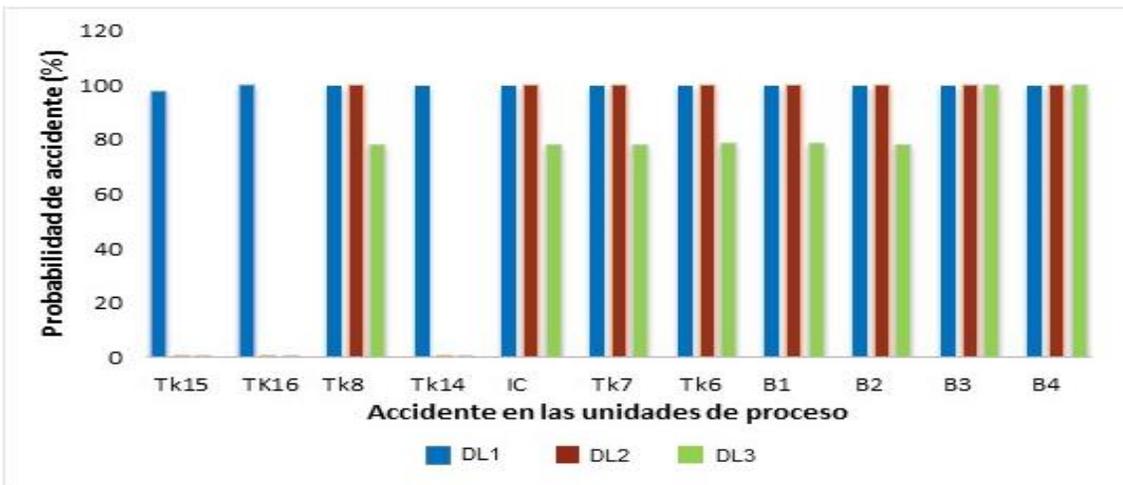


Figura 3.25 Accidentes en las unidades de proceso vs Probabilidad de accidente para red 6.

La posibilidad de que ocurra un accidente en cualquiera de las unidades de proceso si se produce un accidente primario en el tanque 15 es alta. La probabilidad del carácter continuado del accidente en esta unidad es superior al

97% en el primer nivel, siendo este equipo es el más propenso dentro del área a detonar una cadena de eventos dominó.

Los resultados de las red 7 construida a partir de la unidad primaria tanque 15 se muestran en las figuras 3.26 y 3.27.

En la figura 3.26 se aprecia que la probabilidad existente tiene valores superiores a 2,14% para los tanques 8,7,14 y 16. La probabilidad al primer nivel es de 2,25%, mientras que al segundo y tercero es de 1,17 y 0,68 respectivamente.

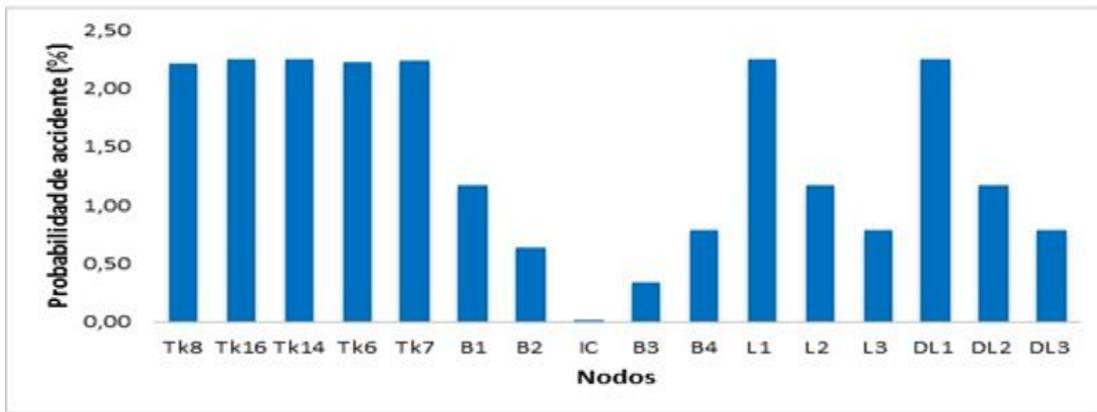


Figura 3.26 Nodos vs Probabilidad de accidente para red 7.

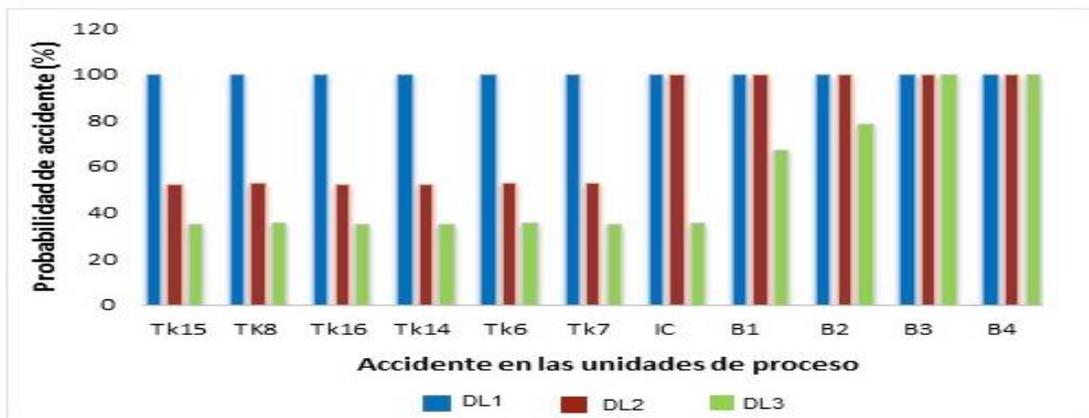


Figura 3.27 Accidentes en las unidades de proceso vs Probabilidad de accidente para red 7.

En caso de ocurrir un accidente en el tanque 15, la probabilidad del efecto dominó es de 100% en todas las unidades para el primer nivel, mientras que para el

segundo nivel alcanza este valor en las cuatro balas y en los intercambiadores y para el tercer nivel en las balas separadores 3 y 4. Por tanto al producirse el escalado del tanque 15 se verán afectadas todas las unidades secundarias, debido a que esta unidad de proceso, es altamente propensa de iniciar la cadena de eventos dominó.

La red 10 se confecciona para el análisis de las balas separadoras, en las figuras 3.28 y 3.29 se muestran los resultados.

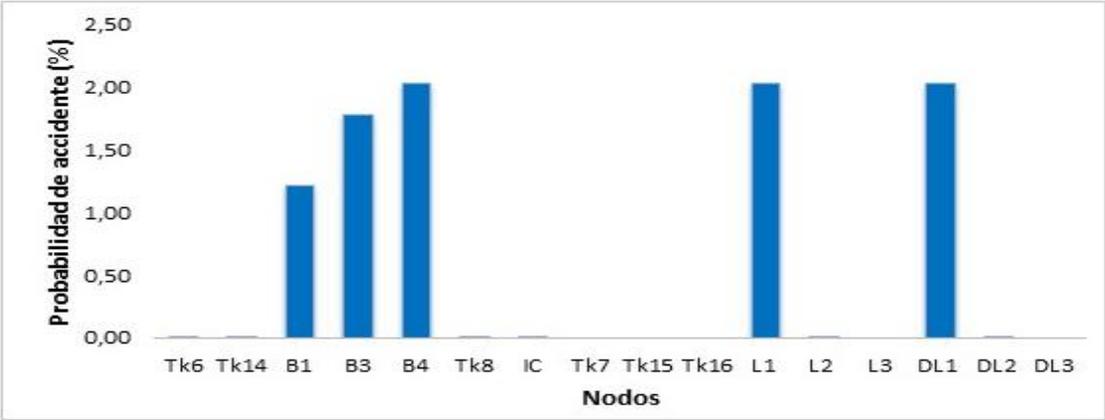


Figura 3.28 Nodos vs Probabilidad de accidente para red 10.

La probabilidad de accidente en las balas 1, 3 y 4 es ligeramente superior 1,21%. Debido a la inflamabilidad del sulfuro de hidrógeno es muy probable el escalado del accidente primario ya que la mayor capacidad de las balas está ocupada por este gas, siendo muy probable el inicio de la cadena de eventos dominó a partir de esta.

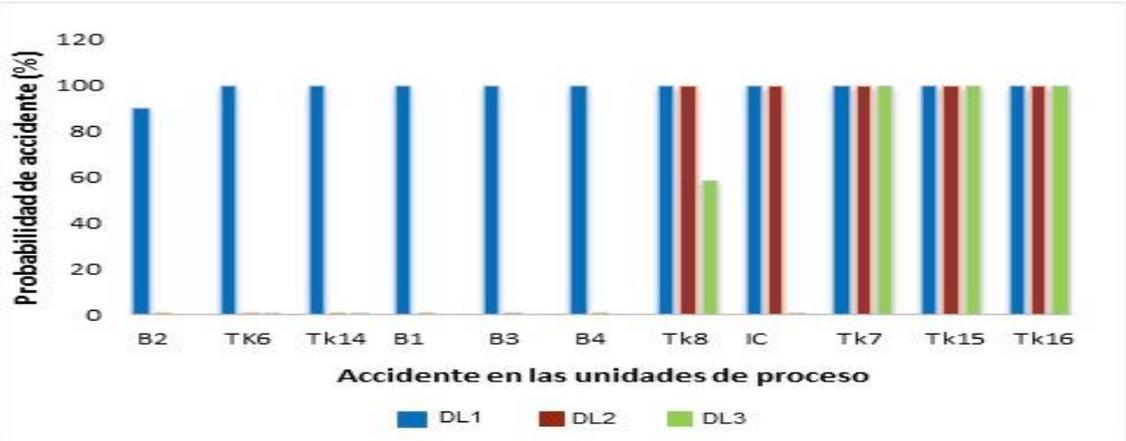


Figura 3.29 Accidentes en las unidades de proceso vs Probabilidad de accidente para red 10.

En la figura 3.29 se aprecia que para todos los equipos de la planta es casi completamente certero que ocurra un accidente en la unidad potencial, ya que la probabilidad en el primer nivel es de 100% en todas las unidades, excepto en la bala 2 siendo esta de 90%, lo que demuestra que es probable que se vean afectados todos estos equipos de ocurrir el escalado del accidente en la bala 2.

La figura 3.30a muestra la probabilidad de efecto dominó existente actualmente teniendo en cuenta las posibles cadenas de eventos, mientras que la 3.30b muestra la comparación de la probabilidad de este efecto a diferentes niveles, a partir de un accidente primario certero en los tanques 6, 15 y la bala separadora 2 respectivamente.

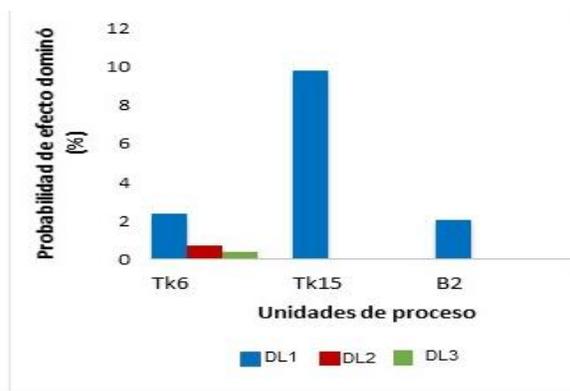


Figura 3.30a Unidades de proceso vs probabilidad de efecto dominó actual.

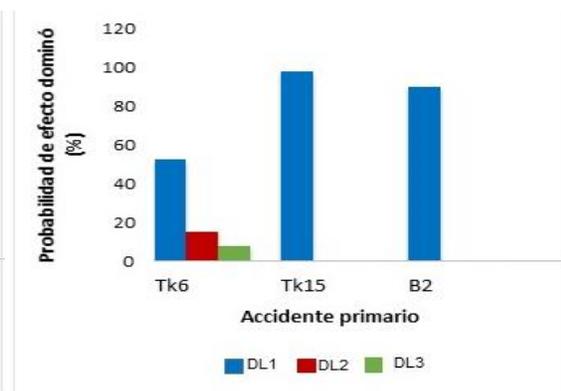


Figura 3.30b Accidente primario vs probabilidad de efecto dominó.

El tanque 15 es el que presenta mayor probabilidad de desarrollo de efecto dominó en ambas figuras con valores muy altos según lo reportado por la literatura. Sin embargo, en los tanques 6 y bala 2 esa probabilidad disminuye. Por lo que el tanque 15 es el más propenso como iniciador de la secuencia dominó, representando un gran peligro para la planta.

3.4.1 Resultados y análisis de la probabilidad conjunta del efecto dominó

La probabilidad conjunta del efecto dominó se determina a partir de la sumatoria de las probabilidades del carácter continuado a todos los niveles para el tanque

15. Este valor es 9,81%. Como se parte de la frecuencia inicial de los accidentes (por análisis histórico), este valor es frecuencial e indica que existe un 9,81% de probabilidad de ocurrir efecto dominó en un año. Según Cai *et al.* (2018), Kabir *et al.* (2015), Kabir y Papadopoulos (2019), Leoni *et al.* (2018) y Zerrouki y Smadi (2016) este valor demuestra un potencial de peligrosidad elevado.

3.5 Valoración de la percepción de riesgos en el área de Procesamiento de Crudos

Los resultados obtenidos en el presente estudio, hacen una contribución, respecto al conocimiento sobre los accidentes y su alcance, así como las afectaciones sobre las personas y sobre la propia instalación. Mediante este conocimiento, que posean las personas que laboran en la empresa, se podrán desarrollar programas de seguridad en el trabajo, que respondan de manera efectiva ante los peligros laborales detectados. En el anexo 23 se muestra la clave para evaluar los resultados de los cuestionarios.

La aplicación de los cuestionarios permitió determinar el grado de percepción de los trabajadores de la planta. En la tabla 3.4 se muestran los resultados de la aplicación de estos cuestionarios.

Tabla 3.4: Resultados de la aplicación de los cuestionarios.

Preguntas	Trabajador 1		Trabajador 2		Trabajador 3	
	Respuesta	Puntos	Respuesta	Puntos	Respuesta	Puntos
1	a,b,c,d,e,f,g	14	a,c,d,e	8	a,b,c,d	8
2	B	4	b	4	B	4
3	A	4	c	0	C	0
4	C	4	a	0	A	0
5	B	4	c	0	B	4
6	A	6	b	0	A	6
7	A	6	b	0	B	0
8	B	6	c	0	a, b	3
9	A	12	b, c	0	B	0
10	D	6	e	10	E	10
11	E	10	e	10	E	10
12	D	10	e	8	E	8
13	E	10	e	10	E	10
RP1		96		50		63
14	a, b	20	a	12	B	12

15	C	12	d	20	D	20
16	D	20	d	20	C	12
17	D	12	d	12	C	6
18	E	20	d	12	C	6
RP2		84		76		56
19	B	10	c	0	B	10
20	a, d	15	a, d	15	a, d	15
21	a, b	12	a	6	B	6
22	D	26	a	0	E	20
23	E	26	e	26	E	26
RP3		89		47		77
24	c- Media		a-Muy baja		a-Muy baja	

Teniendo en cuenta los factores asociados a la percepción de riesgos (RP1, RP2, RP3) en las encuestas realizadas a tres trabajadores, el primer trabajador es el que posee la mayor puntuación con valores de 96, 84 y 89 respectivamente contribuyendo esto a considerar como alta la percepción que posee el mismo ante estos accidentes. Por otro lado, los trabajadores 2 y 3 tienen una media percepción obteniendo puntuaciones 50, 76 y 47 en el primer caso y 63, 56 y 77 en el segundo caso.

El estudio realizado permitió determinar de manera general que los trabajadores tienen una percepción media acerca de estos accidentes, en cierta manera son conscientes del riesgo existente ante los escenarios tóxicos, de incendio y de explosión que pueden ocurrir.

Una de las aplicaciones de la lógica difusa está relacionada con los criterios expertos. Los juicios en forma de expresiones lingüísticas se transforman en números difusos y luego se agregan en "Posibilidad difusa"(FP) (Zarei *et al.*, 2018). De esta manera, la lógica difusa representa un enfoque confiable para cuantificar percepción de riesgos, ya que permite la combinación de los tres factores basándose en criterios de expertos para obtener un factor general de percepción de riesgos. La tabla 3.5 muestra los resultados de los tres factores (RP1, RP2 y RP3) y el factor de percepción de riesgos por lógica difusa.

Tabla 3.5: Resultados de los tres factores y el factor de percepción de riesgo por lógica Fuzzy.

Factor	RP1	RP2	RP3	RP
Trabajador 1	96	84	89	89,3
Trabajador 2	50	76	47	60,8
Trabajador 3	63	56	77	80,4
Promedio	70	72	71	79,5/76,8
Nota: El valor 79,5 es usando la lógica Fuzzy y el 76,8 es usando el promedio de los tres valores de RP. En ambos casos se obtienen valores similares y dentro de la misma clasificación				

El nuevo factor RP obtenido por lógica difusa permite cuantificar la percepción de riesgos integrando los tres factores existentes para obtener un factor único (Dueñas *et al.*, 2021). Los resultados son similares tanto para los tres factores existentes como para el nuevo factor RP obtenido ya que en los dos estudios los trabajadores poseen una percepción media-alta.

La última pregunta del cuestionario se realizó con el objetivo de saber cómo se ve el trabajador a sí mismo en cuanto a su percepción de riesgos y analizar si se sobrestima o subestima. La tabla 3.6 muestra los resultados obtenidos.

Tabla 3.6: Comparación de la clasificación de percepción de riesgos asumida por el trabajador respecto a la real que presenta.

Factor	RP	Percepción asumida	Percepción real	Resultado
Trabajador 1	89,3	Media	Alta- Muy alta	Se subestima
Trabajador 2	60,8	Muy baja	Media	Se subestima
Trabajador 3	80,4	Muy baja	Alta	Se subestima
Promedio	79,5/76,8	Baja	Media-alta	Se subestima

Los resultados muestran que en todos los casos el trabajador se subestima en cuanto al conocimiento que posee, sin embargo, la percepción real demuestra que sí perciben de manera eficaz el riesgo que representa esta área, lo que significa que poseen la preparación adecuada sobre el tema. Según Pell *et al.* (2017) estudios realizados demuestran que la mayoría de las personas tienen una tendencia a la subestimación.

Según el análisis realizado los trabajadores objeto de estudio tienen una percepción media-alta acerca de los accidentes tóxicos, de incendio y explosión que pudieran darse en la misma, lo que significa que son claramente conscientes, de que están expuestos a estos riesgos, por la manipulación de sustancias tóxicas e inflamables producto de sus actividades rutinarias, y que juega un papel importante un trabajo disciplinado con el cumplimiento de las medidas necesarias para evitar este tipo de desastres. Por lo que el conocimiento de los trabajadores sobre el tema es crucial, la percepción de la seguridad por parte del trabajador es un factor importante en las organizaciones para trabajar de forma más segura, una percepción adecuada podrá proporcionar toda la información necesaria sobre los accidentes.

3.6 Conclusiones parciales

- 1- El nuevo factor RP obtenido por lógica difusa permite cuantificar la percepción de riesgos integrando los tres factores (RP1, RP2 y RP3) para obtener un factor único, dando como resultado un valor de 79,5.
- 2- De todos los escenarios el BLEVE más bola de fuego y la nube tóxica provocan daños severos ya que su alcance logra sobrepasar toda el área de EPEP-Centro y zonas cercanas.
- 3- Los mayores valores de frecuencia inicial del accidente por análisis histórico corresponden al tanque 6 y la bala 2 con una frecuencia de $0,5 \text{ a}^{-1}$ en ambos tanques; mientras que, para las fugas de sulfuro de hidrógeno, los valores más altos corresponden al tanque 6 pues contiene una frecuencia de $0,2 \text{ a}^{-1}$.
- 4- La probabilidad de escalado máxima obtenida es la del tanque 6 con respecto al 14 con $1,13\text{E-}01$ para la subárea 1 y del tanque 15 respecto al tanque 16

con 9,58E-01 para el área 2, en el caso del vector radiación; mientras que, para sobrepresión, las probabilidades pueden alcanzar valores de hasta 9,83E-01 para todos los tanques.

- 5- Los accidentes producidos a partir del tanque 15 representan un nivel de riesgo elevado para las personas dentro de la planta, esta unidad primaria es la que mayores afectaciones producirá como iniciadora de la cadena de eventos dominó debido a que almacena sustancias de elevada inflamabilidad.
- 6- La red Bayesiana de mayor probabilidad conjunta es la 6 desarrollada a partir de un charco de fuego en el tanque 15 con un valor de 9,81%.
- 7- La aplicación de los cuestionarios permitió determinar que los trabajadores tienen una percepción media-alta sobre los accidentes tóxicos, de incendio y explosión.

Conclusiones

- 1- El diseño de una metodología con la finalidad de cuantificar la percepción de riesgos de accidentes tóxicos de incendio y explosión permitió evaluar la percepción de estos accidentes dentro del área estudiada, siendo esta media-alta.
- 2- El escenario BLEVE más bola de fuego, a pesar de su poca duración es el que provoca daños mayores ya que su alcance logra sobrepasar toda el área de EPEP-Centro y zonas cercanas provocando en caso del tanque 6 la muerte de todo ser que se encuentre dentro de la radiación superior a 10 kW/m^2 que se alcanza para una distancia de hasta 1,2 kilómetros; mientras que, el escenario nube tóxica provoca daños severos, afectando no solo a la empresa, sino también a la ciudad de Cárdenas alcanzando hasta 7,6 kilómetros.
- 3- A través de la aplicación de las redes Bayesianas se cuantificó que la probabilidad conjunta del efecto dominó más probable, es a partir de un charco de fuego en el tanque 15 con un valor de 9,81%.
- 4- El nuevo factor de Percepción de Riesgos (RP) obtenido por lógica difusa permitió cuantificar la percepción de riesgos integrando los tres factores (RP1, RP2 y RP3) para obtener un factor único, dando como resultado un valor de 79,5.
- 5- La aplicación de los cuestionarios permitió determinar el nivel de percepción de riesgos que presentan algunos trabajadores sobre los accidentes tóxicos, de incendio y explosión obteniéndose una percepción media alta sobre los mismos.

Recomendaciones

- 1- Aplicar la metodología propuesta a otras áreas de almacenamiento de hidrocarburos.
- 2- Evaluar la percepción de riesgos de accidentes tóxicos, de incendio y explosión en la mayoría de trabajadores de la empresa.

Bibliografía

1. Abbasi, S.A., Khan, I.F. (1998). DOMIFFECT (DOMINO EFFECT): user-friendly *software* for domino effect analysis. *Environmental Modelling & Software*.
2. Abbasi, SA; Abbasi, T; Pandey, S; Tauseef, SM, Vipin, K. (2018). Pool Fires in Chemical Process Industries: Occurrence, Mechanism, Management. *Journal of Failure Analysis and Prevention*. <http://doi/10.1007/s11668-018-0517-2>
3. Aboud, A. (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.
4. Ahmadi, O., Mortazavi, S.B., Pasharshahi, H., Mahabadi, H.A., Sarvestani, K. (2019). Modeling of boilover phenomenon consequences: Computational fluid dynamics (CFD) and empirical correlations. *Process Safety and Environment Protection*, vol.129, pp 25-39. doi: 10.1016/j.psep.2019.05.045
5. Ahn, J., Chang, D. (2016). Fuzzy-based HAZOP Study for Process Industry. *Journal of Hazardous Materials*. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhazmat.2016.05.096>
6. Antonioni, G., Cozzani, V., Khakzad, N., Khan, F., Reniers, G., Taveau, J. (2013). Quantitative Assessment of Risk Caused by Domino Accidents. *Domino Effects in the Process Industries, Modeling, Prevention and Managing*. Elsevier. Amsterdam, The Netherlands.
7. Argenti, F., Landucci, G., Antonioni, G., Cozzani, V. (2014). Frequency evaluation for domino scenarios triggered by heat radiation exposure. *Chemical Engineering Transactions*. [en línea]. Vol. 36. Disponible en www.aidic.it/cet. DOI: 10.3303/CET1436063

8. Atkinson, G. (2017). Development of Heavy vapour Clouds in very low wind speeds. Elsevier, pp 162-172. doi: 10.1016/j.jlp.2017.04.011.
9. Behesht Hosein, M., Dehghan Farhang, S., Hajizadeh, R., Mohammad, S. y Koohpaei Alireza, J. (2018). Modelling the Consequences of Explosion, Fire and Gas Leakage in Domestic Cylinders Containing LPG. *Ann Med Health Sci Res*, 8, 83-88.
10. Bellasio, R., Bianconi, R. (2005). On line simulation system for industrial accidents. *Environmental Modelling and Software*.
11. Bestratén, M., Turmo, E. (2019). NTP 293: Explosion BLEVE. Evaluation of the thermal radiation. BLEVE's Assessment of Thermal Radiation.
12. BEVI (2009). Reference Manual Bevi Risk Assessments Versión 3.2. National Institute of Public Health and the Environment (RIVM).
13. 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. 978-92-7969612-1, doi: 10.2760/73303
14. Bolado, R., Ibáñez, J., Lantarón, A. (2000). *El Juicio de Expertos*.
15. Boral, S., Howard, I., Chaturvedi, S. K., McKee, K., Naikan, V.N.A. (2019) An Integrated Approach for Fuzzy Failure Modes and Effects Analysis using Fuzzy AHP y Fuzzy MAIRCA. *Engineering Failure Analysis*. doi: <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2019.104195>
16. Cai, B., Liu, Y. y Fan, Q. (2018). A multiphase dynamic Bayesian networks methodology for the determination of safety integrity levels. *Reliability Engineering and System Safety*. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ress.2016.01.018>

17. Carbonel Siam, A., Torres Valle, A. (2010). Evaluación de percepción de riesgo ocupacional. revistaim@mecanica.cujae.edu.cu. Ingeniería Mecánica. Vol. 13.
18. Carreño, M.L., Cardona O.D., Barbat A.H. (2005). Sistema de indicadores para la evaluación de riesgos.
19. Casal, J., Montiel, H., Planas, E., Vílchez, J. (2002). Análisis del riesgo en instalaciones industriales. 2da ed. Barcelona: Ediciones UPC. 362 p.
20. Changlong, Z., Juncheng, J., Xiongjun, Y. (2012). Study on ignition probability of flammable materials after leakage accidents. *Procedia Engineering*.45. 435-441. <http://doi/10.1016/j.proeng.2012.08.182>
21. Cordobez, R. (2018). ¿Cómo gestionar la percepción del riesgo? Seguridad y Salud en el Trabajo.
22. Correa, D.A., 2004. "Manual de Seguridad y Salud Ocupacional. Términos y definiciones". Unión Cubapetróleo.
23. Cruz Rodríguez, J. (2020) ACERCAMIENTO AL CRITERIO DE EXPERTOS EN LA INVESTIGACIÓN. Primer congreso virtual de ciencias básicas biomédicas en Granma.
24. Cui, Y., Quddus, N. y Mashuga, Ch. V. (2020). Bayesian network and game theory risk assessment model for third-party damage to oil and gas pipelines. *Process Safety and Environmental Protection*, 134, 178-188. Recuperado de: <https://doi.org/10.1016/j.psep.2019.11.038>
25. De Iuliis, M., Kammouh, O., Cimellaro, G. P., Tesfamariam, S. (2018). DOWNTIME ESTIMATION OF BUILDING STRUCTURES USING FUZZY LOGIC. *International Journal of Disaster Risk Reduction*. <https://doi.org/10.1016/j.ijdr.2018.11.017>
26. Denat, T. (2017). Creation of a Biodiversity Severity Index to evaluate the risks of accidental pollutions in the industry: a multi-criteria sorting approach (Dortorado). Universidad de Ciencias y letras de Paris, Paris.

27. Djelosevic, M y Tepic, G. (2019). Identification of fragmentation mechanism and risk analysis due to explosion of cylindrical tank. *Journal of Hazardous Materials*, 362, 17-35. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2018.09.013>
28. Dobashi, R. (2017). Studies on accidental gas and dust explosions. *Fire Safety Journal*. journal homepage: www.elsevier.com/locate/firesaf
29. Doran, B., Yetilmezsoy, K., Murtazaoglu, S. (2015). Application of fuzzy logic approach in predicting the lateral confinement coefficient for RC columns wrapped with CFRP. *Engineering Structures*. journal homepage: www.elsevier.com/locate/engstruct
30. Dueñas, J.A., Luis Orozco, J., Furka, D., Furka, S., Boza, Y.C., Febles, D., González, A., Barrera, M.C. *A new Fuzzy- Bayesian approach for the determination of failure probability due to thermal radiation in domino effect accidents*. *Engineering Failure Analysis*. 120 (2021). Elsevier. Q1, Rank #43/297. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2020.105106>
31. Eldukair, Z.A., Ayyub, B.M. (1992). Multi-attribute fuzzy decisions in construction strategies. *Fuzzy Sets and Systems*.
32. Fahmi Hussin, M., Wang, B. (2010). Industrial safety perception among post-graduate engineering students. *Knowledge-Based Systems*. journal homepage: www.elsevier.com/locate/knosys
33. Ferrero, F. (2006). Incendios de Hidrocarburos: estudio de la formación y evolución del Boilover de Capa Fina. (Tesis en opción al grado científico de Doctor). Universidad Politécnica de Catalunya, Barcelona.
34. Finney, M.A. (2020). The wildland fire system and challenges for engineering. *Fire Safety Journal*. doi: <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2020.103085>
35. Futran Fuhrman, V., Tal, A., Arnon, S. (2014). Why endocrine disrupting chemicals (EDCs) challenge traditional risk assessment and how to

- respond. *Journal of Hazardous Materials*. Disponible en <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhazmat.2014.12.012>
36. Gai, W., Deng, Y., Jiang, Z., Li, J. y Du, Y. (2017). Multi-objective evacuation routing optimization for toxic cloud releases. *Reliability Engineering and System Safety*, 16. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ress.2016.10.021>
37. Gai, W., Dub, Y. y Deng, Y. (2018). Regional evacuation modeling for toxic-cloud releases and its application in strategy assessment of evacuation warning. *Safety Science*, 109, 256-269. Recuperado de: <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2018.06.007>
38. Gewrgios TZIAFERI, S., SOURTZI, P., KALOKAIRINO, A., SGOUROU, E., KOUMOULS, E., y VELONAKIS, E. (2011). Risk Assessment of Physical Hazards in Greek Hospitals Combining Staff's Perception, Experts' Evaluation and Objective Measurements. *Safety and Health at Work*. <http://dx.doi.org/10.5491/SHAW.2011.2.3.260>
39. Gómez Godoy, O. F. (2016). PERCEPCIÓN DE LOS TRABAJADORES ACERCA DE LA SEGURIDAD EN EL TRABAJO EN UNA EMPRESA DEL SECTOR DE GAS NATURAL EN CASANARE.
40. Gómez Herrera, J. E.; Rodríguez Morán, O. (2011). METODOLOGIA PARA EL ANÁLISIS DEL RIESGO PETROLERO Y TOMA DE DECISIONES. CASO DE ESTUDIO FRANJA NORTE DE CRUDOS PESADOS, SECTOR GUANABO – SEBORUCO, CUBA.
41. Gómez Mares, M. (2009). Estudio experimental y modelización matemática de dardos de fuego. (Tesis en opción al grado científico de Doctor). Universidad Politécnica de Catalunya, Barcelona.
42. Gopalaswami, N., Liu, Y., Laboureur, D. M.; Zhang. B., Mannan M. S. (2016). Experimental study on propane jet fire hazards: Comparison of main geometrical features with empirical models. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. (doi: 10.1016 / j.jlp.2016.02.003)

43. Gyenes, Z., Wood, M. y Struckl, M. (2017). Handbook of Scenarios for Assessing Major Chemical Accident Risks. JRC Technical Reports, 1-116
44. He, Z., Weng, W. (2020). A dynamic and simulation-based method for quantitative risk assessment of the domino accident in chemical industry. *Process Safety and Environmental Protection*.
<https://doi.org/10.1016/j.psep.2020.07.014>
45. Hemmatian, B., Casal, J., Planas, E., Hemmatian, B., Rashtchian, D. (2019). Prediction of BLEVE mechanical energy by implementation of artificial neural network. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*). doi: <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2019.104021>
46. Herrero, D., Parada, P., Oliva, M., Jorge, R. The influence of emotional state on risk perception in pedestrians: A psychophysiological approach. *Safety Science*.
47. Hosseinnia, B., Khakzad, N. y Reniers, G. (2018). Multi-plant emergency response for tackling major accidents in chemical industrial areas. *Safety Science*, 102, 275-289. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2017.11.003>
48. Hou, J., Gai, W-mei., Cheng, W-yi., Deng, Y-feng (2020). Statistical analysis of evacuation warning diffusion in major chemical accidents based on real evacuation cases. *Process Safety and Environmental Protection*.
<https://doi.org/10.1016/j.psep.2020.02.028>
49. HSE. (2018). Annual Science Review. Helping Great Britain work we. Disponible en: <http://www.hse.gov.uk/horizons/>.
50. Hugin. (2019). Gasvaerksvej 5. DK-9000 Aalborg. Denmark. Lite 8.7.
51. Javidi, M., Abdolhamidzadeh B., Reniers, G., Rashtchian, D. (2014). A multivariable model for estimation of vapor cloud explosion occurrence possibility based on a Fuzzy logic approach for flammable materials. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*.
52. Jensen, F.V. (2001). *Redes Bayesianas y gráficos de decisión*, Springer.

53. Ji, M., Yang, C., Han, H., Li, Y., Xu, Q. (2018). The influence of trait mindfulness on incident involvement among Chinese airline pilots: The role of risk perception and flight experience. *Journal of Safety Research*. journal homepage: www.elsevier.com/locate/jsr
54. Jia, X., Morel, G., Martell Flore, H., Hissel, F., Jean Louis, B. (2016). Fuzzy logic based decision support for mass evacuations of cities prone to coastal or river floods. *Environmental Modelling & Software*. www.elsevier.com/locate/envsoft.
55. Jones, R., Lehr, W., Simecek-Beatty, D. y Michael Reynolds, R. (2013). ALOHA (Areal Locations of Hazardous Atmospheres) 5.4.4. Seattle, Washington. Department of Commerce National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA).
56. Kabir, G., Sadiq, R. y Tesfamariam, S. (2015). A fuzzy Bayesian belief network for safety assessment of oil and gas pipelines. *Structure and Infrastructure Engineering: Maintenance, Management, Life-Cycle Design and Performance*, 1-17. doi: 10.1080/15732479.2015.1053093
57. Kabir, S. y Papadopoulos, Y. (2018). A review of application of fuzzy sets to safety and reliability engineering. *International Journal of Approximate Reasoning*.
58. Kabir, S. y Papadopoulos, Y. (2019). Applications of Bayesian networks and Petri nets in safety, reliability, and risk assessments: A review. *Safety Science*, 115, 154-175. Recuperado de: <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2019.02.009>
59. Karimi, M., Hossein Niknamfar, A., Taghi, S., Niaki, A. (2018). An application of fuzzy-logic and grey-relational ANP-based SWOT in the ceramic and tile industry. *Knowledge-Based Systems*. <https://doi.org/10.1016/j.knosys.2018.09.020>

60. Khakzad, N., Amyotte, P., Cozzani, V., Reniers, G. y Pasman, H. (2018). How to address model uncertainty in the escalation of domino effects? *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 1-28. doi: 10.1016/j.jlp.2018.03.001
61. Khakzad, N., Landucci, G. y Reniers, G. (2017). Application of dynamic Bayesian network to performance assessment of Pre protection systems during domino effects. *Reliability Engineering and System Safety*, 16, 1-30. doi: 10.1016/j.ress.2017.06.004
62. Kong, D., Liu, P., Zhang, J., Fan, M., Tao, C. (2017). Small scale experiment study on the characteristics of boilover. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. Journal homepage: www.elsevier.com/locate/jlp
63. Kongsvik, T., Almklov, P., Haavik, T., Haugen, S., Vinnem, J. E., Morten Schiefloe, P. (2015). Decisions and decision support for major accident prevention in the process industries. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. journal homepage: www.elsevier.com/locate/jlp.
64. Korol, T. (2014). A fuzzy logic model for forecasting exchange rates. *Knowledge-Based Systems*. journal homepage: www.elsevier.com/locate/knosys
65. Kumar Sharma, R., Gopaldaswami, N., Ram Gurjar, B., Agrawal, R. (2019). Assessment of Failure and Consequences Analysis of an Accident: A case study. *Engineering Failure Analysis*. doi: <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2019.104192>
66. Kwan Seo, J., Eui Lee, S., Shin Park, J. (2017). A method for determining fire accidental loads and its application to thermal response analysis for optimal design of offshore thin-walled structures. *Fire Safety Journal*. journal homepage: www.elsevier.com/locate/firesaf.

67. Landucci, G., Cozzani, V., Birkz, M. (2013). Heat Radiation Effects. Domino Effects in the Process Industries. Modeling, Prevention and Managing. Elsevier. Amsterdam, The Netherlands.
68. Lauritzen, S.L y Nilsson, D. (2001). Representar y resolver problemas de decisión con información limitada. *Management Science*, 47,1235-1251.
69. Lazzerini, B. y Pistolesi, F. (2013). Profiling risk sensibility through association rules. *Expert Systems with Applications*. journal homepage: www.elsevier.com/locate/eswa.
70. Leder, J., Horlitz T., Puschmann P., Wittstock, V., Schütza, A. (2018). Comparing immersive virtual reality and powerpoint as methods for delivering safety training: Impacts on risk perception, learning, and decision making. *Safety Science*. Disponible en www.elsevier.com/locate/safety.
71. Lees, F.P. (2012). Loss prevention in the process industries: Hazard identification, assessment and control, fourth edition. ED. Mannan S., Elsevier Butterworth-Heinemann.
72. Lees' Process Safety Essentials: Hazard Identification, Assessment and Control, First edition (2014). ED. Mannan S., Elsevier Butterworth-Heinemann.
73. Leoni, L., Bahoo Toroody, A., De Carlo, F. y Paltrinieri, N. (2018). Developing a risk-based maintenance model for a Natural Gas Regulating and Metering Station using Bayesian Network. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 1-23. Recuperado de: <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2018.11.003>
74. Li, J., Hao, H. (2020). Numerical study of medium to large scale BLEVE for blast wave prediction. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. journal homepage: <http://www.elsevier.com/locate/jlp>.
75. Li, P., Li, X., Zhang, L., Dai, L (2018). A validation research on fuzzy logic-AHP-based assessment method of operator's situation awareness reliability. *Safety Science*. Disponible en <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2018.10.007>

76. Lisbona, D., Briggs, B. y Wardman, M. (2012). Comparative study of models used in the estimation of risk from flash fire events at major hazard installations. Crown Copyright. Hazards XXIII, 158.
77. Liu, XY, Zhou, N. (2012). Introduction on Safety Management of Oil-Gas.
78. López Navarro, M.A., Tortosa Edo, V., Castán Broto, V. (2018). Firm-local community relationships in polluting industrial agglomerations: How firms' commitment determines residents' perceptions. doi: 10.1016 Journal of Cleaner Production /j. jclepro.2018.03.071
79. Ma, Q., Zhang, Q. (2019). Deflagration characteristics of hydrogen-air mixture beyond the original premixed fuel region. Fuel. journal homepage: www.elsevier.com/locate/fuel.
80. Madun, A. (2020). Public Perceptions of Radiation Effects on Health Risks and Well-Being. A Case of RFEMF Risk Perceptions in Malaysia.
81. Marhavidas, P.K., Filippidis, M., Koulinas, G. K., Koulouriotis, D.E. An expanded HAZOP-study with fuzzy-AHP (XPA-HAZOP technique): Application in a sour crude-oil processing plant. Safety Science. Journal homepage: www.elsevier.com/locate/safety.
82. Marshall, T. M. (2020) Review Paper. Risk perception and safety culture: Tools for improving the implementation of disaster risk reduction strategies. International Journal of Disaster Risk Reduction. Disponible en www.elsevier.com/locate/ijdr
83. Martínez Fiestas, M., Rodríguez Garzón, I., Delgado Padial, A. (2020) Firefighter perception of risk: A multinational analysis. Safety Science. Disponible en www.elsevier.com/locate/safety.
84. Márquez Suárez, O. (2016). Investigación de accidentes explosivos por la liberación de sustancias peligrosas: uso potencial del modelo de ALOHA. Revista del Ministerio Público, (19), 427-460.

85. McGrattan, K., Hostikka, S., McDermott, R., Floyd, J., Weinschenk, C., Overholt, K. (2013). Fire Dynamics Simulator Technical Reference Guide. Volume 1: Mathematical Model. NIST Special Publication 1018. Sixth Edition. USA.
86. Meteogalicia (2011). ALOHA v 5.4.1.2. y MARPLOT v 4.1.2. Manual de Usuario. Versión 1. Actividad 4. Tarea 4.2.1. The Atlantic Regions' Coastal Pollution Response. ARCOPOL.
87. Miao, Z., Wenhua, S., Jia, W. y Zhen, Ch. (2014). Accident consequence simulation analysis of pool fire in fire dike. *Procedia Engineering*, 84, 565-577. <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/3.0/>
88. Mirzakhonov, V.E. (2020). Value of fuzzy logic for data mining and machine learning: A case study. *Expert Systems with Applications*. www.elsevier.com/locate/eswa.
89. Mitropetros, K., Wehmeier, Guido. (2016). Fire Protection in the Chemistry Industry. *Chemical Engineering Transactions*. 48 259-264. <http://doi/10.3303/CET1648044>
90. Mohammad Al-Sarawi, N. (2017). Evaluation of Accidental Atmospheric Releases of Chlorine and Butane from a Mobile Source Using ALOHA and MARPLOT. *American Journal of Environmental Protection*, 6(6), 144-155. doi: 10.11648/j.ajep.20170606.12
91. Moreno, V. C., Danzi, E., Marmo, L., Salzano, E., Cozzani, V. (2019). Major accident hazard in biodiesel production processes. *Safety Science*. doi: 10.1016/j.ssci.2018.12.014
92. Moya, B. (2016). Consulta personal. Especialista principal en Meteorología. CITMA. Matanzas.
93. Muhammad, K., Abo Elkhier, M. (2020). Failure analysis of an exploded large-capacity liquid storage tank using finite element analysis. *Engineering Failure Analysis*. Journal homepage: www.elsevier.com/locate/engfailanal

94. Mukhim Euginia, D., Abbasi, T., Tauseef, S.M. y Abbasi, S.A. (2017). Domino effect in chemical process industries triggered by overpressure- 107 formulation of equipment-specific probits. *Process Safety and Environment Protection*, 1-37. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.psep.2017.01.004>.
95. Naghavi, Z., Mortazavi S. B., Asilian, H., Hajizadeh, E. Clasificación de los factores que contribuyen a los incidentes ocupacionales: un modelo de red Bayesiana para la industria del petróleo. *Process Safety and Environmental Protection* (2020). doi: <https://doi.org/10.1016/j.psep.2020.01.038>
96. Nwabueze Dili, O. (2016). Liquid Hydrocarbon Storage Tank Fires – How Prepared is your Facility? *Chemical Engineering Transactions*, 48, 1-6. doi: 0.3303/CET1648051
97. Oah, S., Na, R. Moon, K. (2018). The influence of Safety Climate, Safety Leadership, Workload, and Accident Experiences on Risk Perception: A Study of Korean Manufacturing Workers. *Safety and Health at Work*. Disponible en: www.e-shaw.org.
98. Okoh, P., Haugen, S., Vinnem, J.E. (2018). Optimization of recertification intervals for PSV based on major accident risk. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. Disponible en: www.elsevier.com/locate/jlp.
99. Pell del Río, S.M, Lorenzo Ruiz, A., Torres Valle, A. (2017). Determinación de la percepción de riesgo de la población ante los productos químicos peligrosos. *Revista Cubana de Salud Pública* vol.43 no.3 Ciudad de La Habana.
100. Perdomo, J.L., Valera, J. (2015). Metodología para la medición de riesgos sociales. Universidad Central de Venezuela.
101. Ping, P., Zhang, J., Kong, D., Xu, Z., Yang, H. (2017). Experimental study of the flame geometrical characteristics of the crude oil boilover fire under cross air flow. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. doi: 10.1016/j.jlp.2017.12.005

102. Planas, E., Hemmatian, B., Casal, J. (2015). Fire as a primary event of accident domino sequences: The case of BLEVE. *Reliability Engineering and System Safety*. journal homepage: www.elsevier.com/locate/ress.
103. Poli, J.P., Boudet, L. (2017). A Fuzzy Expert System Architecture For Data And Event Stream Processing. *Fuzzy sets and systems*. <https://doi.org/10.1016/j.fss.2017.10.005>
104. Poljanšek, K., Marin Ferrer, M., De Groeve, T., Clark, I. (2017). Science for disaster risk management: knowing better and losing less. EUR 28034 EN, Publications Office of the European Union, Luxembourg. ISBN 978-9279-60678-6, doi:10.2788/688605, JRC102482
105. Rahman, N. A., Hussain, M. A., Jahim, J. M., Kamaruddin, S. K., Sheikh, S. R. Abdullah; Kamaruddin, M. Z. F (2013). Integrating computer applications into undergraduate courses: Process control and utility design. *Education for Chemical Engineers*. www.elsevier.com/locate/ece
106. Rajeev, K., Soman, S., Renjith, V.R., George, P. (2019). Human vulnerability mapping of chemical accidents in major industrial units in Kerala, India for better disaster mitigation. *International Journal of Disaster Risk Reduction*. journal homepage: www.elsevier.com/locate/ijdr
107. Rengel, B., Àgueda, A., Pastor, E., Casal, J., Planas, E., Hu, L., Palacios, A. (2020). Experimental and computational analysis of vertical jet fires of methane in normal and sub-atmospheric pressures. *Fuel*. journal homepage: www.elsevier.com/locate/fuel.
108. Reniers, G. y Cozzani, V. (2013). Features of Escalation Scenarios. *Domino Effects in the Process Industries*, 1-13. <http://dx.doi.org/10.1016/B978-0-444-54323-3.00003-8>
109. Renjith, V.R y Madhu, G. (2010). Individual and societal risk analysis and mapping of human vulnerability to chemical accidents in the vicinity of an industrial area. *International Journal of Applied Engineering Research*, Dindigul, 1, ISSN 09764259.

110. Ropero, R.F., Aguilera, P. A., Fernández, A. y Rumí, R. (2014) Redes Bayesianas: una herramienta probabilística en los modelos de distribución de especies. *Ecosistemas Revista Científica de Ecología y Medio Ambiente*, 23(1), 54-60. doi:10.7818/ECOS.2014.23-1.08
111. Rostamabadi, A., Jahangiri, M., Zarei, E., Kamalinia, M., Banaee, S., Samaei M.R. (2019). A Novel Fuzzy Bayesian Network-HFACS (FBN-HFACS) Model for Analyzing Human and Organizational Factors (HOFs) in Process Accidents, Process Safety and Environmental Protection. doi: <https://doi.org/10.1016/j.psep.2019.08.012>
112. Sanchez, E.Y., Represa S., Mellado, D., Balbi, K.B., Acquesta, A.D., Colman, L., Porta, A. (2018). Risk analysis of technological hazards: Simulation of scenarios and application of a local vulnerability index. *Journal of Hazardous Materials*. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2018.03.034>
113. Sarshar, S., Haugen, S., Britt Skjerve, A. (2015). Challenges and proposals for managing major accident risk through the planning process. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. journal homepage: www.elsevier.com/locate/jlp.
114. Sellami, I., Manescau, B., Chetehouna, K., de Izarra, C., Nait Said, R., Zidani, F. (2018). BLEVE fireball modeling using Fire Dynamics Simulator (FDS) in an Algerian gas industry. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2018.02.010>
115. Sengupta, A. (2007). *Industrial Hazard, Vulnerability and Risk Assessment for Landuse Planning A Case Study of Haldia, West Bengal, India*. 147 h. Tesis presentada para optar el título de Máster en Ciencias. International Institute for Geo-information Science and Earth Observation and Indian Institute of Remote Sensing (NRSA).
116. Shi, J., Zhu, Y., Khan, F. y Chen, G. (2018). Application of Bayesian Regularization Artificial Neural Network in explosion risk analysis of fixed

- offshore platform. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 140.
<https://doi.org/10.1016/j.jlp.2018.10.009>
117. Simon, Ch., Mechri, W. y Capizzi, G. (2019). Assessment of Safety Integrity Level by simulation of Dynamic Bayesian Networks considering test duration. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 1-32. Recuperado de: <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2018.11.002>
118. Spirtes, P., Glymour, C. y Scheines, R. (2000). Causación, predicción y búsqueda. MIT Press, computación adaptativa y aprendizaje automático. Segunda edición.
119. Steijn, W.M.P., Van Kampenb, J.N., Vander, G. J., Van, G. (2020). An integration of human factors into quantitative risk analysis using Bayesian Belief Networks towards developing a 'QRA+'. *Safety Science*, vol. 122. Disponible en <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2019.104514>
120. Tancogne, M., Laclémence, P. (2015). Fire risk perception and building evacuation by vulnerable persons: Points of view of layperson, fire victims and experts. *Fire Safety Journal*. www.elsevier.com/locate/firesaf
121. Thepaksorn, P., Siritwong, W., Neitzel, R.L., Somrongthong, R., Techasrivichien, T. (2018). Relationship Between Noise-Related Risk Perception, Knowledge, and the Use of Hearing Protection Devices Among Para Rubber Wood Sawmill Workers. *Safety and Health at Work*. www.e-shaw.org.
122. Tian, X., Liu, Ch., Zhong, M., Shi, C. (2020). Experimental study and theoretical analysis on influencing factors of burning rate of methanol pool fire. *Fuel*. journal homepage: www.elsevier.com/locate/fuel
123. Tohidi, H. (2014). Mathematical modeling of optimal multi fuzzy locating of facilities by assuming step distance among them in a convex set. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.apm.2014.12.048>

124. User's Manual ALOHA. (2007). The CAMEO *software* System. U.S. Environmental Protection Agency. National Oceanic and Atmospheric Administration.
125. Vílchez Sánchez, J.A., Pérez Alavedra, X. (2001). Análisis de riesgos ambientales y aplicación al diseño de instalaciones industriales.
126. Villa, V. y Cozzani, V. (2016). Application of Bayesian Networks to Quantitative Assessment of Safety Barriers' Performance in the Prevention of Major Accidents. *Chemical Engineering Transactions*, 53, 151-156. doi: 10.3303/CET1653026
127. Wan, N., Wan, K., Buang, A. (2016). Small scale boilover and visualization of hot zone. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. Disponible en: www.elsevier.com/locate/jlp
128. Wang, X., Zhang, M., Mannan, M.S., Qian, C., Wang, J (2017). System dynamical simulation of risk perception for enterprise decision-maker in communication of chemical incident risks, *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. Disponible en: 10.1016/j.jlp.2017.01.019
129. Wang, Y., Yang, H., Yuan, X. y Cao, Y. (2018). An improved Bayesian network method for fault diagnosis. *IFAC Papers Online* 51-21,341-346. <http://www.sciencedirect.com>.
130. Wells, G. (2003). *Major Hazards and their management*. Gulf Publishing Company. Houston, Texas.315 p.
131. Wiley, J. (2016). *Introduction to Process Safety for Undergraduates and Engineers*. CENTER FOR CHEMICAL PROCESS SAFETY OF THE AMERICAN INSTITUTE OF CHEMICAL ENGINEERS New York, NY.
132. Wu, Z., Hou, L., Wu, S., Wu, X., Fangyuan, L. (2020). The time-to-failure assessment of large crude oil storage tank exposed to pool fire. *Fire Safety Journal*. journal homepage: <http://www.elsevier.com/locate/firesaf>

133. Xia, N., Wang, X., Griffin, M., Wu, C., Liu, B. (2017). ¿Do we see how they perceive risk? An integrated analysis of risk perception and its effect on workplace safety behavior. *Accident Analysis and Prevention*. <http://www.elsevier.com/locate/aap>
134. Yang, D., Chen, G., Shi, J., Zhu, Y., Dai, Z. (2020). A novel approach for hazardous area identification of toxic gas leakage accidents on offshore facilities. *Ocean Engineering*. journal homepage: www.elsevier.com/locate/oceaneng.
135. Yazdi, M. (2019). A review paper to examine the validity of Bayesian network to build rational consensus in subjective probabilistic failure analysis. *Int J Syst Assur Eng Manag*, 1-8. doi: <https://doi.org/10.1007/s13198-018-00757-7>
136. Yazdi, M. y Kabir, S. (2018). Fuzzy evidence theory and Bayesian networks for process systems risk analysis. *Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal*, ISSN: 1080-7039, 1-31. Recuperado de: <https://doi.org/10.1080/10807039.2018.1493679>
137. Zaranezhad, A., Asilian, H., Reza Dehghani, M. (2019). Development of Prediction models for repair and maintenance–related accidents at oil refineries using artificial neural network, fuzzy system, genetic algorithm, and ant colony optimization algorithm. *Process Safety and Environment Protection*. journal homepage: <https://doi.org/10.1016/j.psep.2019.08.031>
138. Zarei, E., Khakzad, N., Cozzani, V. y Reniers, G. (2018). Safety analysis of process systems using Fuzzy Bayesian Network (FBN). *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 1-37. <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2018.10.011>
139. Zerrouki, H. y Smadi, H. (2016). Bayesian Belief Network Used in the Chemical and Process Industry: A Review and Application. *J Fail. Anal. and Preven.*, 1-7. doi: 10.1007/s11668-016-0231-x

140. Zhang, M., Wang, X., Mannan, M.S., Qian, C., Wang, J. (2017). A system dynamics model for risk perception of lay people in communication regarding risk of chemical incident. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. doi: 10.1016/j.jlp.2017.09.005
141. Zhou, K., Qin, X., Wang, Z., Pan, X. y Jiang, J. (2018). Generalization of the radiative fraction correlation for hydrogen and hydrocarbon jet fires in subsonic and choked flow regimes. *Science Direct*, 43, 9870-9876. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2018.03.201>.
142. Zhou, Q., Wu, W., Liu, D., Li, K., Quiao, Q. (2016). Estimation of corrosion failure likelihood of oil and gas pipeline based on fuzzy logic approach. *Engineering Failure Analysis*. journal homepage: www.elsevier.com/locate/engfailanal.

Anexos

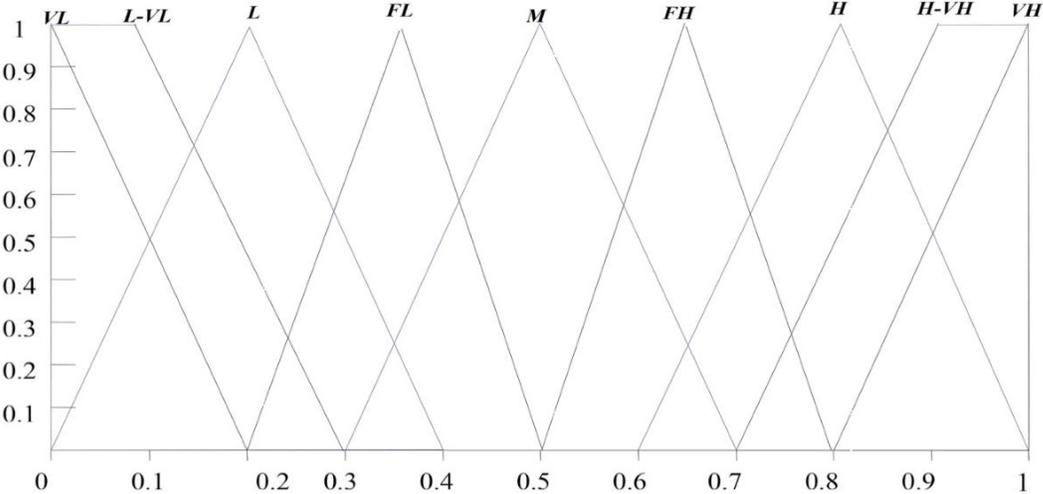
Anexo 1: Términos lingüísticos y números difusos para estimar la probabilidad de ocurrencia de un evento.

Términos lingüísticos	Descripción	Conjunto difuso (escala 7)
Muy alto (VH)	Una vez en el mes	(0.8,1,1,1)
Alto-Muy Alto (HVH)	Una vez en 1–3 meses	(0.7,0.9,1,1)
Alto (H)	Una vez en 3–6 meses	(0.6,0.8,0.8,1)
Fairly Alto (FH)	Una vez en 6–12 meses	(0.5,0.65,0.65,0.8)
Medio (M)	Una vez en 1–5 años	(0.3,0.5,0.5,0.7)
Fairly Bajo (FL)	Una vez en 5–10 años	(0.2,0.35,0.35,0.5)
Bajo (L)	Una vez en 10– 15 años	(0,0.2,0.2,0.4)
Bajo -Muy Bajo (LVL)	Una vez en 15–20 años	(0,0,0.1,0.3)
Muy Bajo (VL)	Durante un ciclo de vida del sistema no ocurre o no se observa	(0,0,0,0.2)

Anexo 2: Términos lingüísticos y sus correspondientes números difusos para estimar la severidad de un evento.

Términos lingüísticos	Conjunto difuso
Muy bajo (VL)	(0,0,0,0.25)
Bajo (L)	(0,0.25,0.25,0.50)
Medio (M)	(0.25,0.50,0.50,0.75)
Alto (H)	(0.50,0.75,0.75,1.0)
Muy alto (VH)	(0.75,1,1,1)

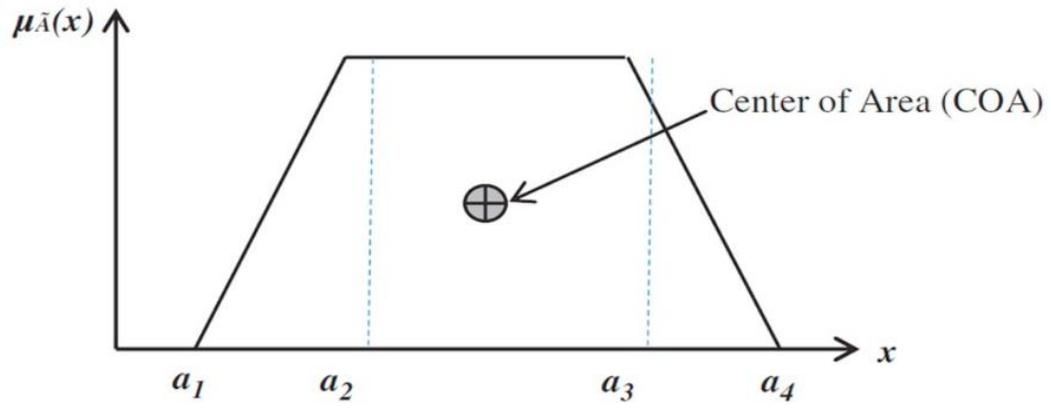
Anexo 3: Escala de conversión seleccionada para estimar la probabilidad de ocurrencia de un evento.



Anexo 4: Puntaje de ponderación de diferentes expertos.

Constitución	Clasificación	Puntuación	Constitución	Clasificación	Puntuación
Posición profesional	Académico de experiencia	5	Nivel de Educación	PhD	5
	Académico principiante	4		Máster	4
	Ingeniero	3		Bachiller	3
	Técnico	2		Diploma Superior Nacional (HND)	2
	Obrero	1		Nivel escolar	1
Tiempo de experiencia (años)	≥ 30	5	Edad (años)	≥ 50	4
	20-29	4		40-49	3
	10-19	3		30-39	2
	6-9	2		≤30	1
	≤5	1			

Anexo 5: Representación del números difuso trapezoidal \tilde{A} .



Anexo 6: Caracterización de los equipos del área.

Equipos	Sustancias almacenadas	Diámetro (m)	Diámetro tubería (mm)		Altura/ Longitud (m)	Volumen (m3)
			Entrada	Salida		
Balas 1,2, 3 y 4	Crudo y H2S	2,80	508	406	16,50	100
Tanque 6	Crudo y H2S	15,19	508	508	16,00	2900
Tanque 7	Crudo	34,19	305	406	12,00	5000
Tanque 8	Crudo y H2S	34,19	305	406	12,00	5000
Tanque 14	Crudo	45,00	508	406	12,00	20000
Tanque 15 y 16	Crudo y H2S	22,82	508	406	11,95	10000

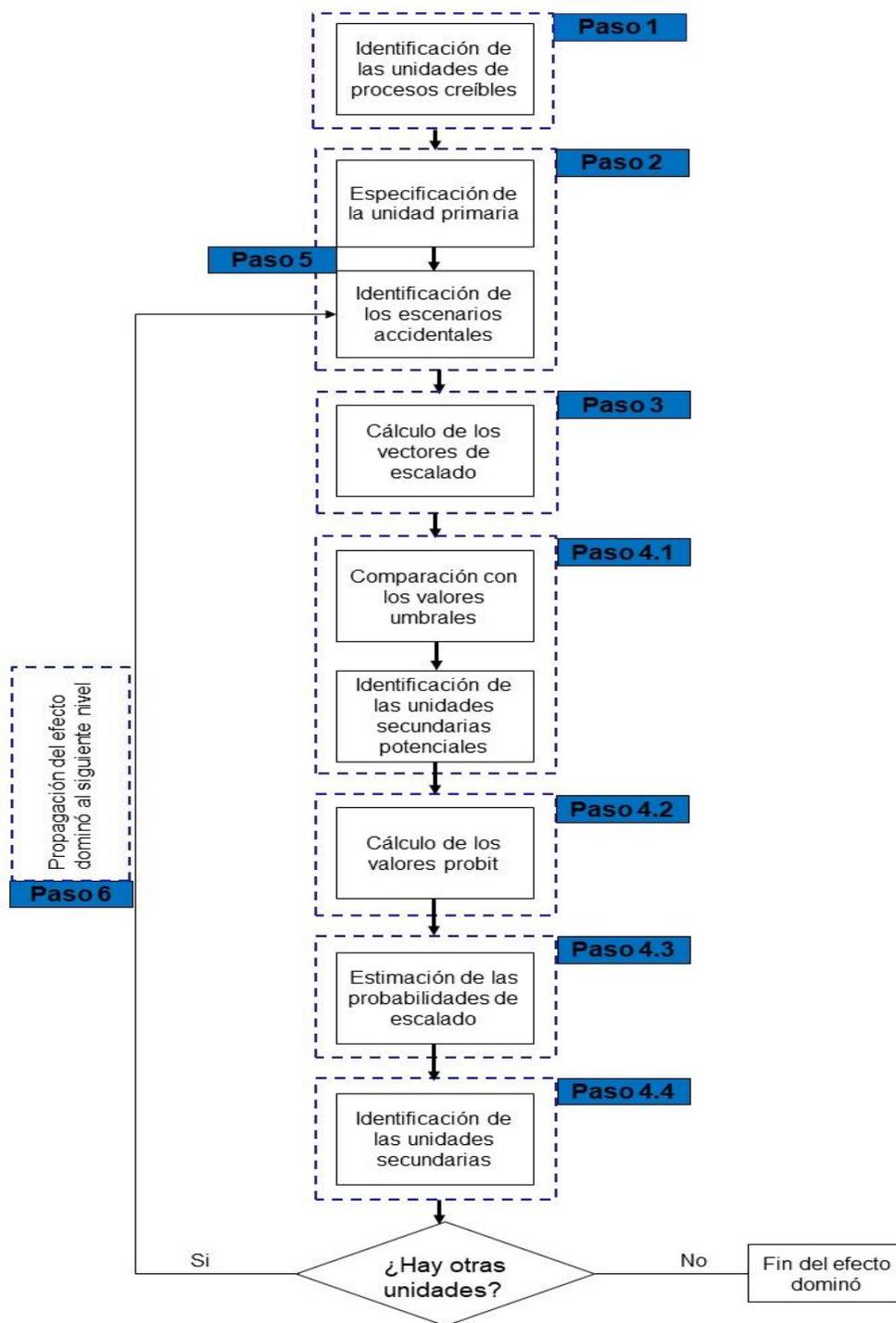
Anexo 7: Categorización de sustancias inflamables según el Manual BEVI.

Categoría de sustancia	Categoría WMS	Límites
Categoría 0	Extremadamente inflamable	Sustancias líquidas y preparaciones con un punto de inflamación inferior a 0 y un punto de ebullición menor o igual a 35 °C. Sustancias gaseosas y preparaciones que pueden incendiarse a temperatura y presión normal cuando se exponen al aire
Categoría 1	Altamente inflamable	Sustancias líquidas y preparaciones con un punto de inflamación por debajo de 21 °C, los cuales, no son extremadamente inflamables.
Categoría 2	Inflamable	Sustancias líquidas y preparaciones con un punto de inflamación mayor o igual a 21 °C y menor o igual a 55 °C
Categoría 3	.	Sustancias líquidas y preparaciones con un punto de inflamación mayor o igual a 55 °C y menor o igual a 100 °C
Categoría 4		Sustancias líquidas y preparaciones con un punto de inflamación mayor que 100°C.

Anexo 8: Categorización del factor por control de ignición.

Categorización	Valor	Características
Ideal	0	Diseño y el mantenimiento garantiza que no exista fuente de ignición en ningún momento.
Excelente	0,1	Diseño y mantenimiento muy buenos. La ignición puede ocurrir solamente a partir de eventos aislados (fallos de equipos impredecible).
Típico	0,25	La planta está diseñada a partir de los estándares internacionales y el mantenimiento se realiza regularmente. La ignición es eliminada en operación normal, pero es potencial para falla de sistemas o circunstancias cambiantes que traen como consecuencia fuentes de ignición ocasionales.
Pobre	.0,5	No tiene en cuenta las normas precisas y el mantenimiento se puede catalogar como pobre. Existe un potencial significativo para posibles fuentes de ignición que pueden ocurrir
Ninguno	Mayor que 0,5	No existe seguimiento de las normas y se realiza poco mantenimiento. Existe un potencial significativo para posibles fuentes de ignición que pueden ocurrir.

Anexo 9: Metodología para la elaboración de la red Bayesiana de probabilidades.



Anexo 10: Tablas de probabilidad para definir los nodos.

Tabla de probabilidad para definir los nodos L_i .

Unidades iésimas		P ($L_i / X_{i1}, X_{i2}$)	
X_{i1}	X_{i2}	Accidente	Seguro
Accidente	Accidente	1	0
Accidente	Seguro	1	0
Seguro	Accidente	1	0
Seguro	Seguro	0	1

Tabla de probabilidad para definir los nodos DL_i .

Nodos		P ($DL_i / X_1, L_1$)	
Unidad Primaria X_1	L_i	Accidente	Seguro
Accidente	Accidente	1	0
Accidente	Seguro	0	1
Seguro	Accidente	0	1
Seguro	Seguro	0	1

Anexo 11: Cuestionario para medir la percepción de riesgos en un área de almacenamiento y procesamiento de hidrocarburos.

El siguiente cuestionario tiene como finalidad determinar la percepción de riesgos respecto a los accidentes, su alcance e impacto en un área de almacenamiento de hidrocarburos. Para ello, debe responder a las siguientes preguntas según corresponda.

Percepción del alcance de los accidentes tóxicos, de incendio y explosión (RP1)

Marque con una X la (s) opción (es) que según corresponda (n):

- 1- Los posibles escenarios que pueden ocurrir en el área de procesamiento y almacenamiento de hidrocarburos son:
 - a) ___ desarrollo de una nube de vapor con propiedades tóxicas
 - b) ___ explosión de una nube de vapor
 - c) ___ llamarada o incendio de una nube de vapor
 - d) ___ charco de fuego
 - e) ___ BLEVE más bola de fuego
 - f) ___ borbollón
 - g) ___ chorro o dardo de fuego
- 2- De ocurrir un charco de fuego en el área, el alcance de este escenario está en función del nivel de:
 - a) ___ sobrepresión
 - b) ___ radiación térmica
 - c) ___ concentración
- 3- De ocurrir el escenario explosión de una nube de vapor, el alcance de este escenario está en función del nivel de:
 - a) ___ sobrepresión
 - b) ___ radiación térmica
 - c) ___ concentración
- 4- De ocurrir la propagación de una nube de vapor con propiedades tóxicas, el alcance de este escenario está en función de:

- a) ___ sobrepresión
 - b) ___ radiación térmica
 - c) ___ concentración
- 5- La radiación superior a 5 kW/m^2 puede generar el efecto de:
- a) ___ muerte en menos de 60 segundos
 - b) ___ quemaduras de segundo grado en menos de 60 segundos
 - c) ___ no provoca afectaciones graves
- 6- La radiación térmica superior a 2 kW/m^2 puede generar el efecto de:
- a) ___ dolor en menos de 60 segundos
 - b) ___ quemaduras de segundo grado en menos de 60 segundos
 - c) ___ no provoca afectaciones graves
- 7- La sobrepresión superior a 3,5 psi puede generar el efecto de:
- a) ___ lesiones probables muy graves como hemorragia pulmonar
 - b) ___ destrucción de edificaciones
 - c) ___ no provoca afectaciones graves
- 8- La sobrepresión superior a 1,0 psi puede generar el efecto de:
- a) ___ destrucción de edificaciones
 - b) ___ rotura de cristales
 - c) ___ no provoca afectaciones graves
- 9- De los siguientes planteamientos relacionados a la influencia de las condiciones meteorológicas en el desarrollo de los accidentes seleccione el o los que considere ciertos:
- a) ___ Las condiciones de calma con baja velocidades de viento favorecen el desarrollo de los accidentes.
 - b) ___ La variable velocidad del viento presenta una gran influencia en el alcance de un posible BLEVE.
 - c) ___ La variable nubosidad no influye en lo absoluto en el desarrollo de una nube de vapor con propiedades tóxicas e inflamables.
- 10-El alcance medido desde el centro de la unidad de proceso en que se produce algún tipo de afectación del escenario charco de fuego, para un tanque de almacenamiento de crudo de 5000 m^3 está en el rango:

- a) ___ 5-20 metros
- b) ___ 21-50 metros
- c) ___ 51-100 metros
- d) ___ 101-150 metros
- e) ___ 151-200 metros

11-El alcance medido desde el centro de la unidad de proceso en que se produce algún tipo de afectación del escenario bola de fuego producto de un BLEVE, para un tanque de almacenamiento de crudo de 5000 m³ está en el rango:

- a) ___ 21-200 metros
- b) ___ 201-500 metros
- c) ___ 501- 1000 metros
- d) ___ 1001-1500 metros
- e) ___ 1501-2500 metros

12-El alcance medido desde el centro de la unidad de proceso en que se produce algún tipo de afectación del escenario explosión de nube de vapor, para un tanque de almacenamiento de crudo que contiene sulfuro de hidrógeno, de 5000 m³ está en el rango:

- a) ___ 21-50 metros
- b) ___ 51-100 metros
- c) ___ 101-150 metros
- d) ___ 151-250 metros
- e) ___ 251-400 metros

13-El alcance medido desde el centro de la unidad de proceso en que se produce algún tipo de afectación del escenario nube tóxica para un tanque de almacenamiento de crudo que contiene sulfuro de hidrógeno, de 5000 m³ está en el rango:

- a) ___ 21-50 metros
- b) ___ 51-100 metros
- c) ___ 101-150 metros
- d) ___ 151-250 metros
- e) ___ 251-400 metros

Percepción de la afectación sobre las personas de accidentes tóxicos, de incendio y explosión (RP2)

14-Seleccione de los siguientes planteamientos cuáles considera verdaderos:

- a) Los mapas de isorriesgos son una herramienta para visualizar en términos probabilísticos los radios de afectación sobre las personas debido a accidentes.
- b) El uso del *software* ALOHA permite estimar las posibles afectaciones sobre las personas en función de los niveles de preocupación.
- c) No es posible definir un radio de acción para la ocurrencia de accidentes con una confianza superior al 90%.

15-El riesgo individual para escenarios de incendio en un radio que cubra toda el área puede alcanzar un valor de:

- a) Muy bajo $1E-10$ hasta $2E-8 a^{-1}$
- b) Bajo $2E-8$ hasta $4E-5 a^{-1}$
- c) Medio $4E-5$ hasta $5E-3 a^{-1}$
- d) Alto $5E-3$ hasta $5E-2 a^{-1}$
- e) Muy alto $5E-2$ hasta $1 a^{-1}$

16-El riesgo individual para escenarios de explosión en un radio que cubra toda el área puede alcanzar un valor de:

- a) Muy bajo $1E-10$ hasta $2E-8 a^{-1}$
- b) Bajo $2E-8$ hasta $4E-5 a^{-1}$
- c) Medio $4E-5$ hasta $5E-3 a^{-1}$
- d) Alto $5E-3$ hasta $5E-2 a^{-1}$
- e) Muy alto $5E-2$ hasta $1 a^{-1}$

17-El riesgo individual para escenarios tóxicos en un radio que cubra toda el área puede alcanzar un valor de:

- a) Muy bajo $1E-10$ hasta $2E-8 a^{-1}$
- b) Bajo $2E-8$ hasta $4E-5 a^{-1}$
- c) Medio $4E-5$ hasta $5E-3 a^{-1}$
- d) Alto $5E-3$ hasta $5E-2 a^{-1}$

e) ___ Muy alto $5E-2$ hasta $1 a^{-1}$

18-El riesgo individual por el efecto conjunto o sinérgicos de accidentes tóxicos, de incendio y explosión en un radio que cubra toda el área puede alcanzar un valor de:

a) ___ Muy bajo $1E-10$ hasta $2E-8 a^{-1}$

b) ___ Bajo $2E-8$ hasta $4E-5 a^{-1}$

c) ___ Medio $4E-5$ hasta $5E-3 a^{-1}$

d) ___ Alto $5E-3$ hasta $5E-2 a^{-1}$

e) ___ Muy alto $5E-2$ hasta $1 a^{-1}$

Percepción del posible desarrollo del efecto dominó (RP3)

19-Seleccione la definición más completa de efecto dominó:

a) ___ El efecto dominó expresa el efecto en cascada o en propagación de los accidentes que pueden ocurrir.

b) ___ El efecto dominó ocurre cuando un accidente denominado primario provoca nuevos accidentes denominados secundarios donde la magnitud de las consecuencias de los accidentes generados es mucho mayor que el del accidente primario de forma aislada.

c) ___ El efecto dominó ocurre cuando un accidente primario provoca otros accidentes de menor envergadura, también se conoce como accidentes en cascada.

20-Seleccione cuáles de los siguientes planteamientos considera ciertos relacionados al efecto dominó:

a) ___ Existen técnicas para cuantificar la probabilidad de efecto dominó como las redes Bayesianas.

b) ___ No es posible pronosticar la ocurrencia del efecto dominó en un área determinada.

c) ___ El efecto dominó intensifica la magnitud de las consecuencias de los accidentes y su ocurrencia se asocia a un accidente mayor.

d) ___ Las redes Bayesianas permiten la actualización de las probabilidades a partir de la incorporación de nueva evidencia.

21-Los vectores de escalado que son los vectores físicos que posibilitan la ocurrencia del efecto dominó son:

- a) ___ radiación térmica
- b) ___ sobrepresión
- c) ___ proyección de misiles

22-La probabilidad de ocurrencia de efecto dominó en el área está en el rango de:

- a) ___ Muy bajo 0-0,01%
- b) ___ Bajo 0,01-0,1%
- c) ___ Medio 0,1-1%
- d) ___ Alto 1-10%
- e) ___ Muy alto 10-100%

23-La probabilidad de ocurrencia de efecto dominó en el área de ocurrir un accidente de incendio y explosión está en el rango de:

- a) ___ Muy bajo 0-0,01%
- b) ___ Bajo 0,01-0,1%
- c) ___ Medio 0,1-1%
- d) ___ Alto 1-10%
- e) ___ Muy alto 10-100%

24-Señale cómo usted considera que es su percepción de riesgos respecto a todos los aspectos antes mencionados:

- a) ___ Muy baja
- b) ___ Baja
- c) ___ Media
- d) ___ Alta
- e) ___ Muy alta

Anexo 12: Comportamiento de las variables meteorológicas.

Nubosidad

Meses	Media	Coefficiente de variación (%)	Desviación estándar
Enero	4	17,9967	0,7378
Febrero	4	17,9967	0,7378
Marzo	4	13,845	0,5676
Abril	3	15,8882	0,5163
Mayo	4	21,356	0,8755
Junio	5	15,7135	0,7071
Julio	5	10,2776	0,483
Agosto	4,5	15,891	0,6992
Septiembre	4,5	15,891	0,6992
Octubre	4	18,7812	0,7888
Noviembre	4,5	11,7121	0,527
Diciembre	4	16,6667	0,6666

Temperatura máxima

Meses	Media	Coefficiente de variación (%)	Desviación estándar
Enero	26,25	2,6448	0,6916
Febrero	25,85	2,7808	0,7208
Marzo	28,15	1,3056	0,3681
Abril	29,7	2,3929	0,7109
Mayo	30,9	2,1177	0,6552
Junio	30,55	2,3972	0,7321
Julio	31,55	1,3668	0,4295
Agosto	31,05	1,5506	0,4853
Septiembre	30,75	2,4842	0,7656
Octubre	29,5	2,3572	0,6963
Noviembre	27,35	2,9726	0,8121
Diciembre	26,55	2,6949	0,7152

Temperatura mínima

Meses	Media	Coefficiente de variaciónn (%)	Desviación estándar
Enero	15,8	2,4873	0,391
Febrero	15,5	2,8347	0,4422
Marzo	17	3,149	0,54
Abril	18,5	2,8335	0,527
Mayo	20,55	3,8223	0,7908
Junio	21,8	2,8873	0,6297
Julio	21,85	4,1467	0,9089
Agosto	21,8	2,8873	0,6297
Septiembre	21,75	2,5733	0,5586
Octubre	20,8	3,511	0,7302
Noviembre	18,65	3,2228	0,6033
Diciembre	16,6	2,868	0,476

Humedad relativa

Meses	Media	Coficiente de variación (%)	Desviación estándar
Enero	78	1,2087	0,9428
Febrero	75	1,0886	0,8164
Marzo	74	1,1033	0,8164
Abril	73	1,1184	0,8164
Mayo	78	1,0467	0,8164
Junio	83	0,9837	0,8164
Julio	81	1,4255	1,1547
Agosto	82	0,9957	0,8164
Septiembre	84	0,972	0,8164
Octubre	84	0,972	0,8164
Noviembre	81	1,4255	1,1547
Diciembre	79	1,0335	0,8164

Anexo 13: Resultados de las corridas en ALOHA.

U/P afectada	Distancia entre U/P (m)	Condición meteorológica (incendios) CRUDO	Intensidad de la radiación (kw/m2)	Condición meteorológica (explosiones) H2S	Sobrepresión (psi) VCE H2S	Concentración (ppm) NT Exterior H2S
Unidad de Proceso: Tanque 6						
Tanque 7	193,6	sw. Temp max	2,8	ssw. Temp max	0,214	4640
		sw. Temp min	3	ssw. Temp min	0,207	3430
		calma.Temp max	2,8	Calma. Temp max	0,329	9170
		Calma.Temp min	3	Calma. Temp min	0,329	9290
Tanque 8	174,28	sw. Temp max	3,5	sw. Temp max	0,327	10000
		sw. Temp min	3,7	sw. Temp min	0,322	10200
		calma.Temp max	3,5	Calma. Temp max	0,38	11500
		Calma.Temp min	3,7	Calma. Temp min	0,377	11600
Tanque 14	122,1	sw. Temp max	7,2	nw. Temp max	0,382	11200
		sw. Temp min	7,6	nw. Temp min	0,382	11700
		calma.Temp max	7,2	Calma. Temp max	0,633	17100
		Calma.Temp min	7,6	Calma. Temp min	0,609	16700
Tanque 15	214,7	sw. Temp max	2,3	wsw. Temp max	0,253	7240
		sw. Temp min	2,4	wsw. Temp min	0,25	7360
		calma.Temp max	2,3	Calma. Temp max	0,285	7280
		Calma.Temp min	2,4	Calma. Temp min	0,287	7380
Tanque	238,7	sw. Temp max	1,8	wsw. Temp	0,221	6020

16				max		
		sw. Temp min	1,9	wsw. Temp min	0,217	6200
		calma.Temp max	1,8	Calma. Temp max	0,248	5740
		Calma.Temp min	1,9	Calma. Temp min	0,251	5830
Bala 1	68,69	sw. Temp max	20,8	nne. Temp max	0,781	23500
		sw. Temp min	22,1	nne. Temp min	0,786	24400
		calma.Temp max	20,8	Calma. Temp max	6,37	42500
		Calma.Temp min	22,1	Calma. Temp min	6,37	40400
Bala 2	73,9	sw. Temp max	18,4	nne. Temp max	0,699	21500
		sw. Temp min	19,5	nne. Temp min	0,702	22300
		calma.Temp max	18,4	Calma. Temp max	4,18	37400
		Calma.Temp min	19,5	Calma. Temp min	3,35	36300
Bala 3	81,07	sw. Temp max	15,6	nne. Temp max	0,613	18800
		sw. Temp min	16,6	nne. Temp min	0,615	19500
		calma.Temp max	15,6	Calma. Temp max	1,92	34700
		Calma.Temp min	16,6	Calma. Temp min	1,67	32800
Bala 4	86,05	sw. Temp max	14,1	nne. Temp max	0,564	17400
		sw. Temp min	14,9	nne. Temp min	0,565	18100
		calma.Temp max	14,1	Calma. Temp max	1,46	30100
		Calma.Temp	14,9	Calma. Temp	1,29	29300

		min		min		
Inter espiral	85,38	sw. Temp max	14,3	nne. Temp max	0,565	17500
		sw. Temp min	15,1	nne. Temp min	0,565	18200
		Calma.Temp max	14,3	Calma. Temp max	1,5	30700
		Calma.Temp min	15	Calma. Temp min	1,33	29900
Unidad de Proceso: Tanque 7						
Tanque 6	193,6	nne.Temp max	1,8			
		nne.Temp min	1,9			
		Calma.Temp máx	1,8			
		Calma. Temp mín	1,9			
Tanque 8	69,74	nne. Temp max	13,4			
		nne. Temp min	14,2			
		Calma. Temp max	13,4			
		Calma. Temp max	14,2			
Tanque 14	286,55	nne. Temp max	0,8			
		nne. Temp min	0,9			
		Calma. Temp max	0,8			

		Calma. Temp max	0,83			
Tanque 15	210,51	nne. Temp max	1,5			
		nne. Temp min	1,6			
		Calma. Temp max	1,5			
		Calma. Temp max	1,6			
Tanque 16	246,28	nne. Temp max	1,1			
		nne. Temp min	1,2			
		Calma. Temp max	1,1			
		Calma. Temp max	1,2			
Bala 1	258,41	nne. Temp max	1			
		nne. Temp min	1			
		Calma. Temp max	1			
		Calma. Temp max	1			
Bala 2	264	nne. Temp max	1			
		nne. Temp min	1			
		Calma. Temp max	0,93			

		Calma. Temp max	1			
Bala 3	270,19	nne. Temp max	0,9			
		nne. Temp min	1			
		Calma. Temp max	0,9			
		Calma. Temp max	0,94			
Bala 4	275,89	nne. Temp max	0,9			
		nne. Temp min	0,9			
		Calma. Temp max	0,9			
		Calma. Temp max	0,9			
Inter espiral	271,14	nne. Temp max	0,9			
		nne. Temp min	0,93			
		Calma. Temp max	0,9			

		Calma. Temp max	0,93			
Unidad de Proceso: Tanque 8						
Tanque 6	174,28	n. Temp max	2,23	ne. Temp max	0,292	7540
		n. Temp min	2,4	ne. Temp min	0,297	2710
		Calma. Temp max	2,1	Calma. Temp max	0,57	15200
		Calma. Temp min	2,2	Calma. Temp min	0,507	4700
Tanque 7	69,74	n. Temp max	13,4	se. Temp max	1,12	32000
		n. Temp min	14,2	se. Temp min	1,5	19700
		Calma. Temp max	15	Calma. Temp max	2,7	51200
		Calma. Temp min	16	Calma. Temp min	3,21	30900
Tanque 14	241,05	n. Temp max	1,13	nne. Temp max	0,197	4340
		n. Temp min	1,2	nne. Temp min	0,195	1460
		Calma. Temp max	1,2	Calma. Temp max	0,371	8800

		Calma. Temp min	1,2	Calma. Temp min	0,371	2430
Tanque 15	139,87	n. Temp max	3,5	nw. Temp max	0,425	12400
		n. Temp min	3,7	nw. Temp min	0,463	5030
		Calma. Temp max	3,5	Calma. Temp max	0,782	21700
		Calma. Temp min	3,7	Calma. Temp min	0,819	7490
Tanque 16	175,83	n. Temp max	2,2	nw. Temp max	0,316	8750
		n. Temp min	2,3	nw. Temp min	0,333	3200
		Calma. Temp max	2,1	Calma. Temp max	0,563	14900
		Calma. Temp min	2,2	Calma. Temp min	0,579	4620
Bala 1	239,86	n. Temp max	1,14	ne. Temp max	0,196	4350
		n. Temp min	1,2	ne. Temp min	0,194	1450
		Calma. Temp max	1,2	Calma. Temp max	0,373	8810
		Calma. Temp min	1,2	Calma. Temp min	0,374	2460
Bala 2	246,81	n. Temp max	1,1	ne. Temp max	0,189	4140
		n. Temp min	1,14	ne. Temp min	0,187	1370

		Calma. Temp max	1,2	Calma. Temp max	0,36	8260
		Calma. Temp min	1,2	Calma. Temp min	0,359	2300
Bala 3	253,97	n. Temp max	1	ne. Temp max	0,182	3930
		n. Temp min	1,1	ne. Temp min	0,18	1290
		Calma. Temp max	1	Calma. Temp max	0,346	7940
		Calma. Temp min	1,1	Calma. Temp min	6,37	61200
Bala 4	259,9	n. Temp max	1	ne. Temp max	0,193	5960
		n. Temp min	1	ne. Temp min	0,331	6930
		Calma. Temp max	1	Calma. Temp max	0,337	9260
		Calma. Temp min	1	Calma. Temp min	2,19	19400
Inter espiral	258,27	n. Temp max	1	ne. Temp max	0,195	6020
		n. Temp min	1	ne. Temp min	0,334	7010
		Calma. Temp max	1	Calma. Temp max	0,339	9360
		Calma. Temp min	1	Calma. Temp min	2,69	19700

Unidad de Proceso: Tanque 14

Tanque 6	122,1	s. Temp max	4,61			
		s. Temp min	4,88			
		Calma. Temp max	4,61			
		Calma. Temp min	4,88			
Tanque 7	286,55	s. Temp max	0,78			
		s. Temp min	0,83			
		Calma. Temp max	0,78			
		Calma. Temp min	0,83			
Tanque 8	241,05	s. Temp max	1,13			
		s. Temp min	1,19			
		Calma. Temp max	1,13			
		Calma. Temp min	1,19			
Tanque 15	200,55	s. Temp max	1,7			
		s. Temp min	1,76			
		Calma. Temp	1,66			

		max				
		Calma. Temp min	1,76			
Tanque 16	205,37	s. Temp max	1,6			
		s. Temp min	1,67			
		Calma. Temp max	1,58			
		Calma. Temp min	1,67			
Bala 1	93,18	s. Temp max	7,86			
		s. Temp min	8,32			
		Calma. Temp max	7,86			
		Calma. Temp min	8,32			
Bala 2	96,74	s. Temp max	7,31			
		s. Temp min	7,73			
		Calma. Temp max	7,31			
		Calma. Temp min	7,73			
Bala 3	99,4	s. Temp max	6,93			

		s. Temp min	7,33			
		Calma. Temp max	6,93			
		Calma. Temp min	7,33			
Bala 4	102,12	s. Temp max	6,57			
		s. Temp min	6,96			
		Calma. Temp max	6,57			
		Calma. Temp min	6,96			
Inter espiral	134,4	s. Temp max	3,8			
		s. Temp min	4,02			
		Calma. Temp max	3,8			
		Calma. Temp min	4,02			
Unidad de Proceso: Tanque 15						
Tanque 6	214,7	e. Temp max	1,49	ene.Temp max	0,208	6480
		e. Temp min	1,59	ene. Temp min	0,352	7730
		Calma. Temp	1,44	Calma. Temp	0,34	8160

		max		max		
		Calma. Temp min	1,52	Calma. Temp min	1,6	15500
Tanque 7	210,51	e. Temp max	1,56	se. Temp max	0,237	6910
		e. Temp min	1,66	se. Temp min	0,423	9650
		Calma. Temp max	1,5	Calma. Temp max	0,349	8470
		Calma. Temp min	1,59	Calma. Temp min	2,31	16200
Tanque 8	139,87	e. Temp max	3,71	se. Temp max	0,403	12700
		e. Temp min	3,99	se. Temp min	1,13	21700
		Calma. Temp max	3,5	Calma. Temp max	0,599	18100
		Calma. Temp min	3,7	Calma. Temp min	6,37	52400
Tanque 14	200,55	e. Temp max	1,73	ne. Temp max	0,209	4490
		e. Temp min	1,84	ne. Temp min	0,204	1560
		Calma. Temp max	1,66	Calma. Temp max	0,357	9270
		Calma. Temp min	1,76	Calma. Temp min	0,394	2710
Tanque	36,84	e. Temp max	40,1	nw. Temp max	2,69	59200

16		e. Temp min	44,4	nw. Temp min	6,37	54100
		Calma. Temp max	36,2	Calma. Temp max	6,37	84200
		Calma. Temp min	38,6	Calma. Temp min	6,37	83800
Bala 1	252,85	e. Temp max	1,05	ene. Temp max	0,149	2710
		e. Temp min	1,12	ene. Temp min	0,14	877
		Calma. Temp max	1,02	Calma. Temp max	0,269	5940
		Calma. Temp min	1,08	Calma. Temp min	0,289	1560
Bala 2	260,93	e. Temp max	0,98	ene. Temp max	0,143	2560
		e. Temp min	1,05	ene. Temp min	0,135	825
		Calma. Temp max	0,95	Calma. Temp max	0,259	5480
		Calma. Temp min	1,01	Calma. Temp min	0,277	1440
Bala 3	267,07	e. Temp max	0,93	ene. Temp max	0,139	2450

		e. Temp min	0,99	ene. Temp min	0,131	788
		Calma. Temp max	0,91	Calma. Temp max	0,252	5220
		Calma. Temp min	0,96	Calma. Temp min	0,269	1350
Bala 4	272,83	e. Temp max	0,89	ene. Temp max	0,131	1530
		e. Temp min	0,95	ene. Temp min	0,104	329
		Calma. Temp max	0,87	Calma. Temp max	0,246	5000
		Calma. Temp min	0,92	Calma. Temp min	0,261	1270
Inter espiral	286,96	e. Temp max	0,8	ene. Temp max	0,127	2150
		e. Temp min	0,85	ene. Temp min	0,12	684
		Calma. Temp max	0,78	Calma. Temp max	0,231	4500
		Calma. Temp min	0,83	Calma. Temp min	0,245	1110
Unidad de Proceso: Tanque 16						
Tanque	238,7	e. Temp max	1,22	e. Temp max	0,167	3300

6		e. Temp min	1,29	e. Temp min	0,161	1080
		Calma. Temp max	1,15	Calma. Temp max	0,289	6580
		Calma. Temp min	1,22	Calma. Temp min	0,312	1810
Tanque 7	246,28	e. Temp max	1,14	se. Temp max	0,176	3690
		e. Temp min	1,2	se. Temp min	0,175	1240
		Calma. Temp max	1,08	Calma. Temp max	0,279	6230
		Calma. Temp min	1,14	Calma. Temp min	0,299	1680
Tanque 8	175,83	e. Temp max	2,39	se. Temp max	0,268	6710
		e. Temp min	2,53	se. Temp min	0,273	2400
		Calma. Temp max	2,19	Calma. Temp max	0,427	11700
		Calma. Temp min	2,31	Calma. Temp min	0,474	3620
Tanque 14	205,37	e. Temp max	1,69	ene. Temp max	0,192	3950
		e. Temp min	1,79	ene. Temp min	0,184	1330
		Calma. Temp	1,58	Calma. Temp	0,347	8840

		max		max		
		Calma. Temp min	1,67	Calma. Temp min	0,382	2590
Tanque 15	36,84	e. Temp max	45,8	se. Temp max	2,67	59200
		e. Temp min	49,8	se. Temp min	6,36	53600
		Calma. Temp max	36,2	Calma. Temp max	6,36	84400
		Calma. Temp min	38,6	Calma. Temp min	6,36	84200
Bala 1	270,04	e. Temp max	0,93	ene. Temp max	0,137	2410
		e. Temp min	0,98	ene. Temp min	0,129	775
		Calma. Temp max	0,89	Calma. Temp max	0,249	5140
		Calma. Temp min	0,94	Calma. Temp min	0,265	1320
Bala 2	276,08	e. Temp max	0,88	ene. Temp max	0,134	2310
		e. Temp min	0,93	ene. Temp min	0,126	742
		Calma. Temp max	0,85	Calma. Temp max	0,243	4920

		Calma. Temp min	0,9	Calma. Temp min	0,258	1240
Bala 3	283,42	e. Temp max	0,83	ene. Temp max	0,13	2210
		e. Temp min	0,88	ene. Temp min	0,122	705
		Calma. Temp max	0,8	Calma. Temp max	0,235	4630
		Calma. Temp min	0,85	Calma. Temp min	0,249	1150
Bala 4	289,84	e. Temp max	0,79	ene. Temp max	0,122	1370
		e. Temp min	0,84	ene. Temp min	-	293
		Calma. Temp max	0,76	Calma. Temp max	0,229	4390
		Calma. Temp min	0,81	Calma. Temp min	0,242	1080
Inter espiral	305,97	e. Temp max	0,71	ene. Temp max	0,114	1240
		e. Temp min	0,75	ene. Temp min	-	264
		Calma. Temp max	0,68	Calma. Temp max	0,215	3910

		Calma. Temp min	0,72	Calma. Temp min	0,226	928
Unidad de Proceso: Bala 1						
Tanque 6	68,69			ssw. Temp max	0,39	11500
				ssw. Temp min	0,393	11600
				Calma. Temp max	0,843	22700
				Calma. Temp min	0,793	21500
Tanque 7	258,41			ssw. Temp max	No signif	1310
				ssw. Temp min	No signif	1320
				Calma. Temp max	0,122	1010
				Calma. Temp min	0,12	1090
Tanque 8	239,86			sw. Temp max	No signif	1510
				sw. Temp min	No signif	1540
				Calma. Temp max	0,134	1320
				Calma. Temp	0,132	1320

				min		
Tanque 14	93,18			wnw. Temp max	0,222	4950
				wnw. Temp min	0,222	5050
				Calma. Temp max	0,423	8310
				Calma. Temp min	0,414	8160
Tanque 15	252,85			wsw. Temp max	No signif	1380
				wsw. Temp min	No signif	1410
				Calma. Temp max	0,125	1170
				Calma. Temp min	0,123	1170
Tanque 16	270,04			wsw. Temp max	No signif	1220
				wsw. Temp min	No signif	1240
				Calma. Temp max	0,116	993

				Calma. Temp min	0,114	987
Bala 2	5,69			ne. Temp max	6,37	183000
				ne. Temp min	6,37	179000
				Calma. Temp max	6,37	191000
				Calma. Temp min	6,37	186000
Bala 3	12,82			ne. Temp max	6,37	70000
				ne. Temp min	6,37	70100
				Calma. Temp max	6,37	145000
				Calma. Temp min	6,37	133000
Bala 4	19,38			ne. Temp max	2,39	47500
				ne. Temp min	2,41	47700
				Calma. Temp max	6,37	105000
				Calma. Temp min	6,37	96200
Inter espiral	28,56			se. Temp max	0,953	22900
				se. Temp min	0,946	23300

				Calma. Temp max	4,35	42700
				Calma. Temp min	4	39900
Unidad de Proceso: Bala 2						
Tanque 6	73,9			ssw. Temp max	0,3	4450
				ssw. Temp min	0,297	4300
				Calma. Temp max	0,521	9460
				Calma. Temp min	0,507	9130
Tanque 7	264			ssw. Temp max	No sig	404
				ssw. Temp min	No sig	389
				Calma. Temp max	0,109	772
				Calma. Temp min	0,107	782
Tanque 8	246,81			sw. Temp max	No sig	534
				sw. Temp min	No sig	518
				Calma. Temp	0,119	887

				max		
				Calma. Temp min	0,116	903
Tanque 14	96,74			wnw. Temp max	0,2	2260
				wnw. Temp min	0,198	2130
				Calma. Temp max	0,37	5900
				Calma. Temp min	0,36	5740
Tanque 15	260,93			wsw. Temp max	No sig	494
				wsw. Temp min	No sig	484
				Calma. Temp max	0,111	783
				Calma. Temp min	0,108	796
Tanque 16	276,08			wsw. Temp max	No sig	443
				wsw. Temp min	No sig	433

				Calma. Temp max	0,104	696
				Calma. Temp min	0,101	707
Bala 1	5,69			sw. Temp max	6,36	191000
				sw. Temp min	6,36	189000
				Calma. Temp max	6,36	191000
				Calma. Temp min	6,36	185000
Bala 3	7,95			ne. Temp max	6,36	141000
				ne. Temp min	6,36	139000
				Calma. Temp max	6,36	177000
				Calma. Temp min	6,36	169000
Bala 4	14,04			ne. Temp max	6,36	65800
				ne. Temp min	6,36	65900
				Calma. Temp max	6,36	137000
				Calma. Temp min	6,36	125000

Inter espiral	24,28			se. Temp max	3,04	34900
				se. Temp min	2,92	35600
				Calma. Temp max	6,36	76400
				Calma. Temp min	6,36	70900
Unidad de Proceso: Bala 3						
Tanque 6	81,07			ssw. Temp max	0,313	8960
				ssw. Temp min	0,316	9020
				Calma. Temp max	0,582	16900
				Calma. Temp min	0,565	16400
Tanque 7	270,19			ssw. Temp max	No sig	1220
				ssw. Temp min	No sig	1230
				Calma. Temp max	0,116	992
				Calma. Temp min	0,114	986
Tanque	253,97			sw. Temp max	No sig	1360

8				sw. Temp min	No sig	1390
				Calma. Temp max	0,125	1150
				Calma. Temp min	0,123	1140
Tanque 14	99,4			wnw. Temp max	0,205	4520
				wnw. Temp min	0,205	4600
				Calma. Temp max	0,388	6930
				Calma. Temp min	0,381	6740
Tanque 15	267,07			wsw. Temp max	No sig	1240
				wsw. Temp min	No sig	1260
				Calma. Temp max	0,117	1020
				Calma. Temp min	0,116	1010
Tanque 16	283,42			wsw. Temp max	No sig	1100

				wsw. Temp min	No sig	1130
				Calma. Temp max	0,109	882
				Calma. Temp min	0,108	878
Bala 1	12,82			sw. Temp max	6,36	80900
				sw. Temp min	6,36	79600
				Calma. Temp max	6,36	145000
				Calma. Temp min	6,36	133000
Bala 2	7,95			sw. Temp max	6,36	144000
				sw. Temp min	6,36	142000
				Calma. Temp max	6,36	177000
				Calma. Temp min	6,36	169000
Bala 4	5,58			ne. Temp max	6,36	185000
				ne. Temp min	6,36	181000
				Calma. Temp max	6,36	192000

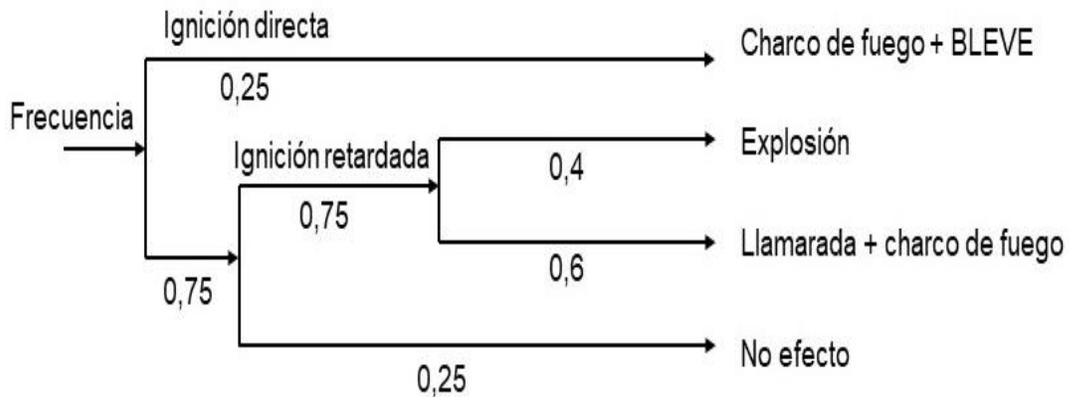
				Calma. Temp min	6,36	186000
Inter espiral	19,79			se. Temp max	6,36	47800
				se. Temp min	6,36	48900
				Calma. Temp max	6,36	102000
				Calma. Temp min	6,36	93700
Unidad de Proceso: Bala 4						
Tanque 6	86,05			ssw. Temp max	0,269	5970
				ssw. Temp min	0,266	6040
				Calma. Temp max	0,471	9320
				Calma. Temp min	0,459	9020
Tanque 7	275,89			ssw. Temp max	No sig	871
				ssw. Temp min	No sig	894
				Calma. Temp max	0,111	601
				Calma. Temp	0,109	604

				min		
Tanque 8	259,9			sw. Temp max	No sig	965
				sw. Temp min	No sig	989
				Calma. Temp max	0,119	683
				Calma. Temp min	0,117	685
Tanque 14	102,12			wnw. Temp max	0,19	3040
				wnw. Temp min	0,188	2960
				Calma. Temp max	0,346	5370
				Calma. Temp min	0,337	5240
Tanque 15	272,83			wsw. Temp max	No sig	889
				wsw. Temp min	No sig	908
				Calma. Temp max	0,112	611
				Calma. Temp min	0,11	613

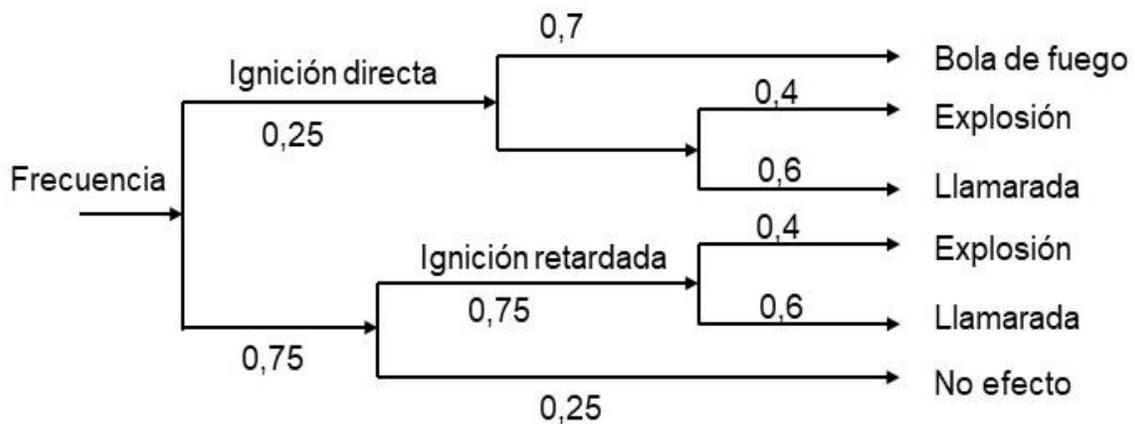
Tanque 16	289,84			wsw. Temp max	No sig	600
				wsw. Temp min	No sig	596
				Calma. Temp max	No sig	618
				Calma. Temp min	No sig	628
Bala 1	19,38			sw. Temp max	2,51	44500
				sw. Temp min	2,48	44500
				Calma. Temp max	6,36	72400
				Calma. Temp min	6,36	66800
Bala 2	14,04			sw. Temp max	6,36	62500
				sw. Temp min	6,36	62300
				Calma. Temp max	6,36	99100
				Calma. Temp min	6,36	90900
Bala 3	5,58			sw. Temp max	6,36	191000
				sw. Temp min	6,36	188000

				Calma. Temp max	6,36	192000
				Calma. Temp min	6,36	186000
Inter espiral	17,37			se. Temp max	2,26	45900
				se. Temp min	2,28	46300
				Calma. Temp max	6,36	83000
				Calma. Temp min	6,36	76300

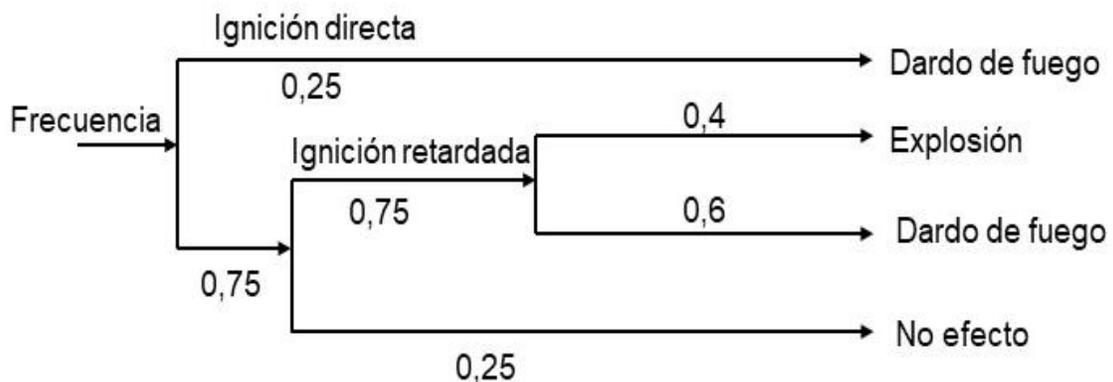
Anexo 14a: Árbol de suceso para líquidos en tanques atmosféricos.



Anexo 14b: Árbol de suceso para gases en tanques atmosféricos.



Anexo 14c: Árbol de suceso para gases en tanque presurizados.



Anexo 15: Resultados de la frecuencia inicial para posibles escenarios de incendio.

U/P	Frecuencia	Tipo de escenario
TK 6	0,125	Charco de fuego + BLEVE
	0,169	Llamarada y pool fire
	0,035	Bola de fuego
	0,030	Flashfire por Ign directa
	0,067	Flashfire por Ign retardada
TK 7	0,050	Charco de fuego + BLEVE
	0,067	Llamarada y pool fire
TK 8	0,075	Charco de fuego + BLEVE
	0,101	Llamarada y pool fire
Tk 14	0,100	Charco de fuego + BLEVE
	0,135	Llamarada y pool fire
Tk 15	0,100	Charco de fuego + BLEVE
	0,135	Llamarada y pool fire
	0,017	Bola de fuego
	0,015	Flashfire por ign directa
	0,033	Flashfire por Ign retardada
B1, B3 y B4	0,075	Charco de fuego + BLEVE
	0,101	Llamarada y pool fire
B2	0,125	Charco de fuego + BLEVE
	0,168	Llamarada y pool fire

Anexo 16: Resultados de la frecuencia inicial para posibles escenarios explosión.

U/P	Probabilidad	Tipo de escenario
TK 6	0,135	Explosión de petróleo
	0,020	Explosión de gas Ign directa
	0,045	Explosión de gas Ign retardada
TK 7	0,045	Explosión de petróleo
TK 8	0,067	Explosión de petróleo
	0,01	Explosión de gas Ign directa
	0,022	Explosión de gas Ign retardada
Tk 14	0,090	Explosión de petróleo
Tk 15	0,090	Explosión de petróleo
	0,01	Explosión de gas Ign directa
	0,022	Explosión de gas Ign retardada
B1, B3 Y B4	0,067	Explosión de petróleo
B2	0,112	Explosión de petróleo
	0,022	Explosión de gas

Anexo 17: Distancia entre los equipos.

Equipos	Distancia (m)									
	Tanque 6	Tanque 7	Tanque 8	Tanque 14	Tanque 15	Tanque 16	Bala 1	Bala 2	Bala 3	Bala 4
Tanque 6		193,6	174,28	122,1	214,7	238,7	68,69	73,9	81,07	86,05
Tanque 7	193,6		69,74	286,55	210,51	246,28	258,41	264	270,19	275,89
Tanque 8	174,28	69,74		241,05	139,87	175,83	239,86	246,81	253,97	259,9
Tanque 14	122,1	286,55	241,05		200,55	205,37	93,18	96,74	99,4	102,12
Tanque 15	214,7	210,51	139,87	200,55		36,84	252,85	260,93	267,07	272,83
Tanque 16	238,7	246,28	175,83	205,37	36,84		270,04	276,08	283,42	289,84
Bala 1	68,69	258,41	239,86	93,18	252,85	270,04		5,69	12,82	19,38
Bala 2	73,9	264	246,81	96,74	260,93	276,08	5,69		7,95	14,04
Bala 3	81,07	270,19	253,97	99,4	267,07	283,42	12,82	7,95		5,58
Bala 4	86,05	275,89	259,9	102,12	272,83	289,84	19,38	14,04	5,58	
Inter de calor	85,38	271,14	258,27	134,4	286,96	305,97	28,56	24,28	19,79	17,37

Anexo 18: Resultados de los valores de intensidad de la radiación y sobrepresión.

Equipos	Valores de intensidad de la radiación (kW/m ²)					
	Tanque 6	Tanque 7	Tanque 8	Tanque 14	Tanque 15	Tanque 16
Tanque 6	-	1,90	2,40	4,88	1,59	1,29
Tanque 7	3,00	-	16,00	0,83	1,66	1,20
Tanque 8	3,70	14,20	-	1,19	3,99	2,53
Tanque 14	7,60	0,90	1,20	-	1,84	1,79
Tanque 15	2,40	1,60	3,70	1,76	-	49,8
Tanque 16	1,90	1,20	2,30	1,67	44,40	-
Bala 1	22,10	1,00	1,20	8,32	1,12	0,98
Bala 2	19,50	1,00	1,20	7,73	1,05	0,93
Bala 3	16,6	1,00	1,10	7,33	0,99	0,88
Bala 4	14,9	0,90	1,00	6,96	0,95	0,84
Intercambiadores de calor	15,1	0,93	1,00	4,02	0,85	0,75

Equipos	Sobrepresión (psi)							
	Tanque 6	Tanque 8	Tanque 15	Tanque 16	Bala 1	Bala 2	Bala 3	Bala 4
Tanque 6	-	0,57	1,60	0,31	0,85	0,52	0,58	0,47
Tanque 7	0,33	3,21	2,31	0,30	0,12	0,11	0,12	0,11
Tanque 8	0,38	-	6,37	0,47	0,13	0,12	0,13	0,12
Tanque 14	0,63	0,37	0,40	0,38	0,42	0,40	0,39	0,35
Tanque 15	0,29	0,82	-	6,36	0,13	0,12	0,12	0,11
Tanque 16	0,25	0,58	6,37	-	0,12	0,10	0,11	
Bala 1	6,37	0,37	0,29	0,27	-	6,36	6,36	6,36
Bala 2	3,35	0,36	0,28	0,26	6,37	-	6,36	6,36
Bala 3	1,92	6,37	0,27	0,25	6,37	6,36	-	6,36
Bala 4	1,46	2,19	0,26	0,24	6,37	6,36	6,36	-
Intercambiadores de calor	1,50	2,69	0,25	0,22	4,35	6,36	6,36	6,36

Anexo 19: Resultados de las probabilidades de escalado por radiación y sobrepresión.

Equipos	Probabilidad de escalado por radiación					
	Tanque 6	Tanque 7	Tanque 8	Tanque 14	Tanque 15	Tanque 16
Tanque 6	-	3,71E-07	4,09E-06	1,44E-03	0	0
Tanque 7	1,31E-04	-	4,40E-01	0	5,30E-07	0
Tanque 8	6,64E-04	3,45 E-01	-	0	1,14E-03	3,17E-05
Tanque 14	1,13E-01	0	0	-	1,52E-05	1,17E-05
Tanque 15	6,50E-06	0	2,80E-04	0	-	9,76E-01
Tanque 16	6,49E-07	0	4,29E-06	0	9,58E-01	-
Bala 1	1,31E-04	0	0	0	0	0
Bala 2	3,91E-05	0	0	0	0	0
Bala 3	7,46E-06	0	0	0	0	0
Bala 4	2,22E-06	0	0	0	0	0
Interc de calor	5,08E-03	0	0	0	0	0

Equipos	Probabilidad de escalado por sobrepresión							
	Tanque 6	Tanque 8	Tanque 15	Tanque 16	Bala 1	Bala 2	Bala 3	Bala 4
Tanque 6	-	8,16E-05	1,06E-01	0	2,48E-03	3,45E-05	1,04E-04	1,17E-05
Tanque 7	0	6,74E-01	3,63E-01	0	0	0	0	0
Tanque 8	1,02E-06	-	9,83E-01	1,22E-05	0	0	0	0
Tanque 14	2,24E-04	7,55E-07	1,51E-06	1,07E-06	3,56E-06	7,18E-07	1,30E-06	3,18E-07
Tanque 15	0	1,99E-03	-	9,83E-01	0	0	0	0
Tanque 16	0	9,57E-05	9,83E-01	-	0	0	0	0
Bala 1	1,25E-01	0	0	0	-	1,23E-01	1,23E-01	1,23E-01
Bala 2	1,44E-03	0	0	0	1,25E-01	-	1,23E-01	1,23E-01
Bala 3	0	1,25E-01	0	0	1,25E-01	1,23E-01	-	1,23E-01
Bala 4	0	0	0	0	0,12E-01	1,23E-01	1,23E-01	1,23E-01
Interc de calor	0	5,30E-07	0	0	2,56E-03	1,23E-01	1,23E-01	1,23E-01

Anexo 20: Resultados del riesgo individual.

Distancia (m)	Vulnerabilidad por radiación	Probabilidad de efecto dominó	Riesgo individual por radiación
50	1,00E+00	0,0981	9,8100E-02
100	1,00E+00		9,8100E-02
150	1,00E+00		9,8097E-02
200	9,90E-01		9,7076E-02
250	8,39E-01		8,2297E-02
300	4,68E-01		4,5923E-02
400	3,92E-02		3,8459E-03
500	1,14E-03		1,1225E-04
700	3,02E-07		2,9616E-08

Distancia (m)	Equipos	Riesgo individual por toxicidad	Riesgo individual total por toxicidad
50	Tanque 15	1,00E-01	1,9799E-01
	Tanque 16	9,80E-02	
100	Tanque 15	1,00E-01	1,9799E-01
	Tanque 16	9,80E-02	
150	Tanque 15	1,00E-01	1,9816E-01
	Tanque 16	9,80E-02	
	Tanque 8	1,64E-04	
200	Tanque 15	1,00E-01	1,9816E-01
	Tanque 16	9,80E-02	
	Tanque 8	1,64E-04	
250	Tanque 15	1,00E-01	1,9867E-01
	Tanque 16	9,80E-02	
	Tanque 8	1,64E-04	
	Tanque 6	1,61E-04	
	Bala 1	1,73E-04	
	Bala 2	1,81E-04	
300	Tanque 15	1,00E-01	1,9891E-01
	Tanque 16	9,80E-02	
	Tanque 8	1,64E-04	
	Tanque 6	1,61E-04	
	Bala 1	1,73E-04	
	Bala 2	1,81E-04	
	Bala 3	9,68E-05	

	Bala 4	1,44E-04	
400	Tanque 15	6,77E-02	1,6296E-01
	Tanque 16	9,49E-02	
	Tanque 8	1,64E-04	
	Tanque 6	1,54E-04	
	Bala 1	1,11E-07	
	Bala 2	3,27E-07	
	Bala 3	1,45E-06	
	Bala 4	4,84E-06	
500	Tanque 15	1,36E-03	1,5247E-02
	Tanque 16	1,37E-02	
	Tanque 8	1,64E-04	
	Tanque 6	2,13E-06	
700	Tanque 8	1,58E-04	1,5781E-04
1000	Tanque 8	1,43E-07	1,4344E-07

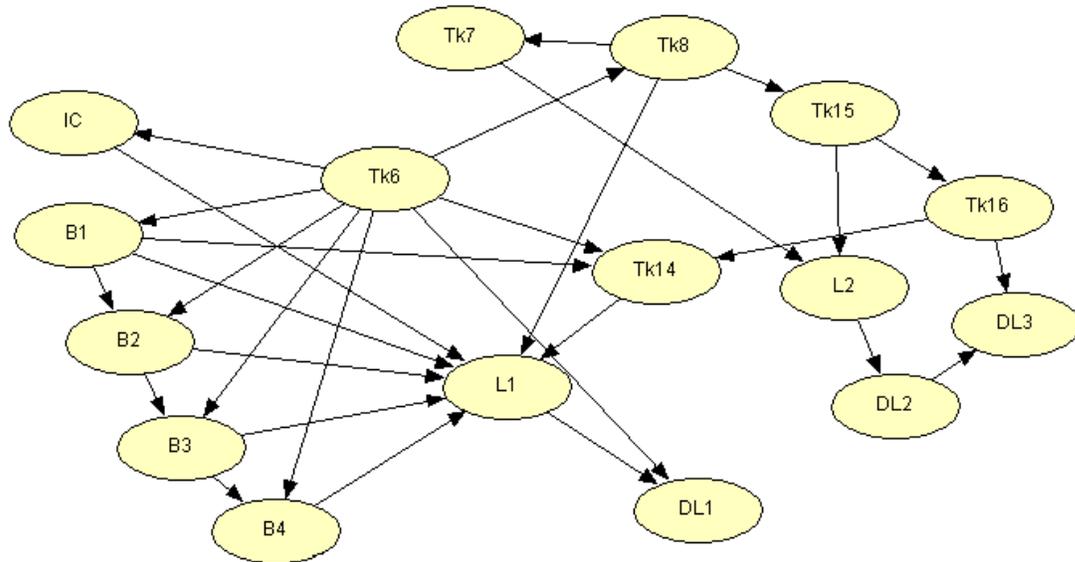
Distancia (m)	Equipos	Vulnerabilidad	Probabilidad de efecto dominó	Riesgo individual por sobrepresión	Riesgo individual por sobrepresión
50	Tanque 16	2,0327E-01	0,0981	1,9941E-02	1,9941E-02
100	Tanque 16	2,0327E-01	0,0981	1,9941E-02	1,9941E-02
150	Tanque 16	2,0327E-01	0,0981	1,9941E-02	3,9882E-02
	Tanque 8	2,0327E-01	0,0981	1,9941E-02	
200	Tanque 16	2,0327E-01	0,0981	1,9941E-02	3,9882E-02
	Tanque 8	2,0327E-01	0,0981	1,9941E-02	
250	Tanque 16	2,0327E-01	0,0981	1,9941E-02	9,9704E-02
	Tanque 8	2,0327E-01	0,0981	1,9941E-02	
	Tanque 6	2,0327E-01	0,0981	1,9941E-02	
	Bala 1	2,0327E-01	0,0981	1,9941E-02	
	Bala 2	2,0327E-01	0,0981	1,9941E-02	
300	Tanque 16	1,3948E-05	0,0981	1,3683E-06	2,8580E-02
	Tanque 8	2,0327E-01	0,0981	1,9941E-02	

	Tanque 6	4,1889E-04	0,0981	4,1093E-05	
	Bala 1	1,7849E-04	0,0981	1,7510E-05	
	Bala 2	4,8342E-04	0,0981	4,7424E-05	
	Bala 3	6,2097E-03	0,0981	6,0917E-04	
	Bala 4	8,0757E-02	0,0981	7,9223E-03	
400	Tanque 8	1,0724E-02	0,0981	1,0520E-03	1,0521E-03
	Tanque 6	4,7918E-07	0,0981	4,7008E-08	
500	Tanque 8	1,6597E-06	0,0981	1,6282E-07	1,6282E-07

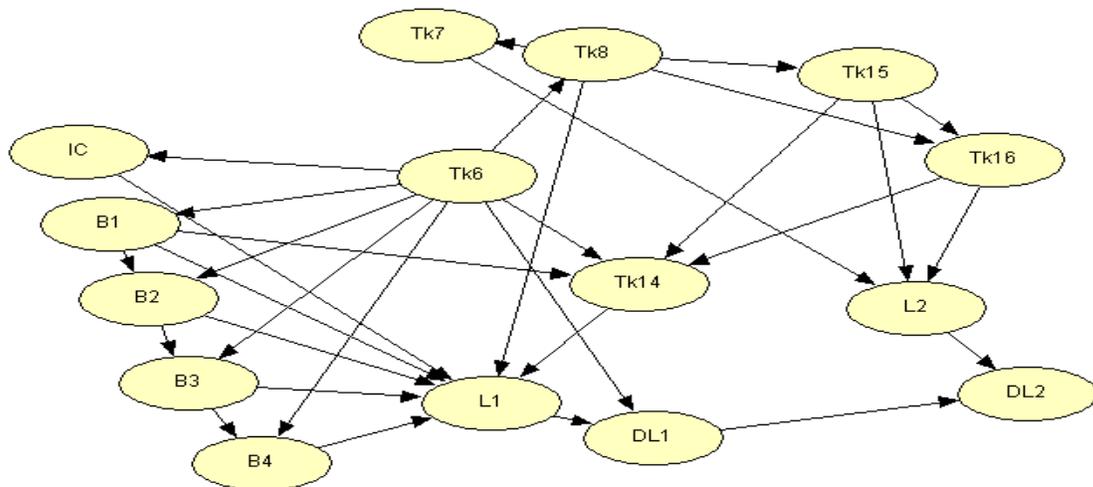
Distancia (m)	Vector	Riesgo individual por combinación	Riesgo individual por combinación
50	Radiación	9,81E-02	3,1604E-01
	Sobrepresión	1,99E-02	
	Toxicidad	1,98E-01	
100	Radiación	9,81E-02	3,1604E-01
	Sobrepresión	1,99E-02	
	Toxicidad	1,98E-01	
150	Radiación	9,81E-02	3,3600E-01
	Sobrepresión	3,99E-02	
	Toxicidad	1,98E-01	
200	Radiación	9,71E-02	3,3498E-01
	Sobrepresión	3,99E-02	
	Toxicidad	1,98E-01	
250	Radiación	8,23E-02	3,8100E-01
	Sobrepresión	9,97E-02	
	Toxicidad	1,99E-01	
300	Radiación	4,59E-02	2,7352E-01
	Sobrepresión	2,86E-02	
	Toxicidad	1,99E-01	
400	Radiación	3,85E-03	1,6790E-01
	Sobrepresión	1,05E-03	
	Toxicidad	1,63E-01	
500	Radiación	1,12E-04	1,5312E-02
	Sobrepresión	1,63E-07	
	Toxicidad	1,52E-02	

Anexo 21: Estructura de las redes Bayesianas elaboradas.

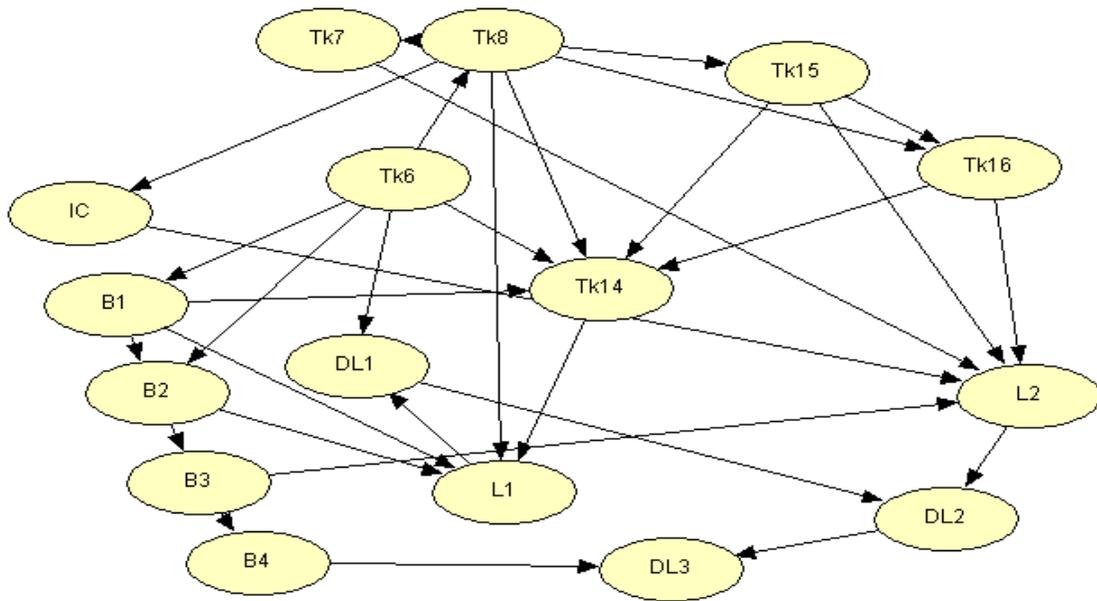
Red Bayesiana 1



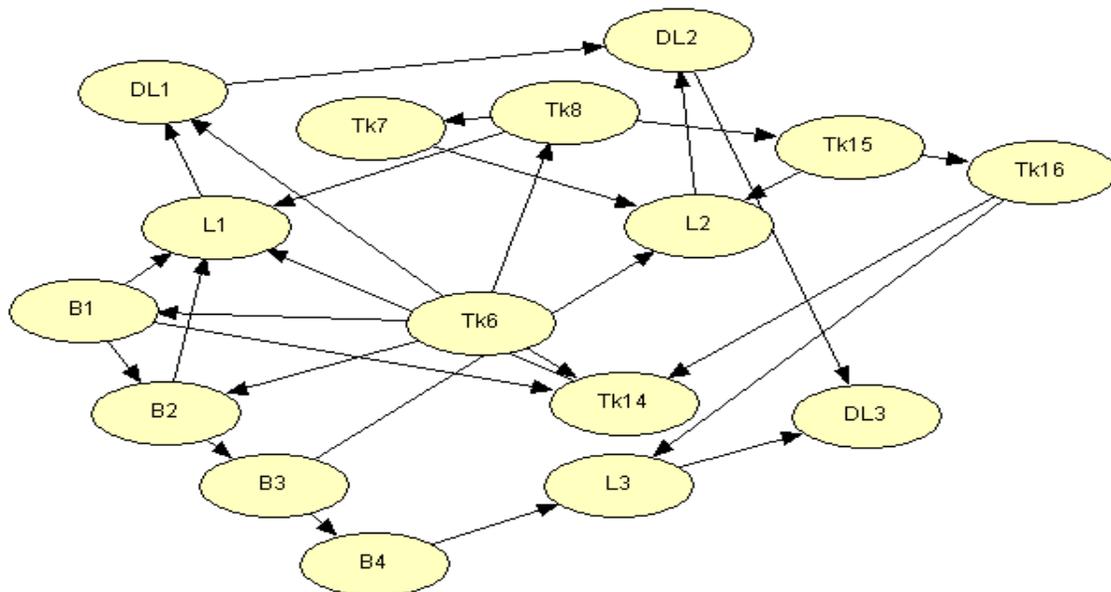
Red Bayesiana 2



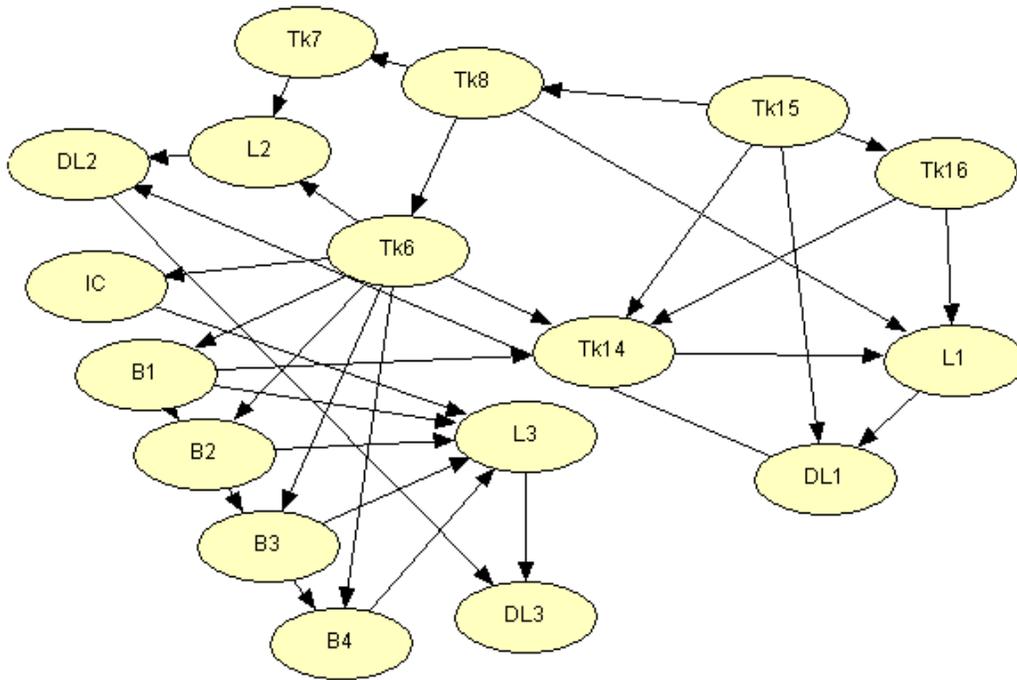
Red Bayesiana 3



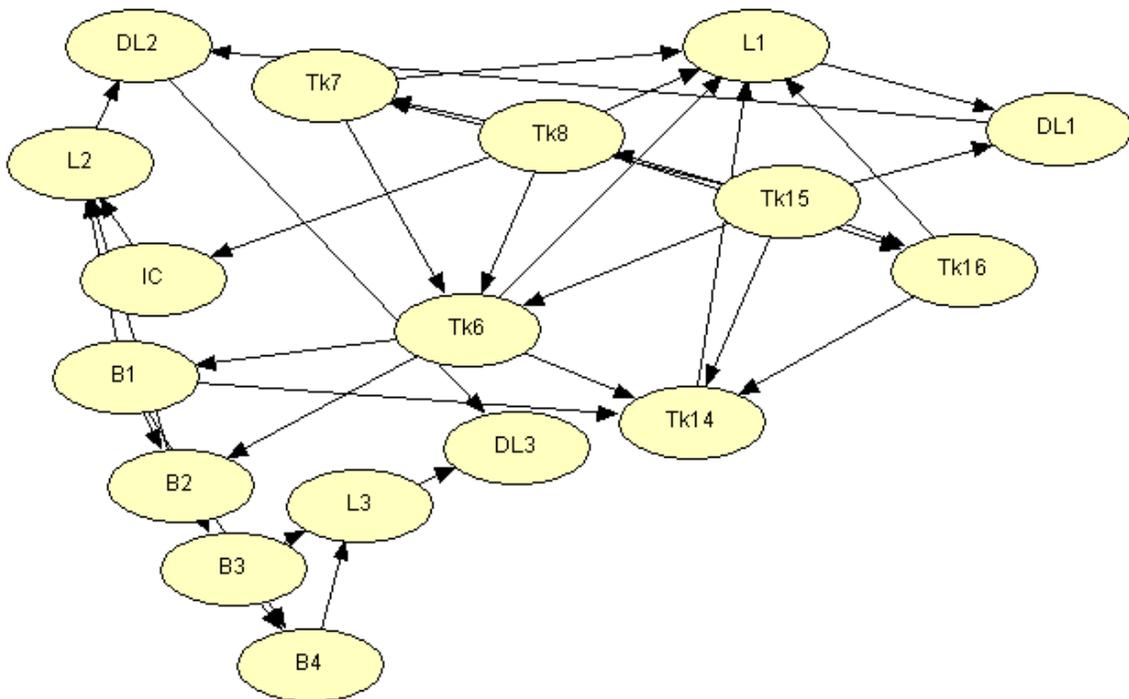
Red Bayesiana 4



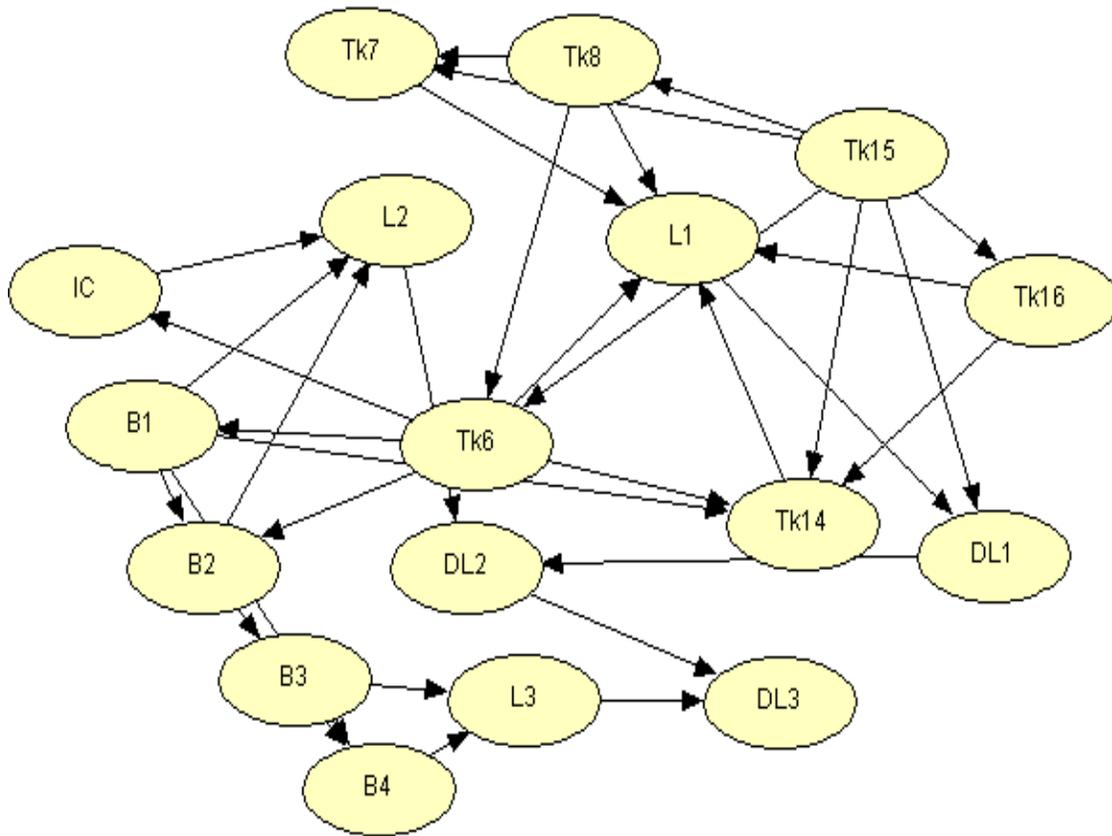
Red Bayesiana 5



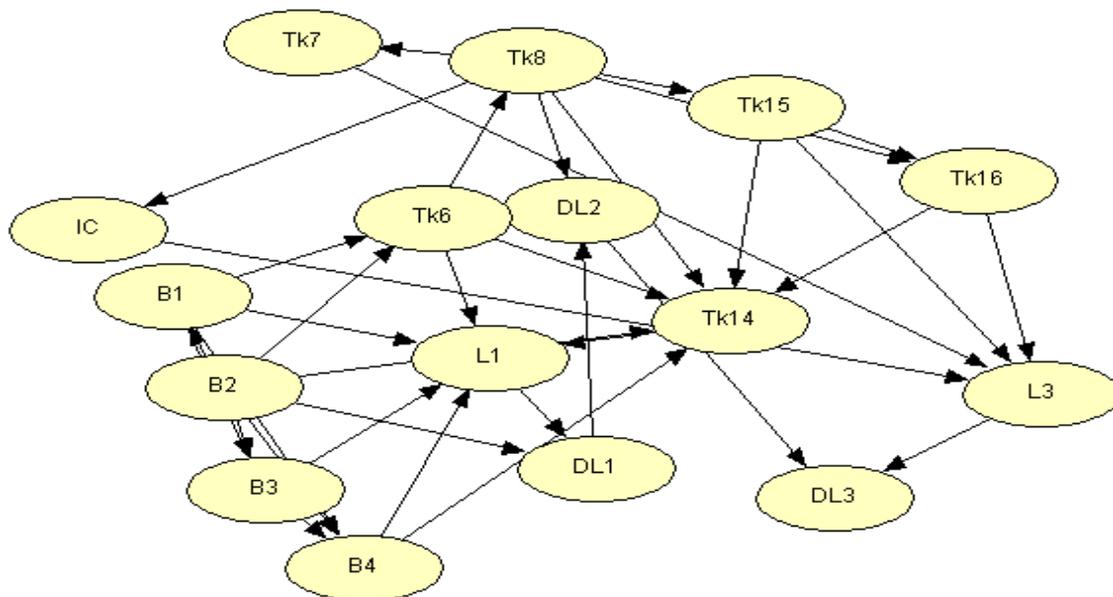
Red Bayesiana 7



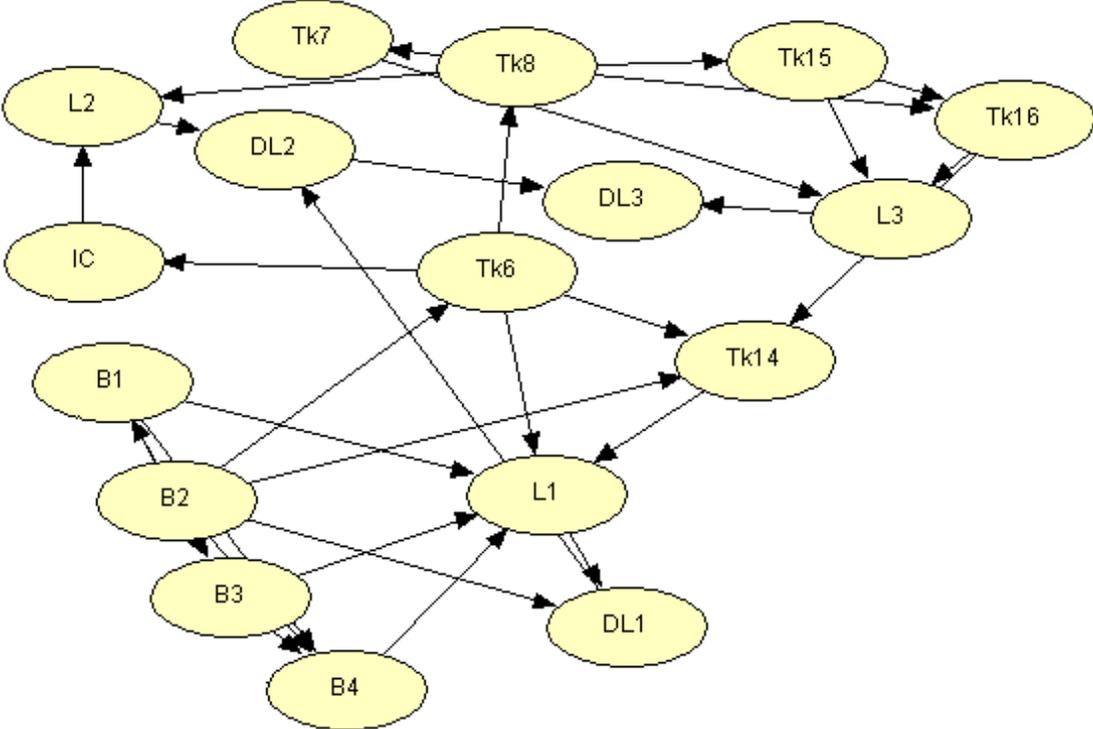
Red Bayesiana 8



Red Bayesiana 9



Red Bayesiana 10



Anexo 22: Resultados de las redes Bayesianas elaboradas.

Red Bayesiana 1

Unidad de Proceso	Primaria (%)	Secundarias (%)							Terciarias (%)		Cuaternaria (%)	L1 (%)	L2 (%)	DL1 (%)	DL2 (%)	DL3 (%)
	Tk 6	Tk 8	Tk 14	IC	B1	B2	B3	B4	Tk 7	Tk 15	Tk 16					
Probabilidad previa	12,5	8,30E-03	1,54	0,06	1,58E-03	1,47E-03	8,50E-04	4,79E-04	4,84E-03	4,16E-06	4,07E-06	1,6	4,84E-03	1,60	4,84E-03	4,07E-06
Accidente Tk 6	100	0,07	12,3	0,49	0,01	0,01	6,80E-03	3,83E-03	0,04	3,32E-05	3,25E-05	12,81	0,04	12,81	0,04	3,25E-05
Accidente TK 8	100	100	12,3	0,49	0,01	0,01	6,80E-03	3,83E-03	58,32	0,05	0,05	100	58,34	100	58,34	0,05
Accidente TK 14	100	0,07	100	0,49	0,01	0,01	6,80E-03	3,83E-03	0,04	3,32E-05	3,25E-05	100	0,04	100	0,04	3,25E-05
Accidente B1	100	0,07	12,3	0,49	100	53,59	28,72	15,16	0,04	3,32E-05	3,25E-05	100	0,04	100	0,04	3,25E-05
Accidente B2	100	0,07	12,3	0,49	57,42	100	53,59	28,29	0,04	3,32E-05	3,25E-05	100	0,04	100	0,04	3,25E-05
Accidente B3	100	0,07	12,3	0,49	53,25	92,74	100	52,79	0,04	3,32E-05	3,25E-05	100	0,04	100	0,04	3,25E-05
Accidente B4	100	0,07	12,3	0,49	49,87	86,85	93,64	100	0,04	3,32E-05	3,25E-05	100	0,04	100	0,04	3,25E-05
Accidente TK 7	100	100	12,3	0,49	0,01	0,01	6,80E-03	3,83E-03	100	0,05	0,05	100	100	100	100	0,05
Accidente TK 15	100	100	12,3	0,49	0,01	0,01	6,80E-03	3,83E-03	58,32	100	97,83	100	100	100	100	97,83
Accidente TK 16	100	100	12,3	0,49	0,01	0,01	6,80E-03	3,83E-03	58,32	100	100	100	100	100	100	100,00
Accidente IC	100	0,07	12,3	100	0,01	0,01	6,80E-03	3,83E-03	0,04	3,32E-05	3,25E-05	100	0,04	100	0,04	3,25E-05

Red Bayesiana 2

Unidad de Proceso	Primaria (%)	Secundarias (%)							Terciarias (%)			L1 (%)	L2 (%)	DL1 (%)	DL2 (%)
	Tk 6	IC	B1	B2	B3	B4	Tk 8	Tk 14	Tk 7	Tk 15	Tk 16				
Probabilidad previa	12,5	0,06	1,58E-03	1,47E-03	8,50E-04	4,79E-04	8,30E-03	1,55	8,15E-03	8,15E-03	8,29E-03	1,6	8,30E-03	1,6	8,30E-03
Accidente Tk 6	100	0,49	0,01	0,01	6,80E-03	3,83E-03	0,07	12,36	0,07	0,07	0,07	12,81	0,07	12,81	0,07
Accidente TK 8	100	0,49	0,01	0,01	6,80E-03	3,83E-03	100	99,97	98,3	98,3	99,97	100	100	100	100
Accidente TK 14	100	0,49	0,01	0,01	6,80E-03	3,83E-03	0,54	100	0,53	0,53	0,54	100	0,54	100	0,54
Accidente B1	100	0,49	100	53,59	28,72	15,16	0,07	12,36	0,07	0,07	0,07	100	0,07	100	0,07
Accidente B2	100	0,49	57,42	100	53,59	28,29	0,07	12,36	0,07	0,07	0,07	100	0,07	100	0,07
Accidente B3	100	0,49	53,25	92,74	100	52,79	0,07	12,36	0,07	0,07	0,07	100	0,07	100	0,07
Accidente B4	100	0,49	49,87	86,85	93,64	100	0,07	12,36	0,07	0,07	0,07	100	0,07	100	0,07
Accidente TK 7	100	0,49	0,01	0,01	6,80E-03	3,83E-03	100	99,97	100	98,3	99,97	100	100	100	100
Accidente TK 15	100	0,49	0,01	0,01	6,80E-03	3,83E-03	100	100	98,3	100	100	100	100	100	100
Accidente TK 16	100	0,49	0,01	0,01	6,80E-03	3,83E-03	100	100	98,3	98,33	100	100	100	100	100
Accidente IC	100	100	0,01	0,01	6,80E-03	3,83E-03	0,07	12,36	0,07	0,07	0,07	100	0,07	100	0,07

Red Bayesiana 3

Unidad de Proceso	Primaria	Secundarias (%)				Terciarias (%)					Cuaternaria	L1 (%)	L2 (%)	DL1 (%)	DL2 (%)	DL3(%)
	Tk 6	Tk 14	B1	B2	Tk 8	Tk 7	Tk 15	Tk 16	IC	B3	B4					
Probabilidad previa	4,5	4,25E-06	2,38	1,27	2,39E-06	2,35E-06	2,35E-06	2,39E-06	1,27E-12	0,68	0,36	2,38	0,68	2,38	0,68	0,36
Accidente Tk 6	100	9,43E-03	52,79	28,29	5,30E-05	5,21E-05	5,21E-05	5,30E-05	2,81E-11	15,16	8	52,79	15,16	52,79	15,16	8
Accidente TK 14	100	100	53,69	28,77	0,56	0,55	0,55	0,56	2,98E-07	15,42	8,14	100	15,89	100	15,89	8,14
Accidente B1	100	9,59E-03	100	53,59	5,30E-05	5,21E-05	5,21E-05	5,30E-05	2,81E-11	28,71	15,16	100	28,71	100	28,71	15,16
Accidente B2	100	9,59E-03	100	100	5,30E-05	5,21E-05	5,21E-05	5,30E-05	2,81E-11	53,59	28,29	100	53,59	100	53,59	28,29
Accidente B3	100	9,59E-03	100	100	5,30E-05	5,21E-05	5,21E-05	5,30E-05	2,81E-11	100	52,79	100	100	100	100	52,79
Accidente B4	100	9,59E-03	100	100	5,30E-05	5,21E-05	5,21E-05	5,30E-05	2,81E-11	100	100	100	100	100	100	100
Accidente Tk15	100	100	52,79	28,29	100	98,3	100	100	5,30E-05	15,16	8	100	100	100	100	8
Accidente TK 16	100	100	52,79	28,29	100	98,3	98,33	100	5,30E-05	15,16	8	100	100	100	100	8
Accidente TK 8	100	100	52,79	28,29	100	98,3	98,3	99,97	5,30E-05	15,16	8	100	100	100	100	8
Accidente TK 7	100	100	52,79	28,29	100	100	98,3	99,97	5,30E-05	15,16	8	100	100	100	100	8
Accidente IC	100	100	52,79	28,29	100	98,3	98,3	99,97	100	15,16	8	100	100	100	100	8

Red Bayesiana 9

Unidad de Proceso	Primaria (%)	Secundarias (%)					Terciaria (%)	Cuaternarias (%)				L1 (%)	L3 (%)	DL1 (%)	DL2 (%)	DL3 (%)
	B2	Tk 6	Tk 14	B1	B3	B4	Tk 8	Tk 7	IC	Tk 15	Tk 16					
Probabilidad previa	2,25	4,28E-03	6,40E-06	1,21	1,77	2,03	2,27E-09	2,23E-09	1,21E-15	2,23E-09	2,27E-09	2,03	2,27E-09	2,03	2,27E-09	2,27E-09
Accidente B2	100	0,19	2,85E-04	53,59	78,46	90	1,01E-07	9,93E-08	5,36E-14	9,93E-08	1,01E-07	90,01	1,01E-07	90,01	1,01E-07	1,01E-07
Accidente TK 6	100	100	9,53E-03	85,94	93,47	96,97	5,30E-05	5,21E-05	2,81E-11	5,21E-05	5,30E-05	100	5,30E-05	100	5,30E-05	5,30E-05
Accidente TK 14	100	6,38	100	57,16	81,69	93,07	0,04	0,03	1,88E-08	0,03	0,04	100	0,04	100	0,04	0,04
Accidente B1	100	0,31	3,04E-04	100	100	100	1,62E-07	1,59E-07	8,59E-14	1,59E-07	1,62E-07	100	1,62E-07	100	1,62E-07	1,62E-07
Accidente B3	100	0,23	2,96E-04	68,3	100	100	1,20E-07	1,18E-07	6,38E-14	1,18E-07	1,20E-07	100	1,20E-07	100	1,20E-07	1,20E-07
Accidente B4	100	0,21	2,94E-04	59,54	87,17	100	1,09E-07	1,07E-07	5,77E-14	1,07E-07	1,09E-07	100	1,09E-07	100	1,09E-07	1,09E-07
Accidente Tk 8	100	100	100	85,94	93,47	96,97	100	98,3	5,30E-05	98,3	99,97	100	100	100	100	100
Accidente TK 7	100	100	100	85,94	93,47	96,97	100	100	5,30E-05	98,3	99,97	100	100	100	100	100
Accidente IC	100	100	100	85,94	93,47	96,97	100	98,3	100	98,3	99,97	100	100	100	100	100
Accidente Tk 15	100	100	100	85,94	93,47	96,97	100	98,3	5,30E-05	100	100	100	100	100	100	100
Accidente Tk 16	100	100	100	85,94	93,47	96,97	100	98,3	5,30E-05	98,33	100	100	100	100	100	100

Anexo 23: Clave para evaluar los resultados de los cuestionarios.

RP1- 100 puntos

- 1- marcar todos (son 7)- 2ptos c/u- 14 ptos
- 2- b 4 ptos
- 3- a 4 ptos
- 4- c 4 ptos
- 5- b 4 ptos
- 6- a 6 ptos
- 7- a 6 ptos
- 8- b 6 ptos
- 9- a sí, b no, c no 12 ptos
- 10-e 10 ptos (si marca d 6ptos, c 2ptos, b 1pto)
- 11-e 10 ptos (si marca d 6ptos, c 2ptos, b 1pto)
- 12-d 10 ptos (si marca e 8 ptos, c 6 ptos, b 1 pto)
- 13-e 10 ptos (si marca d 6ptos, c 2ptos, b 1pto)

RP2- 100 puntos

- 14-a sí, b sí, c no- 20 ptos (8-8-4)
- 15-d- 20 ptos (si marca e 16 ptos, c 12 ptos, b 2 ptos)
- 16-d- 20 ptos (si marca e 16 ptos, c 12 ptos, b 2 ptos)
- 17-e- 20 ptos (si marca d 12 ptos, c 6 ptos, b 2ptos)
- 18-e- 20 ptos (si marca d 12 ptos, c 6 ptos, b 2ptos)

RP3- 100 puntos

- 19-b- 10 ptos
- 20-a sí, b no, c sí, d sí- 20 ptos (5 c/u)
- 21-a sí, b sí, c sí- 18 ptos (6 c/u)
- 22-d- 26 ptos (si marca e 20 ptos, c 10 ptos, b 3ptos)
- 23-e- 26 ptos (si marca d 16 ptos, c 8 ptos, b 2ptos)

El 24 es solo para saber cómo se ve el trabajador a sí mismo en cuanto a su percepción de riesgos y analizar si se sobrestima o subestima.